โครงสร้างและความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนตัวกวนรูปร่างต่างๆ

MICROSTRUCTURE AND TENSILE STRENGTH OF AA 6063 ALUMINUM AND AISI 430 STAINLESS STEEL BY FRICTION STIR WELDING VARIOUS STIRRER SHAPE

ศักดิ์ชัย จันทศรี

SAKCHAI CHANTASRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

2554

โครงสร้างและความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนตัวกวนรูปร่างต่างๆ

ศักดิ์ชัย จันทศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2554

MICROSTRUCTURE AND TENSILE STRENGTH OF AA 6063 ALUMINUM AND AISI 430 STAINLESS STEEL BY FRICTION STIR WELDING VARIOUS STIRRER SHAPE

SAKCHAI CHANTASRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN MANUFACTURING ENGINEERING DEPARTMENT OF INDUSTRIALS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
2011

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างและความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนตัวกวนรูปร่างต่างๆ
ชื่อนักศึกษา	นายศักดิ์ชัย จันทศรี
รหัสประจำตัว	115170440110-8
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

บทคัดย่อ

กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน สามารถทำการเชื่อมอะลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือให้ความร้อนต่ำกว่าจุดหลอมละลาย ที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างผิวแกนหมุนกับเนื้อวัสดุในสภาพพลาสติก การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการประยุกต์การเชื่อมรอยต่อชนอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430และทำการทดสอบความแข็งแรงดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม

ในการทดลองใช้ตัวแปรในการเชื่อมได้แก่ตัวกวนรูปร่าง ทรงกระบอก ทรงกระบอกเกลียว ทรงกรวย และทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบตัวกวน 250-750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-175 มม./นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 126.33 MPa ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความเรียบผิวสม่ำเสมอ แนวเชื่อมมีขนาดเท่ากัน ไม่พบจุดบกพร่อง การตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยฉีกขาดมีลักษณะคล้ายเส้นซิกแซกค่อนไปทางอะลูมิเนียม และโครงสร้างจุลภาคพบว่าเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิม แทรกตัวอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมบริเวณอินเทอร์เฟส ค่อนข้างมากที่ด้านล่างของแนวเชื่อม และทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีพบว่า FeAl ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งโลหะอยู่บริเวณอินเทอร์เฟสฝั่งอะลูมิเนียม ซึ่งมีความสอดคล้องกัน และเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด

คำสำคัญ : การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม ตัวกวน

Thesis Title :	Microstructure and Tensile Strength of AA 6063 Aluminum and AISI 430 Stainless Steel by Friction Stir Welding Various Stirrer Shape
Student Name :	Mr. Sakchai Chantasri
Student ID :	115170440110-8
Degree Award :	Master of Engineering
Study Program :	Manufacturing Engineering
Academic Year :	2010
Thesis Advisor :	Dr. Kittipong Kimapong

ABSTRACT

The friction stir welding (FSW) could weld successfully the joint between aluminum alloy and stainless steel. The temperature at the fusion was below the melting point of material. For this process, the heat was produced by the friction of the rotating surface pin tool with material. The materials become plastic and at the same time the pin tool stir the material and fused together. The objective of research is to study the FSW weld the butt joint between AA6063 aluminum alloy and AISI 430 stainless steel and also testing of the tensile strength of the butt joint by using various stirrer shape to compare with microstructure examination.

Experiment of this welding parameter have pin shapes that are :cylindrical stirrer ,screw cylindrical stirrer, cone stirrer, and screw cone stirrer at rotational speed of 250-750 rpm, and in feed of traverse speed of the welding head pin at 50-175 mm/min. The specimens were taken in tensile strength of the welds macrostructure and microstructure examinations, respectively.

Experimental results show that the screw cone stirrer shape gave the best welds with smooth surface without defects and indicated the maximum tensile strength of 126.33 MPa at the rotational speed of 500 rpm ,and welding speed of 125 mm/min. The macrostructure examination has tears of weld joint in zigzag line into aluminum. The microstructure grain of stainless steel and penetrated into aluminum in root of welds. The chemical composition shows that the FeAl semi-metallic compound was penetrated into interface zone of aluminum grain onto welding speed increased in corresponding and affected to increase the best of tensile strength of the weld joint.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminum, Stainless Steel, Stirrer

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายศักดิ์ชัย จันทศรี

COPYRIGHT © 2011 ลิขสิทธิ์ พ.ศ 2554
FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างและความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนตัวกวนรูปร่างต่างๆ MICROSTRUCTURE AND TENSILE STRENGTH OF AA 6063 ALUMINUM AND AISI 430 STAINLESS STEEL BY FRICTION STIR WELDING VARIOUS STIRRER SHAPE
ชื่อนักศึกษา	นายศักดิ์ชัย จันทศรี
รหัสประจำตัว	115170440110-8
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
วัน เดือน ปี ที่สอบ	6 พฤษภาคม 2554 เวลา 13.00 - 15.00 น.
สถานที่สอบ	ห้องเฟื่องทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร. สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล)

..... กรรมการ
(ดร. ศิริชัย ต่อสกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ บริบูรณ์ เสนาะล้ำ)

..... กรรมการ
(ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหมาย ผิวสอาด)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณ ดร.สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล ดร.ศิริชัย ต่อสกุลและ รศ.บริบูรณ์ เสนาะล้ำ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำรวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ต่องานทดลองนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ท้ายนี้ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุทุกท่านที่สนับสนุน ร่วมคิด ร่วมสร้างและเป็นกำลังใจ จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ศักดิ์ชัย จันทศรี

6 พฤษาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการพื้นฐานการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	3
2.2 โลหะวิทยาการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก	5
2.3 ตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	6
2.4 กลไกสำคัญในการเชื่อมยึดอะลูมิเนียมและเหล็ก	7
2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม	9
2.6 อะลูมิเนียม	13
2.7 การทดสอบสมบัติทางกล	17
2.8 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค	21
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	25
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการวิจัย	30
3.1 แผนการดำเนินงาน	30
3.2 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์	31
3.3 กรรมวิธีการเชื่อม	35
3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง	40
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ตรวจสอบลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมและวิเคราะห์การการกระจายตัวของอิเอ็กตรอน	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	45
4.1 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 250 รอบ/นาทีและความเร็วเดินในการเชื่อมต่าง ๆ	45
4.2 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินในการเชื่อมต่าง ๆ	62
4.3 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 750 รอบ/นาที และความเร็วเดินในการเชื่อมต่าง ๆ	78
4.4 เปรียบเทียบอิทธิพลความเร็วรอบตัวกวนที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมแต่ละรูปร่างตัวกวน	92
4.5 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยฉีกขาด	96
4.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม	103
4.7 วิเคราะห์การกระจายตัวอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม	107
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	111
5.1 สรุปผลการทดลอง	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารอ้างอิง	113
ภาคผนวก	
ก ภาพโครงสร้างจุลภาค มหาภาคของรอยเชื่อม เครื่องมือกลและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการ ทดลองและกราฟแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนการกำหนดเทมเปอร์สำหรับอะลูมินัมผส ตารางแปลงหน่วยมาตรฐานทดสอบความแข็งแบบ Vickers hardness test	115
ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	139
ประวัติผู้เขียน	152

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW)	3
2.2	กลไกการเกิดการรวมตัวของวัสดุ	4
2.3	สมดุลเฟสของอะลูมิเนียมและเหล็ก	5
2.4	ตำแหน่งการเริ่มสอดตัวกวนเข้าสู่แนวรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก	7
2.5	การทดสอบแรงดึง: (ก)การให้แรงแก่ชิ้นงาน(ข)ชิ้นทดสอบ(ค)เครื่องทดสอบ	18
2.6	ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด	18
2.7	การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี	20
2.8	องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ	20
2.9	การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค	22
2.10	การขัดผิวชิ้นทดสอบ	23
2.11	อำนาจแยกแยะของ SEM	26
2.12	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	26
2.13	สัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร	27
2.14	ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ	27
2.15	ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ	28
2.16	สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จีดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (EDS)	28
3.1	แผนภาพการไหลโดยรวมขั้นตอนการดำเนินงาน	30
3.2	ลักษณะการต่อชนระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม	31
3.3	อุปกรณ์จับยึด (Fixture)	32
3.4	เครื่องกัดอัตโนมัติซีเอนซี (CNC Milling Machine)	32
3.5	เครื่องตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	33
3.6	เครื่องกลึง (Machine lathe)	33
3.7	เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง	34
3.8	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	34
3.9	ส่วนต่างๆ ของตัวกวน	35
3.10	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกระบอก (หน่วย : มม.)	36
3.11	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว (หน่วย : มม.)	36
3.12	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกรวย (หน่วย : มม.)	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.13	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว (หน่วย : มม.)	37
3.14	ตัวกวนรูปแบบต่างๆ	37
3.15	การขึ้นรูปเครื่องมือเชื่อมด้วยการกลึง	38
3.16	การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อชนชิ้นงาน	39
3.17	ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม	39
3.18	ชิ้นทดสอบแรงดึง (AWS - D 1.2)	40
3.19	ตำแหน่งการตัดชิ้นงานเชื่อมเพื่อทำชิ้นทดสอบแรงดึง (หน่วย: มม.)	40
3.20	ใบเครื่องมือตัด	41
3.21	ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย : มม.)	41
3.22	อุปกรณ์การหล่อเรซิน	42
3.23	ชิ้นงานหลังการหล่อเรซิน	42
3.24	การขัดกระดาษทราย	43
3.25	น้ำยาที่ใช้ในการกัดกรด	43
3.26	การนำชิ้นงานมาสแกนด้วยเครื่องสแกน	43
3.27	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	44
4.1	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	45
4.2	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	46
4.3	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	47
4.4	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	48
4.5	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	50
4.7	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	50
4.8	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	51
4.9	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	52
4.10	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	52
4.11	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	53
4.12	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	54
4.13	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	55
4.14	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	56
3.15	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	58
4.17	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วเดิน 250 มม./นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	58
4.18	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่(ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	59
4.19	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	60
4.20	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	60
4.21	ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากการดึงที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที	61
4.22	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	62
4.23	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	63
4.24	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	64
4.25	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาทีความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.26	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	65
4.27	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	66
4.28	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	67
4.29	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอกเป็นเกลียวความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 125 (ง) 150 (จ) 175 มม./นาที	68
4.30	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	68
4.31	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	69
4.32	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	70
4.33	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน(ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	71
4.34	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	72
4.35	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 (ฉ) 175 มม./นาที	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.36	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	73
4.37	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	74
4.38	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน(ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	75
4.39	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	75
4.40	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	76
4.41	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	77
4.42	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที	78
4.43	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 (ฉ) 175 มม./นาที	79
4.44	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	80
4.45	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.46	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	82
4.47	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	82
4.48	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	83
4.49	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	84
4.50	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	85
4.51	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	86
4.52	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	86
4.53	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียว ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	87
4.54	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียว ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน(ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	88
4.55	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวความเร็วรอบที่750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.56	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	89
4.57	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50(ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	90
4.58	ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที	91
4.59	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน	92
4.60	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเป็นเกลียวและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน	93
4.61	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน	94
4.62	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเป็นเกลียวและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน	95
4.63	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดของระยะเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที	97
4.64	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที	97
4.65	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที	98
4.66	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 175 มม./นาที	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.67	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที	100
4.68	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 50 มม./นาที	100
4.69	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที	100
4.70	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 175 มม./นาที	102
4.71	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกระบอกที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด	103
4.72	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกระบอกเกลียวที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด	104
4.73	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกรวยที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด	105
4.74	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกรวยเกลียวที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด - ต่ำสุด	106
4.75	โครงสร้างอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่แสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ตัวกวนรูปทรงต่างๆ: (ข)(ค) ทรงกระบอก 500 รอบ/นาที (ง)(จ) ทรงกระบอกเกลียว 500 รอบ/นาที -125 มม./นาที (ฉ)(ช) ทรงกรวย 500 รอบ/นาที และ (ซ)(ฌ) ทรงกรวยเกลียว 500 รอบ/นาที-125 มม./นาที	108

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430	12
2.2	สมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430	12
2.3	สมบัติทางกายภาพเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430	12
2.4	กลุ่มตัวเลข 4 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมขึ้นรูป	14
2.5	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 6063	16
2.6	สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม 6063	16
2.7	สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 6063	16
2.8	โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด	19
2.9	ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด	20
2.10	รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก	24
2.11	รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก	25
4.1	ส่วนผสมทางเคมีของอินเทอร์เฟสบนรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแต่ละชนิดของตัวกวน	110

บทที่ 1
บทนำ

1.1 แนวคิดหรือที่มาของโครงการ

รอยต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar materials joint) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากรอยต่อของวัสดุต่างชนิดทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น และสามารถนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ในปัจจุบันได้นำเอาอะลูมิเนียมเข้ามาใช้งานแทนที่ชิ้นส่วนโครงเหล็กสร้างเพื่อลดน้ำหนักโครงสร้างรถยนต์ และทำให้รอยต่อของเหล็กและอะลูมิเนียมมีความสำคัญในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น [1]

อย่างไรก็ตามการต่อเชื่อมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันเป็นวิธีค่อนข้างยากลำบาก เนื่องจากวัสดุต่างชนิดกันมีสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน และเมื่อเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน มักเกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น เช่นความแตกต่างของโมดูลัสอิลาสติก (Elastic modulas) ก่อให้เกิดความไม่เข้ากันทางกล (Mechanical incompatibility) และก่อให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) หรือความเค้นไม่ต่อเนื่อง (Stress discontinuities) ที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของการนำความร้อนของวัสดุต่างชนิดเมื่อทำการเชื่อมต่อกันทำให้เกิดการกระจายความร้อนของวัสดุที่ต่างกัน และทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stresses) ส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถต้านทานต่อแรงกระทำได้ต่ำ ในอดีตได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อม เพื่อทำการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเข้ากับเหล็กด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมความต้านทาน ซึ่งมีหลักการ คือชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นทรงกลมหมุนเสียดเข้ากับชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม เพื่อก่อให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทาน ชิ้นงานจะถูกอัดเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมและก่อให้เกิดการเชื่อมระหว่างโลหะสองชิ้น อย่างไรก็ตามกรรมวิธีนี้มีข้อจำกัดที่ชิ้นงานอย่างน้อยหนึ่งข้างจะต้องมีภาพตัดเป็นทรงกลม และมีการเชื่อมด้วยอัลตร้าโซนิคเป็นวิธีเชื่อมที่ต้องอาศัยคลื่น แต่มีข้อเสียคือมีการประยุกต์ใช้ที่ไม่แพร่หลาย และนอกจากนี้ยังมีการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด ซึ่งก็มีข้อเสียคือใช้พลังงานค่อนข้างสูง ดังที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียมและเหล็กยังมีข้อจำกัด ดังนั้นการพิจารณากระบวนการเชื่อมอื่นๆ เพื่อทำการเชื่อมอะลูมิเนียมและเหล็กจึงมีความจำเป็น เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆต่อไป[2]

1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติของรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430

1.2.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อสมบัติทางกลรอยต่อชน ดังนี้ ความเร็วรอบของตัวกวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และระยะตำแหน่งตัวกวน

1.3.2 ประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อชนแผ่นอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ความหนาของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากับ 3 มม.

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวกวนที่มีรูปร่างต่างๆ ได้แก่ ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และตัวกวนทรงกรวยเกลียว

1.3.4 การศึกษาตัวแปรการเชื่อม

1) ความเร็วรอบของตัวกวน (S) 250 500 และ 750 รอบ/นาที
2) ความเร็วเดินของแนวเชื่อม (F) 50 75 100 125 150 และ 175 มม. /นาที
3) ความลึกของตัวกวนที่กดลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่า 2.8 มม.

1.3.4 หาค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างมหภาคของผิวหน้ารอยเชื่อม ลักษณะการฉีกขาด

1.3.6 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม

1.3.7 ศึกษาลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด และหาส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อศึกษาแนวคิดเบื้องต้น ในการออกแบบตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เพื่อทำให้เกิดค่าความแข็งแรงของรอยต่อชนสูงสุด และเป็นการนำเสนอรูปแบบวิธีการเชื่อมเบื้องต้นที่คาดว่าจะนำไปสู่การทดลองต่อไป

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการนำเสนอกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเป็นงานที่ไม่มีการทำการทดลองในอดีต

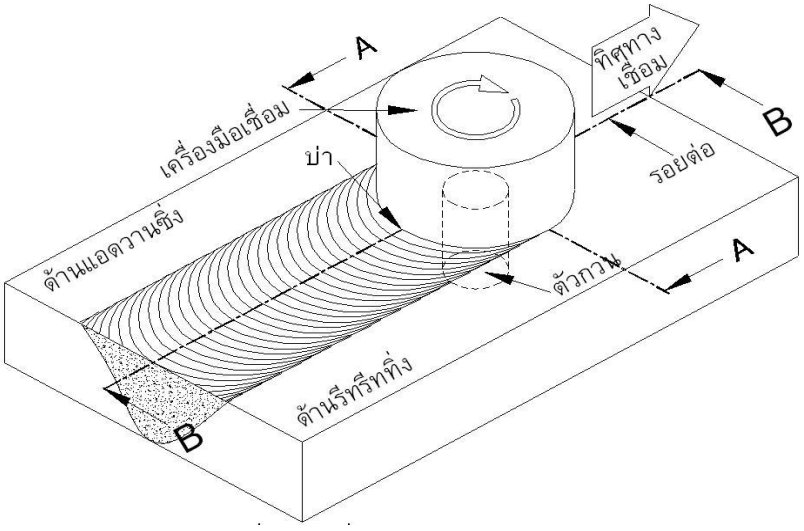
1.4.3 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ในการปรับปรุงกระบวนการเชื่อม เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรง และตัวกวนที่ดีที่สุด

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการต่อของรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ไม่ได้มีรายงานการวิจัย ดังนั้นการค้นหาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมและโลหะวิทยาทั้งสอง รวมไปถึงงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบทนี้กล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองต่อไป

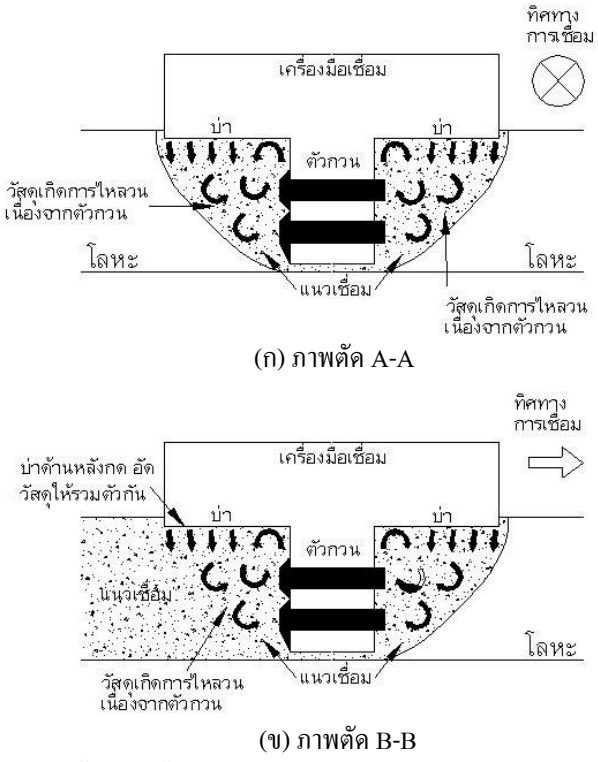
2.1 หลักการพื้นฐานการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [2]

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันเพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลายดั้งเดิม (Conventional fusion welding) เช่น อะลูมิเนียมผสม[2] เมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย FSW สามารถทำให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded zone) กรรมวิธีนี้ FSW ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิผลในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมโดยสังเขปดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) [2]

ตัวกวน (Probe or stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (Rotating tool) สอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic fluid-like state) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงภาพตัด A-A และ B-B ดังรูปที่2.2 แสดงวัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดย้อนลงมาเนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้นซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction stir welding” อย่างไรก็ตามคำจำความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายเป็นเบื้องต้น



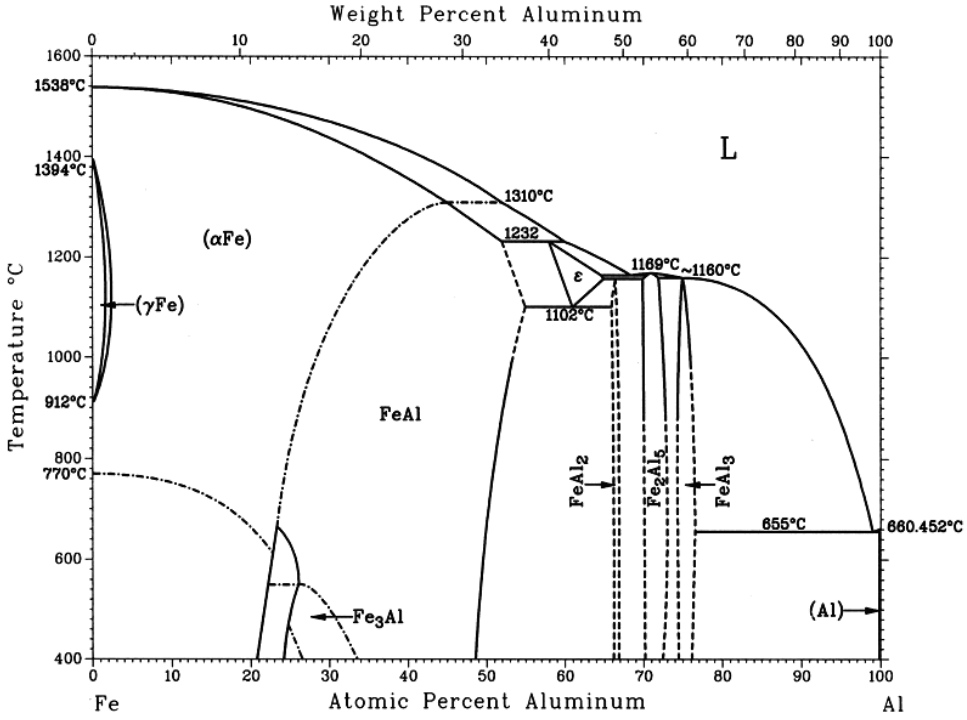
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดการรวมตัวของวัสดุ [2]

ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อวัสดุตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทรีททิ่ง และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซิ่งดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 (ด้านรีทรีททิ่ง คือด้านที่ทิศ ทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซิ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนาน

กับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมจะกด อัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดัง รูปที่ 2.1 และ 2.2 (ข)

2.2 โลหะวิทยาการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก

การต่อเชื่อมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันเป็นวิธีที่ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากวัสดุต่างชนิดกันมีสมบัติทางกล กายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน และเมื่อทำการเชื่อมหรือรวมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกัน มักเกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น เช่น ความแตกต่างของโมดูลัสอิลาสติก (Elasticity modulus) ก่อให้เกิดความไม่เข้ากันทางกล(Mechanical incompatibility) และก่อให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น(Stress concentration) หรือความเค้นไม่ต่อเนื่อง (Stress discontinuities) ที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของการนำความร้อนของวัสดุต่างชนิดเมื่อทำการเชื่อมยึด ทำให้เกิดการกระจายความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกัน และทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stresses) ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถต้านทานต่อแรงกระทำได้ต่ำ[3] ส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างทำให้เกิดการก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound : IMC) ที่มีความแข็งและเปราะซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ลดความแข็งแรงของรอยต่อ IMC ที่มักก่อตัวขึ้นในการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กมี 5 ชนิดใหญ่ๆ คือ Fe_3Al FeAl $FeAl_2$ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ



รูปที่ 2.3 สมดุลเฟสของอะลูมิเนียมและเหล็ก [4]

สามารถแบ่งกลุ่มตามส่วนผสมทางเคมีออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีปริมาณของเหล็กผสมอยู่มาก (Iron-rich IMC) ประกอบด้วย Fe_3Al และ FeAl มีสมบัติ คือ มีความต้านทานการสึกกร่อน (Wear Resistance) มีความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) และมีความแข็งแรง (Strength) สูง จึงเป็นโครงสร้างที่เหมาะกับการนำไปใช้งาน ขณะที่อีกกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง (Aluminum-rich IMC) ประ กอบด้วย $FeAl_2$ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ซึ่งมีสมบัติที่แข็งและเปราะ ความต้านทานต่อแรงกระทำต่ำ เป็นกลุ่มที่ควรหลีกเลี่ยงในการนำมาใช้งาน [5] ดังนั้นการหากระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในการต่ออะลูมิเนียมและเหล็กกล้า เข้าด้วยกันเพื่อนำไปใช้งานจึงเป็นเรื่องสำคัญที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียมและเหล็กจะเห็นว่า กราฟการเชื่อมในสภาพของแข็งนั้น จะเป็นการวิ่งเข้าหากันของอะตอมระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการแทรกเข้าหากันในอุณหภูมิต่ำกว่าการหลอมละลาย เหล็กบริสุทธิ์หลอมละลายที่อุณหภูมิ 1,538 องศาเซลเซียส และอะลูมิเนียมบริสุทธิ์หลอมละลายที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการเชื่อมในสภาพของแข็งนี้ พอสรุปได้ว่า เป็นการเคลื่อนตัวของอะตอมเข้าหากัน

2.3 ตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

รอยต่อของวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เกิดจากการไหลตัวของวัสดุที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียดทานและเกิดการเปลี่ยนรูปถาวะของวัสดุ ตัวแปรการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้การเกิดขึ้นของการไหลอย่างประสิทธิภาพของวัสดุ และค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญประกอบไปด้วย

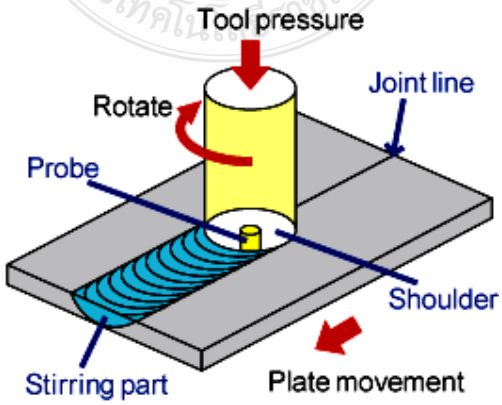
1) ความหนาของวัสดุ
2) ชนิดของรอยต่อ
3) ชนิดของวัสดุ
4) ตำแหน่งการวางแผ่นวัสดุ
5) รูปร่างของตัวกวน
6) ความเร็วรอบของตัวกวน
7) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
8) ความเอียงของตัวกวน

ในอดีตที่ผ่านมา มีการศึกษาถึงอิทธิพลตัวแปรบางตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของรอยต่อวัสดุต่างๆ เช่น Lee et al. รายงานว่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียมหล่อ A356 มีค่าเพิ่มเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลิกอนเกิดการตกผลึกในสารละลายอะลูมิเนียมและทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งของสารละลาย (Solid solution hardening) ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าสูงสุดมากกว่าค่าความแข็งแรงของอะมิเนียม 20% อย่างไรก็ตาม Ericson

and sandstom.[5] พบว่าความแข็งแรงต่อความล้าของรอยต่อชนอะลูมิเนียมA 6082 มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินแนวเชื่อมโดยในรายงานไม่ได้ระบุถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมอาร์คด้วยลวดทังสเตน (Gas tungsten arc welding : GTAW) หรือการเชื่อมทิก (Metal inert gas : TIG) แล้ว รอยเชื่อม FSW มีค่าความต้านทานความล้ามากกว่า Lie et al.แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียม 2017–T351 ลดลงเมื่อระยะห่างการเคลื่อนที่ (Revolution pitch or welding speed / Rotating speed) มีค่าเพิ่มขึ้น และพื้นที่รอบๆ การเกิดการกวนของวัสดุ คือพื้นที่ที่มีความแข็งต่ำสุดและเป็นตำแหน่งที่เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบ จากตัวอย่างทั้งสามงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของรอยต่อของอะลูมิเนียมด้วยเหตุนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม FSW เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดต่อไป [2]

2.4 กลไกสำคัญในการเชื่อมยึดอะลูมิเนียมและเหล็ก

ในการเชื่อมรอยต่อระหว่าอะลูมิเนียมและเหล็กได้มีการรายงานกลไกการเชื่อม FSW ที่น่าสนใจโดย Kimapong and Watanabe [5] รายงานเทคนิคการเชื่อมรอยต่ออะลูมิเนียม A5083 และเหล็กกล้า SS400 ว่าในการสอดตัวกวนเข้าสู่แนวรอยต่อชนของแผ่นอะลูมิเนียมและเหล็ก จะมีความแตกต่างจากการสอดตัวกวนเข้าสู่แนวต่อของการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันดังรูปที่ 2.4 โดยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนจะต้องอยู่แนวเดียวกับแนวรอยต่อ (Butt path) ของแนวเชื่อม ขณะเดียวกันในการเชื่อมอะลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก การสอดตัวกวนที่แนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนและแนวรอยต่อเป็นแนวเดียวกันนั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากจะทำให้เกิดการพังทลายของตัวกวนจึงจำเป็นต้องสอดตัวกวนลงไปในด้านของอะลูมิเนียมก่อนและเคลื่อนผิวด้านข้างของตัวกวนเข้าสู่ด้านของเหล็กดังรูปที่ 2.2 การวางแผนของวัสดุนั้นมีความสำคัญที่ต้องพิจารณาให้ดี เนื่องจากตาม



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งการเริ่มสอดตัวกวนเข้าสู่แนวรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก [2]

การรายงานของ Kimapong and Watanabe [5] ได้แสดงให้เห็นว่าเหล็กต้องวางอยู่ที่ด้านแอดวานซิ่ง (ด้านที่มีทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเดินแนวเชื่อมไปในทิศทางเดียวกัน) และแผ่นอะลูมิเนียมต้องวางที่ด้านรีทรีทติ่ง (ด้านที่มีทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเดินแนวเชื่อมสวนทางกัน) เท่านั้น เมื่อตัวกวนสอดเข้าไปในแผ่นอะลูมิเนียมแล้ว ความร้อนเสียดทานที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิวของเครื่องมือเชื่อมทำให้อะลูมิเนียมอ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ภายใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม เมื่อผิวด้านข้างของตัวเคลื่อนที่เข้าไปถูกับผิวรอยต่อของเหล็ก ชั้นออกไซด์บางๆ จะถูกขัดสีให้หลุดออกไปทำให้ผิวบริเวณดังกล่าวเกิดการกระตุ้นและพร้อมจะรับการยึดเกาะจากวัสดุใดๆที่เคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งอะลูมิเนียมที่อ่อนตัวที่เคลื่อนที่ภายใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม คือวัสดุที่อยู่ใกล้กับผิวกระตุ้นทำให้ถูกอัดดันเข้าไปสู่พื้นที่ดังกล่าวด้วยแรงหมุนและเกิดการเกาะยึดกับผิวของเหล็กต่อไป เทคนิคนี้เรียกว่าเทคนิคการกระตุ้นผิวของเหล็กเพื่อให้เกิดการเกาะยึด (Interface activated-adhesion technique") มีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตัวกวนที่หมุนสอดลงไปในชิ้นงานจนกระทั่งปลายของตัวกวนอยู่ในตำแหน่งความลึกที่กำหนด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุและตัวกวนทำให้วัสดุรอบๆตัวกวนอ่อนตัวเข้าสู่ภาวะพลาสติกหลอมเหลวคล้ายของไหล (Fluid-like plastic state) อะลูมิเนียมจะเกิดการเคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน

ขั้นตอนที่ 2 ผิวของเหล็กภายใต้ปลายตัวกวนจะถูกขัดและกำจัดชั้นบางๆ บนผิวหน้าของเหล็กด้วยตัวกวนที่กำลังหมุน ส่วนของผิวหน้าเหล็กจะถูกดันขึ้นไปบนด้านอะลูมิเนียมและมีลักษณะคล้ายกับครีบของปลา (Fin-like shape) ผิวของเหล็กที่ติดกับตัวกวนที่หมุนจะเปลี่ยนภาวะเป็น "ผิวกระตุ้น (Activated stell surface)"

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อตัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมอะลูมิเนียมจะถูกส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนจากด้านหน้าของบ่าเครื่องมือสู่ด้านหลังของบ่าเครื่องมือและเข้าสู่ช่องว่างระหว่างตัวกวนและครีบของเหล็กที่สร้างขึ้นมาและมีภาวะเป็นผิวกระตุ้นในขั้นตอนที่ 2 ทิศทางการเติมอะลูมิเนียมจากนั้นผิวกระตุ้นของเหล็กดึงดูดอะลูมิเนียมที่เคลื่อนที่ใกล้เคียงและเกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโลหะสองชนิดด้วยพันธะโลหะ (Metallic bond)

ขั้นตอนที่ 4 ตัวกวนที่หมุนและเคลื่อนที่ตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมสร้างครีบของเหล็กขึ้นมาและเปลี่ยนภาวะเป็นผิวกระตุ้นเมื่อครีบอันอื่นๆ ถูกสร้างขึ้นและดันเข้าหาอะลูมิเนียมและทำการเชื่อมยึดระหว่างโลหะทั้งสองขึ้น[2]

2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) [6]

ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมนับเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญด้านอุตสาหกรรม และการใช้งานทั่วไปเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติด้านความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนสูง เหล็กกล้าไร้สนิมมีอยู่หลากหลายประเภทจึงมีการเลือกใช้ตามลักษณะและคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อให้ตรงกับลักษณะการใช้งาน จากหนังสือ และงานวิจัยต่างๆ มากมาย พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิม หมายถึง เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโครเมียมอยู่อย่างน้อย 10.5% ซึ่งโครเมียมนั้นส่งผลให้เกิดคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน โดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะสามารถสร้างฟิล์มบางๆ ของโครเมียมออกไซด์ ซึ่งมีความแน่นและบางมาก เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเหล็กกล้า ซึ่งฟิล์มบางๆ ที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่ปกป้องเหล็กกล้าเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศภายนอก

2.5.1 เหล็กกล้าไร้สนิม สามารถแบ่งออกได้ 5 กลุ่มพื้นฐาน ได้ดังนี้ [6]

1) เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก หมายถึง เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมีโครงสร้างพื้นฐานเฟอร์ไรท์ตามปกติมีธาตุโครเมียมผสมอยู่ 11-30 % คาร์บอนไม่เกิน 0.12% แบ่งได้ 2 ชนิดคือ ถ้าจำแนกตามระบบตัวเลขได้แก่ AISI 405 430 442 และ 446 แยกตามส่วนผสมทางเคมีได้ดังนี้

- เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกคาร์บอนต่ำ มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ 15-18% คาร์บอนไม่เกิน 0.12% ไม่สามารถเพิ่มความแข็ง โดยการชุบแข็งได้ แต่มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในบรรยากาศทั่วไปยกเว้นในน้ำทะเลและสารละลายที่เป็นกรด
- เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกทนความร้อน (Refractory ferritic stainless steels) มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 25-30% คาร์บอน 0.3% เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุผสม เช่น
- เหล็กมีปริมาณโครเมียม 20% อะลูมิเนียม 3.5% สามารถทนความร้อนได้สูง 1,250 °C
- เหล็กมีปริมาณโครเมียม 30% อะลูมิเนียม 5% สามารถทนความร้อนได้สูง 1,250-1300 °C
- เหล็กมีปริมาณโครเมียม 30-35% อะลูมิเนียม 6% สามารถทนความร้อนได้สูง 1,300-1,350°C

2) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก ที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) และนิเกิล (Ni) ประมาณ 9% (ช่วงของส่วนผสมของ Ni +/-1%) การผสมนิเกิลทำให้เหล็กกลุ่มนี้ต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติกโดยนิกเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเตนไนต์ เหล็กกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชั่นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของ

เตาหลอม เหล็กกลุ่มออสเตนนิติกนี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติกในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกลุ่มออสเตนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ใกล้เคียงกับของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติด (ในสภาพผ่านการอบอ่อน) เช่น เกรด 304 316L 321 301 การใช้งาน เช่น หม้อ ช้อน ถาด

3) เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก จะผสมโครเมียมประมาณ 11.5 - 18% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนพอสมเหมาะและสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 การใช้งาน เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด

4) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเตนไนต์และเฟอร์ไรต์ มีโครเมียมผสมประมาณ 21 - 28% และนิเกิลประมาณ 3 - 7.5% เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง เช่น เกรด 2304 2205 2507

5) เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก มีโครเมียมผสมประมาณ 15 - 18% และนิเกิลอยู่ประมาณ 3 - 8 % เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปั๊ม หัววาล์ว ตัวอย่างเกรดของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น PH13 - 9Mo AM – 350

2.5.2 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม [6]

เหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าความหนาแน่นสูง ซึ่งแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะประเภทอื่น ในส่วนของสมบัติเกี่ยวกับความร้อน ความสามารถทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิม เหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน เช่น ตู้คอนเทนเนอร์ หรือต้องการสมบัตินำความร้อนได้ดี เช่น เครื่องถ่ายความร้อน การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมากๆ ได้ โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย เช่น ในการทำหลังคา

2.5.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม [6]

เหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70 - 80% จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม มีความแข็งและความแกร่ง เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับวัสดุชนิดอื่น เมื่อเราเปรียบเทียบวัสดุชนิดอื่นที่มีความแข็งแรงและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอย่างพลาสติกและวัสดุที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงอย่างเซรามิกจะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมีความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักที่สูงกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่าที่เป็นกลางของทั้งความแข็งความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก และจะมีเพิ่มขึ้นอีกในชนิดออสเตนนิติก

2.5.4 ผลของธาตุผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม [6]

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทน - ซิติก เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก จะมีคาร์บอน (C) โดยทั่วไปไม่เกิน 0.15% ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือ 0.02% ($\leq$ 0.03%) และ 0.07% (0.04 – 0.15%) การผสมไททาเนียม หรือไนโอเบียม ในเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยจับตัวกับคาร์บอน ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการเชื่อม โครเมียม (Cr) ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 10.5% นิเกิล (Ni) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบมุมอับในสารละลายกรด เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมนิกเกิลอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 9% (6.0 – 15.0%)

2.5.5 การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม [6]

เหล็กกล้าไร้สนิม มีความสามารถความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีต่อกรดอ่อนๆ น้ำตามอุตสาหกรรม บรรยากาศตามเมือง มีความความสามารถในการขึ้นรูปปานกลางกับงานทั่วไป แต่สามารถขึ้นรูปได้ดีกับงานขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

2.5.6 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 [6]

ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างมากมายทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรมต่างๆ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 มีคุณสมบัติมากมายที่เหมาะกับงานครัวเรือนเนื่องจากทนความร้อนและไม่มีอันตรายเมื่อใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร ในอุตสาหกรรมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 ถือว่ามีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ ได้นำเหล็กกล้าไร้สนิม 430 มาใช้เป็นชิ้นส่วนและท่อไอเสีย และยังถูกมาใช้ประโยชน์ได้อีกมากมาย ทั้งในอุตสาหกรรมการบินและอุตสาหกรรมเครื่องมือต่างๆ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 มีความสามารถในด้านการต้านทานการกัดกร่อนสูงและสามารถป้องกันปฏิกิริยาที่เกิดจากออกซิเจนได้ดี มีความแข็งแรงทนทาน

1) การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 เป็นโลหะสำคัญชนิดหนึ่งที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและงานเชื่อมต่างๆ ดังนั้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การเชื่อมแก๊ส การเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า เป็นต้น ธาตุผสมในโลหะชนิดนี้ส่งผลต่อจุดหลอมละลายของเหล็กกล้า โดยจุดหลอมละลายของเหล็กกล้าชนิดนี้อยู่ที่ประมาณ 1,250 – 1,350 °C ในปัจจุบันนี้การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนสามารถนำมาทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 ได้

2) การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 สามารถนำมาใช้ได้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการ ผลิตอาหารและเครื่องดื่ม หรืออุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ที่เกี่ยวกับอาหาร ซิงค์น้ำ ส่วนประกอบอุปกรณ์ให้ความร้อน ท่อไอเสียต่างๆ อุปกรณ์เครื่องใช้ ภายในบ้าน ส่วนประกอบ เครื่องครัว

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 [7]

ธาตุประกอบในโลหะ	เปอร์เซ็นต์
โครเมียม (Cr)	17.00
นิเกิล (Ni)	0.75
แมงกานีส (Mn)	1.00
คาร์บอน (C)	0.12
ฟอสฟอรัส (P)	0.04
ซัลเฟอร์ (S)	0.03
ซิลิกอน (Si)	1.00

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 [7]

สมบัติทางกล	ผลของสมบัติทางกล
Tensile Strength (MPa)	450
Proof Strees 0.2% (MPa)	205
Elongation A5 (%)	22
Hardness (HB)	160

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 [7]

สมบัติทางกายภาพ	ผลของสมบัติทางกายภาพ
Density	7.75 g/cm^3
Melting Point	1425 – 1510 °C
Modulus of Elasticity	200 GPa
Electrical Resistivity	0.060 x 10^{-6} Ω.m
Thermal Conductivity	23.9 W/m.K at 100°C
Thermal Expansion	10.4x10^{-6} /K at 100°C

2.6 อะลูมิเนียม (Aluminum) [8]

อะลูมิเนียมถือเป็นโลหะที่สำคัญมากทั้งในครัวเรือน อุตสาหกรรม งานวิจัย อะลูมิเนียมได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light metals) เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาแต่ยังคงมีความแข็งที่ใกล้เคียงกันกับโลหะเหล็ก เมื่อเทียบกับเหล็กแล้วถือว่าอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็ก อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความเค้นประมาณ 90 MPa สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง ข้อเสียของอะลูมิเนียมมีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก

2.6.1 ประเภทของอะลูมิเนียม [8]

อะลูมิเนียมถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความสำคัญมาก อะลูมิเนียมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีทั้งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสม จากสมบัติที่หลายหลายของอะลูมิเนียมที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมได้ดังนี้

1) แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

- อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure aluminum) มีเปอร์เซ็นต์ของอะลูมิเนียมอยู่ถึง 99.00% และมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่อีก 1% เช่น เหล็กและซิลิกอน หรือไม่มีส่วนผสมอื่นๆ อยู่เลย อะลูมิเนียมชนิดนี้ใช้ในงานขึ้นรูปได้ดี สมบัติของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์คือ จะมีความ เหนียวสูงมาก ทั้งนี้ก็เพราะว่าอะลูมิเนียมระบบผลึกเป็นแบบ FCC

- อะลูมิเนียมผสม (Wrought aluminum) คือ อะลูมิเนียมที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ตั้งแต่หนึ่งธาตุขึ้นไป อะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด ธาตุที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส แมกนีเซียม ซิลิกอนโครเมียม สังกะสี และนิเกิล โลหะที่ผสมทำให้มีความคงทนต่อแรงดึงสูง
- อะลูมิเนียมหล่อ (Cast aluminum) อะลูมิเนียมชนิดนี้ได้จากกรรมวิธีการหล่อ 3 แบบใหญ่ๆ คือ หล่อทราย หล่อแบบถาวร และหล่อแบบอัดฉีด (Die cast)

อะลูมิเนียมสามารถแบ่งตามส่วนผสมทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 8 กลุ่ม คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โลหะผสมอะลูมิเนียม - ทองแดง โลหะผสมอะลูมิเนียม - แมงกานีส โลหะผสมอะลูมิเนียม - ซิลิกอน โลหะผสมอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม โลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม - ซิลิกอน โลหะผสมอะลูมิเนียม - สังกะสีและโลหะผสมอะลูมิเนียม - ธาตุอื่นๆ

2) การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม [9]

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminum association of america) ได้จัดโลหะผสมของอะลูมิเนียมขึ้นรูปเป็นหมวดหมู่ตามส่วนผสมและใช้เลข 4 หลักเป็นสัญลักษณ์ในการ

กำกับชื่อของโลหะ ในปัจจุบันนี้การกำกับชื่อตามนี้เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายจนเป็นสากล นิยมความหมายของระบบเลข 4 หลัก มีดังนี้

- เลขหลักที่หนึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงกลุ่มของโลหะผสมซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ตามตารางเช่น 1XXX แทนโลหะที่มีอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นต้น
- เลขหลักที่สองใช้สำหรับกำกับเมื่อมีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 0 แสดงว่าเป็นโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 1-9 แสดงว่าเป็นส่วนที่ได้จากการดัดแปลงให้ผิดไปจากเดิม เช่น 2024 (4.5 Cu, 1.5Mg, 0.5Si, 0.1 Cr) เทียบกับ 2218 (4.0 Cu, 2.0 Ni, 1.5 Mg, 0.2 Si) ซึ่งสังเกตได้ว่าโลหะ 2218 มีนิกเกิลผสมเพิ่มเติมเข้าไป
- ตัวเลขหลักที่สามและหลักที่สี่ใช้แสดงชนิดย่อย ๆ ของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างนี้มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น 2014 (4.4 Cu, 0.8 Si, 0.8 Mn, 0.4 Mg) และ 2017 (4.0 Cu, 0.8 Si, 0.5 Mn, 0.5 Mg, 0.1 Cr) เป็นต้น
- เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวหลักที่สามและหลักที่สี่จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่ปรากฏภายหลัง 99 เปอร์เซ็นต์ เช่น 1060 และ 1080 หมายถึงอลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอลูมิเนียมอยู่ 99.60 เปอร์เซ็นต์ และ 99.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 กลุ่มตัวเลข 4 หลักที่ใช้เป็นสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมขึ้นรูป [10]

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

3) สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม [10]

อะลูมิเนียมมีจุดหลอมละลายอยู่ที่ 660 °C อะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นน้อย และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำชิ้นส่วนบางอย่าง ในเครื่องบิน และอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลงเนื่องจากอะลูมีเนียมสามารถใช้แทนโลหะเหล็กในบางชิ้นส่วนได้ จะได้ประหยัดเชื้อเพลิง ตลอดจนชิ้นส่วนอากาศยาน นอกจากนี้อะลูมิเนียมมีความเหนียวมาก จึงสามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ ง่ายและรุนแรง โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก อะลูมิเนียมมีอัตราการไหลตัวสูง มีจุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่ายอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย และไม่มีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหาร และห่อรองรับอาหาร อะลูมิเนียมมีความทนทานต่อการเกิดเป็นสนิม และการผุกร่อน ในบรรยากาศที่ใช้งานโดยทั่วไปได้ดีมาก

4) สมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียม [11]

- ออกซิเจน เมื่ออะลูมิเนียม ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ เรียกว่าอะลูมิเนียมออกไซด์ อยู่ที่ชั้นผิวของ อะลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อไป
- ไนโตรเจน เมื่ออะลูมิเนียม ทำปฏิกิริยา กับไนโตรเจน จะทำให้เกิดไนไตรด์ที่อุณหภูมิสูง
- กำมะถัน เมื่ออะลูมิเนียม ทำปฏิกิริยากับกำมะถันจะไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น
- ไฮโดรเจน เมื่ออะลูมิเนียมทำปฏิกิริยา กับไฮโดรเจน ละลายแทรกซึม เข้าในอะลูมิเนียมได้และในการหล่ออะลูมิเนียมถือว่าไฮโดรเจนเป็นก๊าซ ที่จะต้องกำจัดออก ให้หมดมากที่สุด
- กรดอนินทรีย์ (เข้มข้น) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ กรดอนินทรีย์ ซึ่งอะลูมิเนียมสามารถทนได้บ้าง
- กรดอนินทรีย์ (เจือจาง) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ กรดอนินทรีย์เจือจาง ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทันที
- ด่าง เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับด่าง ซึ่งสามารถ ละลายอะลูมิเนียมได้
- เกลือ เมื่อเกิดปฏิกิริยากับเกลือ ซึ่งสามารถกัดกร่อนอะลูมิเนียมได้
- กรดอินทรีย์ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับกรดอินทรีย์ ซึ่งสามารถละลาย ในอะลูมิเนียมได้ทันที (ยกเว้นกรดน้ำส้ม)
- กรดอินทรีย์ + น้ำ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับกรดอินทรีย์ + น้ำ ซึ่งไม่เกิด ปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม
- ฮาโลเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับฮาโลเจนซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาทันที

5) ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 6063 [11]

ธาตุประกอบในโลหะ	เปอร์เซ็นต์
อะลูมิเนียม (Al)	98.5
ทองแดง (Cu)	0.1
เหล็ก (Fe)	0.3
แมกนีเซียม (Mg)	0.45- 0.9
ซิลิกอน (Si)	0.2-0.6
แมงกานีส (Mn)	0.1
โครเมี่ยม (Cr)	0.1

6) สมบัติทางกลของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม 6063 [11]

สมบัติทางกล	ผลของสมบัติทางกล
Tensile Strength (1000,psi)	35 (T6)
Modulus of Elasticity in Tension(1000,psi)	10.0×10^{6}
Proof Strees 0.2% (1000,psi)	31 (T6)
Elongation (in 2in.),%	12 (T6)
Hardness (HB)	73 (T6)

7) สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 6063 [11]

สมบัติทางกายภาพ	ผลของสมบัติทางกายภาพ
Density ,lb/cu in.	0.098
Melting Temp Range,F	1,140-1,205
Modulus of Elasticity	200 GPa
Electrical Resistivity	0.060×10^{-6} Ω.m
Thermal Conductivity	126 Btu/hr/sq ft/°F/ft
Coef of Ther Exp, per °F	13.0×10^{-6} (68-212 F)

2.7 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุด ในวิธีของการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลด้านพื้นฐานพอสมควร เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบวิธีการทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 2.5 โดยชิ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกดึงด้วยแรงที่กำหนดทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปจนกระทั่งพังทลาย ในการทดสอบแรงดึงอ้างอิงดังรูปที่ 2.6 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในสมการที่ 2.1 ถึง 2.5 ดังนี้ [12]

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \tag{2.2}$$

$$\%elongation = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \tag{2.3}$$

$$\%R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \tag{2.4}$$

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \tag{2.5}$$

เมื่อ σ_t = ความเค้น

F_t = แรงกระทำ

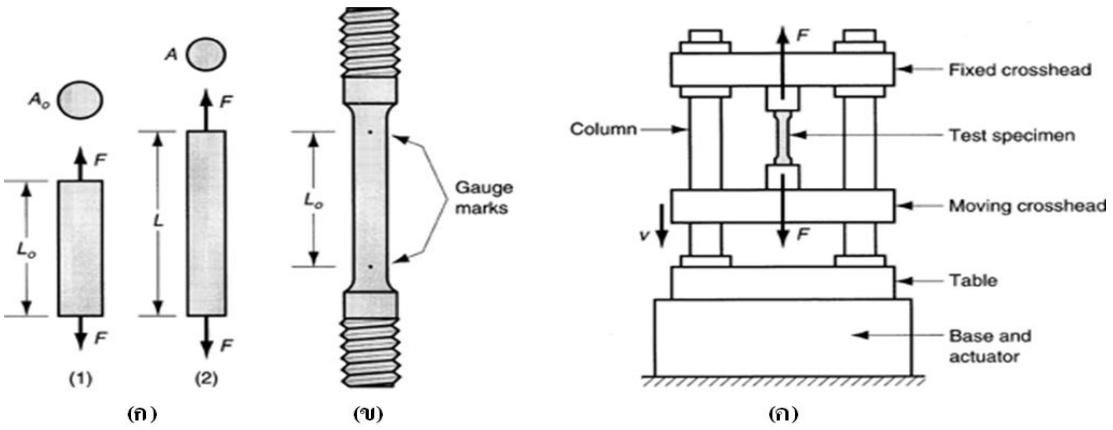
e_t = ความเครียด

L = ความยาวสุดท้าย

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

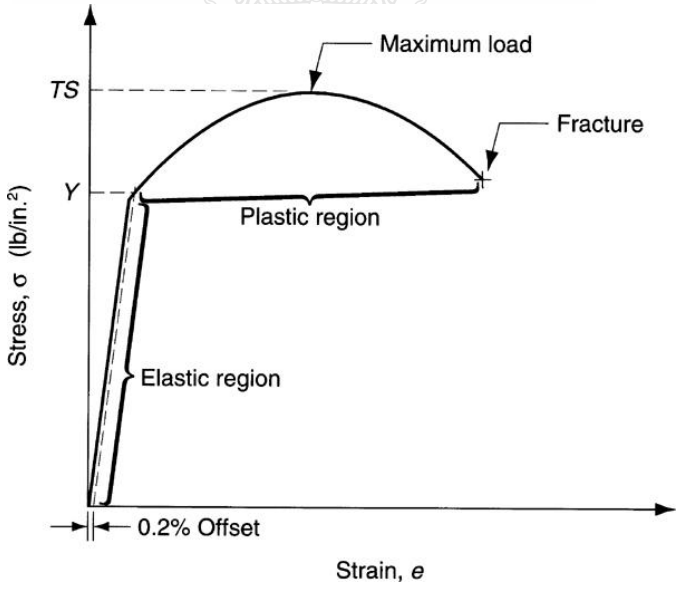
A = พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย

A_0 = พื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 2.5 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [13]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นหลัก โดยจะพล๊อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและค่าความเครียดในแกนนอนดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด [14]

ตารางที่ 2.8 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [13]

โลหะ	โมดูลัสการยืดหยุ่น (MPa)
อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม	69×10^3
เหล็กหล่อ	138×10^3
ทองแดงและทองแดงผสม	110×10^3
เหล็ก	209×10^3
ตะกั่ว	21×10^3
แมกนีเซียม	48×10^3
นิกเกิล	209×10^3
เหล็กกล้า	209×10^3

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้นความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆยืดออกจนถึงจุดๆ หนึ่งในช่วงนี้ที่จะกราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุค (Hook's law) คือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เรียกว่าจุดพิกัดสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic behavior) คือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกจนเกินพิกัดสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงกราฟ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่งนั้น เรียกว่าจุดพิกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวร(Permanent deformation) กับวัสดุนั้นแต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร(Plastic deformation) และจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress)ซึ่งค่านี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ในวัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.20 % แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นโค้งของกราฟค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) ดังรูปที่ 2.6ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิดและความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด แสดงไว้ดังตารางที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ [13]

ตารางที่ 2.9 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [14]

โลหะ	(Yield Strength , MPa)	(Tensile Strength , MPa)
อะลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

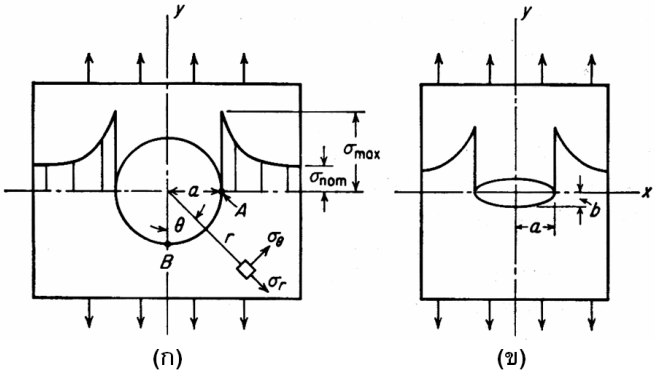
โดยทั่วไปในการทดสอบความแข็งแรงดึง รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รู ร่อง บาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่บริเวณพื้นที่ที่ห่างจากความไม่ต่อเนื่องดังรูปที่ 2.7 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีรูความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดังที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาค่าได้โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress concentra-tion factor : K_t) ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดกับค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิว และค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี ดังรูปที่ 2.8

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nominal}} \tag{2.6}$$

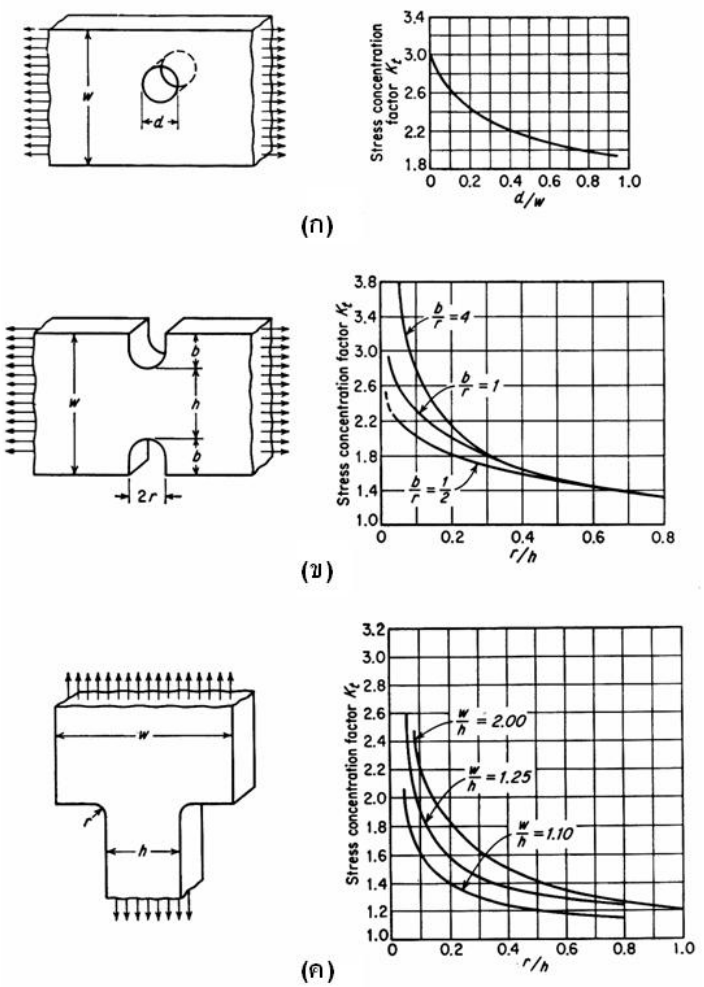
เมื่อ K_t = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี

σ_{max} = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง

$\sigma_{nominal}$ = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [15]



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [15]

2.8 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคมีจุดประสงค์ ดังนี้ คือ การดูความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat affected zone : HAZ) สแลกฝังในการซึมลึกของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า เข้าช่วยการตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่ [12]

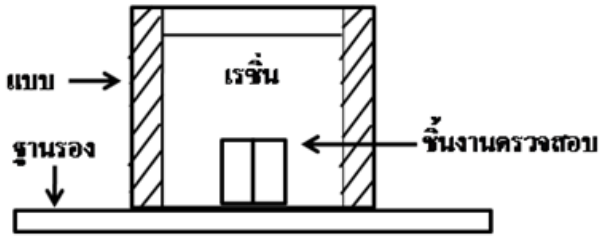
2.8.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตัดชิ้นงานตามขวางออกเป็นชิ้นประมาณ 6 ชิ้นชิ้นแรกและชิ้นสุดท้ายจากขอบงานประมาณ 30 มม. ของปลายทั้งสองข้าง และที่เหลือตัดแบ่งออกเป็น 4 ชิ้น ชิ้นละ 25 มม. ข้อควรระวังคือ การตัดชิ้นงานต้องพยายามมิให้เกิดความร้อน หรือใช้แรงกดระหว่างการตัดมากเกินไปเพราะจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปได้

2.8.2 ขั้นตอนการตรวจสอบ

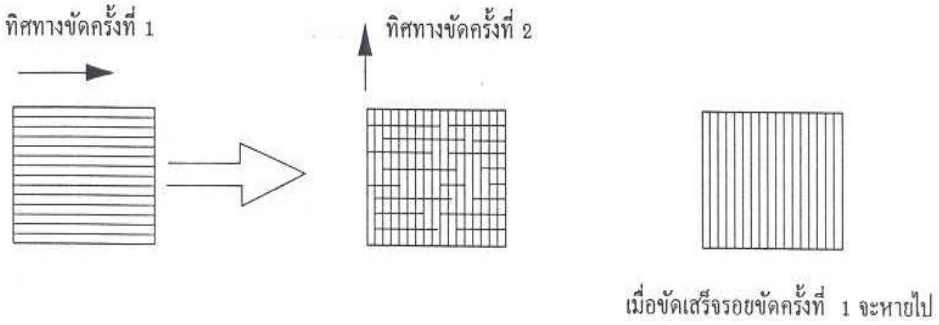
การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องทำการขึ้นตัวเรือน (Mounting) คือการฝังชิ้นงานลงในเรซิ่น ดังรูปที่ 2.9 โดยมีจุดประสงค์ เพื่อทำให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดที่พอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนทำการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยมคม และมุมแหลมของชิ้นงานอยู่เสมอ จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ เบอร์ 600 800 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ โดยการขัดน้ำ (การขัดต้องวางกระดาษทรายบนแผ่นที่เรียบ เช่น กระจกหนา เพื่อให้ได้ระนาบเดียวกัน) จนรอยกระดาษทรายมีทิศทางเดียวกันตลอดชิ้นทดสอบ แล้วหมุนชิ้นทดสอบทำมุม 90องศา ขัดจนรอยเดิมหายไป แล้วเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ที่ละเอียดขึ้นไปจนกระทั่งถึงเบอร์ 1,200

การตรวจสอบและผลการตรวจสอบ อาศัยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) ตามมาตรฐาน ASME Section V โดยตรวจสอบด้วยภาพถ่าย หรืออุปกรณ์กำลังขยายต่ำกว่า10เท่าแล้วบันทึกผลที่ปรากฏโดยการถ่ายรูป หรือสเก็ตภาพ [12]



รูปที่ 2.9 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค [16]

การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 600 800 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การขัดผิวชิ้นทดสอบ [16]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

2.8.3 การกัดกรด

การทดสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะนั้น ในแต่ละชนิดจะต้องมีความแตกต่างกันในการใช้กรด เนื่องด้วยโลหะมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาต่อกรดจึงมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรดให้เหมาะสมกับโลหะงานนั้นๆ สำหรับที่ทำการทดสอบโครงสร้างมหภาคของอะลูมิเนียมผสม การใช้กรดกัดจะต้องมีผสมของ น้ำกลั่น และกรดชนิดต่างๆที่ประกอบด้วยชนิด กรดไฮโดรฟูริก กรดไฮโดรครอริก กรดไนตริก และเมื่อทำการกัดกรดจนมองเห็นโครงสร้างตามต้องการในเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานล้างกรดออกด้วยน้ำที่สะอาดและเช็ดด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน [4]

ตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [15] ดังตารางที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ นี้จะประกอบด้วยรายละเอียดของชื่อน้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนั้นยังได้บอกเวลาในการกัดด้วยน้ำยาเหล่านั้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.10 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก [13]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric acid and hydrochlo - ric)	กรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCI) 10 มิลลิลิตรและเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือเหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มชิ้นตรวจสอบนาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไนตริก (Ferric chloride and Nitric acid)	ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCI_3$) ในกรดไฮโดรคลอริก	เหล็กกล้าไร้สนิม	จุ่มแช่หรือเช็ดด้วยสำลีนาน 5-120 วินาที
ไนตริกและอะเซติก (Nitric and acetic acid)	ไนตริกแอซิด (HNO_3) 30 เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCI_3$) 2 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้มอะเซติกแอซิด (CH_3COOH) 20 มิลลิลิตร	เหล็กไร้สนิมที่มีส่วนผสมของนิกเกิลและโคบอลต์เป็นจำนวนมาก	เช็ดถูด้วยสำลีชุบกรดนาน 10-30 วินาที
โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite)	โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_5$) 15 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง	กัดด้วยกรดในเวลา 10-60 วินาที
ไนตัล (Nital)	ไนตริกแอซิด (HNO_3) 1 มิลลิลิตร ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กชุบแข็งผิวและเหล็กทั่วไป	กัดด้วยกรดนาน 10-15 วินาที
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)	ไฮโดรคลอริกแอซิด (HCI) 50 มิลลิลิตร ผสมแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโครเมียมและนิกเกิล	กัดด้วยกรดนาน 10-30 วินาที

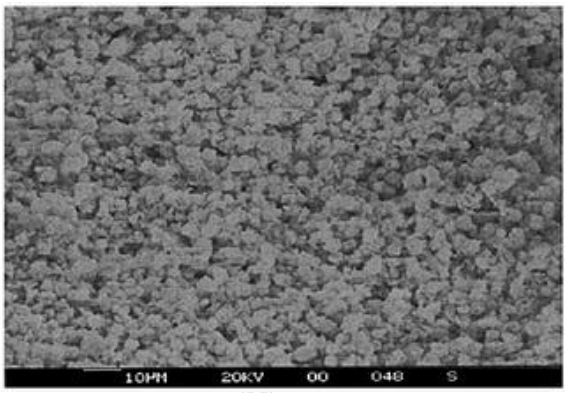
ตารางที่ 2.11 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [13]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริก	กรดไนตริก (HNO_3) 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90 มิลลิลิตร	ทองแดงและทองเหลือง	จุ่มหรือเช็ดนาน 10 -30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริก (Ferric chloride and hydrochloric acid)	เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) 2-5 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5-30 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	ทองแดงผสม	จุ่มหรือเช็ดถูด้วยสำลีนาน 5-15 วินาที
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ ถึง 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือเช็ดนาน 15-45 วินาที
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	เช็ดด้วยสำลีนาน 10-15 วินาที
กรดอะเซติก (Acetic acid)	กรดอะเซติก 2-5 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	แมกนีเซียมผสม	จุ่มแช่
กรดไนตริกและกรดอะเซติก (Nitric acid and acetic acid)	กรดไนตริก (HNO3) 50 มิลลิลิตร ผสมกับกรดอะเซติก	นิกเกิลผสม	ควรจุ่มหรือเช็ดน้ำยาในทันทีที่ผสมน้ำยาเสร็จ

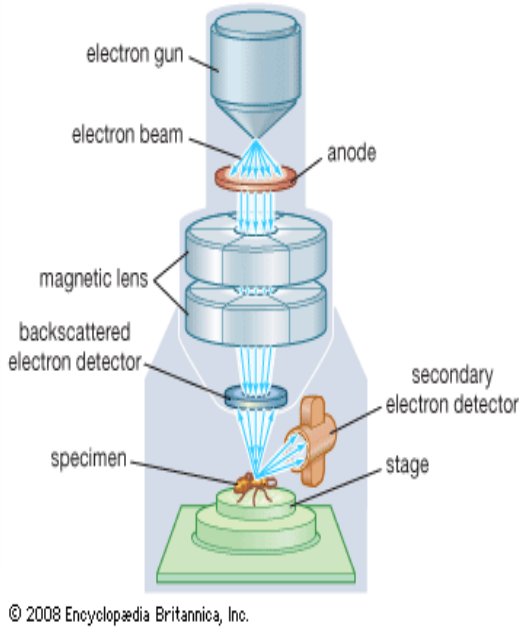
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [17]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope : SEM) เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติบางประการของสสาร ที่มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง ทั้งนี้เป็นเพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ทำให้ภาพมีความชัดลึกสูงแสดงดัง

รูปที่ 2.11 นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive spectrometry : EDS) และเวฟเล็งธิดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (Wavelength dispersive spectrometry : WDS) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีด้วย



รูปที่ 2.11 อำนาจแยกแยะของ SEM [18]



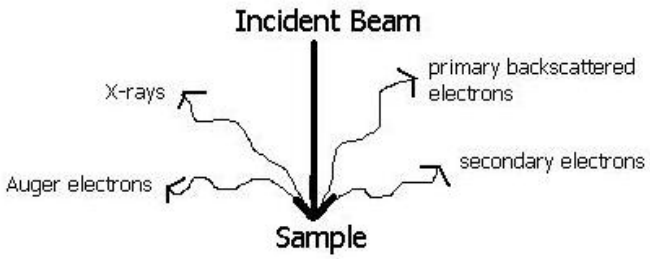
รูปที่ 2.12 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [18]

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งภายในมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV (บางครั้งเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะ

ควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดย แอมเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆกันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First condenser lens) อาจนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทรรศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (Electron optics)เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยคอยกราดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม คล้ายกับการกราดภาพบนจอโทรทัศน์ดังรูปที่ 2.12

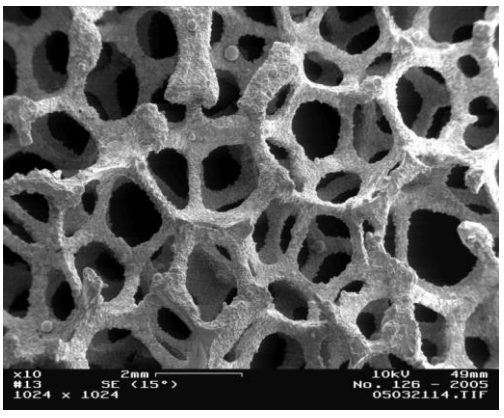
2.9.1 สัญญาณต่าง ๆ (Various types of signal)

สัญญาณแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร และอันตรกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นตามมา แสดงดังรูปที่ 2.13



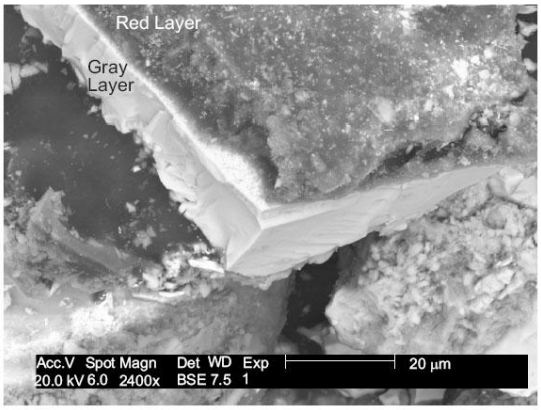
รูปที่ 2.13 สัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร [18]

1) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวและเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อยๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด

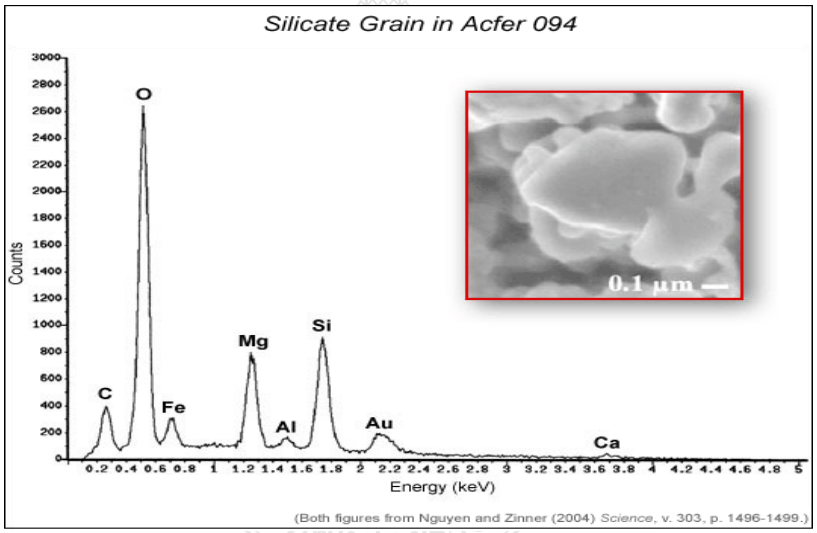


รูปที่ 2.14 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [18]

2) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back scattered electron : BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และลักษณะโทโพกราฟฟีของพื้นผิว ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ [18]



รูปที่ 2.16 สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จีดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (EDS) [19]

3) สัญญาณแบบเอ็กซเรย์ (X-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDS และ WDS แสดงดังรูปที่ 2.15

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, อนินท์ มีมนต์ และบุญส่ง จงกลณี [2] การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมต่างๆ ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยต่อ ตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมมีความแข็งแรงสูงสุด คือ ความเร็วรอบ 250 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 mm/min ความลึกของตัวกวน 3.1 มม.และความเอียงของตัวกวน 2 องศา ที่แสดงความแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่าประมาณ 11,871 N และมีค่าสูงกว่าอะลูมิเนียมหลัก ความเร็วรอบที่ต่ำทำให้ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเพิ่มขึ้น

จุฑามาส สุทธินนท์, จนัสญา แก้วประสิทธิ์ และอนุชา แก้วสมนึก [5] การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของรอยต่อเกยอะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนตัวกวนหลายรูปแบบ คือการนำเอาวัสดุต่างชนิดกันมาทำการเชื่อมประสานให้ติดกัน โดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติแนวดิ่งเชื่อมด้วยความเร็วรอบและความเร็วเดินที่แตกต่างกันด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 13.596 kN ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 750 มม./นาที ด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเป็นเกลียวทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา

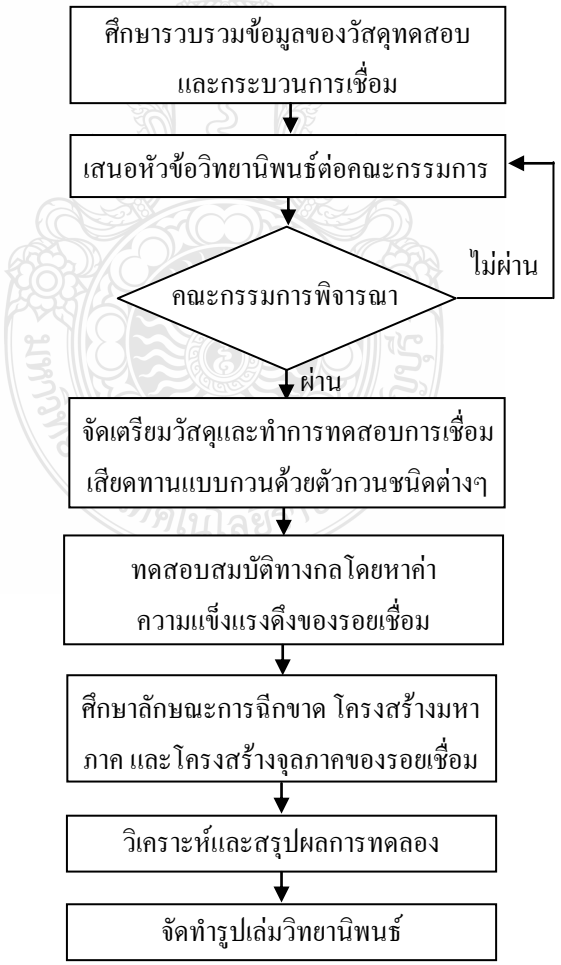
ปราโมทย์ พูนนายม, ปรกช สิริสุวัณณ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [13] การปรับปรุงคุณภาพรอยต่อเชื่อมการเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนอะลูมิเนียม 6063-T1 ในโครงสร้างรถยนต์ด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ และตัวกวนที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 192 MPa คือตัวกวนทรงกระบอกผิวเกลียวขวา ที่มีความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min และความเอียงของตัวกวน 2 องศา ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าโลหะ อะลูมิเนียมที่มีค่าประมาณ 1-5 %

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ในการดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาวิจัยและนำไปปรับปรุงการเชื่อมแบบเสียดทาน โดยมีวัสดุสองชนิด ที่แตกต่างนำมาเชื่อมติดกันโดยมีสามปัจจัย คือ ความเร็วรอบ ความเร็วในการเดินเชื่อม และตัวกวน ซึ่งจากปัจจัยที่กล่าวมาจะมีผลทำให้โครงสร้างของวัสดุและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมเปลี่ยนไปโดยการพิจารณาและวิเคราะห์ผลของปัจจัยตามขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

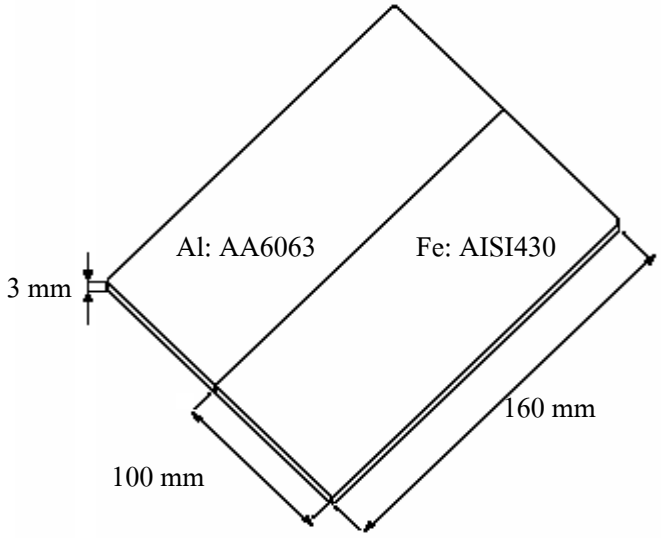
ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 ผู้วิจัยได้ปฏิบัติขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้าย เพื่อให้บรรลุเป้าหมายตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างเป็นแบบแผน



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลโดยรวมขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

วัสดุในการทดลอง คืออะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 โดยมีส่วนผสมทางเคมีและความต้านทานแรงดึง แผ่นอะลูมิเนียมถูกเตรียมให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 160 มม. หนา 3 มม. และเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 160 มม. หนา 3 มม. ผิวของแผ่นวัสดุทั้งสองที่ด้านที่ต้องการนำมาวางต่อเป็นรอยต่อชน ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งรอยต่อชนถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200 400 และทำความสะอาดด้วยอาซีโตน โดยทำการออกแบบการเชื่อมทั้งสี่ตัวกวนที่สภาวะความเร็วรอบที่ 250 500 และ750 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 50 75 100 125 150 และ 175 มม./นาที



รูปที่ 3.2 ลักษณะการต่อชนระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ เนื่องจากในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น ชิ้นงานที่ถูกจับยึดจะต้องแน่นหนาไม่เคลื่อนที่ขณะที่ทำการเชื่อม และที่สำคัญในขณะที่ทำการเชื่อมจำเป็นจะต้องมีแผ่นรองรับแนวแรงที่การกดของแกนหมุนที่ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ดังนั้นจึงจะต้องออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถรองรับแรงกดจากตัวกวน และต้องออกแบบให้อุปกรณ์สามารถจับยึดชิ้นงานอย่างมั่นคง โดยใช้หลักการการดังนี้คือ

- แผ่นรองรับจะต้องรองรับแรงกดได้โดยไม่มีการเสียรูปขณะที่ทำการเชื่อม
- ทนอุณหภูมิได้สูงโดยไม่มีการเสียรูป
- อุปกรณ์จับยึดดังรูปที่ 3.3 จะต้องแข็งแรงและให้แรงในการจับยึดมากพอที่ไม่ทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ขณะทำการเชื่อมและที่สำคัญสามารถถอดประกอบได้ง่ายหากเกิดการชำรุดอีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยนี้จึงทำการออกแบบอุปกรณ์การจับยึดชิ้นงานที่มีรูปร่างดังรูปที่ 3.3 เพื่อสามารถจับยึดชิ้นงานให้มีความมั่นคงขณะทำการเชื่อมเครื่องมืออื่นๆ ที่ใช้ประกอบการทดลองในครั้งนี้มีดังนี้

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จับยึด (Fixture)

- เครื่องกัดอัตโนมัติซีเอนซี (CNC Milling machine) ผู้ทำการวิจัยใช้เครื่องทดสอบภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังรูปที่ 3.4 ที่ใช้เชื่อมชิ้นงานอะลูมิเนียมทดลอง

รูปที่ 3.4 เครื่องกัดอัตโนมัติซีเอนซี (CNC Milling machine)

- เครื่องตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 เครื่องตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

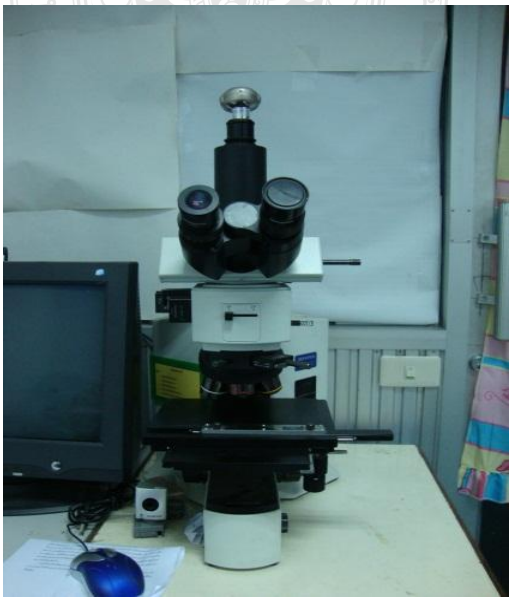
- เครื่องกลึงโลหะ เพื่อการทำตัวกวน ดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่องกลึง (Machine lathe) [12]

- เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง ดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง

- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ดังรูปที่ 3.8

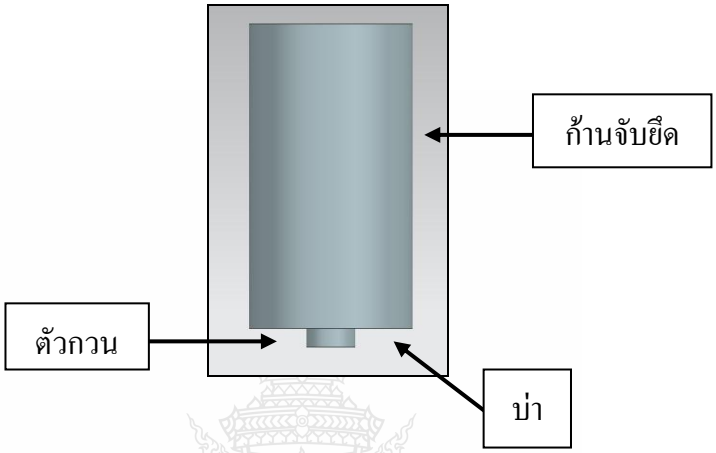


รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.3 กรรมวิธีการเชื่อม

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 นี้ต้องการการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่เที่ยงตรงแน่นอน เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติที่ดีที่สุด ในหัวข้อนี้แบ่งการเตรียมชิ้นงานออกเป็นสองส่วนใหญ่ คือ การเตรียมเครื่องมือเชื่อม และการเชื่อมแผ่นวัสดุ ดังนี้

3.3.1 เครื่องมือเชื่อม



รูปที่ 3.9 ส่วนต่างๆ ของตัวกวน

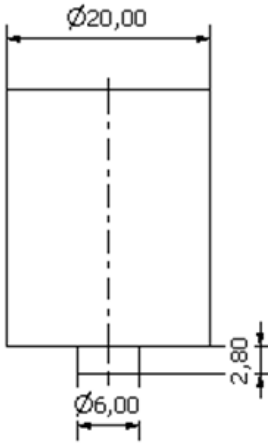
ในการทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบชนิดของตัวกวนที่หลายรูปแบบเพื่อเป็นตัวแปรในการศึกษาและเปรียบเทียบถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม องค์ประกอบเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังแสดงในรูปที่ 3.9 ประกอบไปด้วย

1) ก้านจับยึด เป็นส่วนที่สวมเข้าไปในหัวจับยึดของหัวจับของเพลางานหมุน (Spindle) ของเครื่องกัด

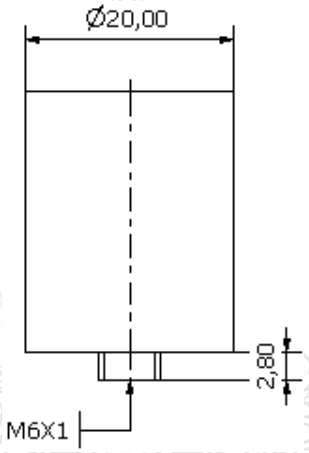
2) บ่า (Shoulder) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานจนเกิดความร้อนที่ชิ้นงานจนเนื้อของวัสดุเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นพลาสติก

3) ตัวกวน (Stirrer) เป็นส่วนที่หมุนอยู่ในเนื้อของวัสดุและทำการกวนเนื้อของวัสดุที่อยู่ในสภาพพลาสติกให้เคลื่อนที่มารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. และยื่นออกมาจากบ่ายาว 2.8 มม.

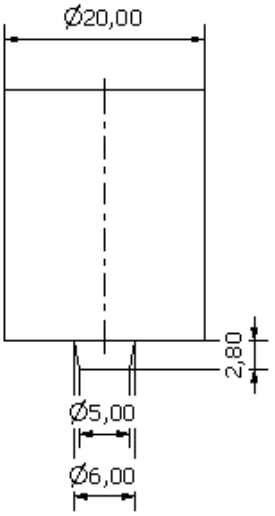
ลักษณะของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมประกอบไปด้วย ตัวกวนรูปทรงกระบอก ตัวกวนรูปทรงกรวย ตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ดังรูปที่ 3.10 - 3.13 ตามลำดับ ที่บ่งบอกขนาดต่างๆ ของหัวกวน [15] ซึ่งมีรูปร่างตัวกวนที่ได้จากการออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.14



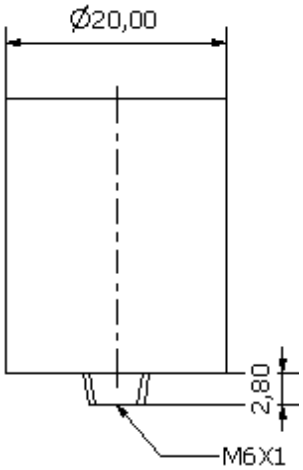
รูปที่ 3.10 ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกระบอก (หน่วย : มม.)



รูปที่ 3.11 ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว (หน่วย : มม.)



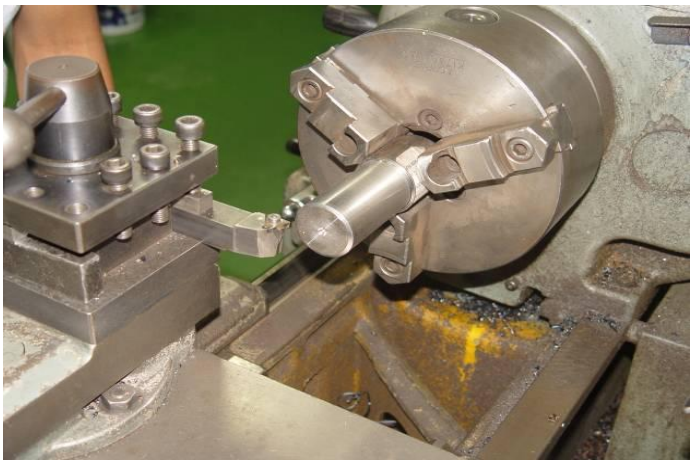
รูปที่ 3.12 ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกรวย (หน่วย : มม.)



รูปที่ 3.13 ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว (หน่วย : มม.)

รูปที่ 3.14 ตัวกวนรูปแบบต่างๆ

โดยชิ้นส่วนทั้งหมดได้จากการขึ้นรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 (Cold work tool steel) ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอน (High carbon) 1.45% - 1.6% โครเมียม (High chromium) 11% -13% โมลิบดีนัม 0.8% - 1.2% วาเนเดียม 0.2% - 0.5% ซึ่งให้ความแข็งสูงสุดได้ที่ 63 - 65 HRC ทีนี้ก็ขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่คุณจะปั้มว่าหนาและต้องการคมแค่ไหนแต่ส่วนใหญ่จะชุบที่ 58 - 60 อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,020 - 1,040 องศาเซลเซียส อบคืนไฟที่ 560 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้รูปร่างของตัวกวน 4 แบบ โดยการนำเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD - 11 ที่ใช้ทำเครื่องมือเชื่อมมาทำการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึง ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การขึ้นรูปเครื่องมือเชื่อมด้วยการกลึง [12]

3.3.2 ขั้นตอนการเชื่อม

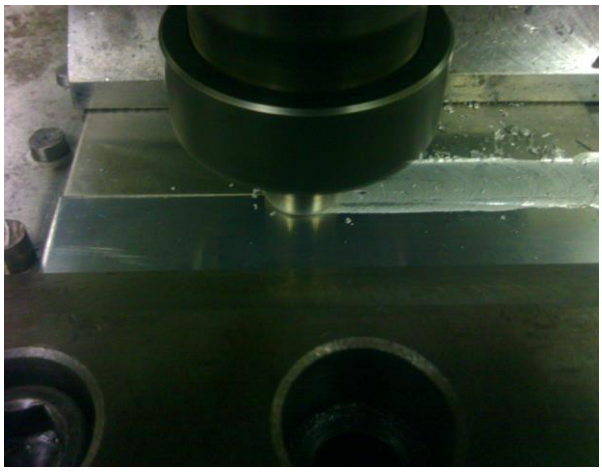
1) การทดลองเดินเครื่อง

ขวัญชัย อยู่สะอาด และ ชวลิต นุชวงษ์ [15]ในการเชื่อมใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) โดยการเขียนชุดคำสั่งให้เครื่องทำงานในการทดลองใช้เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) รุ่น MAKINO type A06B-1008-B100 ซึ่งมีวิธีการปรับตั้งเครื่องมือกลและอุปกรณ์ ดังนี้

- ทำการปรับตั้งอุปกรณ์จับยึดให้ขนานกับแกน x ของโต๊ะวางงานของเครื่องกัด (Table) โดยใช้ (Dial gauge)
- ป้อนชุดคำสั่งโดยใช้มือผ่านทางแผงควบคุมของเครื่อง
- ปรับตำแหน่งศูนย์ให้กับเครื่อง โดยใช้หัวเซตตำแหน่งศูนย์
- ทดลองเดินเครื่องโดยไม่มีชิ้นงาน (Dry run) เพื่อดูความถูกต้องของโปรแกรม
- จับยึดชิ้นงานในอุปกรณ์จับยึด เพื่อเตรียมทดลองเชื่อม
- กดปุ่ม (Start) เพื่อเดินเชื่อมตามคำสั่งที่ป้อนไว้
- นำชิ้นงานออกตรวจสอบความเรียบร้อย

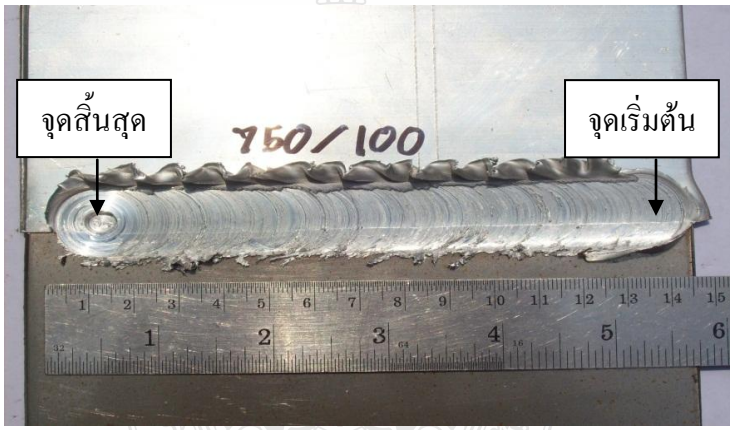
2) การเชื่อม ดังรูปที่ 3.16

- ก่อนการเดินแนวเชื่อมปลายของตัวกวน จะถูกลดลงจนถึงบ่าเครื่อง มือเชื่อมสัมผัสกับผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้
- ตัวกวนที่ขึ้นรูปจากSKD11ถูกสอดเข้าไปยังด้านของอะลูมิเนียมของแนว เชื่อมด้วยความเร็วรอบ และความเร็วเดินที่กำหนดจนกระทั่งบ่าเครื่องมือสัมผัสผิวด้านบนของอะลูมิเนียม
- เครื่องเชื่อมเดินทางตามแนวรอยต่อของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม และทำการแช่ไว้ที่จุดสุดท้ายของการเชื่อม 10 วินาทีก่อนยกตัวกวนออก



รูปที่ 3.16 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อชนชิ้นงาน

- รอให้ชิ้นงานเย็นตัวและทำการถอดชิ้นงานไปปฏิบัติการขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม

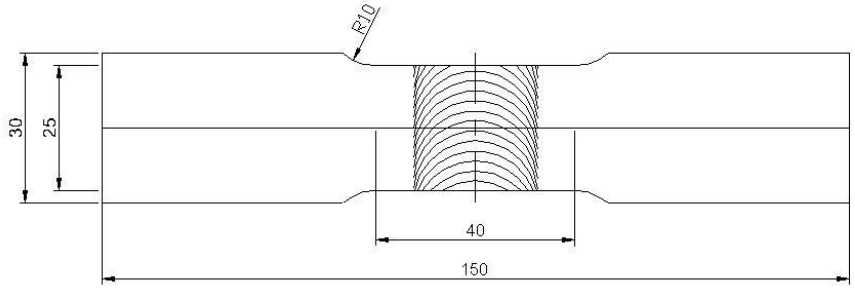
3) ตัวแปรการเชื่อม

ในการทดลองนี้ตัวแปรการเชื่อมประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้

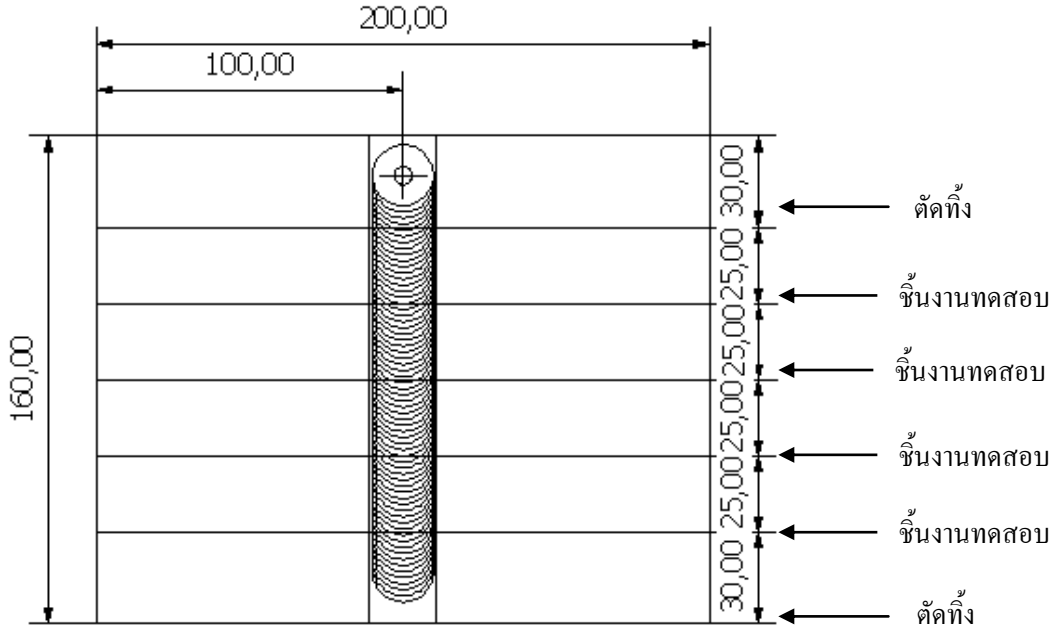
- ชนิดของรอยต่อ เลือกศึกษารอยต่อชน
- รูปร่างของตัวกวน เลือกใช้ตัวกวนที่มีรูปร่าง 4 แบบ คือ ทรงกระบอก ทรงกระบอกเกลียว ทรงกรวย ทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบของตัวกวนเลือกใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 250 500 และ 750 รอบ/นาที ในการเชื่อม [12]
- ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เลือกศึกษาที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมตั้งแต่ 50 ถึง 175 มม./นาที [12]

3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมจะถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง ดังรูปที่ 3.18 โดยมีการวาง แผนการตัดชิ้นงานเพื่อทำชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยทำการเตรียมชิ้นทดสอบตัดขวางแนวเชื่อมด้วยใบตัด Noritake เกรด WA120N BA สำหรับเหล็กเหนียว ระยะห่างจากหัวท้าย 40 มม. ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของแนวเชื่อมจะถูกตัดทิ้งไป ด้วยเครื่องตัดและใบตัดดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.20 ตามลำดับ จากนั้นส่วนที่เหลือจะถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบที่มีขนาดและมิติ จำนวนชิ้นทดสอบในแต่ละตัวแปรการเชื่อม กำหนดให้เลือกชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น เพื่อนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test machine) ต่อไป [12]



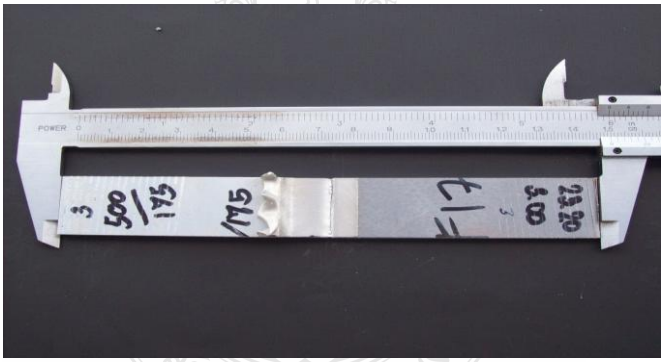
รูปที่ 3.18 ชิ้นทดสอบแรงดึง (AWS - D 1.2) [19]



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งการตัดชิ้นงานเชื่อมเพื่อทำชิ้นทดสอบแรงดึง (หน่วย: มม.)

จากนั้นส่วนที่เหลือจะถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบที่มีขนาดและมิติ ดังรูปที่ 3.18 จำนวนชิ้นทดสอบในแต่ละตัวแปรการเชื่อม กำหนดให้เลือกชิ้นทดสอบสามชิ้น เพื่อนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test machine) ดังรูปที่ 3.21 ต่อไป [12]

รูปที่ 3.20 ใบเครื่องมือตัด [12]



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย : มม.)

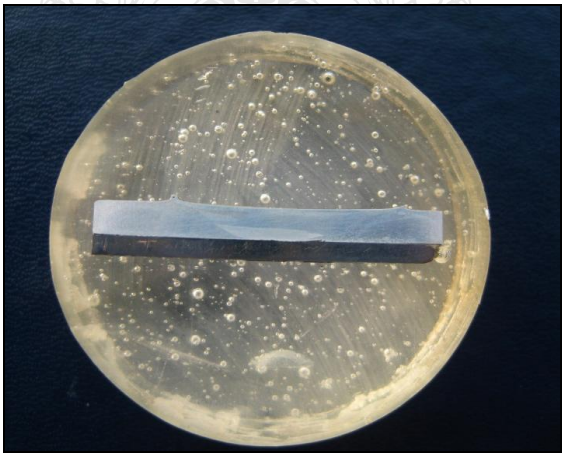
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่ทำการทดลอง ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม คุณสมบัติทางกลที่เราสนใจ คือ คุณสมบัติความต้านแรงดึง ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) ซึ่งจะอธิบายการทดสอบแต่ละอย่างดังนี้

การทดสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคการทดสอบนี้เริ่มจากการนำชิ้นงานที่ได้ทำการเชื่อมไว้แล้วไปตัดเพื่อแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนๆ โดยการตัดด้วยเครื่องตัดพร้อมหล่อเย็นตลอดเวลาเพื่อไม่ให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบเปลี่ยนหลังจากนั้น จึงนำชิ้นทดสอบที่ได้นั้นไปหล่อด้วยเรซิ่น เพื่อจะนำงานที่หล่อแล้วไปขัดและกัดกรดดูโครงสร้างโดยจะมีขั้นตอนดังนี้ [16]

1) นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดที่มีขนาดความกว้าง 5 มม. มาทำการตัดส่วนที่ไม่ใช่แนวเชื่อมออก แล้วนำส่วนที่เป็นแนวเชื่อมมาทำการหล่อเรซิ่น ซึ่งอุปกรณ์ในการหล่อเรซิ่น ดังรูปที่ 3.22 และจะได้ชิ้นงานหลังจากการหล่อเรซิ่นเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.23

รูปที่ 3.22 อุปกรณ์การหล่อเรซิน



รูปที่ 3.23 ชิ้นงานหลังการหล่อเรซิน

2) นำชิ้นงานที่ทำการหล่อเรซิ่นเรียบร้อยมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 800 1,000 และ1,200 ตามลำดับด้วยเครื่องขัด ดังรูปที่ 3.24 จากนั้นนำไปขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้งในขั้นสุดท้ายเพื่อให้ชิ้นงานมีความเรียบและเกิดความมันวาวยิ่งขึ้น

รูปที่ 3.24 การขัดกระดาษทราย

3) หลังจากขัดชิ้นงานเสร็จแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการกัดด้วยกรดผสม ดังรูปที่ 3.25

รูปที่ 3.25 น้ำยาที่ใช้ในการกัดกรด

4) นำชิ้นงานที่กัดกรดแล้วไปทำการสแกน และทำการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างมหภาค ดังรูปที่ 3.26

รูปที่ 3.26 การนำชิ้นงานมาสแกนด้วยเครื่องสแกน

3.6 ตรวจสอบลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมและวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน

ทำการเปรียบเทียบลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุดและต่ำที่สุด ไปทำการตรวจสอบดูลักษณะการฉีกขาดบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 200 เท่า และทำการเปรียบเทียบสัดส่วนส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดด้วยเทคนิคการวัดการการจายตัวของอิเล็กตรอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ 3.27

รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

หมายเหตุ ** ข้อความที่แสดงคำว่า อะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ต่อจากนี้ไปจะใช้คำว่า อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ตามลำดับต่อไป

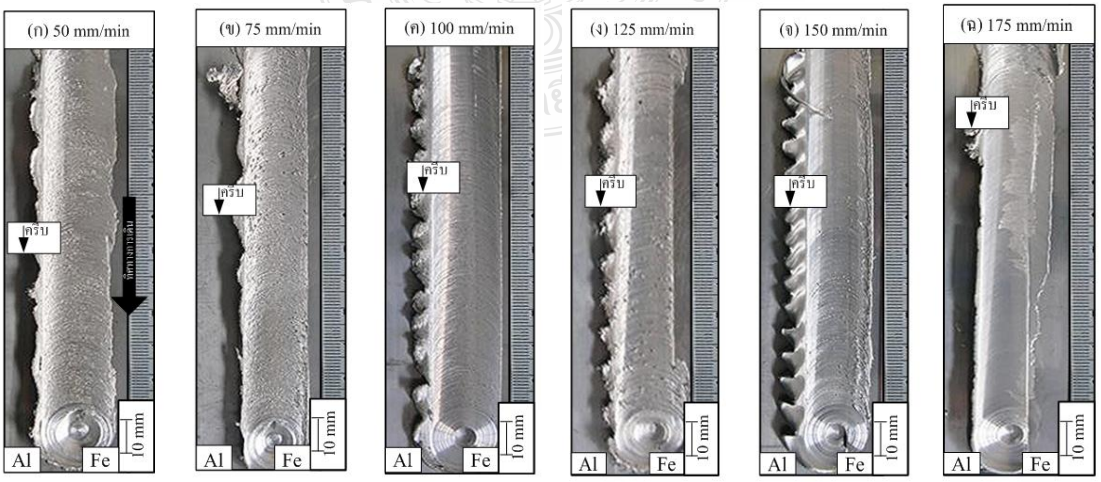
บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง มาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงออกมาในรูปแบบต่างๆ โดยจะทำการวิเคราะห์ในส่วนของความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมรวมไปถึงจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ทำการวิเคราะห์ในส่วนของความแข็งแรงของชิ้นงานที่ทำการเชื่อม ส่วนลักษณะของผิวรอยเชื่อมหลังจากการดึง วิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อม ตรวจสอบลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม และศึกษาส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันในส่วนของอิทธิพลของตัวแปรของรูปร่างตัวกวนที่แตกต่างกัน เพื่อทำการหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนของรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีผลของอิทธิพลของตัวแปรดังต่อไปนี้

4.1 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 250 รอบ/นาทีและความเร็วเดินในการเชื่อมต่าง ๆ

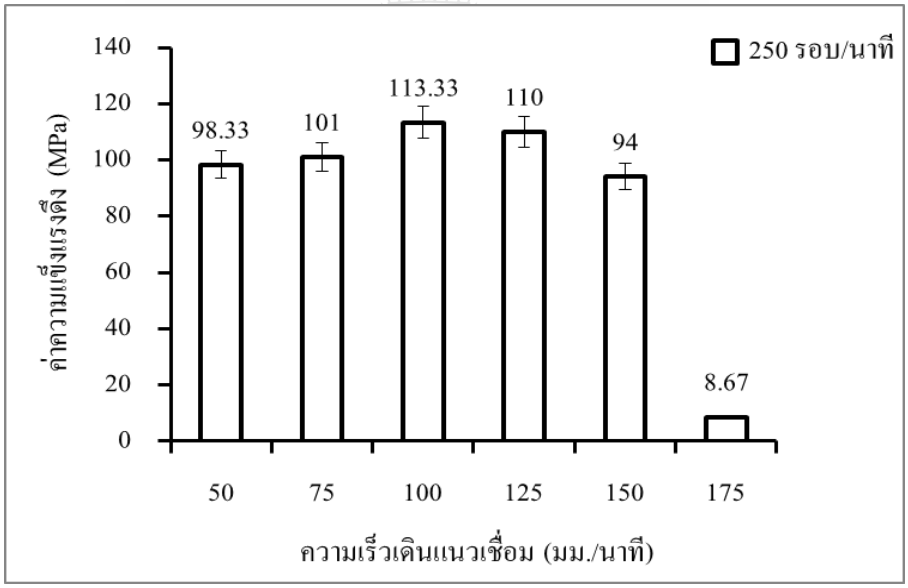
การเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยเชื่อมนั้นจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วรอบตัวกวนที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันและให้ค่าผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่แตกต่างกันดังนี้

4.1.1 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกระบอก



รูปที่ 4.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

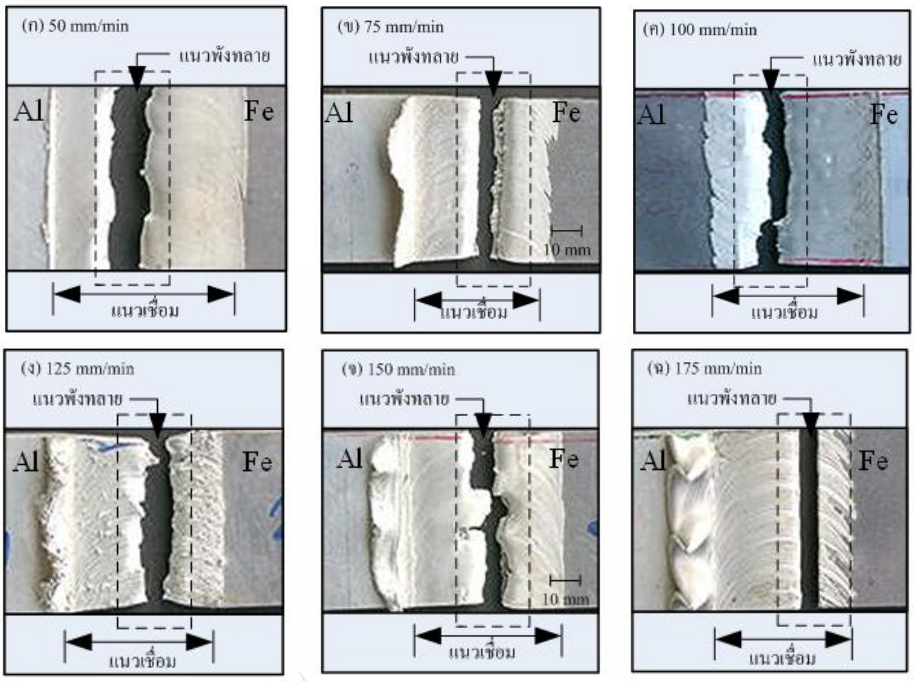
รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที การพิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ดังรูปที่ 4.1 ในรูป (ก) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนว เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75 มม./นาที ในรูป (ข) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันและมีความเรียบผิวน้อยกว่าในรูป (ก) เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ในรูป (ค) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นฝั่งอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอกัน และมีความเรียบผิวที่ดีกว่าในรูป (ก) ลักษณะของแนวเชื่อมสมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ถึง 150 มม./นาที ในรูป (ง) และ (จ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน ลักษณะของแนวเชื่อมฝั่งเหล็กไม่สมบูรณ์ เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน เกิดจุดบกพร่องที่เป็นรูความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันและมีความเรียบผิวน้อยกว่าในรูป (ค)



รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

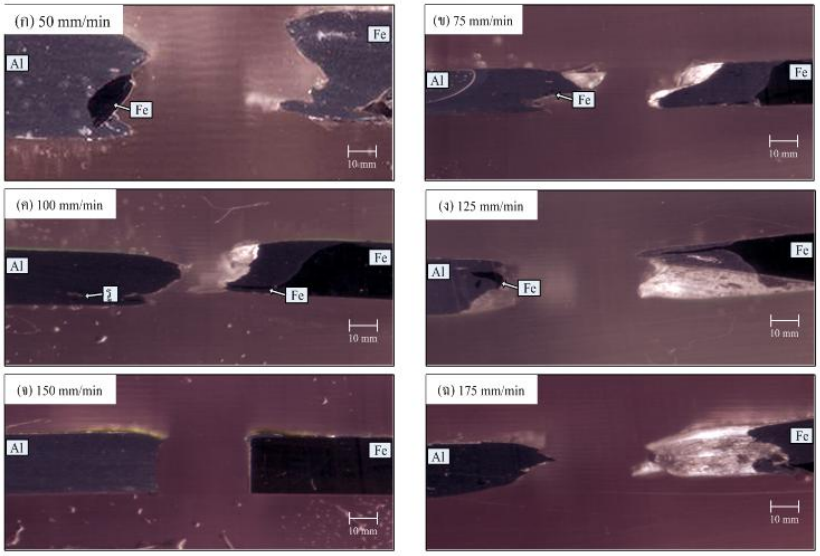
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 75 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 98.33 และ 101 MPa ตามลำดับ และเมื่อที่ความเร็วเดินเพิ่มขึ้น

100 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 113.33 MPa ซึ่งมีค่าแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และเมื่อที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที 150 มม./นาที ถึง 175 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 110 94 และ 8.67 MPa ตามลำดับ



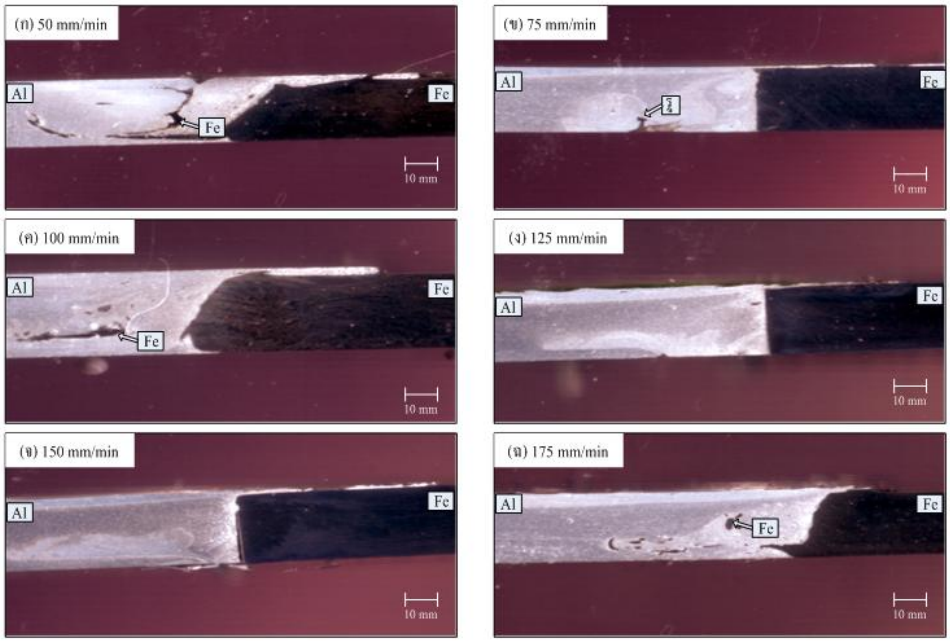
รูปที่ 4.3 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 75 มม./นาที ในรูป (ก) และ (ข)พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นโค้ง ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ ที่ความเร็วเดิน 100 มม./นาที ในรูป (ค) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซกตามแนวฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้ง ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เมื่อความเร็วเดินเป็น 125 มม./นาที ในรูป(ง) พบว่าการฉีกขาด ขาดตรงรอยต่อตามแนวอินเทอร์เฟสเมื่อความเร็วเดินเป็น 150 มม./นาที ลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซก ซึ่งเป็นลักษณะของค่าความแข็งแรงดึงที่มากเช่นกัน เมื่อความเร็วเดินเป็น 175 มม./นาที พบว่ารูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ



รูปที่ 4.4 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

จากการตรวจสอบภาพตัดขวางชิ้นงานที่ผ่านการดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงมาแล้ว ลักษณะการฉีกขาดเกิดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแตกต่างกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.2 สาเหตุที่คาดว่าทำให้แนวฉีกขาดเกิดขึ้นตามแนวซิกแซก คือการที่ส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนนั้นไม่มีความสม่ำเสมอดังรูปที่ 4.4 ในรูป (ค) ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดิน 100 มม./นาที ที่มีส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนในแนวเชื่อมในปริมาณน้อย ทำให้การฉีกขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณระยะอินเทอร์เฟสของรอยต่อชน พิจารณาที่ในรูป (ก) (ข) และ (ง) ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินที่ 50 75 และ 125 มม./นาที ตามลำดับ มีส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมถูกดันเข้าไปอยู่ในอะลูมิเนียมที่ถูกกวนในแนวเชื่อมในปริมาณที่มาก ซึ่งเกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟส พิจารณาที่ความเร็วเดินที่ 150 มม./นาที ในรูป (จ) จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ได้ถูกดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนในปริมาณที่น้อยมาก จึงเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาที จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนในแนวเชื่อมในปริมาณที่มาก เกิดการฉีกขาดที่ระยะอินเทอร์เฟส ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดึง ดังรูปที่ 4.2



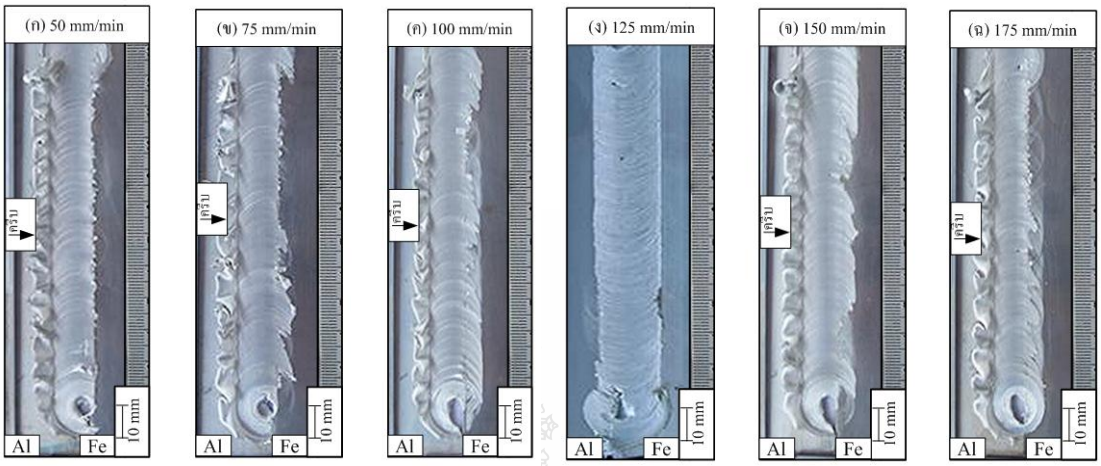
รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจนที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.2

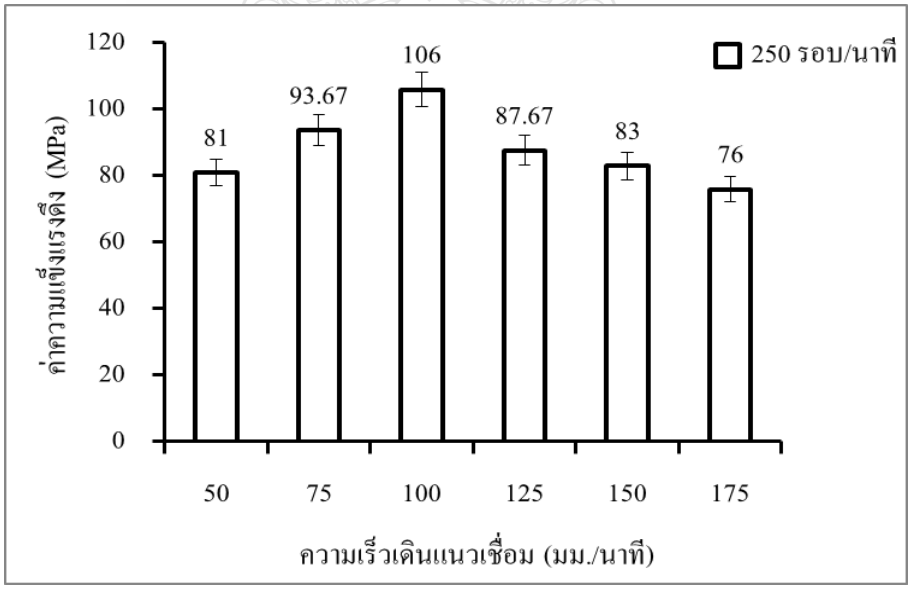
4.1.2 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว

รูปที่ 4.6 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที โดยผลที่ได้จากการเชื่อมตามตัวแปรพบว่า เกิดจุดบกพร่องที่มีลักษณะกลม ซึ่งเกิดจากการถอนเอาเครื่องมือเชื่อมออกจากแนวเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกวน ที่ด้านซ้ายมือของภาพที่จุดสุดท้าย จุดบกพร่องนี้ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ เนื่องจากเป็นจุดบกพร่องที่เกิดกับแนวเชื่อมทุกๆแนวเชื่อม ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 75 ถึง 100 มม./นาที ดังแสดงในรูป (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบ ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนว บริเวณฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ในรูป (ง) ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบเสมอกัน ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เกิดจุดบกพร่อง คือ รู บริเวณต้นของแนวเชื่อม เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 มม./นาที ในรูป (จ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็น

อะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบ ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนว บริเวณฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) พบว่าครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนว บริเวณฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์

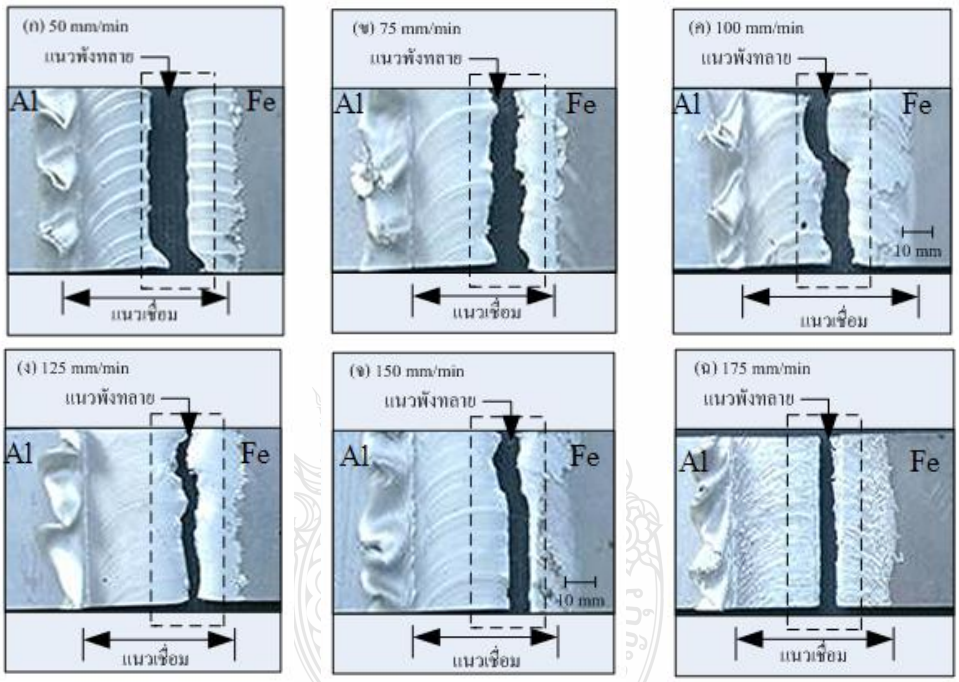


รูปที่ 4.6 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 (ฉ) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150และ (ฉ) 175 มม./นาที

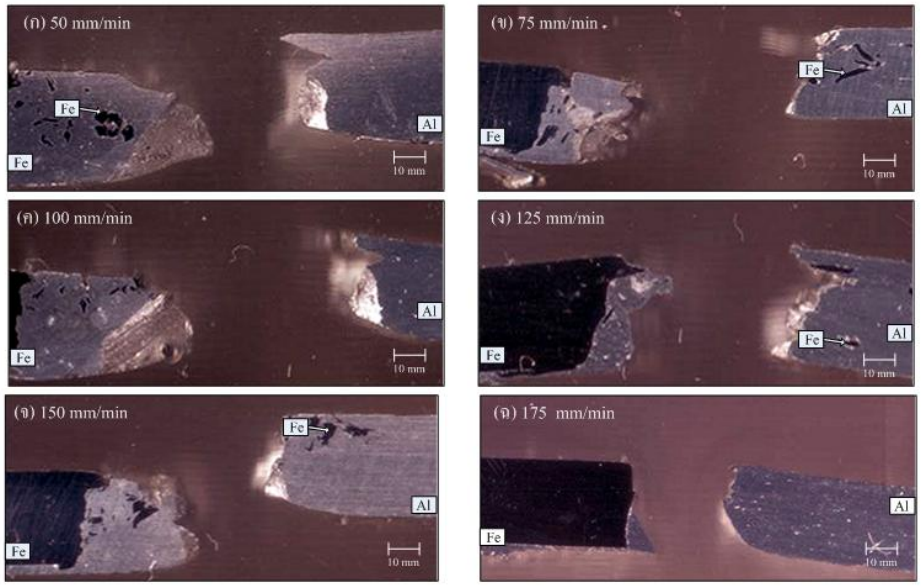
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อมดังแสดงดังรูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 81 MPa ที่ความเร็วเดิน 75 ถึง 100 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที มีค่าเท่ากับ 106 MPa จากนั้นเมื่อความเร็วเดินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 125 ถึง 150 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าลดลงเป็น 87.67 และ 83 MPa ตามลำดับ จนเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเป็น175 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเท่ากับ 76 MPa



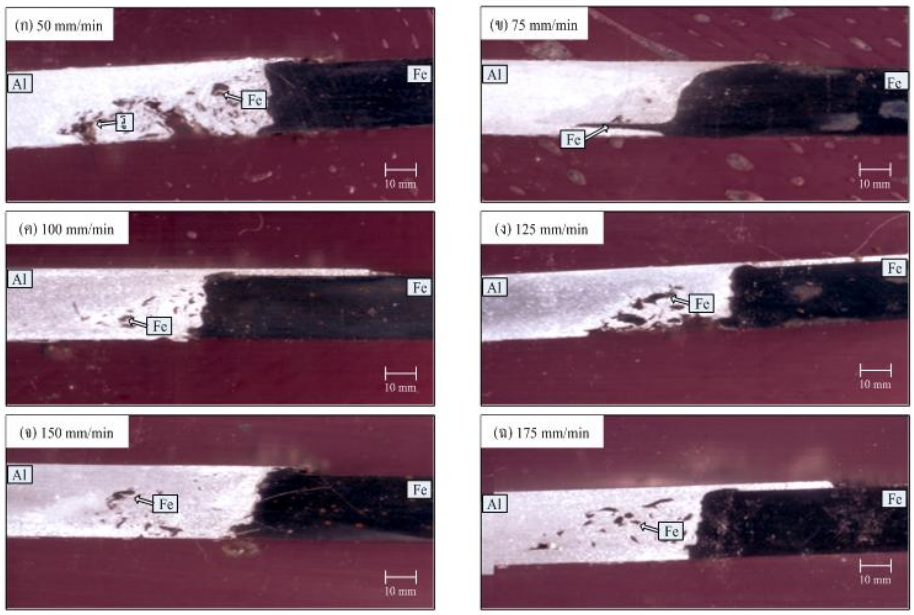
รูปที่ 4.8 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที ดังรูป (ก) แนวการฉีกขาดมีลักษณะคล้ายเส้นตรง ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที รูป (ข) แนวการฉีกขาดมีลักษณะคล้ายเส้นตรง รอยต่อขาดที่บริเวณตำแหน่งเกือบกึ่งกลางของแนวเชื่อม ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดคือชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ดังรูป (ค) ตำแหน่งการฉีกขาดเกิดที่บริเวณค่อนไปทางอะลูมิเนียม และแนวการฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้ง

คล้ายเส้นซิกแซก ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 ถึง 150 มม./นาที ตามลำดับ ดังรูป (ง) และ (จ) แนวฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง รอยต่อเกิดการฉีกขาดที่บริเวณตำแหน่งเกือบกึ่งกลางของแนวเชื่อม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที ดังรูป (ฉ) แนวการฉีกขาดมีลักษณะเป็นเส้นตรง รอยต่อเกิดการฉีกขาดที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อมตามแนวอินเทอร์เฟส



รูปที่ 4.9 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

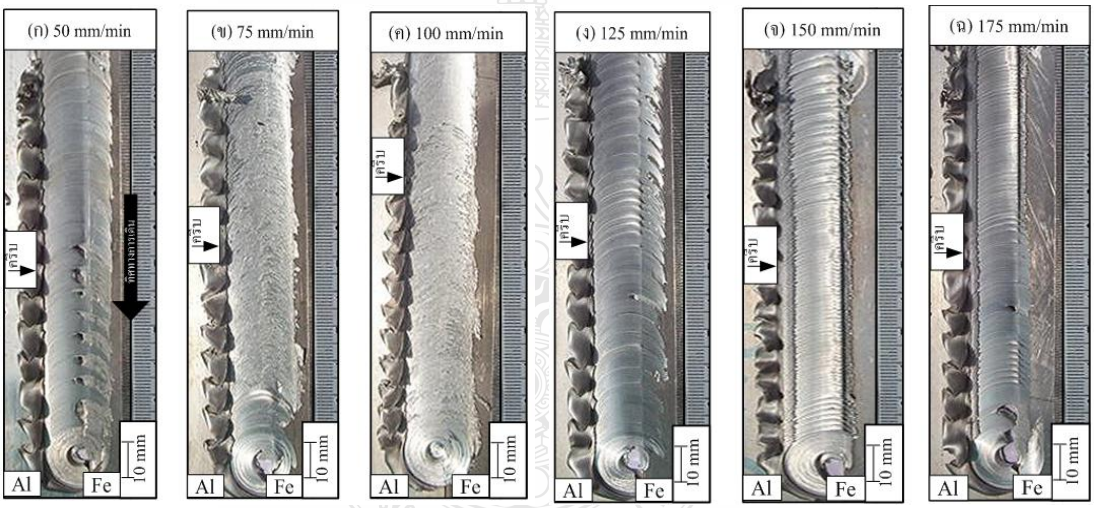


รูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 75 100 125 150 และ 175 มม./นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ การเกิดการฉีกขาดที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม100 มม./นาที เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบอื่นๆ เพราะระยะฉีกขาดเกิดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากที่สุด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมาก ซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงดังแสดงดังรูปที่ 4.7

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม เข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.7

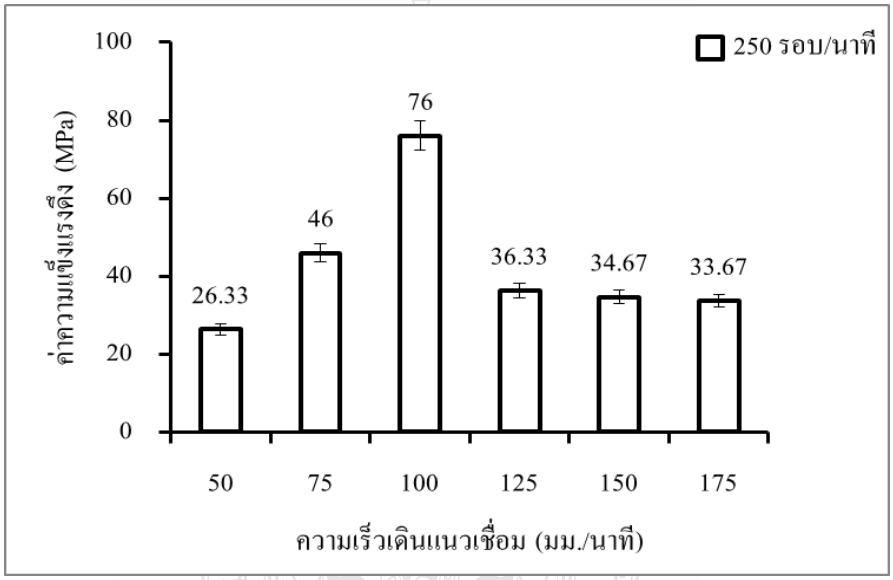
4.1.3 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกรวย



รูปที่ 4.11 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

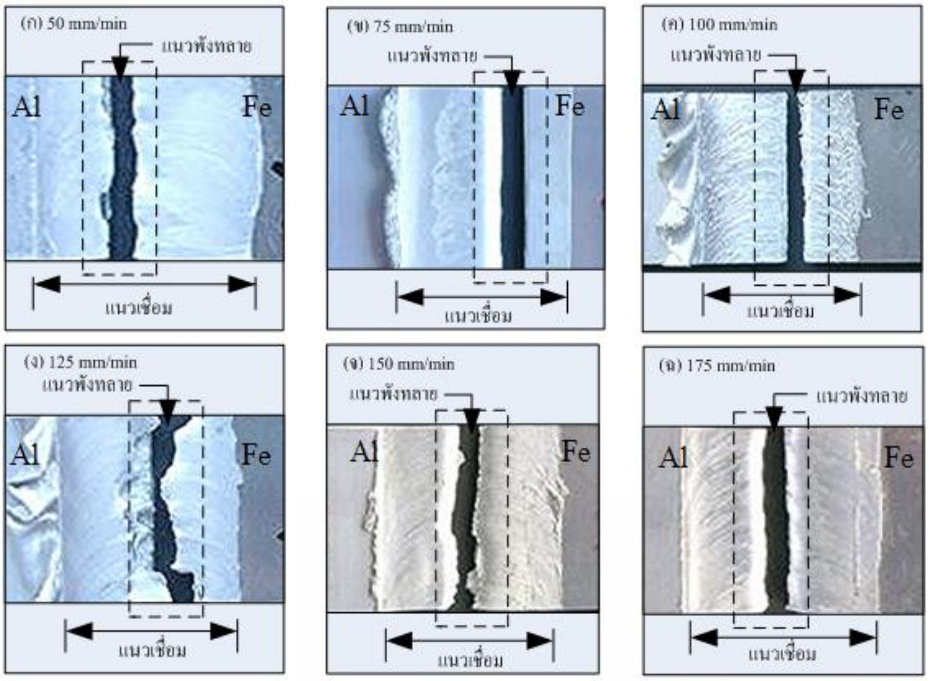
รูปที่ 4.11 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที การพิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ดังรูปที่ 4.11 ในรูป(ก) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นฝั่งอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันเกิดแนวเชื่อมที่มีรอยซ้อนกันของตัวกวน เกิดจุดบกพร่องที่เป็นรูต่อเนื่องกันตรงบริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม ลักษณะของแนวเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75 มม./นาที ดังรูปที่ 4.11 ในรูป (ข) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน

และมีความเรียบผิวน้อยกว่าในรูป (ก) ลักษณะแนวเชื่อมไม่เต็มแนว เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ดังรูปที่ 4.11 ในรูป (ค) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนวเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ดังรูปที่ 4.11 ในรูป (ง) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นฝั่งอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อม ไม่เรียบสม่ำเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมที่มีรอยซ้อนกันของตัวกวน เกิดจุดบกพร่องที่เป็นรู และลักษณะของแนวเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 ถึง 175 มม./นาที ดังรูปที่ 4.11 ในรูป(จ) และ (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น บริเวณอินเทอร์เฟสของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม



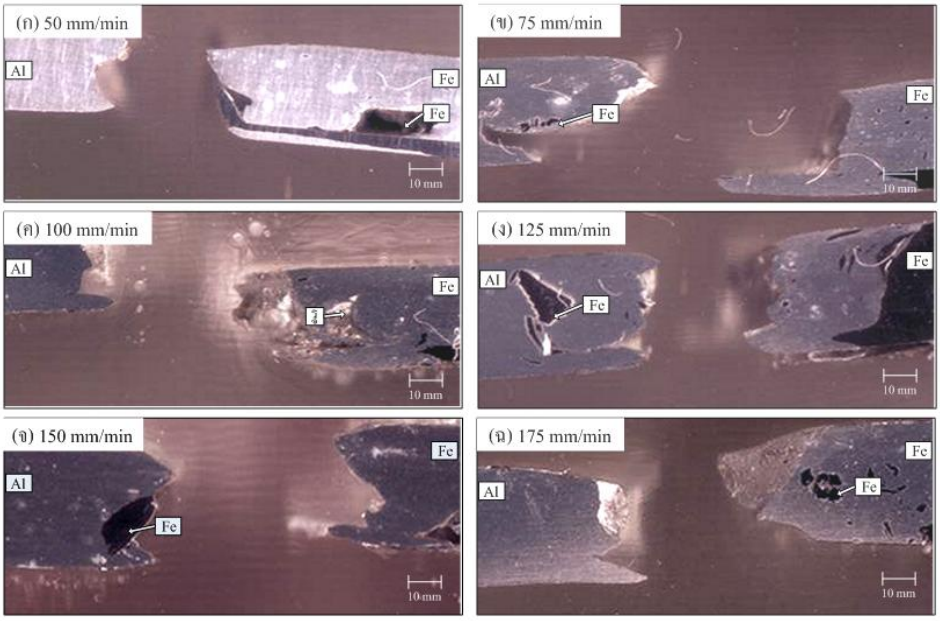
รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 26.33 MPa และที่ความเร็วความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 46 MPa จากนั้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 76 MPa ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดในการเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 125 ถึง 175 มม./นาที นั้นพบว่าค่าความแข็งแรงเท่ากับ 36.33 34.67 และ 33.67 MPa ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าลดลง



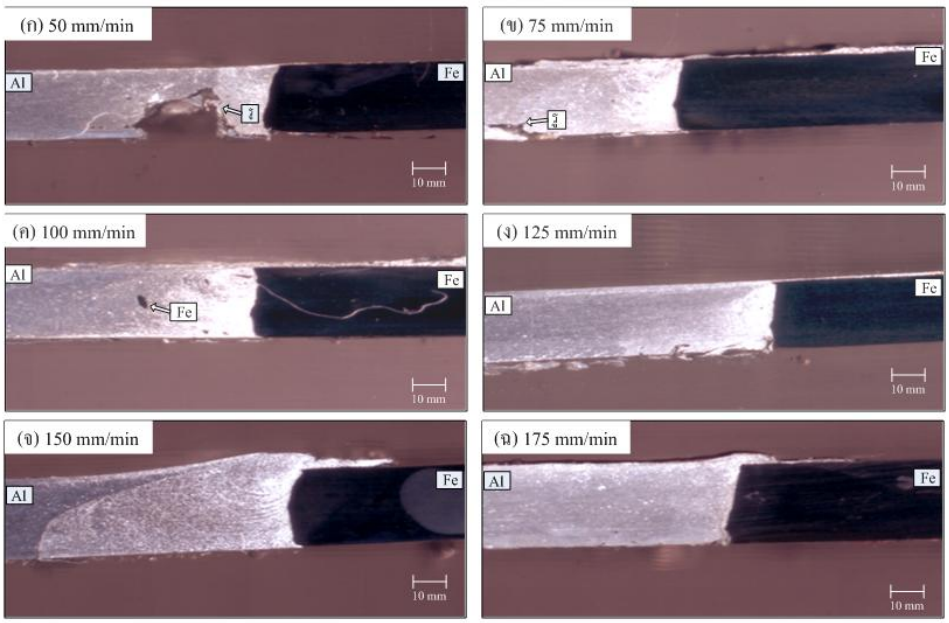
รูปที่ 4.13 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที ในรูป (ก) แนวการฉีกขาดมีลักษณะคล้ายเส้นตรงแต่มีลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซกเพียงเล็กน้อย ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที ในรูป (ข) แนวการฉีกขาดมีลักษณะคล้ายเส้นตรง รอยต่อขาดที่บริเวณตำแหน่งเกือบกึ่งกลางของแนวเชื่อม ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ในรูป (ค) ตำแหน่งการฉีกขาดเกิดที่บริเวณค่อนไปทางอะลูมิเนียม และแนวการฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้งคล้ายเส้นซิกแซก ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 ถึง 150 มม./นาที ในรูป (ง) และ (จ) แนวฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง รอยต่อเกิดการฉีกขาด ที่บริเวณตำแหน่งเกือบกึ่งกลางของแนวเชื่อม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) แนวการฉีกขาดมีลักษณะเป็นเส้นตรง รอยต่อเกิดการฉีกขาดที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อมตามแนวอินเทอร์เฟส



รูปที่ 4.14 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

จากการตรวจสอบภาพตัดขวางชิ้นงานที่ผ่านการดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงมาแล้ว ลักษณะการฉีกขาดเกิดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแตกต่างกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.12 สาเหตุที่คาดว่าทำให้แนวฉีกขาดเกิดขึ้นตามแนวซิกแซก คือการที่ส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ถูกดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.14 ในรูป (ค) ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดิน 100 มม./นาที ที่มีส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวน ในแนวเชื่อมในปริมาณน้อย ทำให้การฉีกขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณระยะอินเทอร์เฟสของรอยต่อชน พิจารณาที่รูป (ก) (ข) และ (ง) ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินที่ 50 75 และ 125 มม./นาที มีส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมถูกดันเข้าไปอยู่ในอะลูมิเนียมที่ถูกกวนในแนวเชื่อมในปริมาณที่มาก ซึ่งเกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟส พิจารณาที่ความเร็วเดินที่ 150 มม./นาที ในรูป (จ) จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ได้ถูกดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนในปริมาณที่น้อยมาก จึงเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาที จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนในแนวเชื่อมในปริมาณที่มาก เกิดการฉีกขาดที่ระยะอินเทอร์เฟส ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดึง ดังรูปที่ 4.12



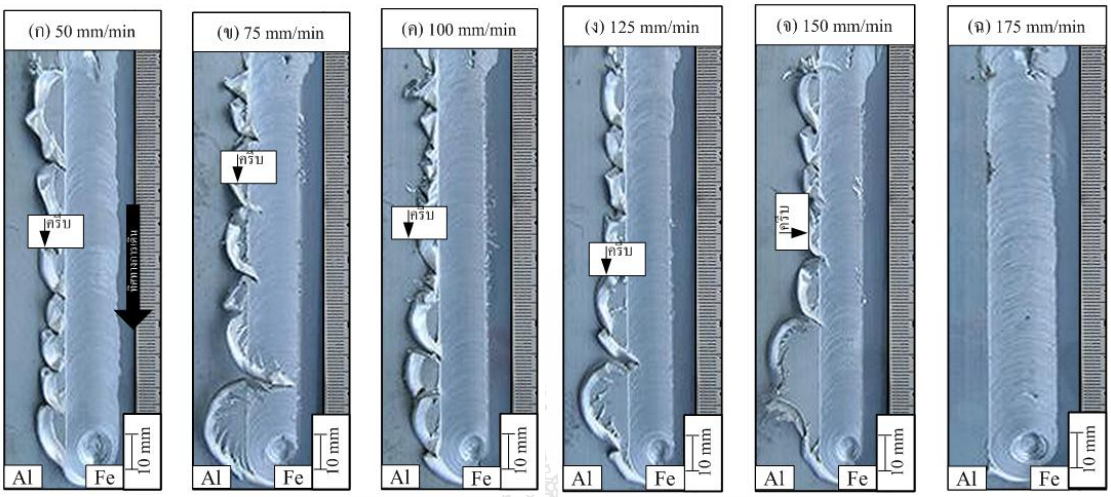
รูปที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจนที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.12

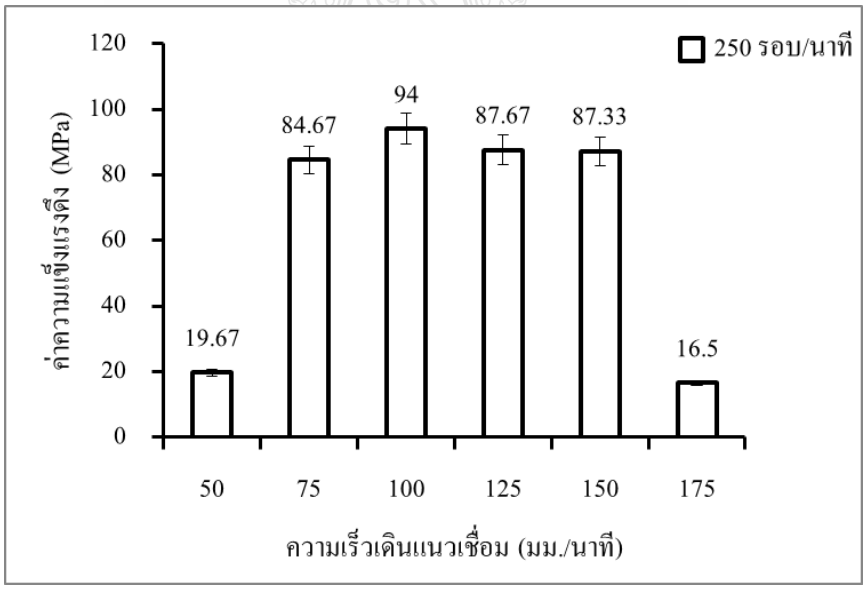
4.1.4 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว

รูปที่ 4.16 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที โดยผลที่ได้จากการเชื่อมตามตัวแปรพบว่า เกิดจุดบกพร่องที่มีลักษณะกลม ซึ่งเกิดจากการถอนเอาเครื่องมือเชื่อมออกจากแนวเชื่อม ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกวน ที่ด้านซ้ายมือของภาพที่จุดสุดท้าย จุดบกพร่องนี้ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ เนื่องจากเป็นจุดบกพร่องที่เกิดกับแนวเชื่อมทุกๆ แนวเชื่อม ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ในรูป (ก) พบว่าครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ลักษณะของแนวเชื่อมเต็มแนว เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75 มม./นาที ในรูป (ข) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบ ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนว บริเวณฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 ถึง 150 มม./นาที ในรูป(ค) ถึง (จ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบ ลักษณะของแนวเชื่อมไม่เต็มแนว

บริเวณฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ เกิดจุดบกพร่องบริเวณต้นของแนวเชื่อม ส่วนที่อินเทอร์เฟสของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

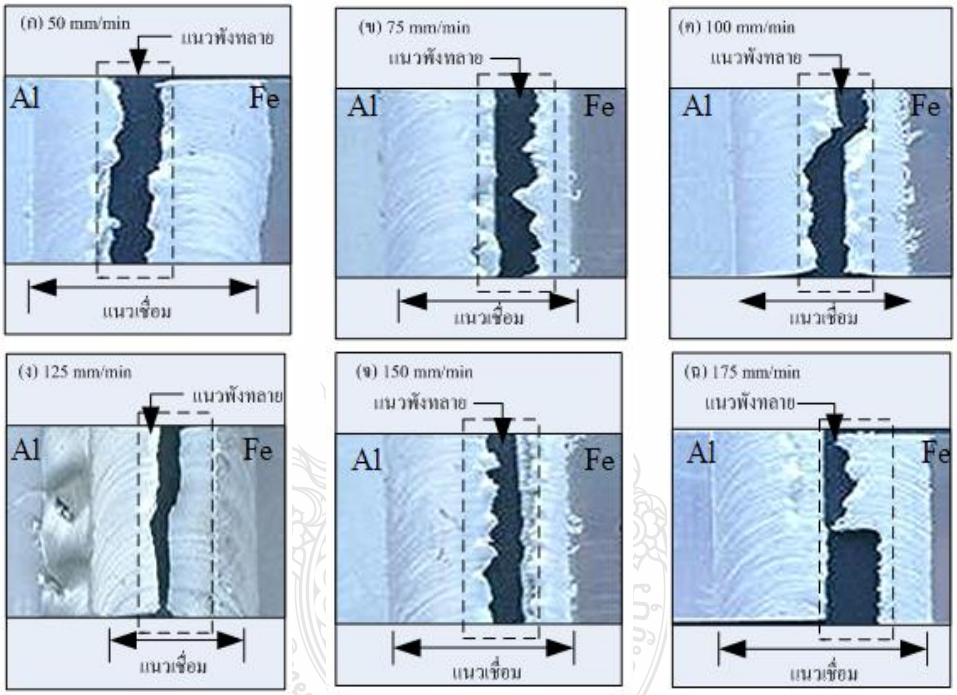


รูปที่ 4.16 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

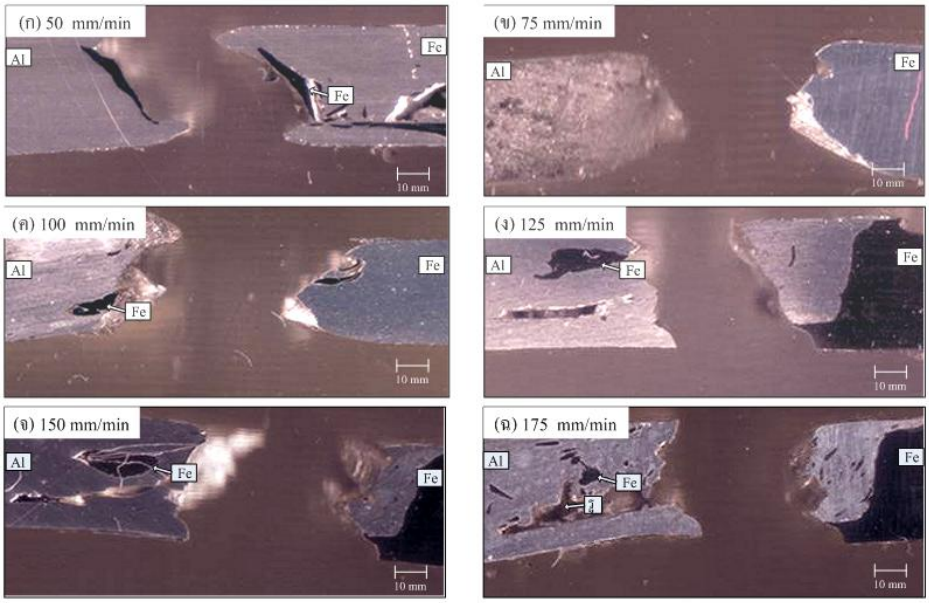
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งแรงที่ได้จากตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ได้ผลการทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่า ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำสุด 50 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 19.67 MPa และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 84.67 MPa จากนั้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 94 MPa และเป็นค่าแรงดึงสูงสุดในการเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 125 ถึง 175 มม./นาที นั้นพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าลดลง



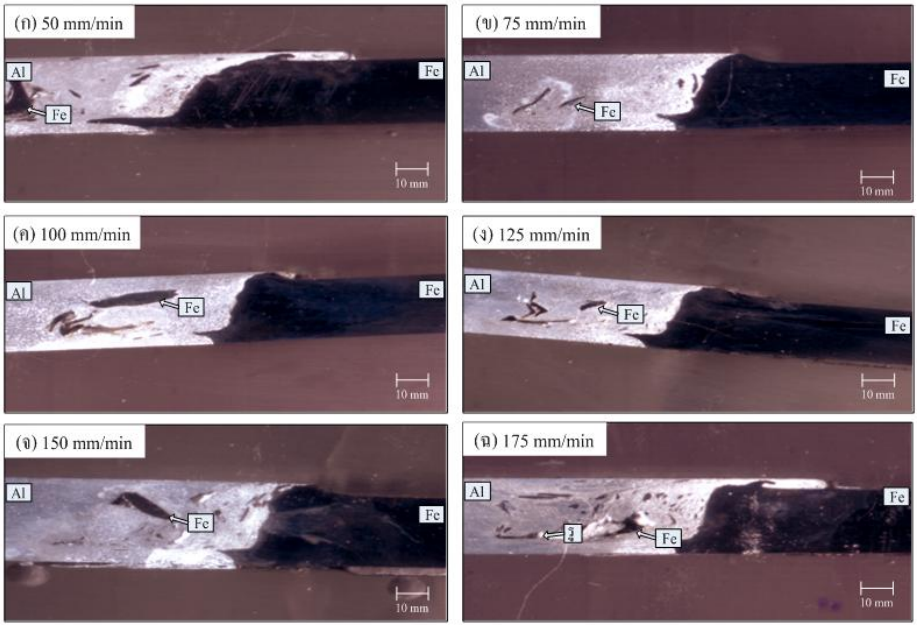
รูปที่ 4.18 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที ในรูป (ก) ตำแหน่งการฉีกขาดเกิดที่บริเวณค่อนไปทางอะลูมิเนียม และแนวการฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้งคล้ายเส้นซิกแซก ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม75 มม./นาที ในรูป (ข) พบว่ารูปร่างมีลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นแนวซิกแซก ระยะการเกิดการฉีกขาดของแนวเชื่อมห่างจากรอยต่อตามแนวอินเทอร์เฟสไปทางอะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที การฉีกขาดห่างจากรอยต่อตาม

แนวอินเทอร์เฟสไปทางอะลูมิเนียม พบว่ารูปร่างมีลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นแนวซิกแซก ในรูป (ค) ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม125 มม./นาที ในรูป (ง) พบว่าแนวฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที ในรูป (จ) พบว่ารูปร่างมีลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นแนวซิกแซก ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) พบว่าแนวฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.19 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

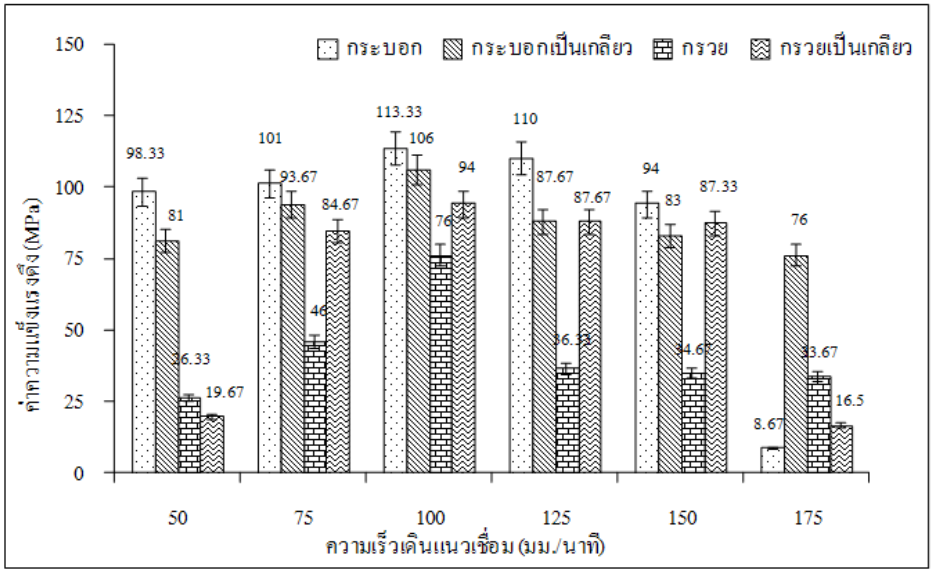


รูปที่ 4.20 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75

รอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 - 175 มม./นาที ดังแสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) - (ฉ) ตามลำดับ การเกิดการฉีกขาดที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบอื่น ๆ เพราะระยะฉีกขาดเกิดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากที่สุด และมีเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมแทรกเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียมส่งผลให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงมาก ซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 4.17

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียว ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที จะสังเกตุเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่น ๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.17

4.1.5 กราฟอิทธิพลความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปแบบต่าง ๆ



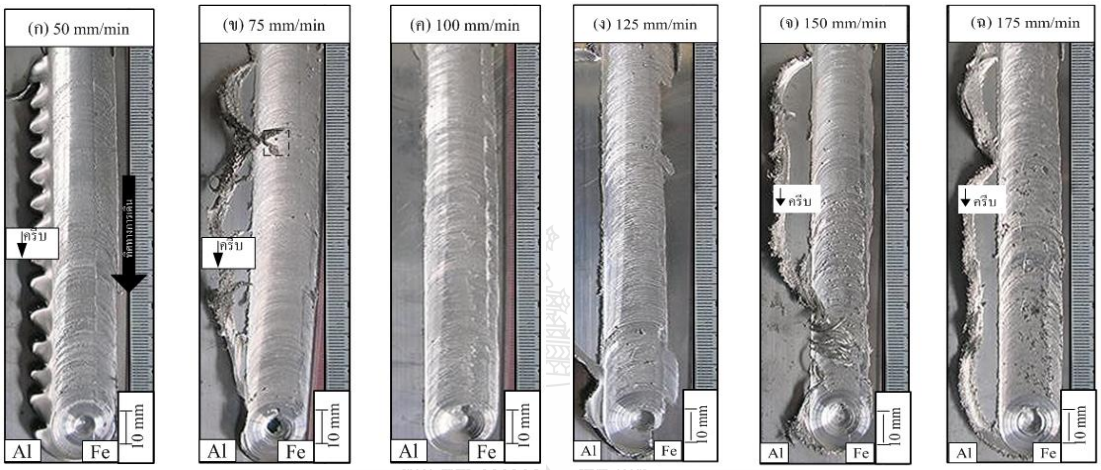
รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ด้วยตัวกวนรูปแบบต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในการเชื่อมที่ตัวกวนรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 113.33 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที และที่ตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว กรวยเกลียวและกรวยมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลง ตามลำดับ

4.2 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินในการเชื่อมต่าง ๆ

การเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยเชื่อมนั้นจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วรอบตัวกวนที่ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันและให้ค่าผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่แตกต่างกันดังนี้

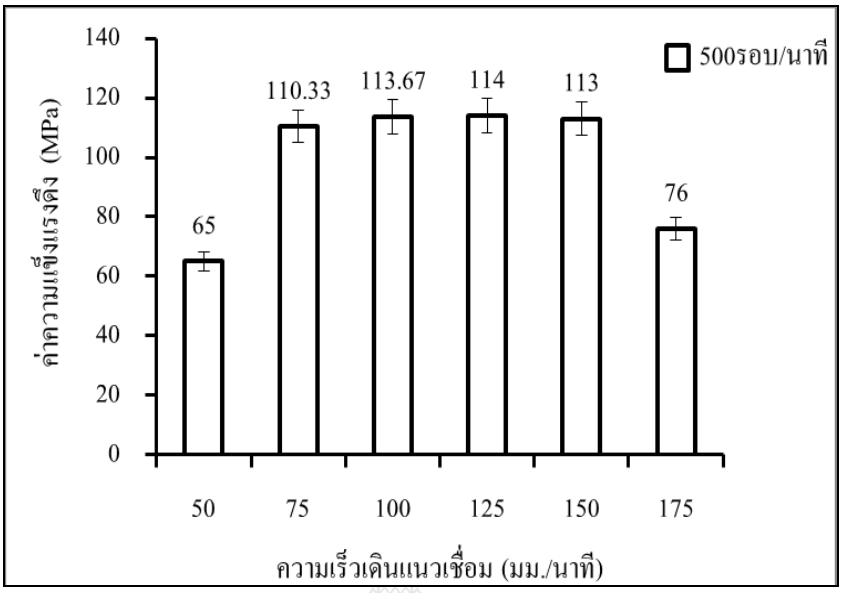
4.2.1 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกระบอก



รูปที่ 4.22 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

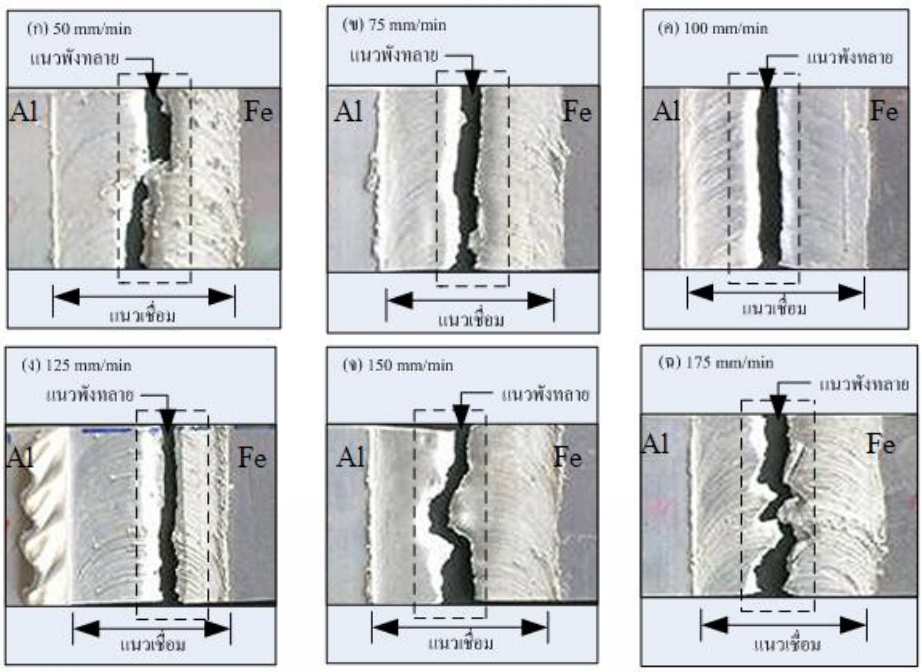
รูปที่ 4.22 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที การพิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ดังรูปที่ 4.22 ในรูป (ก) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียมต่อเนื่องกัน ลักษณะของแนวเชื่อมสมบูรณ์ ผิวหน้าของแนวเชื่อมค่อนข้างสม่ำเสมอกัน เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75 มม./นาที ดังรูปที่ 4.22 ในรูป (ข) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียมไม่ติดกับเนื้ออะลูมิเนียมทั้งแผ่น ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวนเป็นแนวยาว เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ในรูป (ค) ครีบที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าความเร็วเดินอื่นๆ ลักษณะของแนวเชื่อมสมบูรณ์ เกิดแนวเชื่อมที่มีรอยซ้อนกันของตัวกวนเป็นแนวยาว ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันจุดเริ่มต้นของแนวเชื่อมมีลักษณะของแนวเชื่อมที่สมบูรณ์เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ถึง 150 มม./นาที ในรูป (ง) และ (จ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นฝั่งอะลูมิเนียมเกิดในปริมาณและขนาดที่มากกว่าความเร็วอื่น ๆ ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมที่มีรอยซ้อนกันของตัวกวน เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะ

ด้านที่เป็นอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวนเป็นแนวยาว

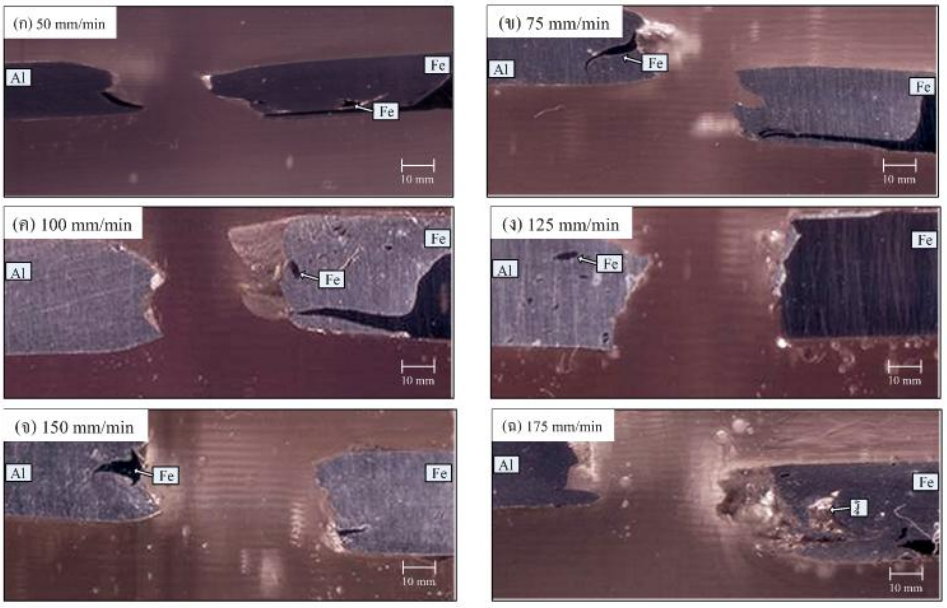


รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.23 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 65.00 MPa และเมื่อความเร็วเดินเป็น 75 ถึง 100 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 110.33 และ 113.67 MPa ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ144.00 MPa ซึ่งมีค่าแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที และเมื่อความเร็วเดินเป็น 150 ถึง 175 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 113 และ 113.67 MPa ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดึงมีค่าลดลง



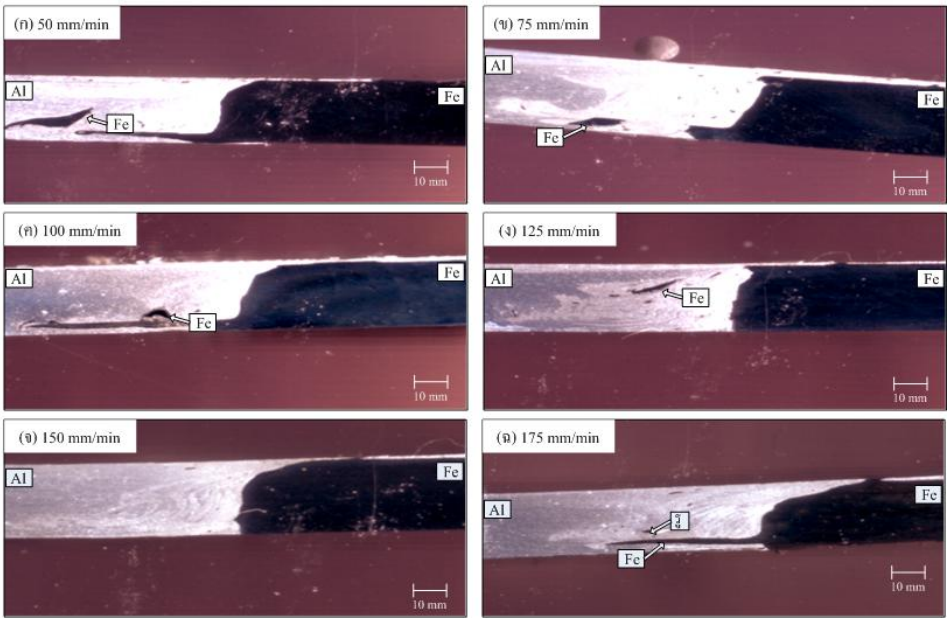
รูปที่ 4.24 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.25 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบ ความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 100 มม./นาที พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นโค้ง ซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อความเร็วเดินเป็น 125 ถึง 150 มม./นาที พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซก ซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าสูงสุด เมื่อความเร็วเดินเป็น 175 มม./นาที พบว่ารูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำ

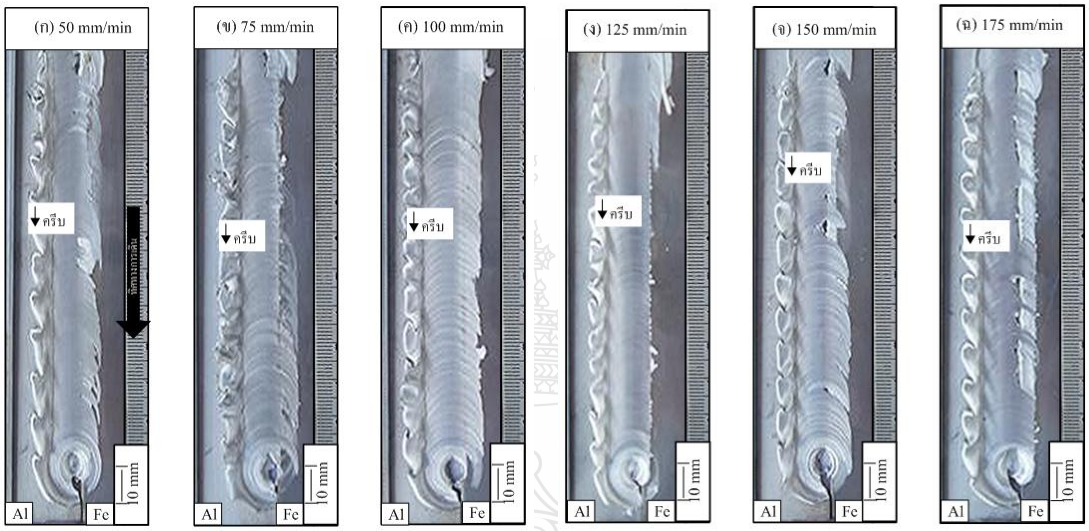
การพิจารณารอยฉีกที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 ถึง 175 มม./นาที ดังรูปที่ 4.25 (ก) ถึง (ฉ) ตามลำดับ พิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 100 มม./นาที การเกิดแนวฉีกขาดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 ถึง 100 มม./นาที เกิดการฉีกขาดระยะ อินเทอร์เฟส ซึ่งส่งผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง ที่แสดงในกราฟรูปที่4.23 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน การเกิดการฉีกขาดของแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินที่ 125 มม./นาที เกิดการฉีกขาด ห่างจากระยะอินเทอร์เฟส มากกว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที มีค่ามากที่สุด ที่ความเร็วเดิน 150 ถึง 175 มม./นาที เกิดการฉีกขาดของแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟสที่เป็นรอยต่อชน



รูปที่ 4.26 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่น ๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังกราฟรูปที่ 4.23

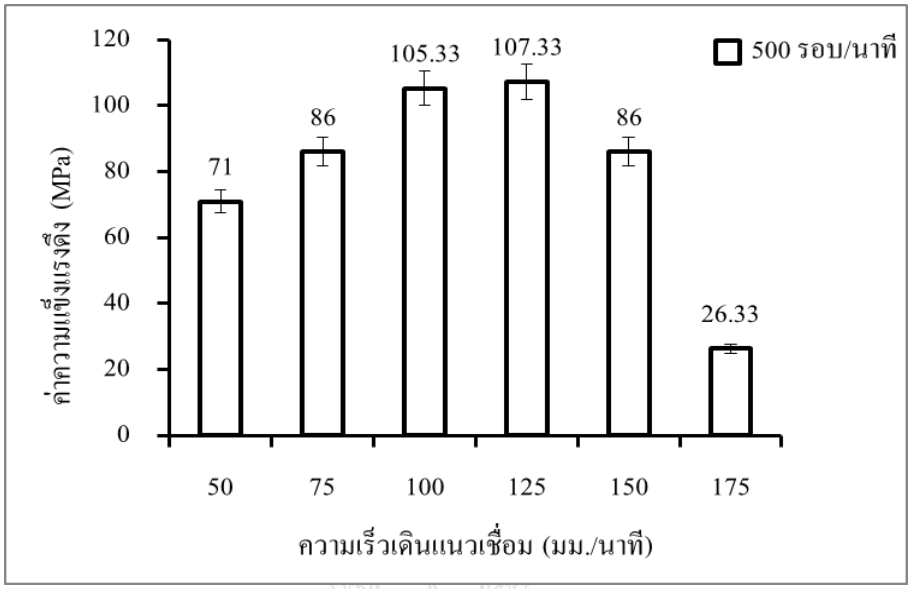
4.2.2 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว



รูปที่ 4.27 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

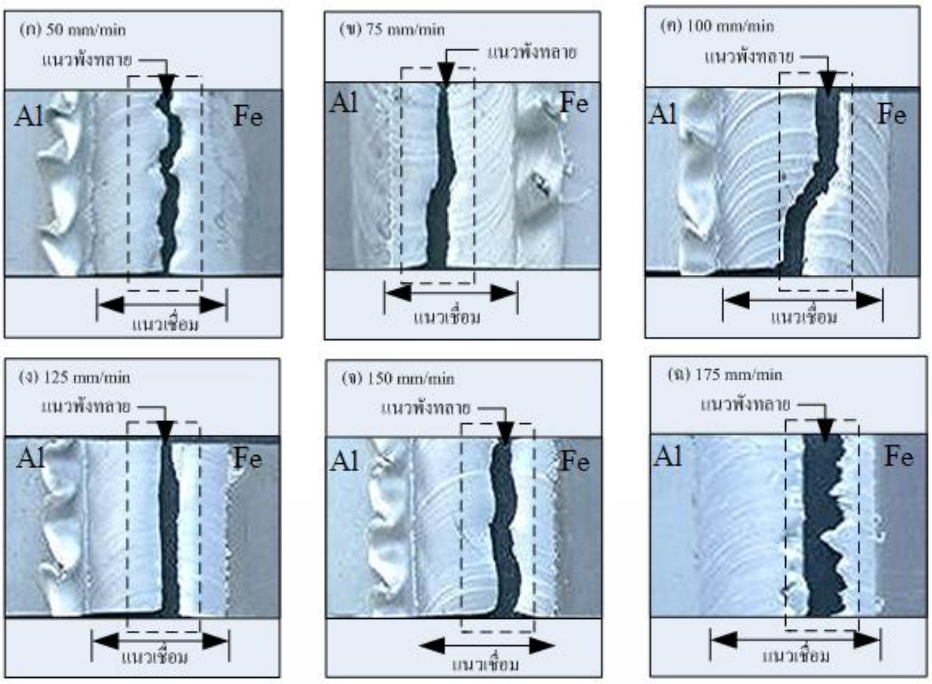
รูปที่ 4.27 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที โดยใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วแนวเชื่อมต่ำสุดคือ 50 มม./นาที นั้น ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม และต่อเนื่องกันเป็นแผ่น ผิวหน้าแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์เกิดจุดบกพร่อง คือรู แนวเชื่อมทางด้านฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม เชื่อมไม่เต็มแนว ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที ในรูป (ข) พบว่าลักษณะของแนวเชื่อมเกิดขึ้นคล้ายกับรูป (ก) แต่ผิวหน้าของรอยเชื่อม มีรอยซ้อนกันของตัวกวน และเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ในรูป (ค) ลักษณะครีบจะเกิดด้านอะลูมิเนียมและยาวต่อเนื่องเป็นแผ่นตลอดแนวเชื่อมเหมือนทุกๆ ความเร็วเดิน ผิวหน้ารอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ที่สุดคือ มีลักษณะเรียบ เงา ในขณะที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที ในรูป (ง) ครีบที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนรูป (ก) ถึง (ค) ผิวหน้าแนวเชื่อมมีลักษณะเรียบ เงา แนวเชื่อมฝั่งเหล็กไม่เต็มแนว ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 150 มม./นาที ในรูป (จ) เกิดครีบที่ด้านอะลูมิเนียม ผิวหน้ารอยเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดจุดบกพร่อง พบรูบริเวณผิวหน้าของ

แนวเชื่อมตรงอินเทอร์เฟสระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงสุดที่ 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นพบได้ด้านอะลูมิเนียม ลักษณะครีบต่อเนื่องกันเป็นแผ่น พบรอยแตกร้าวบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม เป็นทางยาวที่บริเวณอินเทอร์เฟสของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งคาดว่าอาจเป็นสาเหตุให้แนวเชื่อมเกิดความไม่แข็งแรง

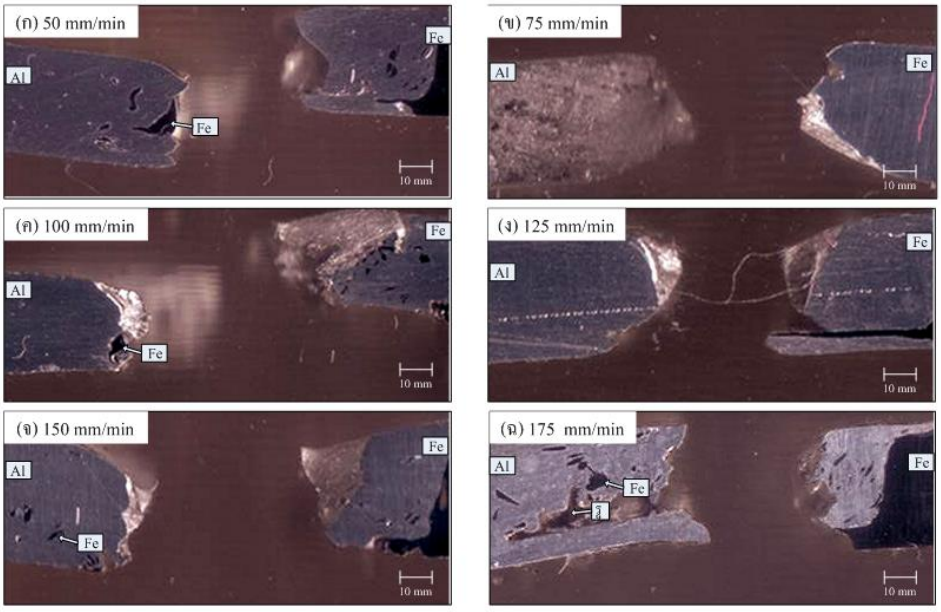


รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.28 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 75 มม./นาที ตามลำดับ พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วเดินเท่ากับ 71.00และ 86.00 MPa ตามลำดับ จากนั้นเมื่อความเร็วเดินมีค่าเป็น 100 มม./นาที พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วเดินเท่ากับ105.33 MPa โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ107.33 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 150 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 86.00 MPa และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงสุดคือ 175 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเท่ากับ 26.33 MPa ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่มีค่าแรงดึงต่ำสุด



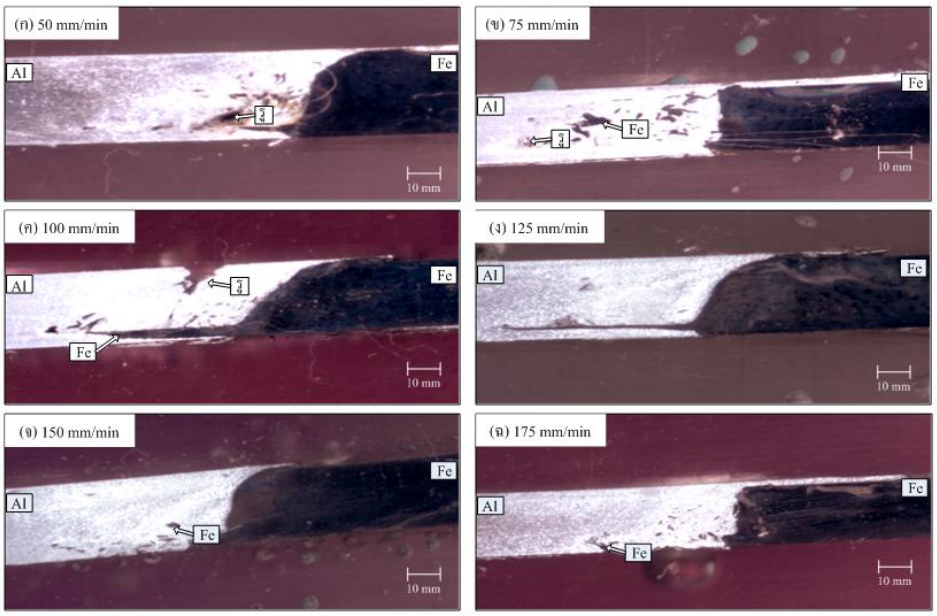
รูปที่ 4.29 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.30 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.29 แสดงแนวการฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที พบว่าแนวการฉีกขาดมีลักษณะคล้าย แนวการฉีกขาดที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที กล่าวคือรูปร่างการฉีกขาด มีแนวฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้งคล้ายเส้นซิกแซก ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดิน 125 มม./นาที ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในสภาวะการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

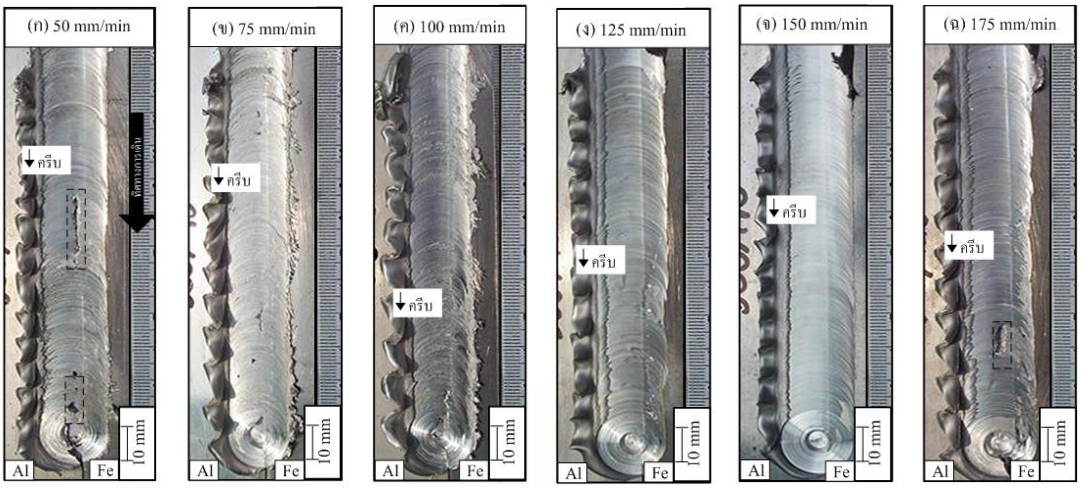
การพิจารณารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 75 100 150 และ 175 มม./นาที ดังรูปที่ 4.30 (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ การเกิดการฉีกขาดที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที



รูปที่ 4.31 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังรูปที่4.31แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม125 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.28

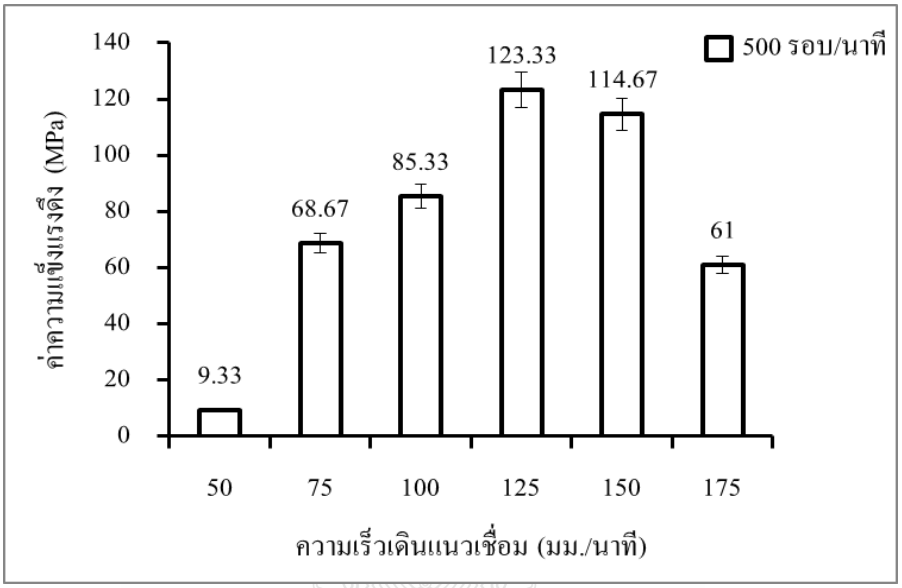
4.2.3 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกรวย



รูปที่ 4.32 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที
ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

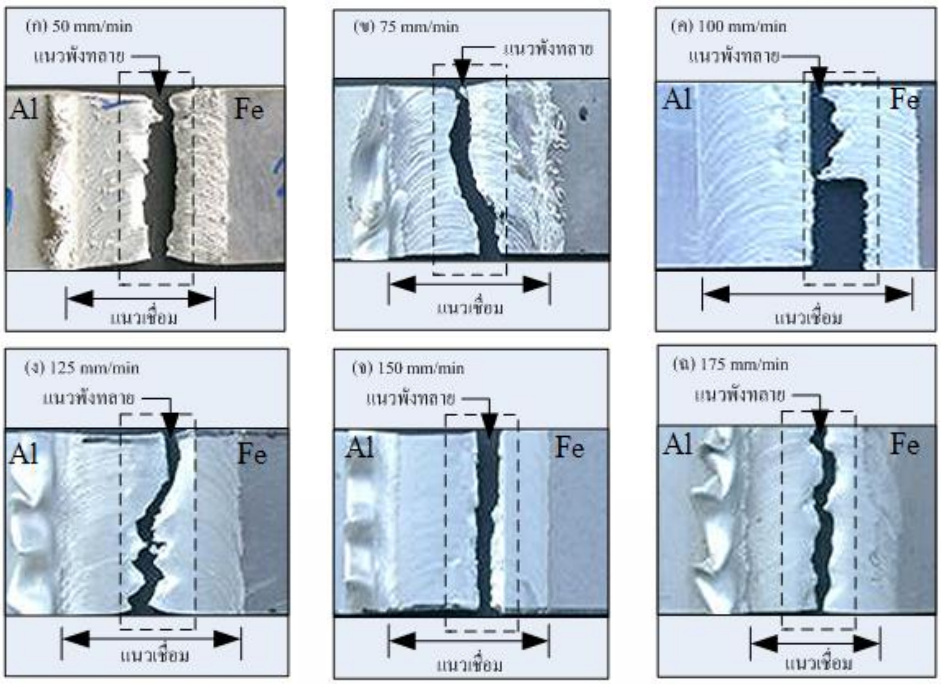
รูปที่ 4.32 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที การพิจารณาการเกิดครีบด้านข้างของแนวเชื่อมทั้งสองด้าน คือ ด้านที่เป็นอะลูมิเนียมและด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าการก่อตัวของครีบวัสดุที่เกิดจากการกด อัด และกวนของเครื่องมือเชื่อม และดันออกตามแนวเส้นรอบวงของบ่าเครื่องมือเกิดก่อตัวขึ้นรอบๆ แนวเชื่อม ที่ความเร็วแนวเชื่อมต่ำ คือ 50 มม./นาที ดังรูปที่ 4.32 ในรูป (ก) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียมโดยที่ครีบมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบต่อเนื่องกันผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันเกิดรูเป็นแนวยาว แนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน ลักษณะของแนวเชื่อมเต็ม เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75 มม./นาที ดังรูปที่ 4.32 ในรูป (ข) ครีบที่เกิดขึ้นสามารถตรวจพบได้ทั้งด้านอะลูมิเนียมและด้านเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณและขนาดที่มากกว่าความเร็วเดินอื่นๆ ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน เกิดจุดบกพร่อง คือ รู บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ดังรูปที่ 4.32 ในรูป (ค) ครีบที่เกิดขึ้นสามารถตรวจพบได้ทั้งด้านอะลูมิเนียมและด้านเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณและขนาดที่มากกว่าความเร็วเดินอื่นๆ ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ในรูป (ง) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียมโดยที่ครีบมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบต่อเนื่องกัน ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน บริเวณจุดเริ่มต้นของการเชื่อมมีลักษณะแนวเชื่อมไม่เต็มแนว เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 มม./นาที แสดงในรูปที่ 4.32 ในรูป (จ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียมโดยที่ครีบมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบต่อเนื่องกัน ผิวหน้าของแนวเชื่อมเรียบสม่ำเสมอกัน จุดเริ่มต้นของการเชื่อมมีลักษณะแนวเชื่อมไม่เต็มแนว ลักษณะของแนวเชื่อมเต็ม เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มม./

นาที ดังรูปที่ 4.32 ในรูป (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะด้านที่เป็นอะลูมิเนียมโดยที่ครีบมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบต่อเนื่องกัน ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันเกิดรูเป็นแนวยาว แนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน ลักษณะของแนวเชื่อมเต็ม

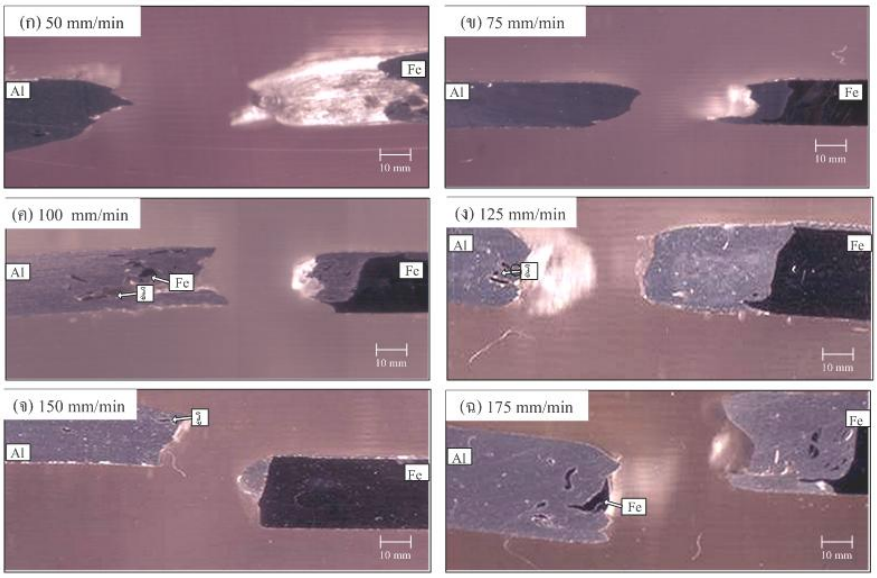


รูปที่ 4.33 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 500 มม./นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.33 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 9.33 MPa ที่ความเร็วเดิน 75 ถึง 100 มม./นาที พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 68.67 และ 85.33 MPa ตามลำดับ เมื่อความเร็วเดินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ123.33 MPa ซึ่งมีค่าแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเท่ากับ 114.67 MPa และเมื่อความเร็วเดินเป็น 175 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเท่ากับ 114.67 MPa



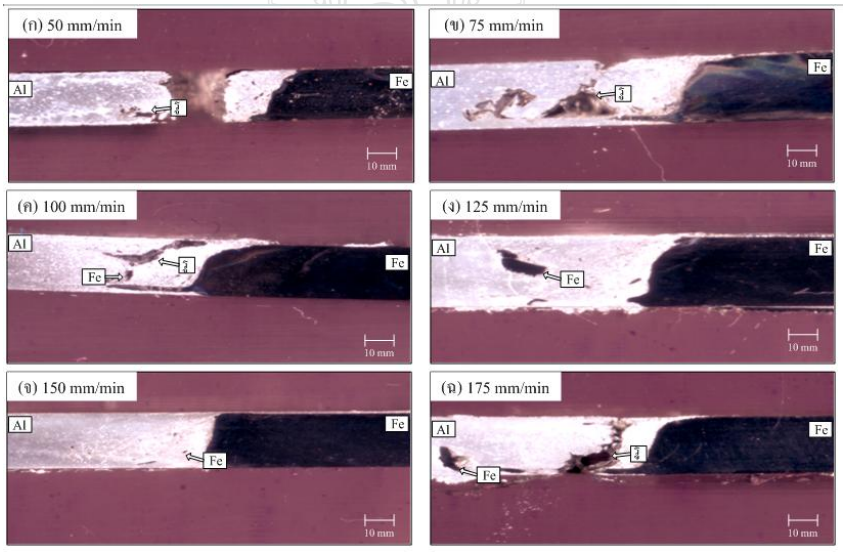
รูปที่ 4.34 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.35 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที จะเห็นว่าที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ในรูป (ก) พบว่าการฉีกขาด ขาดตรงรอยต่อตามแนวอินเทอร์เฟส ความเร็วเดิน 75 มม./นาที ในรูป (ข) การฉีกขาดไม่เป็นเส้นตรง โค้งไปทางฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม ความเร็วเดิน 100 มม./นาที ในรูป (ค) แนวการฉีกขาดตรงบริเวณกึ่งกลางรอยต่อ เนื้อชิ้นงานฉีกเข้าฝั่งอะลูมิเนียมเล็กน้อย ที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที ในรูป (ง) ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด แนวการฉีกขาดมีลักษณะเป็นเส้นซิกแซกตามแนวการฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้ง พิจารณาที่ความเร็วเดิน 150 มม./นาที ในรูป (จ) แนวพังทลายมีลักษณะคล้ายเส้นตรง พิจารณาที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) แนวการฉีกขาด ตรงบริเวณกึ่งกลางรอยต่อ แนวการฉีกขาดมีลักษณะเป็นเส้นซิกแซก

การพิจารณารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 75 100 125 150 และ175 มม./นาที ดังรูปที่ 4.34 (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ การเกิดการฉีกขาดที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบอื่นๆ เพราะระยะฉีกขาดเกิดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากที่สุด และมีเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมแทรกเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียมส่งผลให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงมาก ซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 4.33

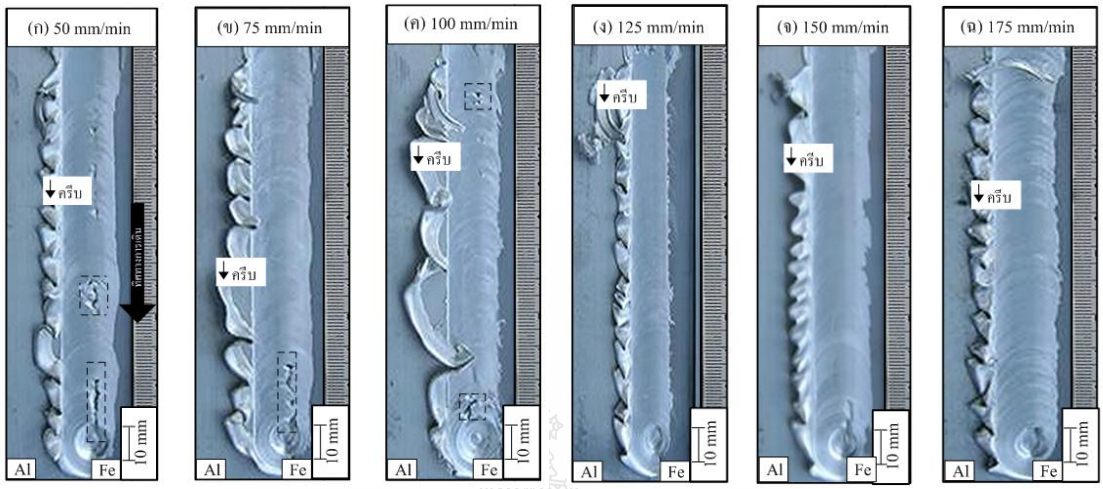


รูปที่ 4.36 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัว

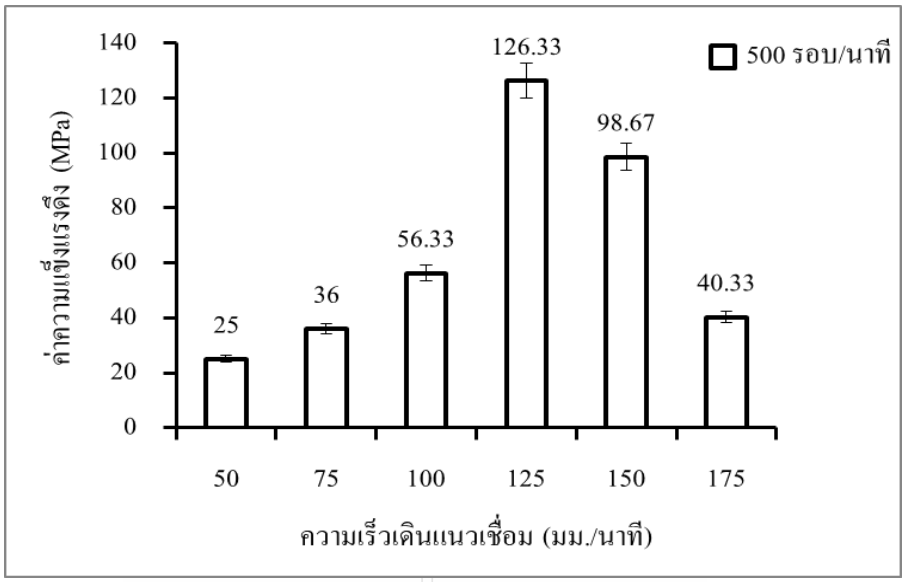
ของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.33

4.2.4 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว



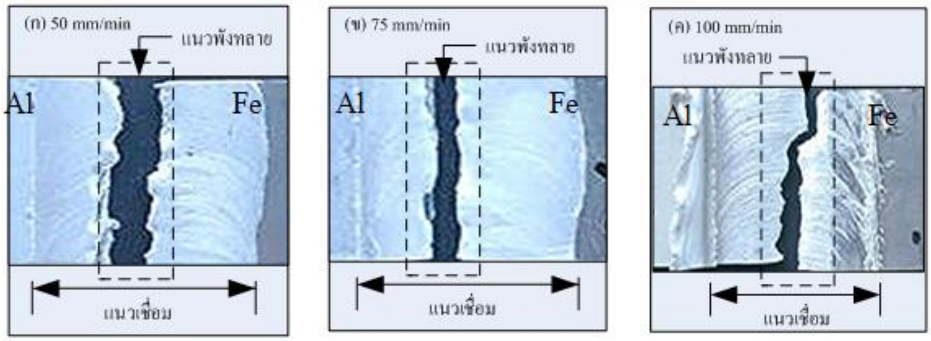
รูปที่ 4.37 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.37 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็ว 500 รอบ/นาที โดยใช้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำสุด คือ 50 ถึง 100 มม./นาที ในรูป (ก) ถึง (ค) เกิดครีบที่ด้านอะลูมิเนียม ครีบมีความแข็งแรงต่อเนื่องกันเป็นแผ่นยาวตลอดแนวเชื่อม บริเวณหน้ารอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมไม่สมบูรณ์ รอยเชื่อมไม่เต็มแนว แนวเชื่อมมีขนาดเท่าๆ กันทุกความเร็วเดิน เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม คือ รู บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ในรูป (ง) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม และต่อเนื่องกันเป็นแผ่น ผิวหน้าแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์เกิดจุดบกพร่อง คือ รูบริเวณต้นของรอยเชื่อม แนวเชื่อมทางด้านฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเชื่อมไม่เต็มแนว เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 มม./นาที ในรูป (จ) พบว่าแนวเชื่อมทางด้านอะลูมิเนียมเกิดครีบยาวตลอดแนวเชื่อม ผิวหน้าแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบเงา พบจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น175 มม./นาที ในรูป (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียม และต่อเนื่องกันเป็นแผ่น ผิวหน้าแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์เกิดจุดบกพร่อง คือ รู แนวเชื่อมทางด้านฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเชื่อมไม่เต็มแนว มีรอยซ้อนทับกันของตัวกวน



รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

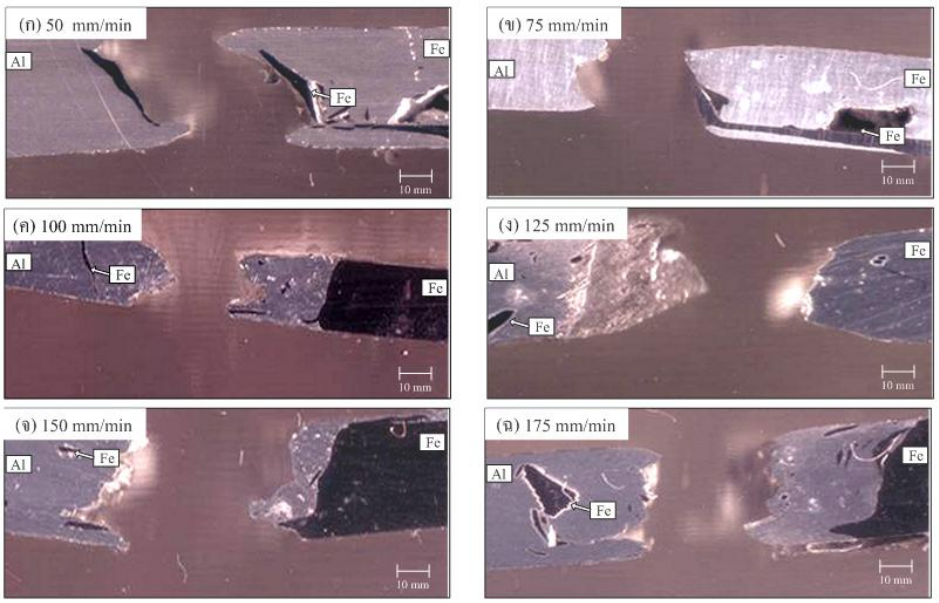
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.38 แสดงค่าความแข็งแรงที่ได้จากตัวกวนรูปทรงกรวยแกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 25.00 MPa ที่ความเร็วเดิน 75 ถึง 100 มม./นาที พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 36 และ 56.33 MPa ตามลำดับ เมื่อความเร็วเดินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 126.33 MPa ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดในการเชื่อมความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเท่ากับ 98.67 MPa และเมื่อความเร็วเดินเป็น 175 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับ 40.33 MPa



รูปที่ 4.39 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100

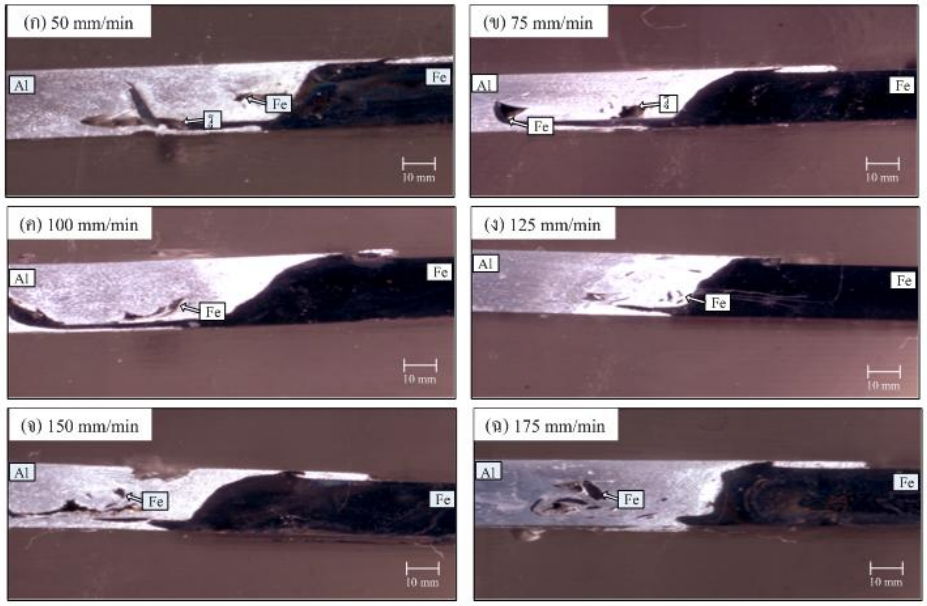
รูปที่ 4.39 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที(ต่อ)

รูปที่ 4.39 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที จะเห็นว่าที่ความเร็วเดิน 50 และ100 มม./นาที ในรูป (ก) และ (ข) พบว่า แนวการฉีกขาด มีลักษณะคล้ายเส้นตรง ที่ความเร็วเดิน 100 มม./นาที ในรูป (ค) แนวการฉีกขาดมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที แนวการฉีกขาดที่ไม่เป็นเส้นตรงเส้นตรงคล้ายเส้นซิกแซก ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดแล้ว แนวการฉีกขาดเกิดที่บริเวณค่อนไปทางอะลูมิเนียม ในรูป (ง) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที ในรูป (จ) แนวการฉีกขาด ลักษณะแนวฉีกขาดที่เป็นเส้นโค้ง ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) แนวการฉีกขาดที่ไม่เป็นเส้นตรงเส้นตรง คล้ายเส้นซิกแซก



รูปที่ 4.40 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

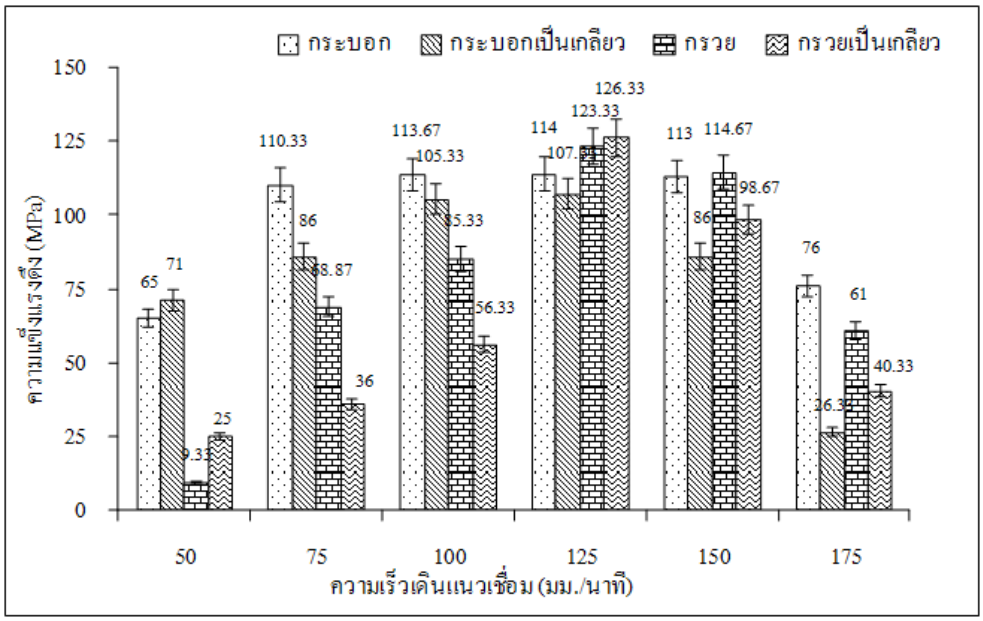
การพิจารณารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที ตามลำดับ จากรูปที่ 4.40 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที ระยะการเกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากกว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที มากกว่า 75 มม./นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที เกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากที่สุด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมาก ซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.41 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.41 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที จะสังเกต เห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่น ๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.38

4.2.5 กราฟอิทธิพลความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปแบบต่าง ๆ



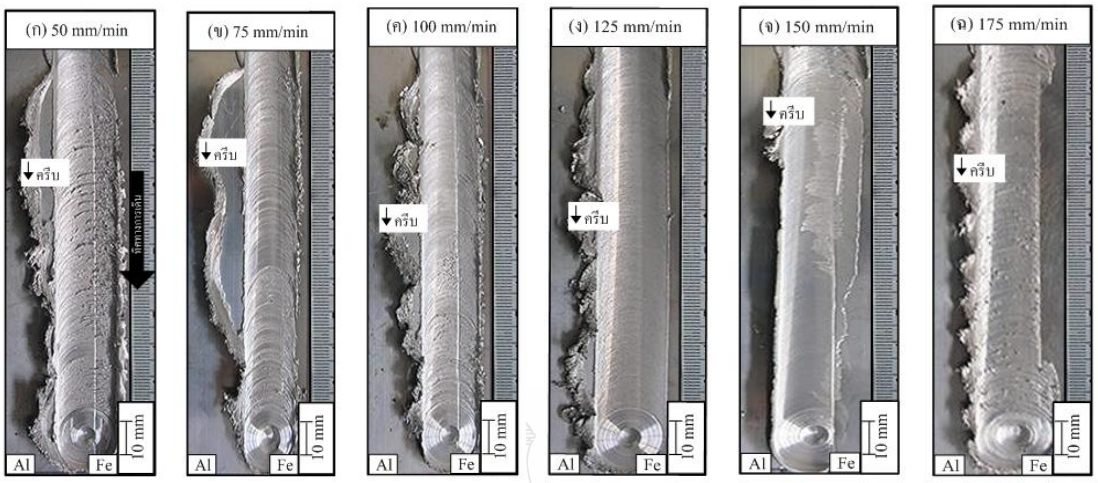
รูปที่ 4.42 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ด้วยตัวกวนรูปแบบต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในการเชื่อมที่ตัวกวนรูปแบบต่างๆซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 126.33 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที และที่ตัวกวนรูปทรงกรวย กระบอก และกระบอกเกลียว มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลงตามลำดับ

4.3 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 750 รอบ/นาที และความเร็วเดินในการเชื่อมต่าง ๆ

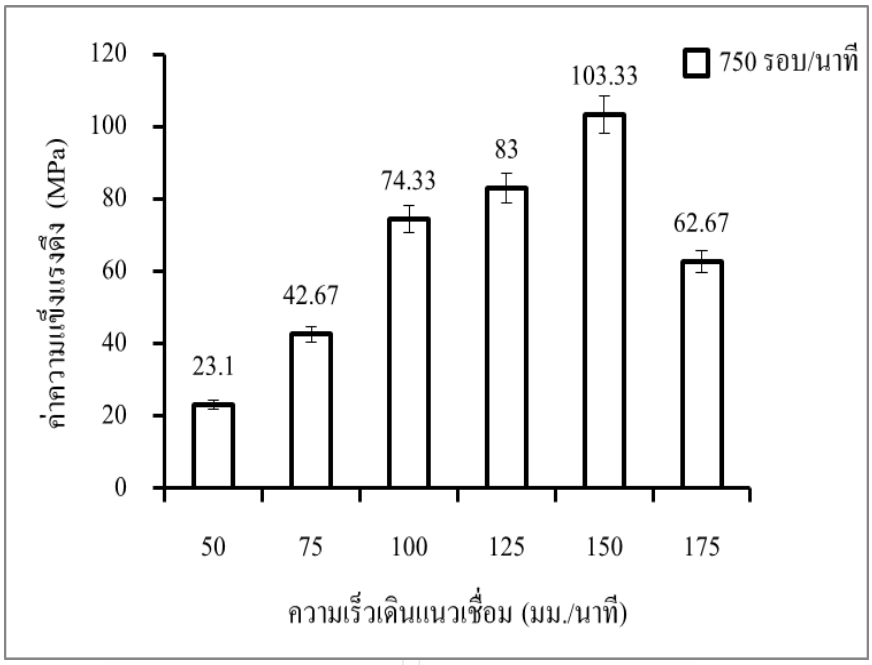
การเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยเชื่อมนั้นจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วรอบตัวกวนที่ 750 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันและให้ค่าผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่แตกต่างกันดังนี้

4.3.1 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกระบอก



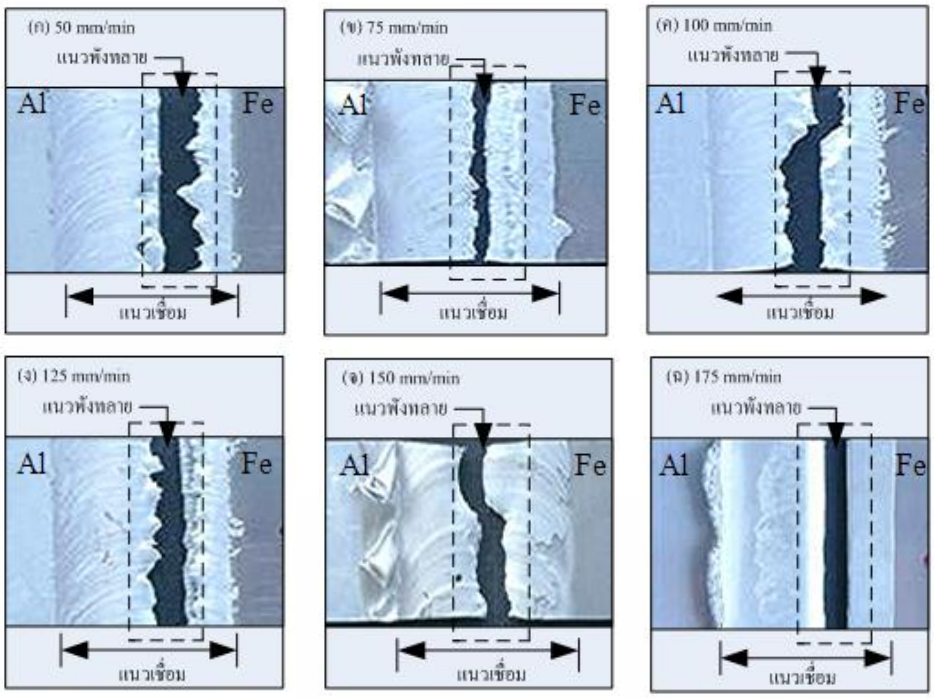
รูปที่ 4.43 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.43 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที การพิจารณาการเกิดครีบด้านข้างของแนวเชื่อมทั้งสองด้าน คือ ด้านที่เป็นอะลูมิเนียมและด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าการก่อตัวของครีบวัสดุที่เกิดจากการกด อัด และกวนของเครื่องมือเชื่อม และดันออกตามแนวเส้นรอบวงของบ่าเครื่องมือเกิดก่อตัวขึ้นรอบ ๆ แนวเชื่อม ที่ความเร็วแนวเชื่อมต่ำ คือ 50 มม./นาที และ 75 มม./นาที ดังรูปที่ 4.43 ในรูป (ก) และ (ข)ตามลำดับ ครีบที่เกิดขึ้นสามารถพบได้ทั้งสองด้าน ด้านที่เป็นอะลูมิเนียมสามารถพบได้ในปริมาณและขนาดที่มากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม และสามารถพบได้ในปริมาณและขนาดที่มากกว่าความเร็วเดินอื่น ๆ ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบเสมอกัน เกิดแนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวนเป็นแนวยาว เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ในรูป(ค) ครีบที่เกิดขึ้นเกิดทั้งสองด้าน ลักษณะแนวเชื่อมไม่เต็มแนว ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบเสมอกัน เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 125 มม./นาที ในรูป(ง) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นฝั่งอะลูมิเนียม ผิวหน้าของแนวเชื่อมเรียบสม่ำเสมอกัน เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 มม./นาที ถึง175 มม./นาที ในรูป (จ) และ (ฉ) ลักษณะของแนวเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมไม่สมบูรณ์ ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น บริเวณอินเทอร์เฟสของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อทำการเดินแนวเชื่อม จึงพบว่าที่ระดับความเร็วเดินเชื่อมที่ระดับนี้ เครื่องมือไม่สามารถเดินแนวเชื่อมให้เกิดเป็นแนวเชื่อมได้



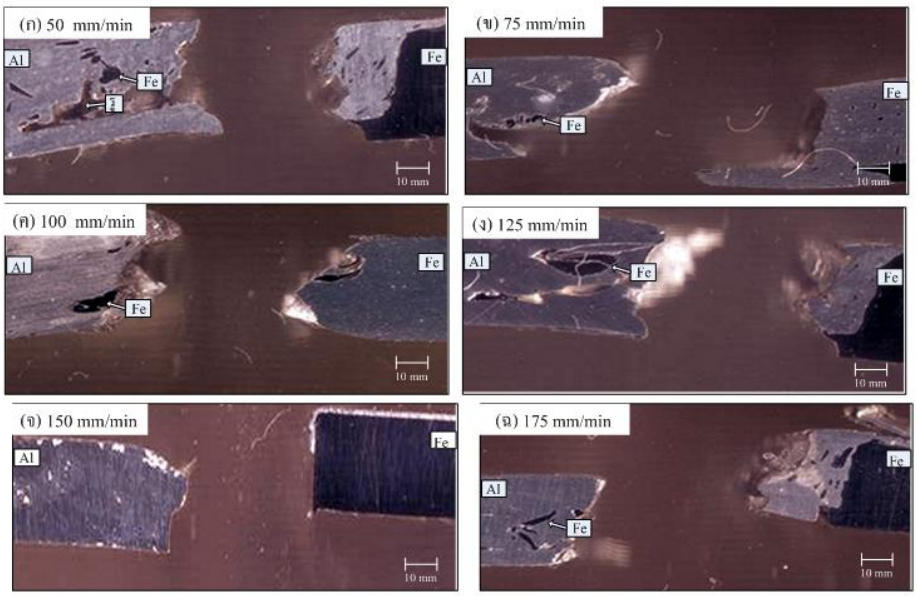
รูปที่ 4.44 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.44 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 125 มม./นาที ตามลำดับ พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วเดินเท่ากับ 23.10 42.67 74.33 และ 83.00 MPa ตามลำดับ จากนั้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 150 มม./นาที พบว่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที มีค่าเท่ากับ 103.33 MPa และเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที พบว่าความแข็งแรงดึงลดลงเท่ากับ 62.67 MPa

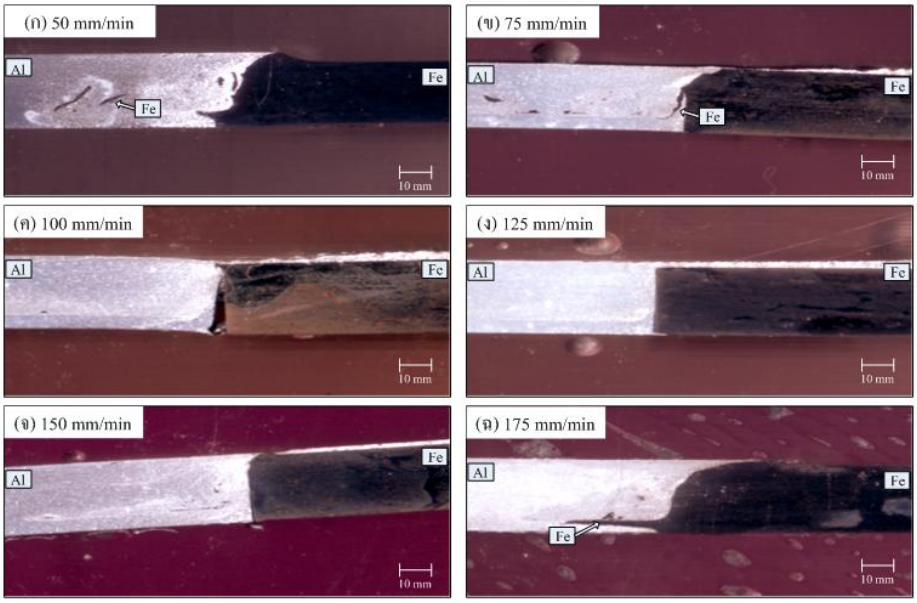


รูปที่ 4.45 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.45 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบ ความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 75 มม./นาที ในรูป (ก) และ (ข) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นโค้ง ซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ ที่ความเร็วเดิน 100 มม./นาที ในรูป (ค) พบว่ารูปร่างลักษณะการฉีกขาดซิกแซก ที่ความเร็วเดิน 150 มม./นาที ในรูป(จ) มีค่าแรงดึงสูงที่สุด ลักษณะการฉีกขาด เป็นเส้นตรง เมื่อความเร็วเดินถึง 175 มม./นาที ในรูป (ฉ) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.46 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที



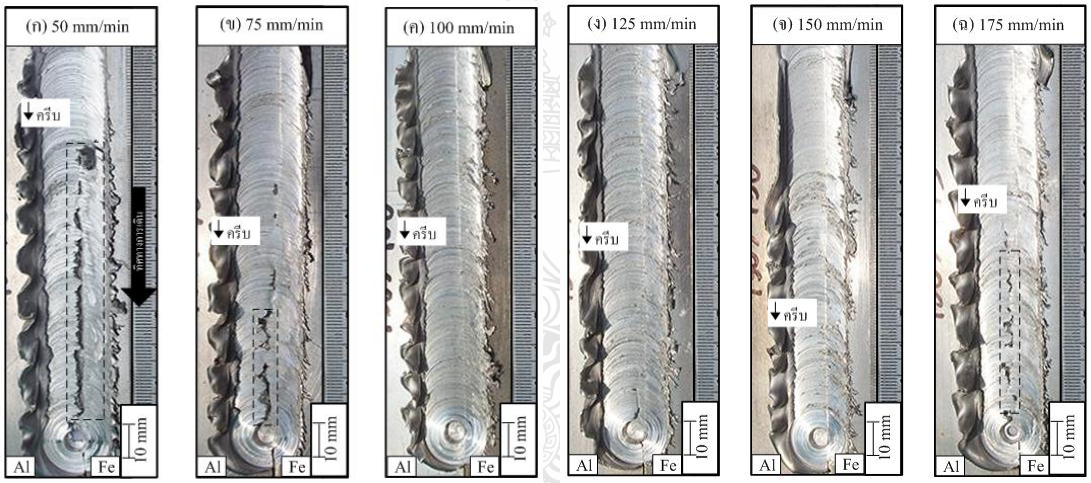
รูปที่ 4.47 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที จากการตรวจสอบภาพตัดขวางชิ้นงานที่ผ่านการดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงมาแล้ว ลักษณะการฉีกขาดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแตกต่าง

กัน ซึ่งก็จะเกิดขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วของตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.44 พิจารณารูปที่ 4.46 ในรูป (จ) ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที ที่มีส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมดันเข้าสู่อะลูมิเนียมที่ถูกกวนในแนวเชื่อม ในปริมาณน้อยทำให้การฉีกขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณระยะอินเทอร์เฟสของรอยต่อชน

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังรูปที่4.47 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม150 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.44

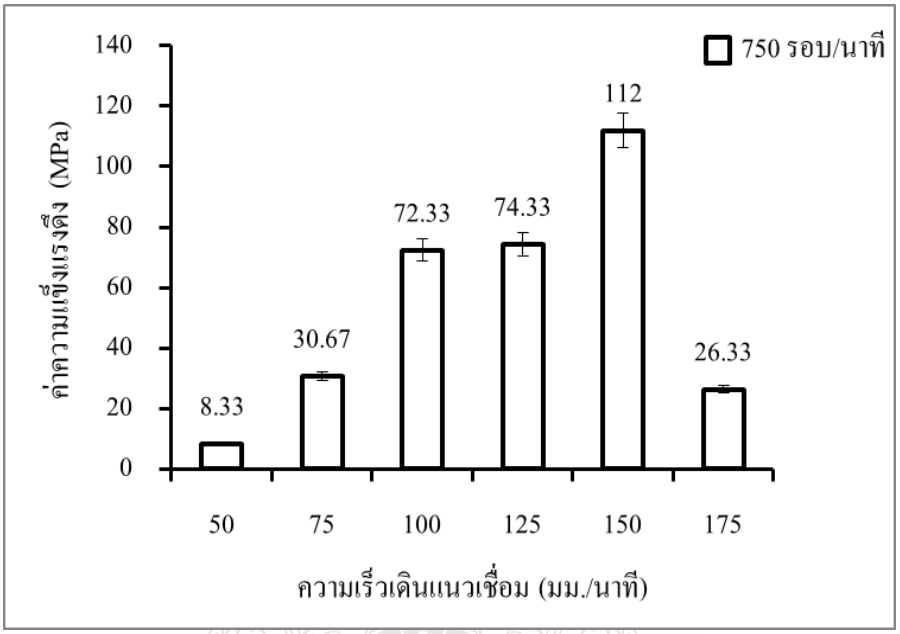
4.3.2 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกรวย



รูปที่ 4.48 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที
ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

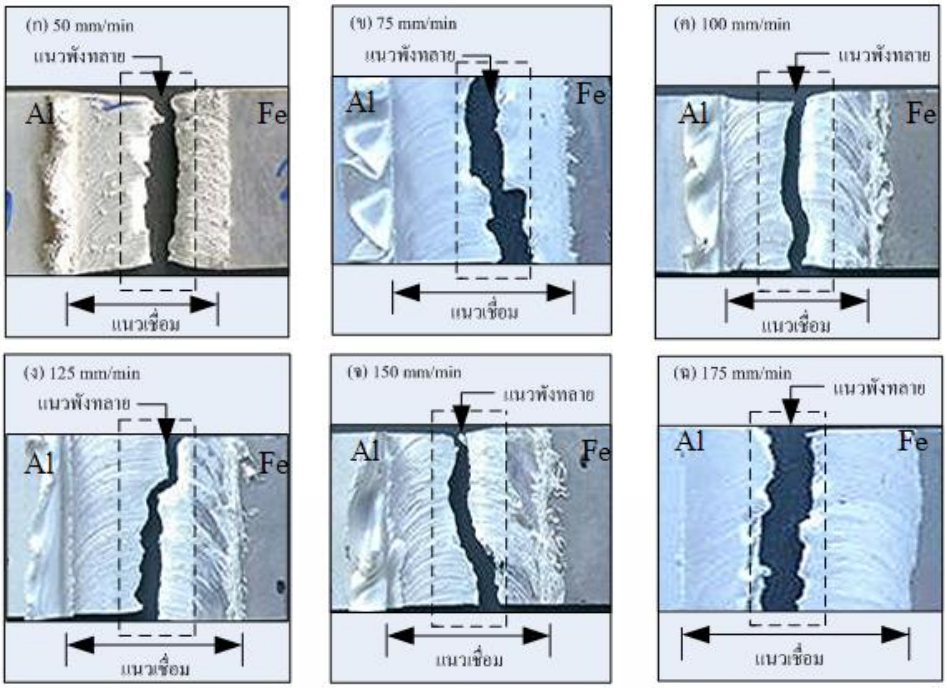
รูปที่ 4.48 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที การพิจารณาการเกิดครีบด้านข้างของแนวเชื่อมทั้งสองด้าน คือ ด้านที่เป็นอะลูมิเนียมและด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าการก่อตัวของครีบวัสดุที่เกิดจากการกด อัด และกวนของเครื่องมือเชื่อม และดันออกตามแนวเส้นรอบวงของบ่าเครื่องมือเกิดก่อตัวขึ้นรอบ ๆ แนวเชื่อม ที่ความเร็วแนวเชื่อมต่ำ คือ 50 มม./นาที และ 75 มม./นาที ดังรูปที่ 4.48 ในรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ ครีบที่เกิดขึ้นสามารถตรวจพบได้ทั้งด้านอะลูมิเนียมและด้านเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณและขนาดที่มากกว่าความเร็วเดินอื่นๆ ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกันเกิดจุดบกพร่องที่เป็นแนวยาว เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 100 มม./นาที ถึง 150 มม./นาที ดังรูปที่ 4.48 ในรูป(ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้าน

ที่เป็นอะลูมิเนียมและด้านเหล็กกล้าไร้สนิมโดยที่ครีบมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบต่อเนื่องกัน ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน แนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน ลักษณะของแนวเชื่อมเต็ม เมื่อความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มม./นาที ดังรูปที่ 4.48 ในรูป (ฉ) ครีบที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านที่เป็นอะลูมิเนียมและด้านเหล็กกล้าไร้สนิมโดยที่ครีบมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบต่อเนื่องกัน ผิวหน้าของแนวเชื่อมไม่เรียบสม่ำเสมอกัน แนวเชื่อมมีรอยซ้อนกันของตัวกวน ลักษณะของแนวเชื่อมเต็มเกิดจุดบกพร่องที่เป็นแนวยาว



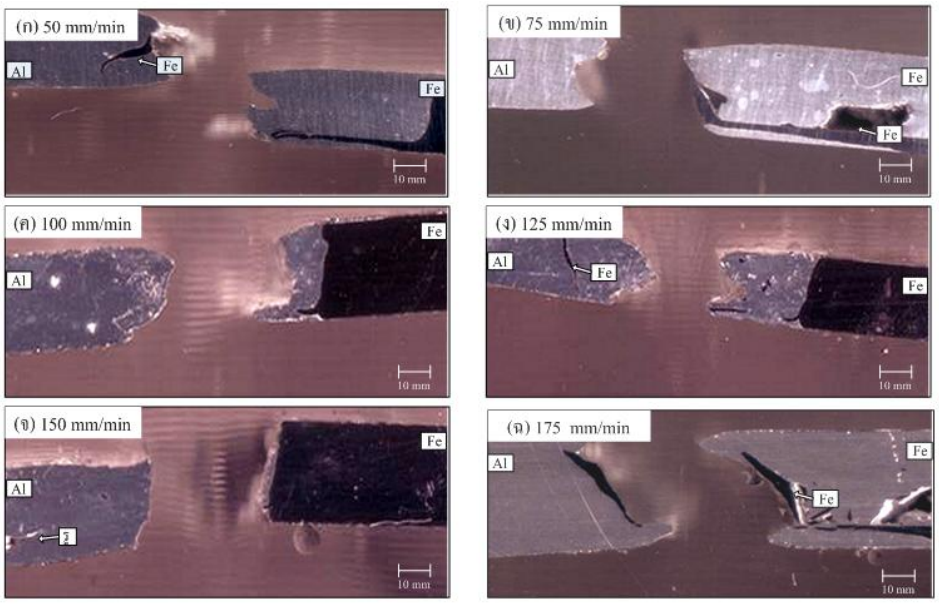
รูปที่ 4.49 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.49 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่750 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 75 มม./นาที ตามลำดับ พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วเดินเท่ากับ 8.33 และ 30.67 MPa ตามลำดับ จากนั้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง150 มม./นาที พบว่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที มีค่าเท่ากับ 112.00 MPa ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที พบว่าความแข็งแรงดึงลดลงเหลือ 26.33 MPa

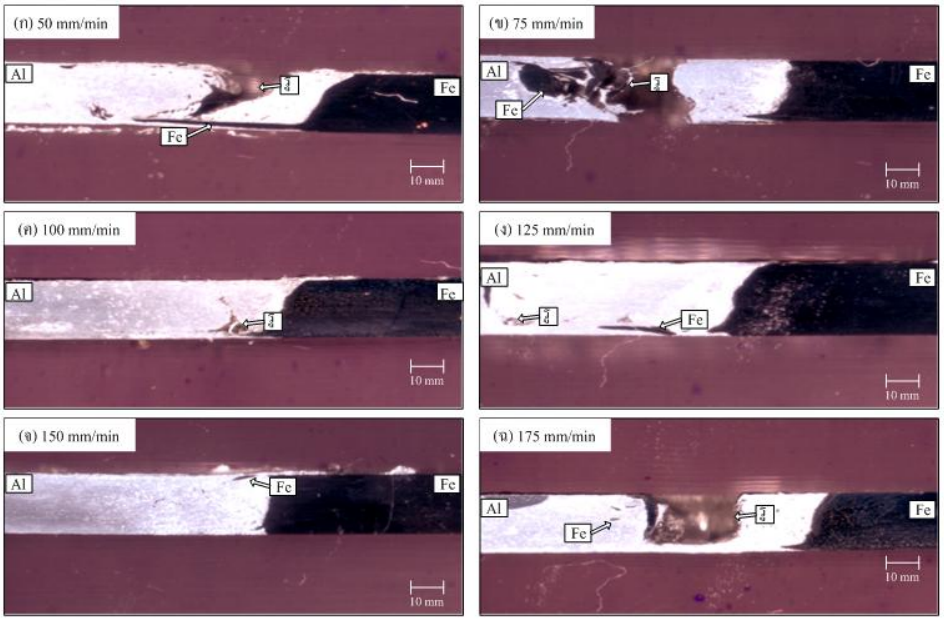


รูปที่ 4.50 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.50 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที จะเห็นว่าที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ในรูป (ก) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดตรงรอยต่ออินเทอร์เฟส ความเร็วเดิน75 มม./นาที ในรูป (ข) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดบริเวณ ตรงรอยต่ออินเทอร์เฟสซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ ที่ความเร็วเดิน100 มม./นาที ในรูป(ค) แนวการฉีกขาดมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที ในรูป (ง) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นโค้ง ที่ความเร็วเดิน 150 มม./นาที ในรูป (จ) แนวการฉีกขาดที่ไม่เป็นเส้นตรงคล้ายเส้นโค้ง ซึ่งเป็นแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดแล้ว แนวการฉีกขาดเกิดที่บริเวณค่อนไปทางอะลูมิเนียม ความเร็วเดิน 175 มม./นาที ในรูป (ง) พบว่ามีรูปร่างลักษณะการฉีกขาดบริเวณ ตรงรอยต่ออินเทอร์เฟสซึ่งแสดงถึงแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 4.51 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

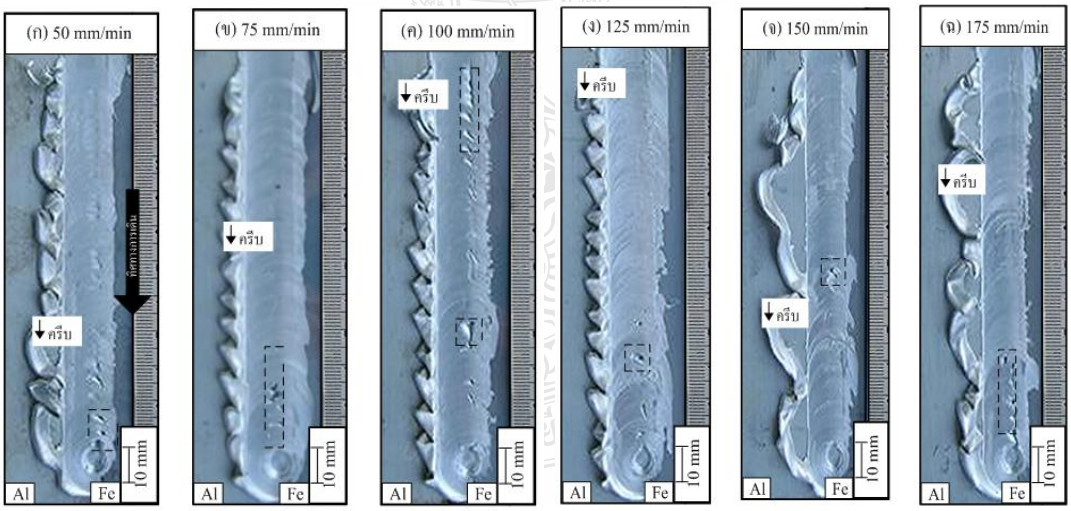


รูปที่ 4.52 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที ตามลำดับ จากรูปที่ 4.51 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที ระยะการเกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากกว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที มากกว่า 50 มม./นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม150 มม./นาที เกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟสมากที่สุด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมาก ซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 4.49

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียว ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.52 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที จะสังเกตุเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.49

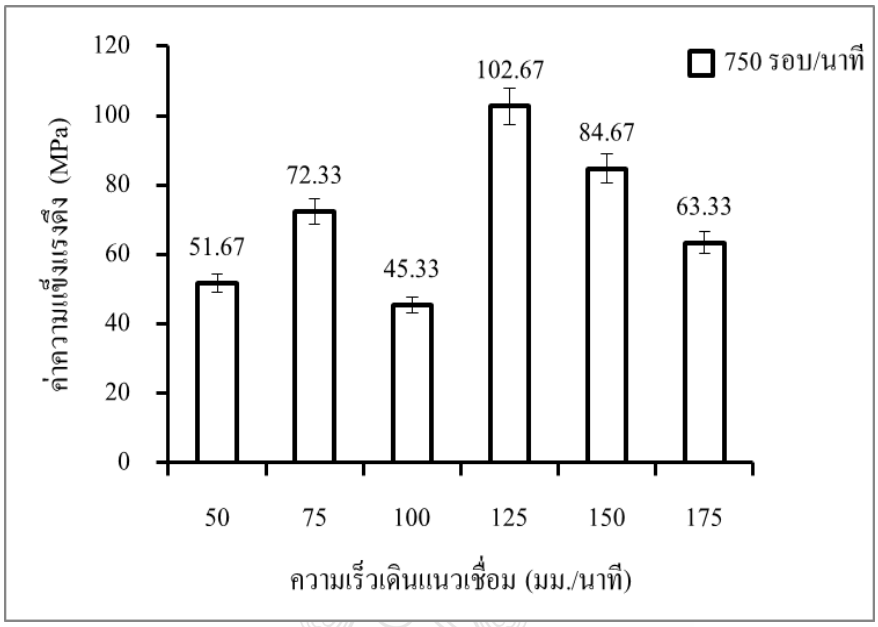
4.3.3 การเชื่อมชิ้นงานด้วยการเสียดทานของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว



รูปที่ 4.53 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

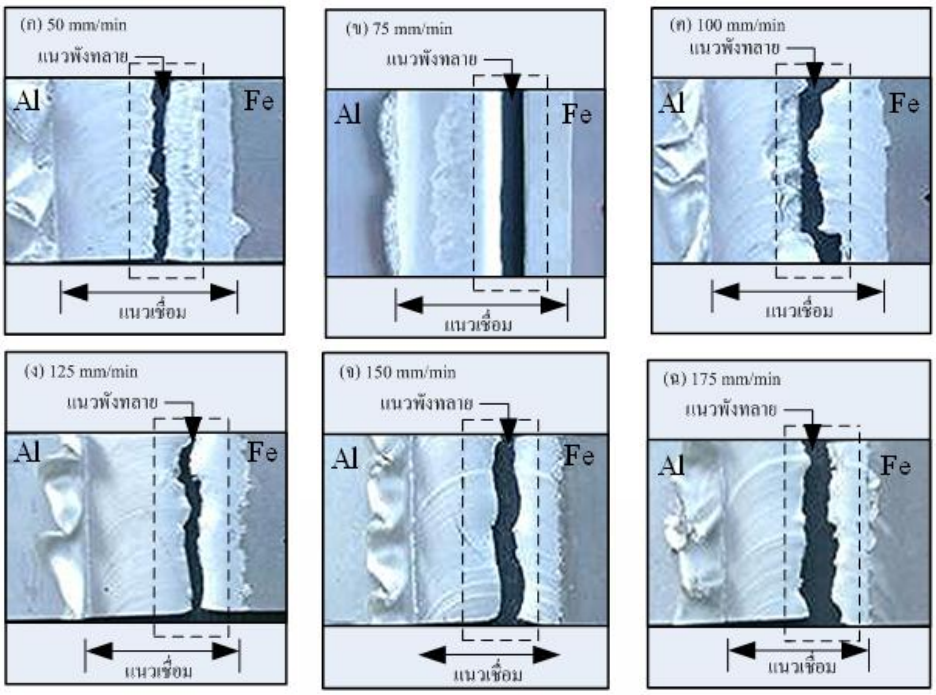
รูปที่ 4.53 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยความเร็ว 750 รอบ/นาที โดยใช้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำสุด คือ 50 มม./นาที ในรูป (ก) พบว่าแนวเชื่อมทางด้านอะลูมิเนียม เกิดครีบยาวตลอดแนวเชื่อม ผิวหน้าแนวเชื่อมค่อนข้างเรียบ เงา พบจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75 ถึง 125 มม./

นาที ในรูป (ข) ถึง (ง) เกิดครีบที่ด้านอะลูมิเนียม ครีบมีความแข็งแรงต่อเนื่องกันเป็นแผ่นยาวตลอดแนวเชื่อม บริเวณหน้ารอยเชื่อมฝั่งเหล็กไม่สมบูรณ์รอยเชื่อมไม่เต็มแนว แนวเชื่อมมีขนาดเท่า ๆกันทุกความเร็วเดิน เกิดจุดบกพร่อง คือ รู บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 ถึง 175 มม./นาที ในรูป (จ) ถึง (ฉ) เกิดครีบที่ด้านอะลูมิเนียมบริเวณหน้ารอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมไม่สมบูรณ์รอยเชื่อมไม่เต็มแนว เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม

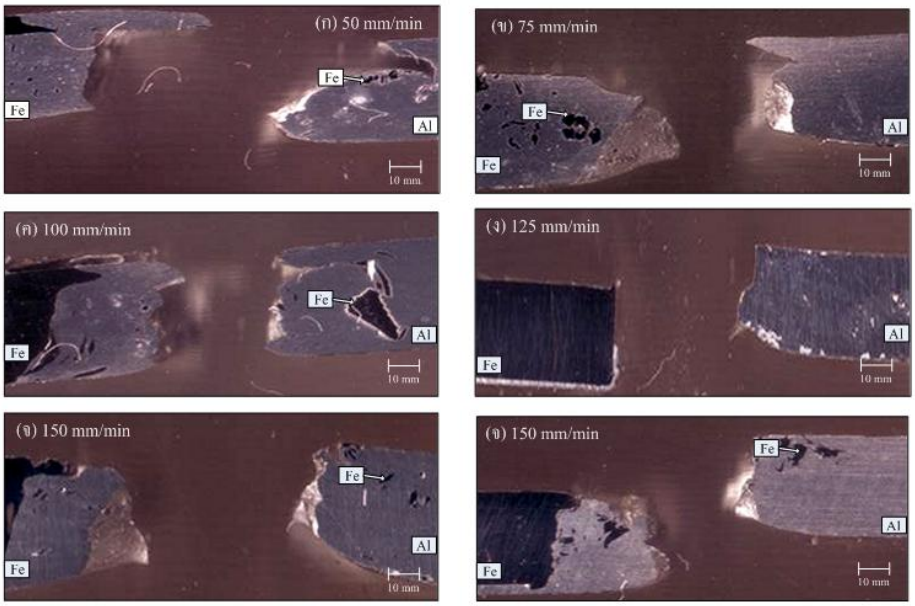


รูปที่ 4.54 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วเดินแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.54 แสดงค่าความแข็งแรงที่ได้จากตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 75 มม./นาที พบว่าค่าแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วเดินเท่ากับ 51.67 และ72.33 MPa ตามลำดับ จากนั้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100 มม./นาที พบว่าความแข็งแรงดึงลดลงเป็น 45.33 MPa โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที มีค่าเท่ากับ 102.67 MPa ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 ถึง 175 มม./นาที พบว่าความแข็งแรงดึงลดลงเหลือ 84.67 และ 63.33 MPa ตามลำดับ



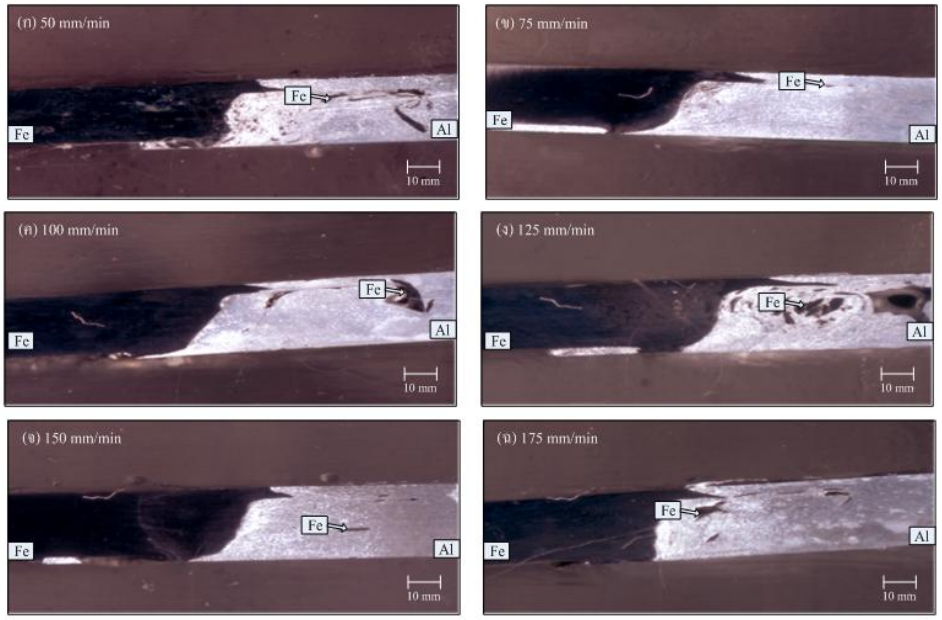
รูปที่ 4.55 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.56 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียว ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที

รูปที่ 4.55 แสดงลักษณะของแนวฉีกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที ในรูป (ก) ลักษณะแนวฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซกเพียงเล็กน้อย การฉีกขาดตามแนวอินเทอร์เฟส เมื่อเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./นาที ในรูป (ข) พบว่าเมื่อทำการเชื่อมด้วยสภาวะนี้ ลักษณะแนวฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซก การฉีกขาดตามแนวอินเทอร์เฟส เมื่อเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที ในรูป (ค) ลักษณะแนวฉีกขาดเป็นเส้นซิกแซก การฉีกขาดตามแนวอินเทอร์เฟส เมื่อเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ในรูป(จ)

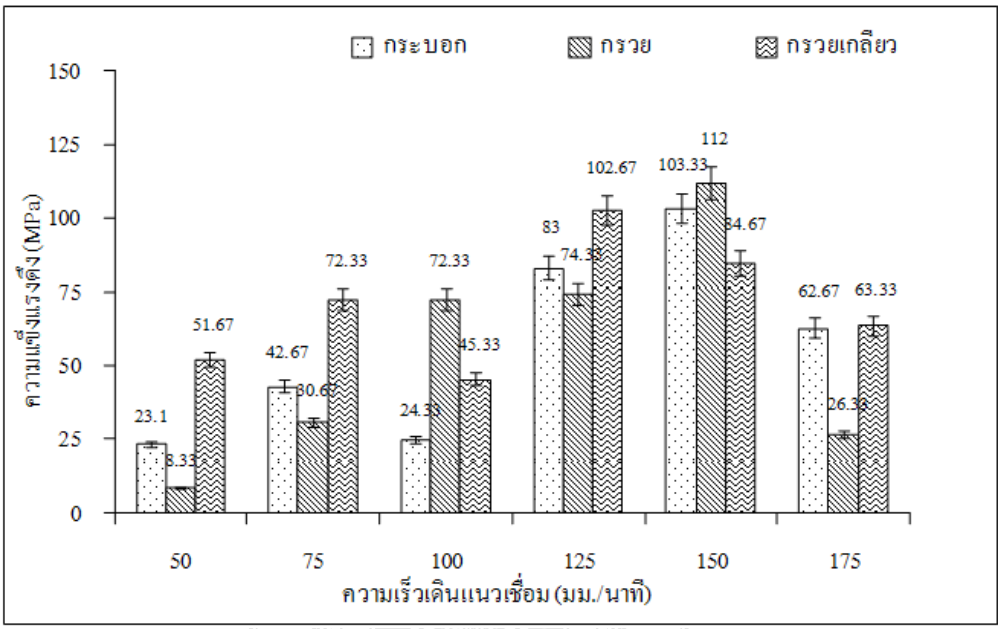
การพิจารณารอยฉีกที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 ถึง 175 มม./นาที ดังรูปที่ 4.54 ในรูป (ก) ถึง (ฉ) ตามลำดับ พิจารณาที่ความเร็วเดิน 50 ถึง 100 มม./นาที การเกิดแนวฉีกขาดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 ถึง 100 มม./นาที เกิดการฉีกขาดระยะอินเทอร์เฟส ซึ่งส่งผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง ดังกราฟรูปที่ 4.54 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน การเกิดการฉีกขาดของแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินที่ 125 มม./นาที เกิดการฉีกขาดห่างจากระยะอินเทอร์เฟส มากกว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่น ๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที มีค่ามากที่สุด ที่ความเร็วเดิน 150 ถึง 175 มม./นาที เกิดการฉีกขาดของแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟสที่เป็นรอยต่อชน



รูปที่ 4.57 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที

การพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ถูกเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียว ที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.57 แสดงให้เห็นลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 4.54

4.3.4 กราฟอิทธิพลความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปแบบต่าง ๆ



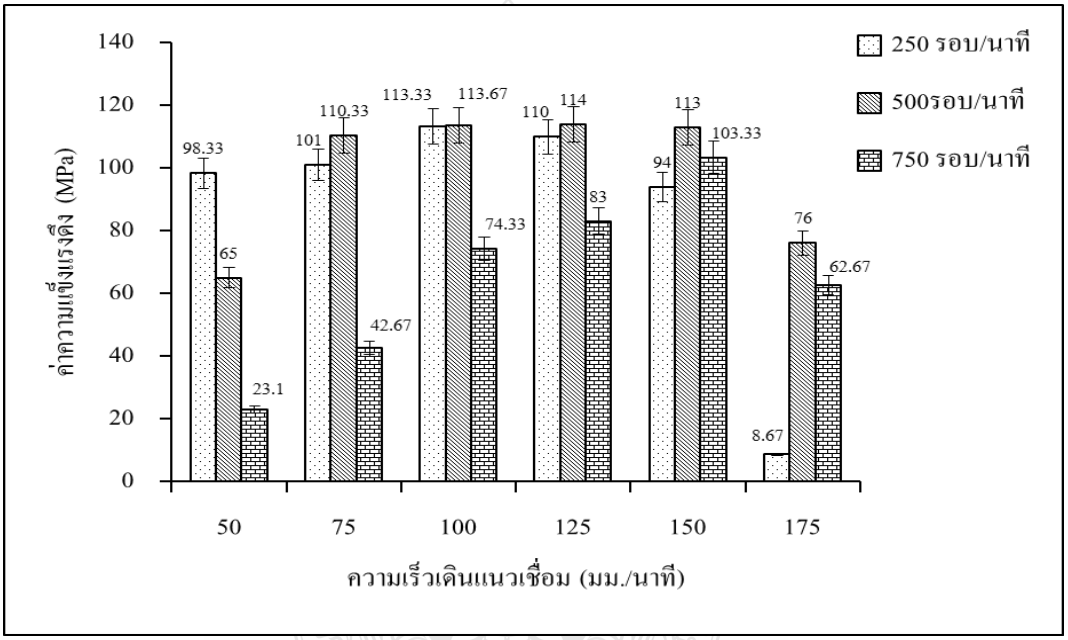
รูปที่ 4.58 ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ด้วยตัวกวนรูปแบบต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที พบว่าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในการเชื่อมที่ตัวกวนรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 112.00 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที และที่ตัวกวนรูปทรงกระบอก และกรวยเกลียว มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลงตามลำดับ

4.4 เปรียบเทียบอิทธิพลความเร็วรอบตัวกวนที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมแต่ละรูปร่างตัวกวน

จากการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยตัวแปรเชื่อมที่ต่างกันนั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผิวหน้าของรอยเชื่อม ลักษณะการฉีกขาด การศึกษาโครงสร้างมหาภาค และหาค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม พบว่า รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงเดียวกันแต่เชื่อมด้วยความเร็วรอบและความเร็วเดินตัวกวนที่ต่างกัน ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ต่างกันสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.4.1 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก

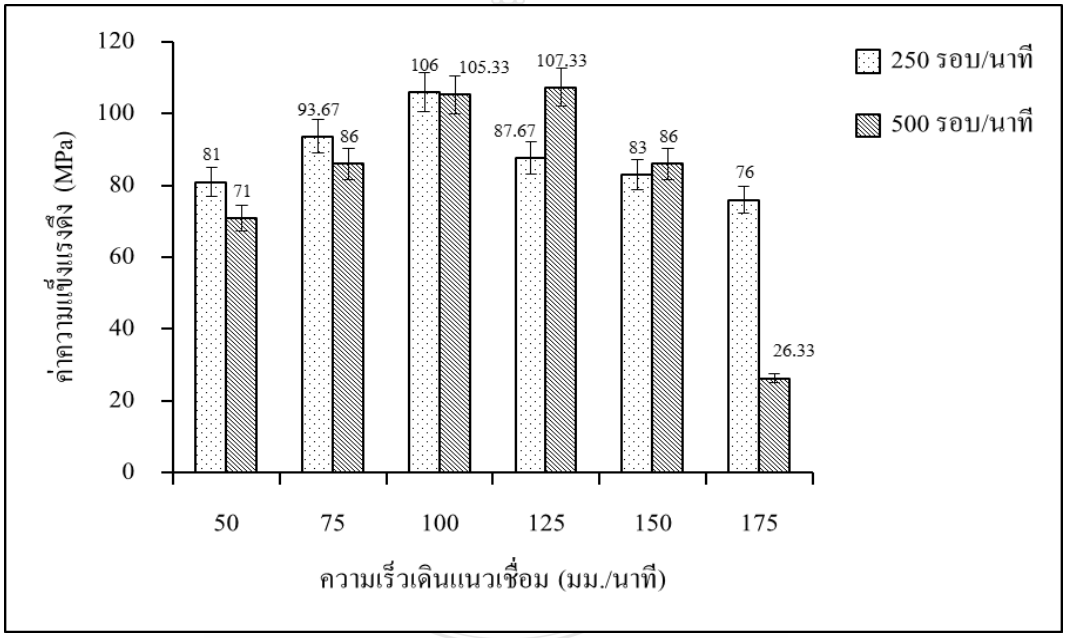


รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน

รูปที่ 4.59 กราฟแสดงการเปรียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวนสามความเร็วรอบ คือ 250 500 และ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 ถึง 175 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก พบว่า ความเร็วรอบที่ 250 และ 500 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงส่วนใหญ่ที่ค่อนข้างสูงทุกๆ ความเร็วเดิน เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบตัวกวนที่ 750 รอบ/นาที ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่า แต่มีค่าในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 - 150 มม./นาที และมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเดินเป็น 175 มม./นาที สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าที่มากน้อยแตกต่างกันนั้น จากการวิเคราะห์ผิวหน้าของแนวเชื่อมและลักษณะการฉีกขาดและโครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อม พบว่า รอยเชื่อมที่

มีค่าความแข็งแรงดึงที่มาก ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ และมีลักษณะการฉีกขาดแบบซิกแซกตลอดแนวการฉีกขาดของรอยเชื่อมเมื่อทำการทดสอบแรงดึง เนื่องจากบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมเกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปอยู่ในส่วนของอะลูมิเนียมที่มากในส่วนด้านล่างของแนวเชื่อมเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคบริเวณอินเทอร์ของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความแตกต่างไปจากรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำ เนื่องจากลักษณะรอยฉีกขาดของแนวเชื่อมเป็นลักษณะเส้นตรงและเกิดการฉีกขาดใกล้กับบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค พบว่าไม่พบการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปอยู่ในส่วนของอะลูมิเนียม จึงทำให้รอยเชื่อมไม่เกิดการเกาะยึดระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงดึงต่ำที่มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.4.2 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเป็นเกลียว

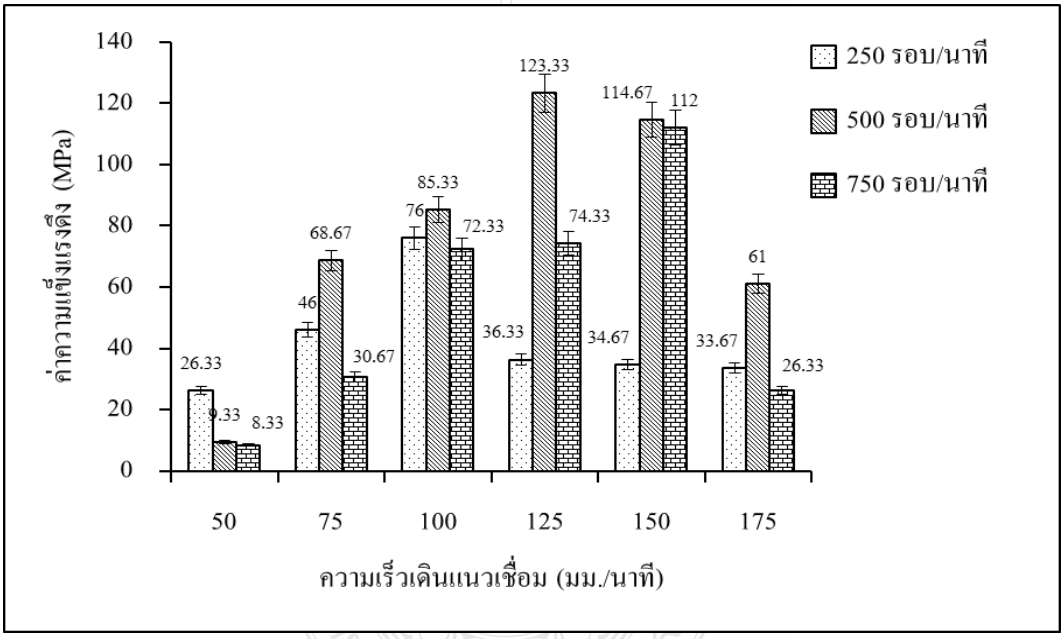


รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเป็นเกลียวและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน

การเชื่อมด้วยตัวเชื่อมทรงกระบอกเกลียว พบว่า รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.60 เมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วรอบตัวกวนทั้งสองความเร็วรอบพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงที่ 250 และ 500 รอบ/นาที มีค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 ถึง 100 มม./นาที และมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมตั้งแต่ 125 - 175 มม./นาที ตามลำดับ ส่วนที่ความเร็วรอบตัวกวน 750 รอบ/นาที และทุกๆ ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมไม่พบค่าความแข็งแรงดึง

เนื่องจากเป็นความเร็วรอบที่ไม่สามารถทำการเชื่อมกับตัวทรงชนิดนี้ได้ จึงทำให้รอยเชื่อมเกิดความไม่สมบูรณ์ อินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมไม่เกิดยึดติดระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด จึงทำให้การเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมให้ติดกันได้เหมือนกับที่ความเร็วรอบตัวกวนทั้งสองความเร็วรอบของตัวกวนประเภทอื่นๆ จากการศึกษาลักษณะการฉีกขาดของแนวเชื่อม และตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดพบว่าการเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวนั้นมีลักษณะแนวการฉีกขาดและโครงสร้างมหาภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมมีความเหมือนกับการศึกษาในส่วนของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกดังที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดมาแล้วข้างต้น

4.4.3 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย

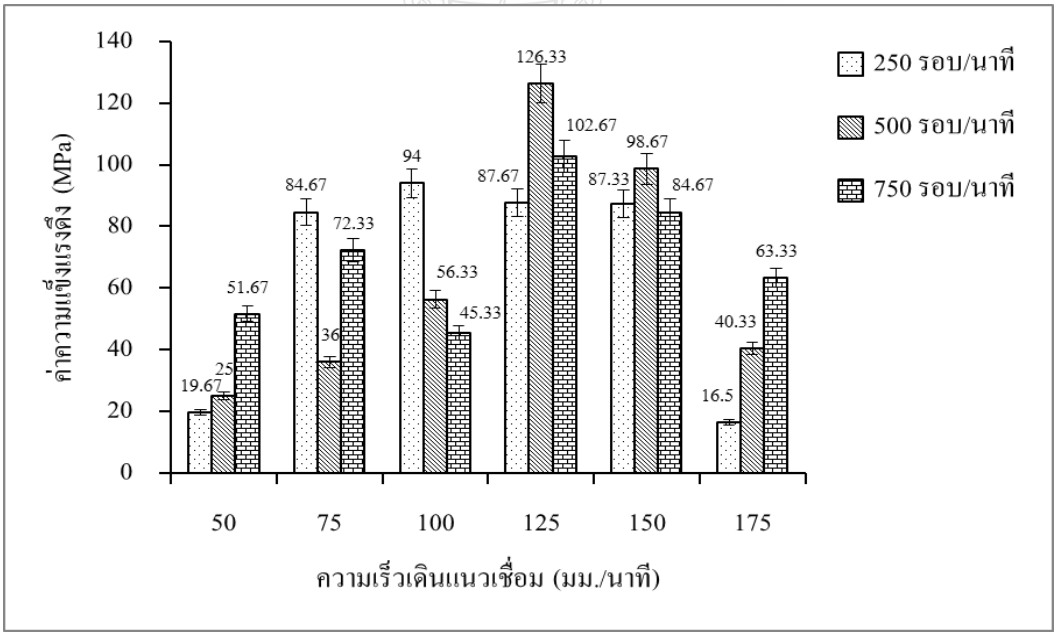


รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย และความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน

ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ดังกราฟรูปที่ 4.61 พบว่า ที่ความเร็วรอบตัวกวนที่ 500 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที และมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างทั้งสองรอบความเร็วเดินตัวกวน คือ 250 และ 750 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกันทั้งสามความเร็วรอบและทุกค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม เกิดเนื่องจากที่สภาวะความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที เป็นความเร็วรอบที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าสูงเกือบทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม ส่วนรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดนั้น พบว่าทำการเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวนที่ 750 รอบ/นาที และ

ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 50 มม./นาที เนื่องจากความเร็วรอบตัวกวนที่มากเกินมีความไม่สอดคล้องกับความเร็วเดินที่น้อยมากจึงทำให้วัสดุทั้งสองชนิดไม่เกิดการแทรกตัวและการเกาะยึดระหว่างกัน เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมและรอยฉีกขาดมีลักษณะที่ความเรียบเป็นเส้นตรงหรือมีความซิกแซกที่น้อยมากตลอดบริเวณแนวการฉีกขาด จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงที่น้อยตามไปด้วย ส่วนรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงมากนั้น เมื่อทำการตรวจผิวหน้าแนวเชื่อมพบว่า มีความสมบูรณ์ตลอดผิวหน้าแนวเชื่อมและไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะการฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึง รอยเชื่อมเกิดการฉีกขาดเข้าไปในฝั่งของอะลูมิเนียมที่ใกล้จากบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่ค่อนข้างมาก และมีลักษณะเป็นรูปซิกแซกที่มีขนาดใหญ่ ก่อนการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม พบการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปที่ฝั่งของอะลูมิเนียมในส่วนด้านล่างของรอยที่ที่ค่อนข้างยาวและมาก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยมีค่าความแข็งแรงสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงในสภาวะที่เหมาะสมกัน

4.4.4 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเป็นเกลียว



รูปที่ 4.62 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเป็นเกลียวและความเร็วรอบตัวกวนที่ต่างกัน

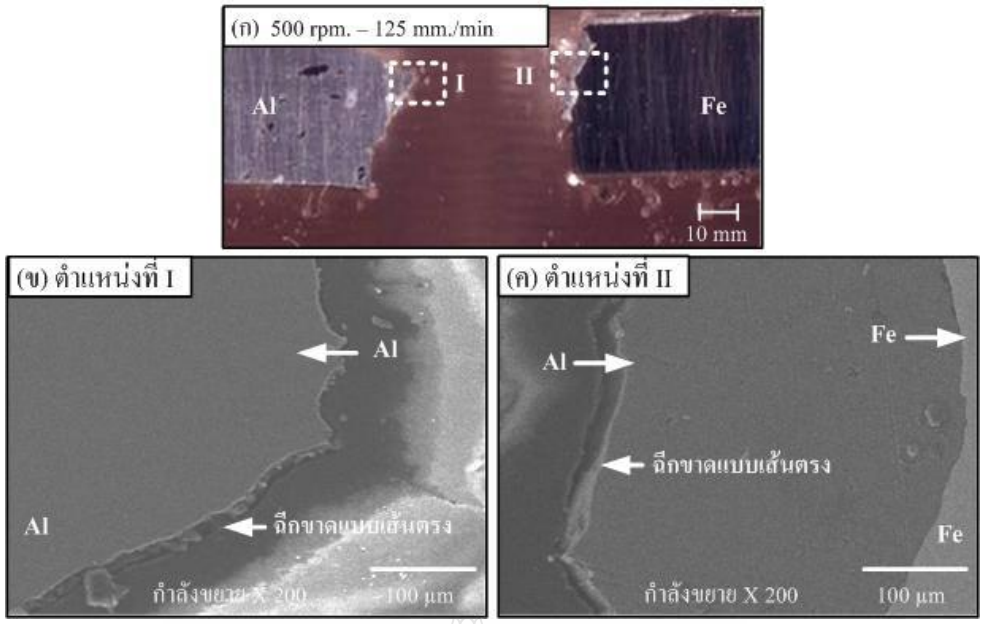
รูปที่ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมโดยทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว ที่ทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบและความเร็วเดินตัวกวนที่แตกต่างกัน

พบว่า ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 และ 750 รอบ/นาที ตามลำดับ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและรองลงมา ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 50 75 100 และ 175 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงส่วนมากค่อนข้างต่ำ ส่วนที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงที่อยู่ในช่วงปานกลางเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมตั้งแต่ 75 ถึง 150 มม./นาที และต่ำสุดเมื่อความเร็วเดิน 50 และ 175 มม./นาที ตามลำดับ จากการศึกษาโครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟส พบว่า รอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงมากสูงและต่ำที่สุด ตามลำดับ มีลักษณะการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในฝั่งของอะลูมิเนียมที่มากและยาวในส่วนด้านล่างของอินเทอร์เฟสรอยเชื่อมสำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ส่วนรอยเชื่อมที่ไม่พบการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในฝั่งของอะลูมิเนียมและบริเวณอินเทอร์เฟสมีความเรียบสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้รอยเชื่อมมีลักษณะการฉีกขาดที่เป็นแนวตรงหรือมีความหยักเล็กน้อยตลอดแล้วเชื่อมใกล้กับบริเวณอินเทอร์เฟสหลังจากทดสอบหค่าความแข็งแรงดึงที่มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำมากเมื่อทำการเชื่อมที่ตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวและสภาวะอื่นๆ ในกระบวนการเชื่อม

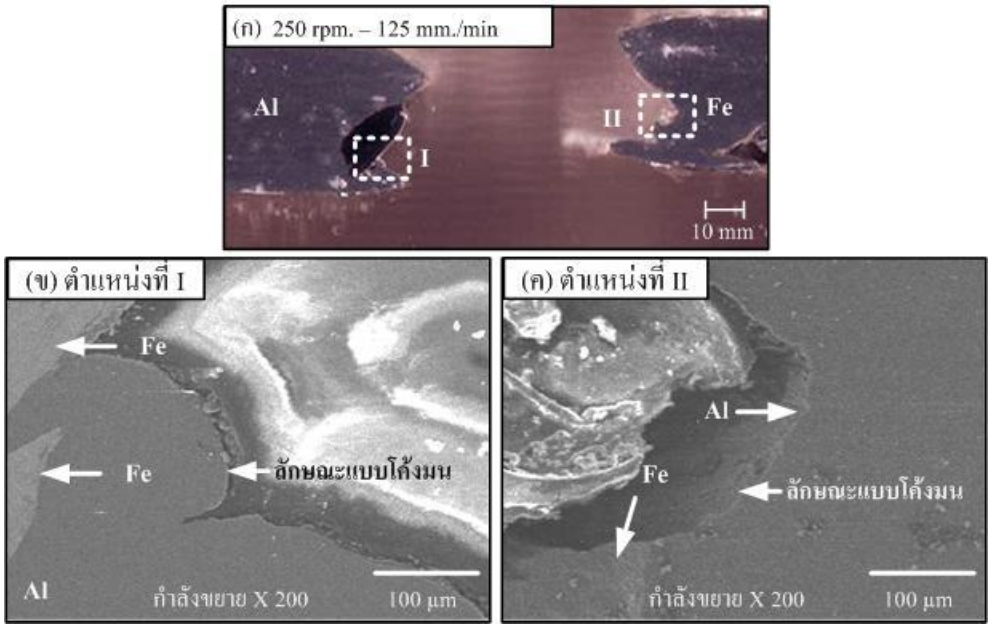
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ด้วยตัวกันที่มีรูปทรงต่างกัน คือ ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียว ตัวกวนทรงกรวย และตัวกวนทรงกรวยเกลียว ที่ความร็วเดินแนวเชื่อม 50 ถึง 175 มม./นาที และความเร็วรอบตัวกวน 250 500 และ 750 รอบ/นาที ผลการวิเคราะห์การทดสอบทั้งหมดนี้ ทำให้ทราบถึงค่าตัวแปรที่ใช้ในการกระบวนการเชื่อมประเภทนี้ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งได้ผลการทดลองที่มีความสอดคล้องและคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Kittipong K. [20] ที่กล่าวถึงกระบวนการทดลอง วิธีการตรวจสอบ และหลักการวิเคราะห์ผลการทดลองในด้านต่างๆ ได้อย่างสมเหตุสมผล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองตามรายละเอียดที่ได้กล่าวมาทั้งหมดแล้วข้างต้น เพื่อที่จะนำไปเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาขึ้นสูงในลำดับต่อไป

4.5 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยฉีกขาด

หลังจากทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะการฉีกขาดรอยพังทลายของแนวเชื่อมแล้วนั้น พบว่า ลักษณะการฉีกขาดของแนวเชื่อมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงที่มากน้อยแตกต่างกันไป จึงได้ทำการตรวจสอบลักษณะการฉีกขาดในส่วนของภาพตัดขวางของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ในเบื้องต้นให้มีความสอดคล้องกันยิ่งขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม เพื่อต้องการทราบการแตกหักของวัสดุทดสอบในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียด ดังต่อไปนี้

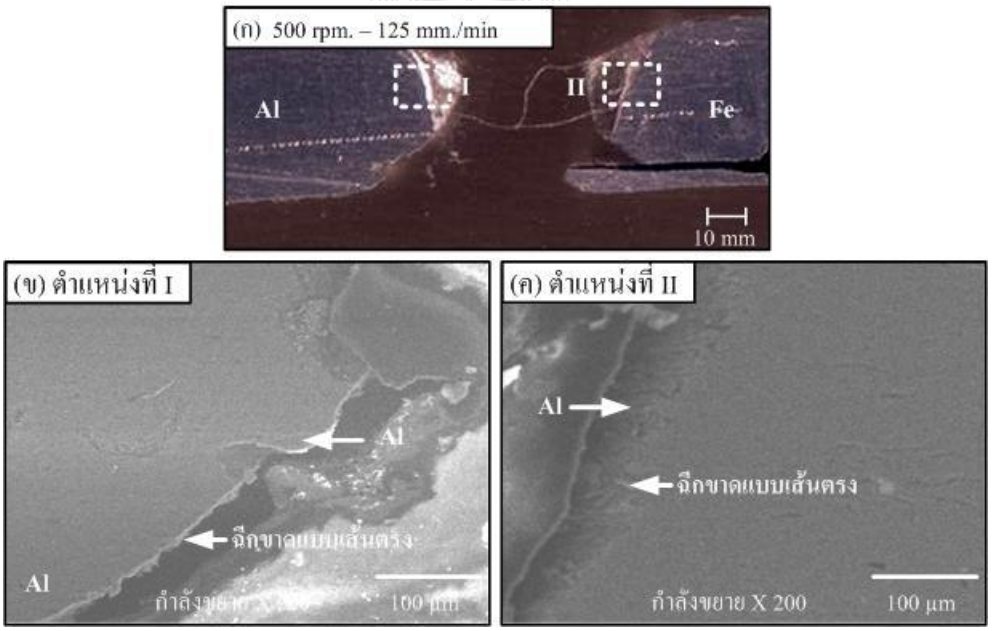


รูปที่ 4.63 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดของระยะเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที



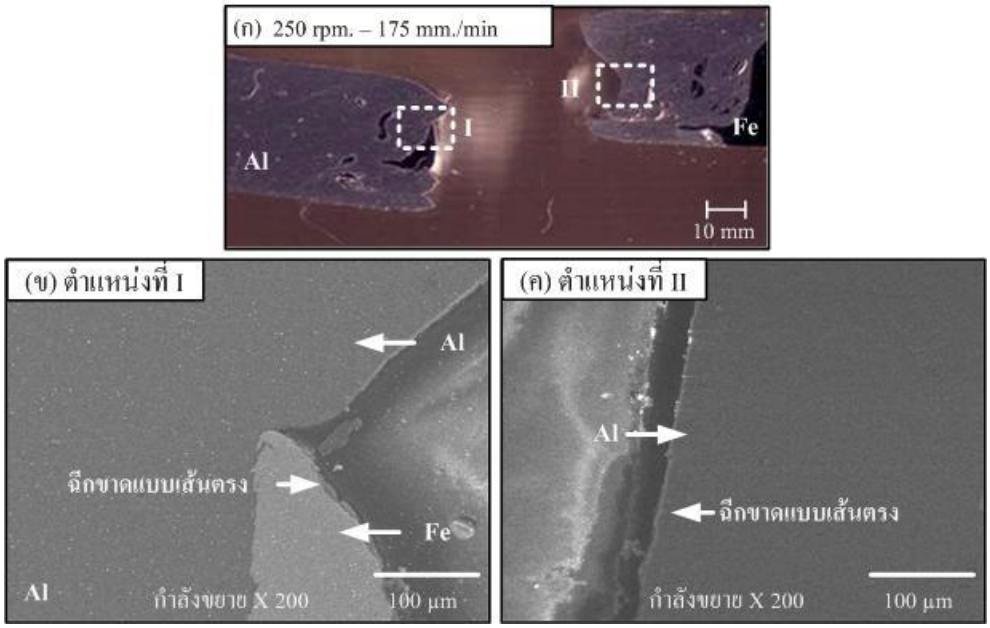
รูปที่ 4.64 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที

รูปที่ 4.63 (ก) แสดงตำแหน่งของรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเกิดการฉีกขาดในตำแหน่งที่ I และ II ดังรูปที่ 4.63 (ข) และ (ค) ตามลำดับ พบว่าการฉีกขาดเกิดขึ้นบริเวณเข้าใกล้อินเทอร์เฟสมาก เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะรอยฉีกขาดด้วยกระบวน SEM ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า จึงทำให้ทราบถึงการฉีกขาดมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ารอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมมีการฉีกขาดวัสดุที่มีความเปราะมีลักษณะของรอยแตกหักที่เป็นเส้นตรงและเหลี่ยมตลอดแนวพังทลาย ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีการแตกหักแบบเปราะ [21] มีความแตกต่างจากลักษณะการฉีกขาดของชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดดังรูปที่ 4.64 (ก) พบว่าที่ตำแหน่งที่ I และ II ตามลำดับ เกิดการพังทลายที่ด้านอะลูมิเนียมและมีความห่างจากอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมมาก การฉีกขาดเกิดขึ้นในลักษณะเป็นส่วนโค้งมน ตรงบริเวณที่เนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมถูกกินเข้ามาอยู่ในเนื้อของอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.64 (ข) และ (ค) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปฝังตัวในเนื้ออะลูมิเนียม จึงทำให้รอยเชื่อมเกิดการพังทลายได้ง่าย รอยฉีกขาดโดยรวมมีลักษณะโค้งมนบริเวณตรงกลางคล้ายรูปถ้วยหรือโคนที่บ่งบอกได้ว่าการฉีกขาดลักษณะนี้เป็นการพังทลายที่เป็นไปตามทฤษฎีการแตกหักแบบเหนียว [22] และมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงเช่นกัน

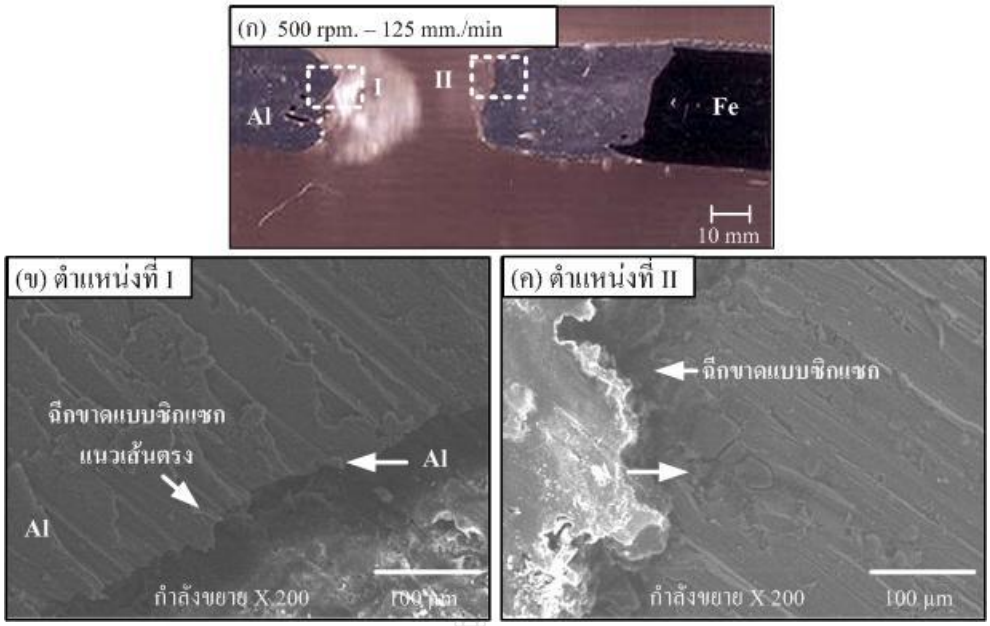


รูปที่ 4.65 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที

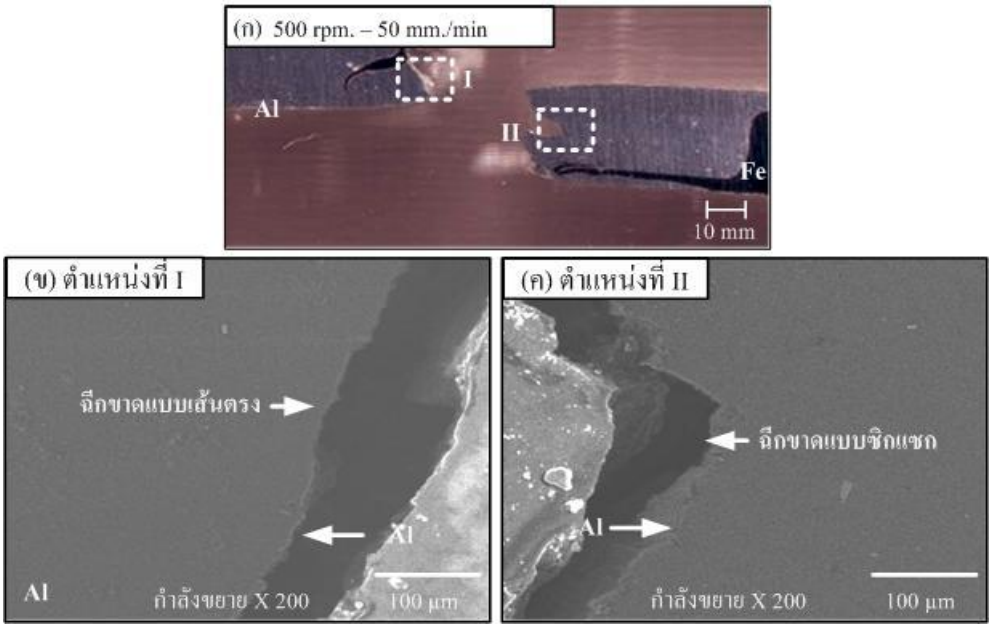
ตามรูปที่ 4.65 (ก) แสดงรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุดมีลักษณะที่ความแตกต่างจากรูปที่ 4.66 (ก) ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เมื่อทำการตรวจสอบรอยฉีกขาดในตำแหน่งที่ I และ II ดังรูปที่ 4.65 (ข) และ (ค) พบว่าเป็นการฉีกขาดของอะลูมิเนียมในทั้งสองฝั่งของรอยขาดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงยาวตลอดทั้งแนว ซึ่งเป็นลักษณะของการพังทลายแบบเปราะ[21] แต่เมื่อทำการวิเคราะห์โดยภาพรวมจากโครงสร้างมหภาค การแตกหักในรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นกรวยคว่ำและปลายมีลักษณะที่ค่อนข้างแหลม แสดงให้เห็นว่ารอยการฉีกขาดของอะลูมิเนียมเกิดการพังทลายแบบเหนียวที่มีความแตกต่างจากลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด ดังรูปที่ 4.66 (ก) เมื่อทำการตรวจสอบรอยการฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบแล้วพบว่ามีลักษณะฉีกขาดที่คล้ายกับรูปที่ 4.64 (ก) พบว่า ที่ตำแหน่ง I รูปที่ 66 ลักษณะน้ำเหมือนกัน ส่วนตำแหน่งที่ II รูปที่ 4.64 (ค) มีลักษณะการฉีกขาดเหมือนรูปที่ 4.65 (ค) ที่ได้อธิบายลักษณะการฉีกขาดไปแล้วข้างต้น จากการวิเคราะห์พบว่าการฉีกขาดมีลักษณะซิกแซกและเป็นรูปถ้วย แสดงให้เห็นว่าการฉีกขาดของรอยเชื่อมหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงมีลักษณะเป็นแบบเหนียวที่น้อยมาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.66 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 175 มม./นาที

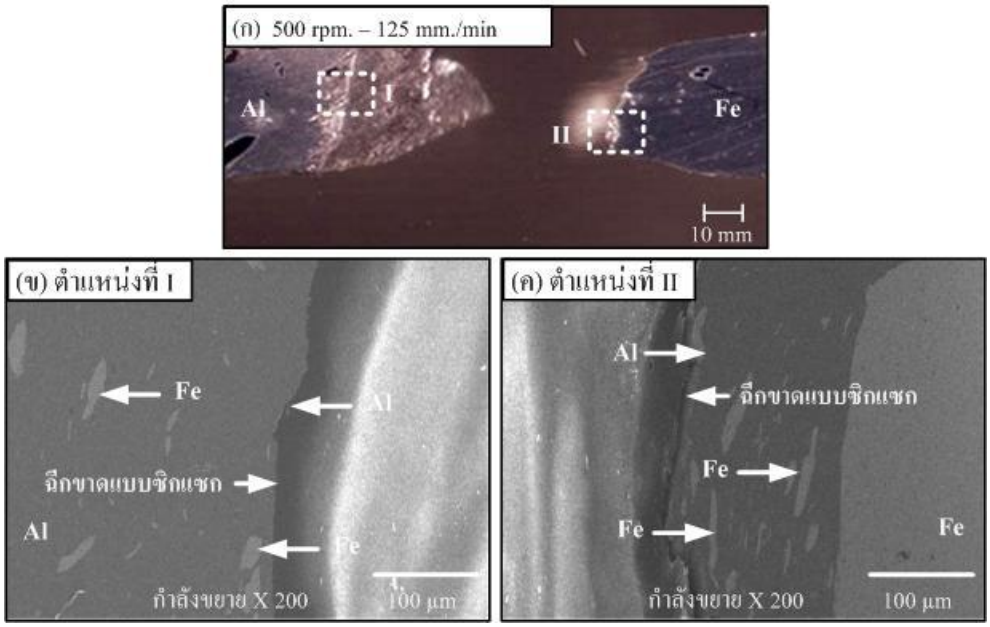


รูปที่ 4.67 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที

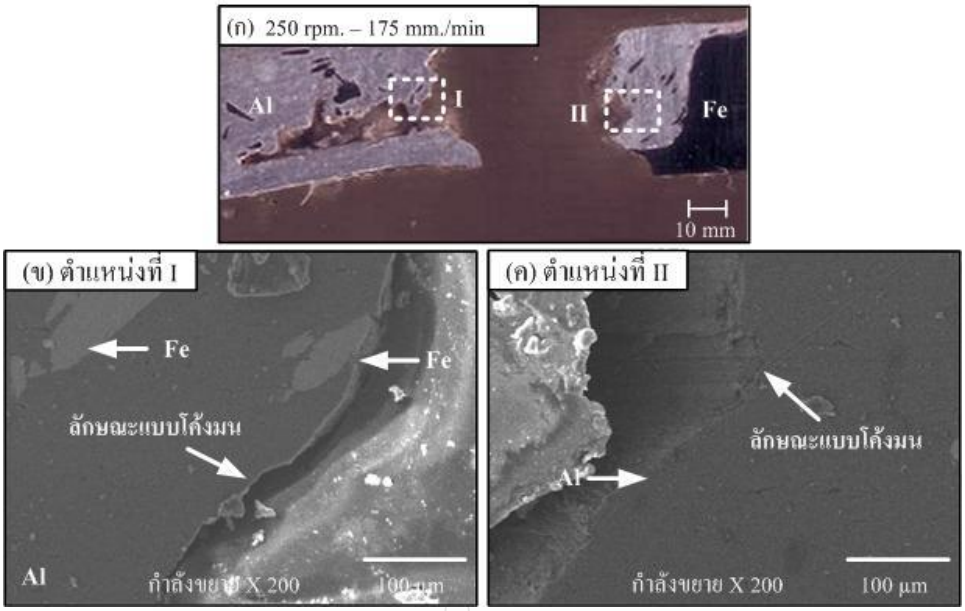


รูปที่ 4.68 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 50 มม./นาที

รอยฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบพบว่าเกิดการฉีกขาดเกิดขึ้นบริเวณอะลูมิเนียมที่ห่างจากอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมมากของทั้งสองรอยฉีกขาดที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และต่ำสุด จากรูปที่ 4.67 (ก) แสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบรอยฉีกขาดของทั้ง 2 ฝั่ง พบว่ารอยพังทลายมีลักษณะเป็นเส้นและเป็นรอยหยักหรือซิกแซกขนาดเล็กตลอดแนวเส้นตรงที่เกิดการแตกหัก ดังรูปที่ 4.67 (ข) และ (ค) ส่วนรอยฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดพบว่าตำแหน่งที่ I และ II มีลักษณะการฉีกขาดที่แตกต่างคือตำแหน่งที่ I ดังรูปที่ 4.68 (ข) เป็นการฉีกขาดหักแบบเส้นตรง ส่วนตำแหน่งที่ II เกิดการฉีกขาดแบบซิกแซกตามรูปที่ 4.68 (ค) จากการวิเคราะห์และพิจารณาการแตกหักของรอยเชื่อมหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงพบว่ารอยการพังทลายของรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุด มีลักษณะโครงสร้างมหภาคที่คล้ายกันคือ มีลักษณะเป็นเส้นตรงเกือบตั้งฉากกับแนวราบผิวรอยแตกหักค่อนข้างเรียบไม่สม่ำเสมอ แสดงให้เห็นถึงรอยการแตกหักมีลักษณะแบบเปราะ ที่มีความเหมือนกันกับรอยการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.69 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 125 มม./นาที



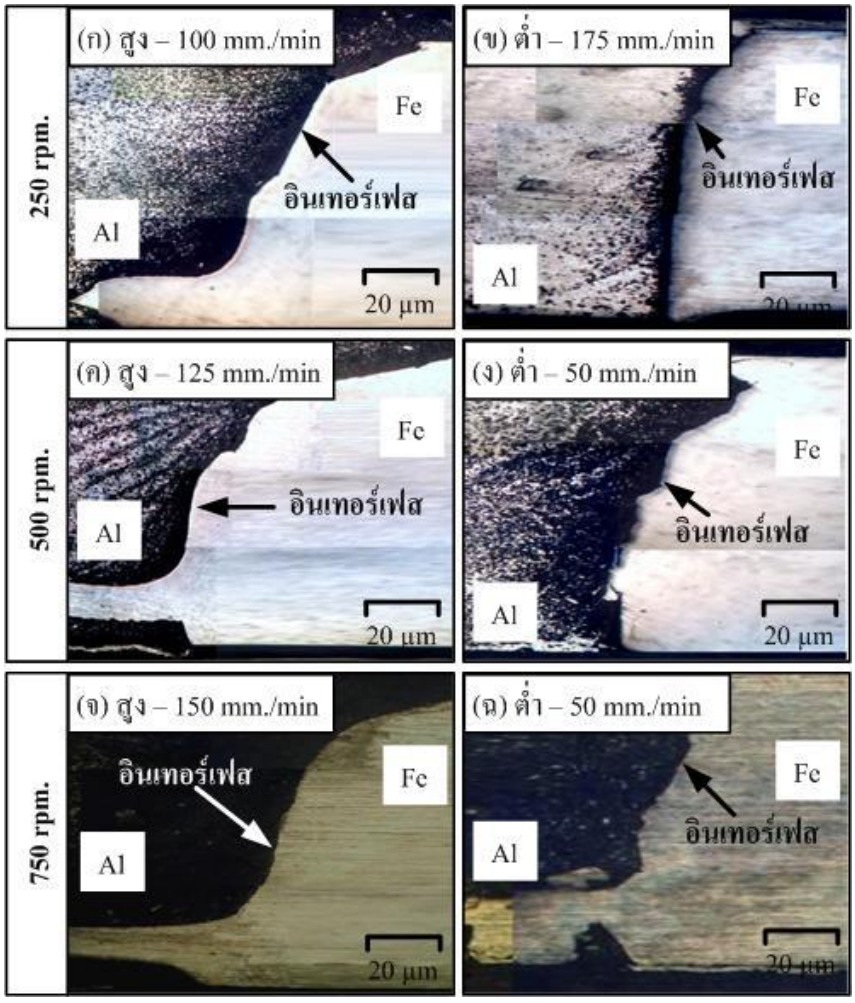
รูปที่ 4.70 ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยฉีกขาดรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 175 มม./นาที

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยฉีกขาดรอยเชื่อมพบว่าลักษณะรอยฉีกขาดที่เกิดจากการดึงจากรูปที่ 4.69 และรูปที่ 4.70 มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่มีลักษณะที่เหมือนกันคือ การฉีกขาดเกิดขึ้นที่บริเวณฝั่งของอะลูมิเนียมและบริเวณรอยฉีกขาดนั้นพบเหล็กกล้าไร้สนิมที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อของอะลูมิเนียมที่แสดงให้เห็นในตำแหน่งที่ I ของทั้ง 2 ชิ้นงานทดสอบ ส่วนที่ขอบของรอยฉีกขาดที่ตำแหน่งที่ I และ II ดังรูปที่ 4.69 (ข) และ (ค) ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะการฉีกขาดที่เป็นเส้นตรง แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยฉีกขาดตามรูปที่ 4.69 (ก) รอยแตกหักมีลักษณะตรงปลายมีรูปทรงที่เรียวเข้าส่วนปลายซิกแซก ซึ่งมีความไม่คล้ายกับการฉีกขาดที่ตำแหน่ง I และ II ของรูปที่ 4.70 (ข) และ(ค) ตามลำดับ รอยแตกหักมีลักษณะโค้งมนเป็นส่วนมาก เมื่อสังเกตจากภาพรวมโครงสร้างมหภาคดังรูปที่ 4.70 (ก) รอยฉีกขาดเป็นแบบซิกแซกที่มีความคล้ายคลึงกันกับการแตกหักชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด แสดงให้เห็นถึงชิ้นงานทดสอบมีการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงแบบเหนียวซึ่งมีการพังทลายที่หลายลักษณะ[22]

จากการวิเคราะห์ลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ทำให้ทราบว่ารอยเชื่อมที่เกิดการพังทลายหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงที่ให้ค่าดีที่สุดและให้ค่าต่ำที่สุด มีลักษณะการฉีกขาดทั้งแบบเปราะและแบบเหนียวในหลายรูปแบบของรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมทุกๆ สภาวะตัวแปรเชื่อมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงทุกๆ ค่า โดยเฉพาะตัวกวนที่มีรูปร่างแตกต่างเป็นสาเหตุที่ทำให้แนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างที่แตกต่างกันดังที่ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของรอยเชื่อมต่อชนที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

4.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม

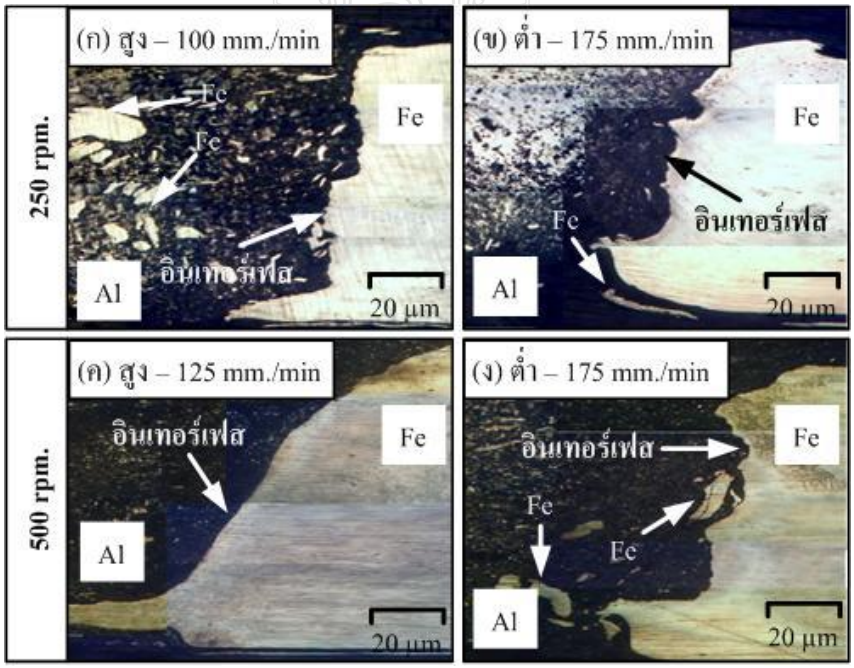
การเชื่อมอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 60603 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ในลักษณะต่อชน ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ตัวแปรเชื่อมต่างๆ และรูปร่างตัวกวนที่แตกต่างกัน เป็นสาเหตุทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงที่มากน้อยต่างกันด้วย ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และต่ำสุด ที่สภาวะความเร็วรอบตัวกวนตามกำหนด ว่ามีลักษณะอินเทอร์เฟสที่เหมือนและต่างกันอย่าง จึงทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงแตกต่างกันมาก อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.71 โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกระบอก
ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด

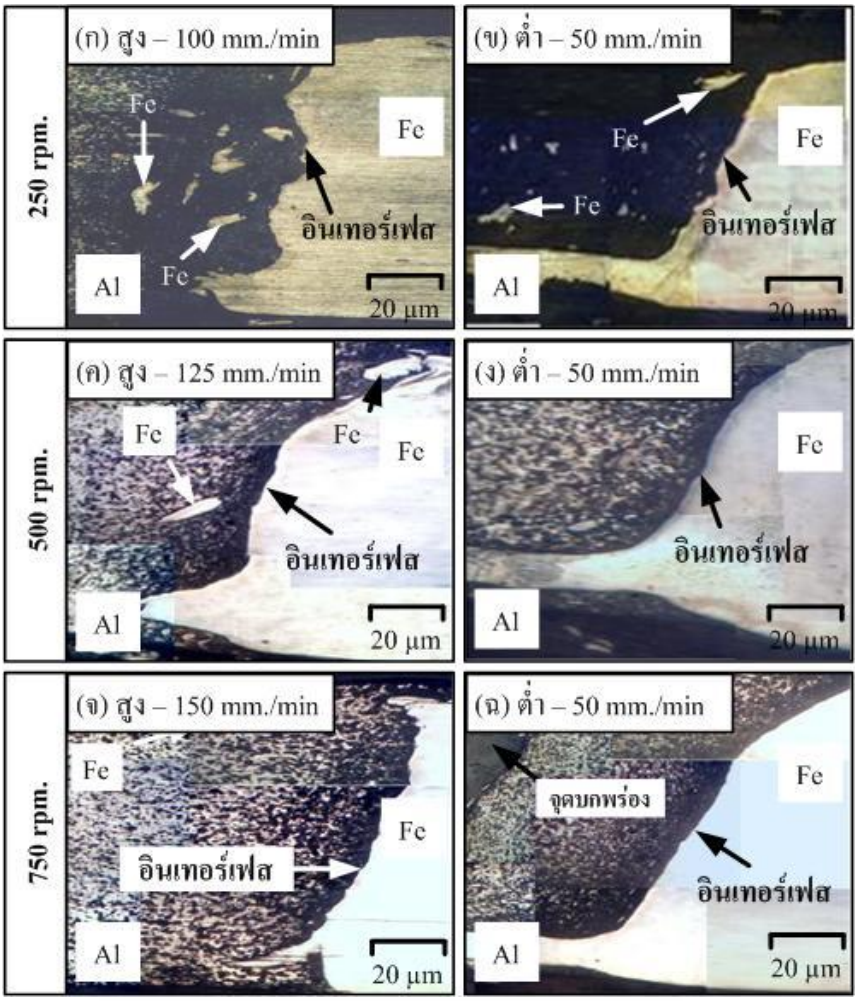
รูปที่ 4.71 แสดงรูป ณ อินเทอร์เฟสที่ความเร็วรอบที่ 250 500 และ750 รอบ/นาที ที่ชิ้นงานเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก จะเห็นถึงการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกเข้าไปในอะลูมิเนียมทุกๆ สภาวะเชื่อม ในลักษณะที่แตกต่างกัน

มาก ดังรูปที่ 4.71 (ค) และ (จ) ตามลำดับ พบเหล็กกล้าไร้สนิมมากที่สุดแต่ในลักษณะที่เป็นกิ่งยาวบาง ในขณะที่รูปที่ 4.71 (ค) มีลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่แผ่ออกเป็นชั้นๆชัดเจน อินเทอร์เฟสที่มีขนาดกว้างออกไปด้านฝั่งของอะลูมิเนียม ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับอินเทอร์เฟส ดังรูปที่ 4.71 (ก) และ (ง) เมื่อเทียบความสัมพันธ์กับกราฟแสดงความแข็งแรงดึงที่มีค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดด้วยความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึง 114.00 MPa ส่วนรูปที่ 4.71 (ข) (ง) และ (ฉ) ตามลำดับ แสดงลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่ให้มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด พบว่าอินเทอร์เฟสมีรูปร่างที่แตกต่างไปจากอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือพบแหล็กกล้าไร้สนิมที่ยื่นเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียมน้อยมากหรือไม่มีเลยเช่นรูปที่ 4.71 (ข) มีลักษณะอินเทอร์เฟสที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีความเรียบตลอดแนว ซึ่งมีความแตกต่างจากรูปที่ 4.71 (ง) และ (ฉ) ที่มีผิวอินเทอร์เฟสไม่เรียบและมีเหล็กกล้าไร้สนิมแทรกเข้าไปในอะลูมิเนียมน้อย ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงที่มีค่าน้อยและลดลงเรื่อยๆ ตามความสมบูรณ์ของอินเทอร์เฟสระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมตามโครงสร้างของรอยต่อวัสดุที่ต่างชนิดกันของการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกด้วยความเร็วตัวกวน 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึง 8.67 MPa



รูปที่ 4.72 โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกระบอกเกลียวที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด

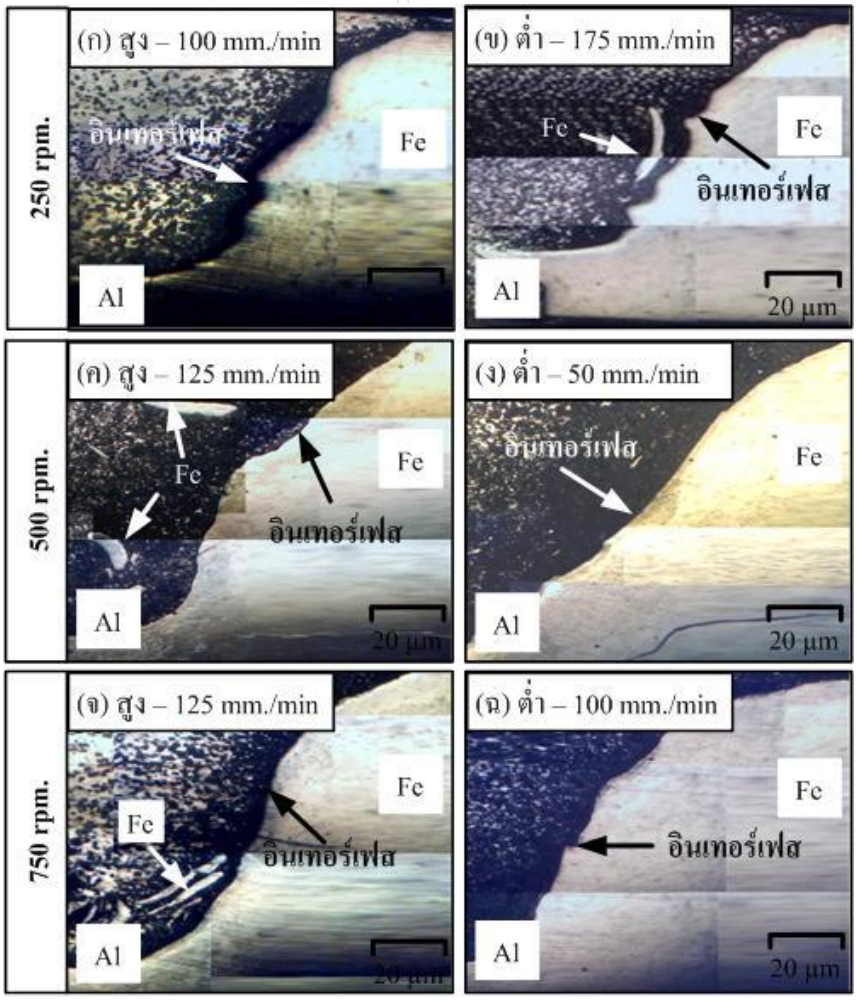
จากรูปที่ 4.72 แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคอินเทอร์เฟสรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว พบว่า ไม่มีรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวน 750 รอบ/นาที เนื่องจาก ไม่สามารถทำการเชื่อมวัสดุทั้งสองชนิดนี้ให้ติดกันได้ หรืออาจเกิดข้อบกพร่องของรอยเชื่อมที่มากที่เป็นสาเหตุทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมไม่เกิดการยึดเกาะติดกันให้แน่นเหมือนชิ้นงานทที่ทำการเชื่อม ดังรูปที่ 4.72 (ก) ถึง (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4.73 โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกรวย ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด

จากกราฟค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดีที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วรอบตัวกวน 250 และ 750 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที ซึ่งมีลักษณะอินเทอร์เฟส ดังแสดงดังรูปที่ 4.73 (ค) พบว่าให้ลักษณะของการเกิดอินเทอร์เฟสระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมในลักษณะที่มีความใกล้เคียงกันกับรูปที่ 4.73 (ข) (ง) และ (ฉ) ที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือพบการแทรกตัวของ

เหล็กกล้าไร้สนิมเข้าในอะลูมิเนียมที่มากและเป็นเส้นยาวที่เป็นเหตุทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างกันของวัสดุทั้งสองชนิด เมื่อมีการตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อมพบว่าเกิดมีข้อบกพร่องหรือแนวเชื่อมเกิดความไม่สมบูรณ์จึงเป็นสาเหตุทำให้การพังทลายจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงและได้ค่าที่น้อยตามไปด้วย ส่วนลักษณะอินเทอร์เฟส รูปที่ 4.73 (ก) (ค) และ (จ) ตามลำดับ พบเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการหลุดเข้าไปผสมกับเนื้ออะลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัด อินเทอร์เฟสฝั่งของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้รับผลกระทบจากตัวกวนมีลักษณะขรุขระไม่สม่ำเสมอ การแทรกตัวระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมเข้ากันได้ในลักษณะซิกแซก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการจับยึดกันของเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเมียมได้อย่างแน่นหนา จึงทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่มากที่มีความสอดคล้องกับผิวหน้าแนวเชื่อมและค่าความแข็งแรงดึงดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



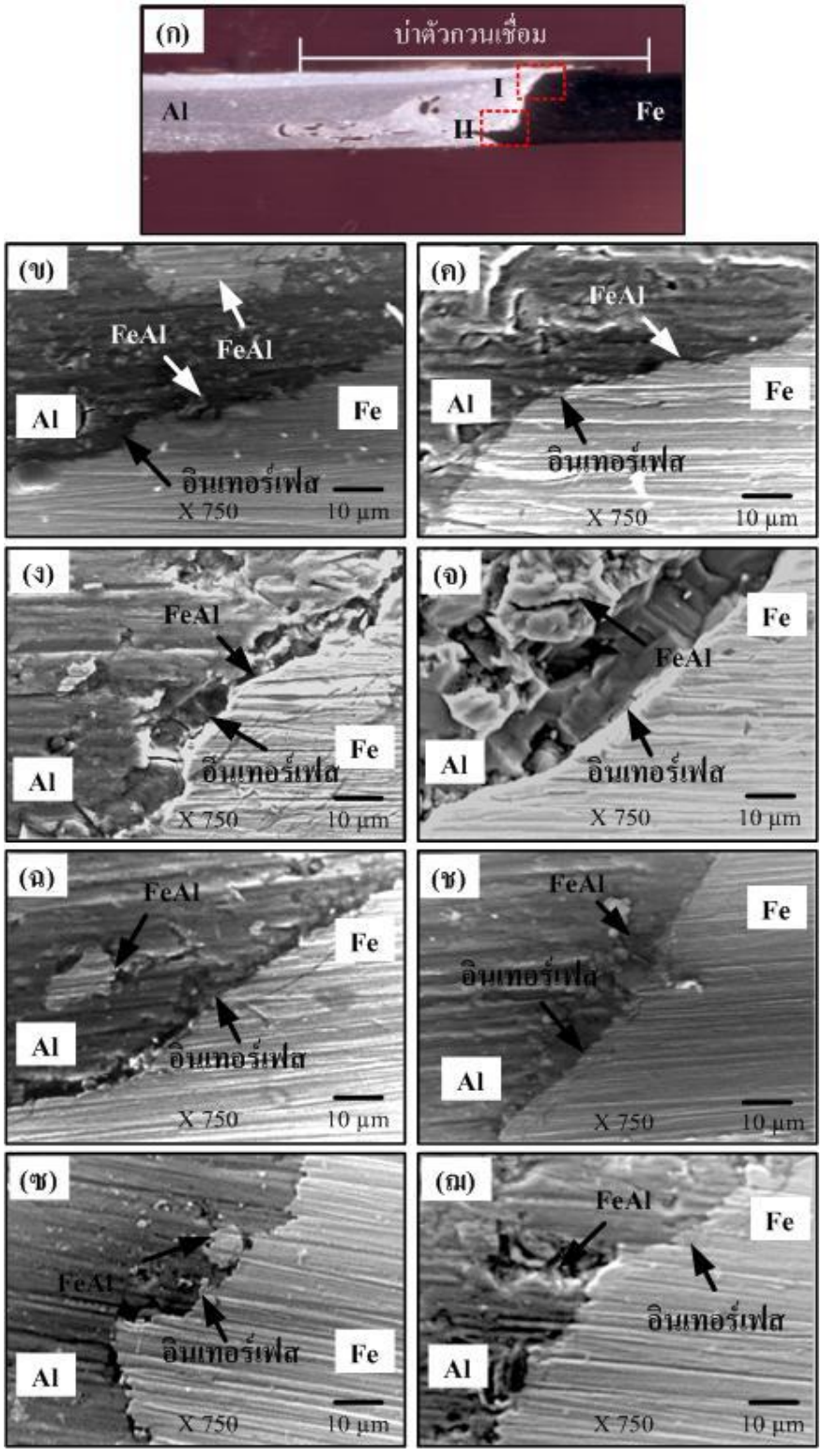
รูปที่ 4 .74 โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยชื่อมตัวตัวกวนทรงกรวยเกลียวที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด - ต่ำสุด

ที่ความเร็วรอบที่ 250 500 และ750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.74 (ก) (ค) และ (จ) ตามลำดับ จะเห็นถึงลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสเหมือนกันมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับกราฟค่าความแข็งแรงดึงข้างต้น ที่ความเร็วดินแนวเชื่อม 100 125 และ 125 มม./นาที ตามลำดับ ความเร็วรอบตัวกวน เมื่อมองถึงลักษณะการอินเทอร์เฟสกันของวัสดุทั้งสองชนิดแล้ว จะพบว่าลักษณะการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในอะลูมิเนียมได้อย่างชักเจนมากที่สุดคือ พบเหล็กกล้าไร้สนิมยื่นเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมที่มากและเป็นเส้นยาวในส่วนล่างรอยเชื่อม ซึ่งการแทรกตัวในลักษณะนี้ส่งผลให้รอยเชื่อมที่ได้มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเช่นกัน อีกทั้งยังพบขนาดที่กว้างของอินเทอร์เฟส อีกทั้งความเรียบของแนวอินเทอร์เฟสไม่สม่ำเสมอและพบเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมหลุดเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมที่เกิดจากการดันของตัวกวนโดยตรง ที่เป็นตวกการทำเกิดจับยึดกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงที่มากสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งมีความแตกต่างไปจากลักษณะของอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำไม่มากนัก ดังรูปที่ 4.74 (ข) (ง) และ (ฉ) ตามลำดับ ลักษณะอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมมีความคล้ายกันมาก แต่พบเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าไปในอะลูมิเนียมด้านล่างในปริมาณที่น้อยหรือไม่พบเลย แต่ไม่ใช่ประเด็นที่สำคัญที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงที่มากหรือน้อย จากการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของรอยเชื่อมและลักษณะการฉีกขาดแล้ว พบว่ามีความสอดคล้องกันที่เป็นตัวบ่งบอกได้ว่ารอยเชื่อมเกิดความไม่แข็งแรงจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง

จากการทำการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยสภาวะที่แตกต่างกันของตัวแปรเชื่อม พบว่าลักษณะของอินเทอร์มีความเหมือนและมีความแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรที่ทำการเชื่อมที่ส่งผลโดยตรงต่ออินเทอร์เฟส เป็นสาเหตุที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงมีค่ามากและน้อยไม่เท่ากัน ซึ่งมีความสัมพันธ์และมีความสอดคล้องกันตามผลการวิเคราะห์ลักษณะที่เกิดขึ้นบนรอยต่อชนของอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งมีผลการทดสอบที่เหมือนกับงานวิจัยของ Kittipong K. [20]

4.7 วิเคราะห์การกระจายตัวอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทดสอบของรอยเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในการทดลองนี้ถูกนำมาทำการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM) และทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวอิเล็กตรอน (Electron Dispersive Spectrometry : EDS)ได้ผลการตรวจสอบดังนี้



รูปที่ 4.75 โครงสร้างอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่แสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ตัวกวนรูปทรงต่างๆ: (ข)(ค) ทรงกระบอก 500 รอบ/นาที (ง)(จ) ทรงกระบอกเกลียว 500 รอบ/นาที -125 มม./นาที (ฉ)(ช) ทรงกรวย 500 รอบ/นาที และ (ซ)(ฌ) ทรงกรวยเกลียว 500 รอบ/นาที-125 มม./นาที

รูปที่ 4.71 (ก) แสดงโครงสร้างของรอยเชื่อมที่ทำการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่ I และตำแหน่งที่ II เป็นบริเวณที่ชิ้นงานทดสอบได้รับผลกระทบจากตัวกวนมากที่สุด บริเวณตำแหน่งที่ I เป็นจุดที่ชิ้นงานสัมผัสกับส่วนของบ่าตัวกวน ส่วนตำแหน่งที่ II เป็นส่วนล่างของแนวรอยเชื่อมที่มีส่วนปลายตัวกวนกินลึกเข้าไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อพิจารณาโครงสร้างโดยภาพรวมไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ในแนวเชื่อม และมีส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิม เล็กน้อยที่ยื่นเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียมดังรูปที่ 4.75 (ข) (ฉ) และ (ซ) ตามลำดับ นั่นแสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ถูกตัวกวนดันให้ผิวข้างและผิวหน้าหลุดเข้าไปผสมในส่วนของอะลูมิเนียม ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงบริเวณตำแหน่งที่ I ของชิ้นงานทดสอบทุกๆ ตัวกวน อินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมมีลักษณะที่สมบูรณ์ทั้งฝั่งอะลูมิเนียมและฝั่งของเหล็กกล้าไร้สนิม อินเทอร์เฟสมีความแนบสนิทกันตลอดแนวการตรวจสอบอินเทอร์เฟสฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเป็นรอยหยัก ผิวขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ พบการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมระหว่างอินเทอร์เฟสทั้งสองวัสดุทดสอบแสดงให้ถึงการจับยึดกันระหว่างอินเทอร์เฟสของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างเห็นได้ชัดที่มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดตัวกวน ซึ่งมีความแตกต่างไป จากรูปที่ 4.75 (ง) แสดงให้เห็นถึงอินเทอร์เฟสบริเวณรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุดแต่เป็นค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงจากทุกๆ รูปทรงตัวกวนที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด พบว่าบริเวณอินเทอร์เฟสมีจุดบกพร่องเล็กน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.75 (ข)(ฉ) และ (ซ) ตามลำดับดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อินเทอร์เฟสระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมมีความไม่สมบูรณ์ที่มีลักษณะคล้ายกับผิวรอยการแตกหัก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ หลังทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่บริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมพบชั้นเฟสที่เกิดการต่อตัวขึ้นบนรอยเชื่อม จึงทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การการกระจายอิเล็กตรอน (Electron Dispersive Spectrometry : EDS) ที่ตำแหน่งที่ I และตำแหน่งที่ II ดังรูปที่ 4.75 พบว่า ส่วนผสมทางเคมีบริเวณระหว่างอินเทอร์เฟสมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1

รูปที่ 4.75 (ข) (ง) (ช) และ (ฌ) ตามลำดับเป็นลักษณะของอินเทอร์เฟสชิ้นงานเชื่อมในตำแหน่งที่ II ของรอยเชื่อมพบว่ามีลักษณะคล้ายกับตำแหน่งที่ I ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น แนวอินเทอร์เฟสมีลักษณะเป็นเส้นที่ความชันน้อยกว่าตำแหน่งที่ I ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ด้านบนของแนวเชื่อม สังเกตได้ว่าระหว่างอินเทอร์เฟสของวัสดุทั้งสองชนิดเกิดรอยแบ่งแยกอย่างเห็นได้ชัดดูเหมือนว่าอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการจับยึดกันที่ไม่แนบสนิทเช่นเดียวกันกับตำแหน่งที่ I แต่ยังมีความแข็งแรงมากพอที่จะทนแรงดึงได้เท่าตลอดแนวอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของอินเทอร์เฟสบนรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแต่ละชนิดของตัวกวน

ชนิดตัวกวน ที่ใช้ในการเชื่อม	ตำแหน่ง ตรวจสอบ	ปริมาณธาตุ (%โดยอะตอม)					
		Fe	Al	Cr	Mg	Si	O
ตัวกวนทรงกระบอก	I	38.04	55.01	4.32	0.63	0.48	1.52
	II	48.52	43.06	5.71	0.46	1.36	0.89
ตัวกวนทรงกระบอกเกลียว	I	38.5	50.62	6.63	1.25	0.91	2.09
	II	30.81	56.17	7.41	0.95	0.79	3.87
ตัวกวนทรงกรวย	I	47.6	41.55	8.01	0.58	1.14	1.12
	II	50.09	43.08	3.73	0.31	0.43	2.36
ตัวกวนทรงกรวยเกลียว	I	33.5	57.41	4.62	0.87	1.55	2.05
	II	50.56	43.29	3.07	0.42	0.87	1.79

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่ได้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุดของแต่ละชนิดตัวกวน พบว่าตำแหน่งที่ I และตำแหน่งที่ II มีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน บริเวณอินเทอร์เฟสพบสารประกอบกึ่งโลหะ FeAl ซึ่งมีผลการทดสอบที่เหมือนกับงานวิจัยของ Kittipong K. [20] นั่นแสดงว่า อินเทอร์เฟสได้เกิดสารประกอบตัวใหม่ขึ้นนั้นFeAl ที่เป็นเหตุทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะการฉีกขาดพบว่า การฉีกขาดส่วนมากเกิดขึ้นในส่วนของอะลูมิเนียมเกือบทุกๆ ชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึงดังนั้นปริมาณ Fe ที่มีค่ามากบริเวณอินเทอร์เฟสฝั่งอะลูมิเนียมเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าเกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียมโดยการทดสอบด้วยเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง

จากผลการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลได้แก่ ผิวหน้ารอยเชื่อม การหาความแข็งแรงดึง วิเคราะห์ลักษณะรอยฉีกขาด การศึกษาโครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟส การศึกษาทั้งหมดนี้ล้วนมีความเกี่ยวข้องและเชื่อมโยงกันทั้งสิ้น ซึ่งสิ่งสำคัญตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมล้วนแต่มีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาปัจจัยและตัวแปรดังกล่าวเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมนี้เพื่อจะได้นำไปเป็นฐานข้อมูลพัฒนากระบวนการและนำไปใช้ในอนาคตต่อไป

บทที่5
สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนของรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430โดยใช้ตัวกวนที่มีรูปทรงต่างๆ ได้แก่ ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกรวยเกลียว ตัวกวนรูปทรงกระบอก และตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติของรอยต่อชน และเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากที่สุด โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการสรุปผลการทดลองในบทนี้จะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้คือ สรุปในส่วนของค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยเชื่อมและตัวกวนที่มีรูป

5.1.1 ค่าความแข็งแรงที่เกิดจากการทดสอบแรงดึงสามารถสรุปผลของความแข็งแรงที่ได้จากการดึง ดังนี้

1) ตัวกวนรูปทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึงสูงสุดคือ 114.00 MPa ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 125 มม./นาที

2) ตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวมีค่าความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึงสูงสุดคือ 107.33 MPa ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินของแนวเชื่อมที่ 125 มม./นาที

3) ตัวกวนรูปทรงกรวยมีค่าความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึงสูงสุดคือ 123.33 MPa ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินของแนวเชื่อมที่ 125 มม./นาที

4) ตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวมีค่าความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึงสูงสุดคือ 126.33 MPa ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินของแนวเชื่อมที่ 125 มม./นาที

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงสูงสุดคือ 126.33 MPa ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินของแนวเชื่อมที่ 125 มม./นาที โดยการเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว

5.1.2 จากค่าความแข็งแรงสูงสุดดังกล่าวใน 5.1.1ข้อ4) ข้างต้นเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่าโครงสร้างที่ปรากฏเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมแทรกตัวเข้าไปในอะลูมิเนียม ลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียม จะสังเกตเห็นการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่อะลูมิเนียมได้ชัดเจน และมีปริมาณที่มากเมื่อเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆส่งผลให้เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบค่าแรงดึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในขณะที่โครงสร้าง

ของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดลักษณะของโครงสร้างการอินเทอร์เฟสของเนื้อวัสดุพบว่าเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมมีการแทรกตัวเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียมปริมาณที่น้อยมากจนแทบที่จะไม่สามารถมองเห็นได้ จึงเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด

5.1.3 การเกิดอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยสภาวะที่แตกต่างกันของตัวแปรเชื่อม พบว่าลักษณะของอินเทอร์มีความเหมือนและมีความแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรที่ทำการเชื่อมที่ส่งผลโดยตรงต่ออินเทอร์เฟส เนื่องจากอินเทอร์เฟสที่มีลักษณะเป็นเส้นซิกแซกและเกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในอะลูมิเมียมในปริมาณที่มาก เป็นสาเหตุที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงมากคล้อยตามด้วย

5.1.4 พบสารประกอบกึ่งโลหะ FeAl บริเวณอินเทอร์เฟสของรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม จากการตรวจสอบด้วยกระบวนการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นสารประกอบที่ก่อตัวขึ้นใหม่และเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในการทำวิจัยในครั้งนี้พบว่ากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 สามารถที่จะประยุกต์การเชื่อม ไปใช้ทำการทดลองและปรับปรุงในส่วนต่างๆ ได้อีก เพื่อนำผลที่ใช้ได้ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ที่มีความสำคัญต่อการทำงานในระบบงานทางด้านวิศวกรรมหรือส่วนอื่นที่มีความเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างประเด็นหัวข้อในการศึกษาดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาการเชื่อมวัสดุมีความหนาที่แตกต่างกันมากกว่านี้ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านการทดสอบมาแล้ว

5.2.2 การออกแบบที่จับยึดชิ้นงานในการเชื่อมให้มีความแข็งแรง และสามารถจับยึดชิ้นงานในมีความแน่นหนามากขึ้น

5.2.3 การศึกษาในส่วนของรูปทรงของตัวกวนที่มีความหลากหลายมากกว่าการทดลองในครั้งนี้ เช่น ตัวกวนรูปทรงกลม ตัวกวนรูปทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น

5.2.3 ศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากการทดสอบการกัดกร่อนที่สภาวะต่างๆ

5.2.3 ศึกษาลักษณะการต่อของรอยเชื่อม เช่น ต่อรูปตัวที ต่อชนทำมุมตั้งฉากและอื่นๆ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Branes, T.A. and Pashyby, I.R. 2000. Joining Techniques for Aluminum Spaceframes used in Automobiles Prat I-Solid and Liquidd Phase Welding. J. of Materials Processing Technology. 99:62-71

[2] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ , อนินต์ มีมนต์ , และบุญส่ง จงกลนี. การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430.

[3] Brandon, D.and Kaplan, W.D. 1997. Joining Processes, An introduction.New York. John Wiley & Sons.

[4] Kimapong, K.and Watanabe, T. 2005. Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding.Materials Transaction 46-4: 835-841.

[5] K. Kimapong and T. Watanbe. “Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel” Welding Journal 84-10 (2004) 277s-282s

[6] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย , 2541 . เหล็กกล้าไร้สนิม [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://www.cigweld.com.au/pages/images/techinfo/consumtech/st_steel.pdf (2 กุมภาพันธ์ 2551).

[7] Stainless steel 430 (ออนไลน์), 2551. เข้าถึงได้จาก : www.430 stainless steel Material property data sheet.com (29 ตุลาคม 2551).

[8] งานอลูมิเนียม (ออนไลน์) , 2550. เข้าถึงได้จาก : http://www.aluminiumlearning.com (31 สิงหาคม 2551).

[9] Engineering Materials : Nonferrous metal (ออนไลน์), 2551. เข้าถึงได้จาก : www.course.eau.ac.th (29 ตุลาคม 2551).

[10] โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (ออนไลน์), 2551. เข้าถึงได้จาก : http://www.gprecision.net/metallurgy-Nonferrous-Metals.html. (18 ตุลาคม 2551).

[11] เอ็มแอนด์อี, คู่มือการเลือกใช้วัสดุ (Material Selecting Quick Reference). กรุงเทพฯ:บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด, 2533. หน้า 102-108.

[12] ปราโมทย์ พูนนายม , ปรกช สิริสุวัณณ์ , ศักดิ์ชัย จันทศรี , และกิตติพงษ์ กิมะพงษ์. การปรับปรุงคุณภาพรอยเชื่อมการเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ในโครงการรถยนตร์ด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ.

[13] M.P. Groover “Fundamentals of Modren Manufacturing, Material, Processes and Systems” (2007) John Wiky &Sons, Inc.,USA, 112-113.

[14] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์. “การเชื่อมฟริกชั่นสเตอร์อลูมิเนียมผสมเกรด A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 18-2 (2550)

[15] ขวัญชัย อยู่สะอาด และ ชวลิต นุชวงษ์. 2551 .อิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 T-1. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[16] จุฑามาส สุทธินนท์, จณัสญา แก้วประสิทธิ์, และอนุชา สวนสมนึก. 2553. “การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของรอยต่อเกยอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนหลายรูปแบบ”. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[17] Lin C.B., Mu C,K., Wu W.W., Hung C.H., The effect of joint design and volume fraction on friction welding properties of A360/SiC (p) composites. Welding Research Supplement. 1999;100-108

[18] Niels H. Harrit, Jeffrey Farrer. Chemical Physics Journal. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://therearenosunglasses.wordpress.com/2009/04/06/. (วันที่ค้นข้อมูล : 7 ธันวาคม 2553).

[19] Niels H. Harrit, Jeffrey Farrer. Chemical Physics Journal. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.psrd.hawaii.edu/June04/silicatesMeteorites.html (วันที่ค้นข้อมูล : 25 มกราคม 2554).

[20] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ประจักษ์ อ่างบุญตา, และบุญส่ง จงกลณี. “โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยเชื่อมวัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่” รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 2552.

[21] สยาม แก้วคำไสย [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/05/brittle-fracture.html (วันที่ค้นข้อมูล : 10 เมษายน 2554).

[22] สยาม แก้วคำไสย [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010_05_01_archive.html (วันที่ค้นข้อมูล : 12 เมษายน 2554).

ภาคผนวก ก

ภาพโครงสร้างจุลภาค มหาภาคของรอยเชื่อม

เครื่องมือกลและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

กราฟแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน

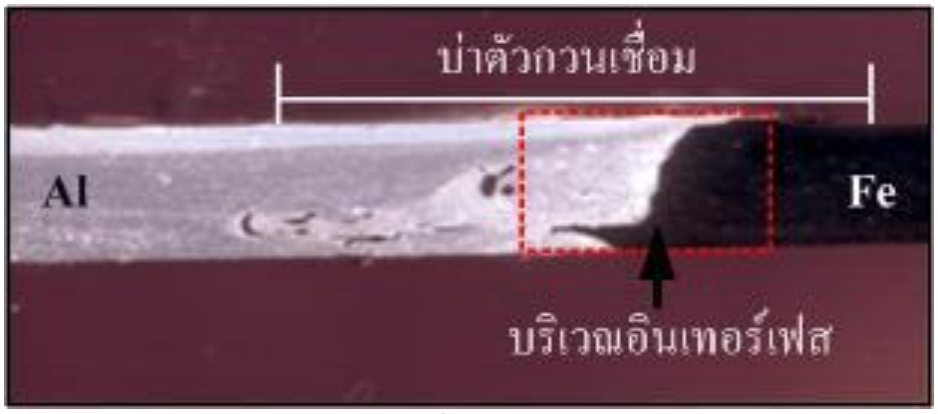
การกำหนดเทมเปอร์สำหรับอะลูมินัมผสม

ตารางแปลงหน่วย

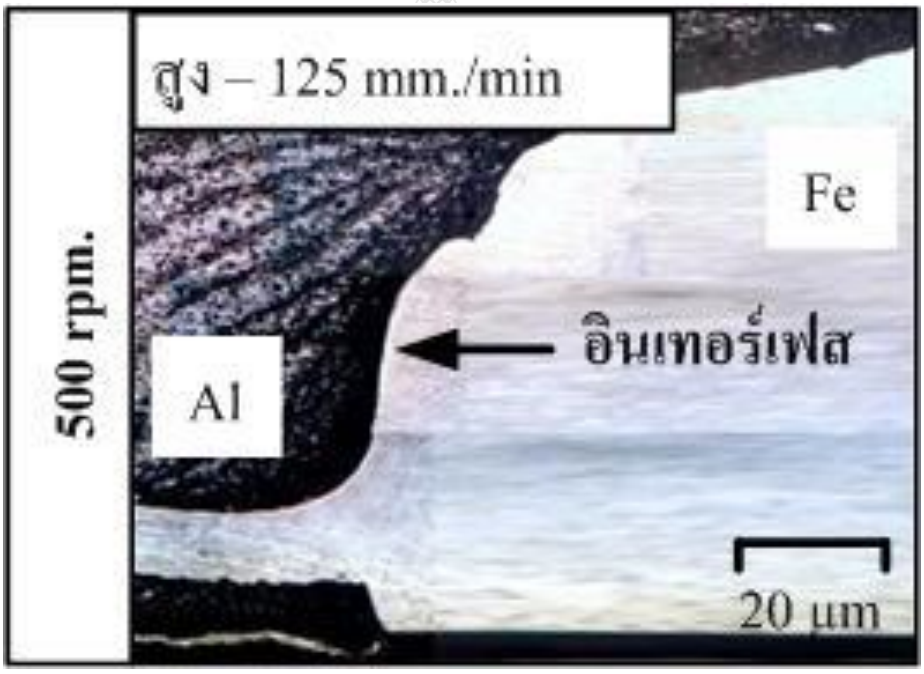
มาตรฐานทดสอบความแข็งแบบ Vickers hardness test

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

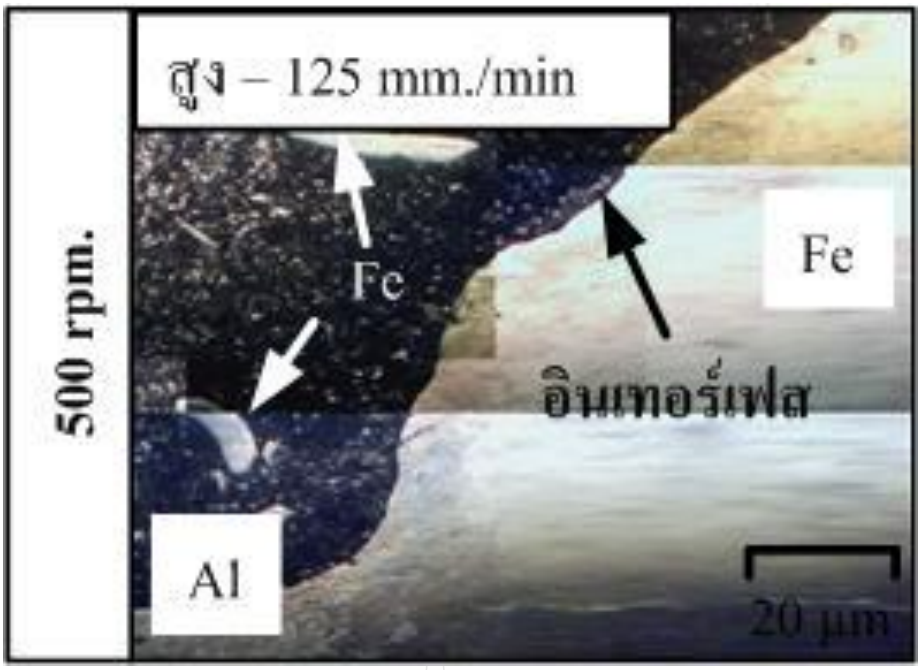
ภาพโครงสร้างจุลภาค มหาภาคของรอยเชื่อม



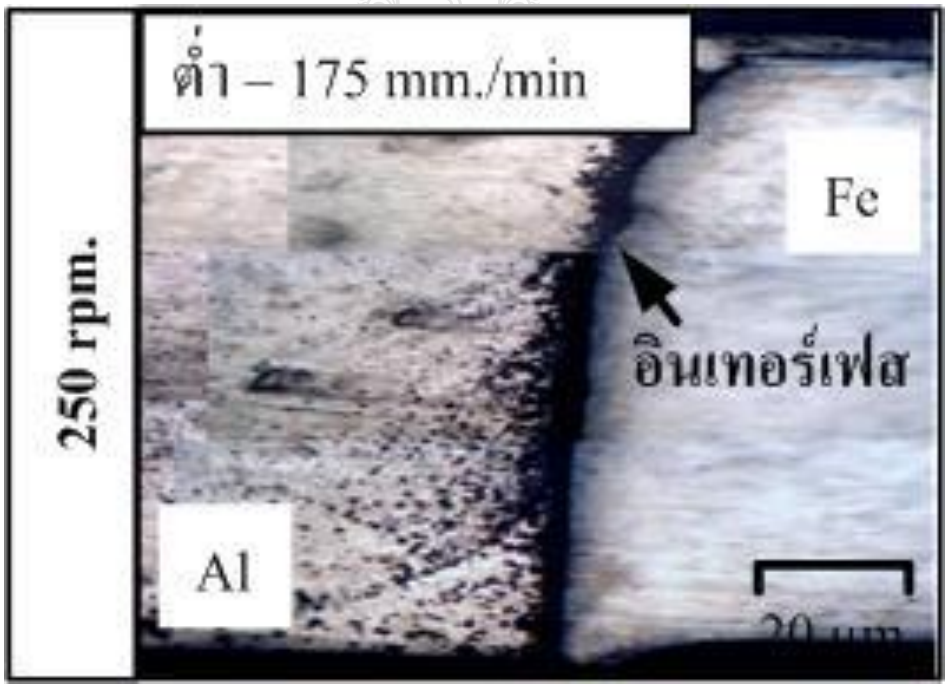
รูปที่ 1 ก. โครงสร้างมหาภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม



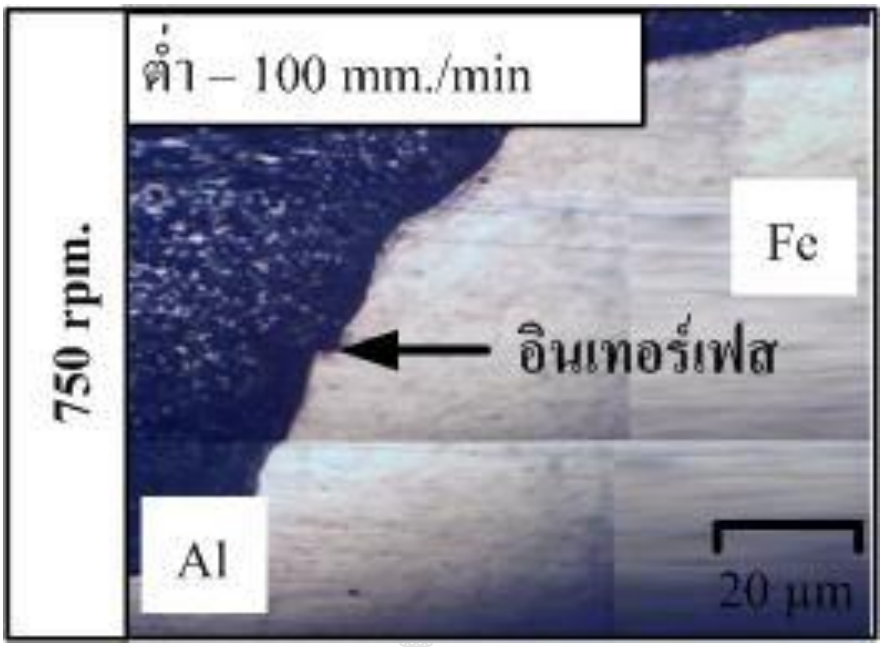
รูปที่ 2 ก. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก



รูปที่ 3 ก. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว



รูปที่ 4 ก. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก



รูปที่ 5 ก. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว

เครื่องมือกลและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 6 ก. เครื่องกัดอัตโนมัติแนวดิ่งที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปที่ 7 ก. เครื่องตัดชิ้นงานที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปที่ 8 ก. เครื่องทดสอบแรงดึงที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

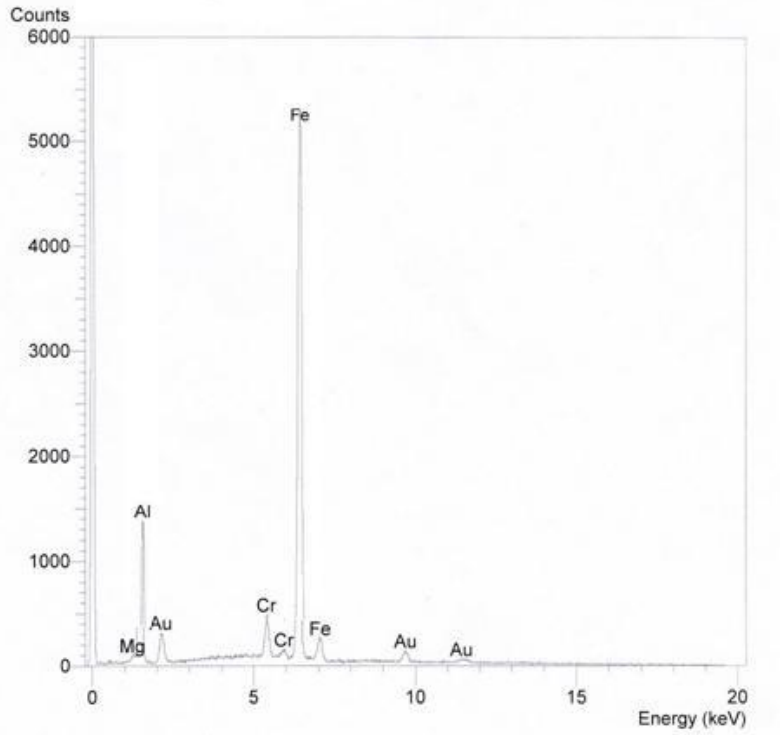
รูปที่ 9 ก. เครื่องขัดผิวชิ้นงานทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปที่ 10 ก. กล้องส่องดูโครงสร้างจุลภาคที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

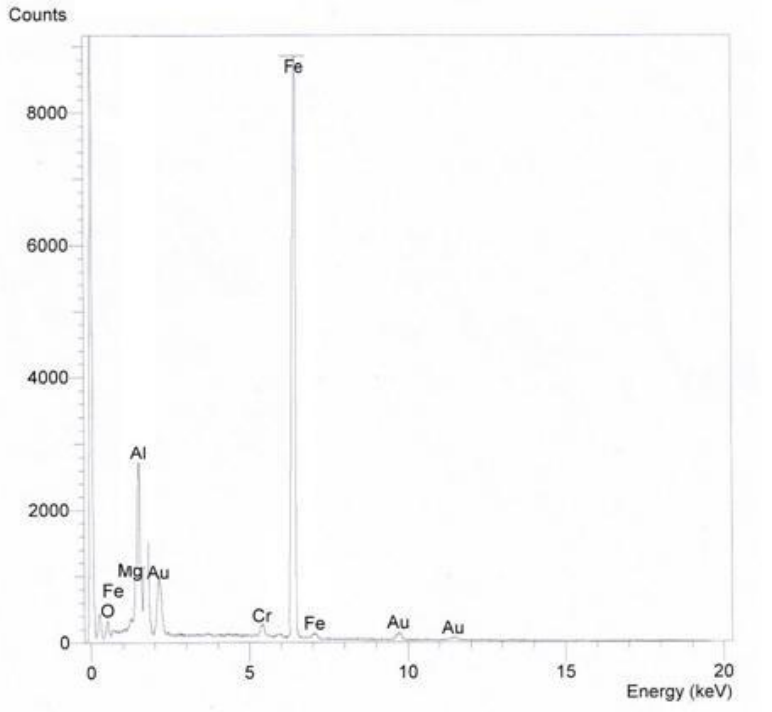
รูปที่ 11 ก. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่สถาบันวิจัยและวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย

รูปที่ 12 ก. เครื่องทดสอบความแข็งที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

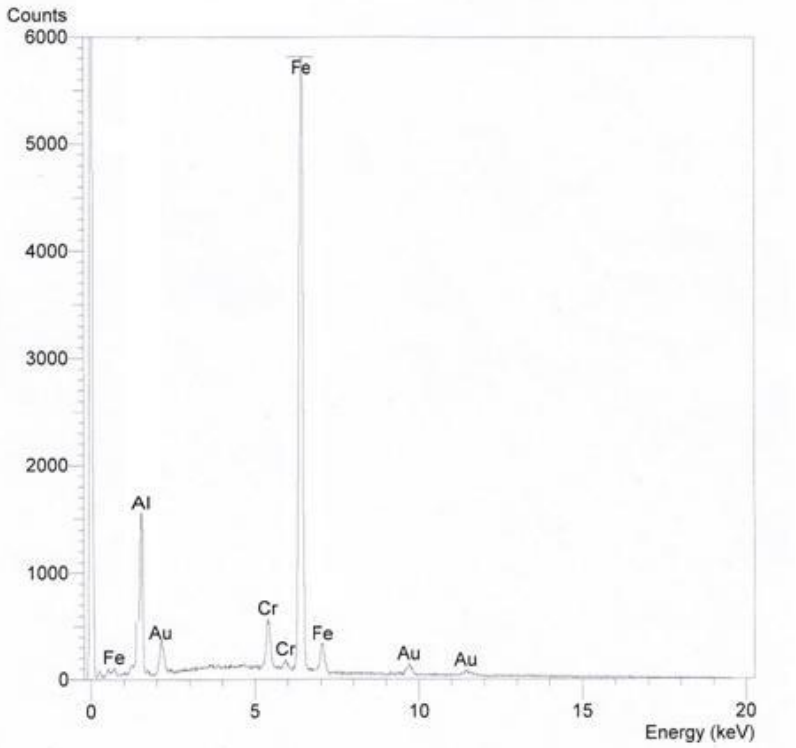
กราฟแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน



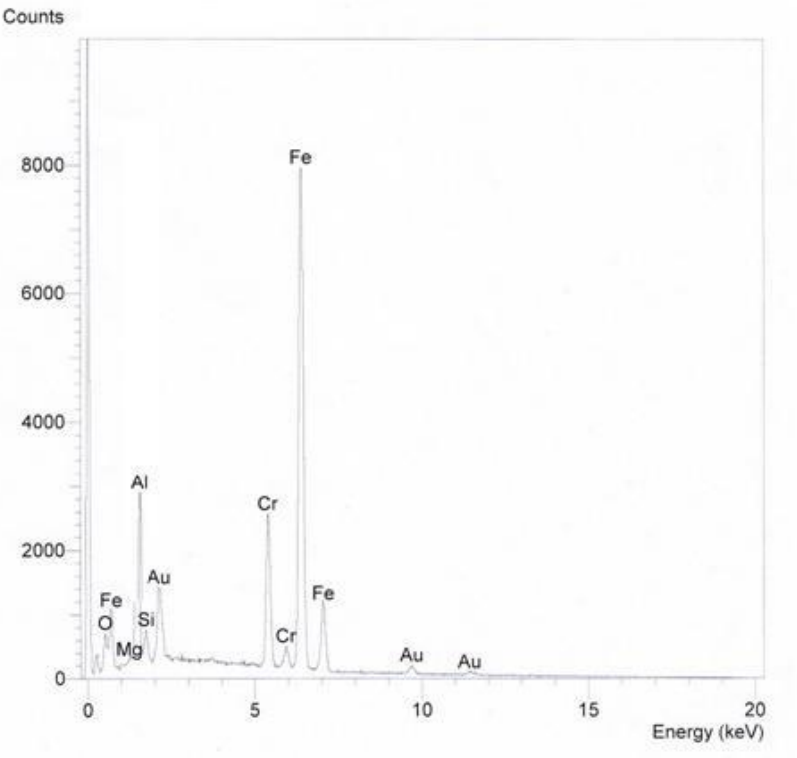
รูปที่ 13 ก. การกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก



รูปที่ 14ก. การกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว



รูปที่ 15 ก. การกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย



รูปที่ 16 ก. การกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว

การกำหนดเทมเปอร์สำหรับอะลูมินัมผสม

F — As fabricated. Applies to the products of shaping processes in which no special control over thermal conditions or strain-hardening is employed.
H — Strain-hardened (wrought products only). Applies to products which have their strength increased by strain-hardening, with or without supplementary thermal treatments of produce some reduction in strength.
H1 — Strain-hardened only. Applies to products which are strain-hardened to obtain the desired strength without supplementary thermal treatments. The number following this designation indicates the degree of strain-hardening.
H2 — Strain-hardened and partially annealed. Applies to products which are strain-hardened more than the desired final amount, and then reduced in strength to the desired level by partial annealing. For alloys that age-soften at room temperature, the H2 tempers have the same minimum tensile strength as the corresponding H3 tempers. For other alloys, the H2 tempers have the same minimum tensile strength as the corresponding H1 tempers and slightly higher elongation. The number following this designation indicates the degree of strain-hardening remaining after the product has been partially annealed.
H3 — Strain-hardened and stabilized. Applies to products which are strain-hardened and whose mechanical properties are stabilized by a low temperature thermal treatment which results in slightly lowered tensile strength and improved ductility. This designation is applicable only to those alloys which, unless stabilized, gradually age-soften at room temperature. The number following this designation indicates the degree of strain-hardening before the stabilization treatment.
O — Annealed (wrought products only). Applies to wrought products fully annealed to obtain the lowest strength.
T — Thermally treated to produce stable tempers other than F, Q, or H. Applies to products which are thermally treated, with or without supplementary strain-hardening, to produce stable tempers.
T1 — Cooled from an elevated temperature shaping process, and naturally aged to a substantially stable condition. Applies to products for which the rate of cooling from an elevated temperature shaping process, such as casting or extrusion, is such the their strength is increased by room temperature aging.
T1 — Annealed (cast products only). Applies to cast products which are annealed to improve ductility and dimensional stability.
T3 — Solution heat treated and then cold worked. Applies to products which are cold worked to improve strength, or in which the effect of cold work is recognized in machanical property limits.
T4 — Solution heat treated and naturally aged to a substantially stable condition. Applies to products which are not cold worked after solution heat treatment, or in which the effect of cold work may not be recognized in machanical property limits.
T5 — Cooled from an elevated temperature shaping process and then artificailly aged. Applies to products which are colled from an elevated temperature shaping process, such as casting or extrusion, and then artificially aged to improve mechanical properties or dimensional stability or both.
T6 — Solution heat treated and then artificially aged. Applies to products which are not cold worked after solution heat treatment, or in which the effect of cold work may not be recognized in mechanical property limits.
T7 — Solution heat treated and then stabilized. Applies to products which are stabilized to carry them beyond the point of maximum strength to provide control of some special characteristics.
T8 — Solution heat treated, cold worked, and then artificially aged. Applies to products which are cold worked to improve strength, or in which the effect of cold work is recognized in mechanical property limits.
T9 — Solution heat treated, artificially aged, and then cold worked. Applies to products which are cold worked to improve strenght.
T10 — Cooled from an elevated temperature shaping process artificially aged and then cold worked. Applies to products which are artificially aged after cooling from an elvated temperature shaping process, such as casting or extrusion, and cold worked to improve strength.
W — Solution heat treated. An unstable temper applicable only to alloys which spontaneously are at room temperature after solution heat treatment. This designation is specific only when the period of natural aging is indicated; for example, W ½ hr.
Source: Aluminum Assn.

4

ตารางแปลงหน่วย

Pressure units

	Pascal (Pa)	Bar (bar)	Technical atmosphere (at)	Atmosphere (atm)	Torr (Torr)	Pound-force per square inch (psi)
1 Pa	≡ 1 N/m^2	10^{-5}	1.0197×10^{-5}	9.8692×10^{-6}	7.5006×10^{-3}	145.04×10^{-6}
1 bar	100,000	≡ 10^6 dyn/cm^2	1.0197	0.98692	750.06	14.5037744
1 at	98,066.5	0.980665	≡ 1 kgf/cm^2	0.96784	735.56	14.223
1 atm	101,325	1.01325	1.0332	≡ 1 atm	760	14.696
1 torr	133.322	1.3332×10^{-3}	1.3595×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	≡ 1 Torr; ≈ 1 mmHg	19.337×10^{-3}
1 psi	6.894×10^3	68.948×10^{-3}	70.307×10^{-3}	68.046×10^{-3}	51.715	≡ 1 lbf/in^2

Example reading: 1 Pa = 1 N/m^2 = 10^{-5} bar = 10.197×10^{-6} at = 9.8692×10^{-6} atm = 7.5006×10^{-3} torr = 145.04×10^{-6} psi etc.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 6507-1:2005(E)

Metallic materials — Vickers hardness test —

Part 1: Test method

1 Scope

This part of ISO 6507 specifies the Vickers hardness test method, for the three different ranges of test force for metallic materials (see Table 1).

Table 1 — Ranges of test force

Ranges of test force, F N	Hardness symbol	Designation
$F \geqslant 49{,}03$	$\geqslant$ HV 5	Vickers hardness test
$1{,}961 \leqslant F < 49{,}03$	HV 0,2 to < HV 5	Low-force Vickers hardness test
$0{,}098\ 07 \leqslant F < 1{,}961$	HV 0,01 to < HV 0,2	Vickers microhardness test

The Vickers hardness test is specified in this part of ISO 6507 for lengths of indentation diagonals between 0,020 mm and 1,400 mm.

NOTE 1 For indentation diagonals less than 0,020 mm, the increase of the uncertainty has to be considered.

NOTE 2 In general, decreasing the test force increases the scatter of results of the measurements. This is particularly true for low-force Vickers hardness tests and Vickers microhardness tests, where the principal limitation will arise in the measurement of the diagonals of the indentation. For Vickers microhardness, the accuracy of determination of the mean diagonal length is unlikely to be better than ± 0,001 mm (see Bibliography [2]-[5]).

For specific materials and/or products, particular International Standards exist.

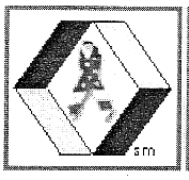
2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 6507-2:2005, *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 2: Verification and calibration of testing machines*

ISO 6507-4, *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 4: Tables of hardness values*

© ISO 2005 – All rights reserved



MARYLAND METRICS
phones: (410) 358-3130 (800) 638-1830
faxes: (410) 358-3142 (800) 872-9329
P.O. Box 261 Owings Mills, MD 21117 USA
6119 Oakleaf Avenue Baltimore, MD 21215 USA

Hardness Conversion Chart *

Comparison of Hardness Scales approx. and Tensile Stress Equivalents approx. (maximum value) in imperial and metric units.**

Rockwell 'C' Scale	Diamond Pyramid Scale HV10 HV30	Brinell			Tensile Stress Equivalents				Scler Scope Hardness Number	Rockwell		Diamond Pyramid Scale HV10 HV30
		Dia. Imp. for 10mm Ball	Carbide Ball	Standard Ball	Tons/in^2	1000lb/in^2	kg/mm^2	MPa (N/mm^2)				
67.7	900								96	85.6	67.7	900
67.0	880								95	85.0	67.0	880
66.3	860								93	84.7	66.3	860
65.5	840								92	84.2	65.5	840
64.8	820								90	83.8	64.8	820
64.0	800								88	83.4	64.0	800
63.3	780								87	83.0	63.3	780
62.5	760								86	82.6	62.5	760
61.7	740								84	82.2	61.7	740
61.0	725	2.44	630	-	-	-	-	-	82	81.8	61.0	725
60.5	710	2.45	627	-	-	-	-	-	-	81.5	60.5	710
60.0	698	2.50	601	-	132	295	208	2039	81	81.2	60.0	698
58.9	670	2.55	578	-	127	284	200	1961	78	80.6	58.9	670
57.1	630	2.60	555	-	122	273	192	1884	75	79.6	57.1	630
56.1	609	2.65	534	-	117	262	184	1807	73	79.0	56.1	609
54.4	572	2.70	514	-	112	250	176	1729	71	78.2	54.4	572
51.9	532	2.75	495	495	108	241	170	1668	68	76.9	51.9	532
50.7	517	2.80	477	477	105	235	165	1621	66	76.3	50.7	517
49.5	497	2.85	461	461	101	226	160	1559	64	75.5	49.5	497
47.5	470	2.90	444	444	98	219	155	1513	62	74.2	47.5	470
46.0	452	2.95	429	429	95	212	150	1467	60	73.5	46.0	452
44.8	437	3.00	415	415	92	206	145	1420	58	73.0	44.8	437
43.7	422	3.05	401	401	88	197	139	1359	56	72.5	43.7	422
42.4	408	3.10	388	388	85	190	134	1312	54	71.5	42.4	408
41.3	395	3.15	375	375	82	183	129	1266	52	71.0	41.3	395
39.9	381	3.20	363	363	80	179	126	1235	51	70.3	39.9	381
38.8	370	3.25	352	352	77	172	121	1189	49	69.8	38.8	370
37.7	359	3.30	341	341	75	168	118	1158	48	69.2	37.7	359
36.7	349	3.35	331	331	73	163	114	1127	46	68.8	36.7	349
35.0	337	3.40	321	321	71	159	111	1096	45	68.0	35.0	337
34.0	327	3.45	311	311	68	152	107	1050	43	67.5	34.0	327
33.0	318	3.50	302	302	66	147	104	1019	42	66.8	33.0	318
32.0	308	3.55	293	293	64	143	101	988	41	66.2	32.0	308
30.9	300	3.60	285	285	63	141	99	973	40	65.7	30.9	300
29.8	292	3.65	277	277	61	136	96	942	38	65.2	29.8	292
29.0	284	3.70	269	269	59	132	93	911	37	64.6	29.0	284

27.5	275	3.75	262	262	58	130	91	895	36	64.0	27.5	275
26.6	269	3.80	255	255	56	125	89	865	35	63.6	26.6	269
25.2	261	3.85	248	248	55	123	87	849	34	62.9	25.2	261
24.3	255	3.90	241	241	53	118	84	818	33	62.6	24.3	255
23.0	247	3.95	235	235	51	114	81	787	32	62.0	23.0	247
22.0	241	4.00	229	229	50	112	79	772	31	61.6	22.0	241
20.8	234	4.05	223	223	49	110	77	756	30	60.7	20.8	234
	228	4.10	217	217	48	107	76	741	-	-	-	228
Hardness 'B' Scale											Hardness 'B' Scale	
98	222	4.15	212	212	46	103	73	710	29	-	98	222
97	218	4.20	207	207	45	101	71	695	28	-	97	218
96	212	4.30	197	197	43	97	68	664	27	-	96	212
93	196	4.40	187	187	41	92	65	632	25	-	93	196
91	188	4.50	179	179	39	88	62	602	-	-	91	188
88.5	178	4.60	170	170	36	81	57	556	24	-	88.5	178
86	171	4.70	163	163	35	78	55	540	-	-	86	171
84.2	163	4.80	156	156	34	76	54	525	23	-	84.2	163
82	156	4.90	149	149	32	72	51	494	-	-	82	156
80	150	5.00	143	143	3t	69	49	479	22	-	80	150
77	143	5.10	137	137	30	67	48	463	21	-	77	143
75	137	5.20	131	131	29.5	66	47	455	20.5	-	75	137
72.5	132	5.30	126	126	29	65	46	448	20	-	72.5	132
70	127	5.40	121	121	28	63	44	432	-	-	70	127
67	122	5.50	116	116	26	58	42	401	15	-	67	122

*These charts were prepared using information contained in B.S.860/1967. This standard differs significantly from the superseded standard B.S. 860/1939, and differs slightly from the conversion scales adopted by SAE and ASTM sources.

** Where hardness acceptance values are specified and a conversion from one scale to another is necessary the source of the conversion data should be stated and understood by the parties involved.

Hardness

Hardness is the property of a material that enables it to resist plastic deformation, penetration, indentation, and scratching. Therefore, hardness is important from an engineering standpoint because resistance to wear by either friction or erosion by steam, oil, and water generally increases with hardness.

Hardness tests serve an important need in industry even though they do not measure a unique quality that can be termed hardness. The tests are empirical, based on experiments and observation, rather than fundamental theory. Its chief value is as an inspection device, able to detect certain differences in material when they arise even though these differences may be undefinable. For example, two lots of material that have the same hardness may or may not be alike, but if their hardness is different, the materials certainly are not alike.

Several methods have been developed for hardness testing. Those most often used are Brinell, Rockwell, Vickers, Tukon, Sclerscope, and the files test. The first four are based on indentation tests and the fifth on the rebound height of a diamond-tipped metallic hammer. The file test establishes the characteristics of how well a file takes a bite on the material.

As a result of many tests, comparisons have been prepared using formulas, tables, and graphs that show the relationships between the results of various hardness tests of specific alloys. There is, however, no exact mathematical relation between any two of the methods. For this reason, the result of one type of hardness test converted to readings of another type should carry the notation "____ converted from ____" (for example "352 Brinell converted from Rockwell C-38").

Another convenient conversion is that of Brinell hardness to ultimate tensile strength. For quenched and tempered steel, the tensile strength (psi) is about 500 times the Brinell hardness number (provided the strength is not over 200,000 psi).

Phones: (800) 638-1830 or (410) 358-3130 are available Monday-Friday 8:30 AM to 5:30 PM Eastern time.
Faxes: (800) 872-9329 or (410) 358-3142 & E-mail are available anytime.
Warehouse & showroom hours are Monday-Friday 10 AM to 5:30 PM.
[To: Maryland Metrics home page] [To: Maryland Metrics Product Guide] [e-mail to Maryland Metrics]
Please note that all Trademarks and Tradenames are the property of their respective owners.

Vickers Hardness Sensitivity Coefficients

ISO 6507-1 defines the Vickers hardness value, *HV*, as:

$$HV = 0.102 \times \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2}$$

where: F = force (in N)
α = plane angle of the indenter (136°)
d = mean indentation diagonal length (in mm)

Partial derivatives allow the sensitivity coefficients for force, indenter angle, and indentation diagonal length to be determined:

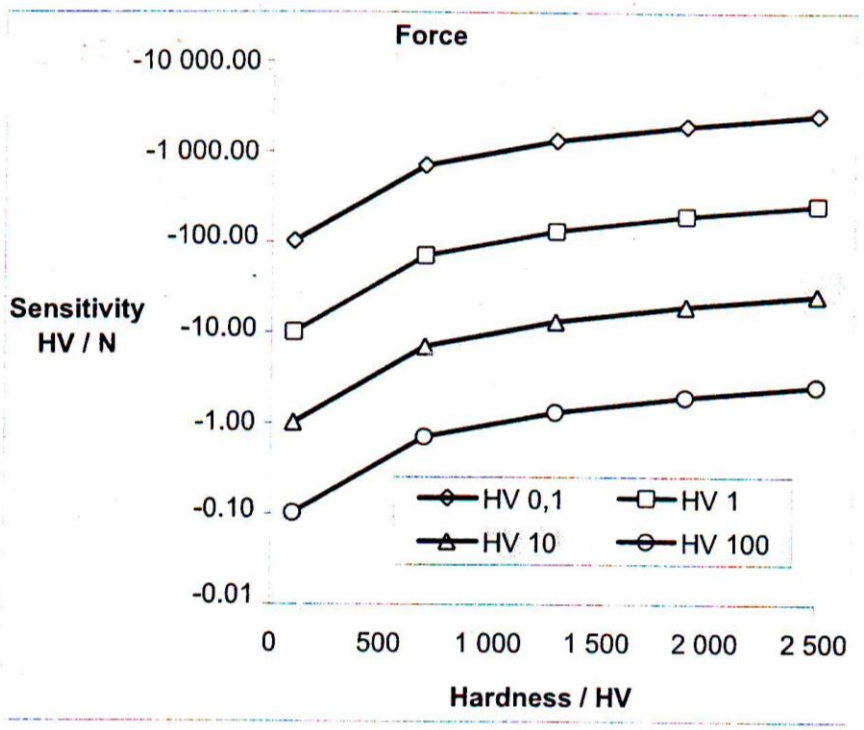
$$\frac{\partial HV}{\partial F} = \frac{HV}{F}$$

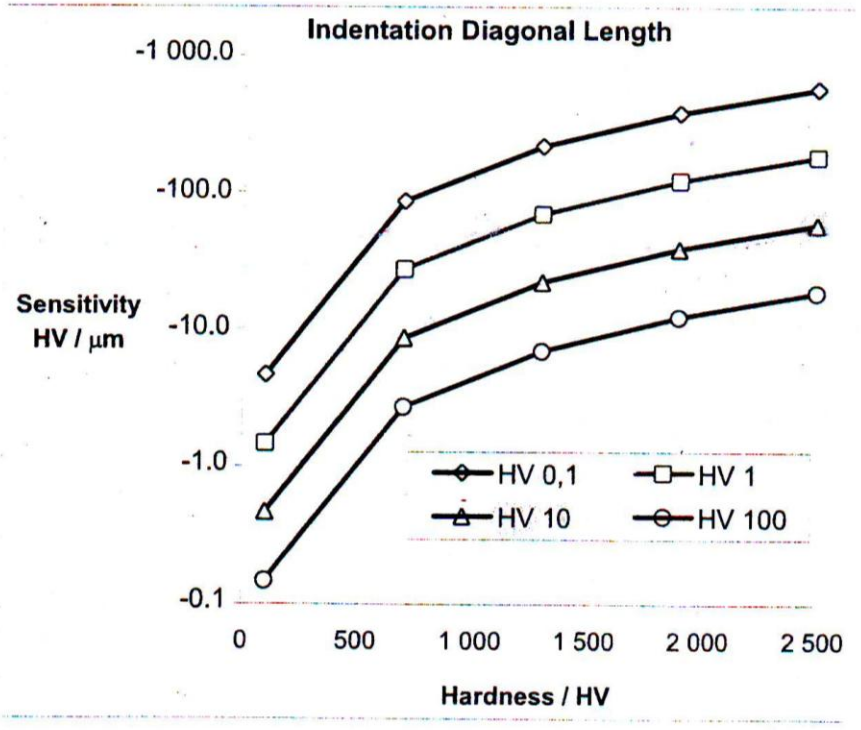
$$\frac{\partial HV}{\partial \alpha} = \frac{HV}{2\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

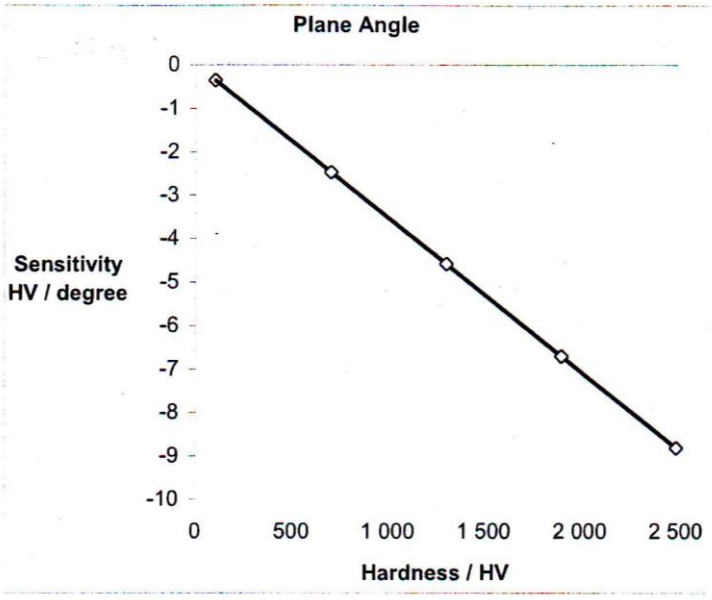
$$\frac{\partial HV}{\partial d} = -2 \times \frac{HV}{d}$$

Important note: the first two equations suggest that the sensitivity coefficients for force and indenter angle are positive - i.e. an increase in force or indenter angle will increase the hardness value. This is only the case if the resulting indentation diagonal length does not also increase – in practice, it always will, to give a similar hardness value. As the hardness value is actually calculated from the nominal force and indenter angle values, together with the measured indentation diagonal length, the sensitivity coefficient values for force and indenter angle should be treated as negative - an increase in the parameter value will lead to a decrease in the calculated hardness - and they are plotted as such in the following graphs:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


Force
-10 000.00
-1 000.00
-100.00
-10.00
-1.00
-0.10
-0.01
Sensitivity
HV / N
HV 0,1
HV 1
HV 10
HV 100
0
500
1 000
1 500
2 000
2 500
Hardness / HV


Indentation Diagonal Length
-1 000.0
-100.0
-10.0
-1.0
-0.1
Sensitivity
HV / µm
HV 0,1
HV 1
HV 10
HV 100
0
500
1 000
1 500
2 000
2 500
Hardness / HV



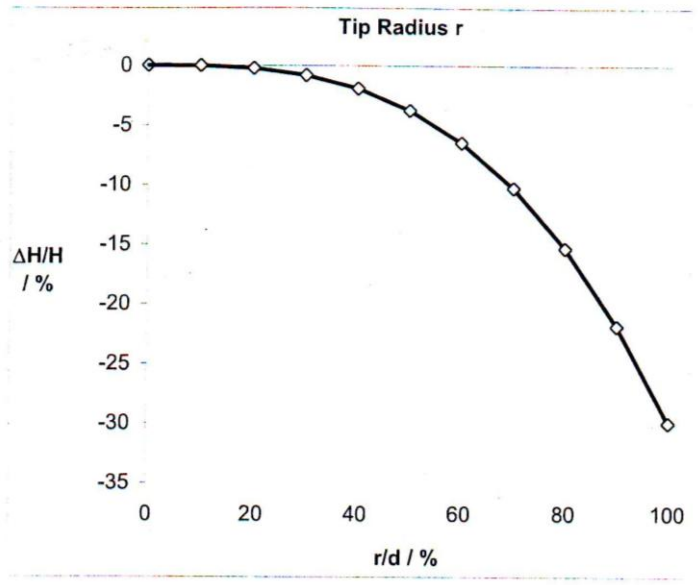
Geometrical considerations allow the sensitivity coefficients for tip radius and length of line of junction to be determined:

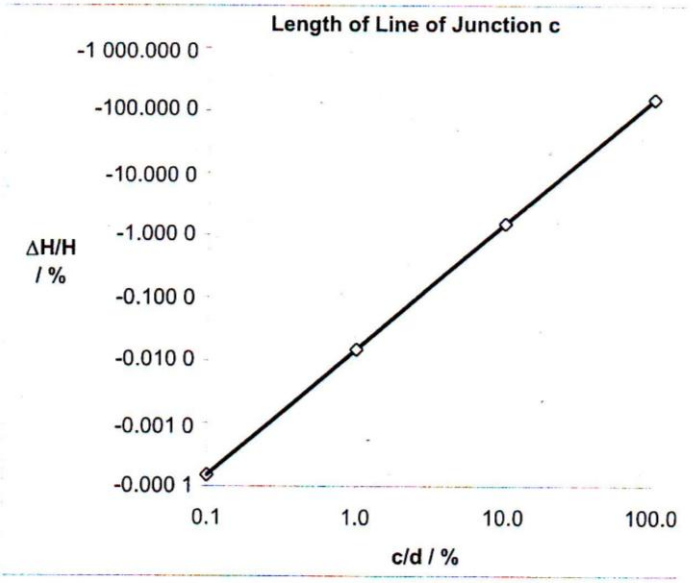
$$\frac{\partial HV}{HV} = -0.3\left(\frac{r}{d}\right)^3$$

$$\frac{\partial HV}{HV} = -1.5\left(\frac{c}{d}\right)^2$$

where: r = tip radius (in mm)
c = length of line of junction (in mm)

The assumption made in both cases is that the volume of the indentation remains the same, for varying values of r and c, as would be the case with an indenter of perfect geometry. Graphs showing values of these two parameters are given below:





Practical experiments were carried out, for the HV 10 and HV 30 ranges, to determine the sensitivity coefficients for loading time and test force duration. In addition, the sensitivities to force value were also determined, to see how well they agreed with the theoretical values.

Sensitivity to application time and force duration

ISO 6507-1 specifies that, for forces of 49.03 N (HV 5) and above, "the time from the initial application of the force until the full test force is reached shall not be less than 2 s nor greater than 8 s" and that "the duration of the test force shall be 10 s to 15 s".

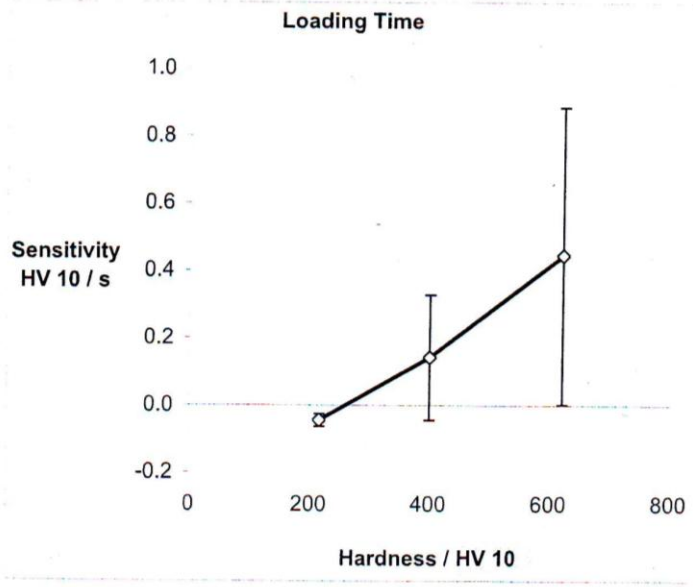
For both ranges, five hardness tests were carried out on each of three blocks of different nominal hardnesses, at different values of the input parameter:

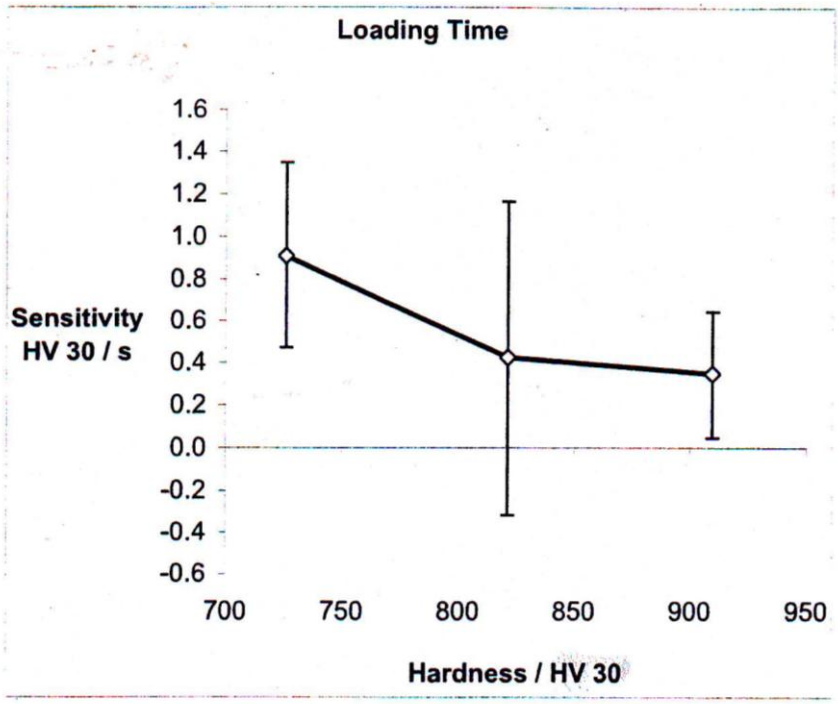
Range	Force	Parameter	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
HV 10	98.07 N	Application time	2 s	4 s	6 s	8 s
		Force duration	10 s	13 s	15 s	N/A
HV 30	294.2 N	Application time	2 s	4 s	6 s	8 s
		Force duration	10 s	13 s	15 s	N/A

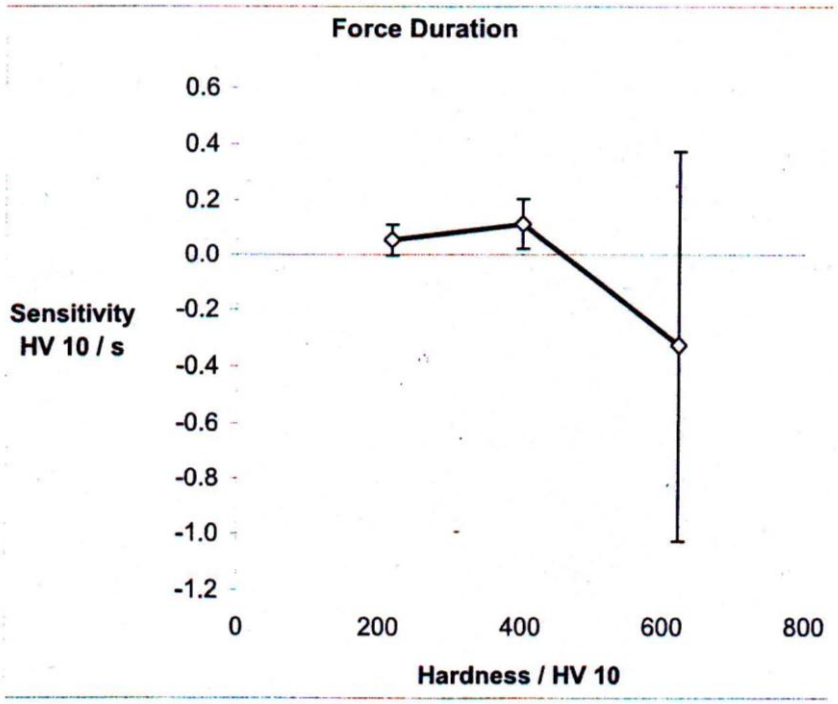
The forces were not applied in a single linear profile, but in two linear sections - 80 % of the force in 25 % of the time followed by the final 20 % of the force in the remaining 75 % of the time:

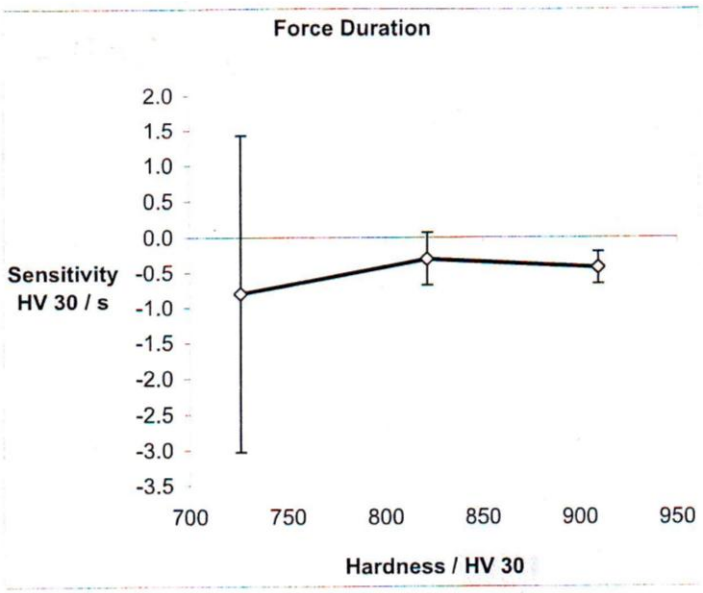
Range	Application time	Part 1			Part 2		
		Force	Time	Rate	Force	Time	Rate
HV 10	2 s	78.46 N	0.5 s	156.9 $N \cdot s^{-1}$	19.61 N	1.5 s	13.08 $N \cdot s^{-1}$
	4 s		1.0 s	78.46 $N \cdot s^{-1}$		3.0 s	6.538 $N \cdot s^{-1}$
	6 s		1.5 s	52.30 $N \cdot s^{-1}$		4.5 s	4.359 $N \cdot s^{-1}$
	8 s		2.0 s	39.23 $N \cdot s^{-1}$		6.0 s	3.269 $N \cdot s^{-1}$
HV 30	2 s	235.4 N	0.5 s	470.7 $N \cdot s^{-1}$	58.8 N	1.5 s	39.23 $N \cdot s^{-1}$
	4 s		1.0 s	235.4 $N \cdot s^{-1}$		3.0 s	19.61 $N \cdot s^{-1}$
	6 s		1.5 s	156.9 $N \cdot s^{-1}$		4.5 s	13.08 $N \cdot s^{-1}$
	8 s		2.0 s	117.7 $N \cdot s^{-1}$		6.0 s	9.807 $N \cdot s^{-1}$

For each of the three hardness blocks, the mean measured hardness was plotted against the input parameter (application time or force duration) and a linear least squares fit was applied to the data. The gradient of this line (the sensitivity of hardness to the input parameter) was plotted against hardness for the three blocks, and these values are shown in the following graphs. The error bars relate to the linearity of the fit of hardness against input parameter at each of the hardness values – each error bar is ±2 × the standard error associated with the estimate of the gradient (sensitivity coefficient).




Loading Time
Sensitivity HV 30 / s
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
700
750
800
850
900
950
Hardness / HV 30


Force Duration
Sensitivity HV 10 / s
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
0
200
400
600
800
Hardness / HV 10



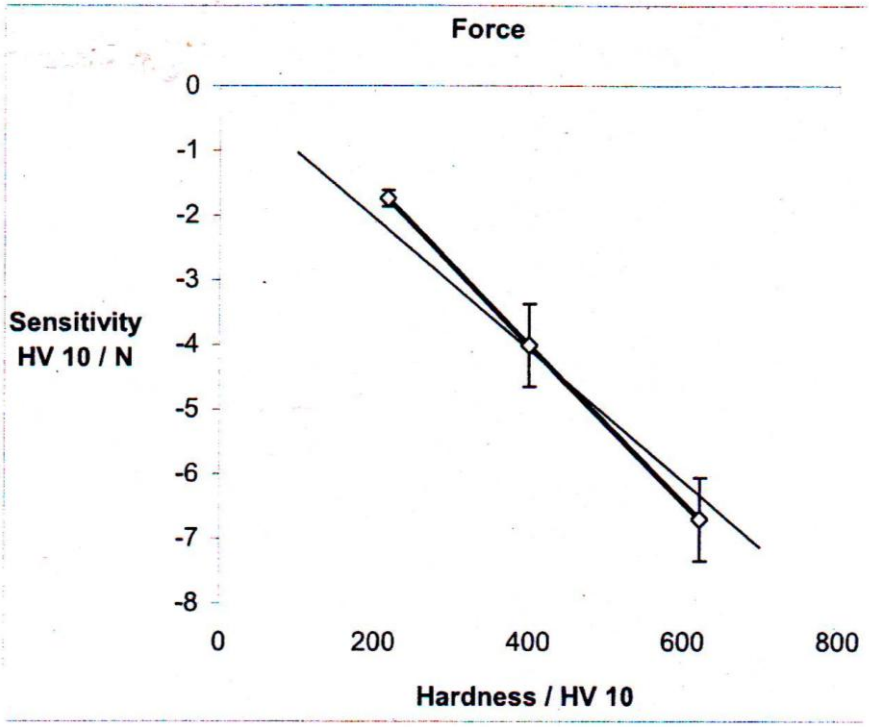
Sensitivity to force value

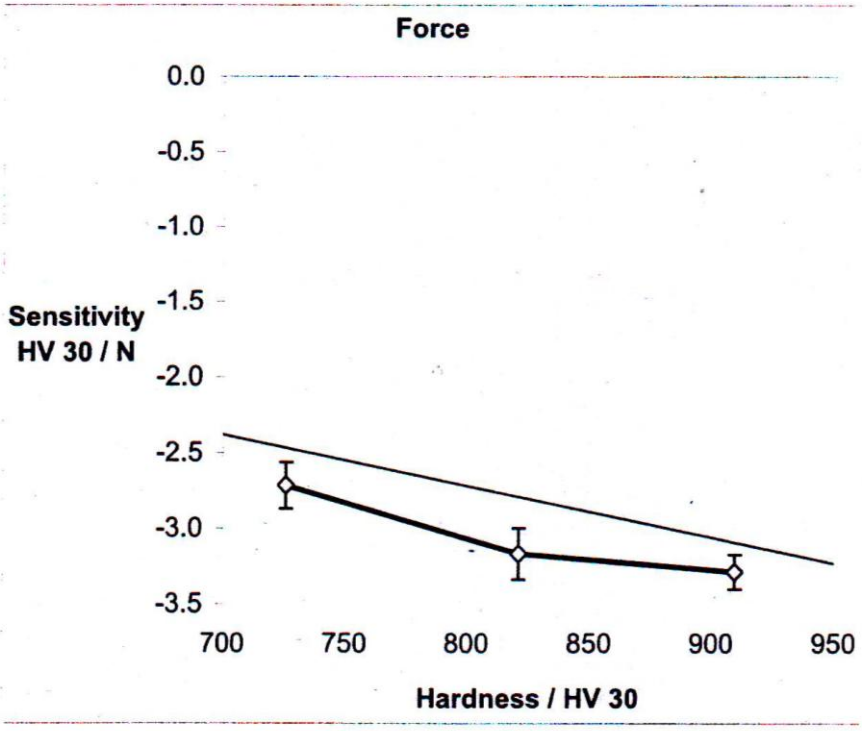
ISO 6507-2 specifies that, for forces of 1.961 N (HV 0.2) and above, each of three force verification measurements in the machine (made by an ISO 376 Class 1 proving device) shall agree with the nominal force to within a tolerance of ±1.0 %.

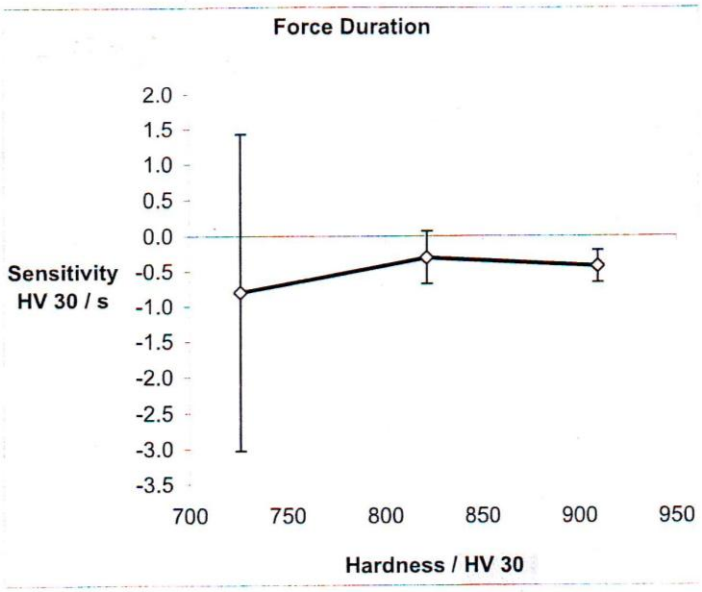
For both ranges, five hardness tests were carried out on each of three blocks of different nominal hardnesses, at different values of force:

Range	Force		
	Run 1	Run 2	Run 3
HV 10	96.60 N	98.07 N	99.54 N
HV 30	287.79 N	294.20 N	298.61 N

For each of the three hardness blocks, the mean measured hardness (calculated using the nominal force) was plotted against applied force and a linear least squares fit was applied to the data. The gradient of this line (the sensitivity of hardness to force) was plotted against hardness for the three blocks, and these values are shown in the following graphs. The error bars relate to the linearity of the fit of hardness against force at each of the hardness values – each error bar is ±2 × the standard error associated with the estimate of the gradient (sensitivity coefficient). The red lines are plots of the sensitivity coefficients obtained from taking a partial derivative of the hardness equation – they are plotted as negative values, rather than positive ones (as the equation suggests), because the hardness values are calculated from the nominal force and the actual indentations, rather than from the actual force and the indentation size at nominal force.


Force
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
Sensitivity
HV 10 / N
0
200
400
600
800
Hardness / HV 10


Force
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
-2.0
-2.5
-3.0
-3.5
Sensitivity
HV 30 / N
700
750
800
850
900
950
Hardness / HV 30



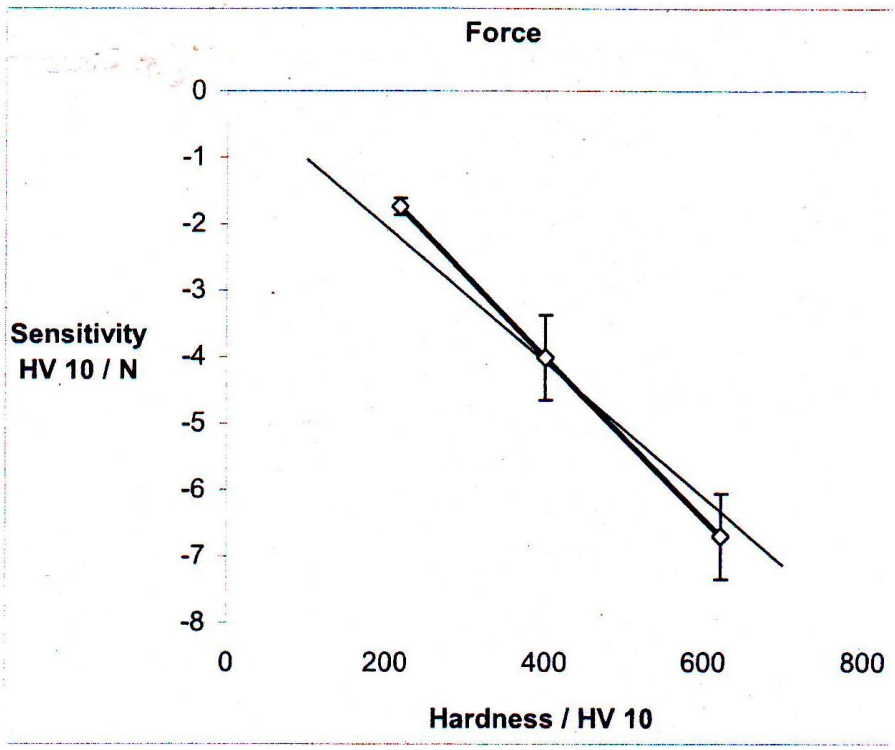
Sensitivity to force value

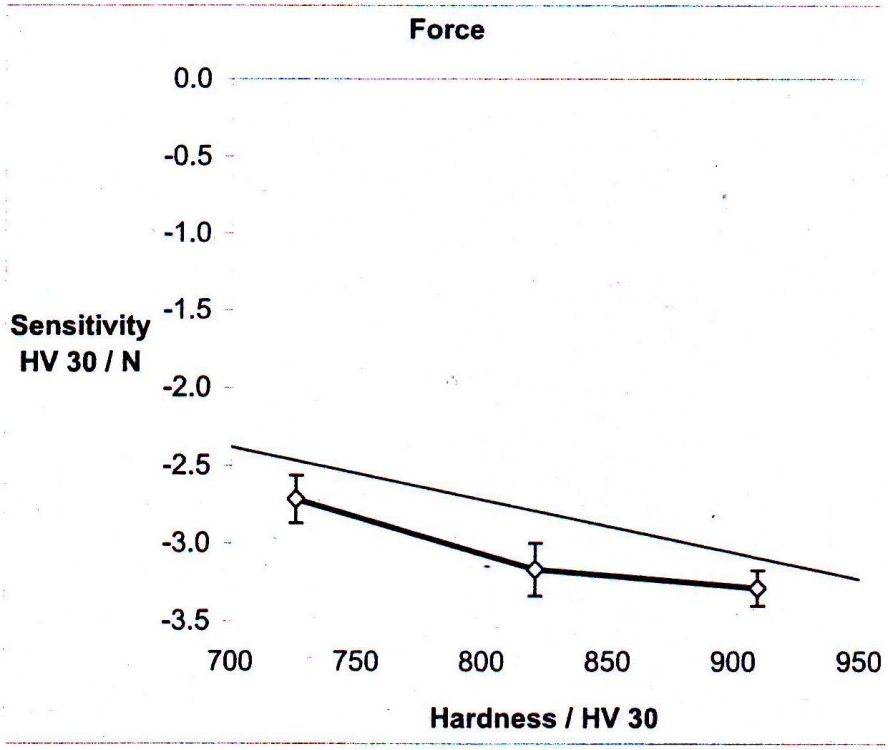
ISO 6507-2 specifies that, for forces of 1.961 N (HV 0.2) and above, each of three force verification measurements in the machine (made by an ISO 376 Class 1 proving device) shall agree with the nominal force to within a tolerance of ±1.0 %.

For both ranges, five hardness tests were carried out on each of three blocks of different nominal hardnesses, at different values of force:

Range	Force		
	Run 1	Run 2	Run 3
HV 10	96.60 N	98.07 N	99.54 N
HV 30	287.79 N	294.20 N	298.61 N

For each of the three hardness blocks, the mean measured hardness (calculated using the nominal force) was plotted against applied force and a linear least squares fit was applied to the data. The gradient of this line (the sensitivity of hardness to force) was plotted against hardness for the three blocks, and these values are shown in the following graphs. The error bars relate to the linearity of the fit of hardness against force at each of the hardness values – each error bar is ±2 × the standard error associated with the estimate of the gradient (sensitivity coefficient). The red lines are plots of the sensitivity coefficients obtained from taking a partial derivative of the hardness equation – they are plotted as negative values, rather than positive ones (as the equation suggests), because the hardness values are calculated from the nominal force and the actual indentations, rather than from the actual force and the indentation size at nominal force.

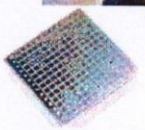

Force
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
Sensitivity
HV 10 / N
0
200
400
600
800
Hardness / HV 10


Force
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
-2.0
-2.5
-3.0
-3.5
Sensitivity
HV 30 / N
700
750
800
850
900
950
Hardness / HV 30

COMPARATIVE MEASUREMENTS OF HARDNESS SCALES FOR ESTABLISHING THE HARDNESS STANDARD OF SLOVENIA

Anton Štibler, ZAG Ljubljana, SLOVENIA • Konrad Herrmann, PTB Braunschweig, GERMANY
Thomas Polzin, MPA-NRW Dortmund, GERMANY • Alessandro Germak, IMGC Torino, ITALY

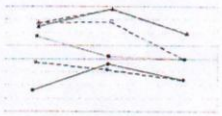
MOTIVATION

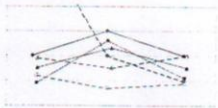


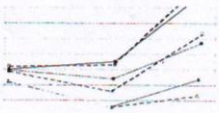
DIRECT CALIBRATION METHOD

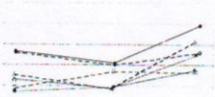
Procedure	Force N	relative errors (%) force applied q	repeatability b	maintainance of force d
HV 30	294,2	0,32	0,25	1,73
HBW 2,5/31,25	306,5	0,04	0,43	1,25
HBW 2,5/62,5	612,9	0,04	0,09	0,32
HBV 2,5/187,5	1839	0,06	0,08	0,09
	F = 98,07	1,29	0,48	
HRC	F = 1471	0,02	0,01	0,03
	F' = 98,07	1,05	0,28	

RESULTS OF COMPARATIVE MEASUREMENTS



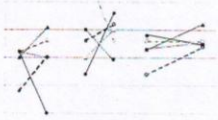


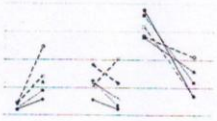




INDIRECT CALIBRATION METHOD

PLAN OF COMPARISON



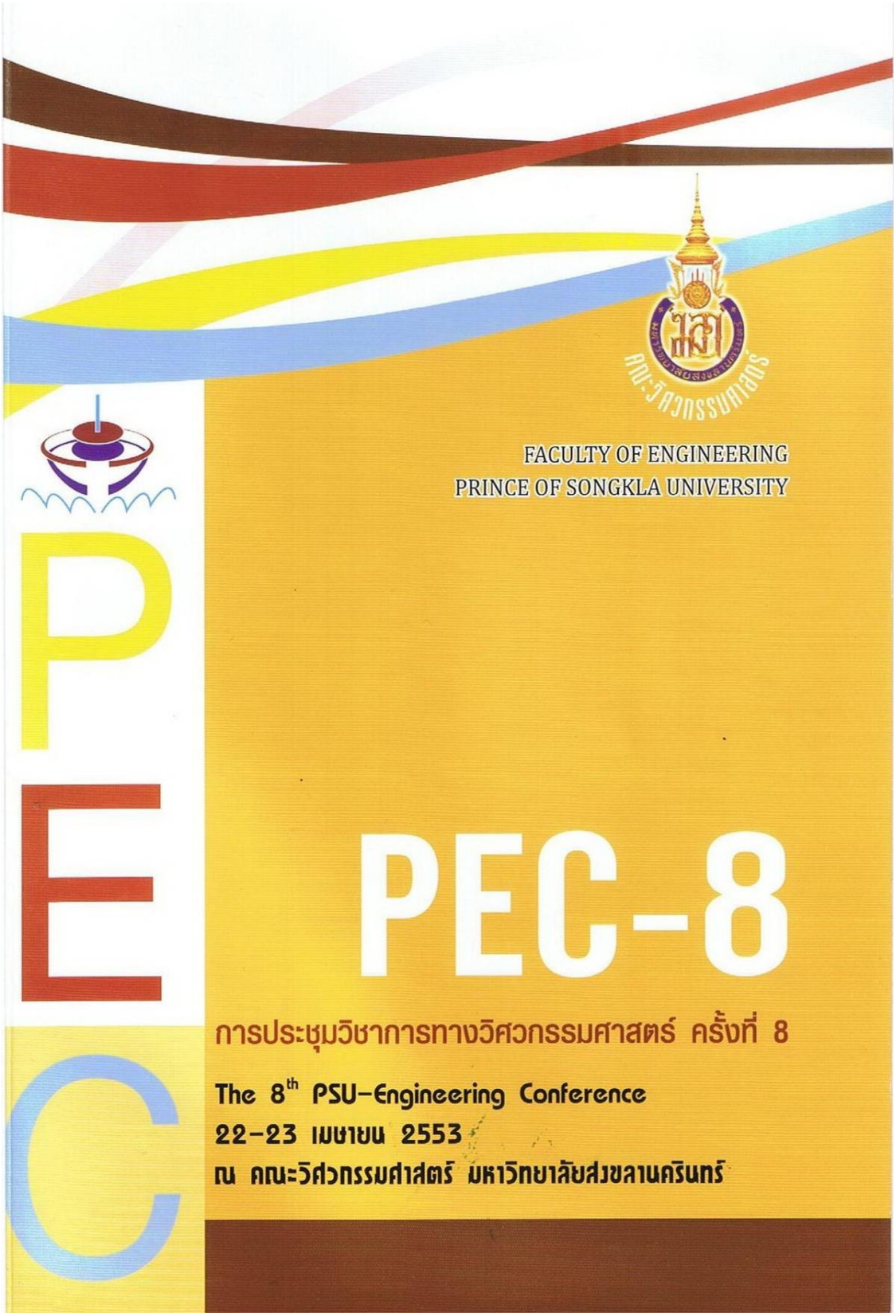


CONCLUSION

Anton Štibler, ZAG Ljubljana, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija, E-mail: anton.stibler@zag.si • Konrad Herrmann, PTB Braunschweig, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany, E-mail: konrad.herrmann@ptb.d
Thomas Polzin, MPA NRW, Marsbruchstraße 186, 44287 Dortmund, Germany, E-mail: dez43@mpanrw.de • Alessandro Germak, IMGC, Strada delle Cacce 73, 10135 Torino, Italy, E-mail: A.Germak@imgc.cnr.it

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่


คณะวิศวกรรมศาสตร์
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
PEC-8
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 8
The 8th PSU-Engineering Conference
22-23 เมษายน 2553
ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประกาศเกียรติคุณผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8
ระหว่างวันที่ 22 - 23 เมษายน 2553 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ด้วยการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8 (PEC-8) ได้รับความกรุณาจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน จากหลายสถาบัน/หน่วยงาน ที่ได้ใช้ความรู้และประสบการณ์ทางวิชาการพิจารณาบทความที่ส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการ PEC-8 ด้วยความอุตสาหะยังผลให้การประชุมวิชาการ PEC-8 ดำเนินการไปด้วยความสมบูรณ์และมีคุณภาพ นอกจากนี้แล้วความร่วมมือจากผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านยังก่อให้เกิดคุณูปการทางวิชาการ อีกทั้งได้ร่วมสร้างบรรยากาศทางวิชาการ และเป็นการเผยแพร่ชื่อเสียงของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อีกด้วย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จึงใคร่ขอขอบพระคุณและประกาศเกียรติคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ดังรายนามต่อไปนี้ ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ก. ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย

1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
    1. รศ.ดร.วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์
    2. รศ.ดร.สมเกียรติ ปรัชญาวรากร คณะวิศวกรรมศาสตร์
    3. ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ คณะวิศวกรรมศาสตร์
    4. ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
    5. ดร.ศุภกิตติ์ โชติโก คณะวิศวกรรมศาสตร์

2. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
    1. ผศ.ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
    2. ผศ.ดร.นิวิท เจริญใจ คณะวิศวกรรมศาสตร์
    3. ผศ.ดร.อภิชาต โสภาแดง คณะวิศวกรรมศาสตร์
    4. ดร.นงค์นุช เรืองจิตต์ คณะวิทยาศาสตร์

3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
    1. รศ.ดร.ผึ่งผาย พรรณวดี คณะวิทยาศาสตร์
    2. รศ.ดร.สุวิมล สัจจวาณิชย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
    3. รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
    4. ผศ.ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม คณะวิศวกรรมศาสตร์

4. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1.	รศ.ดร.อรรถกร	เก่งพล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2.	รศ.สมนึก	วัฒนศรียกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
3.	ผศ.ดร.สมพร	สิริสำราญนุกูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
4.	ผศ.ดร.สมศักดิ์	อรรคทิมากูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

5. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1.	ผศ.ดร.ไชยณรงค์	จักรธรานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2.	ผศ.ดร.ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	คณะวิศวกรรมศาสตร์
3.	ดร.จิรวรรณ	คล้อยภยันต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์

6. มหาวิทยาลัยมหิดล

1.	รศ.ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2.	รศ.ดร.จิตต์ลัดดา	ศักดาภิพาณิชย์	คณะวิทยาศาสตร์
3.	ผศ.ดร.สุกัญญา	พงษ์สุภาพ	คณะวิทยาศาสตร์

7. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.	ดร.เกริก	ภิรมย์โสภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2.	ดร.ปวีณา	เชาวลิตวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์

8. มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1.	รศ.ดร.พรเทพ	ขอขจายเกียรติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2.	ผศ.อนัตต์	เจ่าสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

9. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.	ผศ.ดร.สมบัติ	สินธุเชาวน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2.	ผศ.ดร.สุขอังคณา	ลี	คณะวิศวกรรมศาสตร์

10. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.	รศ.ดร.มนัส	สังวรศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์

11. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.	ผศ.ดร.จุไรวัลย์	รัตนะพิสิฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์

12. มหาวิทยาลัยบูรพา

1.	ผศ.ดร.สยาม	ยิ้มศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์

13. มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

1.	ผศ.สิริวิช	ทัตสวน	คณะวิศวกรรมศาสตร์

14. มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

1.	ผศ.วิจิตรา	เพ็ชรกิจ	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร

ข. ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัย

1. คณะวิศวกรรมศาสตร์

1.	รศ.บุญเจริญ	วงศ์กิตติศึกษา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
2.	รศ.ดร.เกริกชัย	ทองหนู	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
3.	ผศ.ดร.ณัฏฐา	จินดาเพ็ชร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
4.	ผศ.ดร.วิกลม	ธีรภาพขจรเดช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
5.	ผศ.ดร.พรชัย	พฤกษ์ภัทรานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
6.	ผศ.ดร.กุสุมาลย์	เฉลิมยานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
7.	ผศ.ดร.ภาณุมาส	คำสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
8.	ผศ.คณดิต	เจษฎ์พัฒนานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
9.	ผศ.สาวิตร์	ดันฑนุช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
10.	ผศ.สุระพล	เธียรมนตรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
11.	ผศ.ธวัชชัย	ทางรัตนสุวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
12.	ผศ.ปริพนธ์	พัฒนสัตยางค์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
13.	ผศ.เลียง	คูบุรัตถ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
14.	ผศ.สมพัฒน์	รุ่งตะวันเรืองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
15.	ดร.มณเทพ	เกียรติวีระสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
16.	อ.ปราโมทย์	จูฑาพร	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
17.	รศ.ดร.ชาคริต	ทองอุไร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
18.	รศ.ดร.จรัญ	บุญกาญจน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
19.	รศ.ดร.สุภวรรณ	ฏิระวณิชย์กุล	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
20.	ผศ.ดร.ลือพงศ์	แก้วศรีจันทร์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
21.	ผศ.ดร.จันทิมา	ชั่งสิริพร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
22.	ผศ.ดร.กุลชนาฐ	ประเสริฐสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
23.	ผศ.ดร.ผกามาศ	เจษฎ์พัฒนานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
24.	ผศ.ดร.สุกฤทธิรา	รัตนวิไล	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
25.	ดร.สุธรรม	สุขมณี	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
26.	ดร.พรศิริ	แก้วประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
27.	ดร.สินินาฏ	จงดง	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
28.	ดร.สุรัสวดี	กังสนันท์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
29.	รศ.ดร.สันห์ชัย	กลิ่นพิกุล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
30.	รศ.สมชาย	ชูโฉม	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

31. รศ.วนิดา	รัตนมณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
32. ผศ.ดร.องุ่น	สังขพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
33. ผศ.ดร.นิกร	ศิริวงศ์ไพศาล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
34. ผศ.ดร.เสกสรร	สุธรรมานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
35. ผศ.ดร.สุภาพรรณ	ไชยประพัทธ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
36. ผศ.ดร.ธเนศ	รัตนวิไล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
37. ผศ.ดร.นภิสพร	มีมงคล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
38. ผศ.ดร.รัญชนา	สินธวาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
39. ผศ.ดร.กลางเดือน	โพชนา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
40. อ.สุริยา	จิรสถิตสิน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
41. รศ.กัลยาณี	คุปตานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
42. รศ.ดร.ตนุพล	ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
43. ผศ.ดร.เจษฎา	วรรณสินธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
44. ผศ.ดร.วีราวรรณ	สุทธิศรีปก	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
45. ดร.วิษณุ	ราชเพ็ชร	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
46. รศ.ดร.อุดมผล	พืชน์ไพบูลย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
47. ผศ.ดร.ศักดิ์ชัย	ปรีชาวีรกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
48. ผศ.ดร.สมบูรณ์	พรพิเนตพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
49. ผศ.ดร.พรทิพย์	ศรีแดง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
50. ผศ.ดร.สุเมธ	ไชยประพัทธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
51. ผศ.ดร.วรพจน์	ประชาเสรี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
52. ผศ.ดร.ภาสกร	ชัยวิริยะวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
53. ผศ.จรีรัตน์	สกุลรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
54. ดร.ชัยศรี	สุขสาโรจน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
55. ดร.ธนิยา	เกาศล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
56. อ.วิวัฒน์	สุทธิวิภากร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
57. รศ.กำพล	ประทีปชัยกูร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
58. รศ.สมาน	เสนงาม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
59. รศ.ปัญญรักษ์	งามศรีตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
60. รศ.ดร.วรวุธ	วิสุทธิเมธางกูล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
61. ผศ.ดร.วิริยะ	ทองเรือง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
62. ผศ.ดร.พฤทธิกร	ลมิตไมตรี	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
63. ผศ.ดร.จันทกานต์	ทวีกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
64. ผศ.สมเกียรติ	นาคกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
65. ดร.สมชาย	แซ่อึ้ง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
66. ดร.พุทธิพงศ์	แสนสบาย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
67. ดร.ฐานันดร์ศักดิ์	เทพญา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
68. ดร.กิตตินันท์	มลิวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

69.	ดร.ชยุต	นันทดุสิต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
70.	ดร.ธีระยุทธ	หลีวิจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
71.	ดร.จีระภา	สุขแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
72.	ศ.ดร.สินชัย	กมลภิวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
73.	ผศ.ดร.มนตรี	กาญจนะเดชะ	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
74.	รศ.ดร.มิตรชัย	จงเชี่ยวชำนาญ	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
75.	รศ.ทศพร	กมลภิวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
76.	ผศ.ดร.พิชญา	ตันทัยย์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
77.	ผศ.ดร.สุนทร	วิทูสุรพจน์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
78.	ผศ.ดร.วรรณรัช	สันติอมรทัต	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
79.	ผศ.ดร.ธเนศ	เดารพาพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
80.	ผศ.ทวีศักดิ์	เรืองพีระกุล	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
81.	ดร.แสงสุรีย์	วสุพงศ์อัยยะ	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
82.	ดร.นิคม	สุวรรณวร	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
83.	ดร.อนันท์	ชกสุริวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
84.	อ.ฉัตรชัย	จันทร์พริ้ม	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
85.	ดร.วัชรวลี	ตั้งคุปตานนท์	หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศ (MIT)

2. คณะวิทยาศาสตร์

1.	ผศ.ดร.ภัทร	อัยรักษ์	ภาควิชาฟิสิกส์
2.	ผศ.ดร.ศิริรัตน์	วณิชโยบล	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
3.	ผศ.ดร.อรสา	ภัทรไพบูลย์ชัย	หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
4.	ดร.ลัดดา	ปรีชาวีรกุล	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

3. คณะอุตสาหกรรมเกษตร

1.	ผศ.ดร.อัญชลี	ศิริโชติ	ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

4. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วิทยาเขตปัตตานี)

1.	รศ.ดร.เจริญ	นาคะสรรค์	ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

ประกาศ ณ วันที่ 22 เมษายน 2553

รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา
ประธานคณะอนุกรรมการวิชาการและการประชุม PEC-8

การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและทรงกรวย

Comparison of AA6063 Aluminum and AISI430 Stainless Steel FSW Welds Tensile Strength using Cylindrical and Cone Stirrer Shapes

ศักดิ์ชัย จันทศรี[1] ปราโมทย์ พูนนายม[2] สมชาย วนไทยสงค์[3] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์[4]*
[1,2,3,4]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
E-mail: sakchai747@yahoo.co.th*

Sakchai Chantasee[1] Pramote Poonnayom[2] Somchai Wonthaisong[3] Kittipong Kimapong [4]*
[1,2,3,4]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: sakchai747@yahoo.co.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ที่ประกอบไปด้วยตัวกวนรูปร่างทรงกระบอกและทรงกรวยผิวเรียบ ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063 เหล็กกล้าไร้สนิม 430 และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อม เช่น ตัวกวนรูปร่างต่างๆ ความเร็วรอบ และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้ ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบ และตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ สามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ได้ แต่ให้ค่าความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบให้รอยต่อที่มีความสมบูรณ์ ปราศจากจุดบกพร่อง และให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 114 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min และความเร็วรอบ 500 rpm ตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ สามารถเชื่อมรอยต่อให้มีความสมบูรณ์ได้ดีที่ค่าความเร็วรอบสูง แต่ค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นมักไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวแนวเชื่อม

คำหลัก การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อลูมิเนียม เหล็ก ตัวกวน

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8
22-23 เมษายน 2553

การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและทรงกรวย

Comparison of AA6063 Aluminum and AISI430 Stainless Steel FSW Welds Tensile Strength using Cylindrical and Cone Stirrer Shapes

ศักดิ์ชัย จันทศรี[1] ปราโมทย์ พูนนายม[2] สมชาย วนไทยสงค์[3] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์[4]*
[1,2,3,4]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
E-mail: sakchai747@yahoo.co.th*
Sakchai Chantasee[1] Pramote Poonnayom[2] Somchai Wonthaisong[3] Kittipong Kimapong[4]*
[1,2,3,4]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: sakchai747@yahoo.co.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ที่ประกอบไปด้วยตัวกวนรูปร่างทรงกระบอกและทรงกรวยผิวเรียบ ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063 เหล็กกล้าไร้สนิม 430 และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อม เช่น ตัวกวนรูปร่างต่างๆ ความเร็วรอบ และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้ ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบ และตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ สามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ได้แต่ให้ค่าความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบให้รอยต่อที่มีความสมบูรณ์ ปราศจากจุดบกพร่อง และให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 114 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min และความเร็วรอบ 500 rpm ตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ สามารถเชื่อมรอยต่อให้มีความสม บูรณ์ได้ดีที่ค่าความเร็วรอบสูง แต่ค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นมักไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวแนวเชื่อม

คำหลัก การเชื่อมเสียดทานแบบกวน; อลูมิเนียม; เหล็ก; ตัวกวน;

Abstract

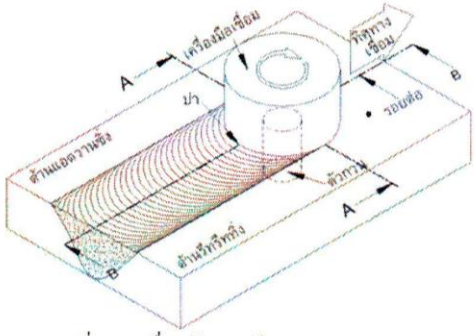
This paper aims to apply Friction Stir Welding using a non screw cylindrical stirrer and a non screw cone stirrer for producing the AA6063 aluminum alloy and AISI430 stainless steel joint. The paper also studied the variation of welding parameters such as stirrer shapes, rotational speed and traverse speed that affected the tensile strength of the joint. The results are as follows. A non screw cylindrical stirrer shape and a non screw cone stirrer shape could apply to produce the butt joint between AA6063 aluminum alloy and AISI 430 stainless steel but the shapes had an effect on joint quality. A non screw cylindrical stirrer shape gave the sound joints without the defect and indicated the maximum tensile strength of 114 MPa at the traverse speed of 75 mm/min and the rotational speed of 500 rpm. A non screw cone stirrer shape could produce the sound joint at the high rotational speed but the tensile strength of the joint was difference along the joint.

Keywords: friction stir welding; steel; aluminum; stirrer;

1. บทนำ

ปัจจุบันรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม มีการใช้งานมากขึ้นในงานอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ได้นำเอาอลูมิเนียมเข้ามาใช้งานแทนที่ชิ้นส่วนเหล็กในโครงสร้างของรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักโครงสร้างของรถยนต์ และส่งผลโดยตรงต่อการใช้เชื้อเพลิงอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ [1] อย่างไรก็ตามการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก ด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลายดั้งเดิม (Conservation fusion welding) เข้าด้วยกันเป็นวิธีที่ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากการเกิดจุดบกพร่องต่างๆ ในโลหะเชื่อมที่มีผลในการลดความแข็งแรงของรอยต่อ [2] ดังนั้นการใช้กระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในการต่อวัสดุต่างชนิด จึงมีความสำคัญในการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

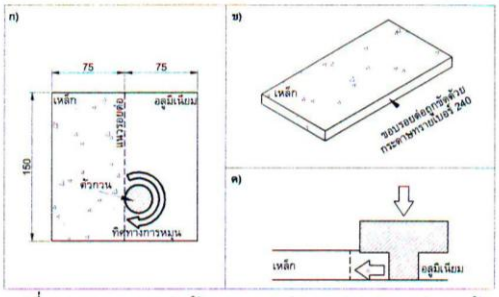
จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา หนึ่งในกระบวนการเชื่อมที่สามารถทำการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3-7] คือ การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) กระบวนการเชื่อมนี้เป็นกระบวนการเชื่อมที่คิดค้นเพื่อใช้ในการเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย เช่น อลูมิเนียมผสม [8] และได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร [9] ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [2]

ตัวกวนของเครื่องมือเชื่อมถูกสอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งป่าของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและป่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้ป่าของเครื่องมือเชื่อม วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดย้อนลงมาเนื่องจากการกดของป่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน เมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุจะถูกถ่ายเทและเคลื่อนที่ภายใต้ป่าเครื่องมือเชื่อม ป่าเครื่องมือเชื่อมด้านหลัง จะกด อัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนั้นจากหลักการเบื้องต้น ตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่บ่งชี้การรวมตัวของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อคาดว่าจะทำให้ได้คุณลักษณะและความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการประยุกต์ใช้ตัวกวนรูปร่างต่างๆ เช่น ตัวกวนรูปร่างทรงกระบอก ทรงกรวย หรือทรงเกลียวเป็นต้น ในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก และทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมกับโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม เพื่อเตรียมข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป ดังเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ประกอบไปด้วยตัวกวนรูปร่างทรงกระบอกและทรงกรวยผิวเรียบ ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063 เหล็กกล้าไร้สนิม 430 และศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมต่อเกยที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างดังกล่าว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตต่อไป

2. วิธีการทดลอง

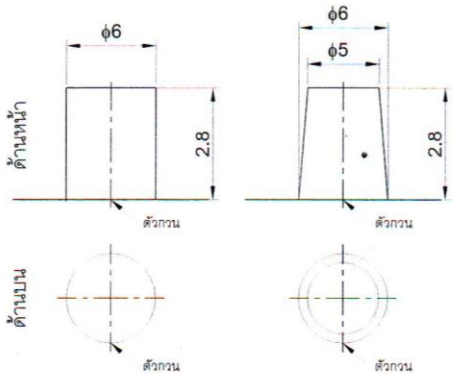


รูปที่ 2 (ก) การวางแผ่นวัสดุของรอยต่อชน (ข) ตำแหน่งการขัดกระดาษทราย และ (ค) การสอดตัวกวนเข้าไปในรอยต่อ [10]

แผ่นรีดอลูมิเนียมผสม AA6063 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ความหนา 3 มม. ขนาดกว้าง 75 มม. ยาว 150 มม. นำมาประกอบเป็นรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2(ก) โดยให้อลูมิเนียมวางไว้ในตำแหน่งแอดวานซิ่ง และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมวางไว้ที่ด้านรีทรีทติ่ง [10] ก่อนการประกอบรอยต่อชน ด้านของรอยต่อชนดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) นำมาทำการขัดให้มีผิวเรียบและตั้งฉากโดยกระดาษทรายเบอร์ 240 และทำความสะอาดด้วยอาซีโตน ตัวกวนทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD-11 ที่มีรูปร่างและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3 การสอดตัวกวน เริ่มสอดตัวกวนเข้าไปที่ด้านของอลูมิเนียมในแนวแกน Z ของเครื่องกัดแนวดิ่งจน กระทั่งได้ความลึกตามกำหนด จากนั้นจึงเลื่อนด้านข้างของตัวกวนเข้าสู่แนวต่อชนดังแสดงในรูปที่ 2 (ค) ความ เร็วรอบของตัวกวนมีค่าเท่ากับ 250-750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 50-1750 มม./นาที ระยะการสอดผิวด้านข้างของตัวกวนเข้าสู่ผิวรอยต่อชนมีค่าเท่ากับ 0.2 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค) ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมนำมาทำการทดสอบความแข็งแรงดึง โดยชิ้นงานถูกเตรียมให้มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกำหนด ให้แนวเชื่อมอยู่กึ่งกลางชิ้นทดสอบ นอกจากนั้นชิ้นงานในตำแหน่งกึ่งกลางถูกเตรียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป

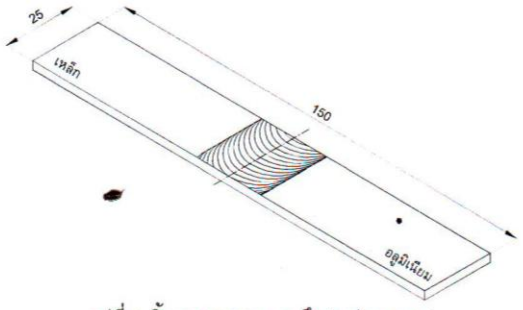
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

ธาตุ	อลูมิเนียม (%wt)	เหล็ก (%wt)
Fe	-	สมดุล
Al	สมดุล	-
Mg	0.40	-
C	-	0.12
S	-	0.03
Cr	0.01	17.00
Si	-	1.00
Mn	0.05	1.00



(ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงกรวย

รูปที่ 3 รูปร่างตัวกวน (หน่วย: มม.)



รูปที่ 4 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย: มม.)

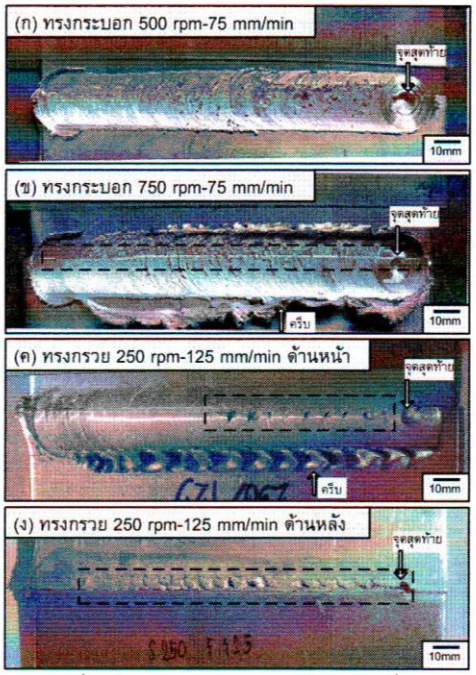
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

ตารางที่ 2 แสดงผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้วยสายตาที่สภาวะการเชื่อมต่างๆ ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบและตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ พบว่าการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกส่วนใหญ่ผิวหน้าแนวเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ บนผิวหน้าแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) อย่างไรก็ตามจุดสุดท้ายของแนวเชื่อมปรากฏรูกลมเล็กๆ ที่เกิดจากตัวกวนบนแนวเชื่อม นอกจากนั้นหากให้ความเร็วรอบในการเชื่อมที่สูง เช่น 750 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ เช่น 50 mm/min ผิวหน้าแนวเชื่อมจะเกิดแนวของรอยต่อที่ไม่สามารถรวมกันได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงภายในพื้นที่เส้นประสี่เหลี่ยมในรูปที่ 5 (ก) นอกจากนั้นปริมาณครีบที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของแนวเชื่อม มีปริมาณค่อนข้างมากที่บริเวณด้านอลูมิเนียม

เปรียบเทียบกับรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ที่ค่าความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าต่ำกว่า 100 mm/min แนวเชื่อมส่วนใหญ่ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยนั้นไม่สามารถทำให้เกิดความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมขึ้นได้ แต่หากทำการเชื่อมที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงกว่า จะทำให้เกิดแนวเชื่อมที่แสดงการรวมตัวกัน และไม่เกิดจุดบกพร่องบนผิวหน้าแนวเชื่อมได้ ความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยนี้ แสดงดังรูปที่ 5 (ค) เมื่อทำการเชื่อมไปที่ระยะกึ่งหนึ่งของระยะทางเดินแนวเชื่อม เกิดเป็นส่วนของอลูมิเนียมที่ไม่สามารถไหลวนเข้าไปรวมตัวกับผิวรอยต่อด้านของเหล็กได้ดังแสดงในพื้นที่เส้นประ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาด้านล่างของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 5 (ง) พบว่า จุดบกพร่องที่แสดงความไม่สามารถในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กของตัวกวนทรงกรวยนี้ เริ่มต้นที่ตำแหน่งใกล้จุดเริ่มต้นของแนวเชื่อมและมีการขยายตัวที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อแนวเชื่อมมีระยะทางเพิ่มขึ้น การเกิดจุดบกพร่องในลักษณะนี้คาดว่าเกิดจากตัวกวนทรงกรวยเกิดการดันอลูมิเนียมขึ้นด้านบนของแนวเชื่อม และเมื่ออลูมิเนียมถูกดันขึ้นมาสู่ผิวหน้าแนวเชื่อม ทำให้ป่าเครื่องมือเชื่อมดันอลูมิเนียมออกไปสู่ด้านข้างของแนวเชื่อมมากขึ้น และเกิดเป็นครีบขนาดใหญ่ที่ด้านรีทรีททิ่งของรอยต่อ จึงเป็นสาเหตุทำให้อลูมิเนียมไม่เพียงพอในการเติมเต็มบริเวณรอยต่อ

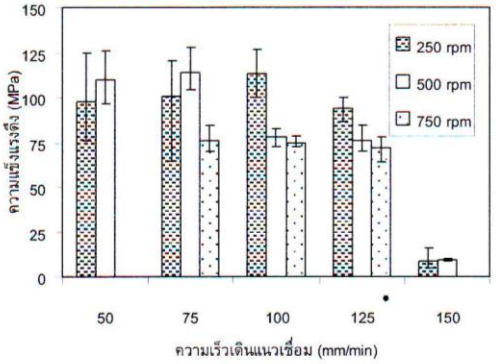
ตารางที่ 2 ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่เชื่อม (O = สมบูรณ์ และ X=ไม่สมบูรณ์)

ความเร็วรอบ (rpm)		ทรงกระบอก			ทรงกรวย		
		250	500	750	250	500	750
ความเร็วเดินแนวเชื่อม (mm/min)	50	O	O	X	X	X	X
	75	O	O	O	X	X	X
	100	O	O	O	X	X	O
	125	O	O	O	X	O	O
	150	O	O	O	O	O	O



รูปที่ 5 ผิวหน้าและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม

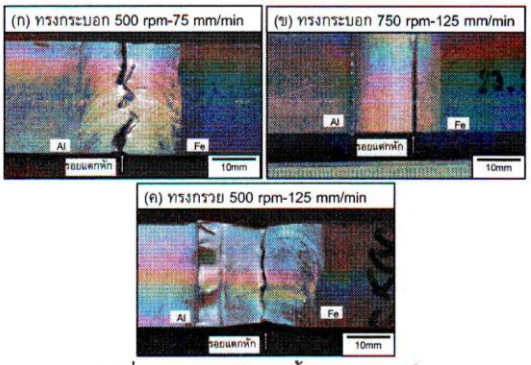
จากชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ในตารางที่ 1 ทำการเตรียมชิ้นงาน เพื่อทำการทดสอบแรงดึงของรอยต่อด้วยชิ้นงานที่มีขนาดและมิติดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วยการตัดด้วยใบตัดไมโครไฟเบอร์ พบว่าชิ้นงานที่มีผิวหน้าสมบูรณ์บางตัวนั้นมีความแข็งแรงต่ำ และไม่สามารถทำการเตรียมเป็นชิ้นทดสอบได้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเดินแนวเชื่อม ความเร็วรอบ และความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อของความเร็วรอบ 250 และ 500 rpm นั้นมีแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าที่เพิ่มจาก 50 mm/min เป็น 75 mm/min และมีค่าลดลง เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นสู่ 150 mm/min แนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อของความเร็วรอบทั้งสองค่านี้ มีลักษณะคล้ายกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแผ่นอลูมิเนียม AA6063 ความหนา 6.3 มม. [11] อย่างไรก็ตาม ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดนั้น แตกต่างกัน โดยในรายงานผลการทดลองนี้ที่ความเร็วรอบ 250 rpm นั้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดพบที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min ขณะที่ความเร็วรอบ 500 rpm นั้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดพบที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min พิจารณาค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 rpm พบว่าที่ค่าควววามเร็วเดินแนวเชื่อม 50 และ 150 mm/min นั้น ไม่สามารถแสดงค่าความแข็งแรงได้ เนื่องจากรอยต่อเชื่อมที่ได้ไม่สามารถนำมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบได้ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ และความแข็งแรงที่ต่ำของชิ้นทดสอบทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดการพังทลายขณะเตรียมชิ้นงานทดสอบ ที่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบไปด้วยความเร็วรอบ และความเร็วเดินแนวเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกนั้น พบว่าตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุดที่ 114 MPa คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min และความเร็วรอบ 500 rpm

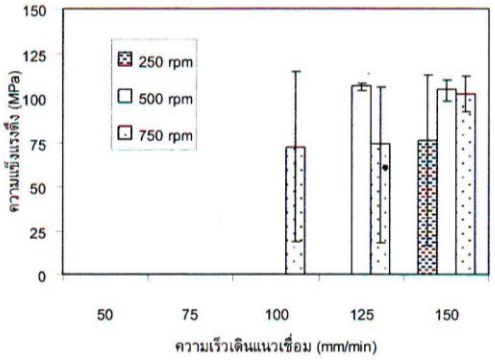
รูปที่ 7 แสดงรอยแตกหักของชิ้นทดสอบแรงดึง พบความแตกต่างที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือ รอยต่อด้วยทรงกระบอกที่มีค่าความแข็งแรงสูงดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) นั้นมีรอยขาดเป็นแนวซิกแซกคล้ายฟันปลา เนื่องจากอลูมิเนียมและเหล็กมีการเกาะยึดกันได้ดีกว่า รอยต่อที่มีค่าความแข็งแรงน้อยอลูมิเนียมและเหล็กเกาะยึดกันไม่มากนักทำให้การแตกหักเกิดขึ้นเป็นแนวตรง



รูปที่ 7 รอยแตกหักของชิ้นทดสอบแรงดึง

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่ได้นั้นมีค่าความแตกต่างจากตัวกวนทรงกรวยที่แสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงของรอยต่อส่วนใหญ่ไม่สามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อม พิจารณาค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-150 mm/min พบว่า ค่าความแข็งแรงของแรอยต่อที่ได้นั้นล้วนมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก โดยค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ รอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ทำการตรวจสอบรอยแตกหักของชิ้นทดสอบ ที่แสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยดังแสดงในรูปที่ 7 (ค) พบว่า การแตกหักเกิดคล้ายกับชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก ที่มีความแข็งแรงสูงสุด คือ เกิดรอยแตกแบบซิกแซกที่บ่งแสดงว่ารอยต่อมีการจับยึดการอย่างดีเยี่ยม นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าความผิดพลาด (Error bar) ที่แสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่าความแข็ง แรงดึงสูงสุดและต่ำสุดของรอยต่อที่สมบูรณ์ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยนี้มีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ผลการทดสอบที่ได้นี้ แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงที่ไม่สม่ำเสมอของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย โดยในการทดสอบนี้ได้เลือกสุ่มชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบที่บริเวณตอนต้น กึ่งกลาง และตอนท้ายของความยาวแนวเชื่อม พบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมนั้นจะมีค่าสูง สุดที่ตอนท้ายของแนวเชื่อม ผลการทดลองที่ได้คาดว่า ตัวกวนทรงกรวยนี้อาจทำให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ และมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นได้ เมื่อเพิ่มระยะการเดินแนวเชื่อมให้มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวไม่ได้รวมอยู่ในรายงานนี้ นอกจากนั้นเพื่อการทดลองที่เข้าใจกลไกการรวมตัวของวัสดุทั้งสอง ว่าตัวกวนทรงกระบอก และตัวกวนทรงกรวย ให้ผลทำให้เกิดการกวนต่างกัน

อย่างไรควรมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคเพื่อการอธิบายการเกิดการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็กต่อไปในอนาคต



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเดินแนวเชื่อม ความเร็วรอบ และความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ประกอบไปด้วย ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบ และตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ ที่มีผลต่อการความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ได้ผลการทดลองโดยสรุปดังนี้

4.1 ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบ และตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบสามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ได้แต่ให้ค่าความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน

4.2 ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบให้รอยต่อที่มีความสมบูรณ์ปราศจากจุดบกพร่อง และให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 114 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min และความเร็วรอบ 500 rpm

4.3 ตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ สามารถเชื่อมรอยต่อให้มีความสมบูรณ์ได้ดีที่ค่าความเร็วรอบสูง แต่ค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นมักไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวแนวเชื่อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2553 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] Sun, Z. and Karppi, R. 1996. The Application of Electron Beam Welding for the Joining of Dissimilar Metals: An Overview. J. of Materials Processing Technology, 59: 257-267.

[2] Branes, T.A. and Pashyby, I.R. 2000. Joining Techniques for Aluminum Spaceframes used in Automobiles Part I-Solid and Liquid Phase Welding. J. of Materials Processing Technology, 99: 62-71.

[3] Kimapong, K. and Watanabe, T. 2004. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel. Welding Journal, 84-10: 277s-282s.

[4] Kimapong, K. and Watanabe, T. 2005. Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding. Materials Transaction, 46-4: 835-841.

[5] Kimapong, K. and Watanabe, T. 2005. Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Property of FSW Lap Joint between Aluminum and Steel. Materials Transaction, 46-10: 2211-2217.

[6] Chen, C.M. and Kovacevic, R. 2004. Joining of Al6061 Alloy to AISI1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding. International Journal of Machine Tool & Manufacturing, 44: 1205-1214.

[7] Uzun, H., Donne, C.D., Argagnotto, A., Ghidini, T. and Gambaro, C. 2005. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel. Materials & Design, 26: 41-46.

[8] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G. Templesmith, P. and Dawes, C.J. 1991. Friction Stir Welding. G.B. Patent Application No. 9125978.8.

[9] Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. 1997. Friction Stir Welding for the Transportation Industries. Materials and Design, 18: 269-273.

[10] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ 2552. การประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า. การประชุมการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, สงขลา, ประเทศไทย, 21-22 พฤษภาคม 2552: 521-526.

[11] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2551 .อิทธิพลความเร็วเดินแนวของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 19-3: 47-51.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล	นายศักดิ์ชัย จันทศรี
วัน เดือน ปีเกิด	19 ธันวาคม 2506
ที่อยู่	3/1935 ซอยแยกจากหมู่ 6 เดิม แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
ประวัติการทำงาน	
ปี 2538 ถึง ปัจจุบัน	อาจารย์ ระดับ 7 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ศักดิ์ชัย จันทศรี ปราโมทย์ พูนนายม สมชาย วนไทยสงค์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์, **“การเปรียบเทียบของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและทรงกรวย”,** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553, สงขลา, 2553, หน้า 826-830.