

อิทธิพลของสารหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม  
เกรด 7075 ต่อสมบัติทางกล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2565

INFLUENCE OF COOLING MEDIA IN FRICTION STIR WELDING ON  
MECHANICAL PROPERTIES OF AL7075



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 2022

อิทธิพลของสารหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม

เกรต 7075 ต่อสมบัติทางกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

ประธานกรรมการ

สุรเดช ตัญตริยรัตน์

(ผศ. ดร.สุรเดช ตัญตริยรัตน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(ผศ. ดร.วรรณวิษ ทุ่งสุด)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ไพศาล แซ่ยั้ง : อิทธิพลของสารหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ต่อสมบัติทางกล (INFLUENCE OF COOLING MEDIA IN FRICTION STIR WELDING ON MECHANICAL PROPERTIES OF AL7075)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเดช ตัญญูรัตน์, 85 หน้า.

คำสำคัญ : อะลูมิเนียม 7075, การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, น้ำมันตัดกลึง, ไครโอเจนิคส์

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม หนึ่งในกระบวนการที่ใช้มากที่สุด คือ การเชื่อม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนยานยนต์และอากาศยาน เป็นที่รู้กันดีว่า อุตสาหกรรมเหล่านี้มีอัตราการใช้อะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นในทุกปี เพราะอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และยังมีอัตราการยึดตัวที่ดีอีกด้วย หนึ่งในอะลูมิเนียมที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม 7075 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการใช้งานโครงสร้างที่มีความเครียดสูง และมีการใช้อย่างกว้างขวางในชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบิน แต่ในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายกลับให้ความแข็งแรงไม่สูงพอสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมเกรดนี้ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการเชื่อมแบบโซลิดสเตตที่เชื่อมชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยไม่ทำให้วัสดุของชิ้นงานหลอมละลาย ความร้อนเกิดจากการเสียดสีระหว่างบ่าของเครื่องมือกวนและวัสดุชิ้นงาน หัวกวนจะทำหน้าที่กวนโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตาม ในโซนของ Thermo Mechanical Affect Zone (TMAZ) และ Heat Affect Zone (HAZ) ยังเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด เพราะฉะนั้นในการดำเนินงานในครั้งนี้นี้จึงมุ่งที่จะปรับปรุงเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์แบบมากขึ้น โดยการหล่อเย็นในระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) ร่วมกับพารามิเตอร์ของความเร็วในการเชื่อม และขนาดบ่าที่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า การหล่อเย็นและขนาดของบ่ากวนส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) สามารถทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

PAISAN SAEYANG : INFLUENCE OF COOLING MEDIA IN FRICTION STIR WELDING  
ON MECHANICAL PROPERTIES OF AL7075. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. DR.  
SURADET TANTRAIRATN

Keyword : AL7075, FRICTION STIR WELDING, CUTTING FLUID, CRYOGENIC.

Regarding various part manufacturing in industrial scale, one of the most popular processes was welding, especially in automotive and aircraft industries. It was well known that these industries have an increasing rate of aluminum consumption every year. There was due to aluminum has many outstanding properties such as light weight, high strength to weight ratio and very good elongation. One of the most popular aluminum alloys was AL7075, which was suitable for highly stressed structural applications in aircraft structural parts. However, fusion welding techniques were usually yielded poorer strength for such grade of aluminum compared to base material. Friction stir welding is a solid-state welding technique that joins two workpieces without melting the workpiece material. Heat was generated by friction between the shoulder of the stirring tool and the workpiece. The probe was to stir and mix two metals parts together. However, the Thermo Mechanical Affect Zone (TMAZ) and Heat Affect Zone (HAZ) were reported as the weakest area of welded parts. Therefore, this study was aimed to improve the joints by cooling processes during welding using Cutting fluid and cryogenic cooling with different parameters such as welding speed and shoulder size. At the significance level of 0.05, it was found that cooling and the size of the shoulder were a significant parameters on the tensile strength. Cutting fluid cooling was found to yield remarkable increase of tensile strength.

School of Manufacturing Engineering  
Academic Year 2022

Student's Signature.....*Tanna*.....  
Advisor's Signature.....*Suradet Tantrairatn*.....  
Co-advisor's Signature.....*mu*.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จได้ดีเนื่องจากความร่วมมือและความอนุเคราะห์ของหลายบุคคลที่เข้าร่วมในกระบวนการวิจัยนี้ หลายคนที่มีส่วนร่วมได้แก่ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาร่วมสาขาวิชาเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและชี้แนะทางวิชาการ นอกจากนี้ยังมีการสนับสนุนด้านวัสดุการทำวิจัยและเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยที่ได้รับการแนะนำ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบิดา มารดา และญาติสนิทมิตรสหายทุกคนที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกการตัดสินใจ โดยผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้อ่านที่สนใจในการนำเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมาประยุกต์ใช้ในเชิงวิศวกรรม และผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้จะสามารถประสบความสำเร็จตามที่คาดหวังไว้ในการทำวิจัยทุกด้าน

ไพศาล แซ่ยัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
<b>บทที่ 2</b> .....	<b>5</b>
2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	5
2.1.1 มุมเอียงของเครื่องมือกวน.....	6
2.1.2 ลักษณะของหัวกวน.....	6
2.1.3 ความเร็วหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อม .....	7
2.1.4 การหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	7
2.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน .....	12
2.2.1 เครื่องมือกวน.....	13
2.2.2 ความเร็วในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม .....	14
2.2.3 การเอียงเครื่องมือและระยะกดลึงของป๋า .....	14
2.3 อะลูมิเนียมผสม .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

2.3.1	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (1xxx) .....	16
2.3.2	อะลูมิเนียมผสมทองแดง Al-Cu (2xxx) .....	16
2.3.3	อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส Al-Mn (3xxx) .....	16
2.3.4	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน Al-Si (4xxx).....	16
2.3.5	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม Al- Mg (5xxx) .....	16
2.3.6	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมกับซิลิกอน Al- MgSi (6xxx) .....	17
2.3.7	อะลูมิเนียมผสมสังกะสี Al- Zn (7xxx).....	17
2.3.8	อะลูมิเนียมผสมธาตุอื่น Al- Miscellaneous (8xxx) .....	18
2.4	การทดสอบคุณสมบัติทางกล .....	18
2.4.1	ความแข็ง (Hardness).....	18
2.4.2	การทดสอบแรงดึง (Tensile testing).....	20
2.5	การออกแบบการทดลอง.....	24
2.5.1	ประเภทของการออกแบบการทดลอง (Type of experimental designs). 26	
2.6	กระบวนการหล่อเย็น.....	28
2.6.1	น้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid).....	28
2.6.2	ไครโอเจนิคส์ (Cryogenic).....	29
2.7	การตรวจสอบทางโลหะวิทยา .....	30
2.7.1	การศึกษาโครงสร้างของโลหะของภาพถ่าย (Metallographic) .....	30
<b>บทที่ 3</b>	.....	<b>32</b>
3.1	การเตรียมวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	32
3.2	การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด หล่อเย็น และวัดอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....	34
3.3	การออกแบบการทดลอง.....	39
3.4	ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลอง.....	40
3.5	การตรวจสอบคุณสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา .....	41
3.6	การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	44



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 .....	45
4.1 ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน .....	45
4.2 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะพื้นผิวของแนวเชื่อม .....	48
4.2.1 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดบ่ากวน 9 มม. ....	48
4.2.2 พื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดบ่ากวน 12 มม. ....	49
4.2.3 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดบ่ากวน 15 มม. ....	50
4.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึง .....	51
4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) .....	54
4.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง .....	55
4.3.3 ความยืดหยุ่นของแนวเชื่อม .....	58
4.4 ความแข็งของแนวเชื่อม .....	59
4.5 ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อม .....	61
4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม .....	63
4.7 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	67
บทที่ 5 .....	71
5.1 สรุปผลวิจัย .....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	72
รายการอ้างอิง .....	73
ภาคผนวก .....	78
ประวัติผู้เขียน .....	85

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินงาน	3
2.1	การปรับพารามิเตอร์ในส่วนของคุณสมบัติของหัวกวนและมุมเอียงของ เครื่องมือ กวน	9
2.2	การปรับพารามิเตอร์ในส่วนของคุณสมบัติของความเร็วหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อม	10
2.3	การปรับพารามิเตอร์ในส่วนของคุณสมบัติของการหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	11
2.4	วัสดุเครื่องมือและวัสดุที่ทำการเชื่อมที่เหมาะสม	14
2.5	ตารางการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูป (8 กลุ่มใหญ่)	15
2.6	สมบัติจำเพาะของ HIKUT W10	29
3.1	ผลการตรวจระยะการเคลื่อนที่ X Y Z	38
3.2	การออกแบบการทดลอง	39
4.1	ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดปากกวน 9 มม.	49
4.2	ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดปากกวน 12 มม.	50
4.3	ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดปากกวน 15 มม.	51
4.4	ปัจจัยในการทดลอง	52
4.5	ค่าความแข็งแรงดึง	53
4.6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง	55
4.7	ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดปาก 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	61
4.8	ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดปาก 12 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	62
4.9	ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดปาก 15 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	62
4.10	เปอร์เซ็นต์ธาตุของแต่ละสเปกตรัม	68
4.11	การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis	69

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	12
2.2	แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียมผสมสังกะสี	18
2.3	หัวกดวิกเกอร์	19
2.4	ลักษณะรอยกดของหัวกดวิกเกอร์	20
2.5	ขั้นตอนทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8	20
2.6	เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Curve) รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดสอบแรงดึง	22
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	24
2.8	ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ	25
2.9	โครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ 3 <sup>2</sup>	28
2.10	โครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ 3 <sup>3</sup>	28
2.11	โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน	30
2.12	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน	31
3.1	ตัดขอยวัสดุด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน	33
3.2	ชิ้นงานที่ผ่านการกัดปาดหน้าด้วยเครื่อง CNC Milling	33
3.3	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)	33
3.4	หัวกวน	34
3.5	การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดบนเครื่องกัด	35
3.6	เครื่องวัดคุณภาพน้ำยาหล่อเย็น	35
3.7	การติดตั้งระบบหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง	36
3.8	ระบบการหล่อเย็นแบบโครโอเจนิคส์	36
3.9	การติดตั้งระบบหล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน	37
3.11	ตรวจสอบความเร็วหมุนกวน	38
3.12	การตัดชิ้นทดสอบแรงดึง	41
3.13	ชิ้นงานทดสอบความแข็ง	42
3.14	เครื่องทดสอบความแข็ง	42
3.15	บริเวณที่ทดสอบความแข็ง	43
3.16	กล้องจุลทรรศน์ Leica M205FCA	43
3.17	กล้องจุลทรรศน์ ZEISS Axioscope 5 FL	
4.1	ภาพความร้อนของชิ้นงานเชื่อมความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. ไม่หล่อเย็น	46
4.2	กราฟแสดงค่าความร้อนของขนาดปากกวน 9 มม.และความเร็วเดินเชื่อม 40 มม./นาที	46
4.3	กราฟแสดงค่าความร้อนของขนาดปากกวน 12 มม.และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	47
4.4	กราฟแสดงค่าความร้อนของขนาดปากกวน 15 มม.และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	47
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงและระยะยึดของชิ้นงานเชื่อมด้วย ขนาดปากกวน 9 มม. และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	53
4.6	กราฟแสดงผลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง	54
4.7	ผลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ	54
4.8	กราฟพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง	56
4.9	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบหลักต่อความแข็งแรงดึง	57
4.1	แผนภาพอิทธิพลของปัจจัยร่วม ในการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม	57
4.11	กราฟแสดงผลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของแนวเชื่อม	58
4.12	ค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดปาก 9 มม. ความเร็วเชื่อม 40 มม./นาที	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	ค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเชื่อม 60 มม./นาที	60
4.14	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075	63
4.15	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ไม่มีการหล่อเย็น	64
4.16	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที หล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง	65
4.17	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์	66
4.18	ภาพโครงสร้างจุลภาคจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ไม่มีการหล่อเย็น	67
4.19	จุดวิเคราะห์ธาตุของภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เนื่องด้วยในปัจจุบันอะลูมิเนียมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติที่โดดเด่นในหลายๆ ประการ เช่น คงทนต่อการแตกหัก ทนต่อการกัดกร่อน อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และนำความร้อนได้ดีกว่าเหล็กถึงสามเท่า[1] ซึ่งในกระบวนการการผลิตจำเป็นต้องมีการประกอบหรือการต่อเติมวัสดุเข้าด้วยกัน การประกอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ การประกอบแบบชั่วคราวและการประกอบแบบถาวร การประกอบแบบถาวรโดยวิธีการเชื่อมเป็นหนึ่งในวิธีการประกอบแบบถาวรที่ได้รับความนิยมมาก แต่อะลูมิเนียมก็ไม่สามารถเชื่อมแบบหลอมละลายให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์แบบได้ทุกเกรด เช่น Al2XXX และ Al7XXX เนื่องจากอะลูมิเนียมตั้งกล่าวไวต่อการแตกร้าร้อนในระหว่างการแข็งตัว[2] รอยร้าจากการแข็งตัวของโลหะเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ในส่วนของผิวชั้นหรือการแตกร้าของของเหลวนั้นสามารถเกิดขึ้นในเขตหลอมเหลวบางส่วนระหว่างการแข็งตัวของโลหะเหลว การเชื่อมแบบหลอมละลายมีอุณหภูมิที่สูงจนทำให้เกิดการไหลตัวของอะลูมิเนียมที่ไม่สม่ำเสมอ จึงก่อให้เกิดจุดบกพร่องและยังส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมอีกด้วย

มากกว่า 20 ปี ของการพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) ที่กลายเป็นเทคโนโลยีการเชื่อมและการผลิตที่สำคัญ[3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมด้านอวกาศ และยานยนต์ที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นเป็นกระบวนการเชื่อมแบบโซลิดสเตตหรือการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่เชื่อมชิ้นงานที่หันเข้าหากันสองชิ้น โดยที่ไม่ทำให้วัสดุของชิ้นงานหลอมละลาย ความร้อนเกิดจากการเสียดสีระหว่างบ่าของเครื่องมือกวน และวัสดุชิ้นงาน ซึ่งทำให้บริเวณที่ใกล้กับเครื่องมือกวน เกิดการอ่อนตัวลง ในขณะที่เครื่องมือกวนเคลื่อนที่ไปตามแนวรอยต่อของชิ้นงาน หัวกวนจะทำหน้าที่กวนผสมวัสดุทั้งสองชิ้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีขนาดของเกรนที่เล็กละเอียดจึงส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูง

อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม ลักษณะของเครื่องมือกวน เป็นต้น ซึ่งในแนวเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนประกอบไปด้วย พื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ) และพื้นที่กระทบร้อน

(Heat Affect Zone ; HAZ) โดยแต่ละพื้นที่มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณของความร้อนและการกวน ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และเกิดเกรนที่ต่างกัน จึงส่งผลให้แต่ละพื้นที่มีความแข็งแรงที่แตกต่างกันไป พื้นที่ที่กระทบร้อนเป็นบริเวณที่อ่อนแอที่สุดของแนวเชื่อม เนื่องจากกระบวนการทำให้ร้อนตัว ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณนี้เกิดการขยายตัวของเกรนที่หยาบ ส่งผลให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่ำกว่าวัสดุเดิม ถึงแม้จะปรับค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ค่าความแข็งแรงของรอยดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ) ยังเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด จากงานวิจัยพบว่าการเชื่อมแบบกวนแรงเสียดทานใต้น้ำของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al7075 ซึ่งผลจากการทดลองพบว่ากระบวนการระบายความร้อนด้วยน้ำช่วยลดความกว้างของแนวเชื่อม HAZ เมื่อเทียบกับกระบวนการระบายความร้อนด้วยอากาศ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความกว้างของพื้นที่ที่กระทบร้อน[4] การศึกษาการตรวจสอบเชิงทดลองและเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการเชื่อมแบบกวนด้วยแรงเสียดทานใต้น้ำของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด AA2519 -T87 พบว่าการไล่ระดับความร้อนตามแกนขวางและตามยาวของรอยเชื่อมถูกควบคุมโดยการระบายความร้อนด้วยน้ำจึงทำให้พื้นที่ที่กระทบร้อนทางกลและพื้นที่ที่กระทบร้อนมีขนาดของเกรนที่เล็กลงอย่างเห็นได้ชัดจึงส่งผลให้สมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้น[5]

ดังนั้นผู้ดำเนินวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสม เกรด 7075 ต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค โดยใช้เทคนิคการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ ขนาดบ่าของเครื่องมือ ความเร็วในการเดินเชื่อม และสารหล่อเย็น โดยใช้รูปแบบการเชื่อมพื้นฐานแบบต่อชน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในรูปแบบที่แตกต่างกันในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่เปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมที่มีวิธีการหล่อเย็นต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้อะลูมิเนียมผสม 7075 ขนาด 100x50x4 มม.
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือกวนเป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน เกรด SKD11
- 1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกล คือ ทดสอบความแข็ง และความแข็งแรงดึง
- 1.3.4 ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา
- 1.3.5 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

## 1.3.5.1 ปัจจัยแปรผัน

- 1) ความเร็วเดิมเชื่อม
- 2) ขนาดบ่ากวน 9, 12 และ 15 มม.
- 3) การหล่อเย็น ได้แก่ หล่อเย็นในอุณหภูมิห้อง น้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และไครโอเจนิคส์ (Cryogenic)

## 1.3.5.2 ปัจจัยควบคุม

- 1) ขนาดหัวกวน 3 มม.
- 2) มุมเอียง 3°
- 3) ระยะกดลึกลับงาน 0.1 มม.

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบอิทธิพลของวิธีการหล่อเย็นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

1.4.2 ทราบถึงความแตกต่างของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมที่ในแต่ละวิธีการของการหล่อเย็น

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนิน

กิจกรรม / ขั้นตอนการ ดำเนินการ	เดือนที่														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัย ปริทรรศน์วรรณกรรมที่ เกี่ยวข้อง	■	■	■	■	■										
2. ศึกษาและออกแบบ อุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงาน และระบบของการหล่อเย็น	■	■	■	■	■										
3. จัดเตรียมชิ้นงานทดลอง และอุปกรณ์				■	■	■									
4. ทดลองเชื่อมเบื้องต้น เพื่อหาความเป็นไปได้ของ พารามิเตอร์					■	■	■	■							



ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนิน (ต่อ)

กิจกรรม / ขั้นตอนการ ดำเนินการ	เดือนที่														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5. ดำเนินการทดลองเชื่อมต่อ ตามการออกแบบการ ทดลอง															
6. ทดสอบสมบัติทางกล ศึกษาดูโครงสร้าง															
7. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อหาผลกระทบที่ส่งผลต่อ สมบัติทางกล															
8. นำเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่สุดมาเชื่อมต่อ เพื่อทดลอง สำหรับยืนยันผล															
9. สรุปและอภิปรายผล ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิ ของการหล่อเชื่อมต่อ โครงสร้างและสมบัติทางกล															

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม

อะลูมิเนียมเกรด 7XXX ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในส่วนประกอบโครงสร้าง (เฟรม เครื่องบิน สิ้นค้ากีฬา และสะพานที่เคลื่อนย้ายได้) ระบบการขนส่งทางรถไฟ อุปกรณ์ป้องกัน และอากาศยานยนต์ เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่น เช่น อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ดีเยี่ยม ความแข็งแรงสูงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการแปรรูปหรือในกระบวนการการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม หนึ่งในกระบวนการที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือ การเชื่อม ซึ่งในปัจจุบันนิยมที่จะเชื่อมประสานอะลูมิเนียมโดยอาศัยการเชื่อมแบบหลอมละลาย ซึ่งในกระบวนการเชื่อมแบบดังกล่าวใช้อุณหภูมิที่สูง[6] แต่อะลูมิเนียมนั้นก็ไม่สามารถที่จะเชื่อมแบบหลอมละลายได้ทุกเกรด เช่น Al2XXX, Al7XXX เนื่องจากเมื่ออะลูมิเนียมดังกล่าว เมื่อถูกความร้อนที่สูงเกินไปทำให้โครงสร้างเกิดการไหลตัวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงก่อให้เกิดการแตกร้าวและเกิดจุดบกพร่องหรือตำหนิ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ความแข็งแรงของแนวเชื่อมนั้นมาจากโครงสร้างที่มีเม็ดเกรนที่ละเอียด ในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายทำให้ขนาดเกรนที่เกิดขึ้นใหม่นั้นมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่และการควบคุมขนาดของเกรนนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ในทางตรงกันข้ามในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมมากกว่าเทคนิคการเชื่อมอื่น ๆ เนื่องจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมต่อแบบโซลิตสเตตที่ใช้เครื่องมือที่ไม่สั่นเปลืองในการเชื่อมชิ้นงานสองชิ้นที่หันหน้าเข้าหากัน โดยไม่ทำให้วัสดุชิ้นงานหลอมละลาย[7] ความร้อนเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือหมุนกวนและวัสดุชิ้นงาน ซึ่งทำให้เกิดพื้นที่อ่อนตัวใกล้กับเครื่องมือกวน ในขณะที่เครื่องมือกวนเคลื่อนที่ไปตามแนวรอยต่อ เครื่องมือจะกวนผสมวัสดุทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยอัตโนมัติ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สามารถทำงานอัตโนมัติสำหรับการผลิต และสามารถออกแบบพิกซ์เจอร์ที่ควบคุมอัตราการทำความเย็นได้อย่างง่าย ลักษณะทั้งหมดเหล่านี้ทำให้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนง่ายขึ้นและถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถควบคุมได้จากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม เช่น ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม ขนาดบ่าของเครื่องมือกวน และลักษณะของหัวกวน เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อม จึงแบ่งออกได้ดังนี้

### 2.1.1 มุมเอียงของเครื่องมือกวน

มุมเอียงของเครื่องมือกวนนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญไม่น้อยไปกว่าปัจจัยอื่น ๆ ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งจากงานวิจัยของ Majid และคณะ[8] ที่ได้ทำการเชื่อมที่มุมเอียงของหัวกวน 1 2 และ 3 องศา พบว่า ความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดเกิดที่มุมเอียง 2 องศา เท่ากับ 71 MPa และ 75% ของวัสดุฐานส่วนเส้นการแตกหักของมุมเอียงเท่ากับ 1 องศา อยู่ที่พื้นที่กวน (NZ) ที่มุมเอียง 2 และ 3 องศาแตกหักที่พื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) เช่นเดียวกับกับ M. Shunmugasundaram และคณะ[9] ที่ทำการศึกษานาคนวมุมเอียงของหัวกวนที่ 1, 1.5 และ 2 องศา พร้อมกับปัจจัยของความเร็วการเดินเชื่อมและความเร็วรอบที่ต่างกัน พบว่าความเร็วในการหมุนของเครื่องมือคือ 850 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อมคือ 20 มม./นาที และมุมเอียง 2 องศา เป็นพารามิเตอร์กระบวนการอิสระที่ปรับให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงสุดในขณะเดียวกัน C. RAJENDRAN และคณะ[10] ที่ศึกษาอิทธิของการเอียงมุมของหัวกวนที่ 1 2 3 และ 4 องศา ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ AA2014-T6 และได้สรุปว่า มุมเอียง 1 2 3 องศา สามารถให้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์แบบ

### 2.1.2 ลักษณะของหัวกวน

รูปทรงลักษณะต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม เช่นเดียวกัน ซึ่งที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่าน พยายามปรับพารามิเตอร์ในส่วนนี้เช่นเดียวกัน Chandrashekar และคณะ[11] ได้ทำการศึกษาอิทธิของลักษณะของหัวกวนต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม โดยมีลักษณะหัวกวนเป็น ทรงกระบอกกรวย ทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าหัวกวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการไหลของวัสดุ และการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของการเสียรูปพลาสติก และลดการก่อดังของข้อบกพร่องขนาดใหญ่ ในบริเวณแนวเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของหัวกวนมีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึง ตามด้วยความเร็วการหมุนของเครื่องมือและความเร็วการเคลื่อนที่ Bayazid และคณะ[12] ได้ศึกษาผลกระทบของรูปทรงหัวกวนต่อข้อบกพร่องของแนวเชื่อมเสียดทานที่เชื่อมอะลูมิเนียม 7075 โดยใช้หัวกวนที่มีทรงกระบอกกรวย ทรงสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีขนาดของปากเครื่องมือกวนเท่ากัน พบว่า หัวกวนทรงสามเหลี่ยมให้โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีรูช่องว่างมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับหัวกวนแบบอื่น ๆ ในทางกลับกัน ผลการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าขนาดของเกรนที่เกิดจากหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดเล็กกว่ารูปทรงชนิดอื่น ไม่เพียงเท่านั้น K. Elangovan[13] ยังได้ศึกษาในรูปแบบเดียวกันคือ ผลของรูปแบบหัวกวนต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมบนอะลูมิเนียม AA6061 โดยมีหัวกวนแบบ ทรงกระบอก ทรงกระบอกกรวย ทรงกระบอกเกลียว ทรงสี่เหลี่ยม และทรงสามเหลี่ยม เชื่อมด้วยความเร็วรอบที่ 800-1600

รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อมเดียวกัน จากการวิจัยนี้พบว่าแนวเชื่อมที่ใช้เครื่องมือกวทงสี่เหลี่ยมที่มีความเร็วรอบเครื่องมือ 1,200 รอบต่อนาที มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมอื่น ๆ และยังพบว่ามีการวิจัยที่ปรับพารามิเตอร์ในส่วนของรูปทรงหัวกวทงอีกหลายงาน ดังตารางที่ 2.1

### 2.1.3 ความเร็วหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อม

ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ความเร็วหมุนของเครื่องมือกวทงและความเร็วเดินเชื่อมเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แนวเชื่อมนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งก็มีงานวิจัยที่พยายามปรับปรุงหรือค้นหาปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีสมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้น T. Sakthivel และคณะ[14] ได้ทำการศึกษาผลของความเร็วในการเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม โดยใช้หัวกวทงทรงกระบอกเกลียวขนาด 6 มม. มีขนาดบ่า 15 มม. เชื่อมที่ความเร็วหมุน 1,000 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 75 100 175 มม.ต่อนาที พบว่า ขนาดของพื้นที่เชื่อมจะกว้างขึ้นเมื่อลดความเร็วการเคลื่อนที่อันเป็นผลมาจากความร้อนเสียดทานจำนวนมากและวัสดุไหลได้ง่าย ความแข็งของพื้นที่เชื่อมจะลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุฐาน แต่ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อม ความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วการเดินเชื่อมให้ช้าลง Peng และคณะ[15] ก็ได้ศึกษาในลักษณะเดียวกัน โดยใช้อะลูมิเนียม 6005A-T6 โดยใช้ความเร็วหมุนกวทง 1,200 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 100 200 400 มม.ต่อนาที และมีหัวกวทงทรงกระบอก 3 มม. ขนาดบ่า 12 มม. คุณสมบัติแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อม ประสิทธิภาพร่วมกันอยู่ระหว่าง 71% ถึง 80% ของวัสดุฐาน Weifeng และคณะ[16] ก็ได้ทำการศึกษาผลของความเร็วในการเดินเชื่อมต่อของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม AA7075-T651 โดยใช้หัวกวทงทรงกระบอก 8 มม. ขนาดบ่า 20 มม. ที่ความเร็วหมุนกวทง 800 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 100 200 และ 400 มม./นาที แล้วได้ข้อสรุปว่า ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมลดลง และค่าความแข็งระดับไมโครในพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงขึ้นด้วย ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นและอัตราความเครียดที่ลดลง รอยเชื่อมที่ความเร็ว 400 มม./นาที มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูง ประสิทธิภาพรอยต่อสูง 97.5% ของวัสดุ ไม่เพียงเท่านั้น ยังมีงานวิจัยอีกหลายงานที่พยายามปรับปรุงแนวเชื่อมโดยการปรับพารามิเตอร์ในส่วนนี้ ดังตารางที่ 2.2

### 2.1.4 การหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวทง

ด้วยความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวทงส่งผลให้พื้นที่แต่ละพื้นที่ที่มีสมบัติทางกลที่ต่างกันจึงส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยพบว่ากระบวนการหล่อเย็นสามารถที่จะปรับปรุงพื้นที่ต่างๆ ของแนวเชื่อมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

L. Fratini และคณะ[17] ได้ทำการศึกษาผลของการระบายความร้อนในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนอะลูมิเนียม 7075-T6 ระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยใช้หัวกวนทรงกระบอก 4 มม. ขนาดบ่า 12 มม. เชื่อมที่ความเร็วหมุน 715 และ 1,500 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 105 และ 214 มม./นาที พบว่า ความร้อนที่อยู่ติดกับเครื่องมือกวนลดลง ค่าความแข็งในพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) เพิ่มขึ้น Buffa และคณะ[18] ใช้ตัวกลางระบายความร้อนที่แตกต่างกัน (น้ำ อากาศบังคับ และอากาศอิสระ) ที่ไหลบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ AA7075 T6 ระหว่าง FSW และได้ข้อสรุปว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือรอยเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ไม่เพียงเท่านั้น Sakurada และคณะ[19] ได้ดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่จมอยู่ในน้ำบนโลหะผสม Al6061 และสรุปได้ว่าการเชื่อมใต้น้ำสามารถทำเชื่อมวัสดุทั้ง 2 ชิ้นเข้าด้วยกันได้ Hofmann และคณะ[20] ได้ทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำโดยใช้วัสดุเป็นโลหะผสม Al6061-T6 พบว่าการเชื่อมที่จมอยู่ในน้ำสามารถปรับแต่งขนาดเกรนที่มากขึ้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างอยู่ภายใต้สภาวะปกติ Upadhyay และคณะ[21] ได้ตรวจสอบอิทธิพลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่จมอยู่ในน้ำ ต่อคุณสมบัติการเชื่อมของข้อต่อ Al7050-T7451 ที่เชื่อมในอากาศ ใต้น้ำ และภายใต้ตัวกลางของเหลวภายใต้สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ  $-25^{\circ}\text{C}$  และได้ข้อสรุปว่ามีการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานที่ต้องใช้การเชื่อมที่สิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักร แต่ก็ได้คุณสมบัติทางกลในด้านของความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างดีขึ้น

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการเชื่อมเสียดแบบกวนที่มีการระบายความร้อนภายนอกและภายในกระบวนการได้รับความนิยมสนใจอย่างมาก แต่ในการวิจัยแทบไม่มีรายงานการตรวจสอบอิทธิพลของการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และการหล่อเย็นแบบไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสม Al7075 ดังนั้น ผู้ดำเนินงานจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นโดยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และการหล่อเย็นแบบไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) ต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของแนวต่อชนอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 การวิเคราะห์โดยละเอียดของคุณสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานแรงดึง ความแข็งของแนวเชื่อม และโครงสร้างจุลภาค

ตารางที่ 2.1 การปรับพารามิเตอร์ในส่วนของคุณสมบัติของหัวกวนและมุมเอียงของเครื่องมือกวน

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์	วัสดุและขนาด	ปัจจัยที่ศึกษา					สรุปผล
			อุณหภูมิ	ขนาดท่อ	ขนาดและรูปทรงของใบกวน	ความเร็วรอบ	เวลา	
Kush และ Vishvesh (2014)[22]	ศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของเครื่องมือที่มีต่อคุณสมบัติการเชื่อมที่ต่างกัน	AA6061-T651	1,2,3,4	$\varnothing=26.64$	ทรงกระบอก $\varnothing = 8$	1300	40	- ไม่มีข้อบกพร่องทำได้โดยมุมเอียงเครื่องมือ $2^{\circ}$ , $3^{\circ}$ และ $4^{\circ}$ ในขณะที่รายงานข้อบกพร่องสำหรับมุมเอียงเครื่องมือ $0^{\circ}$ และ $1^{\circ}$ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 117 MPa ที่มุมเอียง 4 องศา
Hesamoddin และคณะ (2021) [23]	ผลกระทบของมุมเอียงเครื่องมือต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม	AA6068	0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4	$\varnothing=18$	ทรงกรวย D $\varnothing= 6$ d $\varnothing=3$	1400	40	- ขนาดของเกรนในพื้นที่กวนจะเล็กลงเมื่อมุมมองของเครื่องมือกวนเพิ่มขึ้น
Kadaganchi และคณะ (2015)[24]	ผลกระทบของพารามิเตอร์ การหมุนของเครื่องมือความเร็ว ความเร็วในการเชื่อม มุมเอียง และเครื่องมือกวน	AA2014	1.5,2,2.5,3,3.5	$\varnothing=12$	ทรงกรวย, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม, ห้าเหลี่ยม, หกเหลี่ยม	600, 800, 1000, 1200, 1400	200, 400, 600, 800, 1000	-คุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวตอบสนองนั้นคาดการณ์โดยใช้ความเร็วรอบการหมุน 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วหมุน 800 มม./นาที มุมเอียง $3.5$ องศา และโปรไฟล์เครื่องมือหกเหลี่ยม

ตารางที่ 2.2 การปรับพารามิเตอร์ในส่วนของความเร็วมุมและความเร็วในการเดินเชื่อม

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์	วัสดุ	ปัจจัยที่ศึกษา					สรุปผล
			มุมเอียง	ขนาดปาก	ความ รูปทรงหัว	หมงนก ความเร็ว	ความเร็ว เดินเชื่อม	
Shengchong และคณะ (2019)[25]	ผลของความเร็วในการ เชื่อมต่อโครงสร้างจุดภาค และคุณสมบัติ	AA 7055	2.5	$\varnothing = 12$	ทรงกระบอก อก $\varnothing = 3$	1300	75, 100, 125, 150	HAZ ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วการเชื่อม เมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อมจาก 75 เป็น 150 มม./นาที ขนาดเกรนของ NZ จะลดลงก่อนแล้วจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้ง
J. Zhang และคณะ (2018)[26]	ผลกระทบของพารามิเตอร์ การเชื่อม ( $\omega$ , $v$ , $\omega/v$ ) โครงสร้างจุดภาค สมบัติ เชิงกล	AA2195 -T8	0	$\varnothing = 12$	ทรงกรวย $\varnothing D = 4$ $\varnothing d = 2.35$	1500, 1800, 2100,2300, 2600	357, 400,429, 500, 548, 600,700	คุณสมบัติแรงดึงของแนวเชื่อม FSW มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วใน การเชื่อม
Chaitanya และคณะ (2013)[27]	ผลของความเร็วในการเชื่อม และการอบชุบด้วยความ ร้อนหลังการเชื่อม (T6)	AA7039	2.5	$\varnothing = 16$	ทรงกรวย $\varnothing D = 6$ $\varnothing d = 3$	410, 540, 635	75, 120, 190	ขนาดเกรนเฉลี่ยของอะลูมิเนียมที่อยู่ใน รอยเชื่อมจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วใน การเชื่อมและความเร็วรอบที่ลดลง

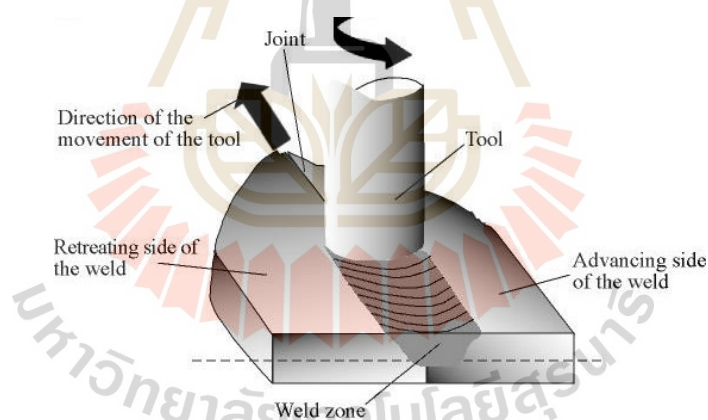
ตารางที่ 2.3 การปรับพารามิเตอร์ในส่วนของการหล่อเย็นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์	วิธีการหล่อเย็น	ปัจจัยที่ศึกษา					สรุปผล
			อุณหภูมิ	ขนาดท่อ	ทวน ประเภท	ความเร็ว รอบ	ความเร็ว ความถี่	
Atul et al. (2018)[29]	ผลของการทำความเย็นด้วย ความเย็นในกระบวนการต่อ คุณสมบัติทางโลหะวิทยาและ ทางกลของโลหะผสม Al7075	liquid nitrogen and methanol หล่อเย็นได้รอย เชื่อม	1.5	25	ทรงกระบอก $\varnothing = 6$	720	65	เกรนในโซนของ TMAZ และ HAZ มีขนาดเล็กและค่าความแข็งแรงดึง เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
Sree et al. (2016)[30]	ตรวจสอบเชิงตัวเลขเกี่ยวกับ การเชื่อมกวนแรงเสียดทานใต้ น้ำของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด AA2519-T87	จมอยู่ใต้น้ำ	3	30	กรวยเกลียว $\varnothing D = 12$ $\varnothing d = 6$	150, 800	7.5, 10	เกรนในโซนของ TMAZ และ HAZ มีขนาด เล็ก จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
Ruzbehani et al. (2018)[31]	สมบัติทางโลหะวิทยาและทาง กลของรอยเชื่อมกวนแรง เสียดทานใต้น้ำของ อะลูมิเนียมผสม Al7075	จมอยู่ใต้น้ำ	2	12	ทรงกระบอก $\varnothing = 4$	800, 1250	25, 50, 100, 150, 200, 250, 300	กระบวนการระบายความร้อนด้วยน้ำช่วย ลดความกว้างของรอยเชื่อม HAZ เมื่อ เทียบกับกระบวนการระบายความร้อน ด้วยอากาศในบรรยากาศ มีความสัมพันธ์ เชิงเส้นระหว่างความกว้างของ HAZ



## 2.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมแรงเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นกระบวนการเชื่อมต่อแบบโซลิดสเตตที่ใช้เครื่องมือที่ไม่สิ้นเปลืองในการเชื่อมชิ้นงานสองชิ้นที่หันหน้าเข้าหากันโดยไม่ทำให้วัสดุชิ้นงานหลอมละลาย[7] ความร้อนเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือหมุนและวัสดุชิ้นงาน ซึ่งทำให้เกิดพื้นที่อ่อนตัวใกล้กับเครื่องมือกวน ในขณะที่เครื่องมือเคลื่อนที่ไปตามแนวรอยต่อ เครื่องมือจะผสมโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยอัตโนมัติ และหลอมโลหะที่ร้อนและอ่อนตัวด้วยแรงกดเชิงกล ซึ่งใช้เครื่องมือนี้ เหมือนกับการตอกดินเหนียว ส่วนใหญ่จะใช้กับอะลูมิเนียม และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงในการเชื่อมสูงมาก FSW สามารถเชื่อมโลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะผสมทองแดง โลหะผสมไททาเนียม เหล็กเหนียว เหล็กกล้าไร้สนิม และโลหะผสมแมกนีเซียม ไม่นานมานี้ได้มีการวิจัยในการเชื่อมพอลิเมอร์โดยใช้การเชื่อมแบบ[32] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นสามารถที่จะเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน เช่น อะลูมิเนียมกับแมกนีเซียมอัลลอยด์เข้าด้วยกัน[33] ไม่เพียงเท่านั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นยังสามารถที่จะประยุกต์ใช้ในการต่อเรือสมัยใหม่ รถไฟ และการบินและอวกาศได้อีกด้วย



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [34]

ในกระบวนการของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนนั้นมียุคประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลักๆ ดังรูปที่ 2.1 เริ่มต้นด้วยการจับยึดชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมอย่างมั่นคงในด้วยชุดอุปกรณ์จับยึดสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนเครื่องจักรที่ใช้ในการเชื่อม จากนั้นเริ่มต้นเปิดความเร็วรอบหมุนของเครื่องจักรที่ใช้ในการเชื่อม (Spindle speed) ขั้นตอนถัดมาทำการกดเครื่องมือเชื่อมสวนที่อยู่ปลายสุดซึ่งเรียกว่าตัวกวน (Probe) เข้าไปในเนื้อวัสดุตั้ง จนกระทั่งขาเครื่องมือกดลงบนวัสดุ จากนั้นแช่ไว้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้วัสดุเกิดความร้อนและอ่อนตัวลง จึงทำการเดินเชื่อมตลอดทั้งแนว

ด้วยสมบัติที่ดีของแนวเชื่อมจึงทำให้การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวนเป็นที่นิยมและแพร่หลายเรื่อยมาดังเช่นงานวิจัยที่ได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการ

ความร้อนในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดจากการหมุนเสียดสีของเครื่องมือกวนและชิ้นงานตามแสดงในรูปที่ 2.1 ชิ้นงานที่เตรียมไว้สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนประกอบด้วยด้านที่ถูกเติมเนื่องจากด้านอีกฝั่งซึ่งเรียกว่าด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side; AS) และด้านที่ถูกเอาเนื้อออกไปเพื่อเติมให้ด้าน AS เรียกว่าด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side; RS) กระบวนการนี้จะใช้เครื่องมือกวนที่สอดลงไปในห้องระหว่างชิ้นงานเพื่อผสมผสานเนื้อวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อวัสดุชิ้นงานอ่อนตัวเสียรูปแบบพลาสติก กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้สามารถแก้ปัญหาการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยได้ดี การศึกษาวิจัยด้านโลหะวิทยาและกลไกความแข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญ พบว่าประสิทธิภาพทางกลของรอยเชื่อมยังต่ำกว่าโลหะเดิม (Base metal) ถึงแม้ว่าพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อมจะถูกควบคุมให้เหมาะสมแล้ว อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของปัจจัยด้านการสึกหรอของเครื่องมือกวนและการนำความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดจุดบกพร่องและกลไกความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม

องค์ประกอบของการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมประกอบด้วย เครื่องมือกวน ความเร็วในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม การเอียงเครื่องมือและความลึกของบ่า

### 2.2.1 เครื่องมือกวน

การออกแบบเครื่องมือกวนเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากเครื่องมือกวนที่ดีสามารถปรับปรุงทั้งคุณภาพของรอยเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม[35] ทำหน้าที่สร้างความร้อนขึ้นในขณะที่เชื่อมและกวนให้เกิดการประสานติดกัน เครื่องมือกวนมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ บ่ากวน (Shoulder) ทำหน้าที่เสียดสีกับผิวหน้าวัสดุเชื่อม ทำให้เกิดความร้อนกับแนวเชื่อมและเกิดการอ่อนตัวโดยส่วนใหญ่ยังไม่มีกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดขนาดของบ่ากวน แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาขนาดของบ่ากวนที่ดีควรมีอยู่ที่ 3-4 เท่าของความหนาวัสดุที่ทำการเชื่อม หัวกวน (Probe) ทำหน้าที่เสียดสีทำให้เกิดความร้อนในรอยเชื่อมและทำหน้าที่ในการกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการไหลตัวเข้าไปผสมภายในรอยเชื่อม ซึ่งลักษณะของหัวกวนมีการออกแบบที่ต่างกัน เช่น ทรงกระบอก ทรงกรวย ทรงกระบอกเกลียว ทรงกรวยเกลียว ทรงหกเหลี่ยม ทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องมือกวน ตามที่ระบุไว้โดย Mishra และ Ma[35] ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอะลูมิเนียม การสึกหรอของเครื่องมือนั้นไม่มากนัก ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุเครื่องมือ เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุ

ที่มีจุดหลอมเหลวสูงอาจต้องใช้วัสดุในการทำเครื่องมือที่มีความทนต่อการสึกหรอมากขึ้นไปด้วยตามตัวอย่างดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 วัสดุเครื่องมือและวัสดุที่ทำการเชื่อมที่เหมาะสม[36]

วัสดุเครื่องมือ	วัสดุที่ทำการเชื่อม
เหล็กกล้าเครื่องมือ	Al alloys, aluminium metal matrix composites (AMCs), copper alloys
WC -Co	Aluminium alloys, mild steel
Ni-Alloys	Copper alloys
WC composite	Aluminium alloys, low alloy steel and magnesium alloys, Ti-alloys
W-alloys	Titanium alloys, stainless steel and copper alloys
PCBN	Copper alloys, stainless steels and nickel alloys

### 2.2.2 ความเร็วในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม

พารามิเตอร์ทั้งสองนี้มีความสำคัญมากและต้องเลือกด้วยให้สัมพันธ์กันจึงจะสามารถเชื่อมวัสดุทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกันได้และมีประสิทธิภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการหมุน ความเร็วในการเชื่อม และความร้อนที่เกิดระหว่างการเชื่อมนั้นซับซ้อน การใช้ความเร็วในการหมุนกวนที่น้อยร่วมกับความเร็วในการเดินเชื่อมที่สูงอาจทำให้เครื่องมือกวนเกิดการแตกหักเพราะความร้อนที่เกิดระหว่างเครื่องมือกวนกับชิ้นงานไม่มากพอที่จะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวลง การเพิ่มความเร็วการหมุนกวนและลดความเร็วการเดินเชื่อมจะส่งผลให้แนวเชื่อมร้อนขึ้นทำให้สามารถที่จะกวนเนื้อวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกันได้ดียิ่งขึ้น แต่ในทางกลับกันการให้ความร้อนสูงเกินไปอาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อม[37 38] สรุปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะต้องมีความร้อนสูงเพียงพอเพื่อทำให้วัสดุมีความเป็นพลาสติกเพียงพอ แต่ไม่สูงจนคุณสมบัติการเชื่อมเสื่อมลงมากเกินไป

### 2.2.3 การเอียงเครื่องมือและระยะกดลึงของบ่า

ระยะความลึกของบ่าจุดต่ำสุดของบ่าที่อยู่ใต้พื้นผิวของแผ่นเชื่อม และพบว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม[39] การกดบ่าลงส่งผลต่อการเสียดสีระหว่างเครื่องมือกวนกับชิ้นงานและความร้อนที่เกิดขึ้นด้วย การเอียงเครื่องมือกวนปกติจะเอียงประมาณ 1-5 องศาเพื่อให้ด้านหลังของเครื่องมืออยู่ต่ำกว่าด้านหน้าเพื่อช่วยในเรื่องของกระบวนการ

กดอัดแนวเชื่อม ในทางกลับกัน ความลึกของการจมนมากเกินไปอาจส่งผลให้หมดเสียดสีกับพื้นผิวแผ่นรองหลังหรือความหนาของรอยเชื่อมต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุฐาน

### 2.3 อะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่น  $\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ ) มีจุดหลอมเหลว  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  และจุดเดือด  $1,800 \text{ }^\circ\text{C}$  โครงสร้างผลึกของ อะลูมิเนียมเป็นแบบเฟสซีซี (Face-Centered Cubic, FCC) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่ทำให้โลหะอะลูมิเนียมมีความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำมาก ไม่เปราะแตกหักง่าย ดังนั้นจึงทำให้อะลูมิเนียมจะเห็นได้ว่าท่อส่งน้ำยาทำความเย็นในระบบปรับอากาศจะผลิตจากท่อ อะลูมิเนียม หรือทองแดง ซึ่งมีระบบผลึกเป็นแบบ เฟสซีซี เช่นเดียวกัน อะลูมิเนียมอาจแบ่งประเภทได้หลายลักษณะ เช่น อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ผสม อะลูมิเนียมอบชุบความร้อนได้ และอบชุบความร้อนไม่ได้ หรืออะลูมิเนียม หล่อ-รีด เป็นต้น ในการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมตามหลักการแบ่งแยกของสมาคม อะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminum Association, AA) ซึ่งแบ่งอะลูมิเนียมออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ อะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูป (wrought aluminum) โดยแต่ละกลุ่มมีรายมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.5 และอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป (cast aluminum)

ตารางที่ 2.5 ตารางการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูป (8 กลุ่มใหญ่)[40]

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	อื่น ๆ เช่น นิกเกิล (Nickel ; Ni) ไททาเนียม (Titanium ; Ti) โครเมียม (Chromium ; Cr) บิสมัท (Bismuth ; Bi) และตะกั่ว (Lead ; Pb)
9xxx	ยังไม่มีใช้

### 2.3.1 อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (1xxx)

ความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ ความเหนียวสูง การนำไฟฟ้าสูง ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่กัดกร่อนทุกประเภท ความสามารถในการขึ้นรูปคือความสามารถของโลหะในการเปลี่ยนรูปพลาสติกโดยไม่เสียหาย ความสามารถของโลหะแผ่นที่จะขึ้นรูปตามต้องการโดยไม่แตกร้า

### 2.3.2 อะลูมิเนียมผสมทองแดง Al-Cu (2xxx)

ทองแดงให้ความแข็งแรงค่อนข้างสูงเพราะให้สารละลายที่แข็งขึ้นและความสามารถในการทำให้ตกตะกอนแข็งตัว ความต้านทานต่อการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศไม่ดีเท่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โลหะผสม 2xxx อาจไวต่อการแตกร้าวจากการกัดกร่อนจากความเครียด (SCC) การชุบแข็งแบบตกตะกอนช่วยเพิ่มความต้านทานต่อ SCC แต่ลดความเหนียวและความเหนียว

### 2.3.3 อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส Al-Mn (3xxx)

แมงกานีสให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแม้ว่าความเครียดจะแข็งตัวแต่มีความสามารถในการขึ้นรูปและความเหนียวค่อนข้างสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้สูงมากในเกือบทุกสภาพแวดล้อม โลหะผสมอะลูมิเนียมแมงกานีสมีแมงกานีสสูงถึง 1.2 % มีความสามารถในการตัดตัดโค้ง ทำงานเชื่อมได้ดี นิยมนำมาทำอุปกรณ์ชุดทำความเย็น ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า กระจบองเครื่องตีต่างๆ

### 2.3.4 อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน Al-Si (4xxx)

มีส่วนผสมของมากถึงซิลิกอนมากถึง 12 % เพื่อให้ช่วงการหลอมเหลวลดลงอย่างมาก โดยไม่ทำให้เกิดความเปราะ ด้วยเหตุผลนี้ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน จึงถูกนำมาใช้ในลวดเชื่อมและเป็นโลหะผสมประสานสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียม ซึ่งต้องการช่วงหลอมเหลวที่ต่ำกว่าโลหะฐาน โลหะผสมส่วนใหญ่ในเกรดนี้ไม่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่อใช้ในการเชื่อมโลหะผสมที่บำบัดด้วยความร้อน โลหะผสมเหล่านี้จับส่วนประกอบของการเจือบางส่วนจากส่วนหลังและตอบสนองต่อการอบชุบด้วยความร้อนในระดับที่จำกัด โลหะผสมที่มีซิลิกอนในปริมาณที่ประเมินค่าได้จะกลายเป็นสีเทาเข้มจนถึงสีดำ เมื่อเคลือบผิวด้วยอนไดซ์ออกไซด์ และด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่ต้องการสำหรับการใช้งานด้านล้อแม็ก 4032 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำและทนต่อการสึกหรอสูง ดังนั้นจึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการผลิตลูกสูบเครื่องยนต์หลอม

### 2.3.5 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม Al-Mg (5xxx)

มีส่วนผสมแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบหลักในการผสมหรือร่วมกับแมงกานีส ผลลัพธ์ที่ได้คือโลหะผสมที่มีความแข็งแรงปานกลางถึงสูง แมกนีเซียมมีประสิทธิภาพมากกว่าแมงกานีสอย่างมาก ในฐานะสารทำให้แข็ง ประมาณ 0.8% Mg เท่ากับ 1.25% Mn และสามารถ

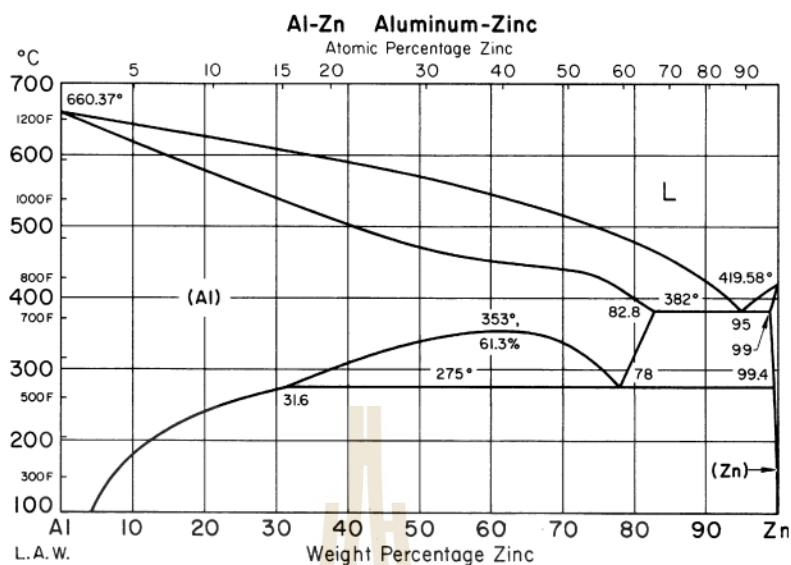
เพิ่มในปริมาณที่สูงกว่ามากได้ โลหะผสมในเกรดนี้มีลักษณะการเชื่อมที่ดีและทนทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศทางทะเลได้ดี

### 2.3.6 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมกับซิลิกอน Al- MgSi (6xxx)

ประกอบด้วยซิลิกอนและแมกนีเซียมโดยประมาณในสัดส่วนที่จำเป็นสำหรับการก่อตัวของแมกนีเซียมซิลิไซด์ จึงทำให้สามารถผ่านการบำบัดความร้อนได้ แม้ว่าจะไม่แข็งแรงเท่ากับโลหะผสม 2xxx และ 7xxx แต่โลหะผสมเกรด 6xxx ก็มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความสามารถในการเชื่อม ความสามารถในการแปรรูป และความต้านทานการกัดกร่อน โดยมีความแข็งแรงปานกลาง โลหะผสมในกลุ่มที่บำบัดด้วยความร้อนนี้อาจก่อตัวขึ้นในอุณหภูมิ T4 (สารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนแต่ไม่ได้รับการบำบัดด้วยความร้อนจากการตกตะกอน) และถูกทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นหลังจากการกระบวนการ T6 ได้มีรูปแบบโดยการบำบัดความร้อนด้วยการตกตะกอน

### 2.3.7 อะลูมิเนียมผสมสังกะสี Al- Zn (7xxx)

สังกะสีเป็นองค์ประกอบหลักของอะลูมิเนียมเกรด 7xxx ในปริมาณ 1 ถึง 8% และเมื่อประกอบกับแมกนีเซียมในสัดส่วนที่น้อยกว่าจะส่งผลให้วัสดุที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนมีความแข็งแรงปานกลางถึงสูงมาก โดยปกติจะมีการเติมธาตุอื่น ๆ เช่น ทองแดงและโครเมียมในปริมาณเล็กน้อย การเติมสารแคนเดียมเจือจางยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของอะลูมิเนียมในกลุ่มนี้ ใช้ในโครงสร้างเฟรม โครงสร้างเครื่องบินและอากาศยานขนาดใหญ่ และชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงดึงสูง เป็นต้น ถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมเกรด 7xxx ให้ความแข็งแรงสูงสุดในบรรดาอะลูมิเนียมอัลลอย แต่ก็ต้องแลกมาด้วยความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำ เนื่องจากความไวต่อการแตกร้าวของแนวเชื่อม Al 7075 ซึ่งประกอบด้วย Zn 5.6%, 2.5% Mg และ 1.6% Cu เป็นโลหะผสมที่ใช้กันทั่วไป โดยมีจุดหลอมละลายที่ประมาณ 660 °C ซึ่งสูงกว่าสังกะสีที่มีจุดหลอมละลายที่ประมาณ 419 °C โดยสังกะสีนั้นสามารถละลายในอะลูมิเนียมสูงสุด 31.6% เกิดปฏิกิริยาอุทกคตอยที่ 78% ของสังกะสี อุณหภูมิประมาณ 275 °C และเกิดปฏิกิริยาอุทกคตคที่ 95% ของสังกะสี อุณหภูมิประมาณ 382°C ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียมผสมสังกะสี[4]

### 2.3.8 อะลูมิเนียมผสมธาตุอื่น Al- Miscellaneous (8xxx)

ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพของอุณหภูมิสูงทำได้โดยใช้โลหะผสม Al-Fe-Ce ที่เสริมความแข็งแรงด้วยการกระจายตัว เช่น 8019 หรือโลหะผสม Al-Fe-V-Si เช่น 8009 ซึ่งทำโดยกระบวนการแปรรูปโลหะผง ความหนาแน่นต่ำและความแข็งแรงสูงขึ้นสามารถทำได้ในโลหะผสมที่มีลิเทียม เช่น 8090 โลหะผสมรุ่นหลังซึ่งสามารถชุบแข็งได้จากการตกตะกอน ได้แทนที่โลหะผสม 2xxx และ 7xxx ที่มีความแข็งแรงปานกลางถึงสูงในการใช้งานด้านอากาศยาน อวกาศ

## 2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของรอยเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วย ความแข็ง และความแข็งแรงดึง

### 2.4.1 ความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness test) คือ การวัดจากความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปแบบถาวร อีกทั้งยังวัดจากรูปมายน้อยของวัสดุ ซึ่งสามารถทดสอบความแข็งของวัสดุได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้แรงกด ชูด เจาะกระแทก ฯลฯ ค่าความแข็งของวัสดุถือได้ว่าเป็นค่าพื้นฐานที่สามารถชี้ให้เห็นคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุนั้นได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ตามมาตรฐาน ASTM E384 – 17 Vickers hardness test คือ วิธีการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุโดยใช้แรงกดเพื่อวัดรอยยุบบนวัสดุ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

จะเลือกใช้หัวกดแบบทรงเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม  $136^\circ$  ดังรูปที่ 2.3 แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์สังเกตรอยกดเพื่อดูและวัดขนาดของแนวเส้นทแยงมุมที่เกิดขึ้นจากรอยกด สามารถคำนวณค่าความแข็งได้ดังสมการที่ 2.1 วิธีการวัดค่าความแข็งวิธีนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ในการวัดความแข็งน้อย และนิยมมากที่สุดคือการวัดความแข็งของโครงสร้างจุลภาคในวัสดุ งานชุบผิวแข็ง และการวัดความแข็งของแนวเชื่อม โดยค่าความแข็งที่วัดได้จะมีหน่วยเป็น HV (Hardness Vickers)

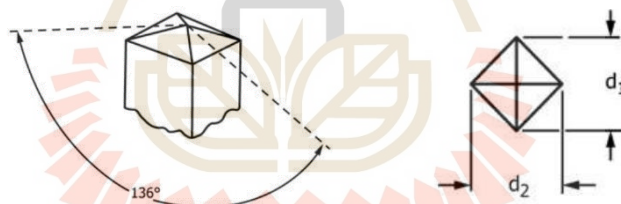
$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = \frac{1.8544 F}{d^2} \quad (2.1)$$

โดยที่

HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

$F$  คือ แรงกด (กรัม)

$d$  คือ ขนาดเส้นทแยงมุม  $d_1$  และ  $d_2$  เฉลี่ย (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.3 หัวกดวิกเกอร์

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ เพื่อความแม่นยำในการวัดที่เหมาะสมที่สุด ควรทำการทดสอบกับชิ้นงานเรียบที่มีพื้นผิวที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 จนถึงเบอร์ 2000 จากนั้น นำไปขัดกับผ้าสักหลาดด้วยผงเพชรหรือผงอะลูมินาเพื่อสภาพผิวที่เงาปราศจากรอยขีดต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อการเอียงหรือการวัดเส้นทแยงมุมในภายหลัง ตำแหน่งของชิ้นงานจะต้องทำมุมตั้งฉากกับหัวกด และชิ้นงานไม่ควรเคลื่อนที่ขณะทำการกดทดสอบ เพราะอาจทำให้รอยกดที่ได้เป็นรูปว่าวเปลี่ยนไปจากความเป็นจริง ที่อาจส่งผลให้ค่าความแข็งไม่ถูกต้อง





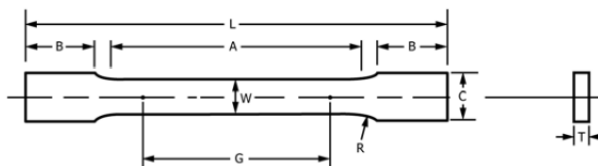
รูปที่ 2.4 ลักษณะรอยกุดของหัวกดวิกเกอร์

(ก) ลักษณะรอยกุดที่ถูกดึง (ข) ลักษณะรอยกุดที่ผิวดรูป

#### 2.4.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบแรงดึง เป็นกระบวนการทดสอบที่ใช้ในการวัดค่าแรงดึงของวัสดุ โดยการยึดตัวอย่างวัสดุและดึงให้เกิดการเปราะหรือแตกต่างกันเพื่อวัดค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ กระบวนการทดสอบแรงดึงทั่วไปจะใช้เครื่องทดสอบแรงดึงที่มีสามส่วนหลักคือ ตัวอย่างทดสอบ (Specimen) ที่ถูกตัดและรูปร่างเป็นลวดหรือแถบที่แข็งและเรียบ และเครื่องทดสอบที่มีคอยล์สปริงที่สามารถรับความยาวได้ ซึ่งเป็นที่จับตัวอย่างและมีการวัดแรงที่ออกทางมาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดการยืดตัวของตัวอย่างเพื่อให้สามารถระบุค่ายืดตัวได้ในขณะทดสอบ ในการทดสอบแรงดึง ตัวอย่างทดสอบจะถูกแนบเข้ากับเครื่องทดสอบและที่ยึดที่สองของตัวอย่างจะถูกดึงออกจากกันโดยการปรับค่ายาวของเครื่องทดสอบ การดึงตัวอย่างจะทำให้เกิดการยืดตัวและขยายตัว จากนั้นเครื่องทดสอบจะบันทึกค่าแรงที่ใช้ในกระบวนการดึงและค่ายาวของตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลที่ได้รับเครื่องทดสอบสามารถคำนวณและแสดงผลเป็นกราฟแรงดึง-ยาว เพื่อให้ผู้วิจัยหรือผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และตีความผลลัพธ์ได้ การทดสอบแรงดึงมีความสำคัญในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง และการซึมเศษส่วนของวัสดุ ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยและผู้ผลิตสามารถเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการทำงานตามเป้าหมายที่กำหนดได้

ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จำเป็นต้องปฏิบัติตามมาตรฐานที่กำหนดเพื่อให้ได้ผลทดสอบที่ถูกต้องและเปรียบเทียบได้ระหว่างการทดสอบที่แตกต่างกันได้ มีหลายมาตรฐานที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง เช่น ASTM (American Society of Testing and Materials): ASTM E8 เป็นมาตรฐานที่ใช้กับวัสดุโลหะ ซึ่งกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง เช่น รูปร่างและขนาดของตัวอย่างทดสอบแบบเส้น (round bar) หรือแผ่น (flat bar) รวมถึงวิธีการทดสอบและการวัดผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทดสอบ[41] ซึ่งลักษณะชิ้นงานทดสอบเป็นดังรูปที่ 2.5

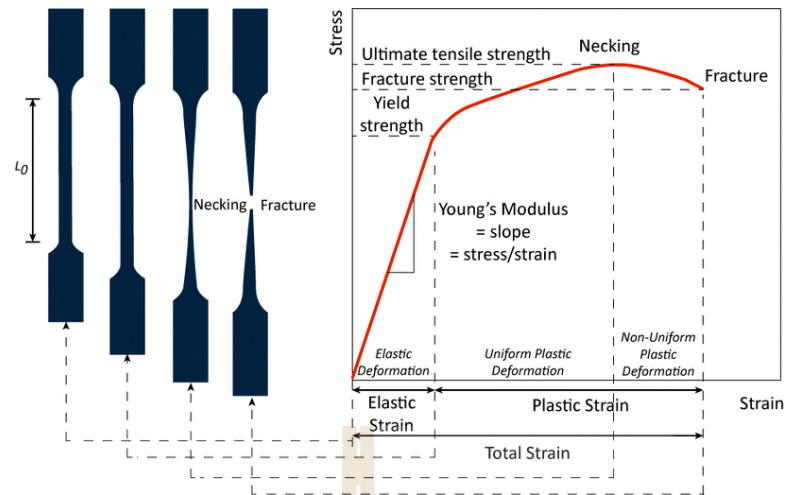


	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 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 parallel 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 2.5 ชิ้นทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8

#### 2.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain

โดยปกติแล้ว เมื่อโลหะหรือวัสดุได้รับแรงดึง (Tensile loading) จะมีการเปลี่ยนรูปทั้งแบบ อีลาสติกและแบบพลาสติก (Elastic and plastic deformation) โดยในตอนแรกโลหะจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบ Elastic ก่อน โดยมีความสัมพันธ์ของค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงาน (Applied load) และการยืดตัว (Extension) ที่เป็นเส้นตรง (Linear relationship) ค่า Load และ Extension ดังกล่าวนี้นำมาคำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) ที่จุดใดๆ รวมถึงความเค้นจริง (True stress) และความเครียดจริง (True strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งในการทดสอบ จะใช้เพียงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมเท่านั้น โดยมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Curve) รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดสอบแรงดึง[42]

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

โดยที่

$\sigma$  คือ ความเค้นทางวิศวกรรม (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

$\varepsilon$  คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

$P$  คือ แรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (นิวตัน)

$A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน (ตารางมิลลิเมตร)

$L_0$  คือ ความยาวเดิมของชิ้นงาน (Original length) (มิลลิเมตร)

$L_f$  คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (Final length) (มิลลิเมตร)

2.4.2.2 ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus, E) คือตัวชี้วัดของความยืดหยุ่นของวัสดุ หรือความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับแรงกระทำ โมดูลัสเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของวัสดุต่อแรงที่กระทำให้เกิดการยืดหยุ่นหรือยุบตัวของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุมีค่าโมดูลัสสูง แสดงว่ามีความแข็งแรงและยืดหยุ่นน้อย ในขณะที่เมื่อค่าโมดูลัสต่ำ แสดงว่าวัสดุมีความยืดหยุ่นสูงและอ่อนแรงยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.4

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

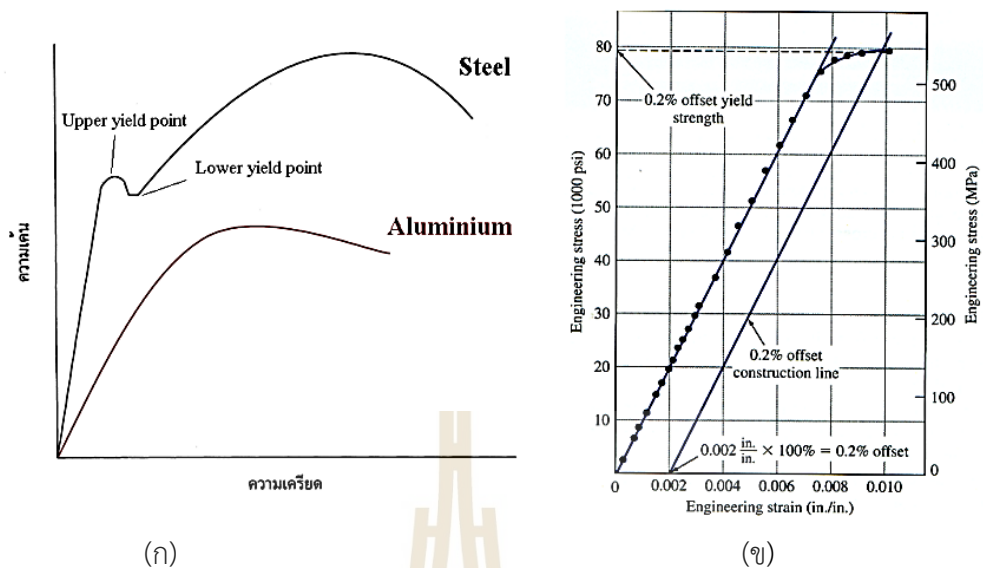
### 2.4.2.3 จุดคราก (Yield point, $\sigma_y$ )

จุดคราก (Yield point) หรือเรียกอีกชื่อว่าแรงคราก (Yield strength) คือ ค่าแรงต้านทานที่วัสดุแสดงให้เห็นว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงครั้งแรกเมื่อถูกกดหรือเปรียบเทียบกับ ค่าคราก จุดครากแสดงถึงแรงที่วัสดุสามารถทนต่อการกดหรือยืดต่อได้ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรหรือการหักขาด เมื่อวัสดุถูกกดหรือยืดในช่วงที่ยังไม่ถึงจุดคราก จะมีการเปลี่ยนแปลงความยืดหยุ่นของวัสดุโดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร แต่เมื่อถึงจุดคราก วัสดุจะเริ่มแสดงอาการเปลี่ยนรูปร่างถาวรที่เรียกว่าการยืดต่อถาวร (Plastic deformation) และอาจเกิดการยืดต่อและการหักขาดของวัสดุ จุดคราก (Yield point) สำคัญในการออกแบบและใช้งานวัสดุ เนื่องจากมันให้ข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุ นอกจากนี้ การทราบจุดครากยังช่วยในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและความยืดหยุ่นในระดับที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (2.5)$$

การเกิด Yielding สามารถพบในโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เช่น เหล็กและเหล็กกล้าหรือในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steels) จะสามารถสังเกตจุด Yield ได้อย่างชัดเจนจากกราฟความสัมพันธ์ของ Engineering stress-strain ดังรูปที่ 2.7 ส่วนโลหะที่ไม่ปรากฏ Yield point ที่ชัดเจน เช่น อะลูมิเนียม ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC อาจกำหนดให้ใช้ 0.2% ของ Plastic strain ที่เกิดขึ้นในแผนภาพความเค้นและความเครียดเป็นค่ากำหนดในการหา Yield point หรือ offset yield โดยหาได้จากสมการที่ 2.6 ได้อย่างชัดเจนจากกราฟความสัมพันธ์ของ Engineering stress-strain ดังรูปที่ 2.7

$$\sigma_{0.2\%y} = \frac{P_{0.2\%}}{A_0} \quad (2.6)$$



(ก)

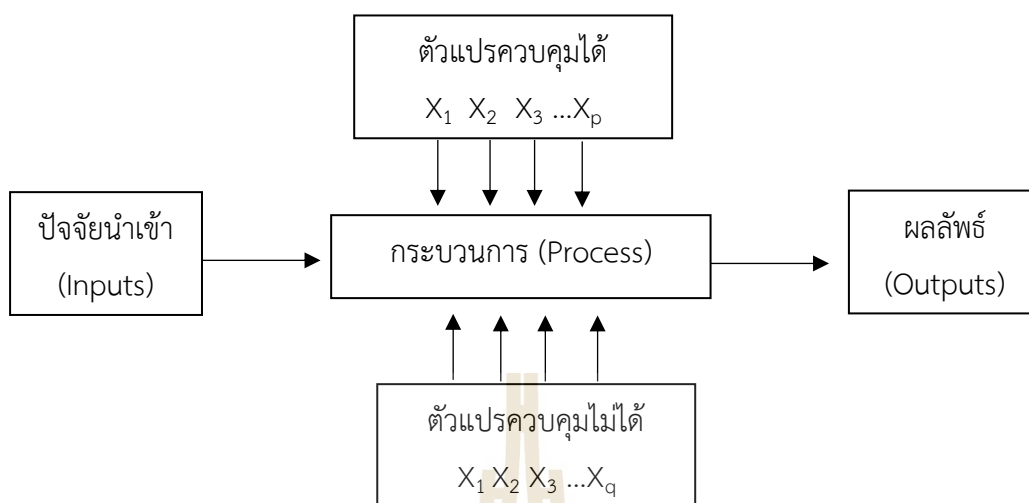
(ข)

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

(ก) ของเหล็กกับอะลูมิเนียม (ข) การหาค่า Yield strength ที่ 0.2% offset

## 2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) เป็นวิธีการทางสถิติโดยอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้า (Input factors) ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ผ่านกระบวนการหนึ่งๆ ซึ่งวิธีการนี้สามารถศึกษาปัจจัยตอบสนอง (Output factors) ของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกัน ซึ่งจะส่งผลต่อจำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาที่ละปัจจัยในกระบวนการหนึ่ง และอาจจะมีบางปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ถึงแม้ปัจจัยเหล่านั้นจะเกิดผลกระทบต่อกระบวนการนั้นๆ ก็ตาม โดยส่วนมากแล้วจะเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น แสงแดด ความชื้นในอากาศ ฝุ่นละออง รวมไปถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการ ฯลฯ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เรียกว่า ปัจจัยควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor) ส่วนบางปัจจัยที่ต้องควบคุมหรือส่งผลกระทบต่อปลายทางหรือกระบวนการ เนื่องจากปัจจัยเหล่านั้นมีผลกระทบต่อผลลัพธ์มากกว่าปัจจัยควบคุมไม่ได้ จึงต้องมีการควบคุมให้เปลี่ยนแปลงอยู่ในตำแหน่งและช่วงใดช่วงหนึ่งที่มีผลเสียต่อกระบวนการน้อยที่สุด เรียกปัจจัยเหล่านี้ว่า ปัจจัยที่สามารถออกแบบหรือควบคุมได้ (Design or controllable factor)



รูปที่ 2.8 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ[43]

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการที่ผู้วิจัยจะวางแผนและดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างปัจจัยต่างๆ และผลลัพธ์ที่ต้องการสำรวจหรือวิเคราะห์ ผู้วิจัยจะเน้นใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในการทดลองให้เกิดประโยชน์สูงสุด หรือใช้ทรัพยากรที่คงที่ให้ผลลัพธ์ที่ต้องการด้วยประสิทธิภาพสูงสุด การประเมินประสิทธิภาพของความสัมพันธ์เชิงสถิตินั้นจะใช้ตัวชี้วัดที่เหมาะสมเพื่อวัดผลลัพธ์ที่ได้ โดยการประเมินข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) ที่เป็นค่าข้อมูลต่อเนื่อง (Continuous data) ซึ่งได้จากการวัดโดยใช้เครื่องมือต่างๆ เช่น เครื่องมือการวัดทางวิทยาศาสตร์ การประเมินข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) ที่เป็นค่าข้อมูลไม่ต่อเนื่อง (Discrete data) ซึ่งได้จากการนับหรือการสังเกต ตัวชี้วัดทั้งคู่นี้จะช่วยให้ผู้วิจัยได้รับข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลลัพธ์ที่สนใจในการทดลอง อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่ทุกปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ตอบสนองของกระบวนการทดลองสามารถวัดได้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องเลือกวัดปัจจัยที่สื่อถึงประสิทธิภาพหรือผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมสถิติที่ใช้ในการออกแบบการทดลองที่สามารถใช้งานได้ง่ายและมีความหลากหลาย เช่น SAS (Statistical Analysis Software), Design-expert และ Minitab เป็นต้น โปรแกรมเหล่านี้มีฟังก์ชันทางสถิติที่ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้อย่างง่ายขึ้น

### 2.5.1 ประเภทของการออกแบบการทดลอง (Type of experimental designs)

การพิจารณาเลือกประเภทของการออกแบบการทดลอง ควรพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง จำนวนของปัจจัยและความสัมพันธ์กันของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ประเภทของการออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.5.1.1 การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) เป็นหนึ่งในประเภทของการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยเดียวต่อผลลัพธ์ที่สนใจ โดยปัจจัยที่สนใจในการทดลองแบบนี้เป็นปัจจัยเดียวเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า "ตัวปัจจัย" (Factor) หรือ "ตัวแปรปัจจัย" (Independent Variable) ตัวปัจจัยนี้สามารถมีระดับหรือเงื่อนไขที่แตกต่างกันได้ ในการทดลองแบบปัจจัยเดียว ผู้วิจัยจะกำหนดตัวปัจจัยเดียวที่สนใจในการศึกษา และทำการปรับเปลี่ยนหรือแปรผลตัวปัจจัยนั้น โดยวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเป็นเพื่อทดสอบสมมติฐาน หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวปัจจัยกับผลลัพธ์ หรือเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของตัวปัจจัยต่อผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้อง การทดลองแบบปัจจัยเดียวช่วยให้ผู้วิจัยสามารถพิจารณาผลกระทบของตัวปัจจัยเดียวต่อผลลัพธ์ได้โดยตรง และช่วยให้มีการควบคุมและจัดการปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อผลลัพธ์ อีกทั้งยังช่วยให้ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์และตีความผลลัพธ์ได้อย่างเป็นระบบและน่าเชื่อถือ

2.5.1.2 การทดลองแบบครั้งละหนึ่งปัจจัย (One Factor at a Time Design) เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยแต่ละปัจจัยโดยที่มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวในแต่ละครั้ง ซึ่งเป็นการทดลองแบบเชิงประสิทธิภาพที่มีความง่ายและความตรงไปตรงมา ในการทดลองแบบครั้งละหนึ่งปัจจัย ผู้วิจัยจะทดลองปรับเปลี่ยนและตรวจสอบผลของปัจจัยแต่ละปัจจัยโดยที่ปัจจัยอื่น ๆ คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวในแต่ละรอบของการทดลอง จากนั้นจึงทำการวัดและบันทึกผลของตัวแปรตามที่สนใจ การทดลองแบบครั้งละหนึ่งปัจจัยมักนิยมใช้เมื่อมีปัจจัยหลายตัวแปรที่มีผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ แต่ยังไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือต้องการศึกษาปัจจัยแต่ละตัวแยกต่างหากกัน

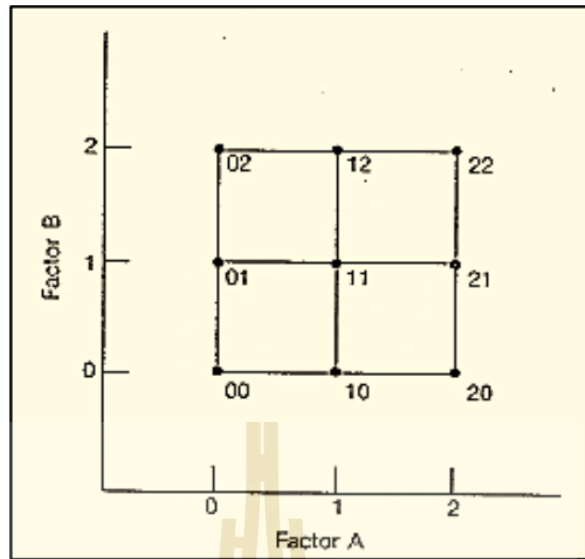
2.5.1.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลายตัวแปรและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านั้น ในการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล ปัจจัยทุกตัวแปรจะถูกปรับเปลี่ยนแบบเชิงรวม (combination) เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากการแปลงแปลงของตัวแปรหลายตัวพร้อมกัน โดยปกติแล้วการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลนั้นใช้สองปัจจัยหรือมากกว่า และแต่ละปัจจัยมีระดับการปรับเปลี่ยน (Level) ที่แตกต่างกัน เช่น ปัจจัย A มีระดับการปรับเปลี่ยนเป็น A1, A2, A3 และปัจจัย B มีระดับการปรับเปลี่ยนเป็น B1, B2, B3 โดยการทดลองจะทำการสร้างกลุ่มการทดลองที่

ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงรวมของระดับการปรับเปลี่ยนทั้งสองปัจจัย เช่น A1B1, A1B2, A2B1, A2B2, ฯลฯ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสามารถใช้ในการศึกษาและวิจัยในหลายสาขา เช่น วิทยาศาสตร์ทางการเกษตร การอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ชีวภาพ การจัดการคุณภาพ และอื่น ๆ การทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลยังสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การปรับปรุงกระบวนการการผลิต หรือการพัฒนานวัตกรรมใหม่ โดยที่สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน และค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่สนใจได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

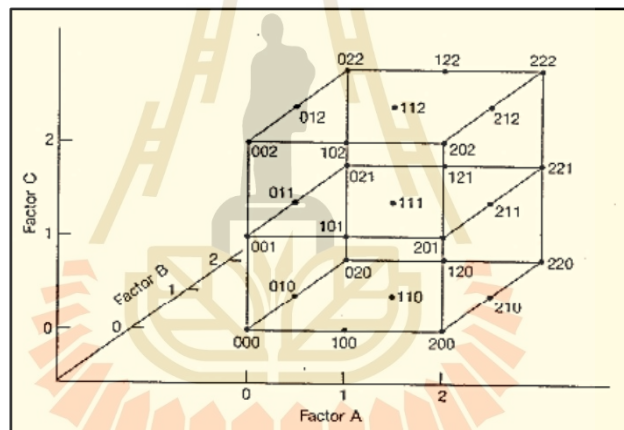
- 1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย
- 2) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$
- 3) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^k$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^k$  คือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ โดยสามารถทำได้ตั้งแต่ 2 ปัจจัย ถึง 15 ปัจจัย การทดลองชนิดนี้สามารถศึกษาค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการได้ต่อจากการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  โดยใช้ผลการทดลองของการออกแบบ  $2^k$  มาใช้ในการวิเคราะห์ผลทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองได้ ในขณะที่การออกแบบการทดลองบางประเภท ต้องทำการทดลองใหม่ทั้งหมด ซึ่งการออกแบบการทดลองชนิดนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีค่าใช้จ่ายในแต่ละเงื่อนไขการทดลองสูงและมีงบประมาณจำกัด นอกจากนี้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^k$  ยังสามารถที่จะศึกษาถึงอิทธิพลร่วมของปัจจัยได้ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ กลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะใช้เป็นตัวเลข 0 (ต่ำ), 1 (ปานกลาง) และ 2 (สูง) การทดลอง ร่วมปัจจัยในการออกแบบ  $3^k$  จะแทนด้วยตัวเลข  $k$  ตัว โดยที่ตัวเลขตัวแรกแทนระดับของปัจจัย A ตัวเลขตัวที่สองแทนระดับของปัจจัย B และตัวเลขตัวที่  $k$  แทนระดับของปัจจัย  $k$  ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบ  $2^k$  ตัวเลข 00 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยซึ่งทั้ง A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ 01 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A อยู่ที่ระดับต่ำ และ B อยู่ที่ระดับปานกลาง รูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ  $3^2$  และ  $3^3$  ตามลำดับ





รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ  $3^2$



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ  $3^3$

## 2.6 กระบวนการหล่อเย็น

เนื่องด้วยวิธีของกระบวนการหล่อเย็นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมเสียหายแบบกวน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการหล่อเย็น 2 วิธี คือ การหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และการหล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์ (Cryogenic)

### 2.6.1 น้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid)

เป็นชื่อเรียกกลุ่มของเหลว ส่วนมากเป็นน้ำมันที่ใช้ในการหล่อลื่นหรือเพื่อลดความร้อนและการเสียดสีเมื่อทำการตัด เจียร บดโลหะ ช่วยให้ไม่เกิดความร้อนมากจนไฟไหม้หรือควันขึ้น

หรือเกิดประกายไฟ ช่วยให้ขอบหน้าของโลหะที่ตัดมีความเรียบเนียน และช่วยให้เศษผงโลหะที่เกิดขึ้นจากการตัดหลุดออกไปได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปน้ำมันตัดกลึงที่ละลายน้ำได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันตัดกลึงชนิดละลายน้ำได้ น้ำมันตัดกลึงกึ่งสังเคราะห์ และน้ำมันตัดกลึงสังเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันตัดกลึงชนิดละลายน้ำได้ ประเภทนี้พบได้บ่อยมากและโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น น้ำมันตัดกลึงที่ละลายน้ำได้ให้การหล่อเย็นและการหล่อลื่นที่ยอดเยียมสำหรับการตัดและเจียรโลหะที่มีเหล็กและอโลหะตั้งแต่งานเบาถึงงานหนัก ส่งผลให้เครื่องมือมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นและได้ผิวสำเร็จที่ตบขึ้นส่วนที่ตัดเฉือน

HIKUT W10 เป็นน้ำมันตัดกลึงที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้ โดยตัวน้ำมันกลึง HIKUT W10 เป็นน้ำมันตัดกลึงโลหะชนิดผสมน้ำ เกรดน้ำมันแร่ (Mineral) เมื่อผสมน้ำแล้วจะมีลักษณะสีขาวคล้ายน้ำนม (Milky) ผลิตจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดพาราฟินิก (Paraffinic) คุณภาพสูงผสมสารเพิ่มคุณภาพช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย เหมาะสำหรับหล่อลื่นและระบายความร้อนงานตัดกลึงโลหะทั่วไป โดยสมบัติจำเพาะของตัวน้ำมันกลึง HIKUT W10 ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติจำเพาะของ HIKUT W10

Tests	Methods	Units	Results
Appearance	Visual Inspection		Brown
Appearance after mixed with water	Visual Inspection		Milky
Kinematic Viscosity at 40 °C	ASTM D445-11	mm <sup>2</sup> /s	42
Emulsion Stability	IP 263		Pass
Copper Strip Corrosion	ASTM D130		1a
pH Value	pH Meter		9.1
Nitrate / Nitrite	-		None
Chlorine	-		None
Corrective Factor (Refractometer)	Refractometer		1.2

### 2.6.2 ไครโอเจนิคส์ (Cryogenic)

การหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหรือการหล่อเย็นแบบไครโอเจนิคส์ คือการใช้วัสดุที่อุณหภูมิต่ำมาก ซึ่งต่ำกว่า -150 °C อย่างไรก็ตาม สารที่ทำให้เกิดอุณหภูมิต่ำ เช่น ฮีเลียม ไฮโดรเจน นีออน ไนโตรเจน ก๊าซไครโอเจนิคส์ มีการใช้งานที่หลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม เช่น อิเล็กทรอนิกส์ การผลิต ยานยนต์ และอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ ไนโตรเจนเหลว

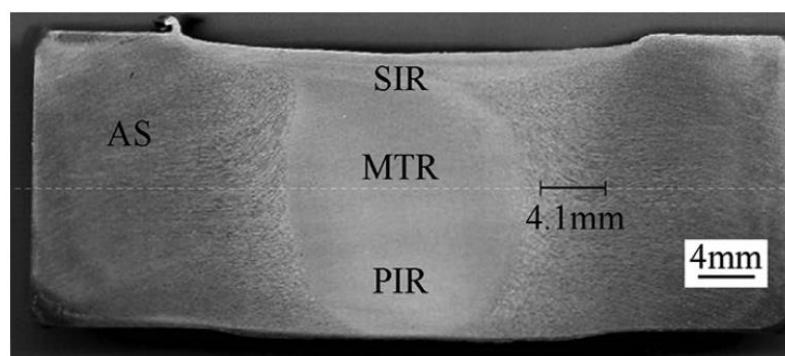
เป็นองค์ประกอบที่ใช้บ่อยที่สุดในโครโอเจนิคส์ ผลิตขึ้นในเชิงอุตสาหกรรมโดยการกลั่นแยกส่วนของอากาศเหลว และมักเรียกด้วยตัวย่อว่า LN<sub>2</sub> ไนโตรเจนละลายที่ -210.01 °C และเดือดที่ -198.79 °C เป็นก๊าซที่มีมากที่สุด ประมาณสี่ในห้า 78.03% โดยปริมาตรของบรรยากาศ เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่เป็นพิษ[5] ลักษณะเฉพาะของไนโตรเจนเหลวเหล่านี้ทำให้เป็นสารหล่อเย็นที่ต้องการ[44] หน้าที่หลักของการทำความเย็นด้วยความเย็นในการตัดโลหะถูกกำหนดโดย Hong และ Zhao[45] เป็นการขจัดความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพออกจากบริเวณการตัด ด้วยเหตุนี้จึงช่วยลดอุณหภูมิการตัด การปรับเปลี่ยนลักษณะการเสียดสี การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นงาน

## 2.7 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

ในการตรวจสอบทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น เพื่อตรวจสอบลักษณะต่างๆ ของแต่ละพื้นที่ของรอยเชื่อม ซึ่งประกอบด้วย พื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ) พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในแต่ละพื้นที่มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปจึงส่งผลให้แต่ละพื้นที่มีสมบัติทางกลที่ต่างกัน วิธีในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

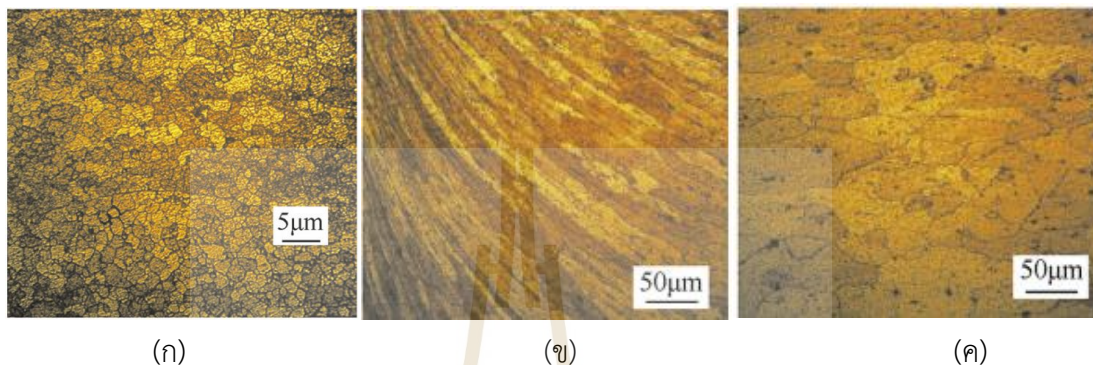
2.7.1 การศึกษาโครงสร้างของโลหะของภาพถ่าย (Metallographic) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

2.7.1.1 การศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) คือ การตรวจสอบโครงสร้างที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทราย ผ่านการกัดกรด และถ่ายภาพที่ กำลังขยายต่ำ (< 25 เท่า) ทำให้เห็นลักษณะภาพโดยรวมชิ้นงาน ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพ (Quality control) ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน[46]

2.7.1.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทราย ขัดละเอียดด้วยผ้าขัด ผ่านการกัดกรด และถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงกว่า 25 ถึง 1,000 เท่า ทำให้เห็นถึงลักษณะชนิดของโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ และลักษณะของโครงสร้างในพื้นที่ต่างๆ ของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน  
(ก) พื้นที่กวน (ข) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (ค) พื้นที่กระทบร้อน

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะมุ่งเน้นไปที่รายละเอียดของวิธีดำเนินการทดลองตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง จนกระทั่งถึงขั้นตอนสรุปผลการทดลอง โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อ ดังนี้

- 3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด ชุดหล่อเย็น และชุดวัดอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 3.3 การออกแบบการทดลอง
- 3.4 ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลอง
- 3.5 การตรวจสอบคุณสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา
- 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.1 การเตรียมวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อะลูมิเนียมแผ่นเกรด 7075 ขนาด  $1,220 \times 2,440 \times 6$  มม. เป็นวัสดุที่ถูกเลือกสำหรับการวิจัย และทำการตัดซอยด้วยเลื่อยสายพานแนวนอน (Sahinler BMSO 250 Fully Automatic Band Saw) ให้ได้ขนาด  $105 \times 55 \times 6$  มม. โดยประมาณ ดังรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นทำการกัดปาดหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องกัด CNC Milling (VMC300) ให้ได้ขนาด  $100 \times 50 \times 4$  มม. ดังรูปที่ 3.2



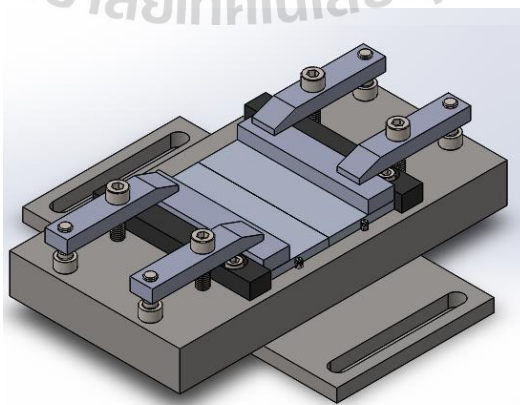
รูปที่ 3.1 ตัดซอยวัสดุด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ผ่านการกัดปาดหน้าด้วยเครื่อง CNC Milling

### 3.1.2 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

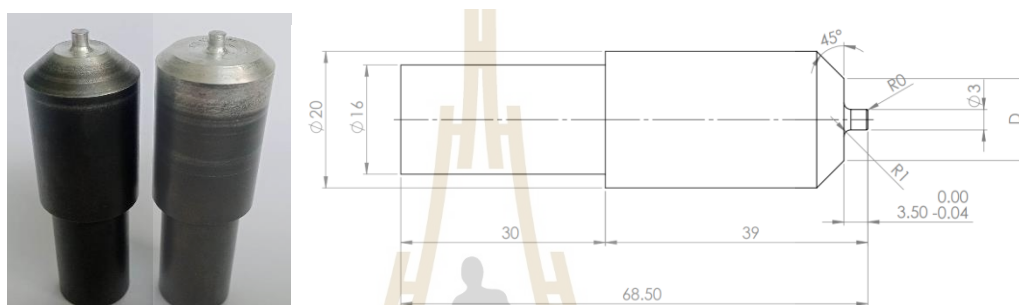
เนื่องด้วยวิธีการกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในงานวิจัยนี้ ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดแนวตั้งในการทดลองเชื่อมและเพื่อให้สามารถยึดชิ้นงานทดลองให้มั่นคงและเชื่อมในตำแหน่งเดียวกันทุกๆ การทดลอง อีกทั้งเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการถอดและจับยึดชิ้นงาน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

### 3.1.3 เครื่องมือกวน หรือหัวกวน

จากการศึกษาทบทวนปริทัศน์วรรณกรรม พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนสามารถใช้ขนาดหัวกวน  $\varnothing$  3 มม. และขนาดบ่า  $\varnothing$  9, 12 และ 15 มม. ในการเชื่อมอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชั้นให้ติดกันได้[47] โดยสร้างจากเหล็กกล้า SKD61 ที่เป็นเหล็กกล้างานร้อนเหมาะที่จะใช้งานที่อุณหภูมิสูง และเพื่อให้หัวกวนทนทานต่อการสึกหล่อ หลังจากที่ผ่านมากระบวนการกลึงขั้นรูปเสร็จ หัวกวนจะถูกนำไปทำการชุบแข็งให้ได้ค่าความแข็ง 55- 60 HRC ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หัวกวน

## 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด หล่อเย็น และวัดอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน

### 3.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

ตามที่ได้กล่าวไว้ว่า การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดแนวตั้ง 3 แกนกึ่งอัตโนมัติ (Lagun GUM 152) ในการเชื่อม ฉะนั้นเพื่อให้หัวกวนทำการกวนให้ได้แนวขนานกับรอยต่อของชิ้นงานทั้ง 2 ชั้น ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดการเชื่อม จึงต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานให้ขนานกับแกน X ของเครื่องกัด และเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดหรือลำเอียงจึงต้องตรวจสอบความขนานของพื้นผิวที่วางชิ้นงานทั้งสองชั้นให้มีความระนาบหรือขนานกับโต๊ะงานของเครื่องกัดโดยใช้ ไดอัลเกจ (Dial Gauge) ในการตรวจสอบ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดบนเครื่องกัด

### 3.2.2 การติดตั้งชุดการหล่อเย็น

เนื่องด้วยการหล่อเย็นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยนี้อยู่ 3 ระดับ คือ ไม่มีการหล่อเย็น หล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง และหล่อเย็นแบบโครโอเจนิคส์

3.2.2.1 หล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง ในกระบวนการนี้ใช้น้ำมันตัดกลึง HIKUT W10 ผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยาหล่อเย็นดังรูปที่ 3.6 ในกระบวนการนี้ให้ชุดดูดน้ำหล่อเย็นที่ติดมากับเครื่องกัดแนวตั้งในการหล่อเย็น โดยใช้ชุดท่อพ่นน้ำหล่อเย็นพร้อมวาล์วที่ปรับได้และมีลักษณะหัวแบนขนาดรูกว้าง 5 มม. ยาว 28 มม. และมีอัตราการไหลที่ 1.5 ลิตร/นาที ระยะการหล่อเย็นสูงจากชิ้น 5 มม. และห่างจากหัวกวาน 15 มม. โดยการหล่อเย็นจะพ่นตามหลังเครื่องมือกวาน ดังรูปที่ 3.7



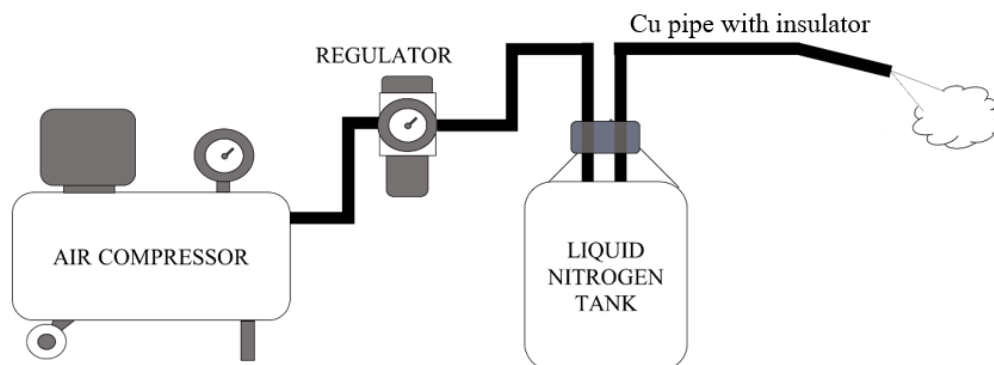
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดคุณภาพน้ำยาหล่อเย็น





รูปที่ 3.7 การติดตั้งระบบหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง

3.2.2.2 หล่อเย็นแบบโครีโอเจนิคส์ ผู้วิจัยได้ออกแบบและจัดทำเครื่องมือสำหรับหล่อเย็นด้วยวิธีการโครีโอเจนิคส์ ดังรูปที่ 3.8 แสดงระบบการหล่อเย็นแบบโครีโอเจนิคส์ ลักษณะของการทำงานคือ ปัมลมจะส่งแรงดันอากาศไปที่ถังไนโตรเจนเหลวขนาด 10 ลิตร โดยผ่านตัวควบคุมความดัน (Regulator) ให้ได้ความดัน 5 psi ตลอดการส่งความดันไปยังถังเพื่อให้ได้ค่าความดันลมที่แน่นอน และตัวกรอกอากาศที่อยู่ภายในตัวควบคุมความดันเพื่อกรองให้ อากาศที่ส่งไปยังถังไนโตรเจนเหลวมีความแห้ง เมื่ออากาศเข้าไปแทนที่ไนโตรเจนเหลวที่อยู่ในถังเก็บไนโตรเจนเหลว ส่งผลให้ไนโตรเจนเหลวที่อยู่ในถังไหลออกไปทางท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มม. ที่หุ้มด้วยฉนวน ระยะการหล่อเย็นสูงจากชั้น 5 มม. และห่างจากหัวกวน 15 มม. โดยการหล่อเย็นจะผันตามหลังเครื่องมือกวน ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ระบบการหล่อเย็นแบบโครีโอเจนิคส์



รูปที่ 3.9 การติดตั้งระบบหล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์

3.2.3 การติดตั้งชุดการวัดอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน การวัดอุณหภูมิในงานวิจัยนี้ใช้กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera: IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 ที่มีความละเอียด 240x180 Pixels ความแม่นยำ  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  หรือ  $\pm 2\%$  ค่าขอบเขตการมองเห็น  $25^{\circ}\times 19^{\circ}$  ช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่  $-20$  ถึง  $+650^{\circ}\text{C}$  จะถูกติดตั้งบนโต๊ะเครื่องกัด และตั้งค่าการทำงานของกล้องจะวัดช่วงอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ  $0$  ถึง  $650^{\circ}\text{C}$  ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 30 ภาพต่อวินาที (fps) และการบันทึกภาพเป็นแบบ Live Stream พร้อมเชื่อมสายสัญญาณของกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม FLIR เพื่อบันทึกค่า ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน

3.2.4 ความเร็วในการหมุนทวน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ความเร็วหมุนทวน 1,580 รอบ/นาาที เพื่อให้มั่นใจว่าได้ความเร็วในการหมุนทวนที่ตรงตามต้องการทางผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความเร็วรอบของเครื่องกัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ AT-6 / CEM Digital Tachometer เป็นเครื่องวัดความเร็วรอบแบบใช้แสง วัดค่าได้ช่วงการวัด 2 ถึง 99,999 รอบ/นาาที มีความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.05 เปอร์เซ็นต์ ใช้เทียบกับค่าที่แสดงบนหน้าปัดดิจิทัลของเครื่อง พบว่า เมื่อปรับความเร็วรอบที่หน้าปัดเครื่องเป็น 1,580 รอบ/นาาที ผลที่วัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบจะอยู่ที่ 1,578 ถึง 1,587 รอบ/นาาที



รูปที่ 3.11 ตรวจสอบความเร็วหมุนทวน

3.2.5 ระยะของการเคลื่อนที่แกน X Y Z ของเครื่องกัด เพื่อให้แน่นชัดหรือการลำเอียงในการทดลองและพิกัดในการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของทั้ง 3 แกนของเครื่องกัด โดยใช้ไดอัลเกจ (Dial Gauge) ในการตรวจสอบนำค่ามาเทียบกับผลการแสดงค่าบนหน้าปัดดิจิทัลของเครื่องกัด ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการตรวจระยะการเคลื่อนที่ X Y Z

อัตราป้อนในการทดลองแกน X (มม.)	0.45	0.50	0.55
อัตราป้อนที่ตรวจสอบได้ (มม.)	0.45	0.50	0.55
อัตราป้อนในการทดลองแกน Y (มม.)	0.45	0.50	0.55
อัตราป้อนที่ตรวจสอบได้ (มม.)	0.45	0.50	0.55
อัตราป้อนในการทดลองแกน Z (มม.)	0.45	0.50	0.55
อัตราป้อนที่ตรวจสอบได้ (มม.)	0.45	0.50	0.55

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป โดยมีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบไปด้วยปัจจัยขนาดของบ่ากวน 3 ระดับ คือ ขนาดบ่า 9, 12 และ 15 มม. ปัจจัยของความเร็วในการเดินเชื่อม 2 ระดับ คือ 40 และ 60 มม./นาที และปัจจัยในการหล่อเย็น 3 ระดับ คือ ไม่มีการหล่อเย็น (เชื่อมในอุณหภูมิห้อง) หล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง และหล่อเย็นแบบโครโอเจนิคส์ ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยเลือกที่จะคงที่มุมเอียงของเครื่องมือกวนที่  $3^\circ$  และความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1,580 รอบ/นาที เนื่องด้วยจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ 1,580 และ 2,220 รอบ/นาที โดยใช้เวลาการเดินเชื่อมและขนาดของบ่ากวนดังกล่าวพบว่า ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ต่างกันมีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปัจจัยของความเร็วในการเดินเชื่อมและขนาดของบ่ากวน[47]

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลอง

StdOrder	มุมเอียง (องศา)	ความเร็ว หมุน (รอบ/นาที)	ขนาดบ่า กวน (มม.)	ความเร็วในการเดิน เชื่อม (มม./นาที)	วิธีการหล่อเย็น
8	3	1,580	12	40	น้ำมันตัดกลึง
6	3	1,580	9	60	โครโอเจนิคส์
17	3	1,580	15	60	น้ำมันตัดกลึง
4	3	1,580	9	60	ไม่หล่อเย็น
18	3	1,580	15	60	โครโอเจนิคส์
3	3	1,580	9	40	โครโอเจนิคส์
13	3	1,580	15	40	ไม่หล่อเย็น
14	3	1,580	15	40	น้ำมันตัดกลึง
11	3	1,580	12	60	น้ำมันตัดกลึง
9	3	1,580	12	40	โครโอเจนิคส์
15	3	1,580	15	40	โครโอเจนิคส์
10	3	1,580	12	60	ไม่หล่อเย็น
12	3	1,580	12	60	โครโอเจนิคส์

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลอง (ต่อ)

StdOrder	มุมเอียง (องศา)	ความเร็วหมุน (รอบ/นาที)	ขนาดปากวน (มม.)	ความเร็วในการเดิน เชื่อม (มม./นาที)	วิธีการหล่อเย็น
16	3	1,580	15	60	ไม่หล่อเย็น
7	3	1,580	12	40	ไม่หล่อเย็น
5	3	1,580	9	60	น้ำมันตัดกลึง
1	3	1,580	9	40	ไม่หล่อเย็น
2	3	1,580	9	40	น้ำมันตัดกลึง

### 3.4 ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนดำเนินการทดลองนี้ จะการอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 7075 โดยผู้วิจัยได้เรียงลำดับขั้นตอนในการเชื่อมดังนี้

3.4.1 หลังจากได้เตรียมชิ้นงานทดสอบให้ได้ขนาดตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ก่อนทำการเชื่อมให้ทำความสะอาดชิ้นทดสอบด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดคราบน้ำมันต่าง ๆ ที่ติดกับชิ้นงาน

3.4.2 หลังจากที่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานตามหัวข้อที่ 3.2.1 แล้ว นำชิ้นงานจับยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึดในลักษณะต่อชน

3.4.3 เซ็ตตำแหน่งชิ้นงานเพื่อหาจุดกึ่งกลางของรอยต่อชนของวัสดุทั้ง 2 ชิ้น

3.4.4 ประกอบหัวกวนกับหัวเครื่องกัด และทำการเซตค่าระยะห่าง (ค่า Z) ที่ปลายของหัวกวนกับชิ้นงาน

3.4.5 ปรับตั้งความเร็วรอบและความเร็วเดินเชื่อมตามตารางการออกแบบการ

3.4.6 เปิดความเร็วรอบและนำหัวกวนลงมากดแช่ที่ชิ้นงาน จนได้ความลึกที่  $3.9 \pm 0.05$  มม. ปากวน สัมผัสจนเกิดความร้อนกดแช่ค้างไว้เป็นเวลาประมาณ 300 วินาที

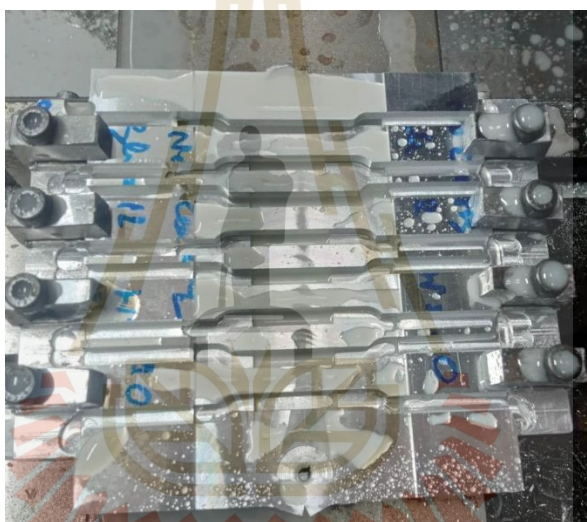
3.4.7 กรณีเชื่อมตามเงื่อนไขที่มีการหล่อเย็นให้เปิดน้ำหล่อเย็นก่อนที่เดินเชื่อมโดยอัตโนมัติตามความเร็วที่กำหนดของแต่ละเงื่อนไข

3.4.8 สิ้นสุดความยาวรอยเชื่อมยกหัวกวนและหยุดความเร็วรอบ

### 3.5 การตรวจสอบคุณสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา

#### 3.5.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง

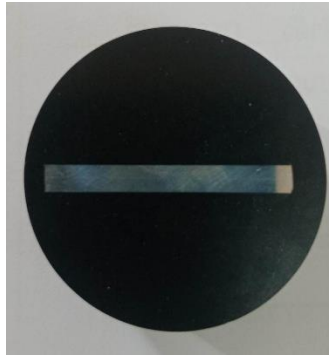
การทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมชิ้นทดสอบแรงดึงตัดตามขนาด มาตรฐาน ASTM E8 โดยตัดชิ้นงานทดสอบขวางแนวเชื่อมด้วยเครื่องกัด CNC จำนวน 4 ชิ้น ในแต่ละการทดลองสำหรับการทดสอบแรงดึง โดยบริเวณพื้นที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของชิ้นงานจะถูกตัดออกไป เนื่องจากบริเวณพื้นที่ดังกล่าว ได้รับความร้อนสะสมสูงสุดจากระยะกดล็กเสียตทาน และนำไปทดสอบจนชิ้นงานขาด โดยใช้ความเร็วทดสอบที่ 1.002 มม./นาที และสังเกตการณ์ขาดของชิ้นงาน บันทึกค่าการทดลอง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตัดชิ้นทดสอบแรงดึง

#### 3.5.2 การทดสอบความแข็ง

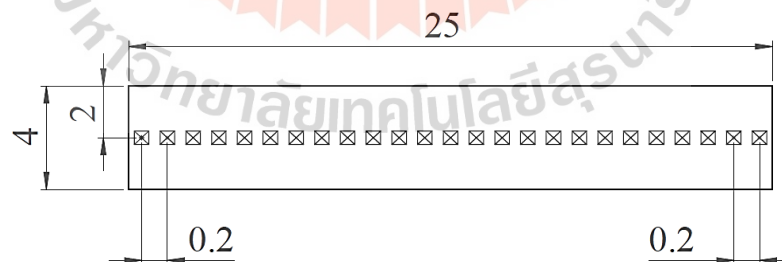
การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดชิ้นทดสอบขวางแนวเชื่อมบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.13 ในลักษณะภาคตัดขวางให้มีขนาดกว้าง 25 มม. จากนั้นนำชิ้นทดสอบนั้นไปขัดแนวเชื่อมในภาคตัดขวางด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 - 2000 จากนั้นขัดพื้นผิวมันด้วยผงอะลูมินาขนาดระหว่าง 0.05 ไมครอน โดยการทดสอบความแข็งนั้นจะใช้ไมโครวิกเกอร์ในการทดสอบด้วยเครื่อง FUTURE-TECH Model FM-800 ดังรูปที่ 3.14 โดยใช้หัวกดรูปทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา กดที่ผิวชิ้นงานดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.15 บริเวณที่ทดสอบความแข็ง

### 3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้าง

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ชิ้นทดสอบจะถูกตัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบมาขัดตามขั้นตอน การตรวจสอบโครงสร้างชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 100 200 400 600 800 1,000

1,200 และ 2,500 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินาขนาด 0.05 ไมครอน และนำชิ้นงานไปล้างแอลกอฮอล์แล้วนำไปกัดกรด Keller's reagent โดยมีกรดไฮดรอฟลูออริกที่ปริมาณ 1 มิลลิลิตร กรดไฮดรอครอลิก 1.5 มิลลิลิตร กรดไนตริก 2.5 มิลลิลิตร และน้ำดีไอ (DI) 95 มิลลิลิตร จุ่มแช่เป็นเวลา 15 วินาที สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในส่วนต่างๆ ของแนวเชื่อมรวมถึงลักษณะการขาดหรือบริเวณที่เกิดการรอกหักจากการหดขอบแรงดึงของแต่ละเงื่อนไขของแนวเชื่อมจะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ Leica M205FCA ที่กำลังขยาย 5X ดังรูปที่ 3.16 เพื่อสังเกตและตรวจสอบรอยตำหนิจุดบกพร่องของแนวเชื่อมนั้นๆ ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ ZEISS Axioscope 5 FL ที่กำลังขยาย 20X และ 50X สำหรับการตรวจสอบขนาดของเกรนในแต่ละพื้นที่ของแนวเชื่อมดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์ Leica M205FCA



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์ ZEISS Axioscope 5 FL



### 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อดำเนินการทดลองเชื่อมชิ้นงานทดลองและนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของแนวเชื่อมและโครงสร้างเสร็จ จึงนำค่าที่ได้มาศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นและปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม Minitab ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและง่ายต่อการใช้งานมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อความเร็วในการวิเคราะห์ผล ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าวในบทต่อไป



## บทที่ 4

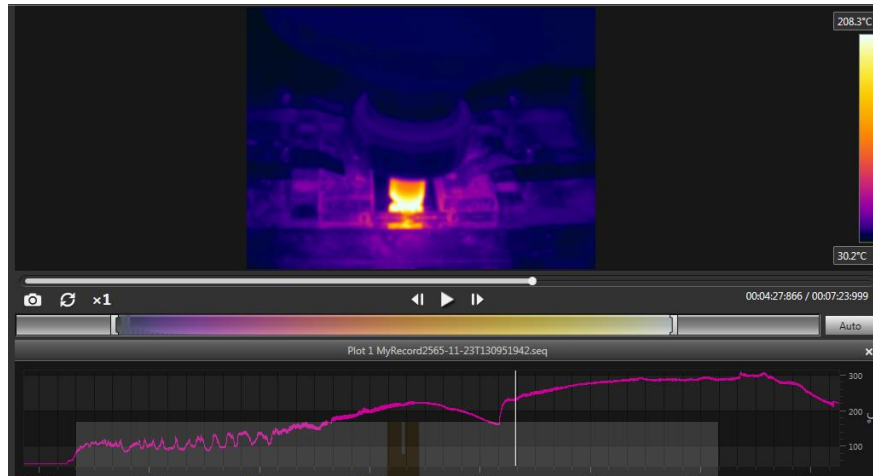
### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอน จึงสามารถเก็บรวบรวมข้อมูล ผลการวิเคราะห์โดยมีผลการทดลองและขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

- 4.1 ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 4.2 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะพื้นผิวของแนวเชื่อม
- 4.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึง
- 4.4 ความแข็งของแนวเชื่อม
- 4.5 ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อม
- 4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม
- 4.7 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

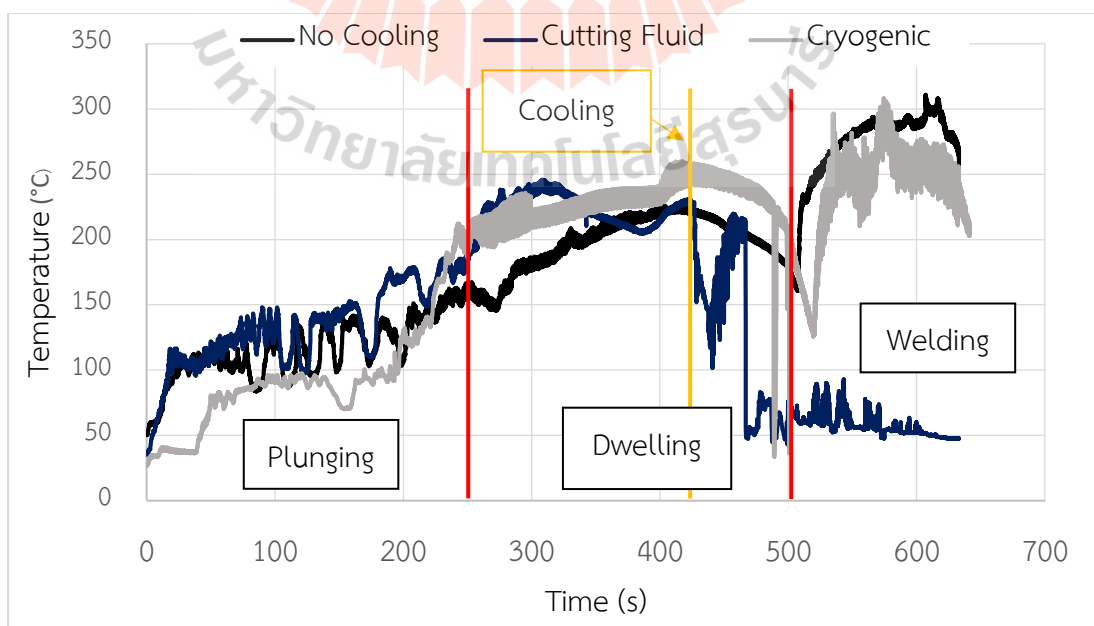
#### 4.1 ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นโดยหลักแล้วจะเกิดจากการเสียดทานทางกลระหว่างบ่ากวนกับชิ้นงานเชื่อม และหัวกวนกับชิ้นงานเชื่อม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดของบ่ากวน ความเร็วรอบหมุนกวน และความเร็วเดินเชื่อมจะมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น เนื่องด้วยการวิจัยครั้งนี้ ได้มีการใช้สารหล่อเย็นที่ต่างกันในการหล่อเย็นแนวเชื่อมในระหว่างกระบวนการเชื่อม เพื่อศึกษาผลความร้อนของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีการหล่อเย็นในอุณหภูมิห้องหรือไม่มีการหล่อเย็น การหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง การหล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์ ขนาดของบ่ากวนและความเร็วเดินเชื่อม ผู้วิจัยได้ใช้กล้องบันทึกภาพความร้อนอินฟราเรดในการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม เทคนิคนี้ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถเห็นและวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมที่เย็นตัวในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

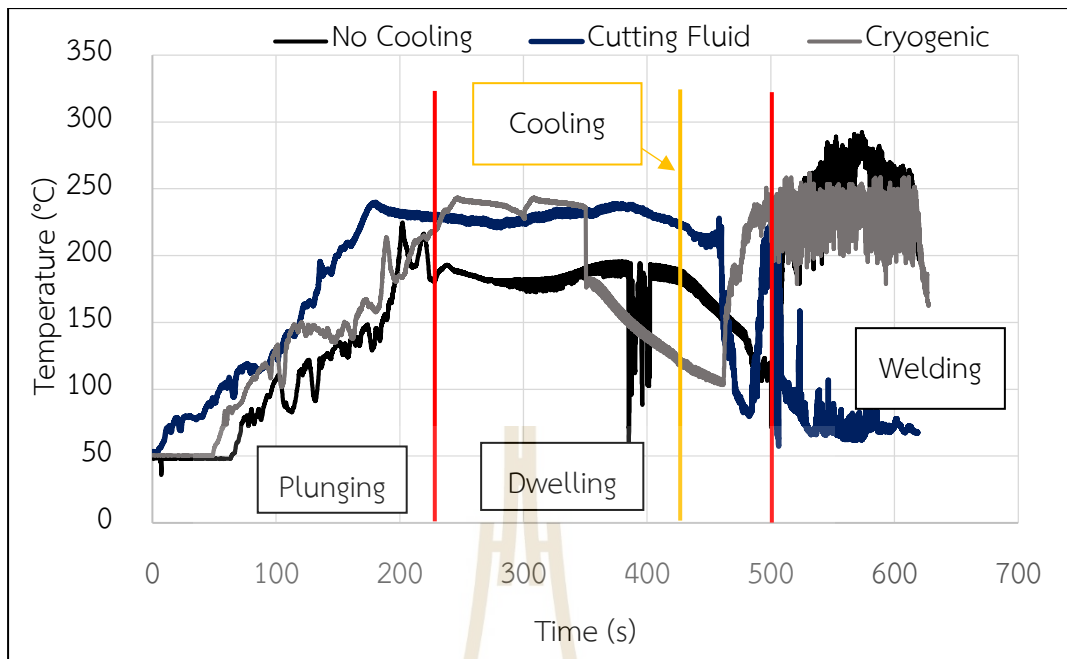


รูปที่ 4.1 ภาพความร้อนของชิ้นงานเชื่อมความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม.  
ไม่หล่อเย็น

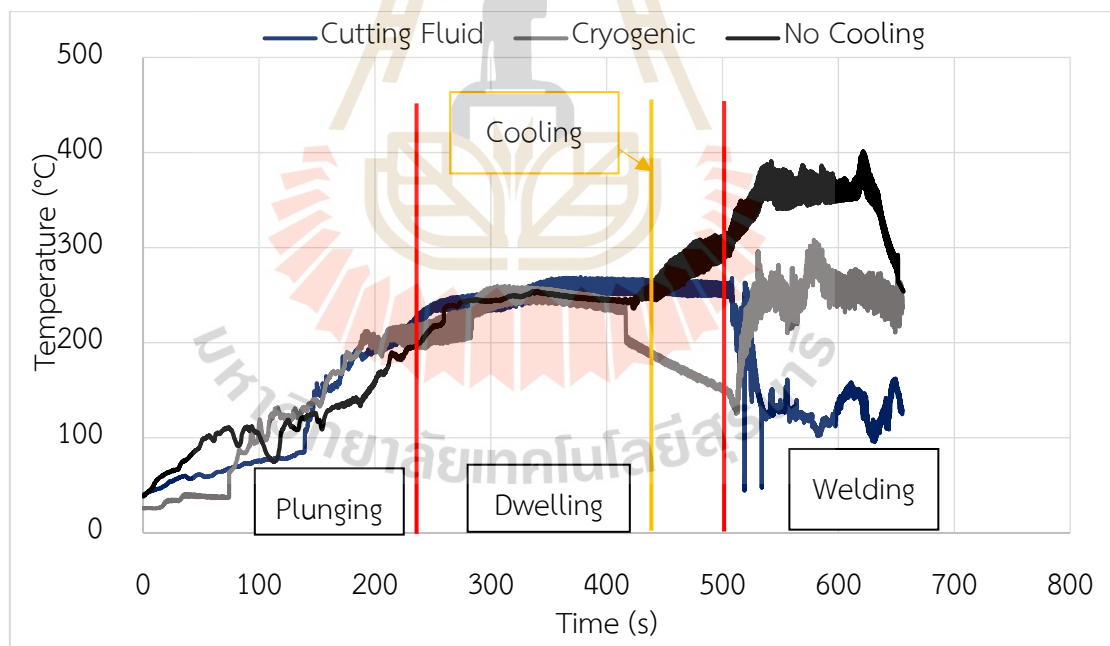
จากภาพที่ 4.1 ที่เป็นภาพความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมของชิ้นงานที่ได้จากความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. ไม่มีการหล่อเย็น สังเกตได้ว่าความร้อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อกดหัวกวนลงบนชิ้นงานเชื่อมและความร้อนจะเพิ่มขึ้นเร็วขึ้นเมื่อปากกวนเสียดทานกับชิ้นงาน หลังจากนั้น ความร้อนจะคงที่และค่อย ๆ ลดลง และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อทำการเดินเชื่อมและอุณหภูมิจะคงที่และเมื่อยกเครื่องมือเชื่อมออกจากชิ้นงานอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลงจนถึงอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความร้อนของขนาดปากกวน 9 มม.และความเร็วเดินเชื่อม 40 มม./นาที



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความร้อนของขนาดบ่ากวน 12 มม.และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความร้อนของขนาดบ่ากวน 15 มม.และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที

ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ เมื่อกดหัวกวน (Prob) ลงบนชิ้นงานเชื่อม (Plunging) และเมื่อบ่ากวนเกิดการเสียดทานกับชิ้นงาน อุณหภูมิจะเพิ่มอีกหลังจากนั้น ถ้าสังเกตจากรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 ชิ้นงานที่ไม่มีการหล่อเย็นจะเห็น




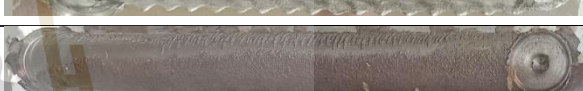

ได้ว่าเมื่อทำการป้อนความเร็วเดินเชื่อมหรือทำการเดินเชื่อมอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิจะคงที่และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อสิ้นสุดการเชื่อมหรือเมื่อยกเครื่องมือเชื่อมออกจากชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) เมื่อทำการหล่อเย็นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วและจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อป้อนความเร็วเดินเชื่อม และการหล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) เมื่อทำการหล่อเย็นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันกับการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) แต่เมื่อป้อนความเร็วเดินเชื่อมอุณหภูมิลบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ยังคงมีความร้อนน้อยกว่าการเชื่อมแบบไม่มีการหล่อเย็น

## 4.2 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะพื้นผิวของแนวเชื่อม

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมเกรด Al7075 โดยมีสารหล่อเย็นที่ต่างกัน คือ หล่อเย็นในอุณหภูมิห้อง น้ำมันตัดกลึง และไนโตรเจนเหลว ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1,580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 และ 60 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกและขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. มีลักษณะดังนี้



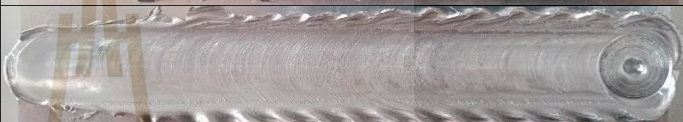
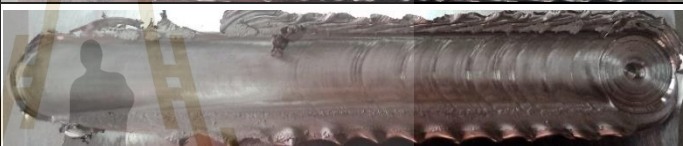


4.2.1 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดปากกวน 9 มม. ที่มีความเร็วในการเดินเชื่อมและสารหล่อเย็นที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ทุกการทดลองเชื่อมที่เชื่อมโดยใช้ปากกวนขนาด 9 มม. ตามพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้แล้ว จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพนั้นทุกเงื่อนไขของการเชื่อมสามารถให้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์โดยไม่มีจุดบกพร่องหรือรอยแหวกของแนวเชื่อม เกิดครีบบากบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) และเกิดครีบล็กเล็กน้อยที่บริเวณด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side ; RS) ลักษณะเหล่านี้เกิดจากการกดลึกลงของปากกวนและเกิดจากการไหลตัวของวัสดุตามทิศทางการหมุนของหัวกวน แนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นหรือเย็นตัวในอุณหภูมิห้องมีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีผิวเรียบ มันวาว แนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยมันหล่อเย็นจะมีลักษณะผิวขรุขระมากกว่าที่หล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวดังตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายกับงานของ R. Ruzbehani และคณะ [31] ที่ทำการเชื่อมใต้น้ำ

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดบ่ากวาน 9 มม.

ขนาดบ่ากวาน	ความเร็วเดินเชื่อม (มม./นาที)	สารหล่อเย็น	ลักษณะของรอยเชื่อม
9	40	อุณหภูมิห้อง	
		น้ำมันตัดกลึง	
		ไครโอเจนิคส์	
9	60	อุณหภูมิห้อง	
		น้ำมันตัดกลึง	
		ไครโอเจนิคส์	







4.2.2 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดบ่ากวาน 12 มม. ที่มีความเร็วในการเดินเชื่อมและสารหล่อเย็นที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ทุกการทดลองเชื่อมที่เชื่อมโดยใช้บ่ากวานขนาด 12 มม. ตามพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ นั้น จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพนั้น ทุกเงื่อนไขของการเชื่อมสามารถให้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์โดยไม่มีจุดบกพร่องหรือรอยแหวกของแนวเชื่อม เกิดครีบมากบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) และเกิดครีบเล็กน้อยที่บริเวณด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side ; RS) ขนาดของครีบมากกว่าของบ่ากวานขนาด 9 มม. และบริเวณด้านรีเทรตติ้งไซด์ของบ่ากวานขนาด 12 มม. มีครีบมากของบ่ากวานขนาด 9 มม. ลักษณะผิวของแนวเชื่อมคล้ายกับบ่ากวานขนาด 9 มม.

ตารางที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดปากกวน 12 มม.

ขนาดปากกวน	ความเร็วเดินเชื่อม (มม./นาที)	สารหล่อเย็น	ลักษณะของรอยเชื่อม
12	40	อุณหภูมิห้อง	
		น้ำมันตัดกลึง	
		โครโอเจนิคส์	
12	60	อุณหภูมิห้อง	
		น้ำมันตัดกลึง	
		โครโอเจนิคส์	

4.2.3 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดปากกวน 15 มม. ที่มีความเร็วในการเดินเชื่อมและสารหล่อเย็นที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ทุกการทดลองเชื่อมที่เชื่อมโดยใช้ปากกวนขนาด 12 มม. ตามพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้นั้น จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพนั้น ทุกเงื่อนไขของการเชื่อมสามารถให้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์โดยไม่มีจุดบกพร่องหรือรอยแหวกของแนวเชื่อม เกิดครีบมากบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) และเกิดครีบเล็กน้อยที่บริเวณด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side ; RS) ขนาดของครีบมากกว่าของปากกวนขนาด 9 และ 12 มม. และบริเวณด้านรีเทรตติ้งไซด์ของปากกวนขนาด 15 มม. มีครีบมากของปากกวนขนาด 9 และ 12 มม. ลักษณะผิวของแนวเชื่อมคล้ายกับปากกวนขนาด 9 และ 12 มม.

ตารางที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมที่มีขนาดบ่ากวน 15 มม.

ขนาดบ่ากวน	ความเร็วเดินเชื่อม (มม./นาที)	สารหล่อเย็น	ลักษณะของรอยเชื่อม
12	40	อุณหภูมิห้อง	
		น้ำมันตัดกลึง	
		ไครโอเจนิคส์	
12	60	อุณหภูมิห้อง	
		น้ำมันตัดกลึง	
		ไครโอเจนิคส์	

#### 4.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึง

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (Full factorial design) ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 2 ระดับ ได้แก่ 40 และ 60 มม./นาที ขนาดบ่ากวน (Shoulder diameter) มี 3 ระดับ ได้แก่ 9, 12 และ 15 มม. และสารหล่อเย็น (Cooling media) มี 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง น้ำมันตัดกลึง และไนโตรเจนเหลว ดังตารางที่ 4.4 โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการทดสอบความแข็งแรงดึงผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งผลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยมาจากค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวน



ตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบจึงได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ปัจจัยในการทดลอง

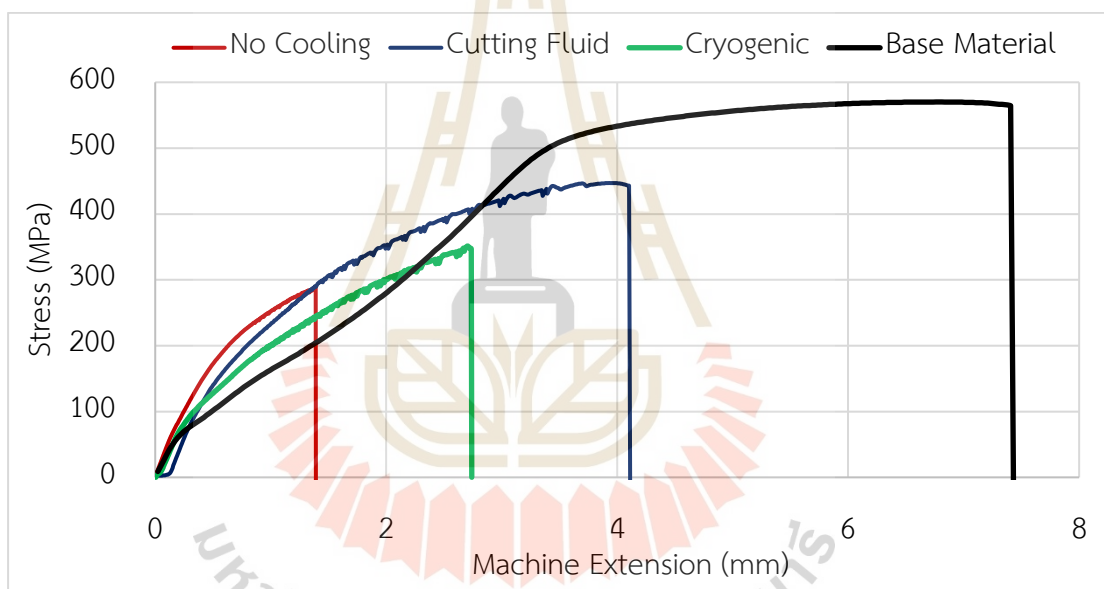
ปัจจัย	ระดับ			หน่วย
	1	2	3	
ความเร็วเดินเชื่อม	40	60		mm/min
ขนาดปากกวน	9	12	15	mm
สารหล่อเย็น	No cooling	Cutting fluid	Cryogenic	-
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	1,580			rpm

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงดึง

RunOrder	Welding Speed	Shoulder Diameter	Cooling Media	Tensile Strength			
				1	2	3	เฉลี่ย
1	60	15	Cutting fluid	446.45	444.73	448.38	446.52
2	40	9	Cutting fluid	424.91	423.61	428.52	425.68
3	60	15	No Cooling	399.32	406.43	407.2	404.31
4	40	15	No Cooling	379.93	378.44	374.19	377.52
5	60	9	Cutting fluid	447.06	447.48	433.3	442.61
6	60	12	No Cooling	383.64	397.71	399.53	393.62
7	60	9	Cryogenic	351.4	351.38	358.45	353.74
8	40	12	Cutting fluid	434.41	441.76	448.95	441.70
9	40	9	No Cooling	376.22	359.38	364.05	366.55
10	40	12	No Cooling	381.42	382.12	376.6	380.04
11	40	15	Cryogenic	372.24	377.45	375.03	374.90
12	60	12	Cryogenic	412.01	415.06	411.06	412.71
13	60	9	No Cooling	288.35	288.58	285.61	287.51

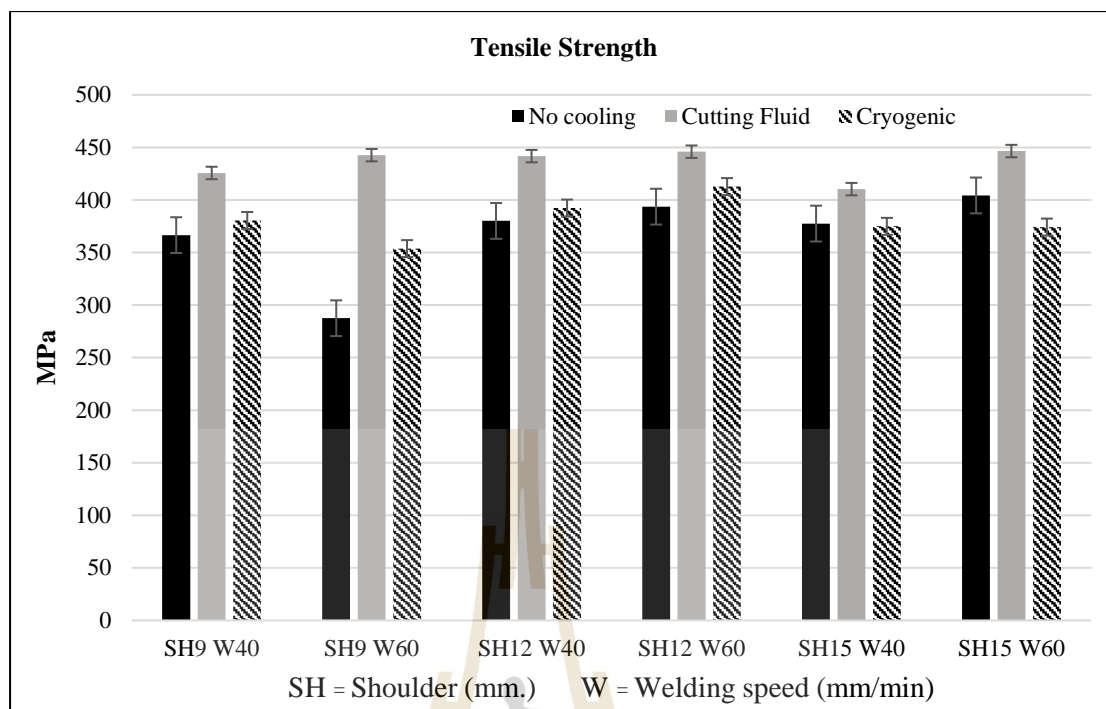
ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงดึง (ต่อ)

RunOrder	Welding Speed	Shoulder Diameter	Cooling Media	Tensile Strength			
				1	2	3	Average
14	40	12	Cryogenic	392.7	390.24	393.98	392.3067
15	40	15	Cutting fluid	404.52	411.18	415.26	410.32
16	40	9	Cryogenic	384.14	379.42	377.83	380.4633
17	60	12	Cutting fluid	448.4	444.15	445.24	445.93
18	60	15	Cryogenic	373.72	370.75	378.17	374.2133



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงและระยะยืดของชิ้นงานเชื่อมด้วยขนาดปากกวน 9 มม. และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที

จากรูปที่ 4.5 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรง (Stress) และค่าระยะยืด (Machine Extension) ของชิ้นงานเชื่อมด้วยขนาดปากกวน 9 มม. และความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที เมื่อเทียบกับค่าของวัสดุฐานแล้วจะเห็นได้ว่าทุกแนวเชื่อมให้ค่าที่ต่ำกว่าวัสดุฐานทั้งค่าการรับแรงต่อพื้นที่และค่าความเครียด (ค่าการยืดตัว) แล้วเมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขของการหล่อเย็นแล้ว ชิ้นงานที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) จะมีค่าการรับแรงต่อพื้นที่และค่าความเครียดได้มากที่สุด ซึ่งจากรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นงานที่รับแรงได้สูงก็จะทำให้ค่าความเครียดเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

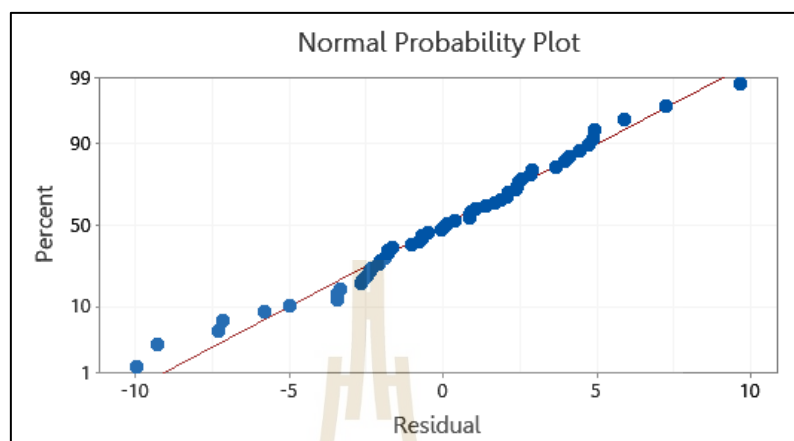


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบ กวนของแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM-E8M จากรูปที่ 4.6 เป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งถ้าดูจากรูปเงื่อนไขในการเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงจะให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมสูงกว่าแนวเชื่อมเชื่อมที่เย็นตัวในอุณหภูมิห้องและหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวอาจเป็นเพราะการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงลดอุณหภูมิในขณะที่เชื่อมได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 จึงทำให้แนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงมีค่าที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ R. Ruzbehani และคณะ[31] ที่ได้ทำการเชื่อมที่ความเร็วหมุนกวน 800 และ 1,250 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 25, 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มม./นาที โดยหล่อเย็นในอุณหภูมิห้องและหล่อเย็นโดยการเชื่อมใต้น้ำ สรุปได้ว่า แนวเชื่อมที่เชื่อมใต้น้ำให้ความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุกเงื่อนไขที่ทำการเชื่อมเหมือนกัน ไม่เพียงเท่านั้น Chaitanya และคณะ [48] ที่ได้ทำการเชื่อมบนอะลูมิเนียม 7039 ที่มีการหล่อเย็นด้วยแรงดันลม ไนโตรเจนเหลว และน้ำ ได้สรุปในทางเดียวกันว่าแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าที่มีการหล่อเย็นด้วยแรงดันลมและไนโตรเจนเหลว

4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)  
การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูล โดยใช้โปรแกรมทาง สถิติ Minitab

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยทำการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งได้ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ

เพื่อเลือกสถิติที่จะใช้ในการทดสอบข้อมูลต่อไป สำหรับการทดสอบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติซึ่งจากรูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติจะเห็นได้ว่า ค่าส่วนตกค้ำนั้น มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ซึ่งลักษณะนี้สามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้ำมีการแจกแจงแบบปกติ

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง

หลังจากได้ผลการทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อมแต่ละเงื่อนไขการเชื่อมแล้วนำผลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ( $\alpha = 0.05$ ) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 4.6

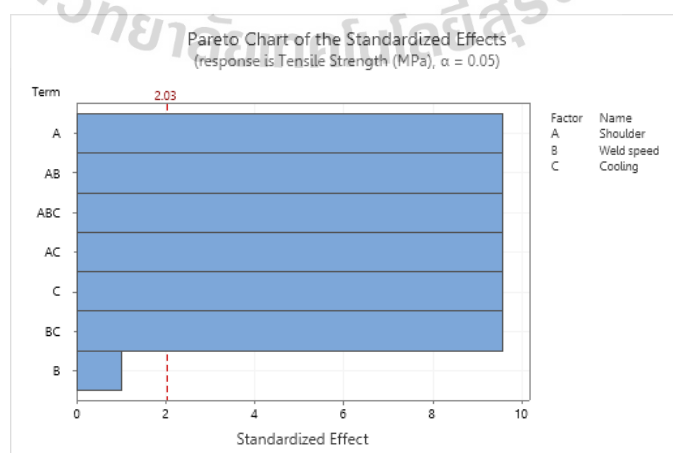
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	80770.3	4751.2	209.17	0
Linear	5	56925.2	11385	501.23	0
Shoulder	2	11231.6	5615.8	247.24	0
Weld speed	1	22.8	22.8	1	0.323
Cooling	2	45670.8	22835.4	1005.35	0
2-Way Interactions	8	18012.1	2251.5	99.12	0

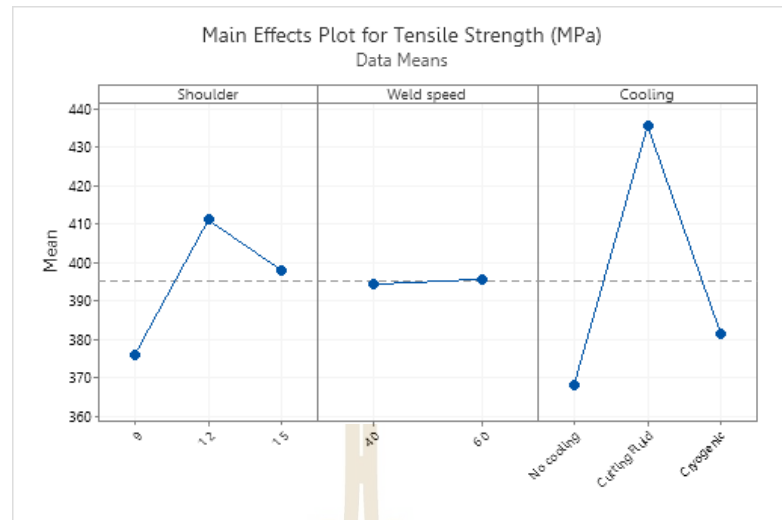
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Shoulder*Weld speed	2	6592.8	3296.4	145.13	0
Shoulder*Cooling	4	9025.3	2256.3	99.34	0
Weld speed*Cooling	2	2394	1197	52.7	0
3-Way Interactions	4	5833	1458.3	64.2	0
Shoulder*Weld speed*Cooling	4	5833	1458.3	64.2	0
Error	36	817.7	22.7		
Total	53	81588			

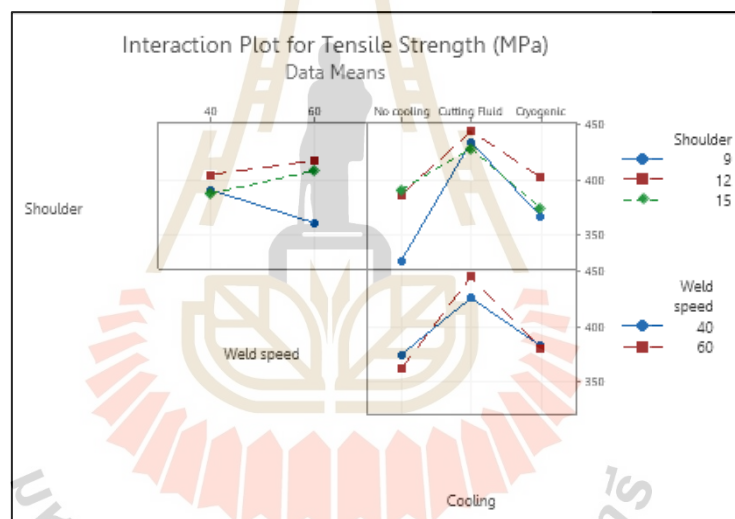
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึงดังตารางที่ 4.6 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ มีเกณฑ์การตัดสินใจ คือ ถ้าค่า P-Value ของปัจจัยนั้นๆ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ปัจจัยดังกล่าวถือว่าส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง แต่ถ้าเกิดว่ามีค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยเหล่านั้นอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึง แต่ส่งผลน้อยหรือจะพูดว่าไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ฉะนั้นจากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 ได้แสดงให้เห็นว่าสารหล่อเย็นและขนาดปากกวนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ คือ ความเร็วเดินเชื่อม ในส่วนของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัยนั้นส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงทั้งหมด



รูปที่ 4.8 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.9 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึง



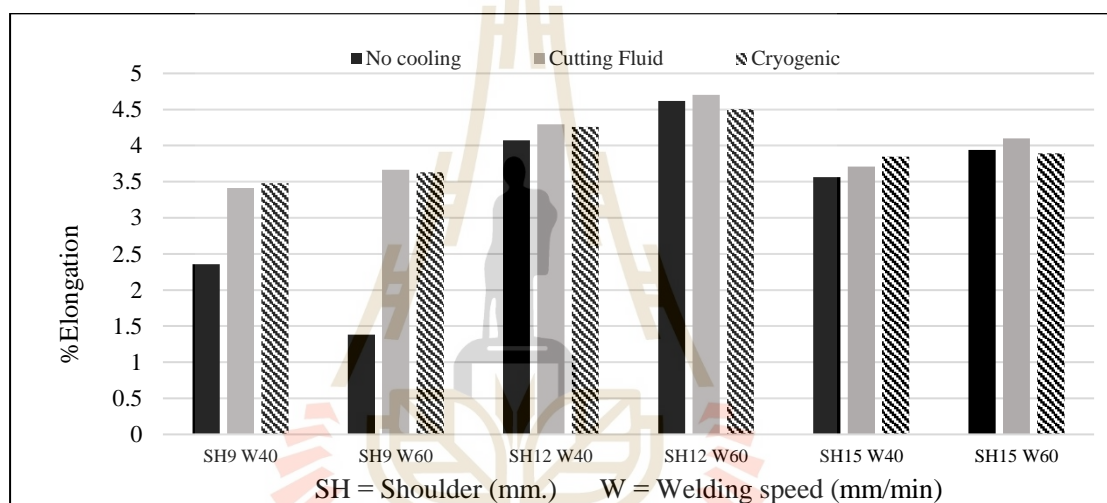
รูปที่ 4.10 แผนภาพอิทธิพลของปัจจัยร่วม ในการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

จากผลของการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้ง 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed), ขนาดบ่าควน (Shoulder Diameter) และสารหล่อเย็น (Cooling Media) จากรูปที่ 4.9 ที่แสดงถึงอิทธิพลหลัก พบว่า ความชันของปัจจัยหลักของความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มีค่าเป็นบวก หมายความว่า เมื่อความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่สังเกตจากเส้นได้ว่าความชันของเส้นนั้นมีความชันไม่มากหรืออาจพูดได้ว่าความเร็วเดินเชื่อมที่ 40 และ 60 มม./นาที ในระดับความเร็วนี้แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ซึ่งเป็นไปตามงานของ Zhang และคณะ[28] ที่บอกว่าความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ในส่วนของขนาดบ่านั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ขนาดบ่าที่ใหญ่ขึ้นส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งแล้ว

จะลดลง และสารหล่อเย็นนั้นส่งผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดคือ การหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงจะมีอิทธิพลสูงมากต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมรองลงมาคือการหล่อเย็นแบบไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) หรือการหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว และไม่มีหล่อเย็น ตามลำดับ

#### 4.3.3 ความยืดหยุ่นของแนวเชื่อม

ค่า %Elongation สูงในแนวเชื่อมเสียตทานแบบกวนแสดงถึงความยืดหยุ่นของแนวเชื่อมซึ่งสามารถทนต่อการยืดหยุ่นได้ดีเมื่อมีการปรับเปลี่ยนความยาว ค่าที่สูงใน %Elongation หมายความว่าแนวเชื่อมมีความยืดหยุ่นมาก สามารถรับแรงกระแทกได้โดยไม่เกิดการแตก อีกทั้งยังสามารถรับความสั่นสะเทือนได้ดีเนื่องจากความยืดหยุ่น

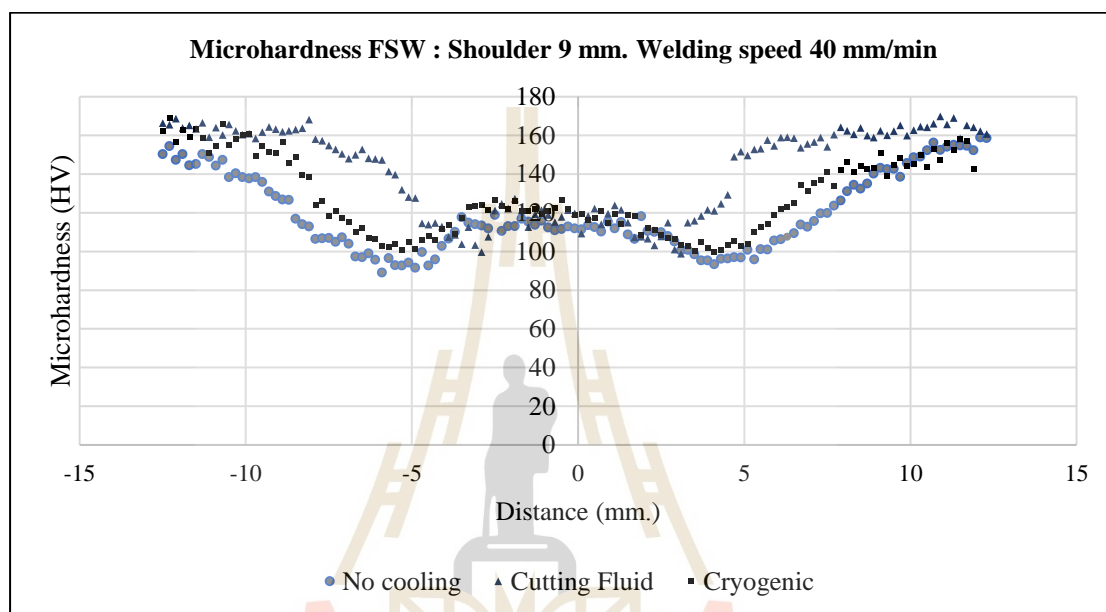


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของแนวเชื่อม

จากรูปที่ 4.11 ที่แสดงผลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นหรือ %Elongation ของแนวเชื่อมสามารถสังเกตได้ว่าแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) มีค่า %Elongation ที่สูงกว่าแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็น หมายความว่าแนวเชื่อมดังกล่าวมีความยืดหยุ่นมากกว่า เมื่อพิจารณาแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า %Elongation มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าค่า %Elongation ยังเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในกระบวนการเชื่อมแนวเชื่อมจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิในพื้นที่ที่กวน ดังนั้น การใช้น้ำมันตัดกลึงและไครโอเจนิคส์ในกระบวนการหล่อเย็นนั้นช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของแนวเชื่อมได้ดีกว่าแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็น

#### 4.4 ความแข็งของแนวเชื่อม

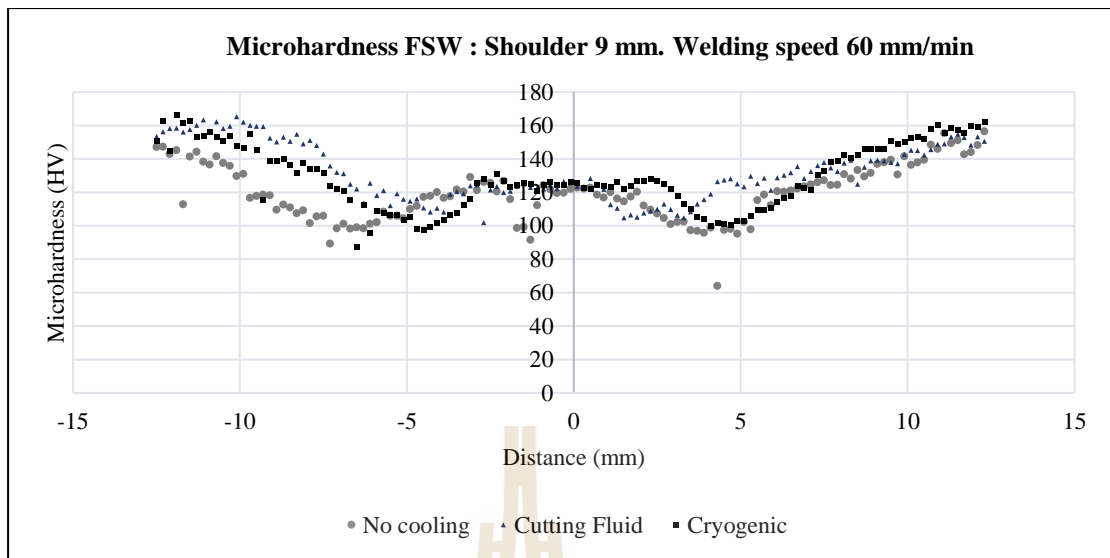
การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน ได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยทดสอบบนพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อมและทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ตามมาตรฐาน ASTM E384 – 17 โดยรอยกดมีระยะห่างเท่ากับ 0.2 มม. เพื่อให้เห็นความแข็งในแต่ละพื้นที่ของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเชื่อม 40 มม./นาที

จากรูปที่ 4.12 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเชื่อม 40 มม./นาที ที่มีสารหล่อเย็นที่ต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งในพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) ตลอดจนถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงมีค่าความแข็งที่มากกว่าแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์และไม่มีการหล่อเย็นตามลำดับ โดยที่บริเวณพื้นที่กวน (NZ) ของแต่ละแนวเชื่อมนั้นมีค่าความแข็งที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะเท่ากัน ทั้งนี้ค่าความแข็งในพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) อาจมีผลมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการเชื่อม ซึ่งจากรูปที่ 4.2 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงนั้นมีค่าต่ำกว่า ซึ่งนั่นอาจหมายความว่าน้ำมันตัดกลึงสามารถระเหยความร้อนได้ดีกว่า จึงทำให้บริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ได้รับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าหรือพื้นที่ดังกล่าวนี้ได้มีการเย็นตัวที่เร็วกว่าจึงทำให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงสูงกว่าแนวเชื่อมที่มีที่ทำการหล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์และไม่มีการหล่อเย็นตามลำดับ





รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเชื่อม 60 มม./นาทึ

จากรูปที่ 4.13 ที่แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเชื่อม 60 มม./นาทึ ของแต่ละพื้นที่ของแนวเชื่อมที่มีสารหล่อเย็นที่ต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งของพื้นที่ต่างๆ ของแต่ละแนวเชื่อมนั้นค่าความแข็งไปทางเดียวกันกับค่าความแข็งของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเชื่อม 40 มม./นาทึ หรือรูปที่ 4.11 เพียงแต่นำแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงและโครโคเจนิคส์ในพื้นที่กระตบร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่กระตบร้อน (HAZ) มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามค่าของพื้นที่ต่างๆ แข็งของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงยังคงให้ค่าความแข็งที่มากกว่าแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยโครโคเจนิคส์และแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นตามลำดับ

จากการค่าความแข็งของแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ถึงแม้จะมีการหล่อเย็นหรือไม่มีการหล่อเย็นในพื้นที่กวน (NZ) ของแต่ละแนวเชื่อมก็ยังมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Fratini และคณะ[17] ที่ได้ทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและมีการหล่อเย็นด้วยน้ำและไม่มีการหล่อเย็น โดยได้อธิบายไปในทางเดียวกันว่าแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นและไม่มีการหล่อเย็นถึงแม้ในพื้นที่กระตบร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่กระตบร้อน (HAZ) จะมีค่าความแข็งที่ต่างกันแต่ในพื้นที่กวน (NZ) กลับมีความแข็งที่เท่ากัน Chaitanya และคณะ[48] ได้อธิบายว่าการหล่อเย็นทำให้พื้นที่กระตบร้อนนั้นแคบลง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความแข็งในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็น

#### 4.5 ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อม

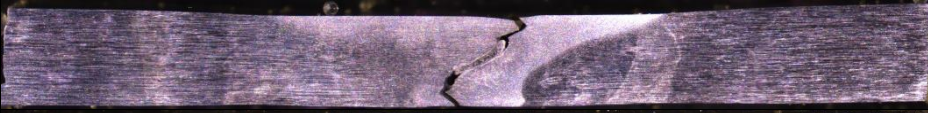

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้ทำการเชื่อมของแต่ละเงื่อนไขต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ นั้น เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการแตกหักหรือจุดที่แตกหักของแนวเชื่อมในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งตำแหน่งที่แตกหักนั้นอาจเป็นสิ่งบ่งบอกได้ว่าพื้นที่ของแต่ละพื้นที่ของแนวเชื่อมนั้นมีสมบัติทางกลแตกต่างกันรวมไปโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่นั้นๆ

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที

ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	
ไม่หล่อเย็น	
น้ำมันตัดกลึง	
โครโอเจนิคส์	

จากตารางที่ 4.7 ที่เป็นลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มม./นาที สังเกตได้ว่าตำแหน่งของการแตกหักของทั้ง 3 แนวเชื่อม เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) ซึ่งเป็นช่วงรอยต่อระหว่างพื้นที่ที่กวนและพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล ลักษณะการแตกหักของแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและแนวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์มีการแตกหักเป็นเส้นตรงตามเขตของพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าความแข็งดังรูปที่ 4.12 ที่แสดงให้เห็นว่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกลของแนวเชื่อมดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าพื้นที่ที่กวน จึงอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมบริเวณดังกล่าว ในส่วนของการแตกหักของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงถึงแม้จะแตกหักที่บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกลแต่ลักษณะของเส้นการแตกหักตัดเฉียงไปที่บริเวณพื้นที่ที่กวนด้วยนั้นอาจเป็นเพราะค่าความแข็งในพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกลและพื้นที่ที่กระทบร้อนมีค่าความแข็งสูง

ตารางที่ 4.8 ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 12 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที

ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 12 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	
ไม่หล่อเย็น	
น้ำมันตัดกลึง	
โครโอเจนิคส์	

จากตารางที่ 4.8 ที่เป็นลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 12 มม. ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มม./นาที สังเกตได้ว่าตำแหน่งของการแตกหักของแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและแนวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์ เกิดการแตกหักที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) ซึ่งจากการทดสอบแข็งแรงดึงทั้ง 3 ชิ้น ทั้งแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและแนวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์ก็เกิดการแตกหักที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน แต่การแตกหักนั้นเกิดขึ้นทั้งด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) ในส่วนของการแตกหักของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงนั้น เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่กวนทั้ง 3 ชิ้นของการทดสอบแข็งแรงดึง

ตารางที่ 4.9 ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 15 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที

ลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 15 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที	
ไม่หล่อเย็น	
น้ำมันตัดกลึง	
โครโอเจนิคส์	

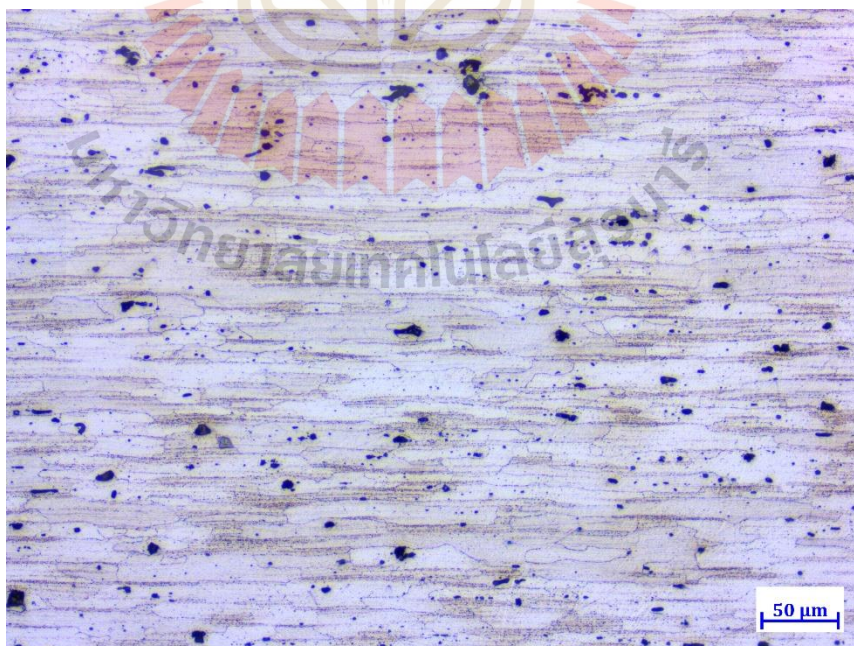
จากตารางที่ 4.9 ที่เป็นลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมขนาดบ่า 15 มม. ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มม./นาที สังเกตได้ว่าตำแหน่งของการแตกหักของแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและแนวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์ เกิดการแตกหักที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) ซึ่งจากการทดสอบแข็งแรงดึงทั้ง 3 ชิ้น ทั้งแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและแนวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์ก็เกิดการแตกหักที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน แต่การแตกหักนั้นเกิดขึ้นทั้งด้าน

แอดวานซิงไซด์ไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) เช่นเดียวกันกับของแนวเชื่อมขนาดบ่า 12 มม. ในส่วนของการแตกหักของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงนั้น เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่กวนทั้ง 3 ชั้น ของการทดสอบแรงดึง

จากภาพโครงสร้างมหภาคลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นนั้นจุดที่แตกหักนั้นเป็นไปตามของ Fratini และคณะ[17] ที่ได้อธิบายว่าลักษณะของการแตกหักของแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นเกิดการแตกหักบริเวณพื้นที่กระทบร้อนและเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกล ส่วนชิ้นงานที่มีการหล่อเย็นนั้นก็เกิดการแตกหักที่บริเวณพื้นที่กวนเช่นเดียวกัน

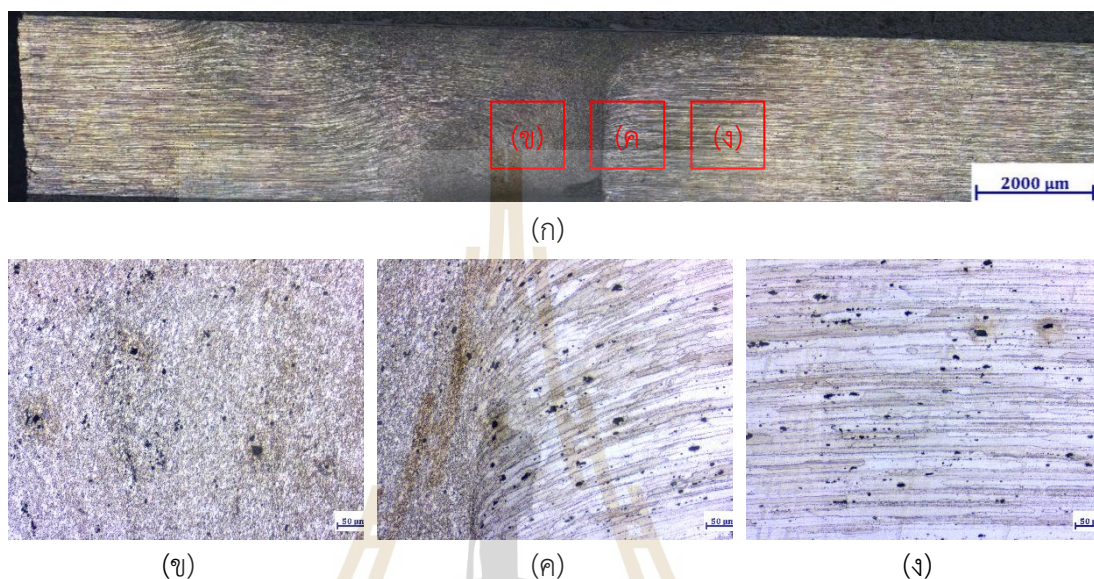
#### 4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้ทำการเชื่อมของแต่ละเงื่อนไขต่างๆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลคือ สารหล่อเย็น ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเลือกแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยขนาดบ่ากวน 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ที่ไม่มีการหล่อเย็น หล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง และหล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์ มาทำการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม และเพื่อแสดงพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ) และพื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างของวัสดุฐาน



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075

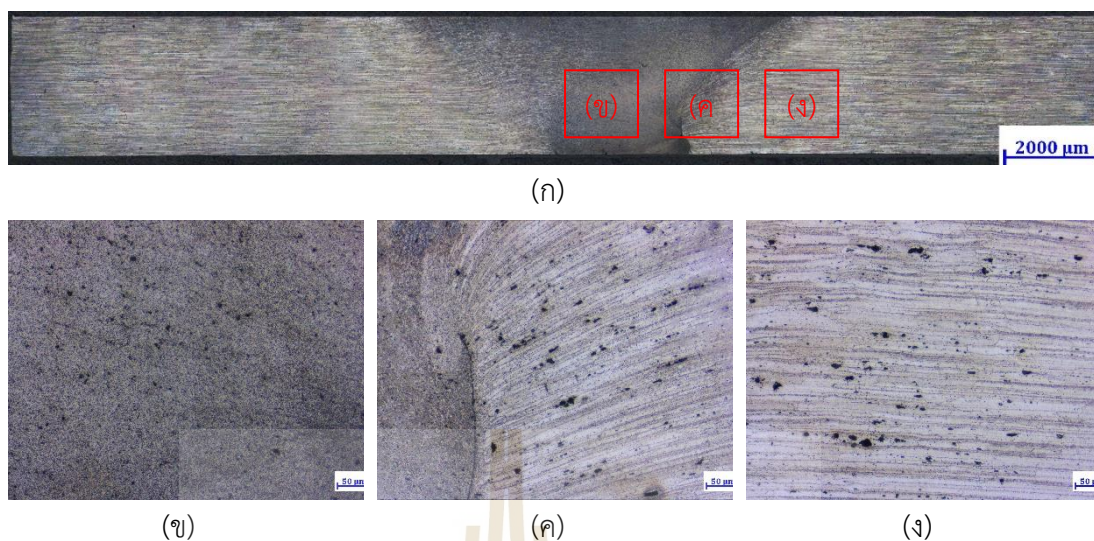
จากภาพที่ 4.14 เป็นภาพโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หรือวัสดุฐานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ โดยไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ในภาพซึ่งประกอบไปด้วยรูปร่างของเกรนในลักษณะที่ไม่คงรูปหรือมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปและขนาดของเกรนนั้นมีหลากหลายอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12 ถึง 19 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับทิศทางการรีดขึ้นรูปของวัสดุ



รูปที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที่ ไม่มีการหล่อเย็น

- (ก) โครงสร้างมหภาค
- (ข) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กวน (NZ)
- (ค) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ)
- (ง) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (HAZ)

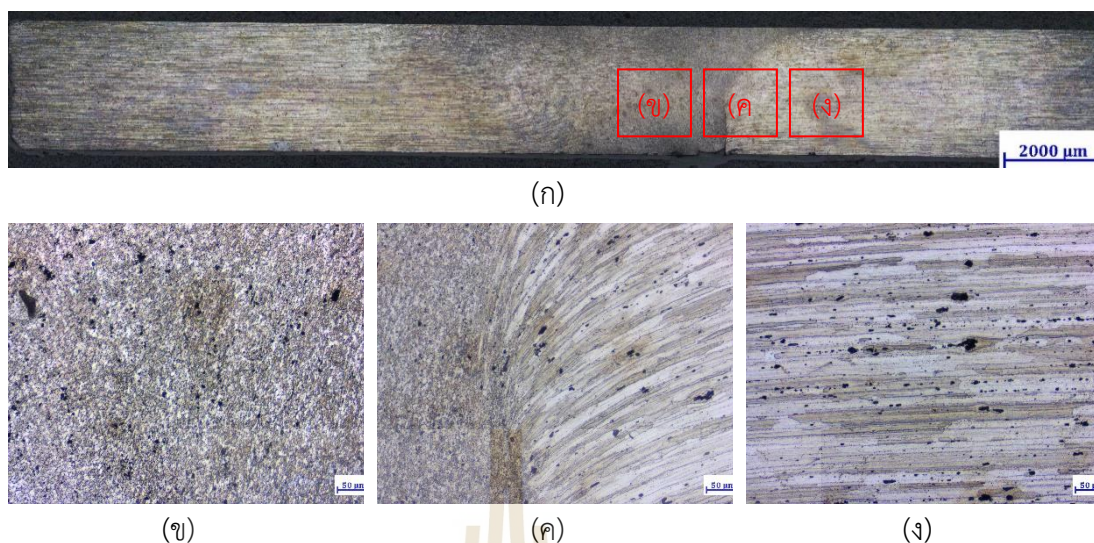
จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที่ ที่ไม่มีการหล่อเย็น จากรูปที่ 4.15 (ก) ที่แสดงโครงสร้างมหภาคนั้น พบช่องว่างที่บริเวณตรงมุมหัวกวนด้านล่างด้านแอดวานซิงไซด์ที่มีขนาดใหญ่และเมื่อเทียบกับการแตกหักดังตารางที่ 4.7 จุดช่องว่างนี้อาจเป็นจุดที่ทำให้เกิดการฉีกขาดจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำ รูปที่ 4.15 (ข) ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่กวนนั้นมีขนาดความกว้างของเกรนประมาณ 4-5 ไมโครเมตร รูปที่ 4.15 (ค) ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนทางกล มีลักษณะเกรนที่รีดยาวที่เกิดจากการดึงเนื้อวัสดุของหัวกวนซึ่งมีขนาดเกรนที่หลากหลายตั้งแต่ขนาด 9-15 ไมโครเมตร และมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นในบริเวณของพื้นที่กระทบร้อนดังรูปที่ 4.15 (ง) ที่มีขนาดเกรนประมาณ 12-19 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที่ หล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง

- (ก) โครงสร้างมหภาค
- (ข) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กวน (NZ)
- (ค) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ)
- (ง) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (HAZ)

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที่ ที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง จากรูปที่ 4.16 (ก) ที่แสดงโครงสร้างมหภาค พบช่องว่างที่บริเวณตรงมุมหัวกวนด้านข้างด้านแอดวานซิงไซด์ที่มีขนาดเล็กมากกว่าแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและเมื่อเทียบกับการแตกหักดังตารางที่ 4.7 เส้นการแตกหักได้เกิดขึ้นบริเวณนี้เช่นกันแล้วฉีกขาดเฉียงไปทางพื้นที่กวน รูปที่ 4.16 (ข) (ค) และ(ง) ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กวน พื้นที่กระทบร้อนทางกล และพื้นที่กระทบร้อน ตามลำดับ ขนาดของเกรนในพื้นที่กวนนั้นมีขนาด 3-4 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นเพียงเล็กน้อย ขนาดเกรนในพื้นที่กระทบร้อนทางกลนั้นมีขนาดประมาณ 8-13 ไมโครเมตร และเกรนในพื้นที่กระทบร้อนนั้นยังคงคล้ายกับของวัสดุฐาน



รูปที่ 4.17 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที่ หล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์

- (ก) โครงสร้างมหภาค
- (ข) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กวน (NZ)
- (ค) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ)
- (ง) โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (HAZ)

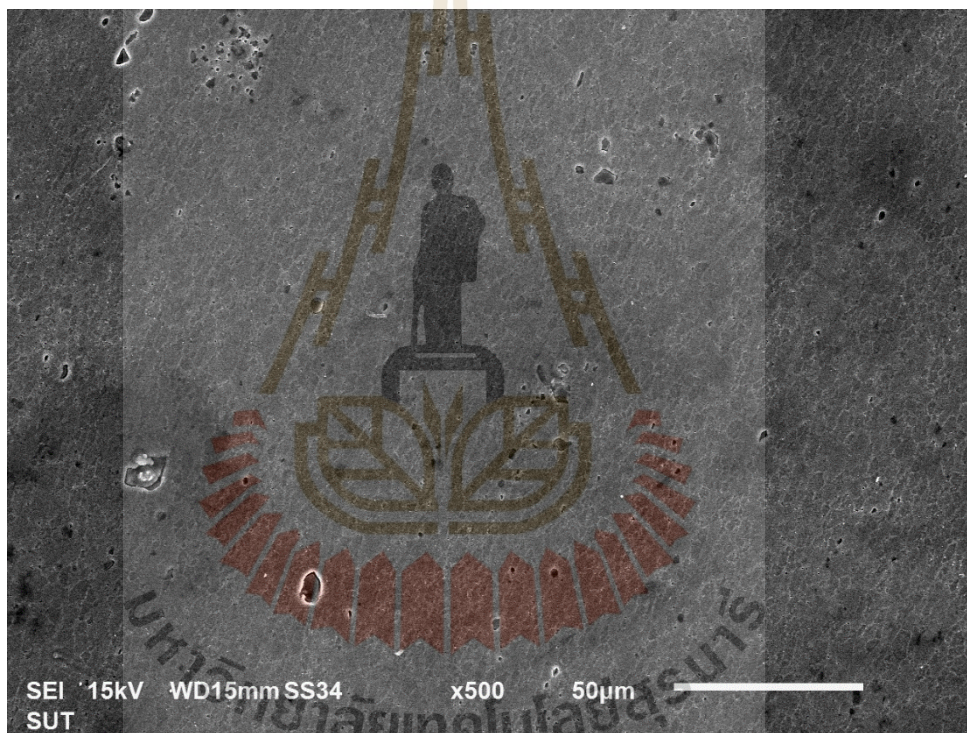
จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที่ ที่มีการหล่อเย็นด้วยโครโอเจนิคส์ จากรูปที่ 4.17 (ก) ที่แสดงโครงสร้างมหภาคนั้น พบว่าแนวเชื่อมนั้นเกิดจุดบกพร่องในพื้นที่กวนบริเวณปลายสุดของหัวกวนหรือล่างสุดของแนวเชื่อม แต่อย่างไรก็ตาม จุดที่เกิดการแตกหักนั้นก็ไม่ได้เกิดจากจุดบกพร่องดังกล่าวเมื่อเทียบกับการแตกหักดังตารางที่ 4.7 ที่เส้นการแตกหักได้เกิดขึ้นบริเวณของพื้นที่กระทบร้อน จากรูปที่ 4.17 (ข) (ค) และ (ง) ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กวน พื้นที่กระทบร้อนทางกล และพื้นที่กระทบร้อนตามลำดับ ขนาดของเกรนในพื้นที่กวนนั้นมีขนาด 3-5 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเกรนคล้ายกับแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็นและขนาดเกรนในพื้นที่กระทบร้อนทางกล และเกรนในพื้นที่กระทบร้อนนั้นมีขนาดใกล้เคียงกับแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็น

อย่างไรก็ตาม ตามที่งานวิจัยของ Rouzbehani และคณะ[31] และ Chaitanya และคณะ [48] ก็ได้ผลที่คล้ายกัน คือ การระบายความร้อนด้วยน้ำพบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการระบายความร้อนในกระบวนการอื่น ๆ และส่งผลให้ขนาดเกรนของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำนั้นมีขนาดที่เล็กลงเมื่อเทียบกับแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นแบบอื่น ๆ ซึ่งผลจากภาพจุลภาคของแนวเชื่อม

รูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 มีลักษณะไปในทางเดียวกันเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม

#### 4.7 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

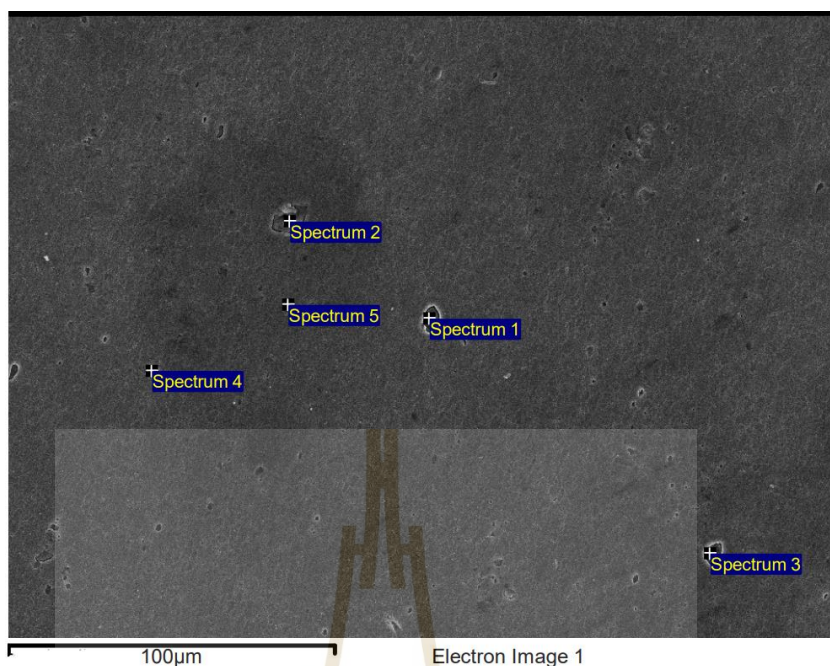
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องของแนวเชื่อมหรือจุดที่ผิดปกติจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อยืนยันสมบัติบางอย่างของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.18 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแนวเชื่อมขนาดบ่า 9 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ไม่มีการหล่อเย็น

จากรูปที่ 4.18 ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กวนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นลักษณะของเส้นขอบเกรนที่ชัดเจน โดยขนาดของเกรนนั้นจะมีขนาดประมาณ 4-5 ไมโครเมตร ซึ่งเท่ากับการที่ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ไม่เพียงเท่านั้น ยังแสดงลักษณะของจุดต่างๆ ที่คล้ายกับจุดบกพร่องที่มีลักษณะเหมือนจะเป็นหลุมก้นดำที่มีขนาดที่แตกต่างกันออกไป





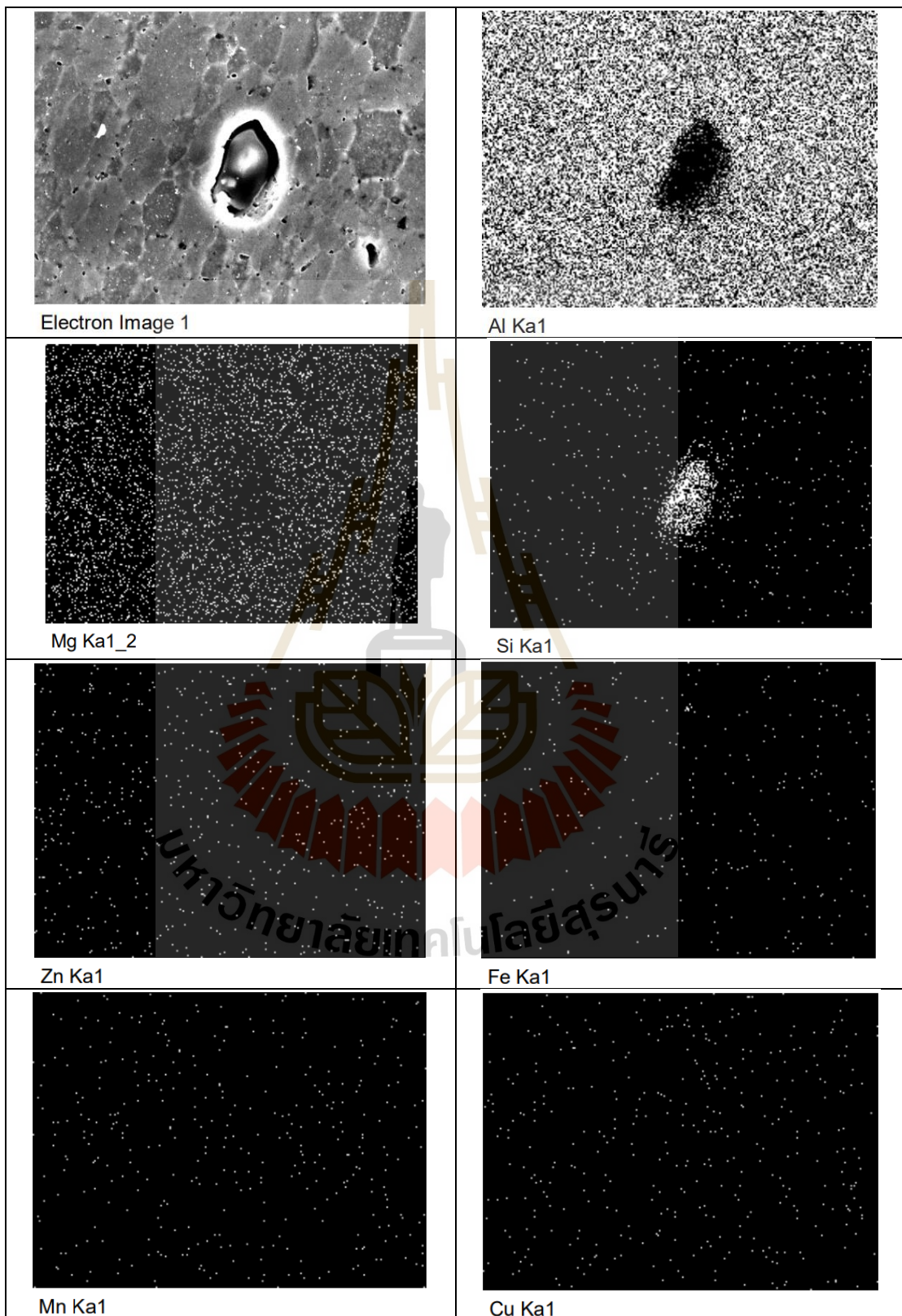
รูปที่ 4.19 จุดวิเคราะห์ธาตุของภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ธาตุของแต่ละสเปกตรัม

Spectrum	Mg	Al	Si	Ti	Cu	Zn	Total
Spectrum 1	-	7.83	86.98	-	5.42	-0.33	100
Spectrum 2	10.16	58.86	-	-	20.91	10.08	100
Spectrum 3	-	17.08	70.72	7.06	3.27	1.87	100
Spectrum 4	2.39	89.35	-	-	2.09	6.18	100
Spectrum 5	2.39	89.33	-	-	1.99	6.29	100

จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.10 ที่แสดงตำแหน่งและเปอร์เซ็นต์ธาตุของแต่ละธาตุที่ตำแหน่งนั้นๆ ซึ่งแต่ละตำแหน่งที่เลือกหรือสเปกตรัม ผู้วิจัยได้เลือกในจุดที่เป็นลักษณะหลุมดำขนาดใหญ่และขนาดเล็กเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) จากผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สเปกตรัม1และสเปกตรัม3 ที่มีลักษณะคล้ายหลุมดำขนาดใหญ่และมีการเรืองแสงที่ขอบสีขาวนั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็น ซิลิคอน (Si) เป็นส่วนมากมีทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ปนมาอีกเล็กน้อย สเปกตรัม2 ที่มีลักษณะคล้ายหลุมดำขนาดใหญ่แต่ไม่เรืองแสงที่ขอบนั้นมีธาตุ ทองแดง (Cu) เป็นส่วนมาก มีแมกนีเซียม (Mg) และสังกะสี (Zn) ปนมาในปริมาณกึ่งหนึ่งของแมกนีเซียม สเปกตรัม4 และสเปกตรัม5 ที่มีลักษณะเป็นจุดขาวเล็กๆ นั้น จะมีสังกะสี (Zn) มีแมกนีเซียม (Mg) และทองแดง (Cu) ผสมอยู่ตามลำดับของปริมาณ

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis



จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX โดยการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis ดังตารางที่ 4.11 ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า จากการตรวจสอบพบส่วนผสมของธาตุต่างๆ ดังนี้ เหล็ก (Fe) 0.66% แมงกานีส(Mn) 0.36% ซิลิคอน (Si) 1.39% แมกนีเซียม(Mg) 2.02% ทองแดง (Cu) 2.11% สังกะสี (Zn) 5.77% และที่เหลือเป็นของอะลูมิเนียม (Al) โดยที่อะลูมิเนียมนั้น จะกระจายทั่วชิ้นงานอย่างหนาแน่น ซิลิคอน(Si) จะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับธาตุอื่นแต่จะเป็นก้อนเล็กๆ ซึ่งในภาพจะเห็นว่าซิลิคอน (Si) นั้นจะอยู่รวมเป็นจุดเดี่ยวซึ่งเป็นจุดสีดำหรือถ้าสังเกตจาก ตารางที่ 4.11 จะเป็นจุดที่อยู่รวมกันอย่างหนาแน่น แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) และแมงกานีส (Mn) จะกระจายอยู่ทั่วบริเวณชิ้นงาน ส่วนของเหล็ก (Fe) และทองแดง (Cu) นั้นจะกระจายอยู่ตามขอบเกรน

โดยจากรูปที่ 4.15 4.16 และ 4.17 ที่แสดงลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยาสังเกตได้ ชิ้นงานที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงนั้นมีการกระจายของจุดดำหรือการกระจายของซิลิคอน (Si) ที่สม่ำเสมอ ไม่เหมือนกับชิ้นงานที่ไม่มีการหล่อเย็นที่โดยส่วนใหญ่แล้วซิลิคอน (Si) จะอยู่รวมกันเป็นจุดขนาดใหญ่ ด้วยการกระจายตัวของซิลิคอน (Si) ที่ดีกว่าจึงอาจส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงาน นั้นมีมากขึ้นด้วยและนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดีขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

##### 5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่มีไม่มีการหล่อเย็น (No Cooling) มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) และการหล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) พบว่า ปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อมที่ระดับ 40 และ 60 มม./นาที ที่ทำการศึกษานั้นไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลได้แก่ สารหล่อเย็นและขนาดปากกวนส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) นั้น สามารถลดอุณหภูมิในขณะที่เดินเชื่อมได้มากถึง 66 เปอร์เซ็นต์ ของการเชื่อมที่ไม่มีมีการหล่อเย็น (No Cooling) และการหล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) สามารถลดอุณหภูมิในขณะที่เดินเชื่อมได้มากถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ของการเชื่อมที่ไม่มีมีการหล่อเย็น (No Cooling) จากอุณหภูมิที่แตกต่างในขณะที่ทำการเดินเชื่อมจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมขนาดปาก 15 มม. ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที ที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) มีความแข็งแรงมากที่สุดคิดเป็น 78.9 เปอร์เซ็นต์ ของวัสดุฐาน และการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึงและไครโอเจนิคส์นั้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นหรือ %Elongation เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมที่ไม่มีมีการหล่อเย็น

##### 5.1.2 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

สืบเนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม นั้น โดยปัจจัยของสารหล่อเย็นเป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ฉะนั้นจากการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและ การทดสอบความแข็งนั้นไปในทิศทางเดียวกัน คือ แนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันตัดกลึง (Cutting fluid) หล่อเย็นด้วยไครโอเจนิคส์ (Cryogenic) และไม่มีการหล่อเย็น (No Cooling) นั้น มีขนาดของเกรนใน แต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน โดยแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำมัน

ตัดกลึง (Cutting fluid) มีขนาดของเกรนในพื้นที่กวน (NZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ที่ละเอียดกว่าแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็น (No Cooling) แต่ขนาดเกรนในทุกพื้นที่ของแนวเชื่อมที่มีการหล่อเย็นด้วยโครโคเจนิคส์นั้นมีขนาดเท่ากับของแนวเชื่อมที่ไม่มีการหล่อเย็น และจากผลได้จากภาพโครงสร้างจุลภาค ภาพโครงสร้างมหภาค และผลการทดสอบความแข็งนั้น ทำให้ทราบว่า การหล่อเย็นระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นส่งผลให้พื้นที่กวน (NZ) และพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) มีขนาดพื้นที่ที่แคบลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นความระนาบของอุปกรณ์จับยึดทั้งในแนวแกน X และแนวแกน Y รวมไปถึงการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่ใช้ในการเชื่อมนั้นมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม อัตราการไหลของสารหล่อเย็นของการหล่อเย็นระหว่างกระบวนการนั้นก็อาจเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมและเป็นพารามิเตอร์ที่น่าสนใจ



## รายการอ้างอิง

1. Davis, J.R., *Aluminum and aluminum alloys*. 1993: ASM international.
2. Temmar, M., M. Hadji, and T. Sahraoui, *Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints*. *Materials & Design*, 2011. **32**(6): p. 3532-3536.
3. Thomas, W. and E. Nicholas, *Friction stir welding for the transportation industries*. *Materials & design*, 1997. **18**(4-6): p. 269-273.
4. Ares, A.E. and C.E. Schvezov, *Influence of solidification thermal parameters on the columnar-to-equiaxed transition of aluminum-zinc and zinc-aluminum alloys*. *Metallurgical and Materials transactions A*, 2007. **38**: p. 1485-1499.
5. .
6. D. Baffari, G.B., D. Campanella, L. Fratini, F. Micari, *Friction based Solid State Welding Techniques for Transportation Industry Applications*. *Procedia CIRP*, 2014: p. 162-167.
7. Li, K., et al., *Using coupled Eulerian Lagrangian formulation for accurate modeling of the friction stir welding process*. *Procedia Engineering*, 2017: p. 574-579.
8. Elyasi, M., H. Aghajani Derazkola, and M. Hosseinzadeh, *Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016. **230**(7): p. 1234-1241.
9. Shunmugasundaram, M., et al., *Optimization of process parameters of friction stir welded dissimilar AA6063 and AA5052 aluminum alloys by Taguchi technique*. *Materials Today: Proceedings*, 2020. **27**: p. 871-876.
10. Rajendran, C., et al., *Effect of tool tilt angle on strength and microstructural characteristics of friction stir welded lap joints of AA2014-T6 aluminum alloy*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019. **29**(9): p. 1824-1835.

11. Chandrashekar, A., B. Ajaykumar, and H. Reddappa, *Effect of pin profile and process parameters on the properties of friction stir welded Al-Mg alloy*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(10): p. 22283-22292.
12. Bayazid, S., H. Farhangi, and A. Ghahramani, *Effect of pin profile on defects of friction stir welded 7075 aluminum alloy*. Procedia materials science, 2015. **11**: p. 12-16.
13. Elangovan, K., V. Balasubramanian, and M. Valliappan, *Effect of tool pin profile and tool rotational speed on mechanical properties of friction stir welded AA6061 aluminium alloy*. Materials and Manufacturing Processes, 2008. **23**(3): p. 251-260.
14. Sakthivel, T., G. Sengar, and J. Mukhopadhyay, *Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded aluminum*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. **43**(5-6): p. 468-473.
15. Dong, P., et al., *Effects of welding speed on the microstructure and hardness in friction stir welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy*. Materials & Design, 2013. **45**: p. 524-531.
16. Xu, W., Z. Li, and X. Sun, *Effect of welding speed on mechanical properties and the strain-hardening behavior of friction stir welded 7075 aluminum alloy joints*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017. **26**: p. 1938-1946.
17. Fratini, L., G. Buffa, and R. Shivpuri, *Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA7075-T6 butt joints*. Acta Materialia, 2010. **58**(6): p. 2056-2067.
18. Gianluca Buffa, L.F., Shivpuri, Rajiv Shivpuri, *In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints*. ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2009.
19. SAKURADA, D.a.K., Kazuyoshi and TOKISUE, Hiroshi, *Underwater friction welding of 6061 aluminum alloy*. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2003: p. 2-6.

20. D.C. Hofmann, K.S.V., *Submerged friction stir processing (SFSP): an improved method for creating ultra-fine-grained bulk materials*. Mater. Sci. Eng. A 402, 2005: p. 234-241.
21. P. Upadhyay, A.P.R., *Effects of thermal boundary conditions in friction stir welded AA7050-T7 sheets*. Mater. Sci. Eng. A 527, 2010: p. 1537-1543.
22. Mehta, K.P. and V.J. Badheka, *Effects of tilt angle on the properties of dissimilar friction stir welding copper to aluminum*. Materials and Manufacturing processes, 2016. **31**(3): p. 255-263.
23. Derazkola, H.A., N. Kordani, and H.A. Derazkola, *Effects of friction stir welding tool tilt angle on properties of Al-Mg-Si alloy T-joint*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021. **33**: p. 264-276.
24. Kadaganchi, R., M.R. Gankidi, and H. Gokhale, *Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology*. Defence Technology, 2015. **11**(3): p. 209-219.
25. Ma, S., et al., *Effect of welding speed on performance of friction stir welded spray forming 7055 aluminum alloy*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **46**: p. 304-316.
26. Zhang, J., et al., *Effects of welding parameters and post-heat treatment on mechanical properties of friction stir welded AA2195-T8 Al-Li alloy*. Journal of Materials Science & Technology, 2018. **34**(1): p. 219-227.
27. Sharma, C., D.K. Dwivedi, and P. Kumar, *Heterogeneity of microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of Al-Zn-Mg alloy AA7039*. Procedia Engineering, 2013. **64**: p. 1384-1394.
28. Zhang, W., et al., *Effect of welding speed on microstructure evolution and mechanical properties of friction stir welded 2198 Al-Cu-Li alloy joints*. Materials, 2022. **15**(3): p. 969.
29. Kumar, A., et al., *Effects of in-process cryocooling on metallurgical and mechanical properties of friction stir processed Al7075 alloy*. Materials Characterization, 2018. **144**: p. 440-447.
30. Sabari, S.S., S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, *The effect of pin profiles on the microstructure and mechanical properties of underwater friction stir*



- welded AA2519-T87 aluminium alloy. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2016. **11**(1): p. 1-14.
31. Rouzbehani, R., et al., *Metallurgical and mechanical properties of underwater friction stir welds of Al7075 aluminum alloy*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018. **262**: p. 239-256.
  32. Sheikh-Ahmad, J.Y., et al., *Friction stir welding of high density polyethylene—Carbon black composite*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019: p. 402-413.
  33. Z. Hou, J.S.-A., F. Jarrar, F. Ozturk, *Residual Stresses in Dissimilar Friction Stir Welding of AA2024 and AZ31: Experimental and Numerical Study*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018.
  34. Eren, B., Guvenc, M.A. & Mistikoglu, S, *Artificial Intelligence Applications for Friction Stir Welding: A Review*. *Met. Mater*, 2021: p. 193–219.
  35. Mishra, R.S. and Z. Ma, *Friction stir welding and processing*. *Materials science and engineering: R: reports*, 2005. **50**(1-2): p. 1-78.
  36. Chiteka, K., *Friction stir welding/processing tool materials and selection*. *Int J Eng Res Technol*, 2013. **2**(11): p. 8-18.
  37. Muhsin, J., M.H. Tolephih, and A. Muhammed, *Effect of friction stir welding parameters (rotation and transverse) speed on the transient temperature distribution in friction stir welding of AA 7020-T53*. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012. **7**(4): p. 436-446.
  38. Moshwan, R., et al., *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.
  39. Leonard, A. *Microstructure and aging behaviour of FSW in Al alloys 2014A-T651 and 7075-T651*. in *2nd International Symposium on FSW (CD Rom)*. 2000.
  40. ธรรมโชติ, ณ., วัสดุวิศวกรรม. 2558: ซีอีดียูเคชั่น.
  41. Venkateswarlu, D., M. Cheepu, and M. Mahapatra. *Analysing the friction stir welded joints of AA2219 Al-Cu alloy in different heat-treated-state*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.

42. Ridwan, R., et al., *Tensile analysis and assessment of carbon and alloy steels using FE approach as an idealization of material fractures under collision and grounding*. Curved and Layered Structures, 2020. **7**(1): p. 188-198.
43. รศ.ดร.ประไพศรี สทัศน์ ณ อยุธยา, การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. 2551: บริษัท สำนักพิมพ์ที่  
อป จำกัด.
44. Hong, S.Y., *Economical and ecological cryogenic machining*. J. Manuf. Sci. Eng., 2001. **123**(2): p. 331-338.
45. Hong, S.Y. and Z. Zhao, *Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining*. Clean Products and Processes, 1999. **1**(2): p. 107-116.
46. Sabari, S.S., et al., *Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armour grade AA2519-T87 aluminium alloy*. Defence Technology, 2016. **12**(4): p. 324-333.
47. Kamruan, A., et al. *Influence of Friction Stir Welding Parameters on Axial Forces and Mechanical Properties of Aluminium Alloy 7075*. in *Proceedings of 10th International Conference on Mechatronics and Control Engineering: ICMCE 2021*. 2022. Springer.
48. Sharma, C., D.K. Dwivedi, and P. Kumar, *Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039*. Materials Science and Engineering: A, 2012. **556**: p. 479-487.



ภาคผนวก

บทความงานประชุมนานาชาติ

**RESEARCH LEAGUES**

**CERTIFICATE**  
OF PARTICIPATION

International Conference on Mechanical, Manufacturing,  
Industrial and Civil Engineering (ICMMICE - 2023)

7th-8th March 2023, Taipei City, Taiwan

This is to certify that ..... **Paisan Saeyang** .....  
of ..... Suranaree University of Technology, Thailand .....  
..... has done his/her excellence in presenting the research paper  
titled ..... "Influence of Cooling Methods in friction stir welding of 7075 aluminum alloy" .....  
.....  
.....  
on 7th-8th March 2023 at Taipei City, Taiwan.

**Dr. Jack Robertson**  
Director



**Kiera Jones**  
Project Manager

# Influence of Cooling Methods in Friction Stir Welding of 7075 Aluminum Alloy

<sup>[1]</sup> Paisan Saeyang, <sup>[2]</sup> Amarin Chanpariyavatevong, <sup>[3]</sup> Kodcharawit Lamkham,  
<sup>[4]</sup> Somsak Siwadamrongpong, <sup>[5]</sup> Suradet Tantrairatn

<sup>[1][2][4]</sup> School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand,

<sup>[3]</sup> School of Manufacturing Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand,

<sup>[5]</sup> School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

Corresponding Author Email: <sup>[1]</sup> paisan0573@gmail.com, <sup>[2]</sup> amarin\_chan@outlook.com, <sup>[3]</sup> Kodcharawit2538@gmail.com,  
<sup>[4]</sup> somsaksi@sut.ac.th, <sup>[5]</sup> suradetj@sut.ac.th

*Abstract— Regarding various part manufacturing in industrial scale, one of the most popular processes was welding, especially in automotive and aircraft industries. It was well known that these industries have an increasing rate of aluminum consumption every year. There was due to aluminum has many outstanding properties such as light weight, high strength to weight ratio and very good elongation. One of the most used aluminum alloys was AL7075, which is suitable for highly stressed structural applications in aircraft structural parts. However, fusion welding techniques were usually yielded poor strength for such grade of aluminum. Friction stir welding is a solid-state welding technique that joins two workpieces without melting the workpiece material. Heat was generated by friction between the shoulder of the stirring tool and the workpiece. The probe was to stir and mix two metals parts together. However, the Thermo Mechanical Affect Zone (TMAZ) and Heat Affect Zone (HAZ) were reported as the weakest area of welded parts. Therefore, this study aims to improve the joints by cooling processes during welding using cutting fluid and cryogenic cooling with different parameters such as welding speed and shoulder size. The results of these experiment indicated that the cooling process influenced the mechanical properties of the joints. The micro-vicker hardness showed a significant increase in TMAZ and HAZ area.*

*Index Terms— AL7075, Friction stir welding, Cutting Fluid, Cryogenic.*

## I. INTRODUCTION

Al 7XXX series alloys were widely used, such as airframes, sports equipment, member in bridge and rail transport system, safety equipment and parts in automotive sector. There was due to aluminum has outstanding properties such as high strength-to-weight ratio and good corrosion resistance [1]. In the production process, it was necessary to assemble or increment materials together. The assembly can be divided into 2 types: temporary and permanent assembly. Permanent assembly by welding was one of the most popular permanent assembly methods. However, fusion welding techniques often yield low strength for Al7xxx and Al2xxx aluminum, as they were susceptible to hot cracking during solidification [2]. Hot cracking of welded metal could occur in the fusion zone during solidification of molten metal. There causes uneven flow of aluminum which leads to cause defects and affects the strength of the weldment as well.

Over 20 years of development, Friction Stir Welding (FSW) has become a key welding and manufacturing technology [3]. Friction stir welding is a solid-state welding technique that joins two facing workpieces without melting the workpiece material. Heat was generated by friction between the shoulder of the stirring tool and the workpiece material. This weakens the area near the FSW instrument. While the tool moves along the butt joint of the workpiece, the probe was to stir and mix two metals together. Fine grain

size in stirred zone was reported and resulting in high strength of weldment [4]. Friction stir welding causes serious plastic deformation and frictional heating during the process. This was an effect of recrystallized grain structure in the nugget zone (NZ) [5]. The recrystallization was reported because of strain gradient, strain rate and temperature of NZ. Some works were aimed to enhance the mechanical properties of the weldment, friction stir welding was performed on Al1050 alloy and a significant increase in hardness (37%) and tensile strength (46%) compared to the starting material. Friction stir welding was a promising technique to increase the mechanical properties resulting from grain size control during the friction stir welding process [6]. Many researchers have also reported that parameter optimization can effectively control the grain size and consequently improve the mechanical properties of the weldment [7-9]. The sludge forming after processing was also studied and it was concluded that the adverse event of sludge dissolution or coarse grain size during friction stir welding might be the main reason for showing inferior properties. Although it developed a fine-grained microstructure [10]. In addition, it was found that the grain size developed during friction stir welding exhibited a rapid expansion of the grain size due to the slow cooling rate after welding [11].

Many techniques were used to improve the properties of weldment. It has been made by using heat treatment method [12, 13]. It was concluded that heat-treated weldments had

increased tensile strength. Not only this, but there has also been research on the use of Cryogenic treatment to increase the efficiency of the weld by bringing the weldment to Deep Cryogenic treatment[14]. There were showed that the cold treatment was able to increase the strength of the weldment. Submerged friction welding was used to control the expansion of the grain[15, 16], by submerging under cooling media such as air, water, dry ice and gas. [17-19].

Therefore, in the present research work, was aimed to investigate friction stir welding on Al7075. 3 Friction stir welding parameters, shoulder size of tool, welding speed and cooling methods (using cutting fluid and cryogenic cooling) were investigated. Mechanical properties of the weldment have been evaluated and compared with based material.

## II. EXPERIMENTAL DETAILS

The 4 mm thick rolled sheet of Al7075 alloy was used as the base metal in this study. The density was 2.81 g/cm<sup>3</sup> and percentage composition was shown in Table I. Mechanical properties of the alloy were shown in Table II. The base metal is cut into 100 × 50 × 4 mm sheet for friction stir welding process.

**Table I.** Chemical composition of Al7075

Composition (wt%)						
Al	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn
Bal.	5.1	2.1	1.2	0.58	0.35	0.12

**Table II.** Mechanical properties of Al7075

Mechanical properties			
Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Vicker Hardness (HV)
498	566	9	164

The strength of the FSW joint was greatly affected by shoulder size and welding speed, Angkarn et al. There was achieved in the welding speed range of 36-63 mm/min and tool rotation at 1,580 – 2,220 rpm[20]. In this study, Full Factorial Design technique was employed with two levels of welding speed (40 and 60 mm/min), two levels of shoulder (9 and 15mm) and three levels of cooling (No cooling, Cutting Fluid, Cryogenic) were carried out and indicated in Table III. The stir tool with cylindrical pin 3 mm in diameter was made by SKD11 hot-work tool steel and hardened to 51-55 HRC, which is displayed in Fig. 1. The friction stir welding (FSW) operation was operated with tool tilt onward angle of 3° for all the FSW experiments.

Regarding the cryogenic cooling process, compressed air at a pressure of 5 bar was poured into a liquid nitrogen tank. After that, the coolant was supplied through an insulated 5.5 mm diameter copper tube. Flow rate of approximately 0.25 l/min was applied to the weldment [21], the measured

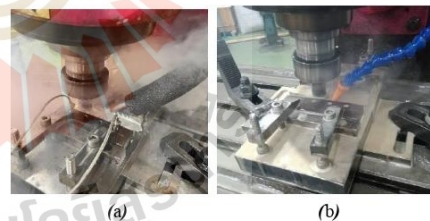
temperature at the spray point was -130°C. For the cutting fluid cooling process, HIKUT W10 was selected with mixing ratio 5%, flow rate approximately 1.5 l/min, coolant spray distance around 15 mm behind the stirrer, as shown in Fig 2. The FSW machine in this study was a modified 3 axis milling machine (Lagun GUM 152) with a welding fixture assembled on it.



**Fig. 1** Tool used for friction stir welding

**Table III.** FSW process parameters

Parameters	levels			Unit
	1	2	3	
Welding speed	40	60		mm/min
Shoulder diameter	9	15		mm
cooling	No cooling	Cutting Fluid	Cryogenic	-
Rotation speed	1,580			rpm



**Fig. 2** Experimental set-up and cooling methods  
(a) cryogenic cooling. (b) cutting fluid cooling.

The welded specimens were segmented for tensile testing and polished for hardness testing in accordance with ASTM E384-17, ASTM E-8 respectively. FUTURE-TECH Model FM-800 Digital Micro Vickers Hardness Tester using a pyramid-shaped diamond indenter, square base. It was used to measure the micro hardness of different zones of the weld. A 100 g load was applied for 15 second for the hardness

measurement. The distance between the two notches was measured at 0.2 mm as shown in Fig.3. The tensile test was performed on a universal testing machine, brand LLOYD, model LD100K, with a load cell size of 100 KN, using a test speed of 1.002 mm/min[22].

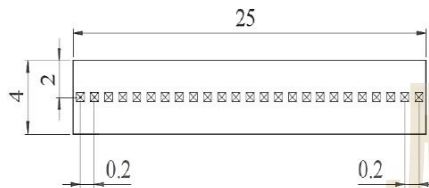


Fig. 3 hardness testing

III. RESULT AND DISCUSSION

A tensile test was performed to determine the effect of cooling on the % elongation and tensile strength of the weld with 3 samples per condition. Fig. 4 shows that the average ultimate tensile strength of the weldment. It was found that cutting fluid cooling condition yielded the highest strength in all conditions, around 78.9% of the based material which obtained from the experiment of shoulder size 15 mm and welding speed 60 mm/min. Cryogenic cooling joints were slightly higher than that of non-cooling joints.

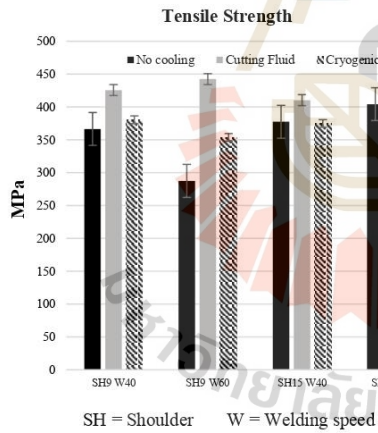


Fig. 4 Comparison of ultimate tensile strength of FSW joints.

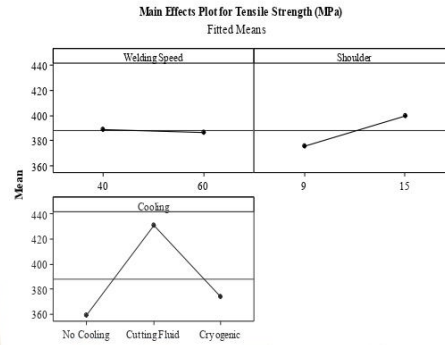


Fig. 5 Main Effects Plot for Tensile.

The Main Effects Plot for tensile strength shown in Fig. 5, there was found that welding speed has little or no effect on tensile strength. Different shoulder sizes result in different strengths. Different cooling methods have a noticeable effect on the strength of joints. Cutting fluid could be considered as very outstanding compared to other cooling methods.

Elongation of the weldment was showed in Fig.6. It was obviously observed that the weldment of cutting fluid and cryogenic cooling were the same level and higher than no cooling condition. It might be caused by the cooling effect which makes the TMAZ and HAZ zones to form smaller grain size [15]. Increasing of welding speed and tool shoulder size also found to increase the % elongation. The weldment with a welding speed of 60 mm./min, shoulder 15 mm. and cooled by cutting fluid showed the highest percentage of elongation.

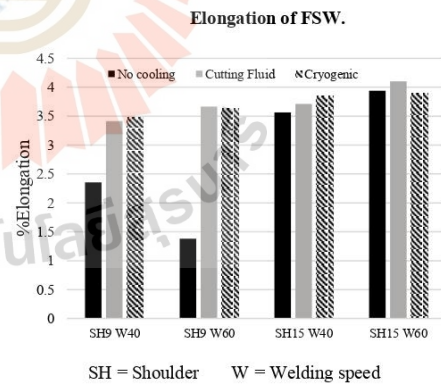
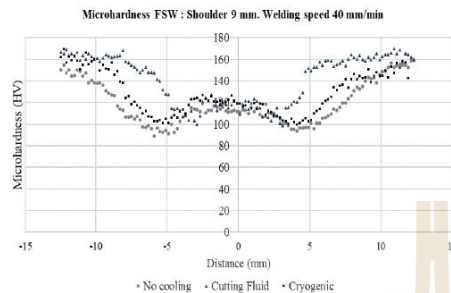
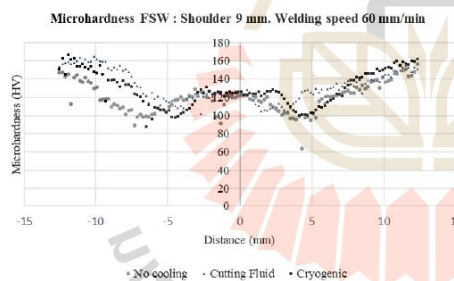


Fig. 6 Comparison of % elongation of FSW joints.



**Fig. 7** Microhardness FSW : Shoulder 9 mm. Welding speed 40 mm/min

Fig. 7 shows the distribution of microhardness across the weldment at a welding speed of 60 and a shoulder of 9 mm. The specimen with Cutting fluid cooling showed the highest hardness values in HAZ and TMAZ compared to uncooled and cryogenic cooling. This might indicate that the grains in such zones may be finer in size than the uncooled one. Fig. 7 might imply that the rapid cooling after FSW can significantly increase the hardness in HAZ and TMAZ, Fig. 7 and Fig. 8. These results were also reported in the same trend by Bocchi et al., there were concluded that joints with cooling process can significantly increase the hardness values in TMAZ and HAZ[23].



**Fig. 8** Microhardness FSW : Shoulder 9 mm. Welding speed 60 mm/min

#### IV. CONCLUSIONS

In this work, the focus was on investigating effects of rapid cooling after FSW with cutting fluid and cryogenic on mechanical properties such as tensile strength and the elongation of the friction stir welding of alloy AL7075. The results of the experiments were concluded as follows;

- 1) Cutting Fluid and Cryogenic cooling processes greatly affect the mechanical properties of weldment, which has the highest tensile strength of 446.52 MPa,

representing 78.9% of the based material which obtained by cutting fluid cooling, welding speed 60 mm./min., and shoulder 15 mm.

- 2) Rapid cooling after FSW increased the % elongation in both cutting fluid and cryogenics coolings.
- 3) Both cooling methods affected the increase of hardness in HAZ and TMAZ, but it seem to had no effect in NZ.

#### REFERENCES

- [1] P. A. Rometsch, Y. Zhang, and S. Knight, "Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys—Some recent developments," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24 (2014), pp. 2003-2017, 2014
- [2] M. Temmar, M. Hadji, and T. Saharaoui, "Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints," *Materials & Design*, vol. 32 (2011), pp. 3532-3536, 2011
- [3] W. Thomas and E. Nicholas, "Friction stir welding for the transportation industries," *Materials & design*, vol. 18 (1997), pp. 269-273, 1997
- [4] A. Scialpi, L. De Filippis, and P. Cavaliere, "Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy," *Materials & design*, vol. 28 (2007), pp. 1124-1129, 2007
- [5] A. Pastor and H. G. Svoboda, "Time-evolution of heat affected zone (HAZ) of friction stir welds of AA7075-T651," (2013), 2013
- [6] Y. Kwon, I. Shigematsu, and N. Saito, "Mechanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process," *Scripta materialia*, vol. 49 (2003), pp. 785-789, 2003
- [7] H. Jiang, C. Liu, B. Zhang, P. Xue, Z. Ma, K. Luo, M. Ma, and R. Liu, "Simultaneously improving mechanical properties and damping capacity of Al-Mg-Si alloy through friction stir processing," *Materials Characterization*, vol. 131 (2017), pp. 425-430, 2017
- [8] R. Kadaganchi, M. R. Gankidi, and H. Gokhale, "Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology," *Defence Technology*, vol. 11 (2015), pp. 209-219, 2015
- [9] H. Dawood, K. S. Mohammed, A. Rahmat, and M. Uday, "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*, vol. 25 (2015), pp. 2856-2865, 2015
- [10] C. Rhodes, M. Mahoney, W. Bingel, and M. Calabrese, "Fine-grain evolution in friction-stir processed 7050 aluminum," *Scripta materialia*, vol. 48 (2003), pp. 1451-1455, 2003
- [11] N. Xu, R. Uejji, and H. Fujii, "Enhanced mechanical properties of 70/30 brass joint by rapid cooling friction stir welding," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 610 (2014), pp. 132-138, 2014
- [12] K. Elangovan and V. Balasubramanian, "Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints," *Materials*



- characterization.vol., 59 (2008), pp. 1168-1177, 2008
- [13] L. Fratini, G. Buffa, and R. Shivpuri, "In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.vol., 43 (2009), pp. 664-670, 2009
- [14] A. Bansal, A. K. Singla, V. Dwivedi, D. K. Goyal, J. Singla, M. K. Gupta, and G. M. Krolczyk, "Influence of cryogenic treatment on mechanical performance of friction stir Al-Zn-Cu alloy weldments," *Journal of Manufacturing Processes*.vol., 56 (2020), pp. 43-53, 2020
- [15] R. Rouzbehani, A. Kokabi, H. Sabet, M. Paidar, and O. Ojo, "Metallurgical and mechanical properties of underwater friction stir welds of Al7075 aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology*.vol., 262 (2018), pp. 239-256, 2018
- [16] S. S. Sabari, S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, and G. M. Reddy, "Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armour grade AA2519-T87 aluminium alloy," *Defence Technology*.vol., 12 (2016), pp. 324-333, 2016
- [17] A. Devaraju and V. Kishan, "Influence of cryogenic cooling (liquid nitrogen) on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2014-T6 aluminum alloy," *Materials Today: Proceedings*.vol., 5 (2018), pp. 1585-1590, 2018
- [18] A. Kumar, A. K. Godasu, K. Pal, and S. Mula, "Effects of in-process cryocooling on metallurgical and mechanical properties of friction stir processed Al7075 alloy," *Materials Characterization*.vol., 144 (2018), pp. 440-447, 2018
- [19] B. Snyder and A. M. Strauss, "In-process cooling of friction stir extruded joints for increased weld performance via compressed air, water, granulated dry ice, and liquid nitrogen," *Journal of Manufacturing Processes*.vol., 68 (2021), pp. 1004-1017, 2021
- [20] A. Kamruan, S. Ingkawara, K. Lamkam, and S. Sivadamrongpong, "Influence of Friction Stir Welding Parameters on Axial Forces and Mechanical Properties of Aluminium Alloy 7075," in *Proceedings of 10th International Conference on Mechatronics and Control Engineering: ICMCE 2021*. 2022. Springer.
- [21] C. Sharma, D. K. Dwivedi, and P. Kumar, "Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039," *Materials Science and Engineering: A*.vol., 556 (2012), pp. 479-487, 2012
- [22] Ş. Kasman and Z. Yenier, "Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.vol., 70 (2014), pp. 145-156, 2014
- [23] S. Bocchi, G. D'Urso, and C. Giardini, "The effect of heat generated on mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.vol., 112 (2021), pp. 1513-1528, 2021

## ประวัติผู้เขียน

นายไพศาล แซ่ยัง เกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2540 ณ อำเภอพบพระ จังหวัดตาก ได้เริ่มการศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนรวมไทยพัฒนา 4 ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนเซนต์โยเซฟแม่ระมาด ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.) สาขาวิชาช่างกลโรงงาน และได้สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ (เทียบโอน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตากเมื่อปี พ.ศ. 2564 และหลังจากนั้น ได้เข้ามาศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประสบการณ์การทำงาน

- สหกิจศึกษา ณ บริษัท แม่สอด เฮฟวี อินดัสทรี จำกัด ในแผนก R&D เป็นระยะเวลา 4 เดือน
- ประสบการณ์ด้านการสอนนั้นในระหว่างการศึกษาผู้เขียนได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนของหลักสูตรวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติและหุ่นยนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งสอนปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต