

อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อเกยอะลูมิเนียม AA 6063
และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430

**EFFECT OF FSW STRIRRERS ON AA 6063 ALUMINUM ALLOY
AND AISI 430 STAINLEES STEEL LAP JOINT**

สมชาย วนไทยสงค์
SOMCHAI WONTHAISONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

2554

อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อเกลียวมึนนิยม AA 6063
และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430



สมชาย วนไทยสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri

**EFFECT OF FSW STIRRERS ON AA6063 ALUMINUM ALLOY AND AISI 430
STAINLEES STEEL LAP JOINT**

SOMCHAI WONTHAISONG

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

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายสมชาย วนไทยสงค์





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อเกษอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430
EFFECT OF FSW STIRRERS ON AA6063 ALUMINUM ALLOY AND AISI 430 STAINLESS STEEL LAP JOINT

ชื่อนักศึกษา

นายสมชาย วนไทยสงค์

รหัสประจำตัว

115210440118 - 9

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

วัน เดือน ปี ที่สอบ

6 พฤษภาคม 2554 เวลา 09.00 - 12.00 น.

สถานที่สอบ

ห้องเฟื่องทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร. สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล)

..... กรรมการ

(ดร. ศิริชัย ต่อสกุล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ บริบูรณ์ เสนาะลำ)

..... กรรมการ

(ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

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

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของรูปร่างตัวกวนที่มีผลต่อสมบัติรอยต่ออะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430
ชื่อนักศึกษา	นายสมชาย วนไทยสงค์
รหัสประจำตัว	115270440118-9
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

บทคัดย่อ

การนำเอาวัสดุสองชนิดที่มีความแตกต่างกันมาทำการเชื่อมประสานให้ติดกันนั้นกำลังเป็นที่นิยมกันในอุตสาหกรรมการผลิตประเภทต่างๆ แต่การเชื่อมวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันนั้น เป็นเรื่องที่มีความยากลำบากมาก เนื่องจากวัสดุสองชนิดมีสมบัติในแต่ละด้านที่แตกต่างกัน จึงเกิดการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียม AA6063 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ขึ้นเพื่อศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างมหภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม

ใช้หลักการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ ได้แก่ ทรงกระบอก ทรงกระบอกเกลียว (ขวา ซ้าย) ทรงกรวย และทรงกรวยเกลียว (ขวา ซ้าย) เชื่อมด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ แนวตั้งเชื่อมที่ความเร็วรอบ 250 - 750 รอบ/นาที และความเร็วเดิน 25 - 175 มม./นาที ในลักษณะต่อ เกย โดยอะลูมิเนียมอยู่ด้านบนเกยกันกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ระยะ 30 มม. ตัวกวนกดลึกลงในเหล็กกล้าไร้สนิม 0.2 มม. อนาคตการเอียงตัวกวน 2 องศา

การทดลองสรุปผลได้ว่า รอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนดีที่สุดคือ รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 175 มม./นาที ได้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือน 13.750 kN เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในอะลูมิเนียมในปริมาณที่มาก บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมพบสารประกอบกึ่งโลหะชนิด FeAl จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี และลักษณะรอยฉีกขาดพบเนื้ออะลูมิเนียมติดอยู่ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณรอยเชื่อมหลังทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่ารอยเชื่อมต่อเกยที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีความแข็งแรงสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเฉือน

คำสำคัญ : อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน รอยต่อเกย

Thesis Title : EFFECT OF FSW STIRRERS ON AA 6063 ALUMINUM
ALLOY AND AISI 430 STAINLEES STEEL LAP JOINT

Student Name : Mr. Somchai Wonthaisong

Student ID : 115270440118-9

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Manufacturing Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisor : Dr. Kittipong Kimapong

ABSTRACT

Product manufacturing from welding process with different material are used increasingly in many manufacturing industries but it is difficult because of a different materials have possessed different properties. The friction stir welding (FSW) for welding AA6063 aluminum and AISI 430 stainless steel has been set up for studying mechanical properties and microstructure.

This evaluation was FSW with various geometries of stirrer including cylinder, screw cylinder (right-left), cone and screw cone (right-left) that welding with vertical milling machine. The evaluation parameters were rotating speed of 250 - 750 rpm and welding speed of 25 - 175 mm./min. The aluminum was overlapped the stainless steel by 30 mm. and the depth of stirrer end that plunged into stainless steel was 0.2 mm. with 2 inclined degrees of stirrer.

The summarized results are as following; The welding, which is used right-screw cylindrical stirrer , has the maximum value of shear strength at rotated speed 500 rpm., welding speed of 175 mm/min has 13.750 kN of shear strength. After inspected the microstructure found that stainless steel insert into aluminum like a branch at side area of structure. The interface area of this joint found that both materials were bonded almost completely. When inspected chemical components it found FeAl at welding interface and tearing area it found aluminum adhered on stainless steel surface at welding joint after testing the tensile strength. This evidence implied that overlapped joint welding by FSW has the strength consistent with shear strength.

Keywords : Aluminum, Stainless steel, Friction stir welding, Overlapped joint

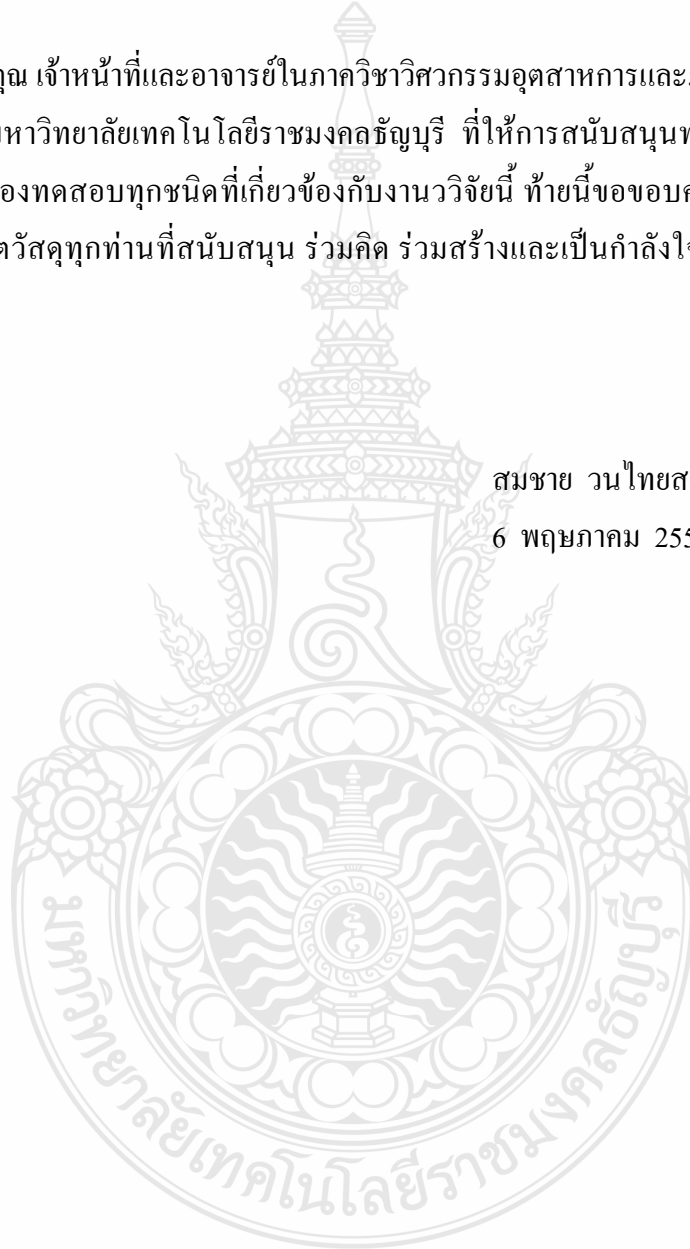
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณ ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล ดร.ศิริชัย ต่อสกุลและ รศ.บริบูรณ์ เสนาะกล้า ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำรวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปัญหอันเป็นประโยชน์ต่องานทดลองนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และโลหะการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ทำนี้ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุทุกท่านที่สนับสนุน ร่วมคิด ร่วมสร้างและเป็นกำลังใจ จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สมชาย วนไทยสงค์

6 พฤษภาคม 2554



สารบัญ

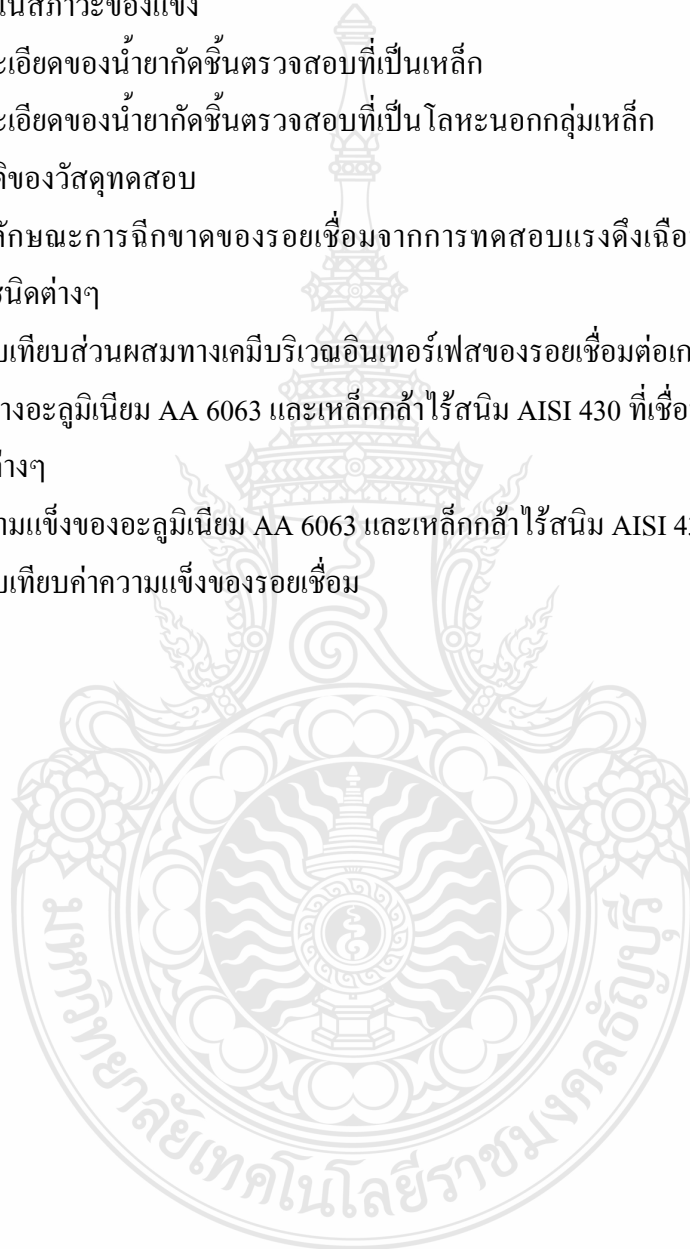
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุ	4
2.2 ตัวแปรการเชื่อม	8
2.3 การเชื่อม	8
2.4 โลหะวิทยาการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก	11
2.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน	12
2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว	19
2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการวิจัย	26
3.1 แผนการดำเนินงาน	26
3.2 การออกแบบการทดลอง/เครื่องมือ	27
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	33
3.4 วิธีการทดสอบ/วิธีการวัดผล	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	42
4.1 อิทธิพลของความเร็วยอบและความเร็วเดินตัวกวนที่มีผลต่อผิวหน้ารอยเชื่อม	42
4.2 อิทธิพลของตัวแปรเชื่อมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน	67
4.3 ลักษณะรอยฟุ้งทลายบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณรอยต่อเกย	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 รอยขีดภาพตัดขวางของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม	87
4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกย	89
4.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาครอยพังทลายของแนวเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	102
4.7 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกย	109
4.8 ศึกษาความแข็งของรอยเชื่อม	111
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	113
5.1 สรุปผล	113
5.2 ข้อเสนอแนะ	115
เอกสารอ้างอิง	116
ภาคผนวก	
ก ตารางผลการทดลอง	119
ข ภาพโครงสร้างจุลภาค มหาภาคของรอยเชื่อม เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และกราฟแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของ อิเล็กตรอนการกำหนดเทมเปอร์สำหรับอะลูมิเนียมผสม ตารางแปลงหน่วย มาตรฐานทดสอบความแข็งแบบ Vickers hardness test	127
ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	152
ประวัติผู้เขียน	167

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม	7
2.2	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างการเชื่อมแบบหลอมเหลวกับการเชื่อมในสภาวะของแข็ง	9
2.3	รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก	16
2.4	รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก	17
3.1	สมบัติของวัสดุทดสอบ	28
4.1	สรุปลักษณะการร้าวของรอยเชื่อมจากการทดสอบแรงดึงเชื่อมด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ	108
4.2	เปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกลยระหว่างอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนต่างๆ	110
4.3	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430	110
4.4	เปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยเชื่อม	112



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW)	10
2.2	แผนภาพสมมูลเฟสของอะลูมิเนียมและเหล็ก	12
2.3	หลักการของแรงเฉือนเดี่ยว	13
2.4	การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค	14
2.5	การขัดผิวชิ้นทดสอบ	15
2.6	อำนาจแยกแยะของ SEM	20
2.7	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	20
2.8	สัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร	21
2.9	สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ	21
2.10	สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ	22
2.11	สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จิสเพอร์ซีฟสเปกโตรเมตรี (EDS)	22
2.12	ลักษณะหวัคดและรอยกดของการทดสอบความแข็งVickers	24
3.1	แผนภาพการไหลกระบวนการในการทำวิทยานิพนธ์	26
3.2	แบบการวางชิ้นงานก่อนการเชื่อม	27
3.3	แผ่นรองรับชิ้นงาน	29
3.4	แผ่นกดทับชิ้นงาน	29
3.5	อุปกรณ์จับยึดแผ่นรองรับชิ้นงาน	30
3.6	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	30
3.7	การจับยึดชิ้นงานก่อนการเชื่อม	31
3.8	ตัวกวน	32
3.9	ขนาดของรูปทรงตัวกวน	32
3.10	ตัวกวนรูปแบบต่างๆ	33
3.11	เครื่องขัดกระดาษทราย	34
3.12	เครื่องกัดอัตโนมัติแนวตั้ง	35
3.13	ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม	35
3.14	เครื่องตัดชิ้นงาน	36
3.15	รูปชิ้นงานที่ตัดแล้ว	36
3.16	เครื่องทดสอบแรงดึง	37
3.17	อุปกรณ์หล่อเรซิน	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.18	ชิ้นงานหลังการหล่อเรซิน	38
3.19	เครื่องขัดผิวชิ้นงานทดสอบ	38
3.20	กล้องส่องดูโครงสร้าง	39
3.21	บริเวณทำการตรวจสอบลักษณะการฉีกขาด	39
3.22	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	40
3.23	ตำแหน่งทำการทดสอบความแข็ง	40
3.24	เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	40
4.1	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน(ก)25 (ข)50 (ค)75 (ง)100 (จ)125 (ฉ)150 และ(ช) 175 มม./นาที	43
4.2	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน(ก)25 (ข)50 (ค)75 (ง)100 (จ)125 (ฉ)150 และ(ช) 175 มม./นาที	44
4.3	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน(ก)25 (ข)50 (ค)75 (ง)100 (จ)125 (ฉ)150 และ(ช) 175 มม./นาที	45
4.4	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	47
4.5	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	48
4.6	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	49
4.7	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	51
4.8	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	53
4.10	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	55
4.11	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	56
4.12	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	57
4.13	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	59
4.14	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	60
4.15	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	61
4.16	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	63
4.17	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	65
4.19	ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก	67
4.20	ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา	68
4.21	ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย	69
4.22	ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย	70
4.23	ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา	70
4.24	ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย	71
4.25	การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเนื่องของตัวกวนแต่ละรูปทรงที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที	72
4.26	การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเนื่องของตัวกวนแต่ละรูปทรงที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที	73
4.27	การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเนื่องของตัวกวนแต่ละรูปทรงที่ความเร็วรอบตัวกวน 750 รอบ/นาที	74
4.28	รอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	75
4.29	รอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	76
4.30	รอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	76
4.31	รอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.41	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	84
4.42	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	84
4.43	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	85
4.44	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	86
4.45	รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	86
4.46	รอยฉีกขาดภาพตัดขวางจากการทดสอบแรงดึงเนื่องที่ค่าสูงสุด - ต่ำสุด แต่ละชนิดตัวกวน : (ก) (ข) ทรงกระบอก 500 รอบ/นาที, 50 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 175 มม./นาที (ค) (ง) ทรงกระบอกเกลียวขวา 250 รอบ/นาที, 150 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 150 มม./นาที (จ) (ฉ) ทรงกระบอกเกลียวซ้าย 250 รอบ/นาที, 125 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 75 มม./นาที (ช) (ซ) ทรงกรวย 150 รอบ/นาที, 25 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 25 มม./นาที (ฅ) (ณ) ทรงกรวยเกลียวขวา 250 รอบ/นาที, 75 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 75 มม./นาที (ญ) (ฎ) ทรงกรวยเกลียวซ้าย 250 รอบ/นาที, 125 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 50 มม./นาที	88
4.47	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	90

สารบัญรูป (ต่อ)

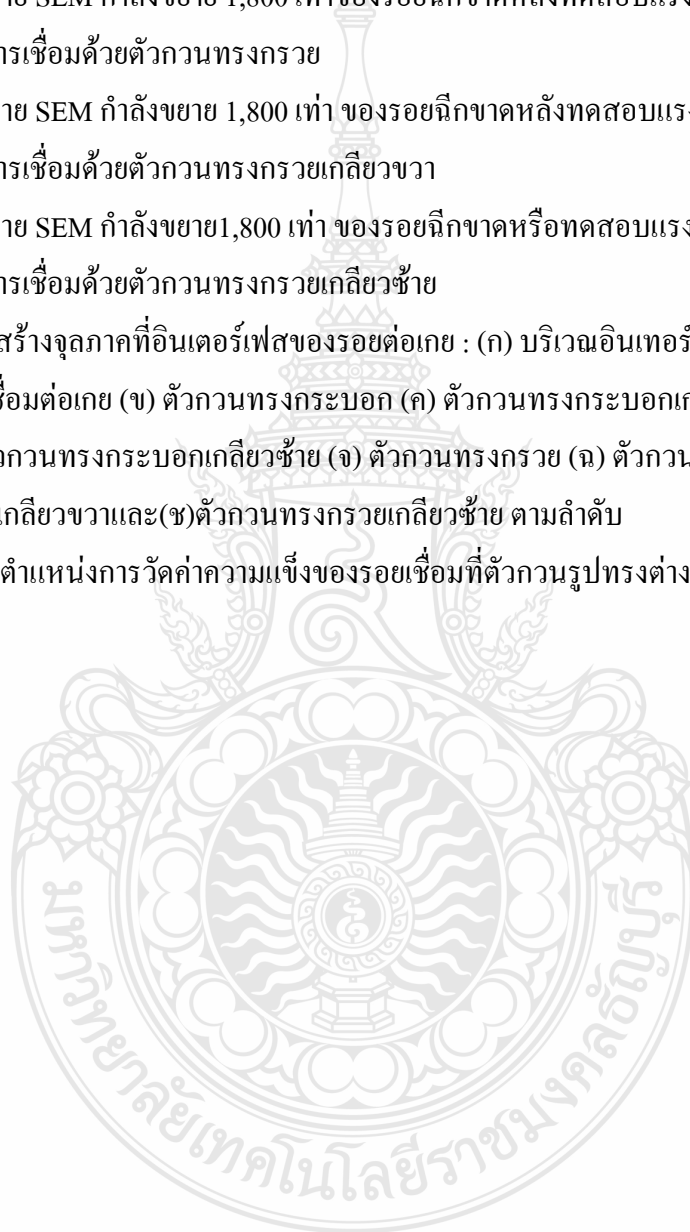
รูปที่		หน้า
4.48	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	90
4.49	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	91
4.50	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	92
4.51	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	92
4.52	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	93
4.53	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 250 นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	94
4.54	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 500 นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	94
4.55	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 750 นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	95
4.56	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.57	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	96
4.58	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	97
4.59	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	97
4.60	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	98
4.61	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	98
4.62	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยทรงกรวยเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	99
4.63	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยทรงกรวยเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	100
4.64	โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยทรงกรวยเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที	101
4.65	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก	102
4.66	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.67	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย	104
4.68	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย	105
4.69	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่า ของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา	106
4.70	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่า ของรอยฉีกขาดหรือทดสอบแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย	107
4.71	โครงสร้างจุลภาคที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อเกย : (ก) บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกย (ข) ตัวกวนทรงกระบอก (ค) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา (ง) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย (จ) ตัวกวนทรงกรวย (ฉ) ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาและ(ช)ตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย ตามลำดับ	110
4.72	แสดงตำแหน่งการวัดค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ตัวกวนรูปทรงต่างๆ	111



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ในปัจจุบันมีการนำเอาวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อะลูมิเนียมผสม มาใช้ทดแทนชิ้นส่วนบางอย่างที่ทำจากเหล็ก เพื่อเป็นการลดน้ำหนักโครงสร้างของยานยนต์ ส่งผลให้ยานยนต์ที่ผลิตออกมามีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและเชื้อเพลิงมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การนำเหล็กและอะลูมิเนียมมาต่อเข้าด้วยกันจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการผลิตโครงสร้างของยานยนต์ แต่การเชื่อมเหล็กและอะลูมิเนียมเข้าด้วยกันนั้นมีความยากลำบากเนื่องจาก วัสดุต่างชนิดกันมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางกลที่แตกต่างกัน จึงมักเกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น เช่น เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างส่วนผสมของวัสดุทำให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่แข็งและเปราะอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงหรือความแตกต่างในเรื่องการนำความร้อนของวัสดุ เมื่อทำการเชื่อมอาจทำให้เกิดการกระจายความร้อนที่แตกต่างกันส่งผลให้วัสดุเกิดความเค้นมีความต้านทานต่อแรงกระทำได้น้อย ดังนั้นการใช้กระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในการต่อวัสดุที่ต่างชนิดกันจึงมีความสำคัญในการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเรื่อยมา [1]

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็งที่มีการกีดกันโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อะลูมิเนียมผสม [2] กระบวนการเชื่อมนี้เป็นการเชื่อมวัสดุต่างชนิดให้ติดกันที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบัน ลักษณะของกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เริ่มจากตัวกวนสอดเข้าไปบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองแผ่น เมื่อความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับวัสดุ ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหลและเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อม เมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่วัสดุในสภาวะของไหลจะถูกถ่ายเทมาอยู่ด้านหลังของตัวกวน จากนั้นตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมจะกดอัดและผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นแนวเชื่อมขึ้น [3]

ในการศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ผ่านๆ มา มีการศึกษาสมบัติทางกล และโครงสร้างของการต่อชนระหว่างอะลูมิเนียม 6063 T1 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ด้วยตัวกวนที่มีรูปร่างต่างๆ [2] การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติทางกลของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด A 5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS 400 โดยตัวแปรคือ ความเร็วของตัวกวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และความลึกของตัวกวนที่สอดเข้าไปในเนื้อโลหะเท่านั้น [4] วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน โดยมีจุดประสงค์ในการ

เชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ด้วยตัวกวนที่มีรูปร่างต่างๆ แล้วเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อเกย โดยคาดว่ากรรวมตัวกันระหว่างวัสดุจะสามารถทำได้ดีขึ้นและค่าความแข็งแรงของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นได้ [2]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อประยุกต์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ประกอบด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ ได้แก่ ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกล ทางเคมี และศึกษาโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 เพื่อเปรียบเทียบแต่ละรูปทรงของตัวกวน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 เชื่อมรอยต่อแบบเกยแผ่นอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 ขนาด กว้าง 105 มม. ยาว 150 มม.หนา 3 มม. และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ขนาด กว้าง 105 มม. ยาว 150 มม. และหนา 2 มม.

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวกวนที่มีรูปร่างต่างๆ ได้แก่ ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย

1.3.3 ศึกษาตัวแปรการเชื่อม [5]

- 1) ความเร็วรอบของตัวกวน (S) 250 500 และ 750 รอบ/นาที
- 2) ความเร็วเดินของแนวเชื่อม (F) 25 50 75 100 125 150 175 มม./นาที
- 3) ความเอียงของตัวกวนเมื่อเทียบกับแกนหมุนของเครื่องกัด 2 องศา
- 4) ความลึกของตัวกวนที่กดลงไปบนเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่า 0.2 มม.

1.3.4 ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม โดยทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนและทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน การแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ในอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063

1.3.5 ศึกษาลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด และหาส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ประยุกต์การเชื่อมเสียดทานและการทดสอบงานเชื่อมตามแบบมาตรฐาน

1.4.2 สามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้ในภาคส่วนของอุตสาหกรรมยานยนต์ภายในประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.3 สามารถเสนอข้อมูลเพื่อการพัฒนาและทำการศึกษาต่อ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนตัว กวนหลายรูปแบบที่นำมาใช้น้อยมากในปัจจุบัน

1.4.4 ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีความแข็งแรงมากกว่า หรือเมื่อเทียบกับ ลักษณะการเชื่อมแบบอื่นๆ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุ

2.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม [6]

สเตนเลส ตามศัพท์บัญญัติเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) มีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่า การเติม นิกเกิล โมลิบดีนัม ไททาเนียม ไนโอเบียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิดของคุณสมบัติเชิงกลและการใช้ลงในเหล็กกล้าธรรมดา ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้

เหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ใช่อัลลอยส์แต่ถูกจัดอยู่ในชนิดของเหล็ก อัลลอยส์จะมี ส่วนประกอบเป็นโครเมียมอย่างน้อย 10.5% ส่วนประกอบอื่นๆ ได้ถูกผสมเพิ่มขึ้นมาเพื่อเพิ่มการ ป้องกันการเกิดสนิมและการเกิดความร้อนได้ดีขึ้นเพิ่มคุณสมบัติทางกลไกและส่วนผสมใหม่ๆ เข้าไป ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจึงมีมากกว่า 50 ชนิดโดยถูกกำหนดขึ้น โดยองค์กร The American Iron And Steel Institute (AISI) การแยกชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 3 ชื่อ คือ ส่วนประกอบทาง เทคนิคของโลหะ ระบบเรียงลำดับของ AISI และการจัดกลุ่มเดียวกันของระบบเรียงลำดับ ได้ถูก พัฒนาโดยองค์กรของอเมริกาที่ทำหน้าที่ทดสอบแร่ธาตุ (ASTM) และองค์กรยานยนต์วิศวกรรม โดย จะกำหนดตัวเลขให้กับโลหะและอัลลอยด์ทุกชนิด

1) ประเภทของอัลลอยด์

- เบอร์ 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมพื้นฐานที่ใช้ในการตกแต่งเพื่อความสวยงาม เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ง่ายต่อการขึ้นรูปและป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี
- เบอร์ 304 L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 ที่ใช้คาร์บอนเป็นส่วนประกอบ น้อยลงมาใช้ในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง
- เบอร์ 316 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกแบบให้มาป้องกันการเกิดสนิมได้เป็น อย่างดี ถูกใช้ในงานอุตสาหกรรมหนักและสถานที่ใกล้ทะเล
- เบอร์ 316 L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316 ที่มีส่วนผสมของคาร์บอนน้อย
- เบอร์ 430 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้โครเมียมเป็นส่วนประกอบ 100% และมี โอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าเบอร์ 300 พวกนี้นิยมใช้ตกแต่งภายใน [6]

2) สมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่นใน ส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนความสามารถทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม มีข้อสังเกต 3 ประการคือ

- การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราความคืบดี เมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส
- การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายเทความร้อน)
- การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมากๆ ได้ โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย เช่น ในการทำหลังคา [6]

3) สมบัติเชิงกล

เหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70 – 80 % จึงทำให้มีสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการคือ ความแข็งและความแกร่ง จะเห็นว่าพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่าที่เป็นกลางของทั้งความแข็ง ความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก

โลหะทุกชนิดทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์บนผิวโลหะหรือออกไซด์ที่เกิดบนผิวเหล็กทั่วไปจะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์และทำให้เกิดสภาพพื้นผิวเหล็กผุกร่อน ที่เราเรียกว่า เป็นสนิม แต่เหล็กกล้าไร้สนิม มีโครเมียมผสมอยู่ 10.5% ขึ้นไป ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นฟิล์มปกป้อง หรือพาสซีฟเลเยอร์ (Passive layer) ที่เหมือนเกราะป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า พาสซีวิตี (Passivity) ฟิล์มปกป้องนี้จะมีขนาดบางมาก (สำหรับแผ่นสแตนเลสบางขนาด 1 มม. ฟิล์มหรือพาสซีฟ เลเยอร์นี้ จะมีความบางเทียบเท่ากับวงกระดาษ 1 แผ่น บนตึกสูง 20 ชั้น) และมองตาเปล่าไม่เห็นฟิล์มนี้จะเกาะติดแน่น และทำหน้าที่ปกป้องสแตนเลส จากการกัดกร่อนทั้งหมด หากนำไปผลิตแปรรูปหรือใช้งานในสภาพเหมาะสม เมื่อเกิดมีการขีดข่วน ฟิล์มปกป้องนี้จะสร้างขึ้นใหม่ได้เองตลอดเวลา

ความคงทนของพาสซีฟเลเยอร์ เป็นปัจจัยหลักของความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อนอันได้แก่ ความรุนแรง ของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็นกรดปริมาณสารละลายคลอไรด์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณโครเมียมจะช่วยเพิ่มความต้านทาน การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมนิกเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนโดยทั่วไป ให้ทนสภาวะกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วนโมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) [6]

2.1.2 อะลูมิเนียม [7]

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ซึ่งมีสมบัติเด่นหลายประการ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงต่ำ แต่สามารถนำไปผสมกับธาตุต่างๆ ได้ง่าย เช่น ทองแดง สังกะสี แมกนีเซียม แมงกานีส และซิลิกอน เช่น Duralumin ในปัจจุบันวัสดุเกือบทั้งหมดที่เรียกว่าอะลูมิเนียมเป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์พบเฉพาะเมื่อต้องการความทนต่อการกัดกร่อนมากกว่าความแข็งแรงและความแข็ง เมื่อรวมกับกระบวนการทางความร้อนและกลศาสตร์ (Thermo-mechanical processing) โลหะผสมของอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้น โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นส่วนสำคัญของเครื่องบินและจรวดเนื่องจากมีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

1) ประเภทของอะลูมิเนียม [8]

จากสมบัติที่หลากหลายของอะลูมิเนียมที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมตามกรรมวิธีการผลิตได้ดังนี้

- อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure aluminum) มีเปอร์เซ็นต์ของอะลูมิเนียมอยู่ถึง 99.00 % และมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่อีก 1% เช่น เหล็กและซิลิกอน หรือไม่มีส่วนผสมอื่นๆ อยู่เลย อะลูมิเนียมชนิดนี้ใช้ในงานขึ้นรูปได้ดี
- อะลูมิเนียมผสม (Wrought aluminum) คือ อะลูมิเนียมที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ตั้งแต่หนึ่งธาตุขึ้นไปทำให้มีความคงทนต่อแรงดึงสูง ธาตุที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส แมกนีเซียม โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล
- อะลูมิเนียมหล่อ (Cast aluminum) อะลูมิเนียมชนิดนี้ได้จากกรรมวิธีการหล่อ 3 แบบใหญ่ๆ คือ หล่อทราย หล่อแบบถาวร และหล่อแบบอัดฉีด (Die cast) ซึ่งอะลูมิเนียมหล่อสามารถที่จะทำการเชื่อมได้แต่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยก่อนการเชื่อมจะต้องทำการอุ่นชิ้นงานเสียก่อน เพื่อป้องกันการสูญเสียสมบัติของมันเอง ข้อเสียของอะลูมิเนียมหล่อ คือสมบัติทางกลด้อยกว่าอะลูมิเนียมเหนียว [8]

2) สมบัติของอะลูมิเนียม [8]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม [8]

สมบัติทางกล	สมบัติทางกายภาพ
<p>1) มีความหนาแน่นน้อย มีน้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง (Strength to weight ratio) จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ไม้สอยตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบินจรวด จีปนาอวกาศ และอุปกรณ์ในรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลงจะได้ประหยัดเชื้อเพลิงจุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย</p> <p>2) ค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94% (International annealed copper standard: IACS) ซึ่งไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบาดังนั้น จึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในกรณีที่สำคัญค่านึงถึงเรื่องน้ำหนักเบาเป็นส่วนสำคัญ</p> <p>3) เป็นโลหะไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ (Nontoxic) และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห้องรับอาหาร</p> <p>4) ผิวหน้าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีดัชนีการสะท้อนกลับของสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในเฟลชถ่ายรูป จานสะท้อนแสงในคอมพิวเตอร์ ไฟหน้ารถยนต์</p> <p>5) ทนทานต่อการเกิดสนิมและการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานโดยทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนทานการกัดกร่อนในกรณีที่ชั้นผิวออกไซด์ถูกสารละลายที่สามารถละลายชั้นผิวออกไซด์ได้ เช่น ค่างเข้มข้น ปูนขาวสด และหินปูนก่อสร้าง</p>	<p>1) ความแข็งแรง(Tensile strength) 8-10kg/mm²</p> <p>2) พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) 3 kg/mm²</p> <p>3) อัตราการยืดตัว (Percent elongation) 40-45 %</p> <p>4) ความแข็ง (Hardness) 16-20 Hv</p> <p>5) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) 7,800 kg/mm²</p> <p>6) มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่ายและรุนแรงโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก</p>

2.2 ตัวแปรการเชื่อม [5]

2.2.1 รูปร่างตัวกวน

หน้าที่หลักของตัวกวน คือ เป็นผิวสัมผัสกับวัสดุชิ้นงาน โดยทำให้เกิดความร้อน และเกิดการรวมของวัสดุรอบรอยต่อในแนวเชื่อมเข้าด้วยกัน ในการทดลองนั้นจะมีรูปร่างตัวกวนหลายแบบ โดยแต่ละแบบนี้จะให้ความแข็งแรงแก่รอยเชื่อมแตกต่างกัน

2.2.2 ความเร็วรอบ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และมุมเอียงของตัวกวน

ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้จะทำให้วัสดุบริเวณแนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยความเร็วรอบที่แตกต่างกันนั้น ทำให้วัสดุรอบๆ ตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนที่แตกต่างกันไป ในขณะที่เดียวกันความเร็วเดินแนวเชื่อมก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุจากด้านหน้าของตัวกวนไปสู่ด้านหลังของตัวกวนทำให้แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ที่แตกต่างกันไป ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมนั้นจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วเดินแนวเชื่อมว่าสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ส่วนความเอียงของตัวกวนที่ทำมุมกับแกนตั้งฉากของเครื่องก็เช่นกัน หากมีค่าเหมาะสมจะทำให้บ่าด้านหลังของตัวกวนกดและกวนวัสดุรอบๆ ตัวกวนให้มีการผสมรวมกัน ได้มากทำให้แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์มากขึ้น

2.2.3 ความลึกของตัวกวนที่กดลงไปบนเหล็กกล้าไร้สนิม

ระยะความลึกของตัวกวนที่กดลงไปบนเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมมีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อค่าความแข็งแรงตั้งแต่ระยะที่กดลงไปนั้นต้องมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบและความเร็วเดินด้วย ถ้าความสัมพันธ์กันมีค่าที่เหมาะสมแล้วค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบแรงดึงก็มีค่าที่มากตามกันไปด้วย

2.3 การเชื่อม (Welding) [8]

การเชื่อม หมายถึง การต่อวัสดุโดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลาย และการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม การเชื่อมสามารถจำแนกได้เป็นสองชนิด คือ

การเชื่อมแบบหลอมเหลว (Fusion welding) คือ การประสานโลหะสองชิ้นให้รอยต่อเกิดเป็นแนวเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแนวประสานโดยใช้ความร้อนและลวดเชื่อมเติมเนื้อประสาน การเชื่อมอาจจะใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานหรืออาจจะไม่ใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานก็ได้ นอกจากนี้ยังจำแนกชนิดการเชื่อมได้ตามลักษณะของพลังงานความร้อนที่นำมาใช้เชื่อมตามลักษณะของมันเป็นแก๊สที่ปกคลุมบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมขณะ โลหะหลอมเหลวไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศได้

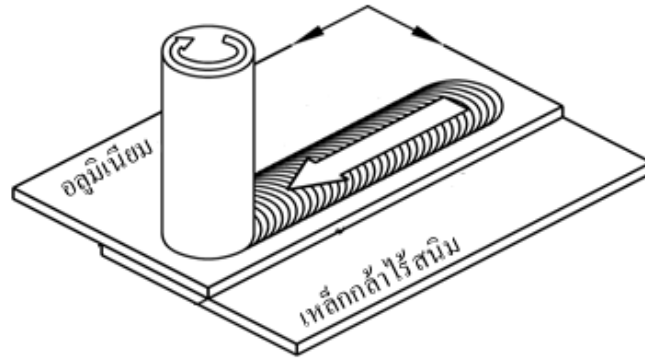
การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) คือ การประสานโลหะสองชนิดให้ติดกัน โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน โดยอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เช่น การเชื่อมจุด (Spot welding) การเชื่อมจากเปลวแก๊ส (Gas press welding) การเชื่อมจากสารเคมีพร้อมแรงอัดไม่ใช้ความร้อนเช่นการเชื่อมอัดเย็น (Cold press welding) และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นต้น [8]

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างการเชื่อมแบบหลอมเหลวกับการเชื่อมในสภาวะของแข็ง [8]

การเชื่อม (Welding)	ข้อดี	ข้อเสีย
การเชื่อมแบบหลอมเหลว (Fusion welding)	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนการผลิตต่ำ - ได้แนวเชื่อมที่แข็งแรง - วิธีการเชื่อมไม่ซับซ้อน - เหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นอันตรายกับสายตา - เกิดการบิดงอหลังการเชื่อม - เกิดฝุ่นควันระหว่างการเชื่อม - แนวเชื่อมที่ได้จะไม่เท่ากันตลอด - เกิดแนวปกคลุมหลังการเชื่อม - ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญสูงในการเชื่อม
การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding)	<ul style="list-style-type: none"> - ได้แนวการเชื่อมที่สวยงาม - ไม่ต้องทำการตกแต่งแนวเชื่อม - เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ - สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนการผลิตสูง - แนวเชื่อมที่ได้อาจไม่แข็งแรง - มีขอบเขตของการเชื่อมอย่างจำกัด - ไม่สะดวกในการใช้งานนอกสถานที่

2.3.1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding : FSW) [9]

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) ใช้เชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional fusion welding) หลักการในการเชื่อม คือ ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วสูง สอดเข้าไปในแนวต่อชนหรือต่อเกยของแผ่นวัสดุ 2 แผ่นและทำให้เกิดความร้อนเสียดทานภายใต้ปาเครื่องมือ และทำให้วัสดุอ่อนตัวลง วัสดุที่อ่อนตัวจะถูกดันให้เคลื่อน ที่รอบๆ ตัวกวน และเมื่อตัวกวนเคลื่อนที่ ปาตัวกวนจะกดและอัดวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุเป็นแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) [9]



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) [9]

1) ลักษณะการทำงาน

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน เป็นการเชื่อมที่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลาย (Melting temperature) ของวัสดุทุกชนิดโดยไม่ต้องใช้โลหะเติม (Filler) และสารปกคลุม (Flux) โดยในการเชื่อมจะใช้เครื่องกัดแนวตั้ง ที่หมุนด้วยความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กัน ตามรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งตัวกวนจะไม่หลอมติดกับวัสดุชิ้นงาน เนื่องจากตัวกวนทำมาจากวัสดุที่ต้านทานความร้อนได้สูง และมีความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุชิ้นงาน [8]

2) ข้อดีและข้อเสียของกรรมวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน FSW

ข้อดี

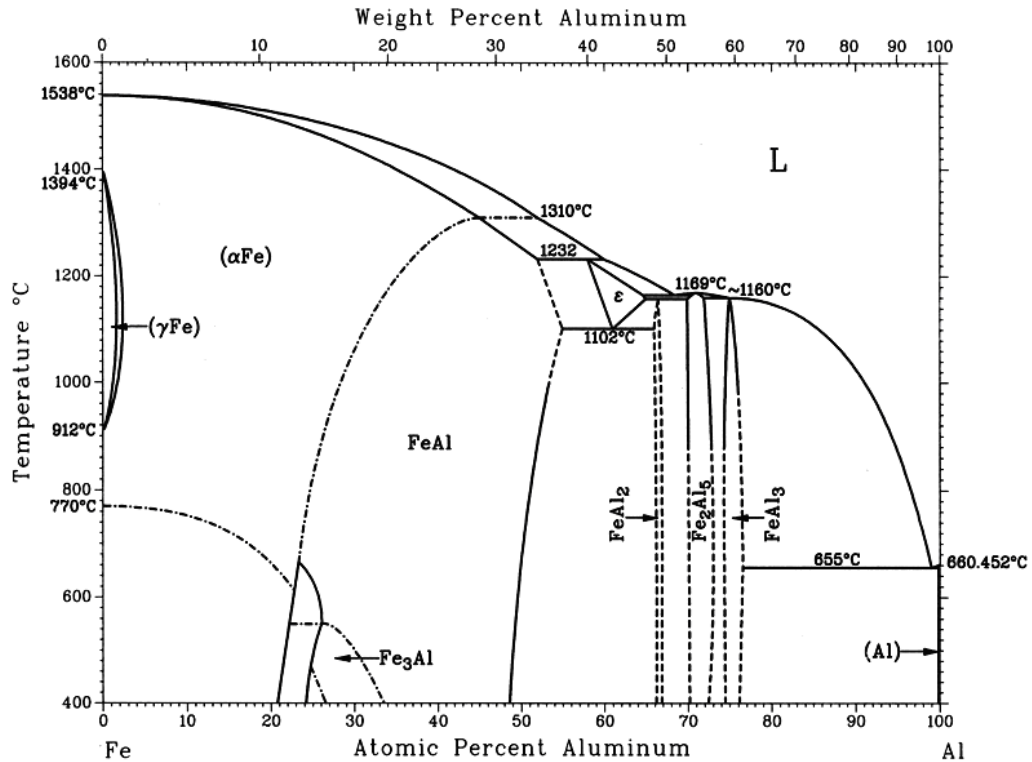
- เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งของการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อะลูมิเนียมจะหดไป นอกจากนั้นผิวออกไซด์หนาที่เคลือบอยู่บนผิวของอะลูมิเนียมจะถูกทำให้แตกออกด้วยการขัดหมุนของตัวกวนและกระจายไปทั่วทั้งแนวเชื่อม และลดปัญหาการเสื่อมสภาพของแนวเชื่อมลง แนวเชื่อมที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น
- กระบวนการเชื่อมราคาไม่แพง สามารถใช้เครื่องกัดในการเชื่อมได้
- ผิวหน้าแนวเชื่อมคุณภาพดีเยี่ยม
- ใช้พลังงานน้อย
- เชื่อมวัสดุหนาสูงสุดได้ 12 มม.
- ความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength) ดีเยี่ยม

ข้อเสีย

- ต้องจับยึดชิ้นงานให้แน่นเสมอเพราะแรงที่เกิดขึ้นมีค่าสูง
- ผลจากการเชื่อมทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้สมบัติเดิมตลอดชิ้นงาน
- มีจุดบกพร่องที่มักเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม ที่เกิดจากการถอดตัวงานออกจากแนวเชื่อม
- เหมาะสมกับการเชื่อมทำราบ ชิ้นงานแบนยาว
- ช่องว่างระหว่างแผ่นมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10% ของความหนาแผ่นชิ้นงานที่เชื่อมในลักษณะต่อชน [9]

2.4 โลหะวิทยาการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก

การต่อเชื่อมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันเป็นวิธีที่ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากวัสดุต่างชนิดกันมีสมบัติทางกล ภายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน และเมื่อทำการเชื่อมหรือรวมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกัน มักเกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น เช่น ความแตกต่างของโมดูลัสอีลาสติก (Elasticity modulus) ก่อให้เกิดความไม่เข้ากันทางกล (Mechanical incompatibility) และก่อให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) หรือความเค้นไม่ต่อเนื่อง (Stress discontinuities) ที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของการนำความร้อนของวัสดุต่างชนิดเมื่อทำการเชื่อมยึด ทำให้เกิดการกระจายความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกัน และทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stresses) ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถต้านทานต่อแรงกระทำได้น้อย [10] ส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างทำให้เกิดการก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound : IMC) ที่มีความแข็งและเปราะซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ลดความแข็งแรงของรอยต่อ IMC ที่มักก่อตัวขึ้นในการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กมี 5 ชนิดใหญ่ๆ คือ Fe_3Al $FeAl$ $FeAl_2$ Fe_2Al_3 และ $FeAl_3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และสามารถแบ่งกลุ่มตามส่วนผสมทางเคมีออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีปริมาณของเหล็กผสมอยู่มาก (Iron-rich IMC) ประกอบด้วย Fe_3Al และ $FeAl$ มีสมบัติ คือ มีความต้านทานการสึกกร่อน (Wear resistance) มีความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) และมีความแข็งแรง (Strength) สูง จึงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ขณะที่อีกกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง (Aluminum-rich IMC) ประกอบด้วย $FeAl_2$ Fe_2Al_3 และ $FeAl_3$ ซึ่งมีสมบัติที่แข็งแรงและเปราะ ความต้านทานต่อแรงกระทำต่ำ เป็นกลุ่มที่ควรหลีกเลี่ยงในการนำมาใช้งาน [11] ดังนั้นการหากระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในการต่ออะลูมิเนียมและเหล็กกล้า เข้าด้วยกันเพื่อนำไปใช้งานจึงเป็นเรื่องสำคัญที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียมและเหล็ก [12]

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

2.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

2.5.1 การทดสอบแรงเฉือน [13]

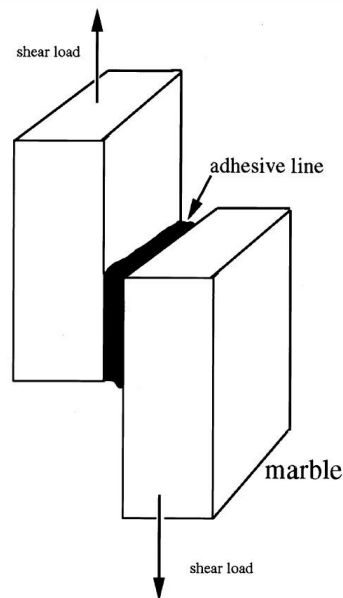
การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวนานกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ การเฉือนนี้แตกต่างจากการดึงและการดัดซึ่งใส่แรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน

การทดสอบแรงเฉือนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

- 1) แรงเฉือน โดยตรง (Direct shear)
- 2) แรงเฉือนจากการบิด (Torsional shear)

แรงเฉือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการใส่แรงสวนทางกันสองทิศทาง โดยแรงเฉือนตรงสามารถแยกออกได้เป็นสองแบบคือแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear) กับแรงเฉือนคู่ (Double shear) แรงเฉือน

เดี่ยวยังเกิดขึ้นตลอดแนวระนาบเดี่ยวย ในขณะที่แรงเฉือนจะเกิดระหว่างสองระนาบ พร้อมกัน ในทางทฤษฎีความแข็งแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวยกับแรงเฉือนคู่ควรมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดจึงทำให้แรงเฉือนทั้งสองอาจไม่เท่ากันเสมอไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แสดงหลักการของแรงเฉือนเดี่ยวย [14]



รูปที่ 2.3 หลักการของแรงเฉือนเดี่ยวย [15]

- ข้อจำกัดในการใช้การทดสอบแรงเฉือนตรง เนื่องจาก
 - กำลังรับแรงเฉือนที่ได้เป็นค่าโดยประมาณของกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ
 - หน่วยแรงดัด (Bending stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน/ระยะเยื้องศูนย์กลาง
 - แรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือทดสอบ
 - ระดับความแข็งแรงและความคมของแผ่นเหล็กที่ใช้เฉือนตัวอย่างทดสอบ
- ไม่สามารถหาสมบัติอื่นๆ เช่น Elastic strength และ Shearing modulus of elasticity ของวัสดุได้ เนื่องจากไม่สามารถวัดหาค่า Shearing strain [10]

2.5.2 ชิ้นทดสอบ (Specimens)

ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบนั้นผ่านกระบวนการตัดเฉือนที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ ความสะอาดของชิ้นงานก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดสอบเช่นกัน ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบนั้น ต้องเก็บรักษาในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อป้องกันค่าคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ร้อนและเย็นเกินไป

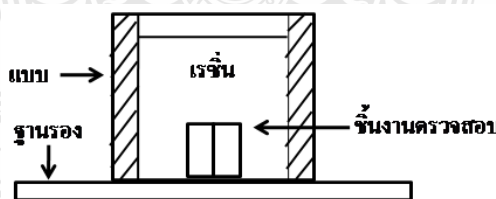
2.5.3 วิธีการทดสอบ

การเค้นตรงและการเค้นบิดส่วนใหญ่จะทดสอบด้วยการทดสอบแรงเค้น โดยในการทดสอบแรงเค้นตรงหรือแบบสวนทางนั้น ชิ้นทดสอบจะถูกตรึงสวนทางกัน การทดสอบแรงเค้นแบบสวนทางนี้ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเค้นของ วัสดุ โดยความแม่นยำของค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความคมของชุดอุปกรณ์ตรึงยึด ชิ้นทดสอบ ข้อจำกัดอื่น ๆ ในการทดสอบแรงเค้นแบบสวนทางคือไม่สามารถทำการจัดเก็บ ข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลส่วนนี้ได้ทำให้ไม่สามารถ คำนวณค่าความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่นหรือโมดูลัสริจิสได้ สมบัติทางกลที่สามารถบอกได้จากการทดสอบแรงเค้นแบบสวนทางมีเฉพาะแรงที่จำเป็นในการเค้น ชิ้นทดสอบเท่านั้น และเมื่อนำไปเทียบกับขนาดหน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบทำให้สามารถ คำนวณค่าความแข็งแรงเค้นของวัสดุโดยประมาณได้ [8]

2.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างมหภาค [8]

1) การเตรียมชิ้นตรวจสอบ

การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาดสำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มม. หรือ 1 นิ้ว และความสูงไม่น้อยกว่า 15 มม. แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าควรมีขนาด 25×25×20 มม. ทั้งนี้เพื่อให้การจัดผิวกระทำได้อย่างง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค [8]

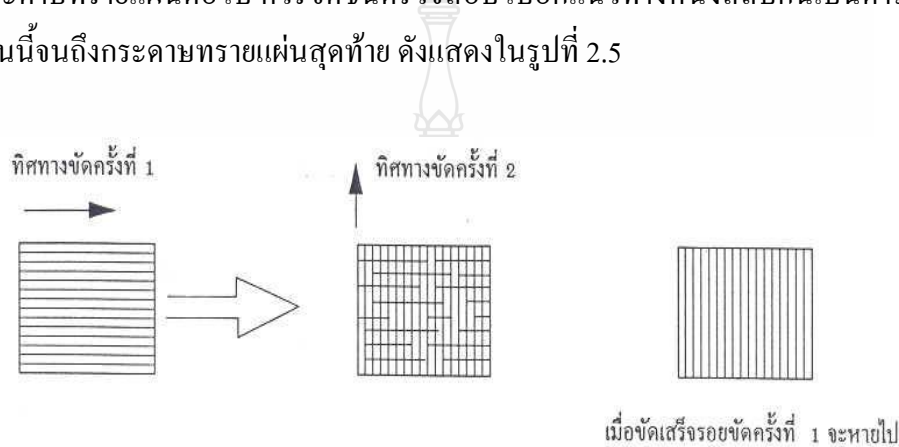


รูปที่ 2.4 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค

หลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นต่อไปเพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การขัดผิวชั้นตรวจสอบ

การขัดผิวชั้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 600 800 1,000 และขัดจนถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหน้าเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชั้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การขัดผิวชั้นทดสอบ [8]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชั้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

- การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชั้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้เพชรขัดผิวของชั้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน
- การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชั้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริก ร้อยละ 2-4 ผสมแอลกอฮอล์

ตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆ แยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [8] ดังตารางที่ 2.3 นี้ จะประกอบด้วยรายละเอียดของชื่อน้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้บอกเวลาในการกัดด้วยน้ำยาเหล่านั้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก [8]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric acid and hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO ₃) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตรและเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มชิ้นตรวจสอบ นาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไนตริก (Ferric chloride and nitric)	ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl ₃) ในกรดไฮโดรริก	เหล็กกล้าไร้สนิม	จุ่มแช่หรือเช็ดด้วย สำลี นาน 5 - 120 วินาที
ไนตริกและอะเซติก (Nitric and acetic acid)	ไนตริกแอซิด (HNO ₃) 30 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้มอะเซติกแอซิด (CH ₃ COOH) 20 มิลลิลิตร	เหล็กไร้สนิมที่มี ส่วนผสมของนิกเกิล และโคบอลต์เป็น จำนวนมาก	เช็ดถูด้วยสำลีชุบ กรด นาน 10-30 วินาที
โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite)	โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Na ₂ S ₂ O ₅) 15 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าเครื่องมือ รอบสูง	กัดด้วยกรดใน เวลา 10-60 วินาที
ไนตัล (Nital)	ไนตริกแอซิด (HNO ₃) 1 มิลลิลิตร ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กชุบแข็งผิวและ เหล็กทั่วไป	กัดด้วยกรด นาน 10-15 วินาที
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)	ไฮโดรคลอริกแอซิด (HCl) 50 มิลลิลิตร ผสมแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าที่มี ส่วนผสมของ โครเมียมและนิกเกิล	กัดด้วยกรด นาน 10-30 วินาที

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [8]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริก	กรดไนตริก (HNO ₃) 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90 มิลลิลิตร	ทองแดงและทองเหลือง	จุ่มหรือเช็ด นาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริก (Ferric chloride and hydrochloric acid)	เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl ₃) 2-5 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5-30 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	ทองแดงผสม	จุ่มหรือเช็ดดูด้วยสำลี นาน 5-15 วินาที
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ ถึง 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือเช็ด นาน 15-45 วินาที
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	เช็ดด้วยสำลี นาน 10-15 วินาที
กรดอะซิติก (Acetic acid)	กรดอะซิติก 2-5 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	แมกนีเซียมผสม	จุ่มแช่
กรดไนตริกและกรดอะซิติก (Nitric acid and acetic acid)	กรดไนตริก (HNO ₃) 50 มิลลิลิตร ผสมกับกรดอะซิติก	นิกเกิลผสม	ควรรจุ่มหรือเช็ด น้ำยาในทันทีที่ผสมน้ำยาเสร็จ

- การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน [8]

2.5.5 การส่องกล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่องดูวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถมองเห็นรายละเอียดได้ด้วยตาเปล่า สามารถเลือกใช้กล้องได้ตามกำลังขยายของภาพที่ต้องการ กล้องจุลทรรศน์มี 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) [7]

1) ลักษณะกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

- Light microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่พบอยู่ทั่วไป โดยเวลาส่องดูจะเห็นพื้นหลังเป็นสีขาว และจะเห็นเชื้อจุลินทรีย์มีสีเข้มกว่า
- Dark field microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีพื้นหลังเป็นสีดำเห็นเชื้อจุลินทรีย์สว่าง เหมาะสำหรับใช้ส่องจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก ที่ติดสียาก
- Phase contrast microscope ใช้สำหรับส่องเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังไม่ได้ทำการย้อมสี จะเห็นชัดเจนกว่า Light microscope
- Fluorescence microscope ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น อัลตราไวโอเลต ส่องดูจุลินทรีย์ที่ย้อมด้วยสารเรืองแสง ซึ่งเมื่อกระทบกับแสง UV จะเปลี่ยนเป็นแสงช่วงที่มองเห็นได้ แล้วแต่ชนิดของสารที่ใช้ พื้นหลังมักมีสีดำ

2) ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์

- ช่วยในการมองเห็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าตาเราจะมองเห็น
- ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลหลักฐานทางชีววิทยา

3) หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด (Resolution / Resolving power) หมายถึงความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุด ให้มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two points of discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ

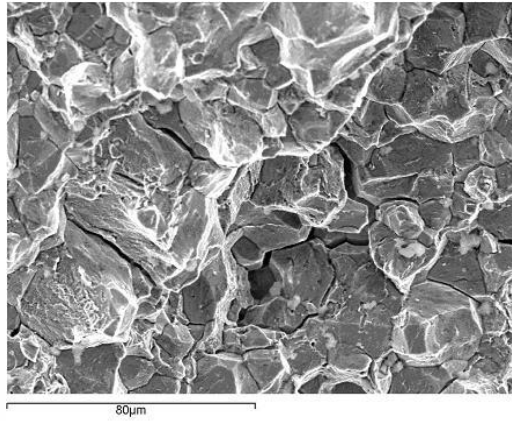
4) การใช้กล้องจุลทรรศน์

- การจับกล้อง ใช้มือหนึ่งจับที่แขนของกล้อง และใช้อีกมือหนึ่งรองรับที่ฐานตั้งลำกล้องให้ตรงเสมอเพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนประกอบต่างๆ เลื่อนหลุดจากตำแหน่ง
- หมุนเลนส์ใกล้วัตถุให้เป็นเลนส์ที่มีกำลังขยายต่ำสุดให้อยู่ในตำแหน่งแนวของลำกล้อง
- ปรับกระจกเงา หรือเปิดไฟเพื่อให้แสงเข้าลำกล้องได้เต็มที่

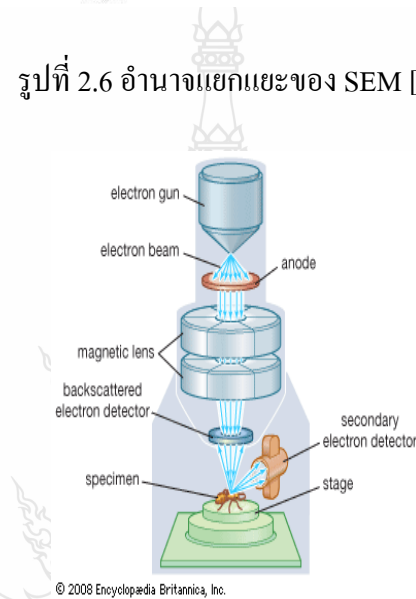
- นำแผ่นสไลด์ที่จะศึกษาวางบนแท่นวางวัตถุ ให้วัตถุอยู่บริเวณกึ่งกลางบริเวณที่แสงผ่าน
- มองด้านข้างตามแนวระดับแท่นวางวัตถุค่อยๆ หมุนปุ่มปรับภาพขยายให้เลนส์ใกล้วัตถุเลื่อนลงมาอยู่ใกล้ๆกระจกปิดสไลด์ (แต่ต้องระวังไม่ให้เลนส์กับสไลด์สัมผัสกัน เพราะจะทำให้ทั้งคู่แตกหักหรือเสียหายได้)
- มองที่เลนส์ใกล้ตาหมุนปุ่มปรับภาพละเอียดเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ถ้าวัตถุที่ศึกษาไม่อยู่ตรงกลางให้เลื่อนแผ่นสไลด์เล็กน้อยจนเห็นวัตถุอยู่ตรงกลางพอดี
- ถ้าต้องการให้ภาพขยายใหญ่ขึ้นก็หมุนเลนส์อันที่ก้ำกลางขยายสูงขึ้นเข้าสู่แนวลำกล้อง แล้วปรับความคมชัดด้วยปุ่มปรับภาพละเอียดเท่านั้น
- บันทึกกำลังขยายโดยหาได้จากผลคูณดังที่กล่าวไว้แล้ว
- หลังจากใช้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ให้ปรับกระจกเงาให้อยู่ในแนวตั้ง ตั้งฉากกับตัวกล้อง เลื่อนที่หนีบสไลด์ให้ตั้งฉากกับที่วางวัตถุ หมุนเลนส์ใกล้วัตถุให้เป็นอันที่มีกำลังขยายต่ำสุดอยู่ในตำแหน่งของลำกล้อง และเลื่อนลำกล้องให้อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด เช็ดทำความสะอาดส่วนที่เป็นโลหะด้วยผ้านุ่มๆและสะอาด แล้วจึงนำกล้องเข้าเก็บในตำแหน่งที่เก็บกล้อง [16]

2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [14]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope : SEM) เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติบางประการของสสาร ที่มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง ทั้งนี้เป็นเพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ทำให้ภาพมีความชัดลึกสูงแสดงดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive spectrometry : EDS) และเวฟเล็งธิคิสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (Wavelength dispersive spectrometry : WDS) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีด้วย



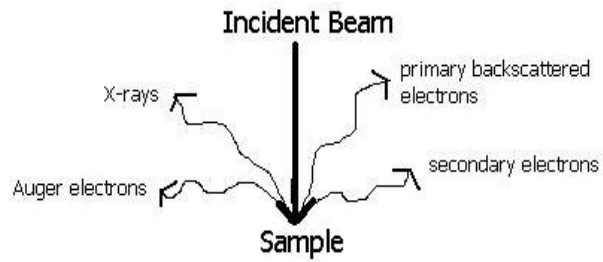
รูปที่ 2.6 อารามแยกแยะของ SEM [18]



รูปที่ 2.7 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [18]

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งภายในมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV (บางครั้งเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดย แอพเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First condenser lens) อาจนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทรานส์มิสชันของอิเล็กตรอน (Electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยคอยกราดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม คล้ายกับการกราดภาพบนจอโทรทัศน์ดังรูปที่ 2.7

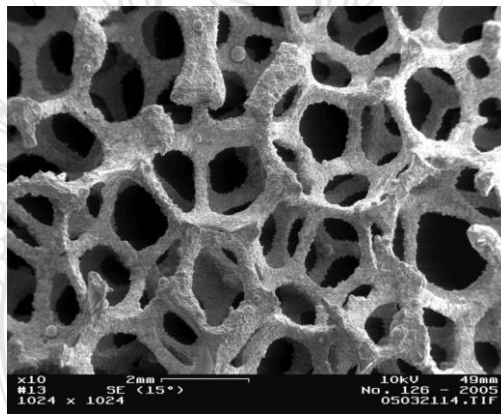
2.6.1 สัญญาณต่าง ๆ (Various types of signal)



รูปที่ 2.8 สัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร [18]

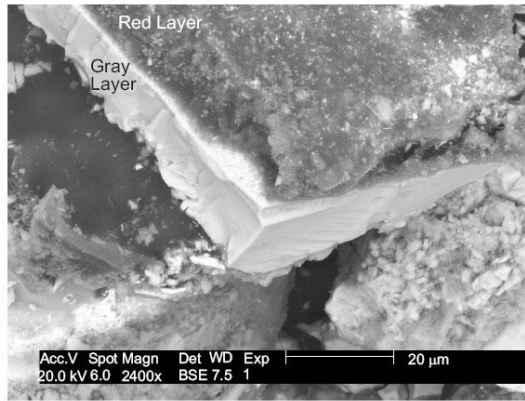
สัญญาณแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร และอันตรกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นตามมา แสดงดังรูปที่ 2.8

1) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron: SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อย ๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด



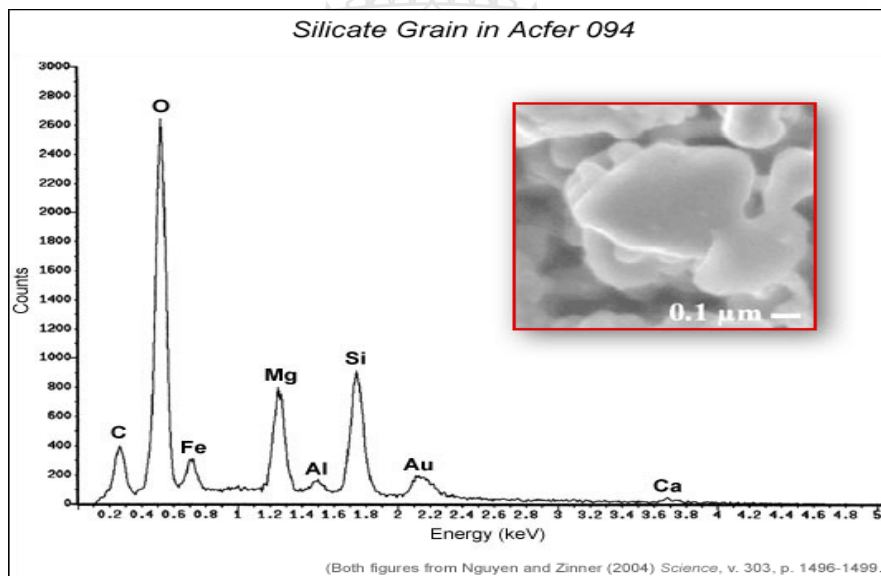
รูปที่ 2.9 สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [18]

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



รูปที่ 2.10 สัณฐานอิเล็กทรอนิกส์ของกระจกกลับ [18]

3) สัณฐานแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ เป็น สัณฐานที่ใช้เทคนิค EDS และ WDS



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จิสเปกโตรสโกปีฟอสฟอโรเมตรี (EDS) [19]

2.7 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers [20]

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกด ที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ ซึ่งในบั้นนี้ได้ แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบรอยกด (Indentation) แบบ กระดอน (Rebound) แบบขีดข่วน (Scratch) แบบสึกหรอ (Wear) และใน แบบของความสามารถในการกลึงไส (Machinability) โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ เป็นการวัดแรงที่กระทำที่เทียบกับรอย

กดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อน หัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ส่วนการทดสอบในลักษณะการ ปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักลงบนผิววัสดุ จากนั้นวัดการกระดอนของลูกตุ้มเรียกว่าความแข็ง แบบกระดอน และการทดสอบความแข็งที่สะดวกที่สุดคือการทดสอบความแข็งแบบรอยขีด ข่วน โดยการขีดข่วนพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่างๆ ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้ เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ ส่วนปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไข การทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทานการขัดสี และ สูดท้ายความสามารถในการกลึงไสใช้เป็นตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

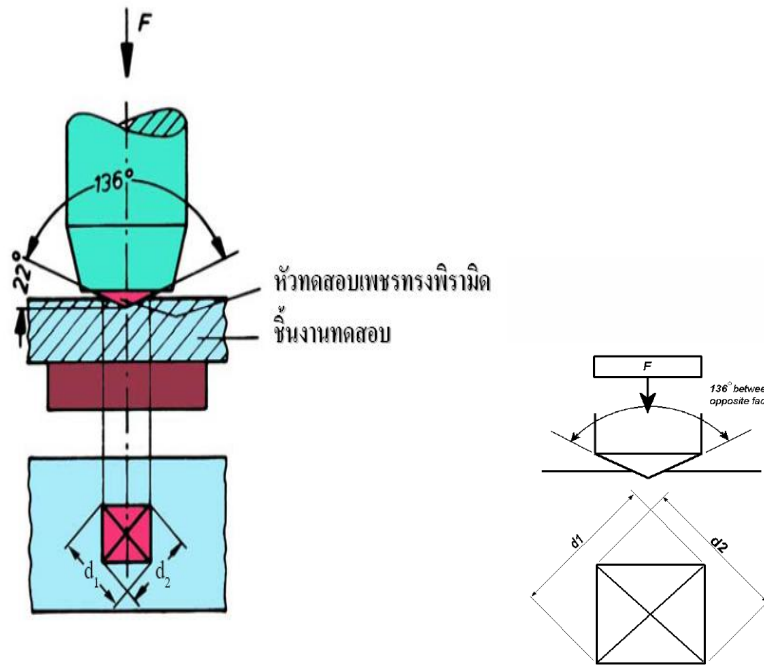
หลักการ หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบ หัวบอล แบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือพีรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้า แข็งหรือเพชรและ ใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอย กดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอนการทดสอบความแข็งกับวัสดุ โลหะส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบโลหะที่มี ความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็ง นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็งบางครั้ง ต้องทำการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่ พื้นผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness tester) เช่น นูพ (Knoop) เป็นต้น

การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีรามิด ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136 องศา ดังรูปที่ 2.12 [20] ในกรณีแรงกดมีหน่วยเป็นกรัม (gf) ใช้สมการที่ 2.1 แต่ถ้าแรงกดมีหน่วยเป็นนิวตันต้องใช้สมการที่ 2.2 [21]

$$Hv = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

$$Hv = \frac{1.8544}{9.80665} \times \frac{F}{d^2} = 0.18909 \frac{F}{d^2} \quad (2.2)$$

- เมื่อ Hv = ความแข็ง
 F = แรงกด (N หรือ kgf)
 S = พื้นที่ผิวหัวตัด (mm²)



รูปที่ 2.12 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [22]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมศักดิ์ ศรีป่าหมาก และกิตติพงษ์ กิมะพงส์ [23] การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียม 6063-T1 และทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-225 มม./นาทิต พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงและโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่าง ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่า 106 MPa เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาทิต ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาทิต การเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเพิ่มขึ้น

กิตติพงษ์ กิมะพงส์ และอนันท์ มีมนต์ [24] การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนแบบต่อเกลยระหว่างอะลูมิเนียมผสมเบอร์ A 5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเบอร์ SS 400 ได้ถูกทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบฟริกชันสเตอร์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการเชื่อม เช่นความเร็วในการเชื่อม ความลึกกวนเข้าไปในเนื้อของวัสดุ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงเนื่องจากการเพิ่มความเร็ของความเร็วรอบทำให้ IMC ชนิดเปราะที่มีค่าความหนาเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบกวนต่ำการพังทลายเกิดในอะลูมิเนียมเป็นแบบคัต ไทล์ ขณะที่ความเร็วรอบสูงเป็นการพังทลายแบบเปราะเกิดขึ้นที่ชั้นหน้าของ IMC การเพิ่มความเร็เดินแนวเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การเพิ่มความลึกของตัวกวนสอดลงในแนวเชื่อมที่ก่อให้เกิดจุดบกพร่อง

ขวัญชัย อยู่สะอาด และชวลิต นุชวงษ์ [25] การศึกษาอิทธิพลรูปร่างตัวกวนในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบตัวกวนต่อสมบัติรอยต่อชนอะลูมิเนียม A6063-T1 โดยใช้เครื่องมือเชื่อมแบบเกลียวขวา ความเร็วรอบเครื่อง 2000 รอบ/นาที เครื่องมือเชื่อมเปิดทำมุมกับชิ้นงาน 2 องศา ทำการเชื่อมได้แนวเชื่อมที่แข็งแรงที่สุด โดยให้ค่าความแข็งที่ 170 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวเท่ากับ 29% ของความยาวเดิม โดยที่สภาวะการเชื่อมนี้ไม่พบจุดพบพร่องใดๆ ในแนวเชื่อม

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ , บุญส่ง จงกลณี และสมควร แววดี [2] การศึกษาอิทธิพลของตัวกวนรูปแบบต่างๆ เช่น ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกรวย และตัวกวนเกลียว ของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียม 6063-T1 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ได้จากรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มม./นาที และความเร็วรอบ 500 รอบ/นาทีที่ค่าประมาณ 165 MPa

ณัฐ แก้วสกุล และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [26] การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่างๆ คือ ความเร็วรอบของตัวกวนและความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่อสมบัติรอยต่อชนระหว่างอะลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดสามารถทำให้เกิดรอยต่อชนที่สมบูรณ์ คือ รอยต่อชนที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 102 มม./นาที ที่ค่าความแข็งแรงดึง 71 MPa

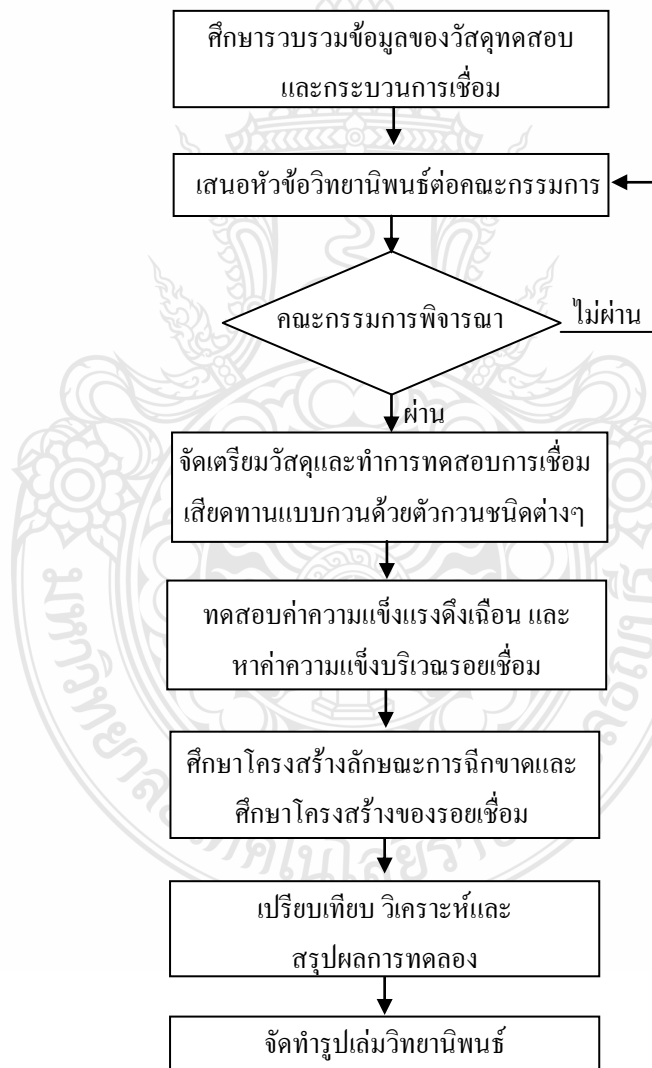


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ในลักษณะต่อเกลยโดยใช้ตัวกวนหลายรูปแบบ ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่เหมาะสม จึงได้วางแผนงานและดำเนินงานให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ตามกำหนดแผนการดำเนินงาน โดยมีแผนผังการไหลของกระบวนการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 3.1



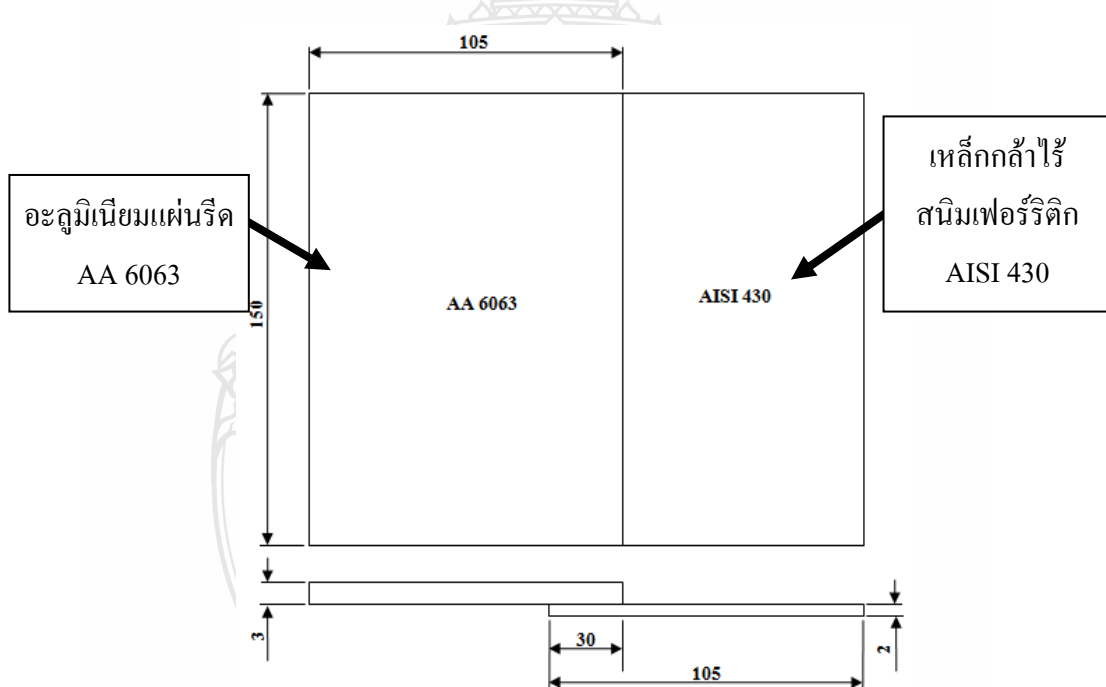
รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลกระบวนการในการทำวิทยานิพนธ์

3.2 การออกแบบการทดลอง / เครื่องมือ

งานวิจัยนี้เป็นกระบวนการทดสอบที่ต้องปฏิบัติงานให้สมบูรณ์ทุกขั้นตอนเพื่อให้ได้ผลการทดลองออกมามีความแม่นยำมากที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบขึ้นมาใหม่เพื่อให้สามารถทดลองและเก็บข้อมูลในการวิจัยนี้ได้ เช่น อุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงาน เครื่องที่ใช้เป็นตัวกวน รวมไปถึงการเลือกวัสดุที่จะนำมาทดสอบไม่ว่าจะเป็นชนิดของวัสดุ ขนาด สมบัติหรือราคาของวัสดุก็เป็นสิ่งที่สำคัญในการทดสอบเพื่อการวิจัยด้วยกันทั้งนั้น หากผลที่ได้เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ ก็จะทำให้ผลจากการวิจัยเกิดประโยชน์มากต่องานอุตสาหกรรมในอนาคต

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) อะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 ขนาดที่ใช้เชื่อม ความยาว 150 มม. ความกว้าง 105 มม. และ ความหนา 3 มม
- 2) เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ขนาดที่ใช้เชื่อมความยาว 150 มม. ความกว้าง 105 มม. และ ความหนา 2 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่แสดงถึงลักษณะการต่อของวัสดุทั้งสองชนิด



รูปที่ 3.2 แบบการวางชิ้นงานก่อนการเชื่อม

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุทดสอบ

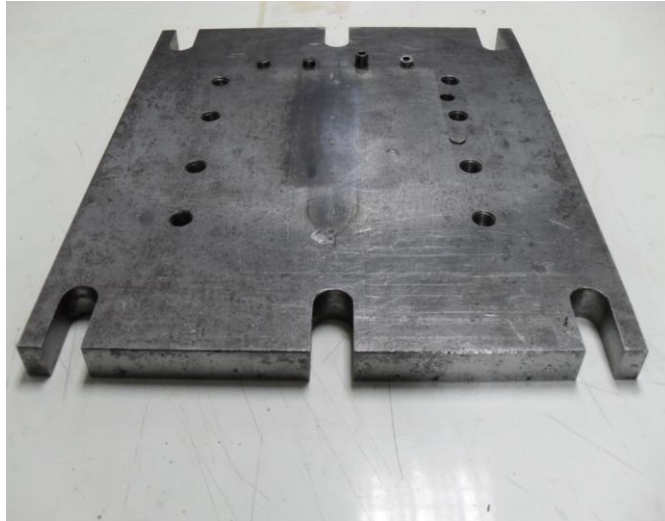
สมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	
อะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063	เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430
<p>1) ทนทานต่อการเกิดเป็นสนิม และการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานโดยทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดแก่และด่างต่างๆ เป็นน้ำหนักเบา</p> <p>2) ความถ่วงจำเพาะ 2.7 ซึ่งเหล็ก 7.8 และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง มีแมกนีเซียม 0.415 % แมงกานีส 0.055 % เหล็ก 0.18 % ซิลิกอน 0.585 % ทองแดง 0.018 % โครเมียม 0.003 % และอะลูมิเนียม 98.725 %</p> <p>3) สมบัติทางกล คือสามารถทนแรงดึงตามแนวการรีดได้ถึง 240 MPa โดยมีอัตราการยืดตัว 24 เปอร์เซ็นต์ และสามารถทนแรงดึงขวางแนวการรีด 217 MPa โดยมีอัตราการยืดตัว 22.4 เปอร์เซ็นต์</p>	<p>1) มีธาตุโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักและผสมอยู่ในช่วง 11 - 27 % แม่เหล็กดูดติดมีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และมีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก คือประมาณ 13% หรือ 17% ไม่มีนิกเกิล</p> <p>2) มีจุดหลอมเหลวสูงดังนั้นบางที่ก็มีชื่อว่าพวกสเตรตโครม (Straightchrome) เนื้อเหล็กมีจุลโครงสร้างแบบเฟอร์ริติก</p> <p>3) สมบัติทางกลของเหล็กขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีเป็นหลัก ไม่สามารถปรับปรุงด้วยวิธีทางความร้อนและทางกลได้</p>

หมายเหตุ * ข้อความต่อจากนี้ที่แสดงคำว่าอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 จะใช้คำว่า อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ในลำดับต่อไป

3.2.2 การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อการดำเนินงานของโครงการเป็นอย่างมากเนื่องจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) จะก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนและอุณหภูมิที่สูงระหว่างการเชื่อม จึงต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานให้มีความแข็งแรงมั่นคง มีความสามารถในการต้านการสั่นสะเทือนหรือลดการสั่นสะเทือนให้ได้มากที่สุด เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม โดยสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงเสมอในการออกแบบอุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แผ่นรองชิ้นงานทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ S45 ทำการชุบแข็งที่ผิว มีหน้าที่ในการรองรับชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม จะต้องเป็นวัสดุที่สามารถรองรับแรงกดได้ดี ทนต่อสภาวะอุณหภูมิที่สูงได้ ไม่เสียรูปทรงในระหว่างและหลังการเชื่อม และที่สำคัญสามารถจับยึดกับโต๊ะจับขึ้น



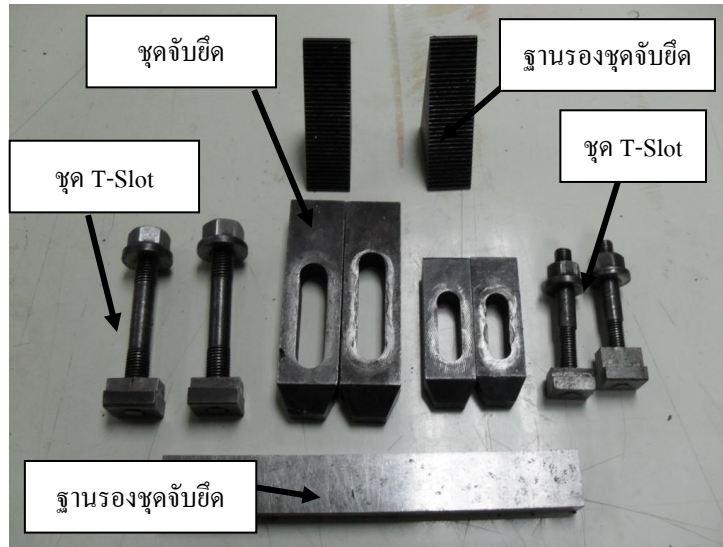
รูปที่ 3.3 แผ่นรองรับชิ้นงาน

งานได้อย่างแน่นและมั่นคง โดยแผ่นรองรับชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนครั้งนี้ มีขนาดความกว้าง 200 มม. ความยาว 350 มม. และความหนา 20 มม. ทำการเจาะรูสำหรับใส่น็อตเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3

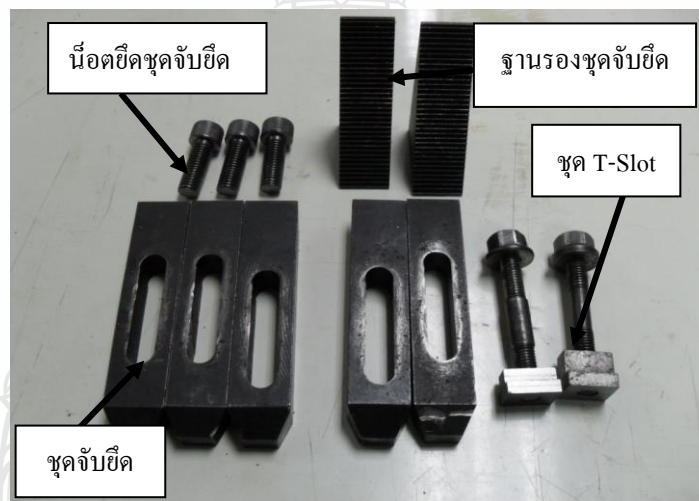
2) แผ่นกดทับชิ้นงานทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ S45 มีหน้าที่ในการกดทับชิ้นงานทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงาน เพื่อให้สามารถจับยึดชิ้นงานได้แน่นและมั่นคงมากขึ้น จะต้องเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อสภาวะแรงกดและอุณหภูมิที่สูงได้ และที่สำคัญต้องไม่เสียรูปทรงในระหว่างและหลังการเชื่อมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นกดทับชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดแผ่นรองชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

3) อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็งที่ผิวแล้ว อุปกรณ์จับยึดแผ่นรองชิ้นงานทำหน้าที่ในการจับยึดแผ่นรองชิ้นงานให้แน่น ไม่เคลื่อนที่ในขณะที่ทำการเชื่อม สามารถทนต่อแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนได้ดี รวมไปถึงอุณหภูมิที่สูงในขณะที่ทำการเชื่อมด้วย อุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานก็จะมีหน้าที่ที่คล้ายกับอุปกรณ์จับยึดแผ่นรองชิ้นงาน แต่จะทำหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงาน โดยการจับยึดจะทำการจับยึดกับชิ้นงานโดยตรงและผ่านแผ่นกดทับชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานไม่เคลื่อนที่ในขณะที่ทำการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



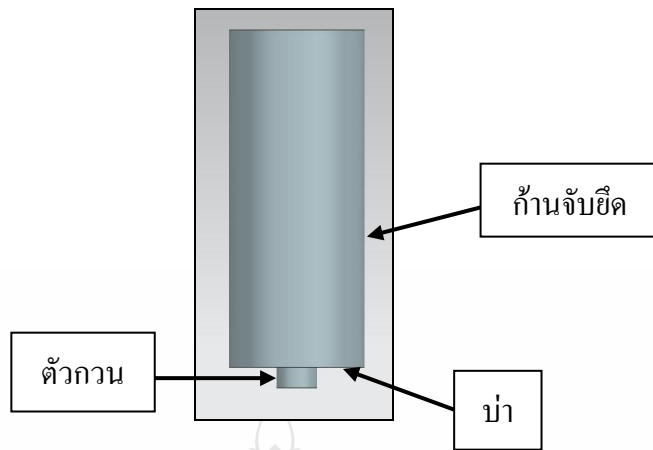
รูปที่ 3.7 การจับยึดชิ้นงานก่อนการเชื่อม

ทำการประกอบชุดอุปกรณ์จับยึดทั้งหมด โดยเริ่มจากการยึดแผ่นรองชิ้นงานกับโต๊ะรองชิ้นงานของเครื่องกัด จากนั้นวางชิ้นงานในลักษณะของการต่อเกยโดยเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ด้านล่างและอะลูมิเนียมอยู่ด้านบน โดยใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานยึดชิ้นงานให้แน่นพร้อมที่จะทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนในลำดับต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.7

3.2.3 การออกแบบเครื่องมือที่ใช้เป็นตัวกวน (Tool)

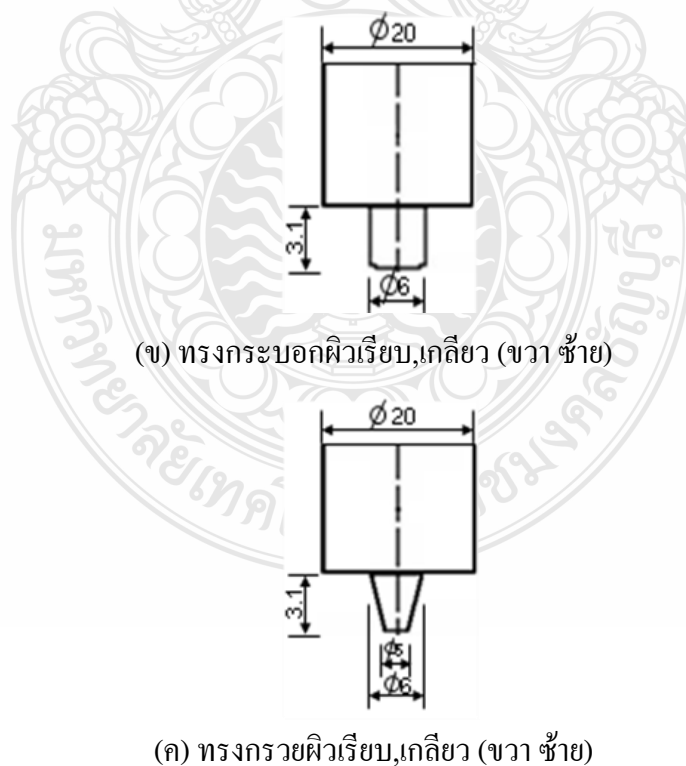
ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) สิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากก็คือตัวกวน ซึ่งมีหน้าที่ในการให้ความร้อน และกวนเนื้อวัสดุให้ประสานติดกัน โดยจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อแรงกด แรงสั่นสะเทือนและอุณหภูมิที่สูงได้และที่สำคัญต้องมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่นำมาทดสอบด้วย โดยทั่วไปจะมีส่วนที่ทำหน้าที่หลักอยู่ 3 ส่วน คือ

- 1) ก้านจับยึด (Body) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นพื้นที่ในการจับยึดของหัวจับของเครื่องกัด
- 2) บ่า (Shoulder) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กดและเกลี่ยเนื้อของวัสดุจนเกิดความร้อนจากการเสียดทานจึงทำให้วัสดุประสานติดกัน ในการเชื่อมครั้งนี้บ่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.
- 3) สลัก (Pin) มีหน้าที่กวนเนื้อภายในของวัสดุให้เกิดความอ่อนตัวจนเกิดการหลอมประสานติดกันระหว่างวัสดุทดสอบพร้อมทั้งสร้างความแข็งแรงของแนวการเชื่อมภายในเนื้อวัสดุด้วย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ยาว 3.1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวกวน

ในการทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบชนิดของตัวกวนที่หลากหลายรูปแบบเพื่อเป็นตัวแปรในการศึกษาและเปรียบเทียบถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการทดลอง ตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมประกอบไปด้วย ตัวกวนรูปทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวเกลียวขวา ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย ดังแสดงขนาดของตัวกวนในรูปที่ 3.9 (ก) และรูปทรงตัวกวน ดังรูปที่ 3.10



(ข) ทรงกระบอกผิวเรียบ,เกลียว (ขวา ซ้าย)

(ค) ทรงกรวยผิวเรียบ,เกลียว (ขวา ซ้าย)

รูปที่ 3.9 ขนาดของรูปทรงตัวกวน



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างรูปร่างต่างๆ

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการดำเนินการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) นอกจากเครื่องมือที่ได้ออกแบบและทำการสร้างเพื่อใช้ในกระบวนการแล้ว เครื่องจักรก็มีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมากเช่นกันหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนของการดำเนินงานโดยมีเครื่องมือกลต่างๆ ที่ใช้ด้วยกัน ได้แก่ เครื่องกัดอัดโนมัติ เครื่องตัด เครื่องอัดรีชน เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง กัดองจุลทรรศน์แบบลำแสง กัดองจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด และเครื่องทดสอบความแข็ง เป็นต้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม

- 1) นำอะลูมิเนียม หนา 3 มม. ตัดให้ได้ขนาด กว้าง 105 มม. ยาว 150 มม. และเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 2 มม. ตัดให้ได้ขนาดกว้าง 105 มม. ยาว 150 มม.
- 2) นำอะลูมิเนียม ที่ตัดไว้ไปเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 มม. ที่มุมใดมุมหนึ่งห่างจากขอบทั้งสองข้างข้างละ 15 มม.
- 3) ลบคมที่ขอบของอะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดครีบจากการตัดโดยเน้นหน้าสัมผัสระหว่างการต่อของวัสดุทั้งสอง โดยทำการขัดโดยใช้เครื่องขัดกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องขัดกระดาษทราย

4) ทำการขัดชิ้นงานบริเวณหน้าผิวสัมผัสของรอยต่อของวัสดุทั้งสอง โดยขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400 และเบอร์ 600 ตามลำดับ เพื่อกำจัดความสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวของวัสดุทั้งสองชิ้น จากนั้นทำการเช็ดด้วยอะซิโตนอีกรอบเพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทราย

5) ทำการจับยึดชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึดที่เตรียมไว้ในรูปแบบการต่อเกย (Lap joint) โดยวางแผ่นอะลูมิเนียมทับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในระยะ 30 มม.

6) ประกอบตัวกวนเข้ากับเครื่องกัดแล้วทำการตั้งค่าจุดเริ่มต้นในการเริ่มการเชื่อม

3.3.2 การตั้งค่าโปรแกรมการเดินเครื่องกัดอัตโนมัติและกระบวนการเชื่อม

1) ตั้งค่าเงื่อนไขในการเดินเครื่องกัดอัตโนมัติดังต่อไปนี้

- ความเร็วรอบของตัวกวน (S) 250 500 และ 750 รอบ/นาที
- ความเร็วเดินของแนวเชื่อม (F) 25 50 75 100 125 150 และ 175 มม./นาที
- ความเอียงของตัวกวนเมื่อเทียบกับแกนหมุนของเครื่องกัด 2 องศา
- ความลึกของตัวกวนที่ตกลงในเหล็กกล้าไร้สนิม ลึก 0.2 มม.

2) เริ่มทำการเชื่อมโดยเปิดเดินเครื่องแบบอัตโนมัติไปตามทิศทางที่กำหนดจนสิ้นสุดของขนาดความยาวของชิ้นงานที่ตั้งค่าไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

3) นำชิ้นงานออกและตรวจสอบความเรียบร้อยของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จแล้ว

4) ตรวจสอบระยะของตัวกวนทุกครั้งหลังการเชื่อมและปล่อยให้ตัวกวนเย็นตัวในอากาศประมาณ 20 นาที ก่อนการลงมือเชื่อมชิ้นงานชิ้นต่อไป ซึ่งได้ชิ้นงานเชื่อมที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 เครื่องกัดอัตโนมัติแนวตั้ง



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม

3.3.3 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมทดสอบแรงดึงเฉือน

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาทำการตัดหัวและตัดท้ายออก และตัดเป็นชิ้น ๆ ตามขนาดที่กำหนด เพื่อจะนำไปทดสอบแรงดึงและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยตัดหัวท้ายทิ้งและตัดให้มีควมกว้าง 30 มม. 3 ชิ้น และ กว้าง 5 มม. 2 ชิ้นด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องตัดชิ้นงาน

3.4 วิธีการทดสอบ / วิธีการวัดผล

3.4.1 การทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.15 รูปชิ้นงานที่ตัดแล้ว



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงดึง

หลังจากที่ได้ทำการตัดชิ้นงานที่จะทำการทดสอบเรียบร้อยแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.15 เลือกชิ้นงานที่มีความกว้าง 30 มม. ทั้ง 3 ชิ้นไปทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยกำหนดค่าของแรงและความเร็วในการดึงที่เหมาะสมกับชิ้นงาน ซึ่งดึงให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงไปเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของรูปร่างของตัวกวนชนิดต่างๆ ว่าปัจจัยที่มีผลต่อรอยเชื่อมของรอยต่อเกยเป็นอย่างไรบ้าง

3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์หล่อเรซิน



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานหลังการหล่อเรซิน

1) นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดที่มีขนาดความกว้าง 5 มม. มาทำการตัดส่วนที่ไม่ใช่แนวเชื่อมออก แล้วนำส่วนที่เป็นแนวเชื่อมมาทำการหล่อเรซิน ซึ่งอุปกรณ์ในการหล่อเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และจะได้ชิ้นงานหลังจากการหล่อเรซินเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.17

2) นำชิ้นงานที่ทำการหล่อเรซินเรียบร้อยแล้วมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 800 1,000 และ 1,200 ตามลำดับด้วยเครื่องขัดโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.19 จากนั้นนำไปขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้งในขั้นสุดท้ายเพื่อให้ชิ้นงานมีความเรียบและเกิดความมันวาวยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.19 เครื่องขัดผิวชิ้นงานทดสอบ

3) หลังจากขัดชิ้นงานเสร็จแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการกัดด้วยกรดผสม
4) นำชิ้นงานที่กัดกรดแล้วไปทำการส่องโครงสร้างด้วยกล้องส่องโครงสร้างจุลภาค และทำการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กล้องส่องดูโครงสร้างจุลภาค

3.4.3 ตรวจสอบลักษณะรอยฉีกขาด

ทำการตรวจสอบลักษณะรอยฉีกขาดบริเวณรอยเชื่อมหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเดือน ด้วยภาพถ่ายที่บริเวณรอยเชื่อมตามแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และทำการตรวจสอบภาพตัดขวางของรอยเชื่อมที่เกิดการฉีกขาดที่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียม เพื่อเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเดือน และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยฉีกขาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดด้วยกำลังขยาย 1,800 เท่า ดังรูปที่ 3.22 ในบริเวณรอยฉีกขาดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 3.21 และหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนดีที่สุดที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงต่างๆ



รูปที่ 3.21 บริเวณทำการตรวจสอบลักษณะการฉีกขาด



รูปที่ 3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.4 ทดสอบค่าความแข็งบริเวณอินเทอร์เฟซรอยเชื่อม



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งทำการทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.24 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

ทำการทดสอบหาค่าความแข็งที่บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึง
เดือนมากที่สุดของแต่ละชนิดรูปทรงตัวกวน ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งด้วยแรงกด (Load) 100 gf.
โดยระบุตำแหน่งที่ทำการกดที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมดังรูปที่ 3.23 ด้วย
เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ดังรูปที่ 3.24



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

การเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 โดยใช้ตัวกวนที่มีรูปทรงต่างกัน ได้แก่ ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และตัวกวนทรงเกลียวซ้าย โดยการใส่ค่าความเร็วรอบของตัวกวนที่ 250 500 และ 750 รอบ/นาที และมีค่าตัวแปรคงที่ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

- ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25 50 75 100 125 150 และ 175 มม./นาที ในทุกๆ ความเร็วรอบหมุนตัวกวน
- ความเอียงของตัวกวนเมื่อเทียบกับแกนหมุนของเครื่องกัดเท่ากับ 2 องศา
- ความลึกตัวกวนที่ตกลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 เท่ากับ 0.2 มม.

จากการทดลองตามค่าตัวแปรที่กำหนด แล้วนำชิ้นงานทดลองมาทำการทดสอบเชิงกลวิเคราะห์โครงสร้างทั้งภายในและภายนอกของรอยเชื่อม และนำผลมาทำการเปรียบเทียบเพื่อทำการหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนหลายรูปแบบของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ซึ่งได้ผลจากการทดลอง ดังนี้

4.1 อิทธิพลของความเร็วรอบและความเร็วเดินตัวกวนที่มีผลต่อผิวหน้ารอยเชื่อม

จากอิทธิพลของความเร็วรอบและความเร็วเดินที่กล่าวมาข้างต้นนำไปสู่การทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ในส่วนต่างๆ จะทำการวิเคราะห์ตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม โดยการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายซึ่งจะบอกถึงลักษณะที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อม เพื่อนำลักษณะที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงที่ทดสอบโดยการทดสอบแรงดึงเฉือน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์รอยเชื่อมที่เกิดขึ้นผนวกกับความเข้าใจในการวิเคราะห์กับข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อม จึงได้กำหนดอักษรย่อขึ้นมาเพื่อระบุข้อบกพร่องบนรอยเชื่อมให้มีความเข้าใจมากขึ้นดังต่อไปนี้

SP คือ จุดบกพร่องบนรอยเชื่อมที่จุดเริ่มต้น

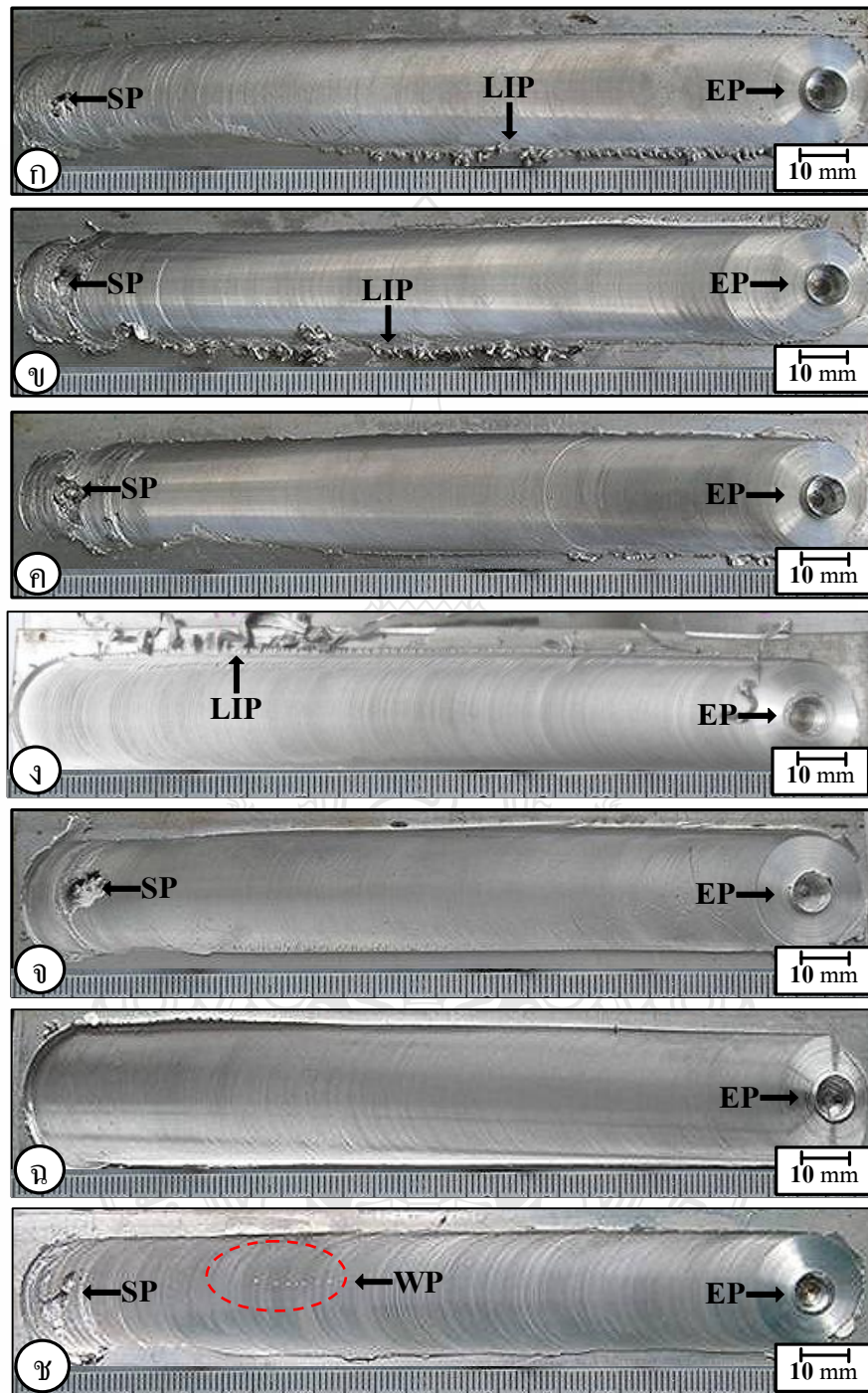
WP คือ จุดบกพร่องบนรอยเชื่อม

EP คือ จุดบกพร่องบนรอยเชื่อมที่จุดสุดท้าย

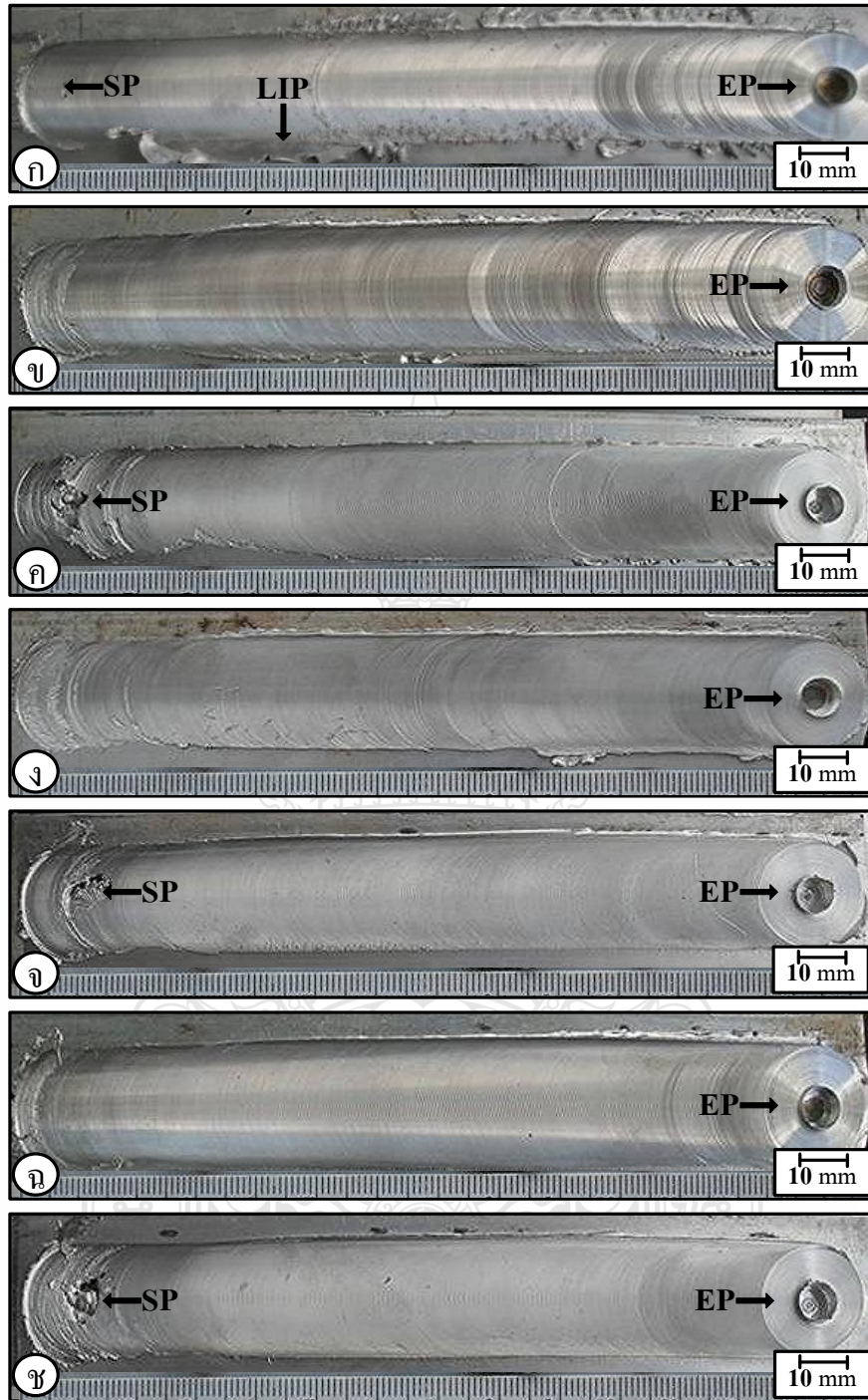
LIP คือ ครีปที่เกิดขึ้นบนขอบของรอยเชื่อม

หมายเหตุ * ข้อความต่อจากนี้ที่แสดงคำว่าอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 จะใช้คำว่า อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ในลำดับต่อไป

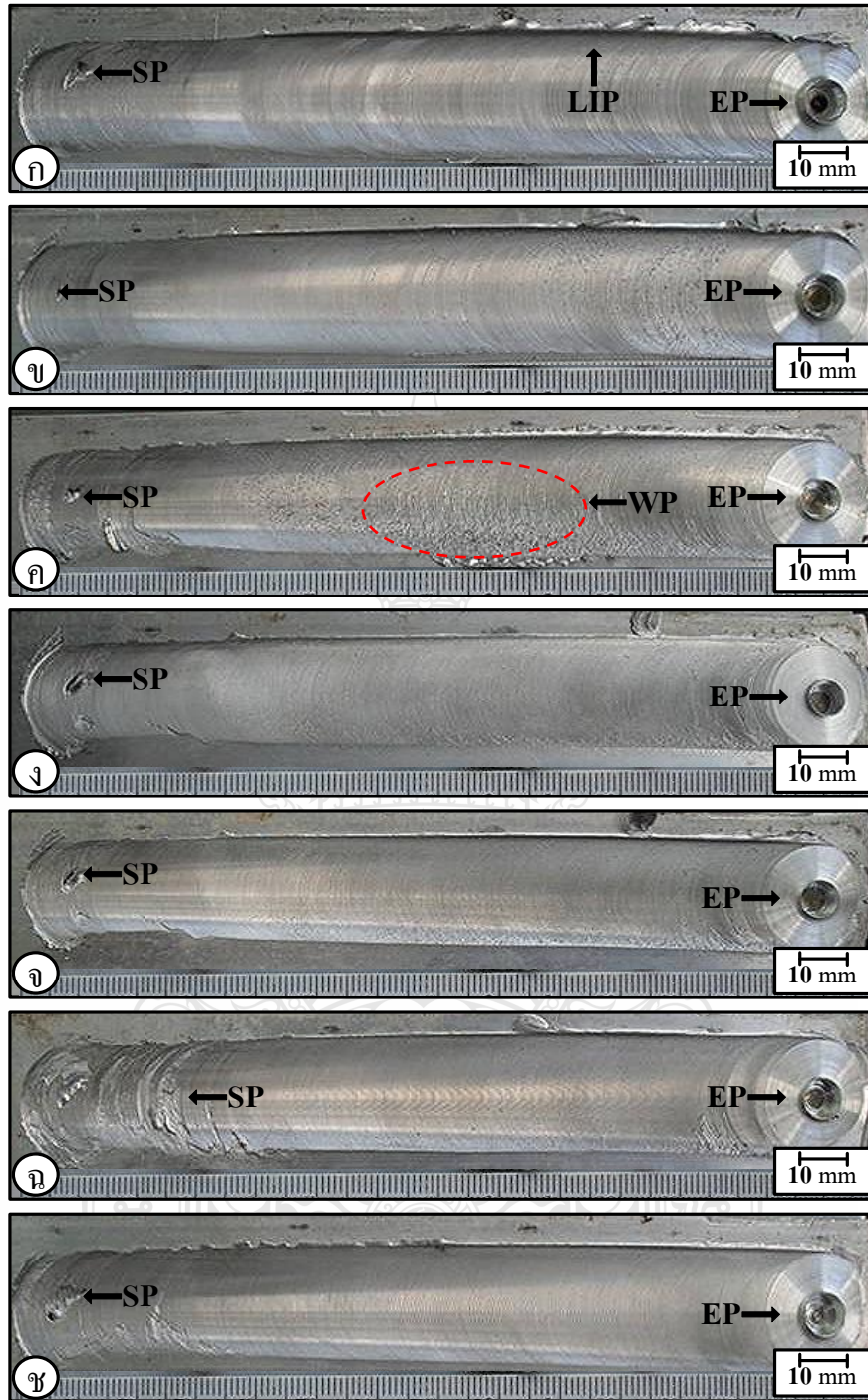
4.1.1 ตัวกวนทรงกระบอก



รูปที่ 4.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.2 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



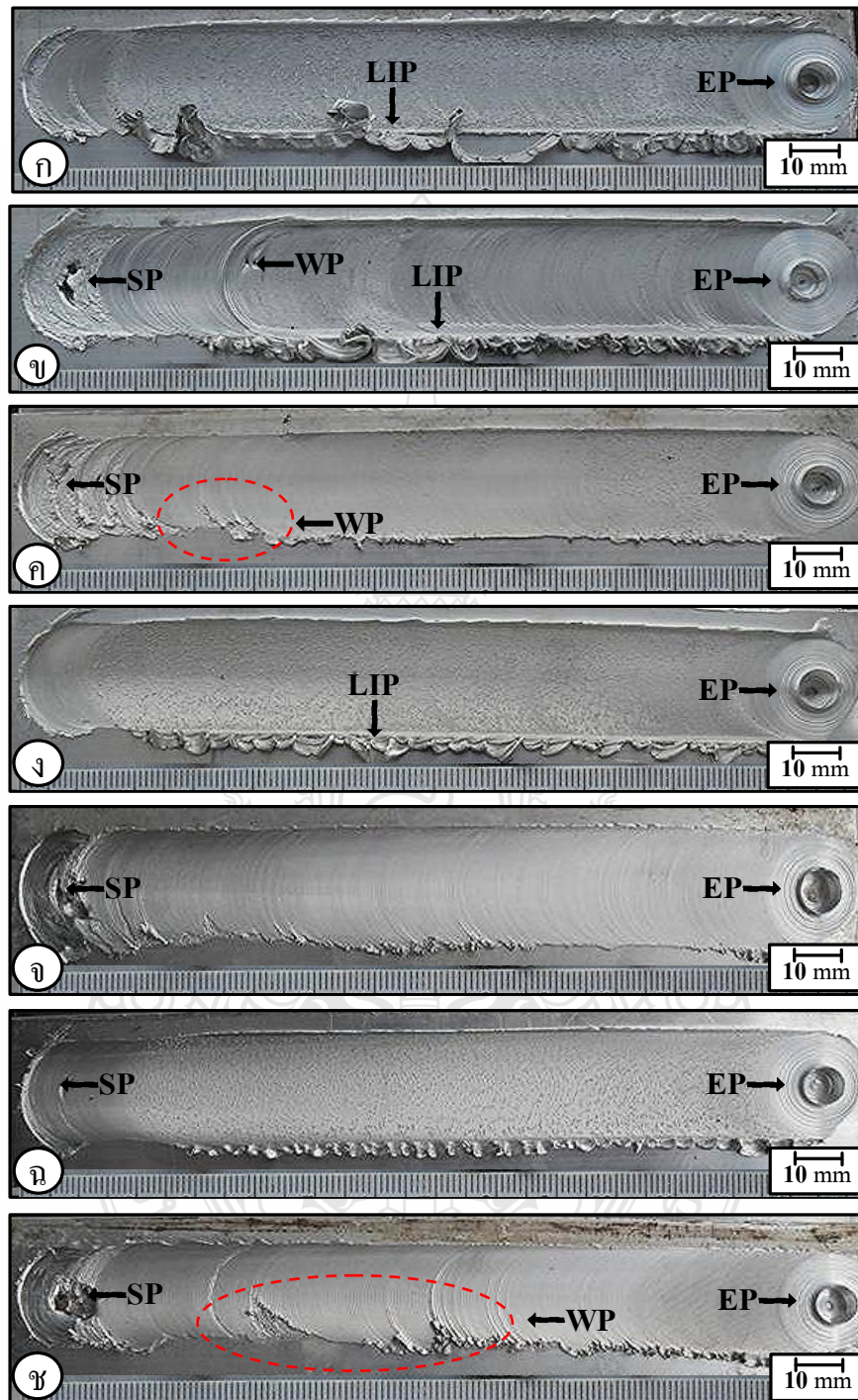
รูปที่ 4.3 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ชิ้นงานทุกชิ้นนั้นจะเกิดจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) และนอกจากนั้นยังพบครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยเชื่อมในความเร็วเดินที่ 25 50 75 และ 100 มม./นาที ส่วนความเร็วเดินที่เหลือเกิดครีบน้อยมาก และยังพบจุดบกพร่องบนผิวงานบริเวณจุดเริ่มต้น (SP) ในแนวเชื่อมซึ่งมีความเร็วเดินที่ 100 และ 150 มม./นาที ไม่เกิดจุดบกพร่องบนผิวงานและในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมจะเริ่มจากมีความหยาบเกิดขึ้น เมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นจะพบว่า ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมจะมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น

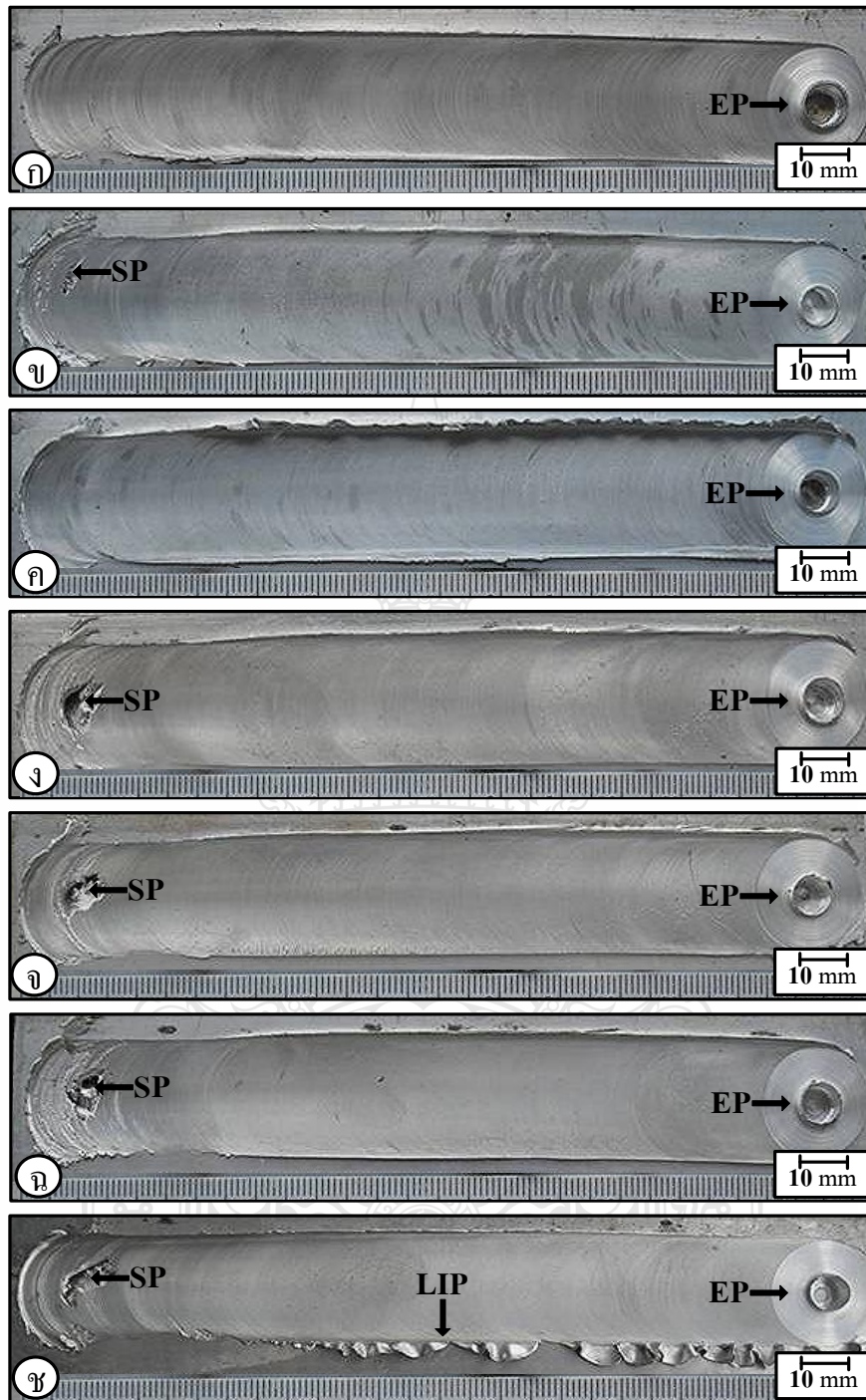
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ชิ้นงานทุกชิ้นนั้นจะเกิดจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) และนอกจากนั้นยังพบครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยเชื่อม ซึ่งปริมาณครีบกึ่งที่เกิดขึ้นมีมากสุดในความเร็วเดิน 25 มม./นาที และปริมาณครีบกึ่งที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นและยังพบจุดบกพร่องบนผิวงานในบริเวณจุดเริ่มต้นในแนวเชื่อมซึ่งความเร็วเดินที่ 50 100 และ 150 มม./นาที ไม่เกิดข้อบกพร่องบนผิวงานและในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมนั้น จะเริ่มจากผิวที่เรียบเมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นจะพบว่าความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมนั้นจะเริ่มจากผิวที่เรียบเมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นจะพบว่าความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมมีความละเอียดเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ 250 มม./นาที ในส่วนจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) นั้นความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที มีขนาดเล็กกว่า ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และครีบกึ่งที่เกิดขึ้นในแนวรอยเชื่อมความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ปริมาณครีบกึ่งที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่า 250 รอบ/นาที และจุดบกพร่องบนผิวงานก็เกิดขึ้นน้อยกว่า 250 รอบ/นาที และขนาดของจุดบกพร่องบนผิวงานมีขนาดเล็กกว่าด้วย ในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมใน 500 รอบ/นาที จะให้ความละเอียดเรียบมากกว่า 250 รอบ/นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ชิ้นงานทุกชิ้นนั้นจะเกิดจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ 250 และ 500 รอบ/นาที จะมีขนาดเล็กกว่าและยังพบครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยเชื่อมในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ความเร็วรอบดังกล่าว ซึ่งปริมาณครีบกึ่งที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วเดินขึ้นและยังพบจุดบกพร่องบนผิวงานในบริเวณจุดเริ่มต้นในแนวเชื่อมเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ 2 ความเร็วรอบดังกล่าว จุดบกพร่องบนผิวงานจะเกิดขึ้นมากที่สุด และในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมใน 750 รอบ/นาที จะมีผิวที่ละเอียดกว่า 2 ความเร็วรอบดังกล่าว

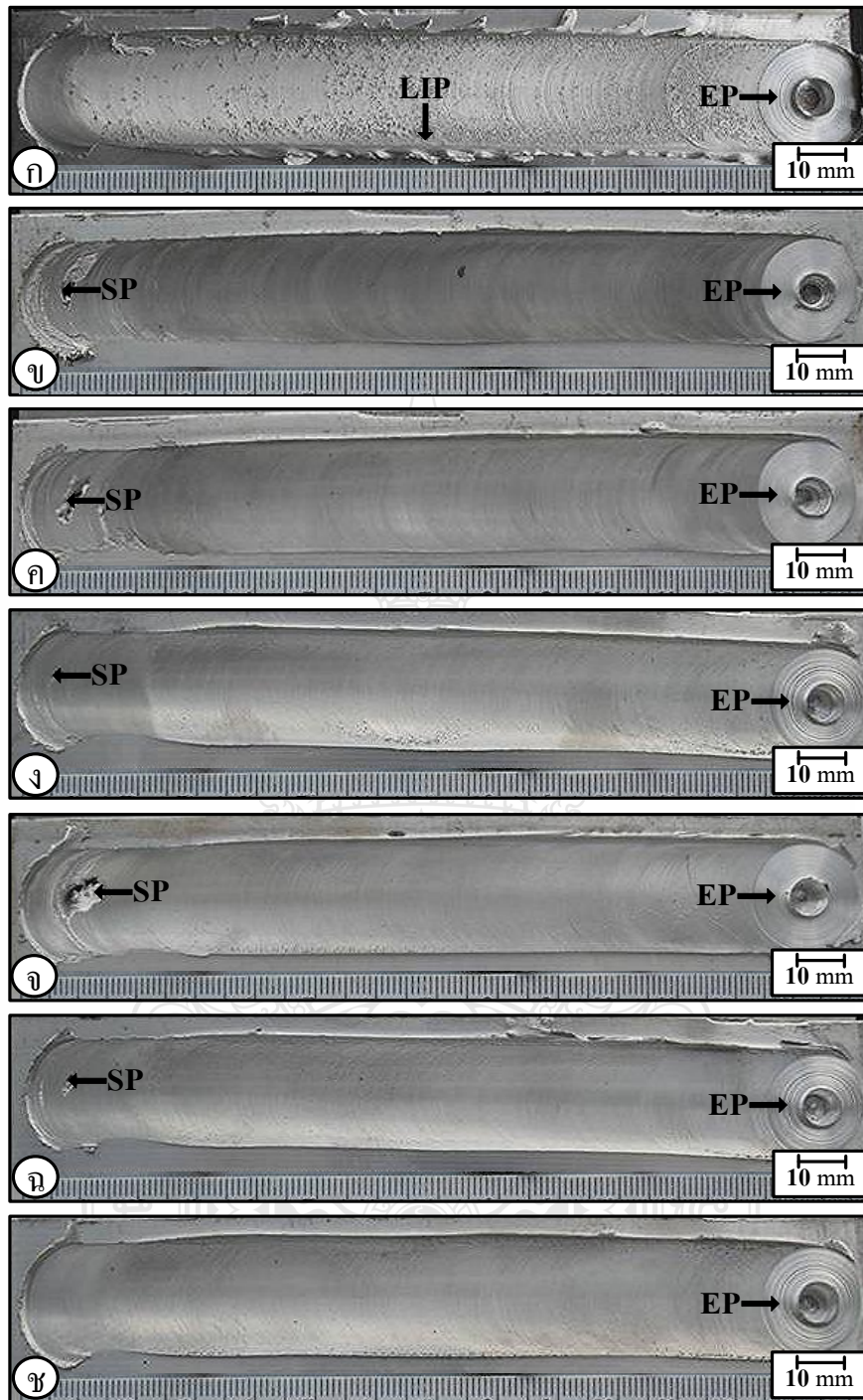
4.1.2 ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา



รูปที่ 4.4 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.5 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



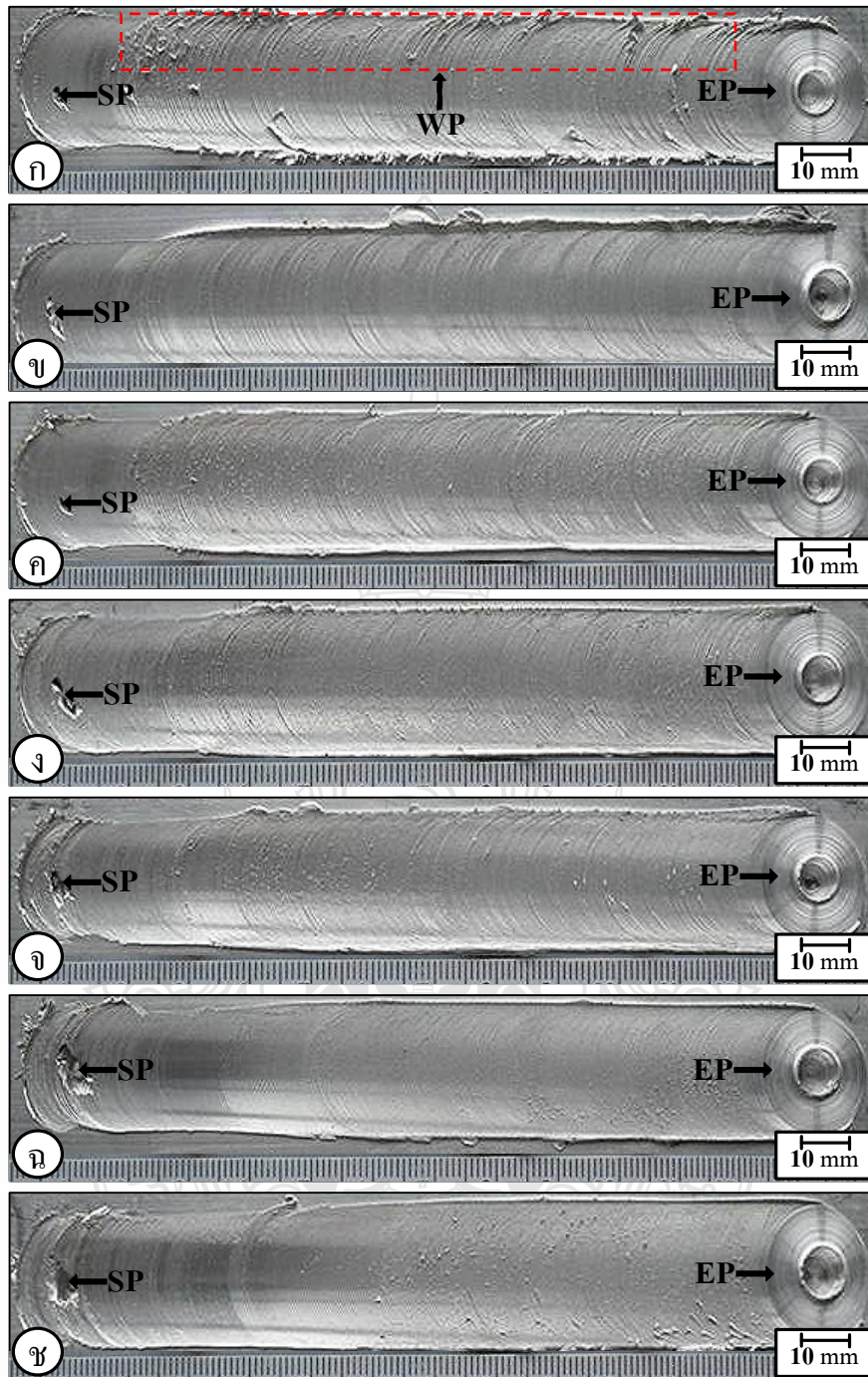
รูปที่ 4.6 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ชิ้นงานทุกชิ้นนั้นจะเกิดจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) และนอกนั้นยังพบครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยเชื่อมในความเร็วเดินที่ 25 และ 50 มม./นาที จะเกิดครีบมาก ส่วนความเร็วเดินที่เหลือนั้นเกิดครีบน้อยลง เมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นยังพบจุดบกพร่องบนผิวงานบริเวณจุดเริ่มต้น (SP) ในแนวเชื่อมซึ่งมีเพียงความเร็วเดิน 25 100 มม./นาที ไม่เกิดจุดบกพร่องบนผิวงานและในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จะเริ่มจากมีความหยวบเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้น จะพบว่าความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมลดลง แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ

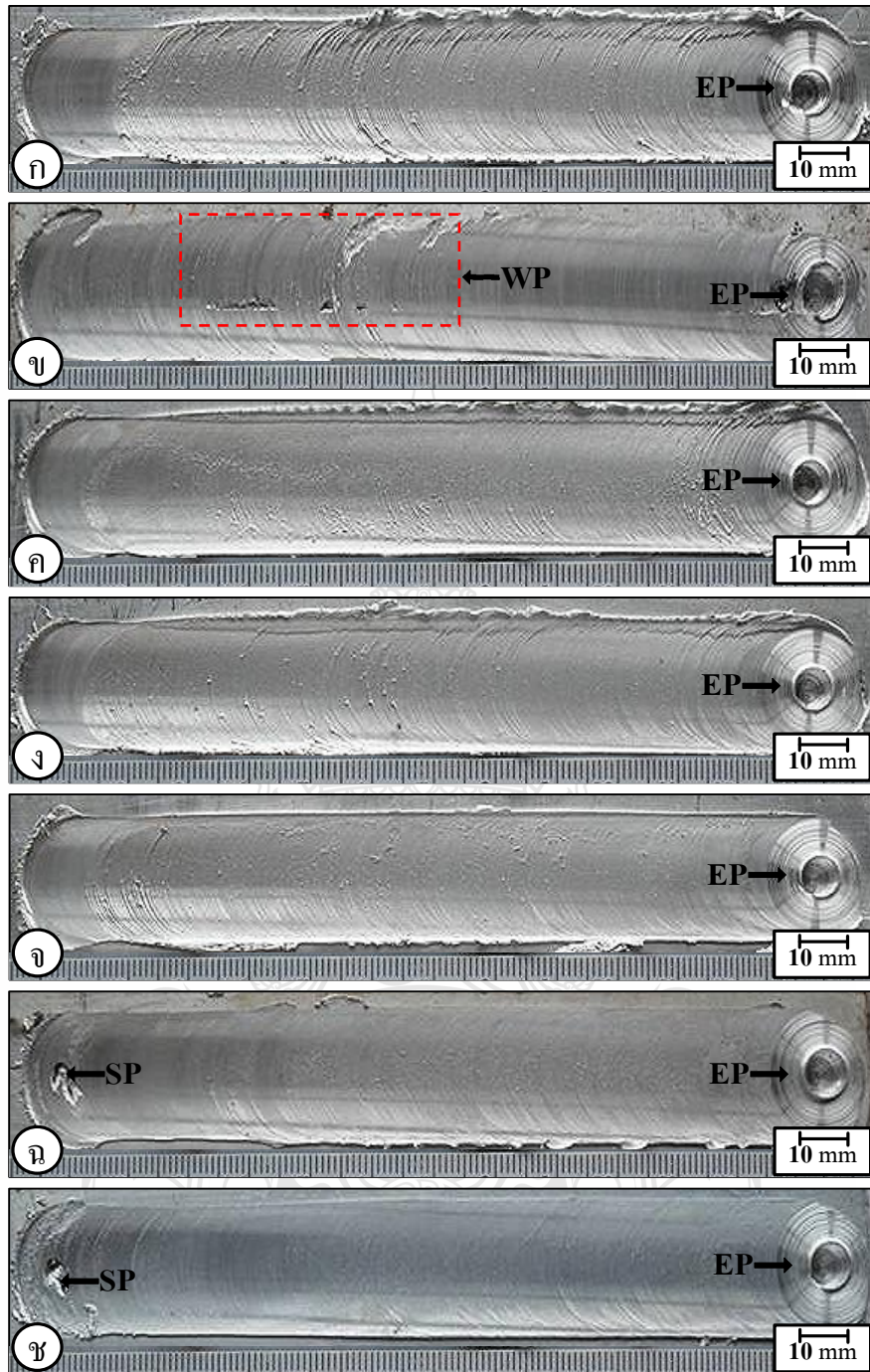
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ชิ้นงานทุกชิ้นนั้นจะเกิดจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) และนอกจากนั้นยังพบครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยเชื่อมซึ่งปริมาณครีบกึ่งที่เกิดขึ้นมีมากที่สุดในการเดินที่ 75 และ 150 มม./นาที ส่วนความเร็วเดินอื่นๆ เกิดครีบน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที เกิดครีบน้อยกว่า และยังพบจุดบกพร่องบนผิวงานในบริเวณจุดเริ่มต้น (SP) ในแนวเชื่อมตั้งแต่ความเร็วเดินที่ 100 125 150 และ 175 มม./นาที ส่วนความเร็วเดินที่ 25 50 และ 75 มม./นาที ไม่พบจุดบกพร่องบนผิวงานน้อยกว่าและในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมจะเริ่มจากผิวที่เรียบ เมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นจะพบว่าความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมมีความละเอียดเพิ่มขึ้นแต่ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที มีความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่สม่ำเสมอ

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ชิ้นงานทุกชิ้นนั้นจะเกิดจุดบกพร่องสุดท้าย (EP) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที จะมีขนาดเล็กกว่า 2 ความเร็วรอบดังกล่าวและนอกจากนั้นยังพบครีบกึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยเชื่อมในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ความเร็วรอบ ครีบกึ่งที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วเดินขึ้นและยังพบจุดบกพร่องบนผิวงานในบริเวณจุดเริ่มต้น (SP) ในแนวเชื่อม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสองความเร็วดังกล่าวจุดบกพร่องบนผิวงานที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุดและในส่วนของความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมใน 750 รอบ/นาที จะมีขนาดรอยเชื่อมที่สม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อมมากที่สุด เมื่อเทียบกับสองความเร็วรอบดังกล่าว

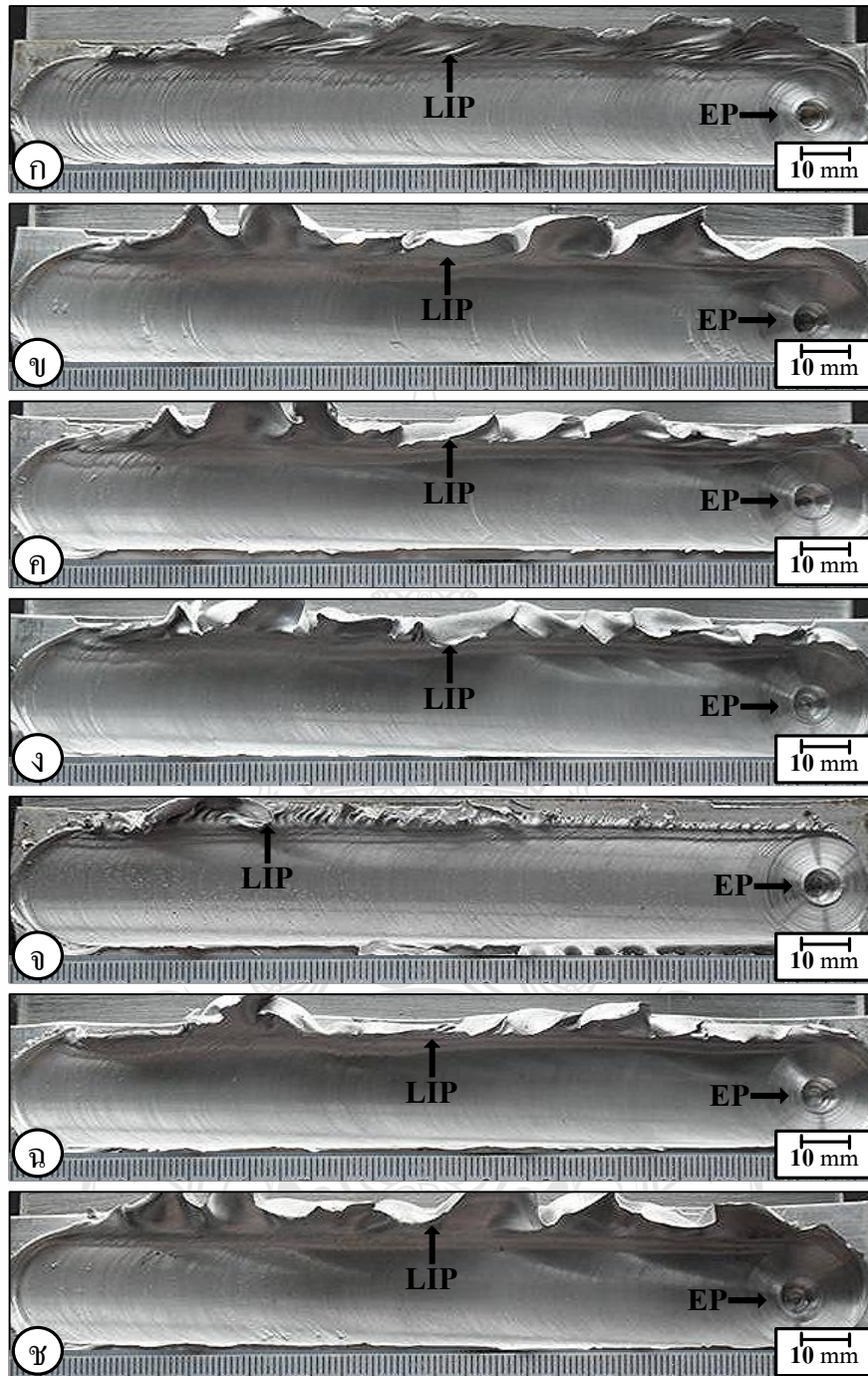
4.1.3 ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย



รูปที่ 4.7 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.8 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



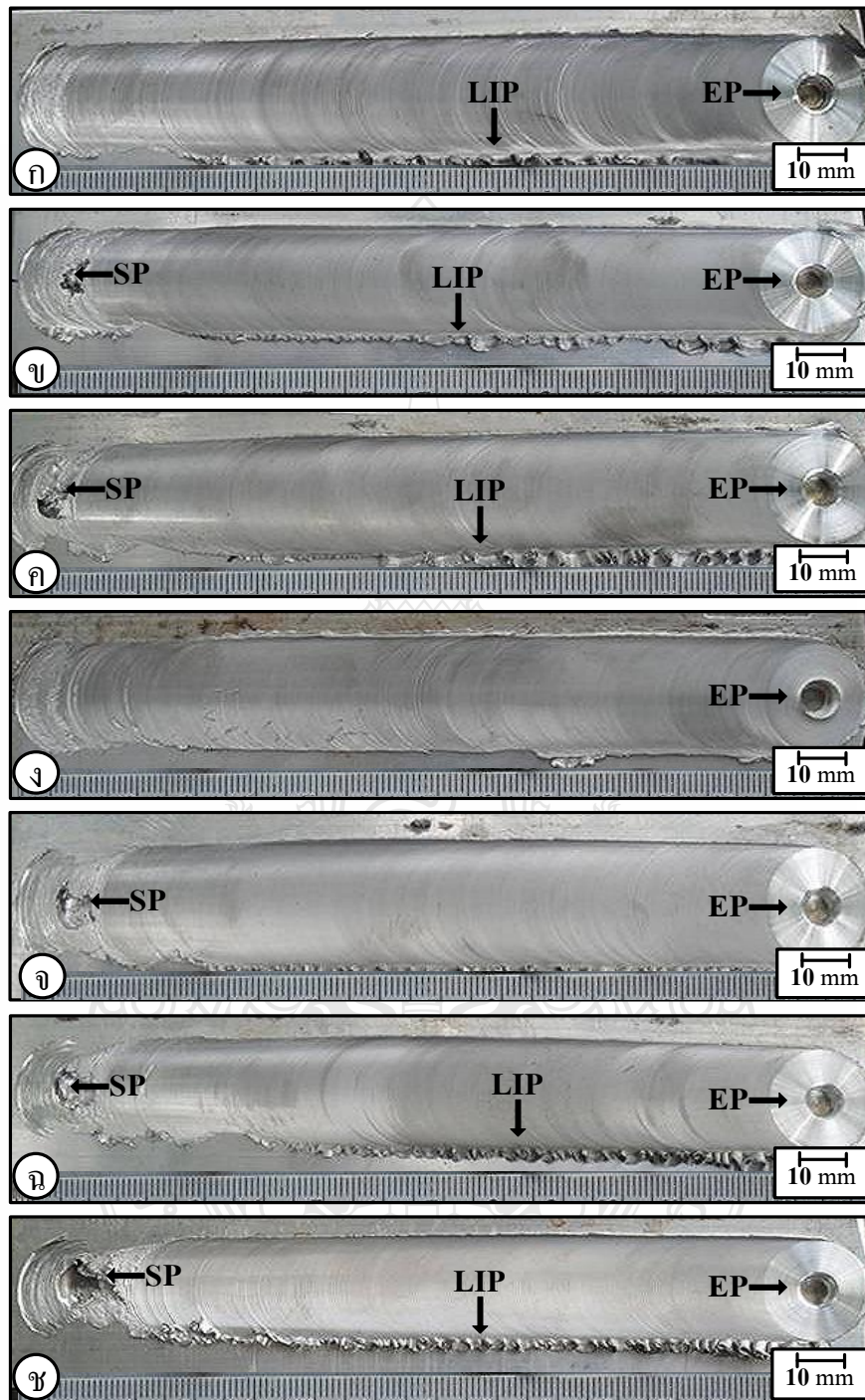
รูปที่ 4.9 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน(ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงจุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย (EP) ของชิ้นงานทุกชิ้น โดยที่ชิ้นงานที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที ดังแสดงในรูป(ก) มีขนาดใหญ่ที่สุด นอกจากจุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายแล้วยังพบจุดบกพร่องที่จุดเริ่มต้น (SP) ของชิ้นงานทุกความเร็วเดิน โดยแนวโน้มความรุนแรงและขนาดของจุดบกพร่องเริ่มจากน้อยไปหามาก ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นเริ่มจากชิ้นงานความเร็วเดินต่ำๆ ผิวรอยเชื่อมมีลักษณะหยาบ แต่เมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะพบว่าความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมจะมีความละเอียดและสมบูรณ์มากขึ้นด้วยเช่นกัน

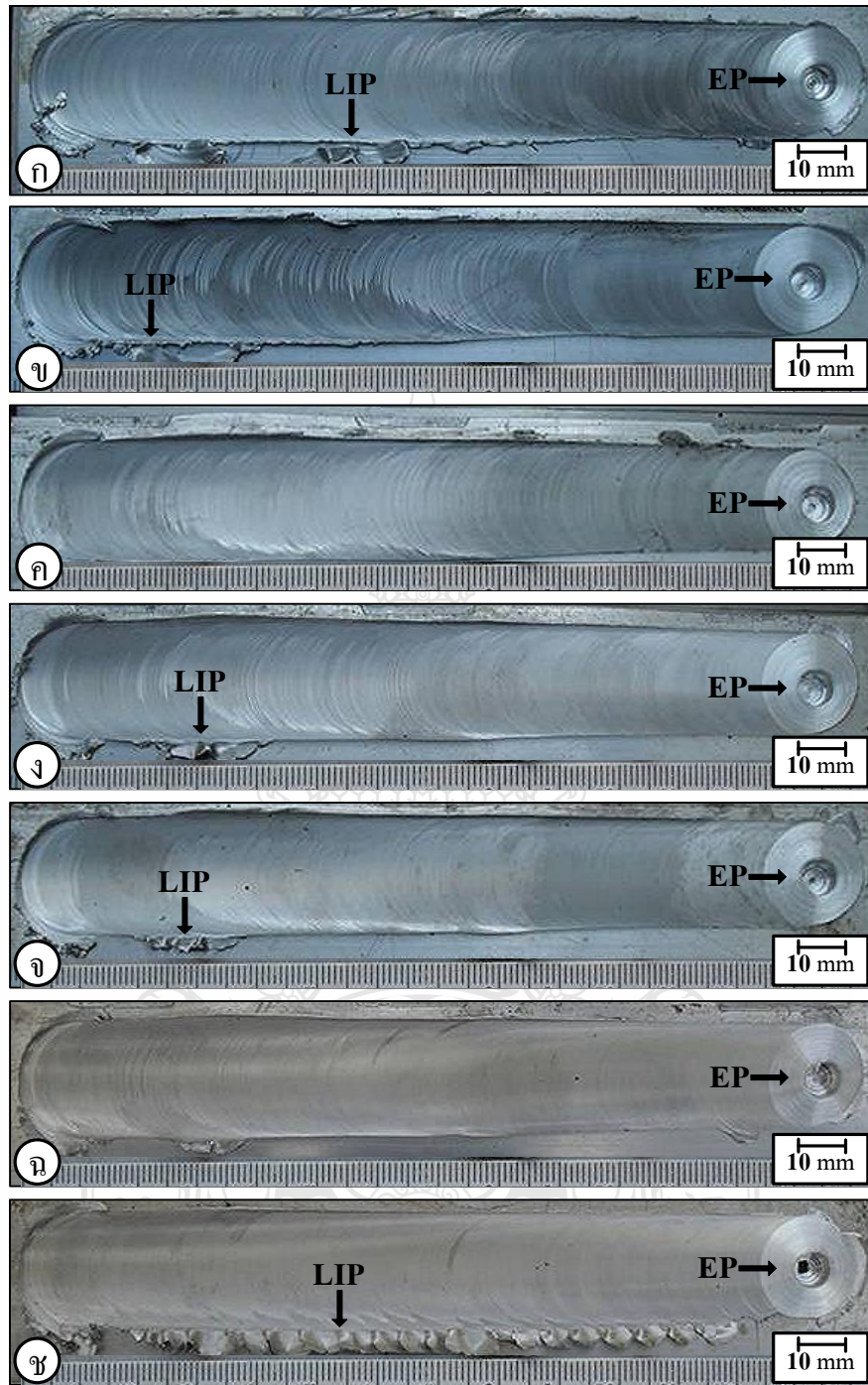
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของจุดบกพร่องสุดท้ายเกิดขึ้นกับทุกสถานะความเร็วเดิน เช่นเดียวกับความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที แต่จุดบกพร่องที่จุดเริ่มต้น (SP) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (จ) และ 4.8 (ข) เท่านั้นที่มีจุดบกพร่องที่จุดเริ่มต้นเกิดขึ้น ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมเริ่ม ดังแสดงในรูป 4.8 (ก) มีความสมบูรณ์ที่ยังไม่ละเอียดมากนัก ยังมีครีบกี้เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของชิ้นงานเล็กน้อย แต่เมื่อความเร็วเดินมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมก็ดีขึ้นละเอียดขึ้นเรื่อยๆเช่นกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 ความเร็วรอบแล้วพบว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 150 มม./นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (จ) มีความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมมากที่สุด

ที่รอยเชื่อมความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นมีความคล้ายกับความเร็วรอบที่ 250 และ 500 รอบ/นาที คือ มีจุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย (EP) เกิดขึ้นเช่นกันแต่จุดบกพร่องที่จุดเริ่มต้น (SP) พบว่าไม่มีจุดพบพร่องเกิดขึ้นกับรอยเชื่อมทุกสถานะความเร็วเดิน ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมพบว่าผิวของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ละเอียดใกล้เคียงกันและมีครีบกี้เกิดขึ้นที่ทุกสถานะความเร็วเดินด้วย พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วเดินเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆปริมาณของครีบกี้ที่เกิดขึ้นก็มีปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ เช่นกัน

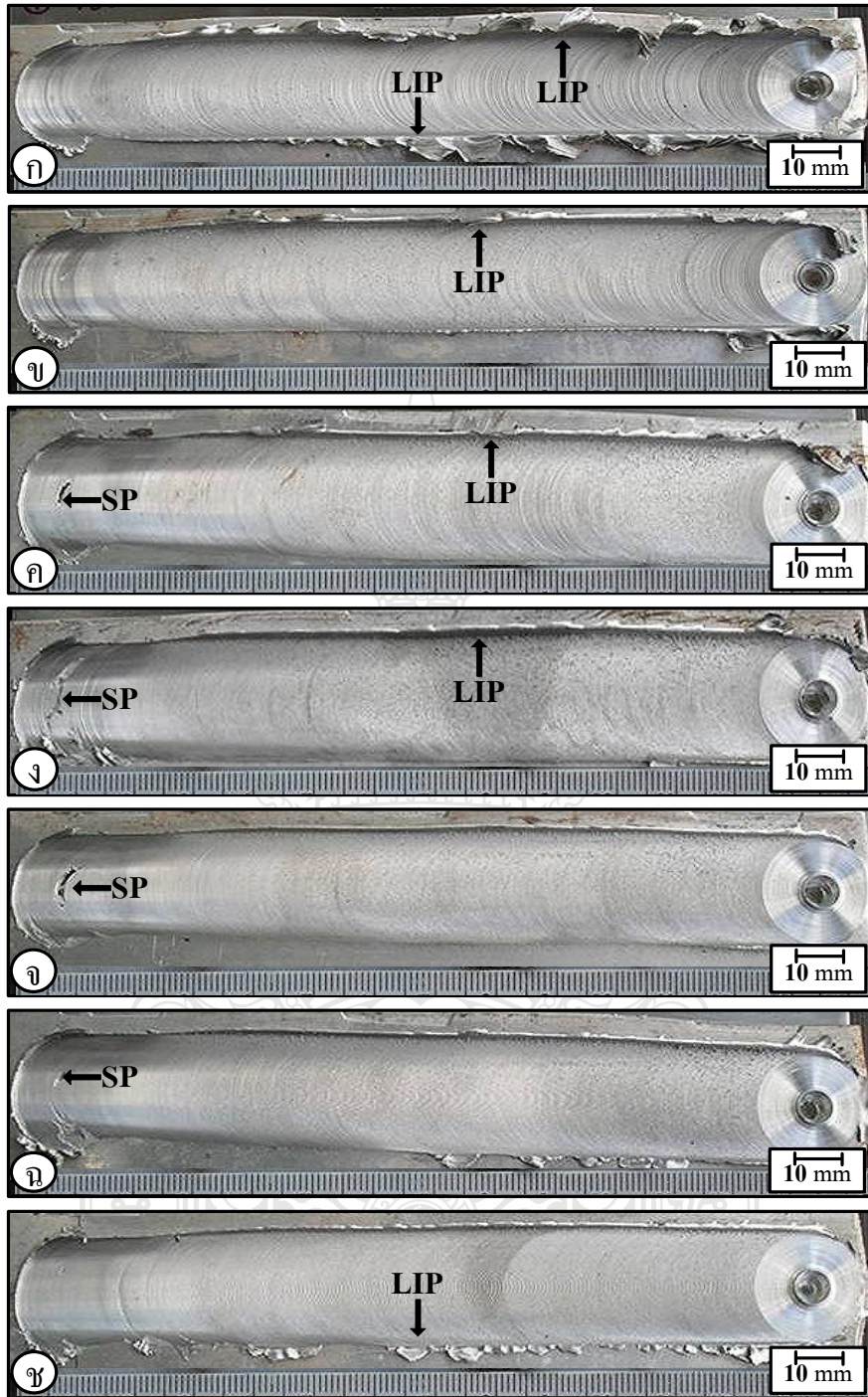
4.1.4 ตัวกวนทรงกรวย



รูปที่ 4.10 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.11 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.12 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

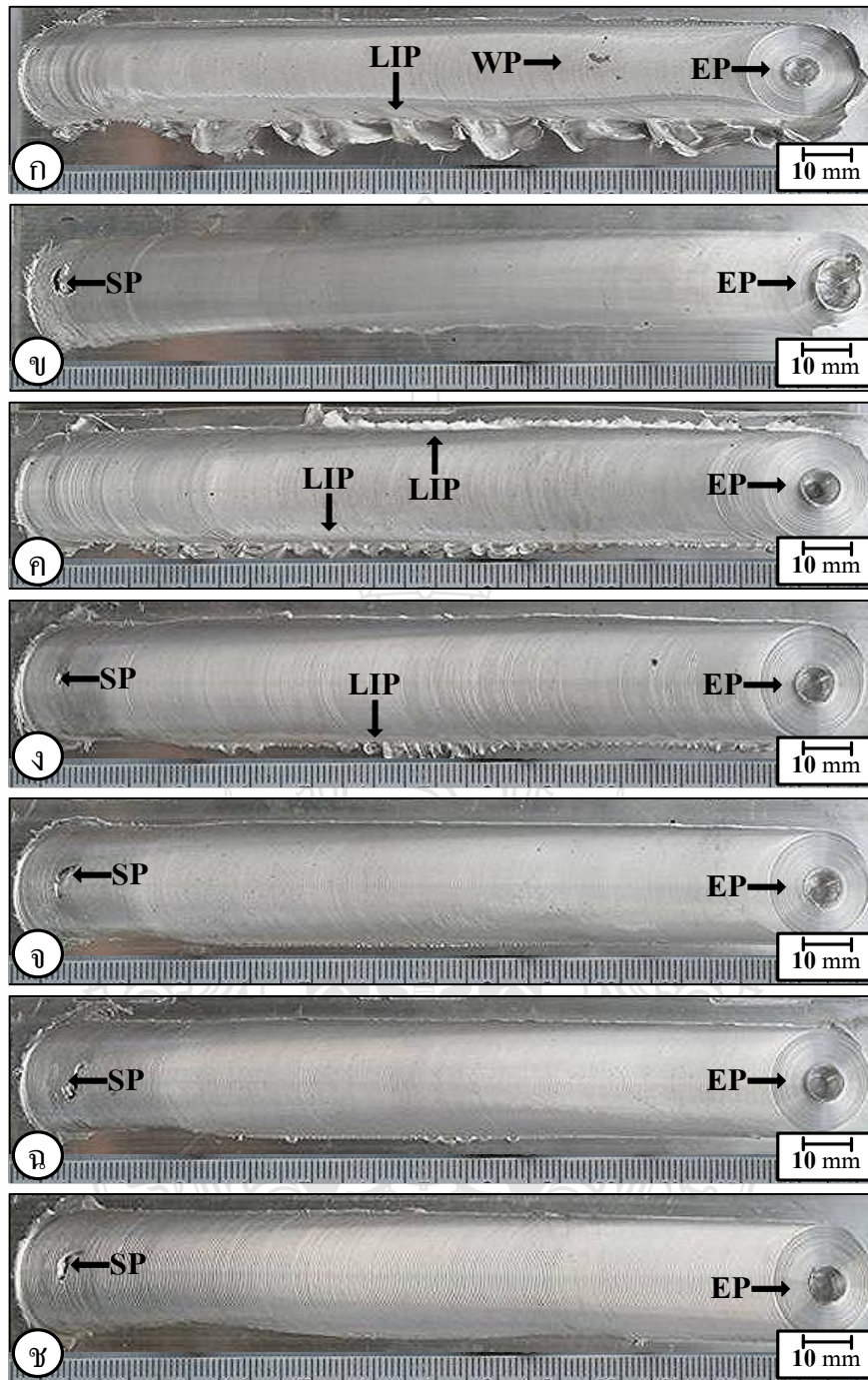
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากการตรวจสอบด้วยภาพถ่าย สังเกตเห็นได้ว่า จะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่จุดสุดท้าย (EP) ของชิ้นงานทุกชิ้น และที่ขอบของชิ้นงานแต่ละชิ้นจะมีครีบกี้เกิดขึ้นเล็กน้อยโดยมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที และความเร็วเดิน 100 มม./นาที พบว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ตลอดตามแนวเชื่อม แต่ที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที จะมีความสมบูรณ์มากกว่าเล็กน้อยตรงตำแหน่งเริ่มต้นของแนวเชื่อม ส่วนที่ความเร็วเดินอื่นๆ พบว่ามีลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมจะมีผิวค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่จะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นตรงตำแหน่งเริ่มต้น (SP) ของแนวเชื่อม

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11 มีจุดบกพร่องที่มีขนาดใกล้เคียงกันเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของชิ้นงานทุกชิ้น และลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์มากกว่าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นว่าไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นเลยในทุกความเร็วเดิน รวมถึงครีบกี้ที่เกิดขึ้นตรงบริเวณขอบของแนวเชื่อมก็ยังเกิดขึ้นน้อยกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

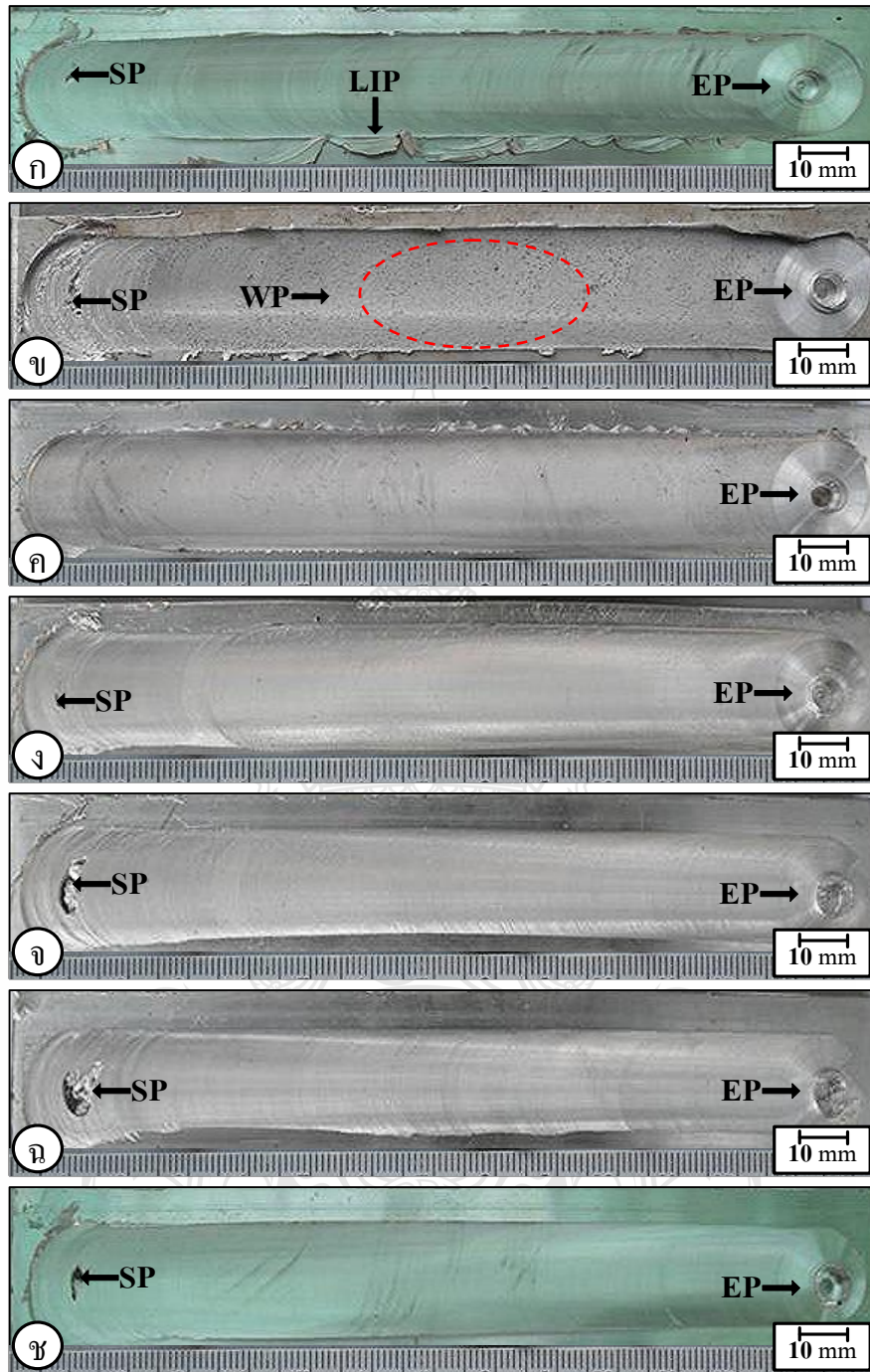
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.12 มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของชิ้นงานทุกชิ้น เหมือนกับที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วรอบ 500 มม./นาที ผิวแนวเชื่อมค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ มีครีบกี้ตรงบริเวณขอบของแนวเชื่อมเล็กน้อย และมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นตรงตำแหน่งเริ่มต้นของแนวเชื่อม โดยภาพรวมแล้วจะเกิดขึ้นน้อยกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที แต่จะมากกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที



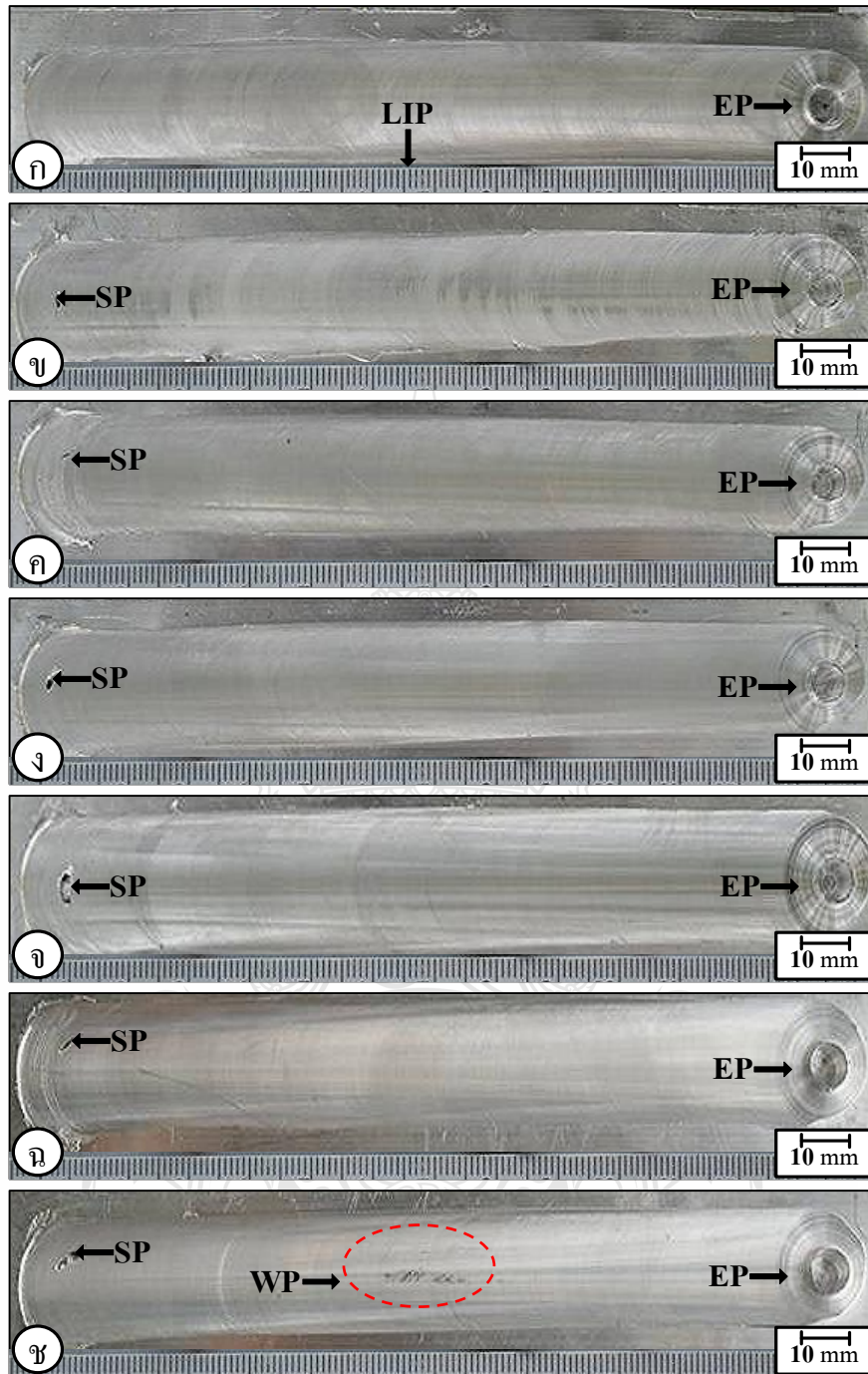
4.1.5 ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา



รูปที่ 4.13 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.14 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวแกนทรงกรวยเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ซ) 175 มม./นาที



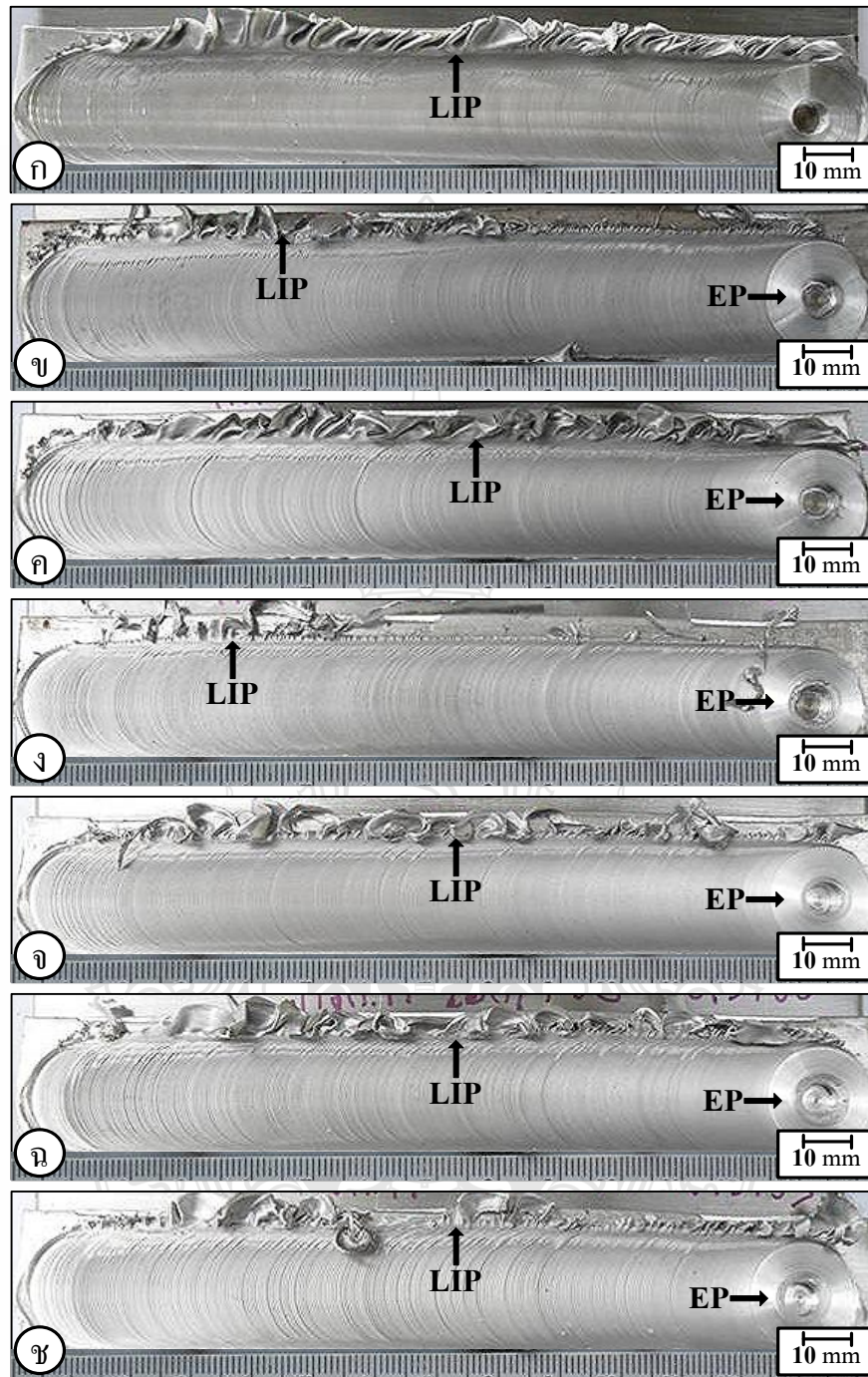
รูปที่ 4.15 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวแกนทรงกรวยเกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที
 ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากการตรวจสอบด้วยภาพถ่าย สังเกตเห็นได้ว่า มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของชิ้นงานทุกชิ้น แต่ที่ความเร็วเดิน 500 มม./นาที จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าที่ความเร็วเดินอื่นๆ ส่วนครีบบที่เกิดขึ้นตรงบริเวณขอบของแนวเชื่อมจะมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเดินเพิ่มมากขึ้น และพบว่าลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อมจะค่อนข้างมีความสม่ำเสมอทุกสถานะความเร็วเดิน แต่สังเกตได้ว่าที่ความเร็วเดิน 75 มม./นาที จะมีผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด

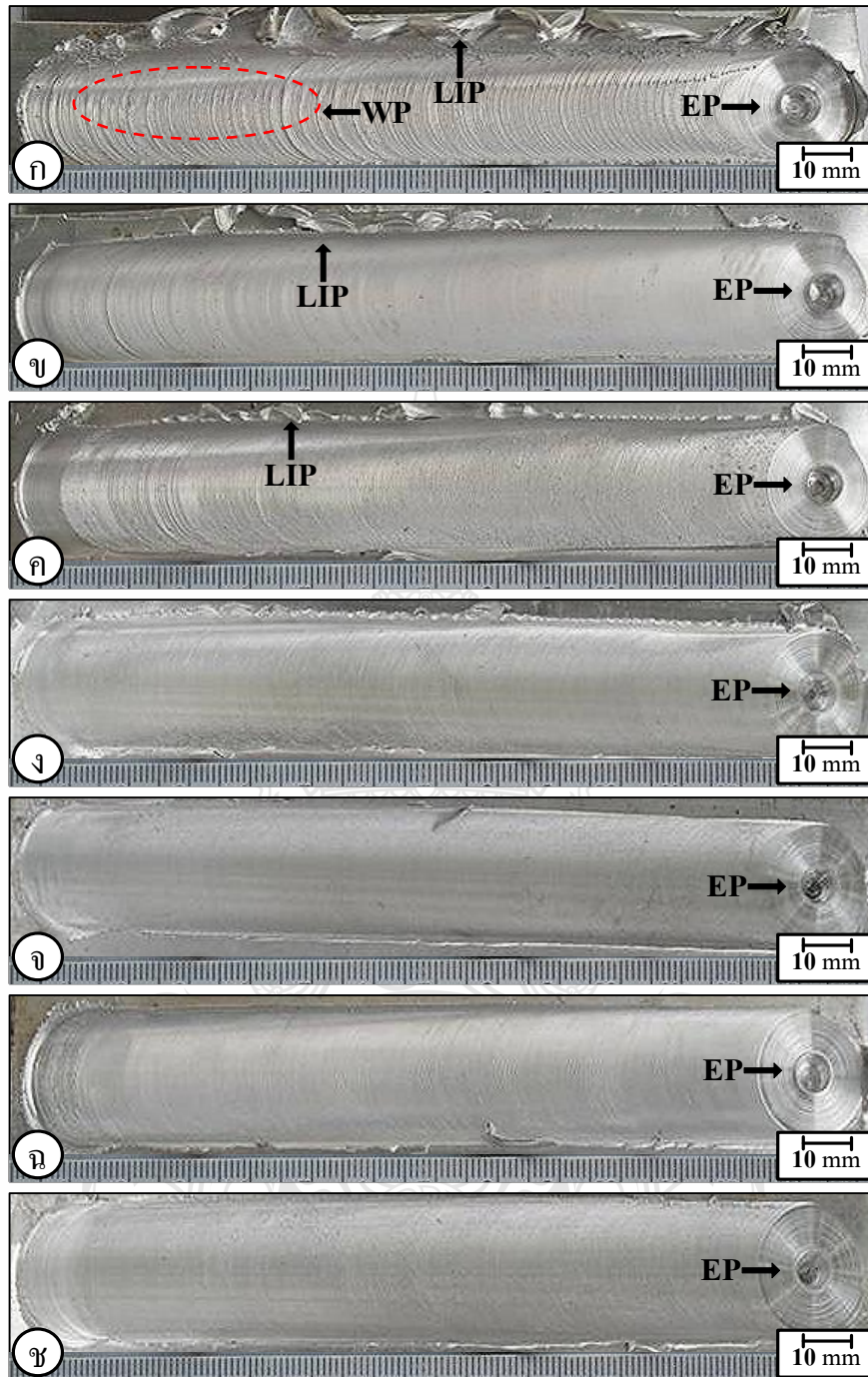
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของชิ้นงานทุกชิ้น ส่วนครีบบที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของแนวเชื่อมจะมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเดินเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ลักษณะผิวหน้าแนวเชื่อมค่อนข้างสม่ำเสมอทุกสถานะความเร็วเดินแต่ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที จะมีผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีลักษณะแตกต่างจากความเร็วเดินอื่นๆ ตรงที่มีผิวหน้าที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆเกิดขึ้นทั่วบริเวณแนวเชื่อมส่วนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งเริ่มต้นของแนวเชื่อมจะเกิดขึ้นชัดเจนมากกว่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของชิ้นงานทุกชิ้นแต่จะมีขนาดใหญ่กว่าที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 และ 500 รอบ/นาที มีลักษณะผิวหน้าแนวเชื่อมเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีครีบบเกิดขึ้นที่ขอบของแนวเชื่อม จุดบกพร่องตรงตำแหน่งเริ่มต้นของแนวเชื่อมเกิดขึ้นน้อยมาก และจะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นเล็กน้อยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาที จากลักษณะต่างๆ ที่กล่าวมาโดยรวมแล้วแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีความสมบูรณ์มากกว่าความเร็วรอบที่ 250 และ 500 รอบ/นาที

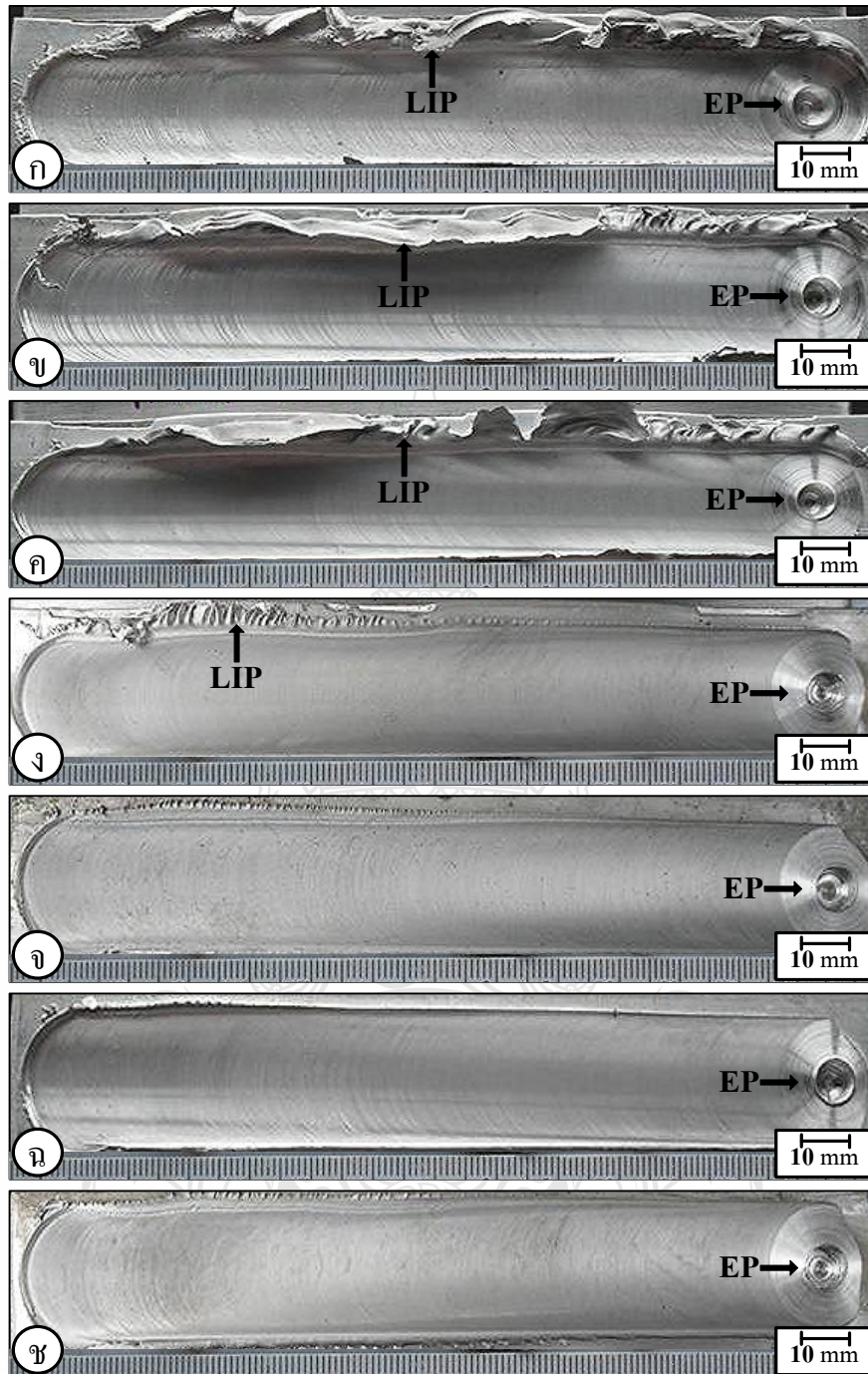
4.1.6 ตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย



รูปที่ 4.16 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.17 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.18 ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดิน (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.61 ตัวกวนทรงกรวยเป็นเกลียวทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทุกสถานะความเร็วเดิน พบว่ารอยเชื่อมที่เกิดขึ้นมีจุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายทุกสถานะความเร็วเดิน ความสมบูรณ์ของผิวหน้าของรอยเชื่อมมีลักษณะที่หยาบเล็กน้อยมีความละเอียดสมบูรณ์ที่สุดที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที ดังแสดงในรูป(จ) ที่บริเวณขอบข้างของ

ผิวหน้ารอยเชื่อมเกิดครีบขึ้นในทุกสถานะความเร็วเดินในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยที่ความเร็วเดินดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) มีปริมาณครีบที่เกิดขึ้นมากที่สุดในขณะที่ความเร็วเดินที่ 100 มม./นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) แนวโน้มของครีบที่เกิดขึ้นมีลักษณะลดน้อยลงเมื่อความเร็วเดินเพิ่มมากขึ้น

รอยเชื่อมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.17 ตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียวทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทุกสถานะความเร็วเดิน เกิดจุดบกพร่องที่จุดสุดท้ายทุกสถานะความเร็วเดินเช่นกันกับความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาที่ผิวหน้าของรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับความเร็วเดินที่ 250 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่ามีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมมีความละเอียดมากกว่าผิวหน้ารอยเชื่อมที่ 250 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.16 โดยที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.16 ผิวหน้ามีความหยาบมากมีครีบที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของผิวหน้ารอยเชื่อมที่ปริมาณมากด้วย เมื่อเพิ่มค่าของความเร็วเดินมากขึ้นเรื่อยๆ พบว่าผิวหน้าของรอยเชื่อมมีความละเอียดมากขึ้น ครีบที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของผิวหน้าของรอยเชื่อมลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีเลยที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.17

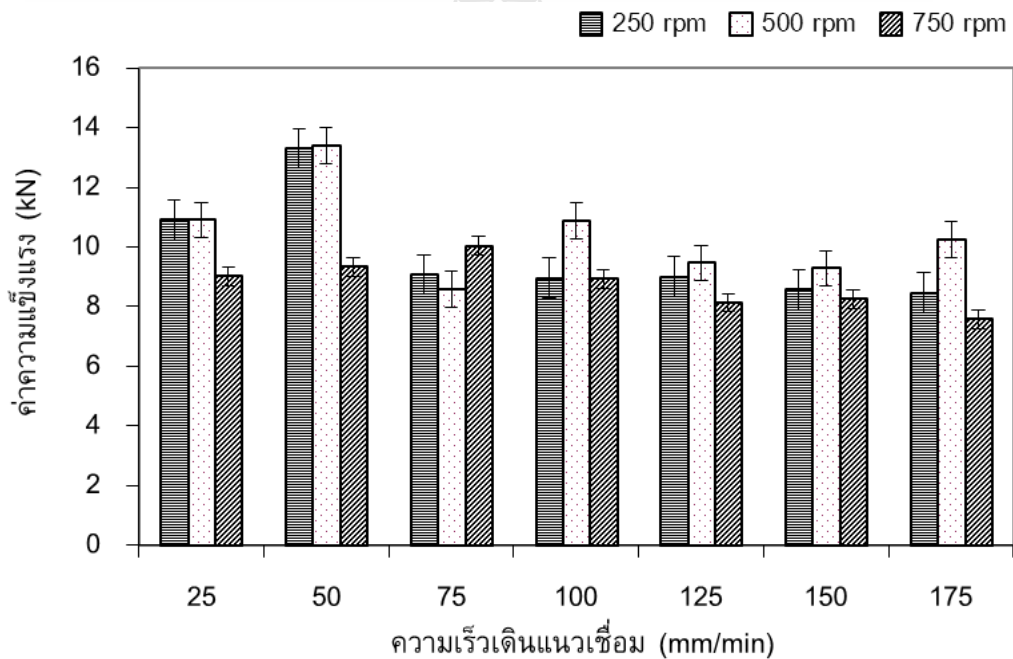
รอยเชื่อมความเร็วรอบ 750 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.18 ทุกสถานะความเร็วเดินพบว่าเกิดครีบขึ้นกับชิ้นงานที่ความเร็วเดินคือ รูปที่ (ก) - (ง) ความเร็วเดิน 25 50 75 และ 100 มม./นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.18 ตามลำดับ โดยมีครีบที่เกิดขึ้นในปริมาณที่มากที่สุดสามความเร็วเดินคือ 25 50 และ 75 มม./นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.18 ตามลำดับ และลดลงเมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้น ความสมบูรณ์ของผิวหน้ารอยเชื่อมชิ้นงานที่มีครีบเกิดขึ้นจะมีลักษณะที่หยาบในขณะที่ผิวหน้าของชิ้นงานที่ไม่มีครีบจะมีลักษณะที่ละเอียด โดยผิวหน้าที่ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.18 ความเร็วเดิน 125 มม./นาทิต่างแสดงในรูปที่ 4.18 มีความสมบูรณ์ของผิวหน้ารอยเชื่อมดีที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกันทั้งสามความเร็วรอบ

จากการทดลองการเชื่อมด้วยกระบวนการเสียดทานแบบกวนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยตัวกวนที่มีรูปทรงแตกต่างกัน และสภาวะการเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนดพบว่า ครีบอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของรอยเชื่อมเกิดขึ้นเนื่องจากการกดและกวนของเครื่องตัวกวนทั้งสองข้างของแนวเชื่อม ขนาดครีบมีขนาดเล็กลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยคาดว่าสาเหตุเกิดจากผลลักษณะนี้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นลดลง นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบครีบที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบต่างกันที่ความเร็วเดินเดียวกัน พบว่าขนาดของครีบมีขนาดที่เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย และเกินขึ้นในปริมาณที่มากขึ้นอยู่กับสภาวะตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อม ตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้ค่าความร้อนของการเชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ ความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมของตัวกวน หากความเร็วรอบตัวกวนสูงและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำแล้วมีผลทำให้ความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าอะลูมิเนียมที่มากกว่าจึงทำให้อะลูมิเนียมอ่อนตัว ประกอบกับแรงกดและแรงเฉือนที่เกิดจากการกดตัวกวนลงสู่วัสดุแนวเชื่อมและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเชื่อมตามลำดับ ดังที่ Chen and Kovacevic กล่าวไว้ [35]

4.2 อิทธิพลของตัวแปรเชื่อมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน

จากการทดวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวแปรต่างๆ พบว่าแนวเชื่อมเกิดความสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบตัวกวน ความเร็วเดินแนวเชื่อม และชนิดของตัวกวน ล้วนแล้วแต่มีผลต่อลักษณะของผิวหน้ารอยเชื่อมทั้งสิ้น ดังนั้น เพื่อเป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าผิวหน้ารอยเชื่อมที่ทำการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย ที่มีค่าความแข็งแรงภายในรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิมมากน้อยเพียงใด จึงได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมทุกๆ สภาวะตัวแปรเชื่อม ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

4.2.1 ตัวกวนทรงกระบอก

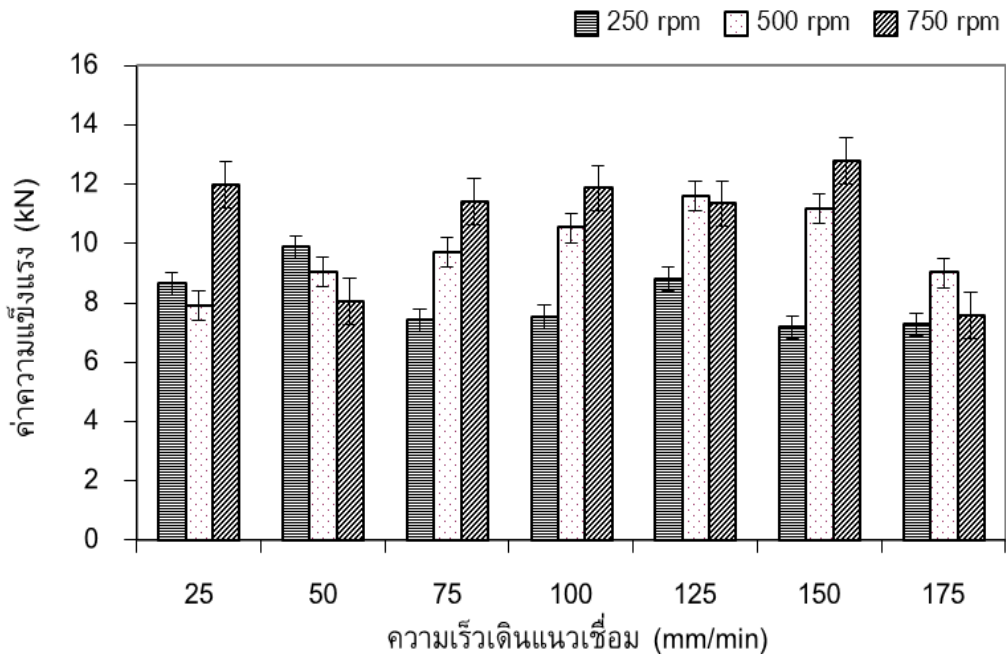


รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก

จากกราฟรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเฉือน (kN) กับค่าความเร็วรอบของตัวกวนและค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม (มม./นาที) พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉือนมีค่าที่สูงต่ำสลับกันขึ้นอยู่กับความเร็วเดินของแนวเชื่อม ลักษณะของกราฟที่ความเร็วรอบ 250 และ 500 รอบ/ นาที มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงที่ค่อนข้างสูงในทุกๆ ความเร็วเดิน สังเกตได้ว่าที่ค่าความเร็วรอบตัวกวนทั้งสามความเร็วรอบและค่าความเร็วเดินตั้งแต่ 75 - 175 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงที่สูงต่ำสลับกันค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนที่ความเร็วรอบ 250 และ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที พบว่า มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่าค่อนข้างสูงใกล้เคียงกัน จากการเชื่อมเสียดทานแบบ

กวนด้วยตัวกวนทรงกระบอกได้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ค่าความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 13.4 kN

4.2.2 ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา

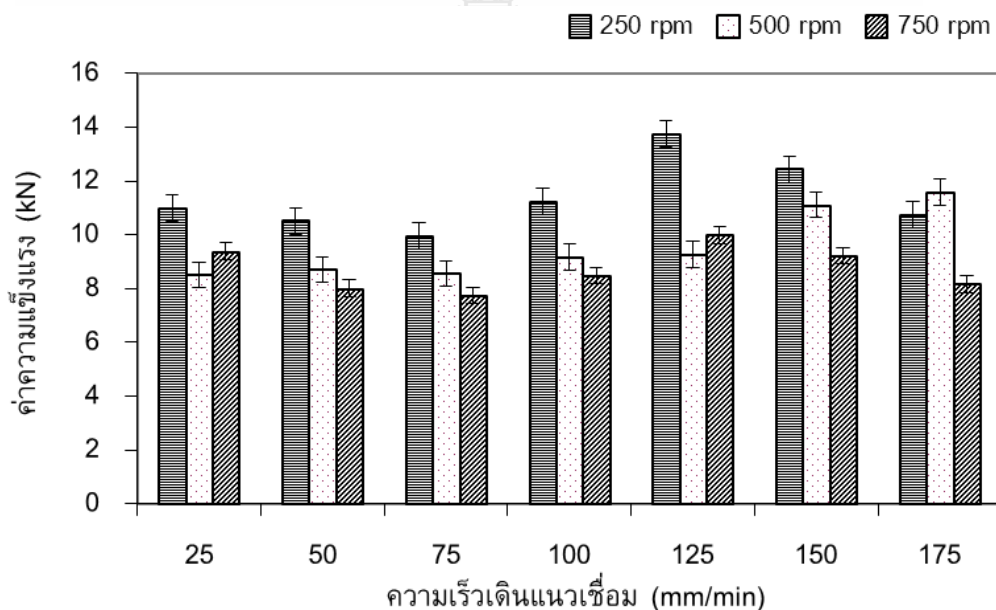


รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา

จากกราฟรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเฉือน (kN) กับค่าความเร็วรอบของตัวกวนและค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม (มม./นาที) พบว่า มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ค่อนข้างสูงที่ความเร็ว เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อมและมีค่าที่ลดลงสลับกันไปเรื่อยๆ ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนลดต่ำลงตามลำดับที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ค่อนข้างต่ำอย่างสม่ำเสมอ และมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบของตัวกวนเพิ่มขึ้นเป็น 500 และ 750 รอบ/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 12.8 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 750 รอบ/ นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนมีความสอดคล้องต่อความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบที่สูงบนผิวหน้าแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ตลอดแนวเชื่อม

4.2.3 ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย

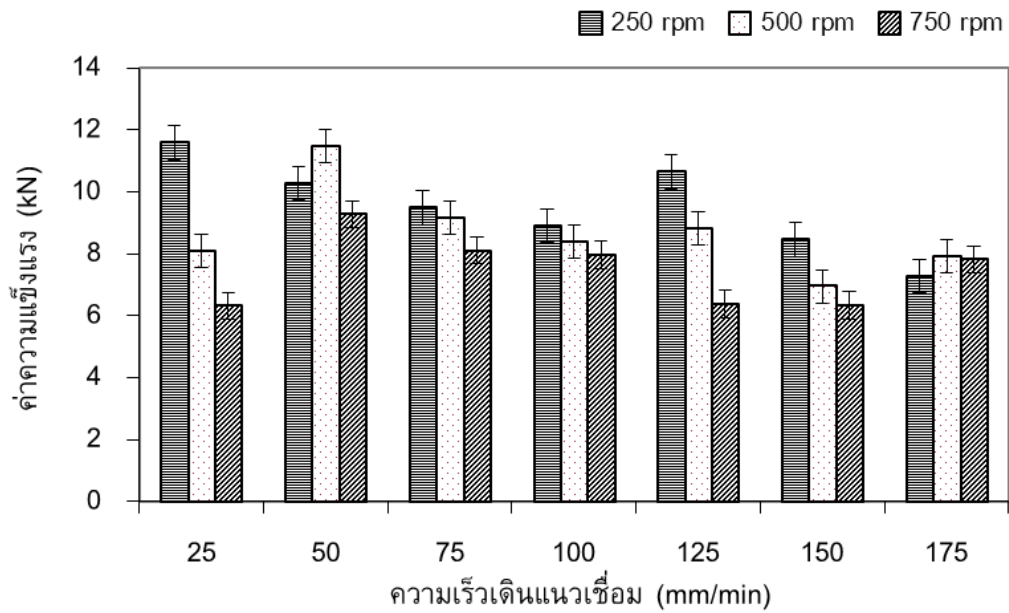
จากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเนื่องกับความเร็วยรอบของตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.21 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องส่วนใหญ่มีค่ามากที่สุดที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/ นาที ทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม ส่วนที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 75 100 150 และ 175 มม./นาที ที่ความเร็วรอบ 500 และ 750 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเนื่องที่ลดลง ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วเดิน 25 และ 125 มม./นาที กลับมีค่าความแข็งแรงดึงเนื่องที่สลับกันที่ความเร็วรอบ 750 และ 500 รอบ/นาที ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องที่มีค่ามากที่สุดตัวแปรเชื่อมทั้งหมด พบว่า ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที มีค่าเท่ากับ 13.750 kN



รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย

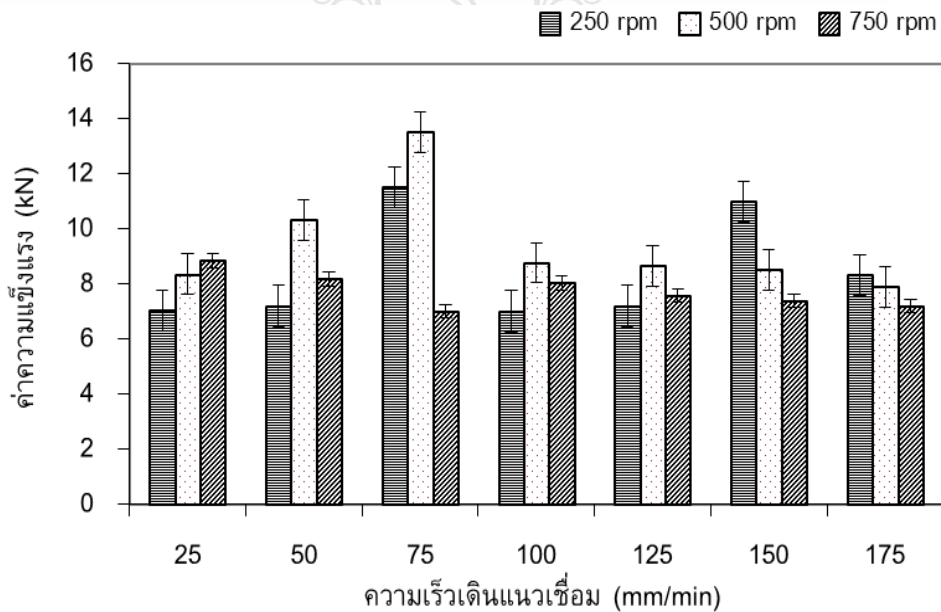
4.2.4 ตัวกวนทรงกรวย

จากกราฟรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเนื่องกับค่าความเร็วยรอบของตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องมีค่าลดลงในแต่ละความเร็วเดิน เมื่อความเร็วยรอบเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเนื่องที่แตกต่างไปจากค่าความเร็วเดินอื่นๆ คือ ที่ความเร็วยรอบที่ต่ำค่าความแข็งแรงดึงเนื่องมีค่าต่ำตามไปด้วย ตัวแปรเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องมีค่าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 11.578 kN ที่สภาวะความเร็วยรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 25 มม./นาที แนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากสภาวะการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย มีค่าที่ใกล้เคียงสม่ำเสมอทุกๆ ความเร็วยรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อม



รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย

4.2.5 ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา

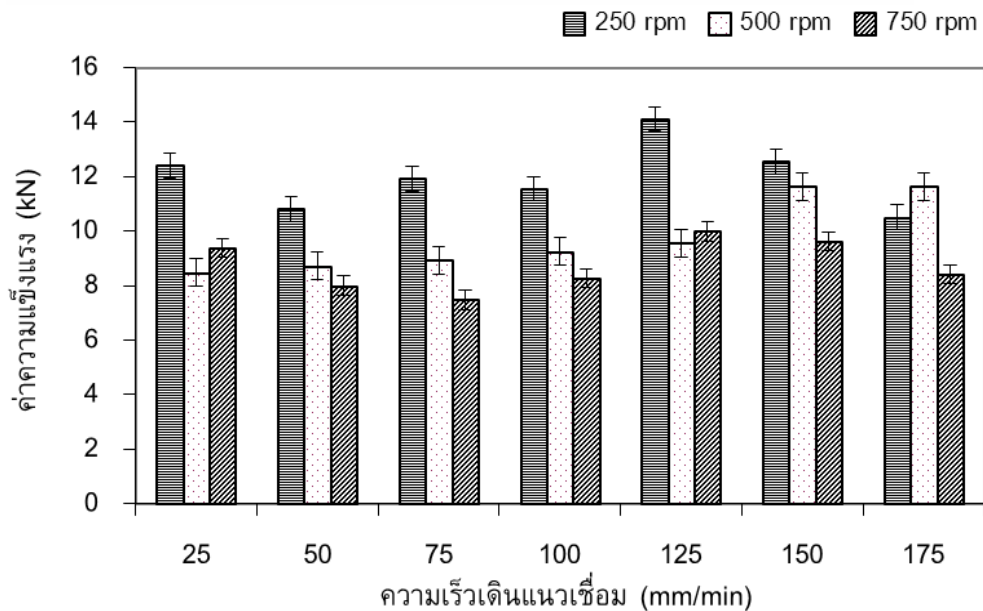


รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา

ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องจากการเชื่อมด้วยความเร็วเดินและความเร็วรอบของตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาที่สภาวะต่างๆ ดังกราฟรูปที่ 4.23 พบว่า ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มม./ นาที ได้ค่าความแข็งแรงดึงเนื่องดีที่สุดคือ 13.500 kN แนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงเนื่องมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที ตามค่าความเร็ว

รอบตัวกวนที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่ในทางที่กลับกันที่ค่าความเร็วรอบตัวกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าความแข็งแรง ดึงเฉือนมีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 และ 175 มม./นาทึ ส่วนที่ค่าความเร็ว เดิน 50 - 125 มม./นาทึ ได้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ดีที่สุดที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาทึ

4.2.6 ตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย



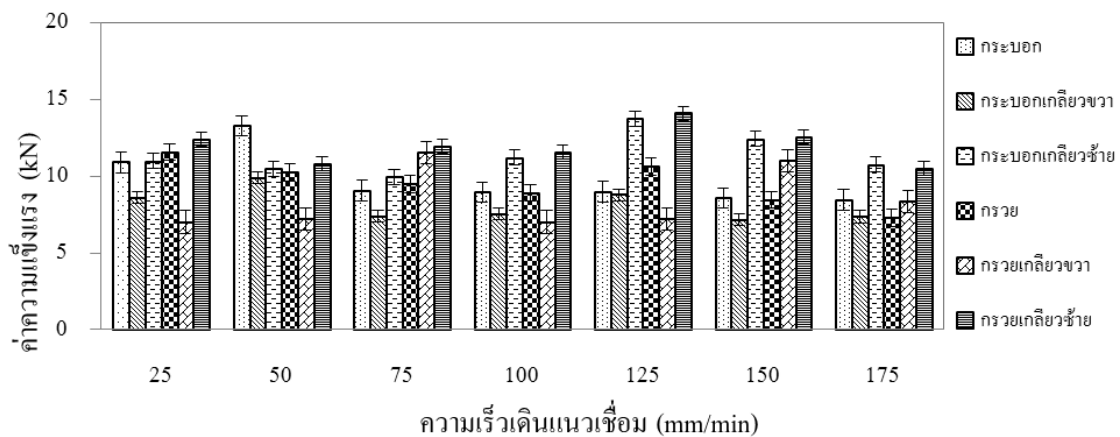
รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย

จากกราฟรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของความเร็ว รอบตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้ายกับค่าความเร็วรอบและความเร็วเดินตัวกวน แสดงให้เห็นว่าค่าความ แข็งแรงดึงเฉือนมีค่ามากที่สุดที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาทึ และลดลงเรื่อยๆ เพื่อความเร็ว รอบเพิ่มขึ้นที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 75 100 และ 150 มม./นาทึ ส่วนที่ความเร็วเดิน 25 125 และ 175 มม./นาทึ ตามลำดับ มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงต่ำสลับกันขึ้นอยู่กับสถานะความเร็วรอบตัว กวน แสดงดังกราฟ ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนส่วนใหญ่ของการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย มี ค่ามากที่สุดที่สถานะ 250 รอบ/ นาทึ เกือบทุกๆ สถานะความเร็วเดินแนวเชื่อม ลักษณะของกราฟส่วนใหญ่ พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ใกล้เคียงกันที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 และ 750 รอบ/ นาทึ ทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม จากผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงเฉือน ได้ค่าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 13.047 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/ นาทึ ความเร็วเดิน 125 มม./นาทึ ซึ่งเป็นสถานะการเชื่อม ที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวนของรอยต่อเกย ระหว่างอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่เชื่อมด้วยตัวกวนที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ได้แก่ ตัวกวน ทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ตัวกวนทรงกรวย ตัว

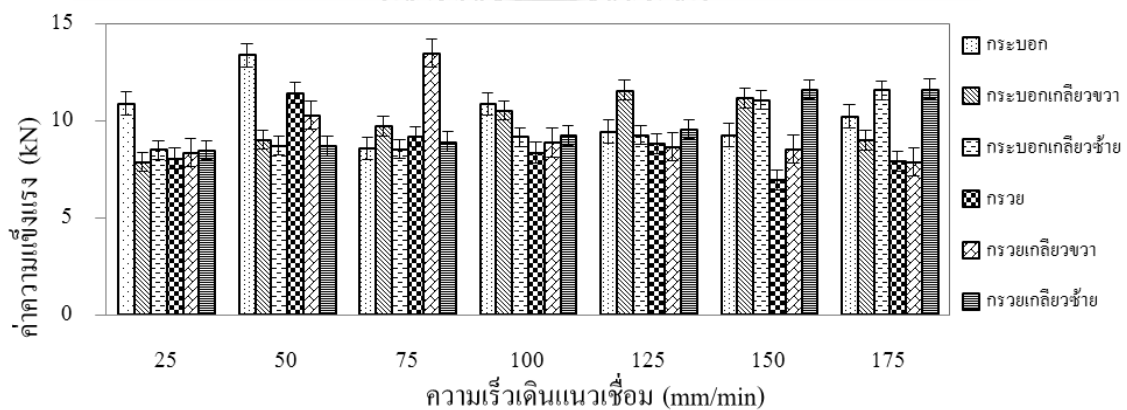
กวนทรงกรวยเกลียวขวา และตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย ทำการเชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม ตั้งแต่ 25 - 175 มม./นาที ความเร็วรอบตัวกวน 250 500 และ 750 รอบ/นาที ซึ่งจะได้ค่าความแข็งแรง ดึงเฉือนที่แตกต่างกันทุกๆ สภาวะตัวแปรเชื่อม เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภายในรอย เชื่อมในหัวข้อที่ 4.5 พบว่า ทุกๆ รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบตัวกวน ความเร็วเดินแนวเชื่อม รูปร่างของตัวกวน ล้วนแต่มีผลทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างรอยเชื่อมของ อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะรอยเชื่อมที่มีค่า ความแข็งแรงดึงเฉือนสูงที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์จากการตรวจสอบพบว่าเกิดการแทรกตัวของ เหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปอยู่ในส่วนของอะลูมิเนียมในปริมาณที่มาก และมีลักษณะเป็นกิ่งก้านยื่นเข้าไป ยึดเกี่ยวกับอะลูมิเนียมตลอดบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม ซึ่งมีความแตกต่างจากรอยเชื่อมที่มีค่า ความแข็งแรงดึงเฉือนต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคพบว่าลักษณะของ อินเทอร์เฟซที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างจากลักษณะของอินเทอร์เฟซรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึง เฉือนที่สูง คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการแทรกตัวเข้าไปในอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างน้อยหรือไม่เกิดการ แทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมเลย จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่า ความแข็งแรงดึงเฉือนที่สูงและต่ำในสภาวะความเร็วรอบ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และรูปทรงตัวกวน ที่เหมาะสมแตกต่างกัน [27] ผลที่ได้จากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนมีความสอดคล้องกับ การศึกษาโครงสร้างจุลภาควิวอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม การวิเคราะห์ลักษณะการฉีกขาด การ ทดสอบความแข็งแรง และการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนในลำดับต่อไป

4.2.7 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรูปร่างตัวกวนต่างๆ ที่ทำการเชื่อมตัว ความเร็วรอบตัวกวน และความเร็วแนวเชื่อมเดียวกัน อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของตัวกวนแต่ละรูปทรง ที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที

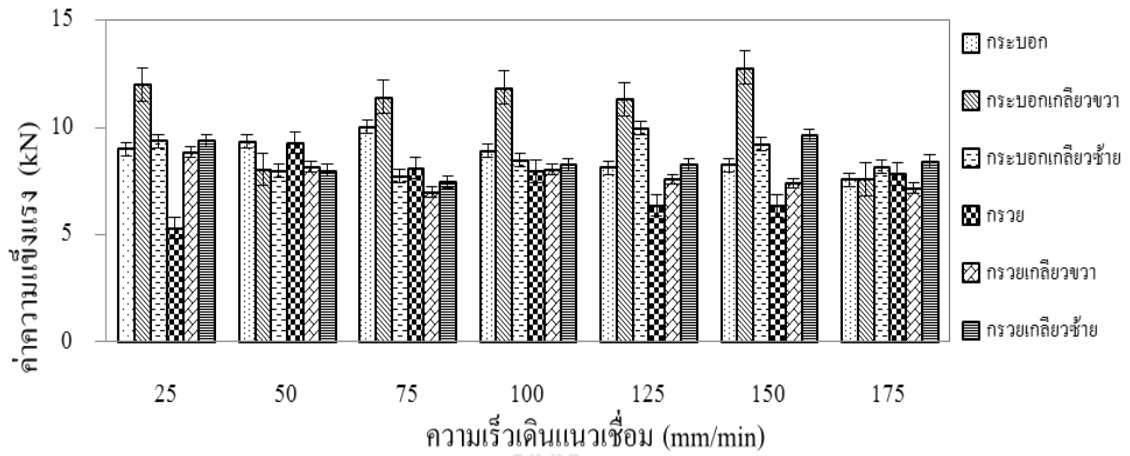
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของตัวกวนแต่ละรูปทรงที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/ นาที ความเร็วเดิน 25 – 175 มม./ นาที สังเกตได้ว่าที่ตัวกวนชนิดต่างๆ มีค่าความแข็งแรงสูงต่ำสลับกันของแต่ละชนิดตัวกวนที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 25 มม./ นาที พบว่าตัวกวนทรงกรวยมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ความเร็วเดิน 50 มม./ นาที ตัวกวนเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนมากที่สุดมี 2 ชนิดคือ ตัวกวนทรงกระบอก และตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา ส่วนตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวามีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดที่ความเร็วเดิน ตัวกวนที่ 75 มม./ นาที และมีความเร็วเดินตัวกวน 125 มม./ นาที ของตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย และกรวยเกลียวซ้ายมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าตัวกวนชนิดอื่นๆ ที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 150 และ 175 มม./ นาที ตามลำดับ ไม่พบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่าสูงสุดของตัวกวนชนิดใดเลย จึงเป็นเหตุทำให้การเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในลักษณะต่อเกลของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม มีค่าพารามิเตอร์ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมในความเร็วเดินแนวเชื่อมดังกล่าว มีค่าที่ไม่เหมาะสมในการเชื่อมและมีค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยตัวกวนแต่ละชนิดที่มีความเร็วเดินที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/ นาที



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของตัวกวนแต่ละรูปทรง ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/ นาที

รูปที่ 4.26 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบชนิดตัวกวนทั้งหกชนิด ที่ทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/ นาที พบว่าตัวกวนแต่ละชนิดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่ามากในแต่ละความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 500 มม./ นาที มีตัวกวนทรงกระบอก และตัวกวนทรงกรวยมีค่าแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วเดิน 75 125 และ 150 มม./ นาที ตามลำดับ หลังทดสอบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเมื่ค่าสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ดีที่สุด จากการทดสอบด้วยตัวกวนทรงกระบอก และทรงกระบอกเกลียวซ้าย ทรงกรวยเกลียวซ้าย ตามลำดับ ส่วนที่ความเร็วเดิน 25 100 และ 175 มม./ นาที ไม่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของแต่ละตัวกวนที่ดีที่สุด ซึ่ง

เป็นค่าความเร็วเดินที่ไม่เหมาะสมกับค่าความเร็วรอบ 500 รอบ/ นาที และขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกวนที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนด้วย



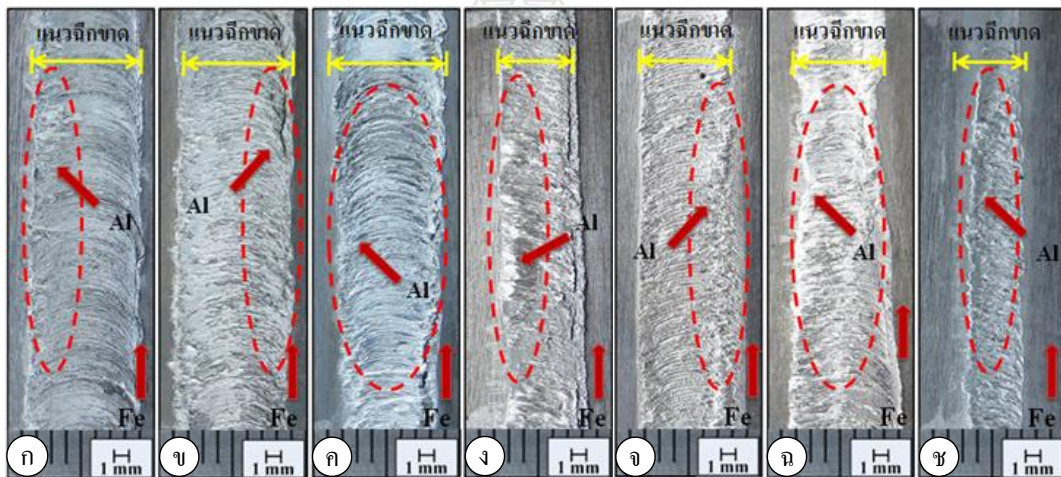
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของตัวกวนแต่ละรูปทรง ที่ความเร็วรอบตัวกวน 750 รอบ/นาที

จากค่าความเร็วรอบตัวกวนที่ 250 และ 500 รอบ/ นาที พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดของแต่ละชนิดตัวกวนมีค่าที่ดีที่สุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับรูปร่างของตัวกวน ความเร็วรอบและความเร็วเดินในกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมต่างกัน จากรูปที่ 4.27 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัวกวนที่ 750 รอบ/ นาที ของตัวกวนชนิดต่างๆ และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่าสูงต่ำสลับกันไป เช่นกับค่าความเร็วรอบตัวกวนที่ 250 และ 500 รอบ/นาที ตามลำดับ ดังกราฟรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ตามลำดับ ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25 50 75 125 และ 150 มม./ นาที ตามลำดับ ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา ทรงกรวย ทรงกระจะบอก ทรงกระจะบอกเกลียวซ้าย และทรงกระจะบอกเกลียวขวา ทรงกรวยเกลียวซ้าย ตามลำดับ ส่วนที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 และ 175 มม./ นาที พบว่า ไม่มีตัวกวนชนิดใดเลยที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนดีที่สุดด้วยการเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวน 750 รอบ/นาที

4.3 ลักษณะรอยฟังกหลายบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณรอยต่อเกย

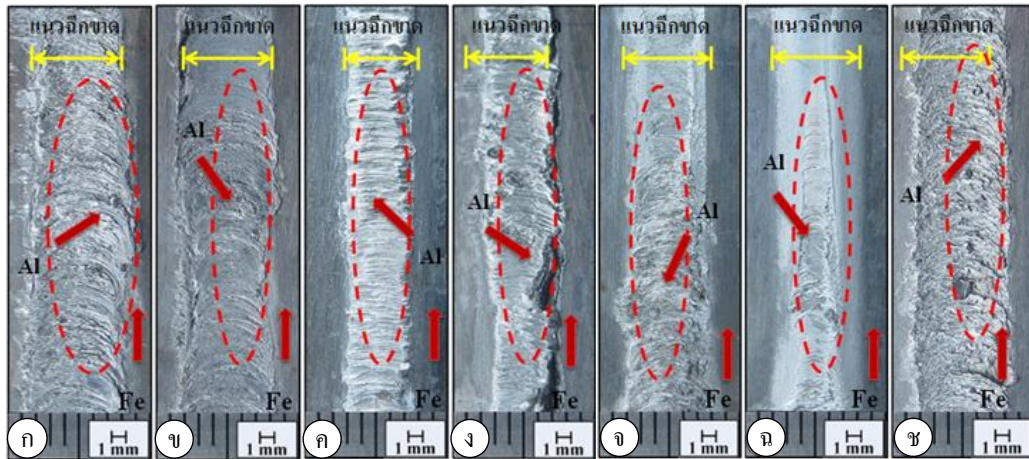
จากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่า รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่สูงต่ำแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะตัวแปรเชื่อมที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบลักษณะการถิกขนาดของรอยเชื่อมหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเพื่อต้องการยืนยันค่าที่ออกมาจากการทดสอบมีความแตกต่างกัน โดยทำการพิจารณาจากภาพถ่ายที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการถิกขนาดและสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์ในลำดับต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ตัวกวนทรงกระบอก



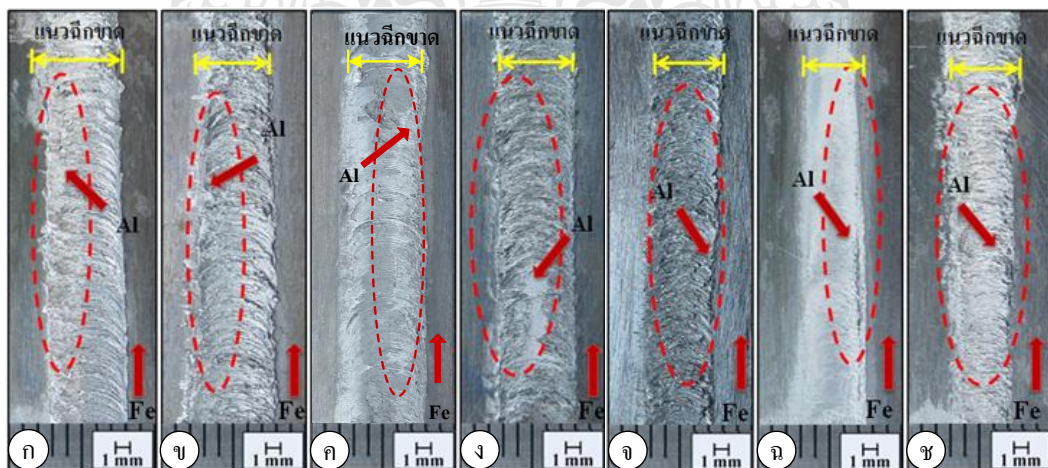
รูปที่ 4.28 รอยถิกขนาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ลักษณะของแนวถิกขนาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.28 มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของตัวกวน ซึ่งมีความเร็วเดินที่ 100 และ 175 มม./นาที จะมีขนาดที่ไม่ใกล้เคียงกับขนาดของตัวกวนมีขนาดเล็กกว่าตัวกวน ลักษณะของรอยถิกขนาดนั้นมีความสม่ำเสมอที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม และมีปริมาณของอะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่ทั่วตลอดแนวเชื่อม ที่ความเร็วเดิน 150 มม./นาทีจะมีขนาดของแนวถิกขนาดที่ไม่สม่ำเสมอและที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาที แนวถิกขนาดนั้นมีขนาดเล็กกว่าตัวกวนมากที่สุด



รูปที่ 4.29 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเงื่อนไขที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

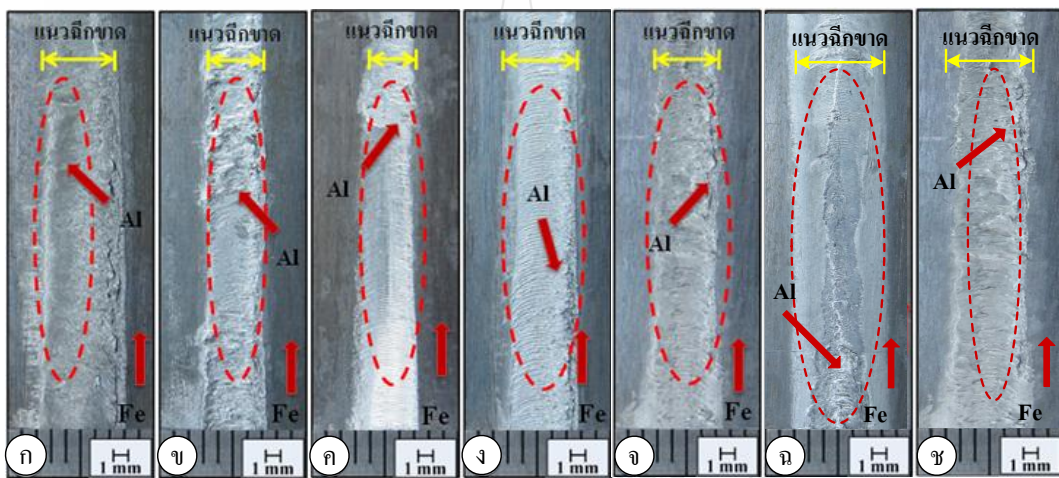
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.29 มีขนาดเล็กกว่าขนาดตัวทวน ซึ่งมีเพียงความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที มีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้วแนวฉีกขาดที่ 250 รอบ/นาที มีขนาดใกล้เคียงกับตัวทวนมากกว่า ลักษณะรอยฉีกขาดนั้นมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับ 250 รอบ/นาที จะมีความสม่ำเสมอมากกว่า 500 รอบ/นาที ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีปริมาณของอะลูมิเนียมแทรกตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับ 250 รอบ/นาที และรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนไม่เท่ากันเมื่อเทียบกับ 250 รอบ/นาที



รูปที่ 4.30 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเงื่อนไขที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

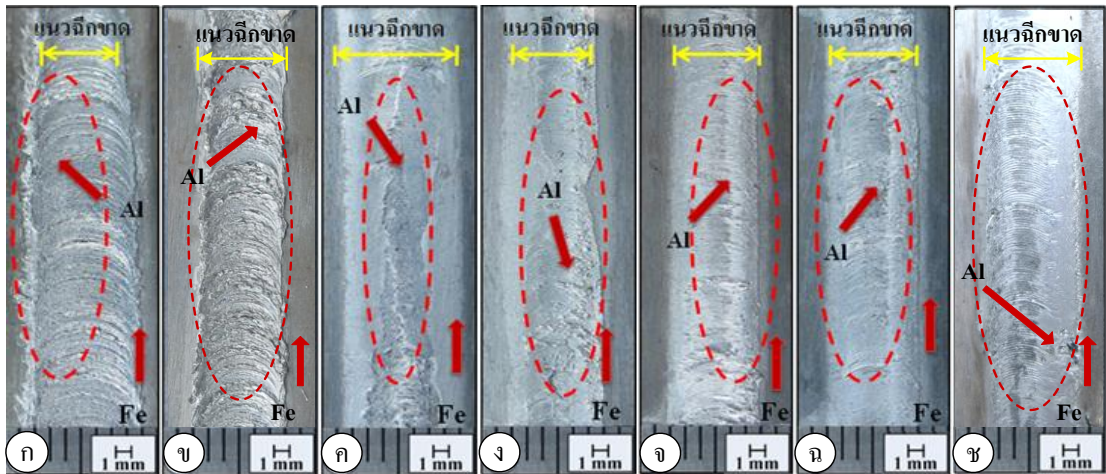
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.30 มีขนาดเล็กกว่าขนาดของตัวกวนทุกชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกับ 250 500 และ 750 รอบ/นาที มีลักษณะของแนวฉีกขาดมีขนาดเล็กที่สุด ลักษณะของรอยฉีกขาดนั้นมีความสม่ำเสมอที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ความเร็วเดิน 75 และ 150 มม./นาที มีเพียงรอยที่วัสดุติดกันด้วยแรงกดและความร้อนขณะเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบกับสองความเร็วรอบดังกล่าวมีรอยฉีกขาดที่สม่ำเสมอต่ำที่สุดและมีปริมาณของอะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่ทั่วตลอดแนวเชื่อมต่ำสุดเมื่อเทียบกับสองความเร็วรอบก่อนหน้า

4.3.2 ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา



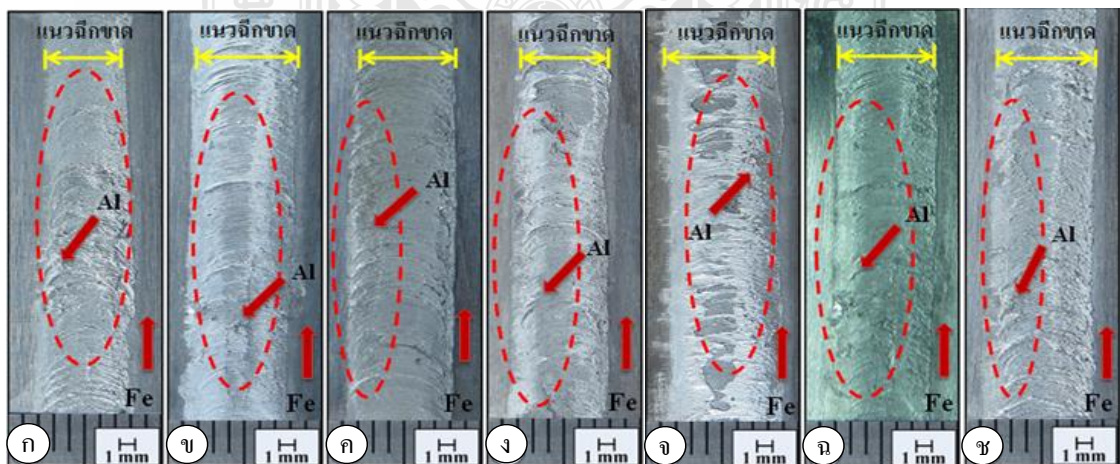
รูปที่ 4.31 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเงื่อนไขที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./ นาที

ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.31 มีขนาดเล็กกว่าขนาดของตัวกวน และลักษณะของรอยฉีกขาดนั้นมีความไม่สม่ำเสมอที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม และมีปริมาณของอะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่ทั่วตลอดแนวเชื่อมเพียงความเร็วเดินที่ 50 มม./นาที ส่วนความเร็วเดินอื่นมีเพียงรอยที่วัสดุติดกันด้วยแรงกดและความร้อนขณะเชื่อม



รูปที่ 4.32 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

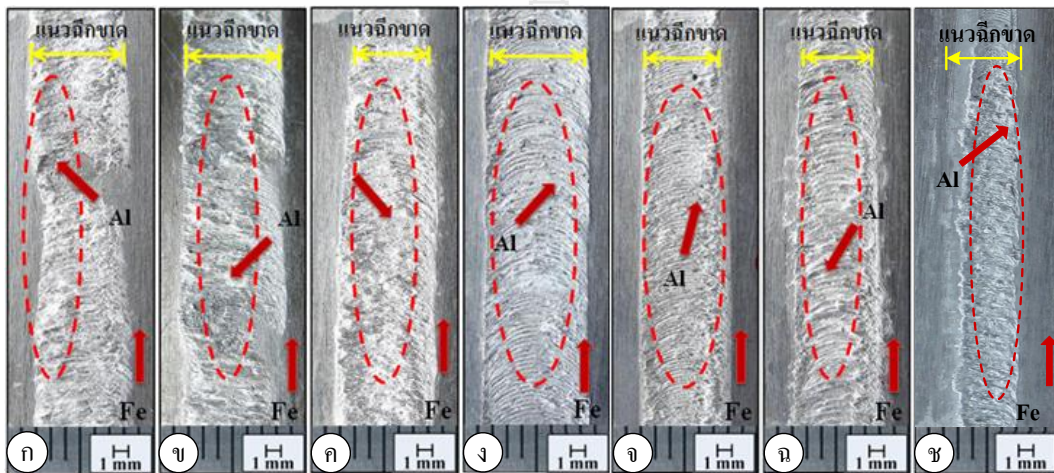
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนโดยการดึงความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.32 มีขนาดเล็กกว่าขนาดตัวกวน ซึ่งมีเพียงความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที ที่มีขนาดแนวฉีกขาดใกล้เคียงกับขนาดตัวกวน เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที มีขนาดแนวฉีกขาดที่ใกล้เคียงกับตัวกวนมากกว่า ลักษณะของรอยฉีกขาดนั้นมีขนาดสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว รอบ/นาที มีรอยฉีกขาดที่สม่ำเสมอมากกว่าที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีปริมาณของอะลูมิเนียมแทรกตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ มีเพียงความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที ที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมสม่ำเสมอตลอดแนวฉีกขาด เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที มีปริมาณอะลูมิเนียมแทรกตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่า



รูปที่ 4.33 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

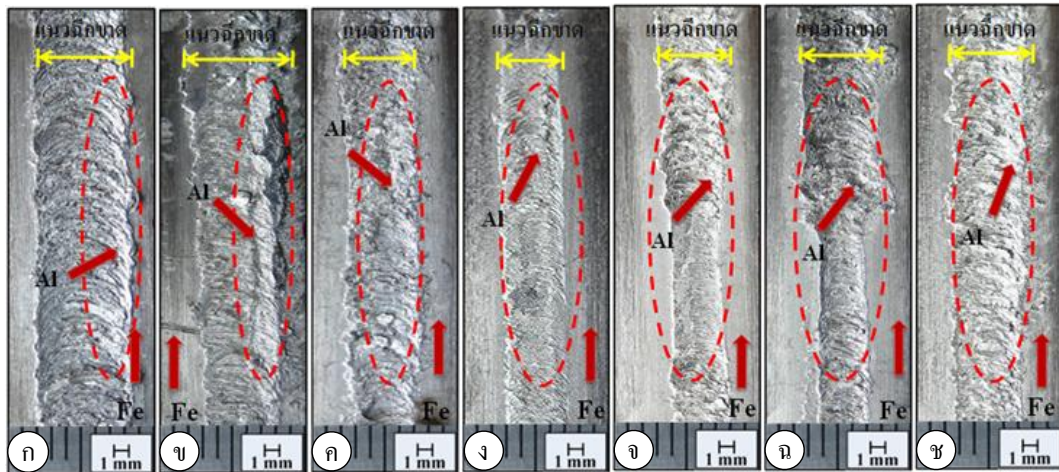
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.33 มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดตัวกวน เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 และ 500 รอบ/นาที แล้ว 750 รอบ/นาที มีลักษณะของแนวฉีกขาดมีขนาดใกล้เคียงกับตัวกวนมากที่สุด ลักษณะของรอยฉีกขาดนั้นมีความสม่ำเสมอที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเปรียบเทียบกับ สองความเร็วรอบดังกล่าว มีรอยฉีกขาดที่สม่ำเสมอมากที่สุด มีปริมาณของอะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่ทั่วตลอดแนวเชื่อมมากที่สุด เมื่อเทียบกับสองความเร็วรอบ

4.3.3 ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย



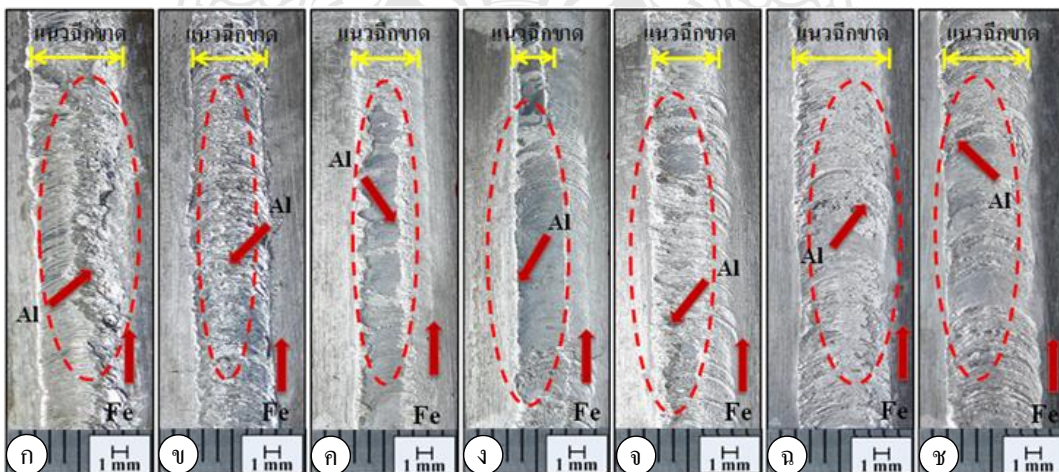
รูปที่ 4.34 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่ามีเศษของเนื้ออะลูมิเนียม หลุดออกมาเกาะติดที่ความเร็วเดินที่ 25 50 มม./นาที เท่านั้นที่เห็นได้ชัดเจน จากนั้นเมื่อความเร็วเดินมีค่าเพิ่มมากขึ้นการหลุดของเศษอะลูมิเนียม มาเกาะติดที่เหล็กกล้าไร้สนิม ก็ค่อยๆ ลดน้อยลงเรื่อยๆ จนแทบจะไม่มีเศษอะลูมิเนียม มาเกาะให้เห็นที่ความเร็วเดิน 175 มม./นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 4.21 สามารถที่จะสรุปได้ว่าการหลุดออกของเศษอะลูมิเนียมมาเกาะติดที่เหล็กกล้าไร้สนิม มีการแปรผันตรงกับค่าของความแข็งแรงดึงเฉือนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.35 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

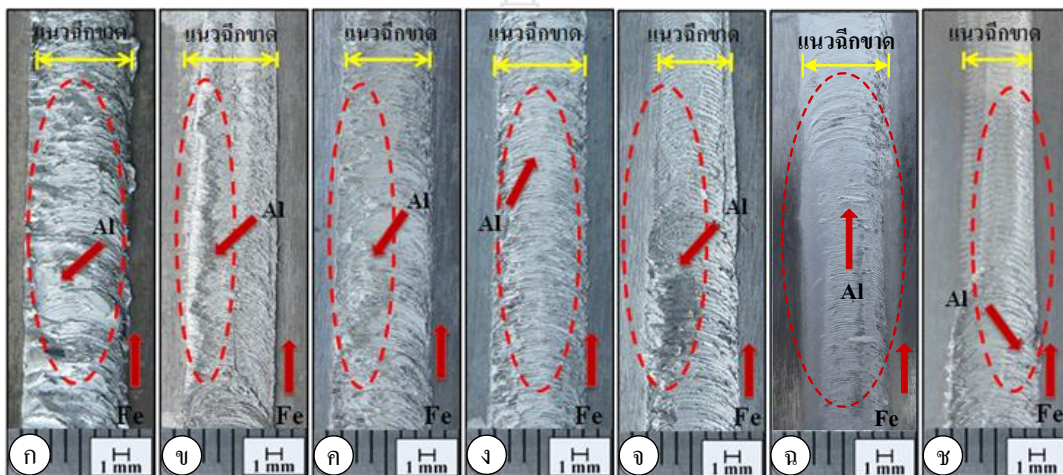
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่ารอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเริ่มจากความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที ดังแสดงในรูป(ก) เศษของอะลูมิเนียม หลุดออกมาเกาะที่เหล็กกล้าไร้สนิม ในปริมาณที่น้อยขนาดของรอยเชื่อมมีขนาดน้อยกว่าขนาดจริงของตัวกวนประมาณ 2 มม. ในขณะที่เมื่อค่าของความเร็วเดินมีค่าเพิ่มมากขึ้นขนาดของรอยเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของตัวกวนจนกระทั่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดจริงของตัวกวนประมาณ 1 มม. ที่ความเร็วเดินที่ 175 มม./นาที ดังแสดงในรูป(ช)



รูปที่ 4.36 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/ นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./ นาที

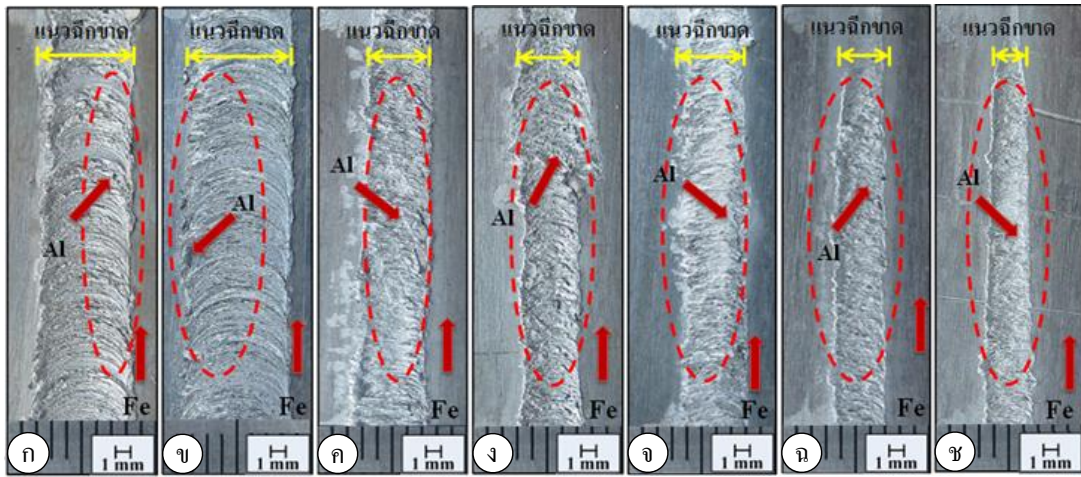
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าเศษของอะลูมิเนียม หลุดออกมาเกาะที่เหล็กกล้าไร้สนิม ทุกสถานะความเร็วเดิน โดยที่ขนาดของรอยฉีกขาดมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของตัวกวนมากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วเดินที่ 250 และ 500 รอบ/นาที ค่าที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรอยฉีกขาดพบว่ารอยฉีกขาดใดที่มีเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะที่เหล็กกล้าไร้สนิมมากเท่าใดค่าความแข็งแรงที่ได้จากการดึงก็จะมีค่ามากเช่นกัน

4.3.4 ตัวกวนทรงกรวย



รูปที่ 4.37 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเงื่อนไขที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

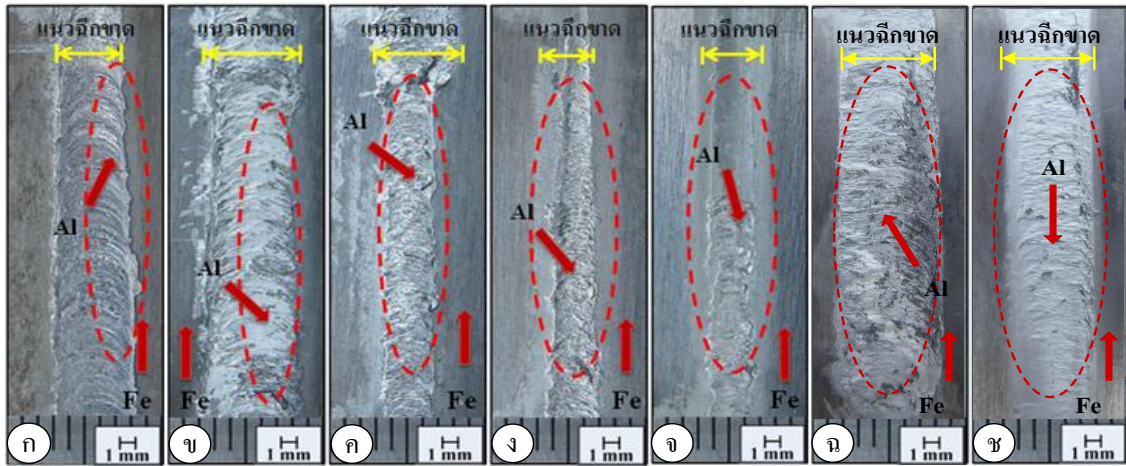
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.37 จากการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายจะเห็นว่า ขนาดและความชัดเจนของรอยฉีกขาดจะลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับรอยฉีกขาดดังแสดงในรูป (ก) ซึ่งมีลักษณะของรอยฉีกขาดที่ชัดเจน โดยมีอะลูมิเนียมปกคลุมอยู่บนบริเวณรอยฉีกขาดเป็นจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าความเร็วเดินอื่นๆ



รูปที่ 4.38 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

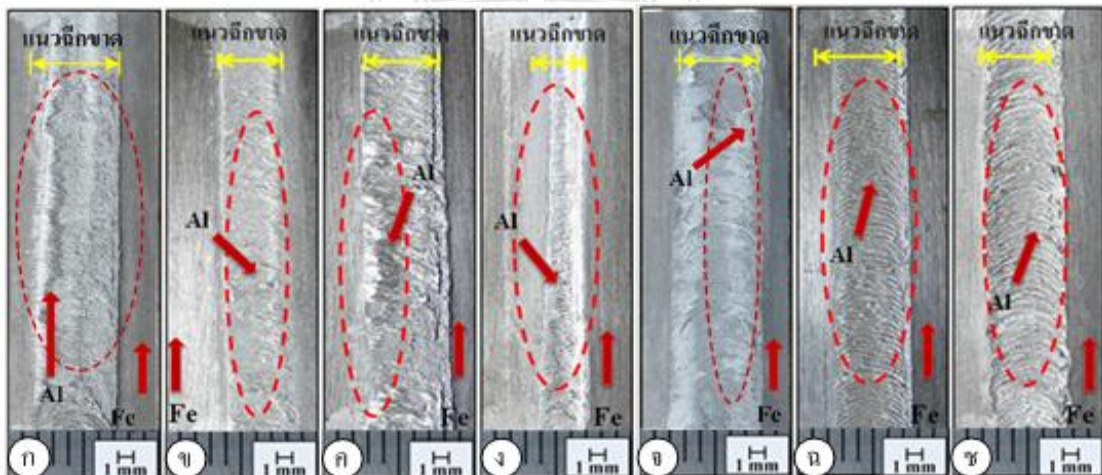
ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.38 โดยภาพรวมจะเห็นว่า ขนาดและความชัดเจนของรอยฉีกขาดจะลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น จะเป็นเช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และจากกราฟที่ 4.22 จะเห็นว่าที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด คือ 11.463 kN แต่ค่าความแข็งแรงที่ได้นี้ก็น้อยกว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ดีที่สุดของความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ซึ่งก็สอดคล้องกับลักษณะของรอยฉีกขาด ดังแสดงในรูป(ข) ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นนั้นมีรอยกดอัดของตัวกวนที่ชัดเจน แต่จะแตกต่างกับรอยฉีกขาดที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ดีที่สุด โดยอยู่ที่ค่าความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ตรงที่มีปริมาณอะลูมิเนียมที่ปกคลุมอยู่บริเวณรอยฉีกขาดน้อยกว่ามาก จะเห็นแต่การแทรกตัวของอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในแนวเชื่อมเท่านั้น และรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วเดินอื่นๆ

ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ลักษณะของรอยฉีกขาดจะมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับที่ความเร็วรอบ 250 และ 500 รอบ/นาที คือ ขนาดและความชัดเจนของรอยฉีกขาดจะลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น และจากกราฟรูปที่ 4.43 ความเร็วเดินที่ 50 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด คือ 9.281 kN แต่ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุดที่ความเร็วรอบ 250 และ 500 รอบ/นาที



รูปที่ 4.39 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเส้นที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

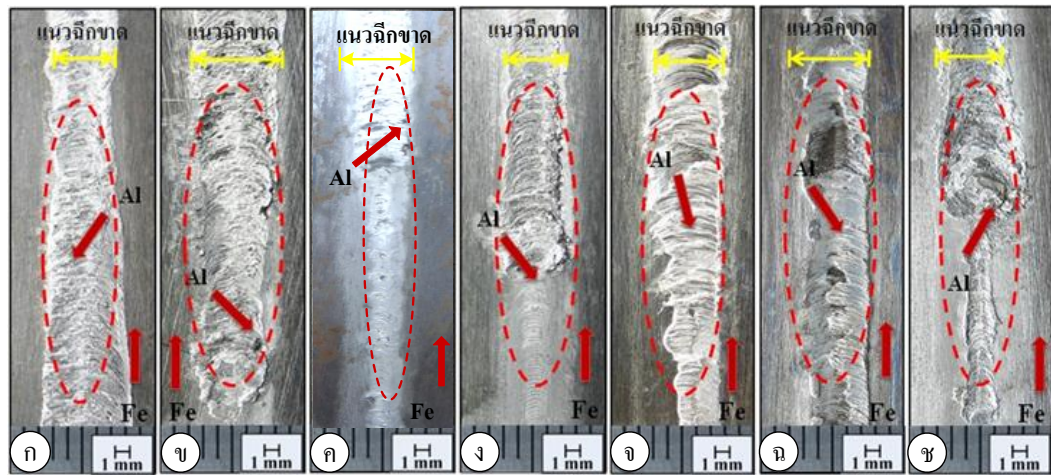
4.3.5 ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา



รูปที่ 4.40 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเส้นที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./ นาที

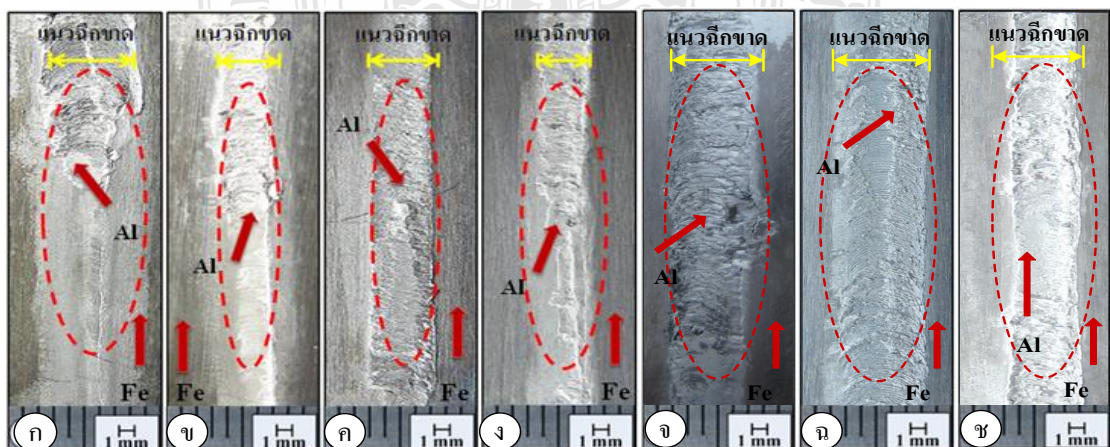
เมื่อตัดชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับทิศทางของการเดินแนวเชื่อม แล้วนำไปทดสอบแรงดึง พบว่า ลักษณะของรอยฉีกขาดมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเนื่อง ดังแสดงในกราฟที่ 4.23 ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.40 จากการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายจะเห็นว่า ขนาดและความชัดเจนของรอยฉีกขาด ต้องอาศัยความสัมพันธ์กันระหว่างความเร็วรอบของตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ที่ความเร็วเดิน 75 มม./นาที ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นนั้นมีความชัดเจนมากกว่ารอยฉีกขาดที่ความเร็ว

เดินอื่นๆ ลักษณะโดยทั่วไปของรอยฉีกขาดมีเนื้ออะลูมิเนียมปกคลุมอยู่ทั่วบริเวณรอยฉีกขาด แสดงถึงความแข็งแรงของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.41 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

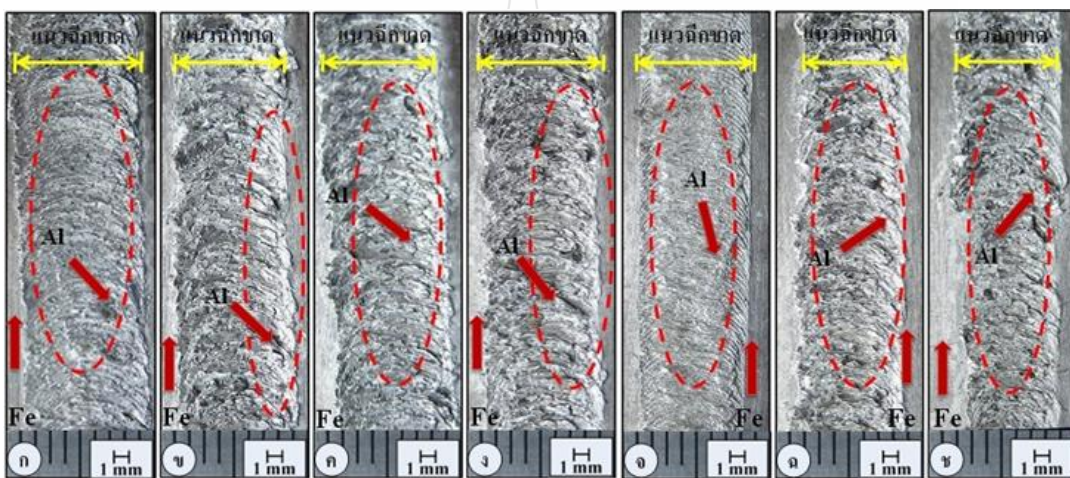
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 500รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ขนาดและความชัดเจนของรอยฉีกขาด ไม่เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันตามการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วเดินเชื่อม แต่จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้น จะมีแนวฉีกขาดไม่เท่ากันตลอดทั้งแนว รอยฉีกขาดไม่สม่ำเสมอมีความสมบูรณ์น้อยกว่ารอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที



รูปที่ 4.42 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

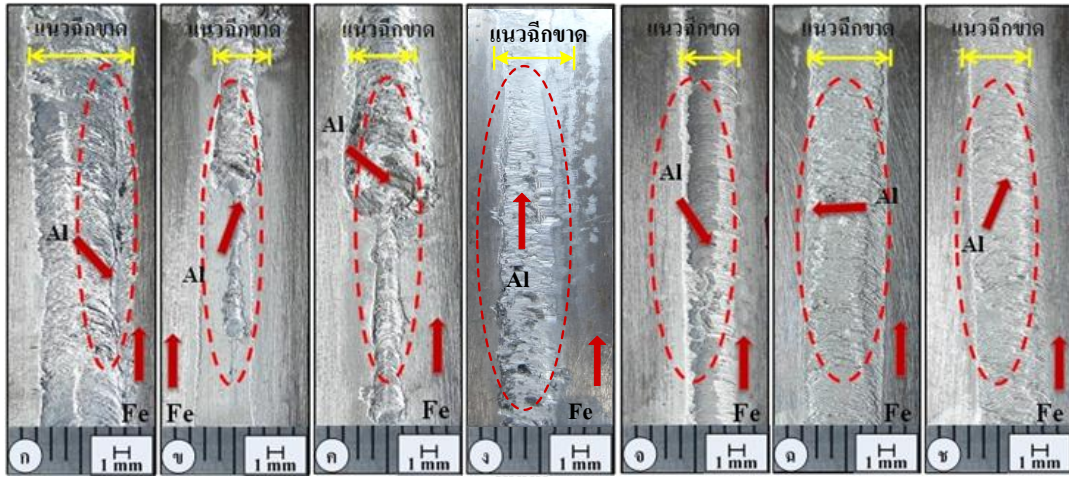
ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ขนาดและความชัดเจนของรอยฉีกขาดต้องอาศัยความสัมพันธ์กันระหว่างความเร็วรอบของตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อม เช่นเดียวกันกับความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดิน 75 มม./นาที ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดและความชัดเจนน้อยกว่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ลักษณะโดยทั่วไปของรอยฉีกขาดมีเนื้ออะลูมิเนียมปกคลุมอยู่ทั่วบริเวณรอยฉีกขาด ซึ่งปริมาณของอะลูมิเนียมที่ติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของรอยเชื่อม

4.3.6 ตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย



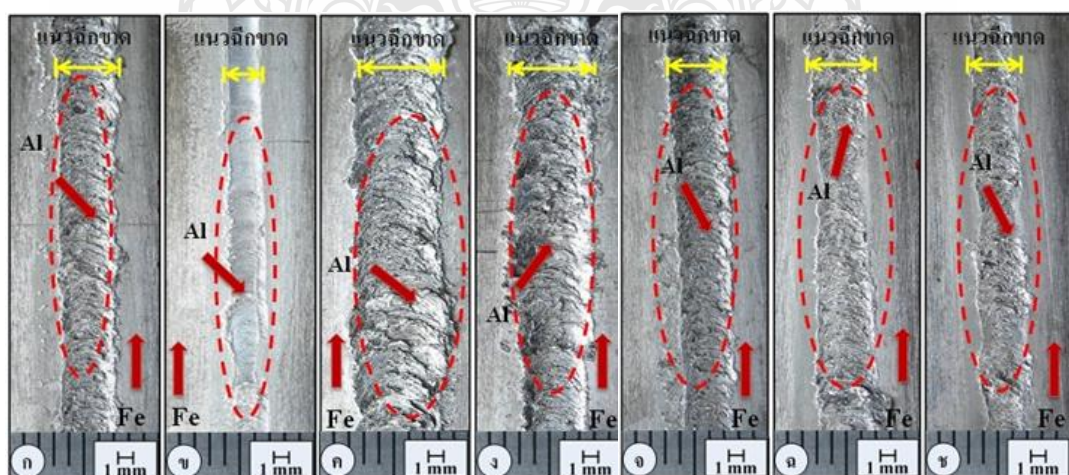
รูปที่ 4.43 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ลักษณะของแนวฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 250รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ทุกสถานะความเร็วเดินพบว่าขนาดของรอยฉีกขาดทุกสถานะความเร็วเดินมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดของตัวกวนจริงประมาณ 1 ถึง 1.5 มม. เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ผิวหน้าของรอยฉีกขาดพบว่ามีเศษของอะลูมิเนียมเกาะติดอยู่เหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ทุกสถานะความเร็วเดินมีเพียงความเร็วเดิน ดังแสดงในรูป(ก) เท่านั้นที่มีเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะติดที่น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดึงก็พบว่าค่าของแรงดึงที่ต่ำที่สุดด้วย ในส่วนนี้ผิวหน้าของรอยฉีกขาดที่มีเศษอะลูมิเนียมมาเกาะติดที่เหล็กกล้าไร้สนิมมากที่สุด ดังแสดงในรูป(จ) ความเร็วเดินที่ 125 มม./นาที เมื่อเทียบกับแรงดึงแล้วมีค่าความแข็งแรงที่เกิดจากการดึงสูงสุดที่ความเร็วเดิน 250 รอบ/นาที นี้ด้วย



รูปที่ 4.44 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.44 ทุกสถานะความเร็วเดินพบว่าเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะติดอยู่ที่เหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที โดยเริ่มจากความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที ไม่มีเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะติดอยู่เลย จากนั้นเมื่อเพิ่มค่าของความเร็วเดินที่มากขึ้นปริมาณการเกาะติดของอะลูมิเนียมที่เหล็กกล้าไร้สนิมก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยที่ผิวหน้าของรอยฉีกขาดที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ปริมาณการเกาะติดของอะลูมิเนียม เกาะติดที่เหล็กกล้าไร้สนิมที่มากที่สุด อยู่ที่ความเร็วเดินที่ 150 มม./นาที เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของความแข็งแรงที่เกิดจากการดึงก็มีค่ามากที่สุดด้วย



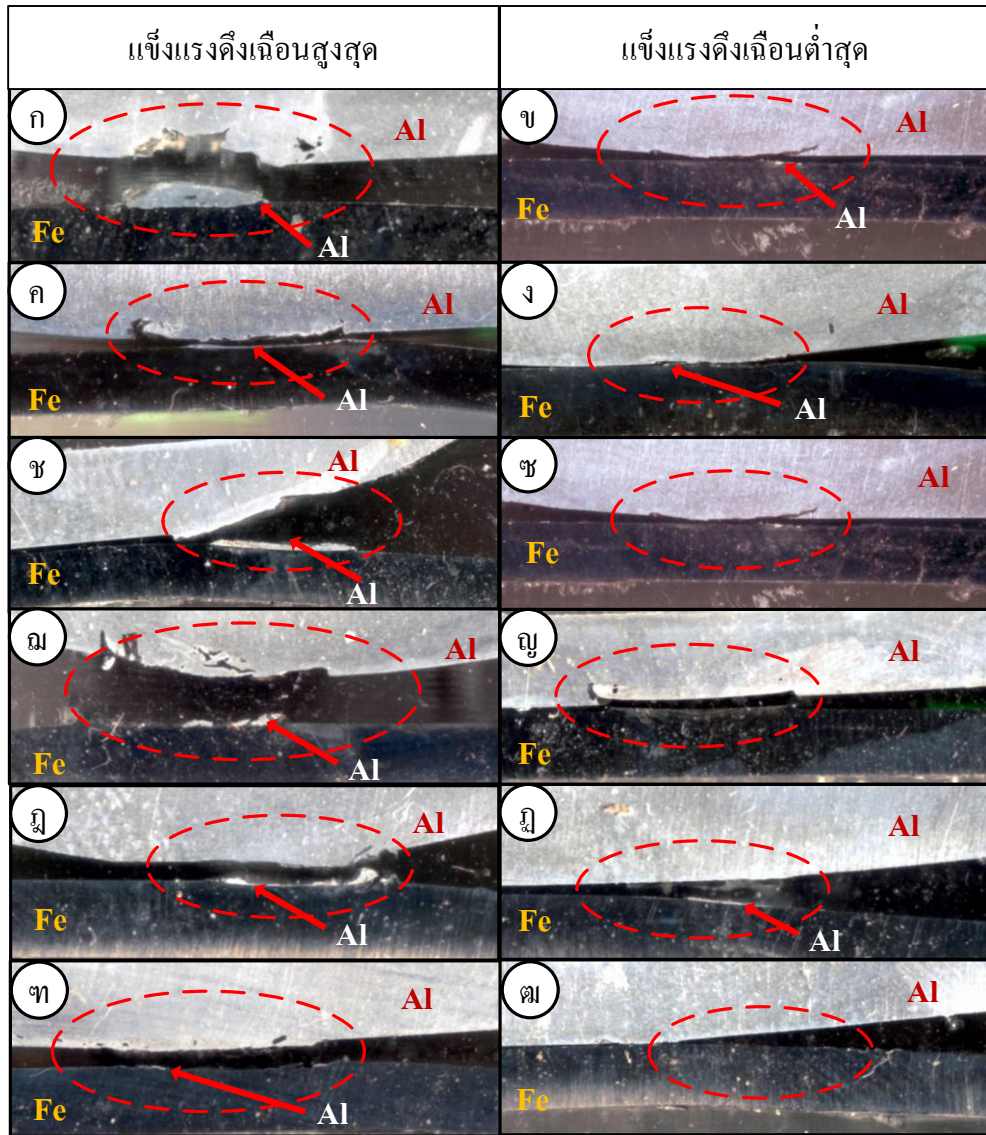
รูปที่ 4.45 รอยฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเนื่องที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/ นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./ นาที

ลักษณะของแนวรอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงโดยการดึงความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.45 ทุกสถานะความเร็วเดินพบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นมีเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะติดที่เหล็กกล้าไร้สนิมในทุกสถานะความเร็วเดิน ยกเว้นความเร็วเดินที่ 75 มม/นาที ที่มีเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะติดในปริมาณที่น้อยที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์ในส่วนขนาดของรอยร้าวที่เกิดขึ้น โดยส่วนมากมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดของตัวกวน ดังแสดงในรูป(ข) และ (ง) คือความเร็วเดิน 25 และ 100 มม./นาที ตามลำดับเท่านั้นที่มีขนาดของรอยร้าวที่มีความใกล้เคียงกับขนาดของตัวกวนจริง ทำการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงที่เกิดจากการทดสอบโดยการดึงพบว่า รอยร้าวใดมีเศษของอะลูมิเนียมมาเกาะติดที่เหล็กกล้าไร้สนิมมากเท่าไรปริมาณค่าความแข็งแรงดึงก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะรอยร้าวหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเดือนต่างๆ สภาวะตัวแปรเชื่อม พบว่า ลักษณะรอยร้าวของรอยเชื่อมที่ได้ทำการตรวจสอบบริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีอะลูมิเนียมติดอยู่ในปริมาณมากน้อยที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม ตำแหน่งการร้าวของรอยเชื่อม และปริมาณอะลูมิเนียมที่หลุดติดผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เฉพาะของปริมาณอะลูมิเนียมที่เกิดการร้าวและติดที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นเหตุทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่สูงต่ำแตกต่างกัน ผลการตรวจสอบทำให้ทราบว่าอะลูมิเนียมที่หลุดติดผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณมากทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่มากและอะลูมิเนียมที่หลุดติดผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่น้อยทำให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรงดึงเดือนต่ำ [27] หรือรอยเชื่อมบางชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณอะลูมิเนียมติดผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมปริมาณมากและน้อย ตามลำดับ กลับให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำและสูง ตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีพิเศษที่ต้องทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

4.4 รอยร้าวสภาพตัดขวางของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

จากการตรวจสอบสภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงเดือนมาแล้ว พบว่า ลักษณะของการร้าวที่เกิดขึ้นนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อมดังที่ได้กล่าวมาในส่วนของอิทธิพลตัวแปรเชื่อมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเดือน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงเดือนดีที่สุดและต่ำที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะรอยร้าวหลังทดสอบแรงดึงเดือนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมตลอดแนวเชื่อม โดยมีลักษณะรอยร้าวสภาพตัดขวางของชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 รอยฉีกขาดภาพตัดขวางจากการทดสอบแรงดิ่งเหนือที่ค่าสูงสุด - ต่ำสุด แต่ละชนิดตัวกวน

(ก) (ข) ทรงกระบอก 500 รอบ/นาที, 50 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 175 มม./นาที

(ค) (ง) ทรงกระบอกเกลียวขวา 250 รอบ/นาที, 150 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 150 มม./นาที

(จ) (ฉ) ทรงกระบอกเกลียวซ้าย 250 รอบ/นาที, 125 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 75 มม./นาที

(ช) (ซ) ทรงกรวย 150 รอบ/นาที, 25 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 25 มม./นาที

(ฅ) (ญ) ทรงกรวยเกลียวขวา 250 รอบ/นาที, 75 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 75 มม./นาที

(ฉ) (ฎ) ทรงกรวยเกลียวซ้าย 250 รอบ/นาที, 125 มม./นาที - 750 รอบ/นาที, 50 มม./นาที

รูปที่ 4.46 (ก) (ค) (จ) (ช) (ฅ) และ (ฉ) ตามลำดับ แสดงลักษณะการฉีกขาดที่เกิดขึ้นบริเวณทั้งสองฝั่งของวัสดุทดสอบพบว่าที่บริเวณอะลูมิเนียมเกิดการฉีกขาดเป็นส่วนมาก ซึ่งกินลึกเข้าไปในส่วนของรอยเชื่อม ส่วนบริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมพบก้อนอะลูมิเนียมขนาดใหญ่ติดบนผิว

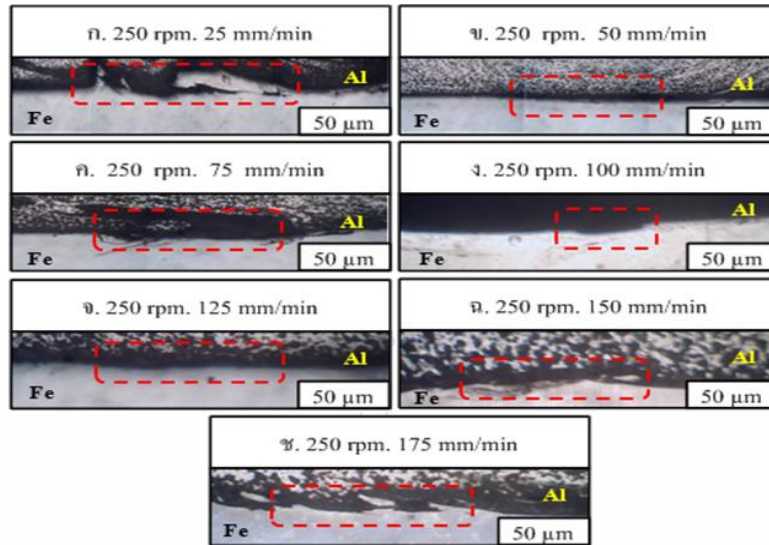
ของเหล็กบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากตัวกวน สิ่งเหล่านั้นแสดงให้เห็นว่า บริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากจึงทำให้เกิดการฉีกขาดเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัด จากชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดในแต่ละตัวกวนเชื่อม มีลักษณะการฉีกขาดที่กว้างและมีขนาดใหญ่ที่ไม่แตกต่างอะไรกันมากนัก ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมที่มีผลต่อวัสดุทดสอบ โดยเฉพาะรูปทรงของตัวกวน ความเร็วเดิน และความเร็วรอบตัวกวน ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะอินเทอร์เฟซบริเวณรอยเชื่อมที่เกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปอยู่ในส่วนของอะลูมิเนียมในปริมาณที่มากเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดได้อย่างเหนียวแน่น [27] ส่วนรูปที่ 4.46 (ข) (ง) (ฉ) (ช) (ญ) และ (ฎ) ตามลำดับ พบว่าลักษณะการฉีกขาดภาพตัดขวางของชิ้นงานเชื่อมต่อเกยที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุดหลังทดสอบหาความความแข็งแรงดึงเดือนลักษณะการฉีกขาดมีความคล้ายคลึงกันเมื่อเทียบกับชิ้นงานภาพตัดขวางของค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดซึ่งมีลักษณะที่สอดคล้องกับผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเดือนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้งนี้ พบว่าค่าความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ของทุกรูปทรงตัวกวนให้ค่าความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมต่อเกยต่ำที่สุด และความเร็วรอบตัว 250 รอบ/นาที เกือบทุกรูปทรงตัวกวน ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเดือนดึงสูงสุด และมีค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันไป

4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกย

จากการศึกษาอิทธิพลตัวแปรที่ใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น ทำให้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อม ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเพื่อทำการตรวจสอบการเชื่อมติดกันระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดหรือที่เรียกว่า “อินเทอร์เฟซ” เพื่อทำการพิสูจน์โครงสร้างภายในรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับลักษณะการฉีกขาดและค่าความแข็งแรงดึงเดือนอย่างไร จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบดังนี้

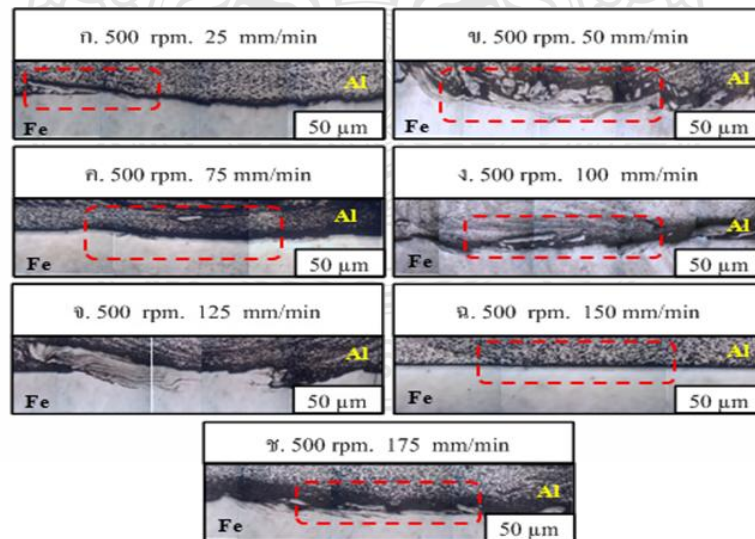
4.5.1 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก

ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟซชัดเจนสุด ดังแสดงในรูป (ข) ซึ่งก็มีความสัมพันธ์กันกับกราฟรูปที่ 4.19 เนื่องจากที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดดังแสดงในรูป (ข) จะเห็นว่าอินเทอร์เฟซที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียมอย่างชัดเจน ซึ่งการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรง

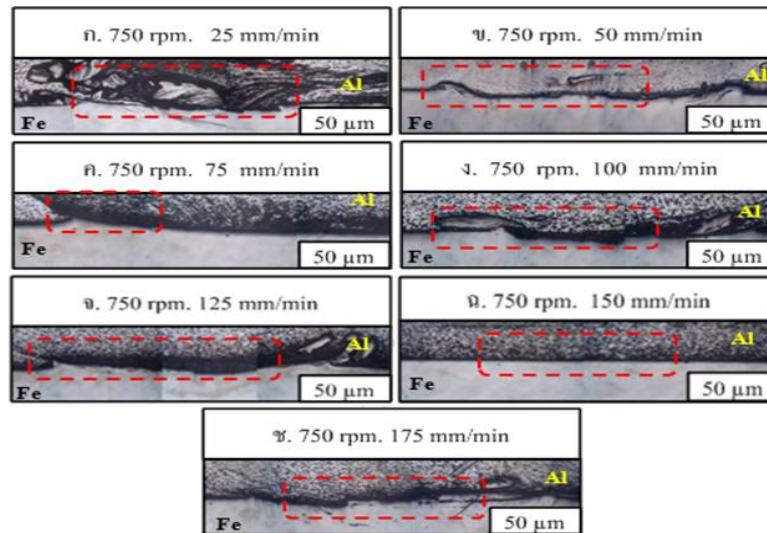


รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.48 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่มากที่สุด ดังแสดงในรูป(ข) ซึ่งก็มีความสัมพันธ์กับกราฟรูปที่ 4.19 เนื่องจากที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดดังแสดงในรูป(ข) จะเห็นว่าอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียมอย่างชัดเจน ซึ่งการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรง เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที มีการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดชัดเจนมากกว่า



รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

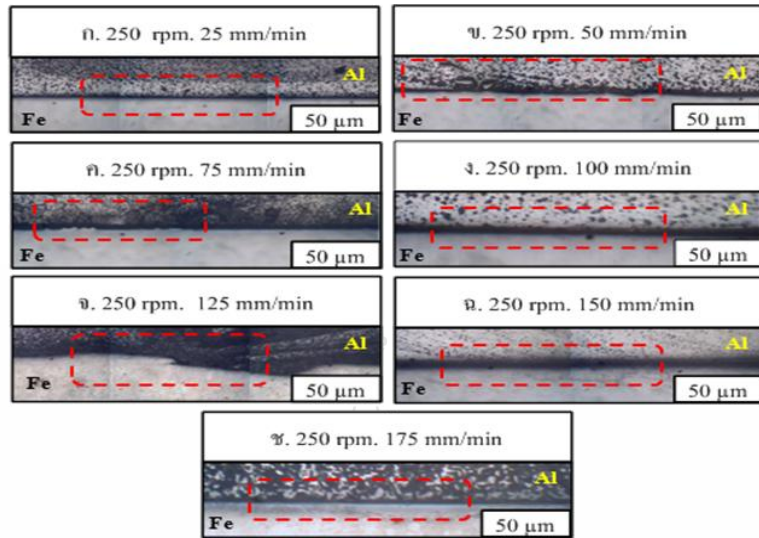


รูปที่ 4.49 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่มากที่สุด ดังแสดงในรูป (ค) ซึ่งก็มีความสัมพันธ์กันกับกราฟที่ 4.19 เนื่องจากที่ความเร็วเดิน 75 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด ดังแสดงในรูป (ค) จะเห็นว่าอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียมอย่างชัดเจน ซึ่งการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรง เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 และ 500 รอบ/นาที แล้วพบว่า การแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงดึงเฉือน คือความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ชัดเจนที่สุด

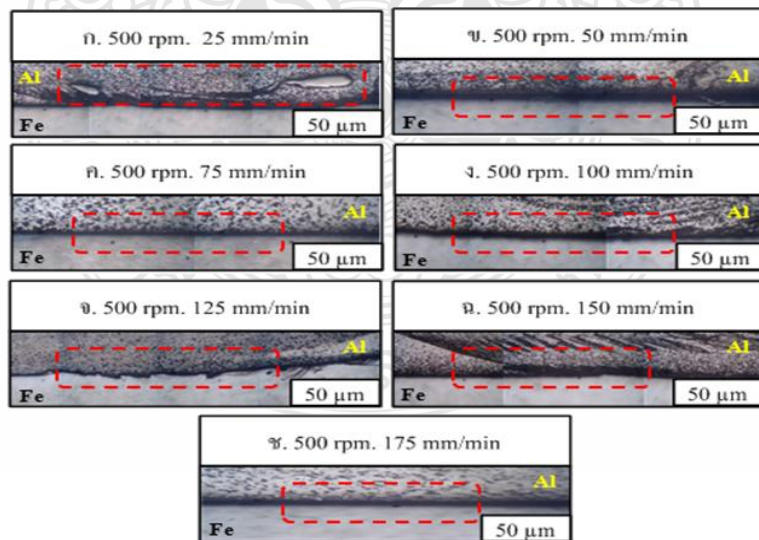
4.5.2 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา

ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่มากที่สุด ดังแสดงในรูป (ก) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับกราฟรูปที่ 4.20 เนื่องจากที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด ดังแสดงในรูป (ก) จะเห็นว่าอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียมอย่างชัดเจน ซึ่งการแทรกตัวของวัสดุทั้ง 2 ชนิดในลักษณะนี้ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงดึงเฉือน

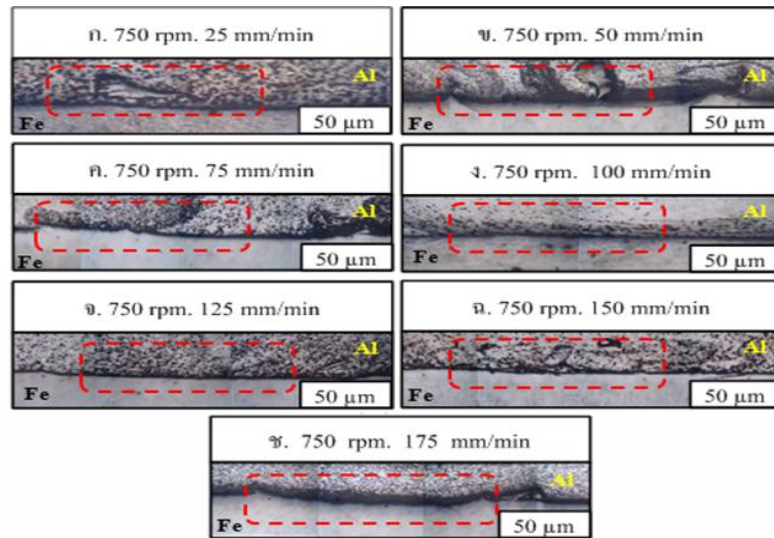


รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.51 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่มากที่สุด ดังแสดงในรูป(จ) ว่างก็มีความสัมพันธ์กันกับกราฟรูปที่ 4.20 เนื่องจากที่ความเร็วเดิน 125 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเนือนสูงสุดดังแสดงในรูป(จ) จะเห็นว่าอินเทอร์เฟสที่อะลูมิเนียมอย่างชัดเจนซึ่งการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงดึงเนือน เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 รอบ/นาที แล้ว 500 รอบ/นาที มีการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิด ชัดเจนมากกว่า



รูปที่ 4.51 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

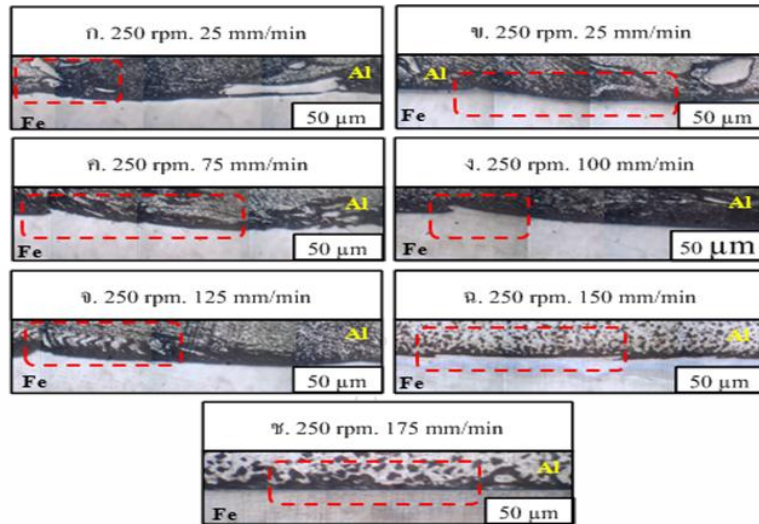


รูปที่ 4.52 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.52 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการกินอินเทอร์เฟสที่มากที่สุด ดังแสดงในรูป(ฉ) ซึ่งก็มีความสัมพันธ์กับกราฟรูปที่ 4.20 เนื่องจากที่ความเร็วเดิน 150 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด ดังแสดงในรูป(ฉ) จะเห็นว่าอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของวัสดุทั้งสอง ชนิดในลักษณะนี้ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงดึงเฉือน เมื่อเปรียบเทียบกับ 250 และ 500 รอบ/นาที แล้วพบว่า การแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงดึงเฉือน คือความเร็วที่ 750 รอบ/นาที ชัดเจนที่สุด

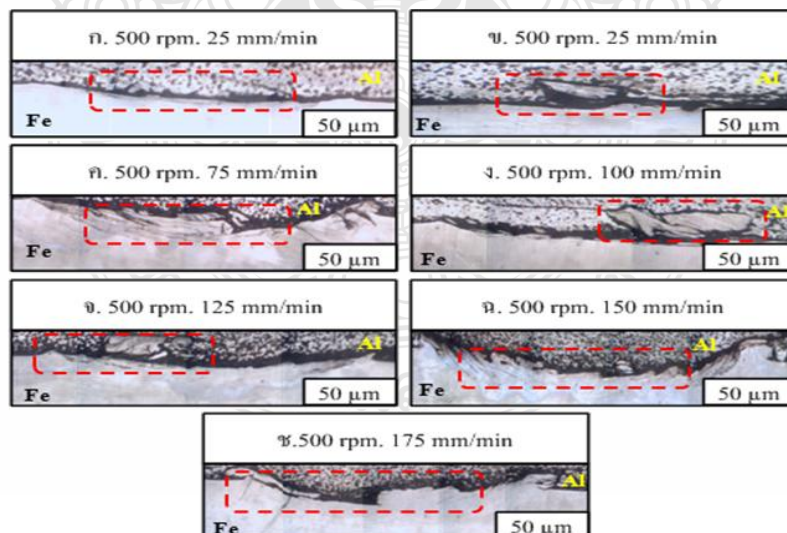
4.5.3 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย

ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.53 แสดงให้เห็นว่าทุกสถานะความเร็วเดิน ที่เนื้อของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะที่แนบกันในดังแสดงในรูปที่ 4.53 (ก) และรูปที่ 4.53 (ข) โดยส่วนของความเร็วเดินส่วนอื่น ลักษณะที่พบปรากฏว่าเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมแทรกเข้าไปในอะลูมิเนียมในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมแทรกตัวไปในอะลูมิเนียมมากที่สุดที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที ส่งผลให้ค่าของแรงดึงมีค่ามากขึ้นตามด้วยเช่นกัน

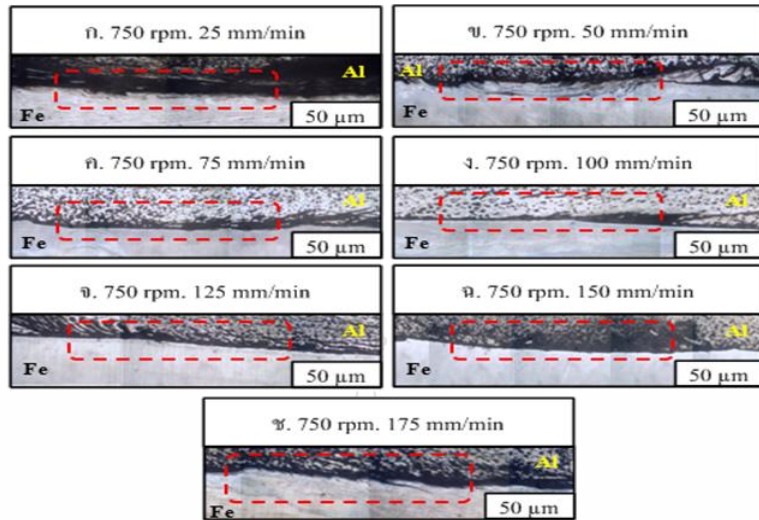


รูปที่ 4.53 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย รอบที่ 250 นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.54 แสดงให้เห็นว่าทุกสถานะความเร็วเดิน ที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที เท่านั้น ที่มีการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในเนื้อของ อะลูมิเนียมในปริมาณที่น้อยที่สุดจนเกือบมองไม่เห็นเลย การแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าเพิ่ม มากขึ้นเรื่อย จนถึงความเร็วเดินที่ 150 มม./นาที มีการแทรกตัวเข้าไปในลักษณะกิ่งก้านมากที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบที่ค่าของแรงดึงก็มีค่ามากที่สุดที่สถานะการเชื่อมนี้เช่นกัน



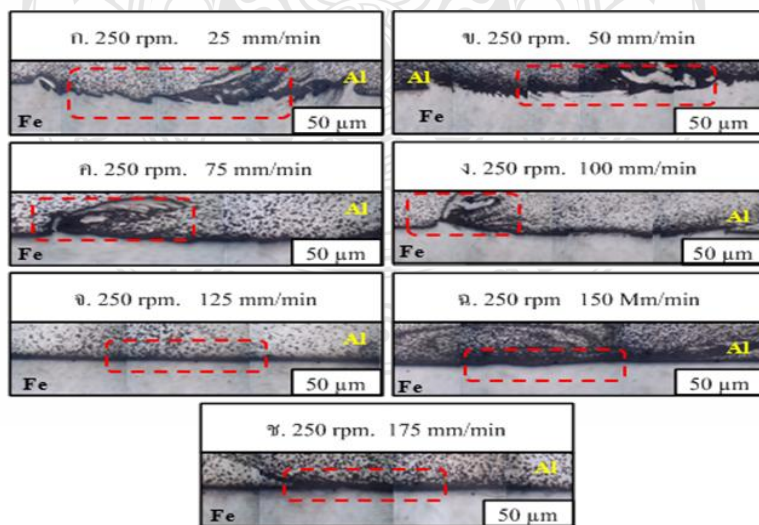
รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 500 นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที



รูปที่ 4.55 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

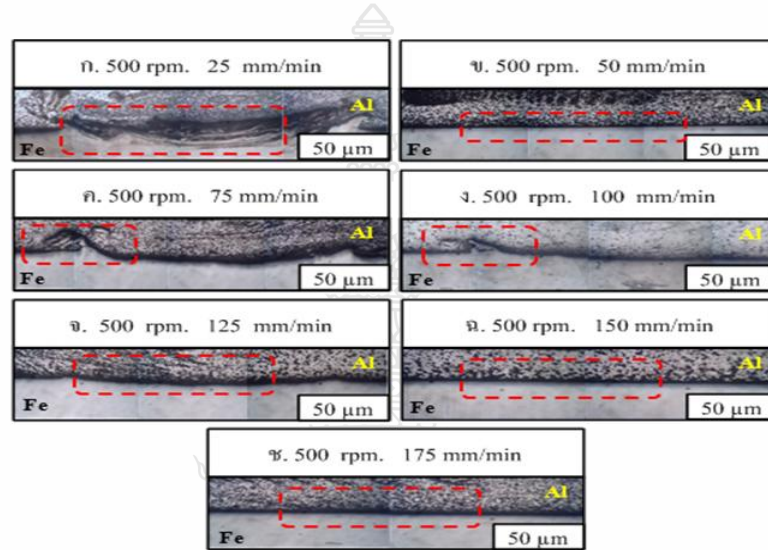
ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.55 แสดงให้เห็นว่าทุกสถานะความเร็วเดิน ที่โครงสร้างที่พบมีการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียม ในทุกสถานะความเร็วเดิน ดังแสดงในรูป 4.55 (ข) มีการแทรกตัวมากที่สุด ลักษณะของการแทรกตัวเป็นลักษณะของการแทรกตัวเป็นแบบกึ่งก้านทางด้านขวาของรูปมีปริมาณของการแทรกตัวแบบกึ่งก้านมากกว่าด้านซ้าย ในขณะที่การแทรกตัวของรูปโครงสร้างความเร็วเดินอื่นๆ มีการแทรกตัวที่น้อยมากจนแทบมองไม่เห็นการแทรกตัว

4.5.4 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย



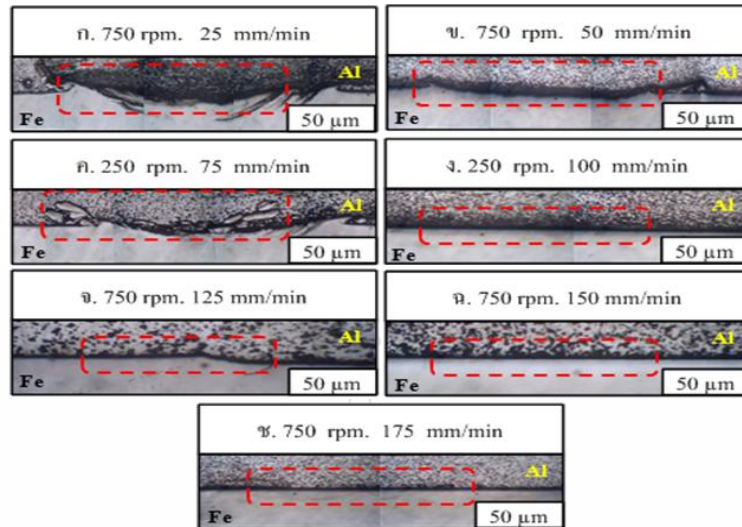
รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.56 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนมากที่สุดดังแสดงในรูป(ก) ที่ความเร็วเดิน 25 มม./นาที ซึ่งก็มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่ดีที่สุดในการาฟรูปที่ 4.22 ดังแสดงในรูป(ก) นั้นจะเห็นว่าอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียมอย่างชัดเจน ซึ่งการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงดึงเดือนมาก



รูปที่ 4.57 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวถ่วงรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ข) 175 มม./นาที

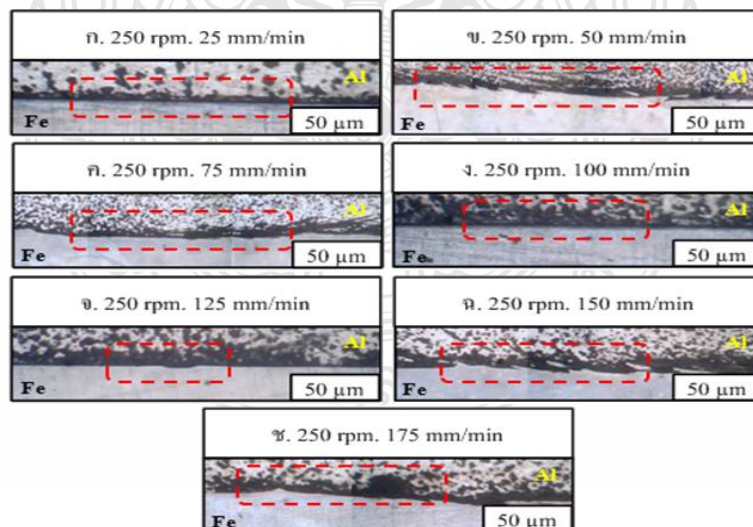
ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.57 แสดงให้เห็นลักษณะการอินเทอร์เฟสที่ชัดเจนเกือบทุกความเร็วเดิน แต่หากดูค่าความแข็งแรงดึงเดือนจากกราฟรูปที่ 4.22 แล้วจะพบว่า ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดซึ่งก็สอดคล้องกับลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูป(ข) เพราะลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนมาก มีการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เนื้อของอะลูมิเนียม แต่ปริมาณการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองน้อยกว่าการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที



รูปที่ 4.58 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

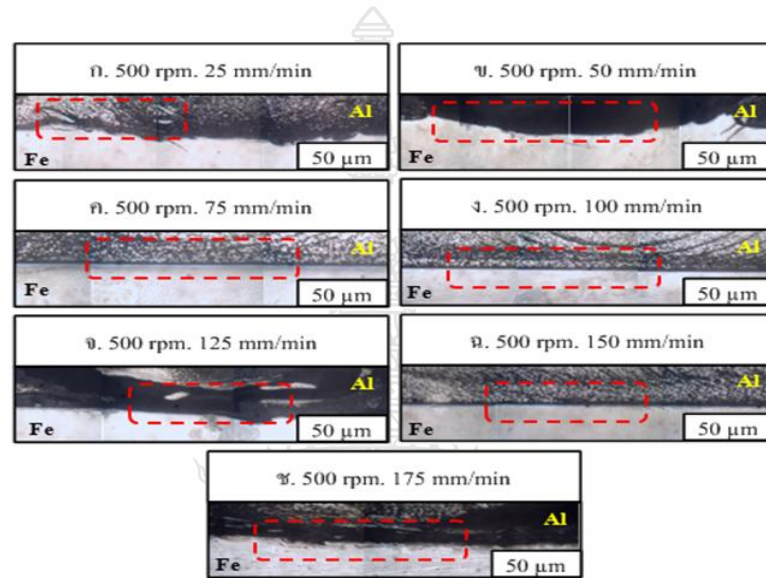
ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.58 ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที จะเห็นว่าลักษณะการเกิดอินเทอร์เฟสจะมีลักษณะคล้ายกับที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที แต่มีความชัดเจนของการอินเทอร์เฟสน้อยกว่า และมีลักษณะของการแทรกตัวของวัสดุทั้งสองชนิดเกิดขึ้นน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบเดียวกัน

4.5.5 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา

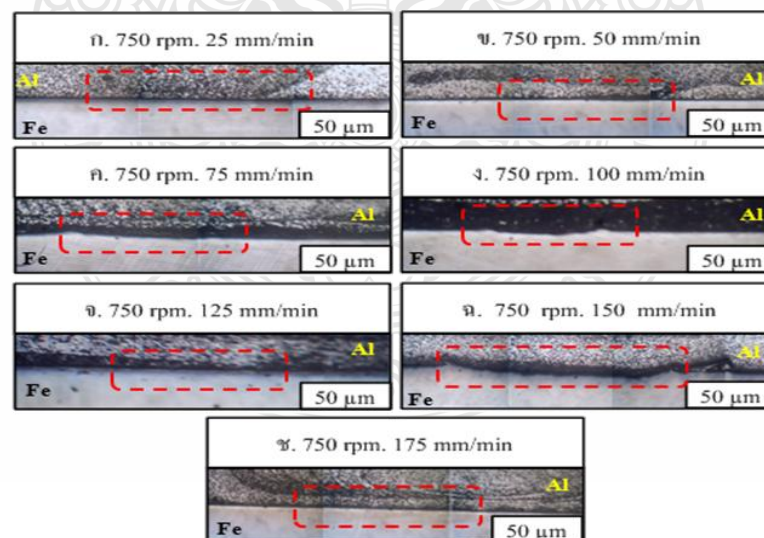


รูปที่ 4.59 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.59 แสดงลักษณะของอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะโค้งคล้ายรูปถ้วยชัดเจนที่สุดอยู่ที่ความเร็วเดิน 75 มม./นาที ซึ่งก็มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.23 เนื่องจากที่ความเร็วเดินดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเดินอื่นๆ และลักษณะของอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นนั้นมีการแทรกตัวกันของวัสดุทั้งสองน้อยมาก



รูปที่ 4.60 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวถวนรูปทรงกรวยเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

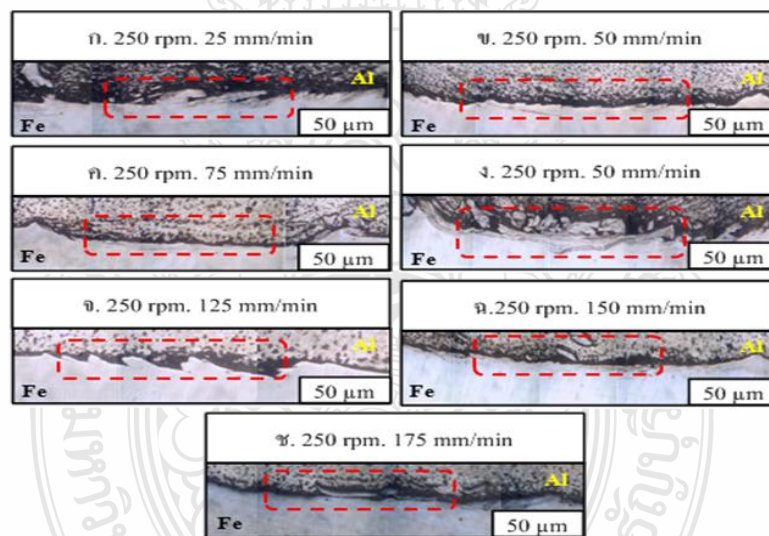


รูปที่ 4.61 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวถวนรูปทรงกรวยเกลียวขวา ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.60 แสดงลักษณะของอินเทอร์เฟซที่เกิดขึ้นมีมากที่สุดอยู่ที่ความเร็วเดิน 50 มม./นาที มีลักษณะโค้งคล้ายรูปถ้วยชัดเจน ซึ่งก็มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเฉือนในกราฟรูปที่ 4.23 เพราะที่ค่าความเร็วเดินดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วเดินอื่นๆ ลักษณะของอินเทอร์เฟซโดยทั่วไปก็มีลักษณะคล้ายการอินเทอร์เฟซที่เกิดจากค่าความเร็วเดิน 75 มม./นาที ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที

ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.61 แสดงลักษณะของอินเทอร์เฟซที่เกิดขึ้นโดยรวมแล้ว ทุกความเร็วเดินมีความชัดเจนของลักษณะการอินเทอร์เฟซไม่มากนัก ส่วนลักษณะการอินเทอร์เฟซที่ความเร็วเดิน 75 มม./นาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วเดินที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนมากที่สุดนั้นก็มีความชัดเจนน้อยกว่าลักษณะการอินเทอร์เฟซที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที มาก ซึ่งก็สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเฉือน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.23

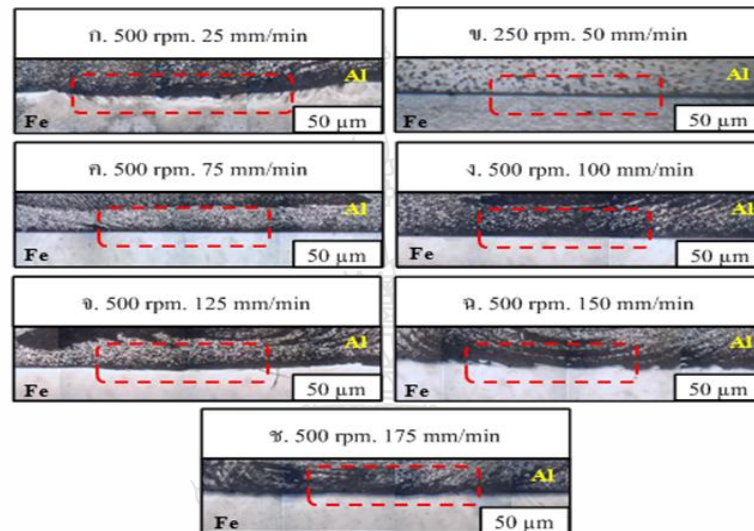
4.5.6 เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย



รูปที่ 4.62 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยทรงกรวยเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

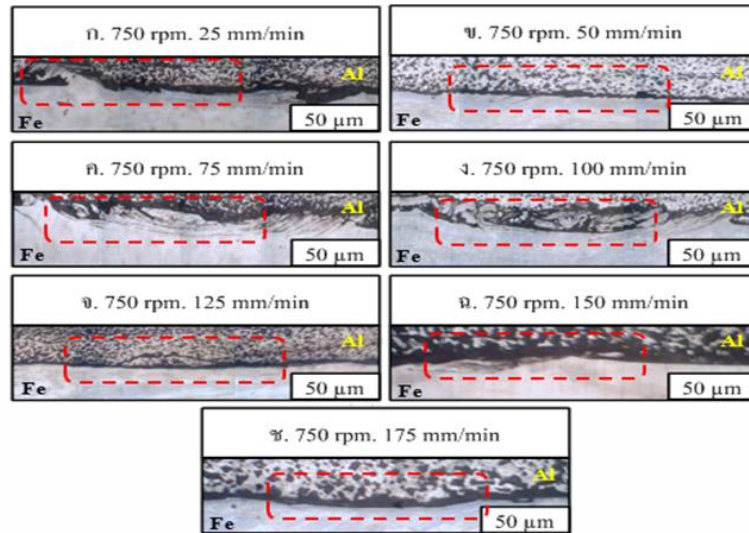
ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.62 ทุกสถานะความเร็วเดิน พบว่าลักษณะของการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกตัวในอะลูมิเนียมไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยที่ความเร็วเดินที่ 25 และ 125 รอบ/นาที มีการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะของการแทรกตัวมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ดังแสดงในรูปที่ 4.62 (ฉ) และรูปที่ 4.62 (ช) ลักษณะ

ของการแทรกตัวค่อยข้างราบเรียบเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแล้วพบว่า โครงสร้างใดที่มีลักษณะการแทรกตัวที่เป็นแบบกึ่งก้านจะมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มาก โครงสร้างใดที่มีลักษณะโครงสร้างที่ราบเรียบจะมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่น้อยตามกันไปด้วย



รูปที่ 4.63 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงทรงกรวยเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.63 ทุกสถานะความเร็วเดินพบว่า ลักษณะของการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียมมีปริมาณที่น้อยมาก โดยส่วนมากจะเป็นลักษณะที่ราบเรียบเท่านั้น ในส่วนของความเร็วเดินที่ 125 มม./นาที พบว่าเกิดช่องว่างขึ้นที่เนื้อของอะลูมิเนียมด้วย โดยแนวโน้มของโครงจุลภาคในส่วนของความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที จะค่อยๆ แทรกตัวเข้าไปในอะลูมิเนียมจนปริมาณเริ่มมากขึ้นแต่ยังไม่ถึงขั้นที่เป็นกึ่งก้านค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ได้จากการดึงเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเดินที่ 250 รอบ/นาที จึงยังมีค่าที่ต่ำกว่า



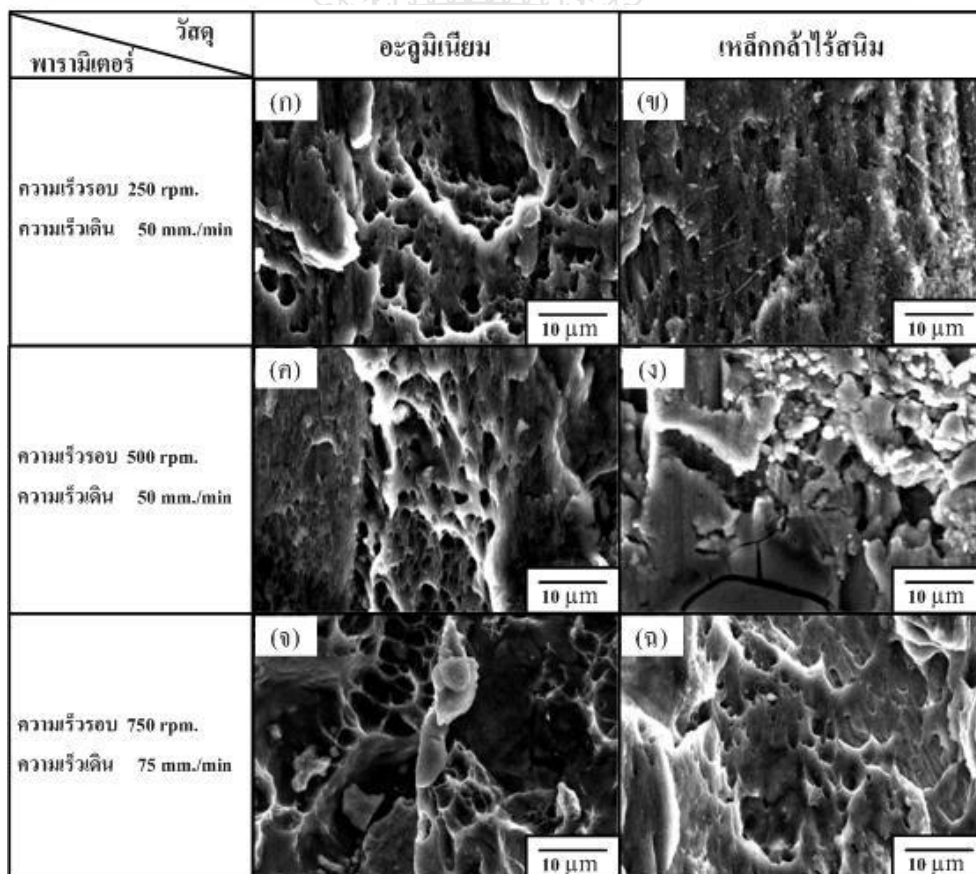
รูปที่ 4.64 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกรวยทรงกรวยเกลียวซ้าย ความเร็วรอบที่ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ (ก) 25 (ข) 50 (ค) 75 (ง) 100 (จ) 125 (ฉ) 150 และ (ช) 175 มม./นาที

ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.64 ทุกสถานะความเร็วเดินพบว่า ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดมีการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในเนื้อของ อะลูมิเนียม ในลักษณะการแทรกตัวแบบกึ่งก้านสลับกับการแทรกตัวแบบความราบเรียบ โดยสามารถ เห็นการแทรกตัวแบบกึ่งก้านได้ชัดเจนที่ความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.64 (ก) โดยมี ค่าความแข็งแรงดึงเหนือสูงสุดเช่นกัน

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิมสรุปได้ว่า อินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปร เชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในและส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเหนือทำให้ ได้ทราบถึงตัวแปรเชื่อมที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมนี้ ลักษณะอินเทอร์เฟซที่มีผลต่อค่าความ แข็งแรงดึงเหนือดีที่สุดคือ เกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปอยู่ในส่วนของอะลูมิเนียม บริเวณรอยเชื่อมในลักษณะที่เป็นกึ่งก้านด้านข้างของตัวกวน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการยึดเกี่ยว ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับอะลูมิเนียมจึงทำให้อรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงเหนือที่มีค่ามาก เมื่อ เปรียบเทียบกับลักษณะของอินเทอร์เฟซที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ พบว่ารอยเชื่อมส่วนใหญ่มีลักษณะ อินเทอร์เฟซที่เรียบสม่ำเสมอ ขนาดความกว้างค่อนข้างเล็ก ไม่เกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้ สนิมเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมหรือเกิดขึ้นเล็กน้อยที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า จาก การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซมีความสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะ การศึกษาของรอยเชื่อมและค่าความแข็งแรงดึงเหนื่อดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น [27]

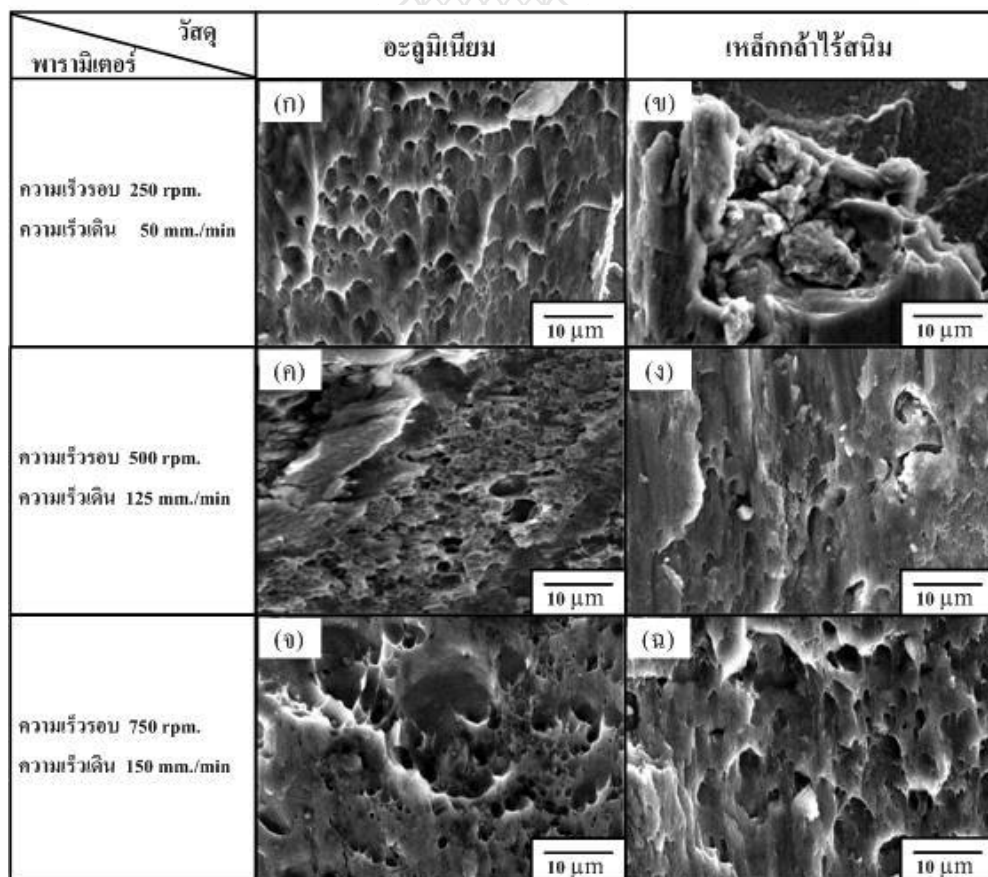
4.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาครอยพังทลายของแนวเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รอยต่อของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ถูกเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบตัวกวน ความเร็วเดินแนวเชื่อมและรูปทรงของตัวกวนที่แตกต่างกันส่งผลให้มีลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมที่แตกต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ส่วนลักษณะการฉีกขาดหลังจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน พบว่าที่ผิวภายในรอยเชื่อมเกิดลักษณะการฉีกขาดที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการฉีกขาดด้วย ผู้วิจัยไม่สามารถระบุได้ว่ารอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างไร จากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย จึงได้ทำการตรวจสอบพื้นผิวรอยฉีกขาดภายในรอยเชื่อม หลังจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope : SEM) ทุกสภาวะความเร็วรอบตัวกวน 250 500 และ 750 รอบ/นาที ที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันของแต่ละชนิดรูปทรงของตัวกวน ซึ่งมีลักษณะการฉีกขาดทั้งเหมือนและต่างกัน อธิบายได้ดังนี้



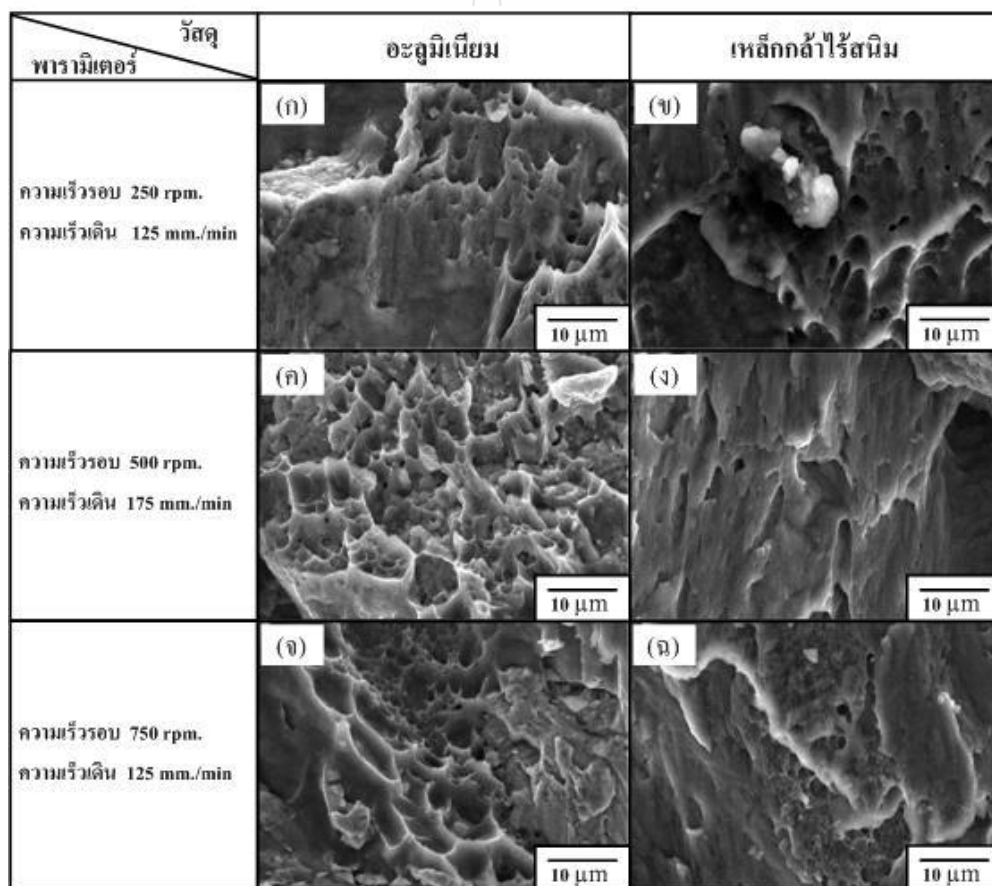
รูปที่ 4.65 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก

รูปที่ 4.65 แสดงลักษณะของรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นบนผิวของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมรูป (ก) (ค) และ (จ) เป็นรอยฉีกขาดบนผิวของอะลูมิเนียมมีลักษณะการฉีกขาดที่เหมือนกัน จึงมีลักษณะเป็นชั้นเป็นหลุมขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและขอบมนสลับกัน เกิดความมันวาวที่ขอบของหลุมและมีลักษณะเป็นชั้นๆ พื้นผิวรอยฉีกขาดมีลักษณะที่เรียบ ซึ่งมีความไม่แตกต่างไปจากที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมากนัก ดังรูปที่ 4.65 (ข) (ง) และ (ฉ) ตามลำดับ เป็นลักษณะการฉีกขาดของเนื้ออะลูมิเนียมที่ถูกยึดติดเข้าไปในส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะที่คล้ายกันกับที่ผิวรอยฉีกขาดของอะลูมิเนียมรูป (ข) มีลักษณะรอยพังทลายที่มีผิวเรียบ มีหลุมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคี่ๆ ขนาดเล็กกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอทั่วรอยฉีกขาดที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนรูป (ง) เป็นลักษณะการฉีกขาดที่เกิดบริเวณขอบของรอยเชื่อม แสดงให้เห็นถึงการเกิดหลุมลักษณะใหญ่คล้ายกับการแตกร้าวและพื้นผิวมีลักษณะเป็นก้อนคล้ายกับผลึกของน้ำตาล แต่เมื่อสังเกตเข้าไปข้างในบริเวณตรงกลางรอยฉีกขาดจะพบลักษณะที่ผิวของเหล็กมีความคล้ายคลึงกันกับลักษณะการฉีกขาดที่ผิวของอะลูมิเนียม ดังรูป (ฉ)



รูปที่ 4.66 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกรียวขวา

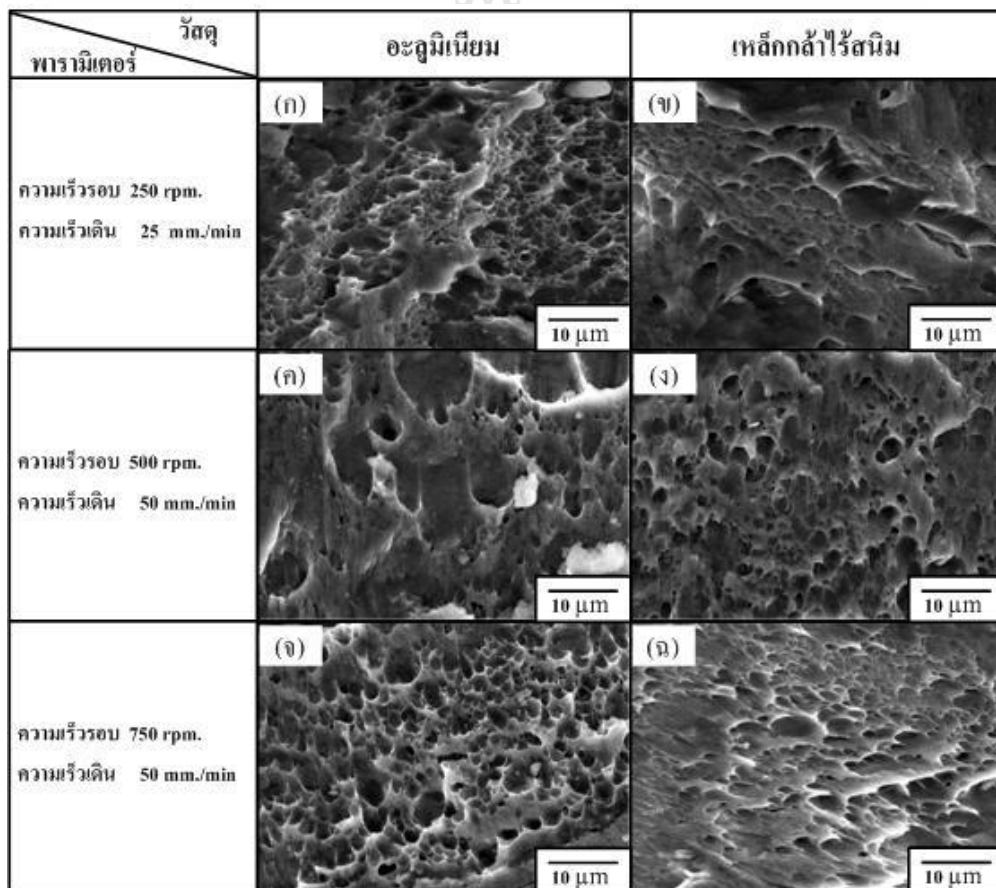
รูปที่ 4.66 (ก) (ค) และ (จ) ตามลำดับ เป็นลักษณะรอยฉีกขาดภายในรอยเชื่อมหลังทดสอบแรงดึงเฉือนที่ผิวสัมผัสภายในของอะลูมิเนียมพบว่า รูป (ค) มีลักษณะการฉีกขาดที่เป็นหลุมและเป็นรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีความแตกต่างจากรูป (ก) และ (จ) ที่มีลักษณะการฉีกขาดที่เป็นรูพรุนเหมือนกันแต่ที่ขอบของรูจะมีทิศทางการถูกฉีกของเนื้ออะลูมิเนียมตามแนวเฉือน บ่งบอกว่าอะลูมิเนียมเกิดการยึดตัวขณะทำการดึง ซึ่งมีความสอดคล้องกับเนื้ออะลูมิเนียมที่หลุดติดอยู่ที่ผิวของเหล็กดังรูป (ข) และ (ฉ) ที่มีความคล้ายคลึงกับลักษณะการฉีกขาดที่ผิวของอะลูมิเนียม ส่วนรูป (ง) มีความแตกต่างไปจากภาพอื่นๆ คือ ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะที่เรียบและเป็นชั้นบางๆ มีหลุมขนาดเล็กต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอทั่วบริเวณรอยพับทลายของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.67 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย

จากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย หลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉือนของรอยเชื่อมพบว่าที่ผิวของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะการฉีกขาดที่แตกต่างกันมาก ดังรูปที่ 4.67 (ก) (ค) และ (จ) ตามลำดับ สังเกตได้ว่า การฉีกขาดมีลักษณะที่แตกต่าง

กันอย่างเห็นได้ชัด รูป (ก) เกิดการฉีกขาดที่มีลักษณะผิวราบค่อนข้างใหญ่และเป็นชิ้นๆ อย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความคล้ายกับที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูป (ข) ที่พบการยึดตัวของอะลูมิเนียมที่ติดอยู่กับผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมในทิศทางตามแรงเฉือน ส่วนรูป (ค) พบว่าการพังทลายมีลักษณะที่เป็นหลุมลึกและเป็นเหลี่ยมอย่างไม่สม่ำเสมอทั่วผิวรอยเชื่อม และที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูป (ง) การพังทลายมีลักษณะที่ราบเรียบ มีหลุมตื้นขนาดเล็กเกิดขึ้นตามแนวแรงเฉือน ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูป (ฉ) แตกต่างกันที่พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม การฉีกขาดมีลักษณะที่เป็นชิ้นๆ อย่างเห็นได้ชัด มีความแตกต่างจากรอยฉีกขาดที่ผิวของอะลูมิเนียม ดังรูป (จ) พบว่า เกิดหลุมลึกและกว้างที่เกิดจากการหลุดไปของก้อนเนื้ออะลูมิเนียมและมีหลุมลึกขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวรอยการพังทลายของอะลูมิเนียมอย่างไม่สม่ำเสมอ

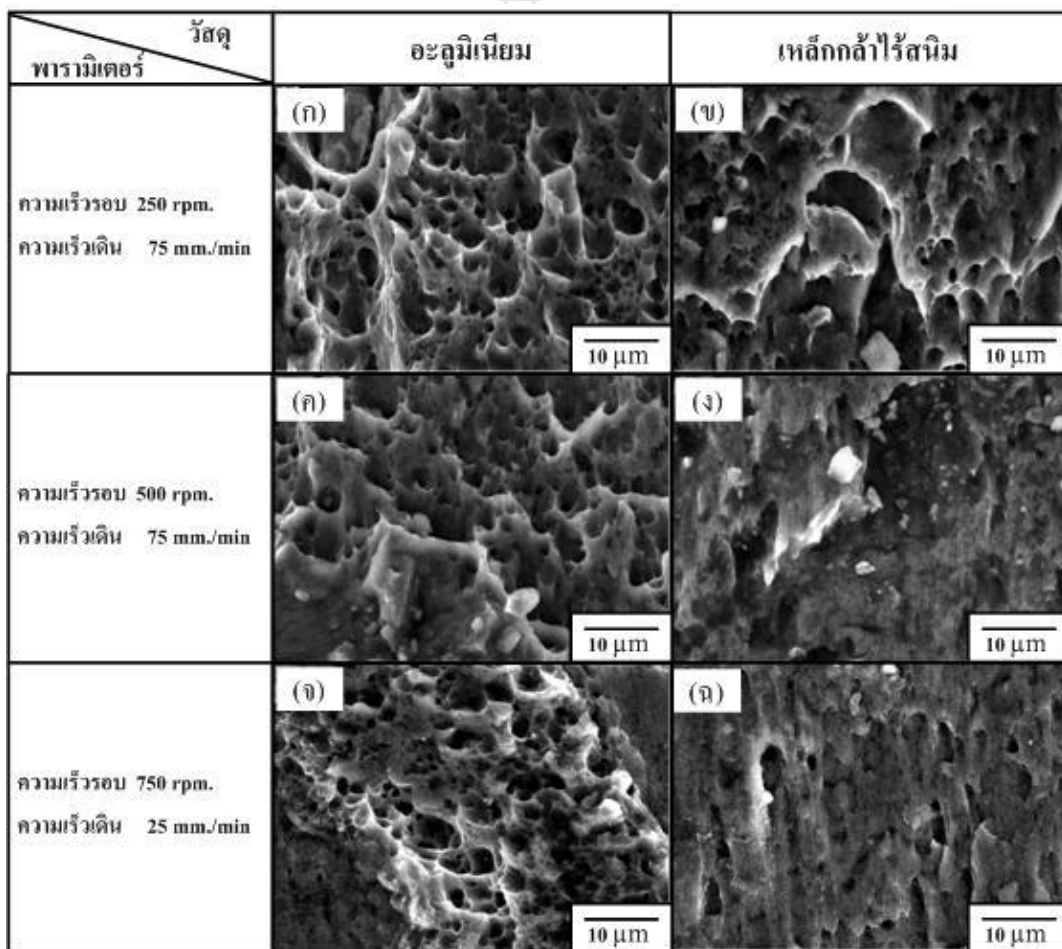


รูปที่ 4.68 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่าของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย

รอยพังทลายของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียมหลังทดสอบแรงดึงเฉือน ดังรูปที่ 4.68 พบว่ารูป(ก) (ค) และ (จ) ตามลำดับ เป็นลักษณะการฉีกขาดที่ผิวของอะลูมิเนียม

พบว่า มีลักษณะที่แตกต่างกัน รูป (ก) และ (จ) มีลักษณะที่คล้าย คือ เกิดหลุมขอบกลมมนขนาดเล็ก และใหญ่ค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวรอยฉีกขาด แต่รูป(ข) ที่ขอบจะมีลักษณะที่ขอบของหลุมเกิดการยึดของเนื้ออะลูมิเนียมตามทิศทางการดึงเหนือนของการทดสอบ ส่วนรูป (ค) มีลักษณะที่คล้ายกับรูป(ก) แต่พบว่าบริเวณหลุมที่เกิดจากการพังทลายของอะลูมิเนียมมีขนาดที่กว้างมากและขอบมีลักษณะกลมมน

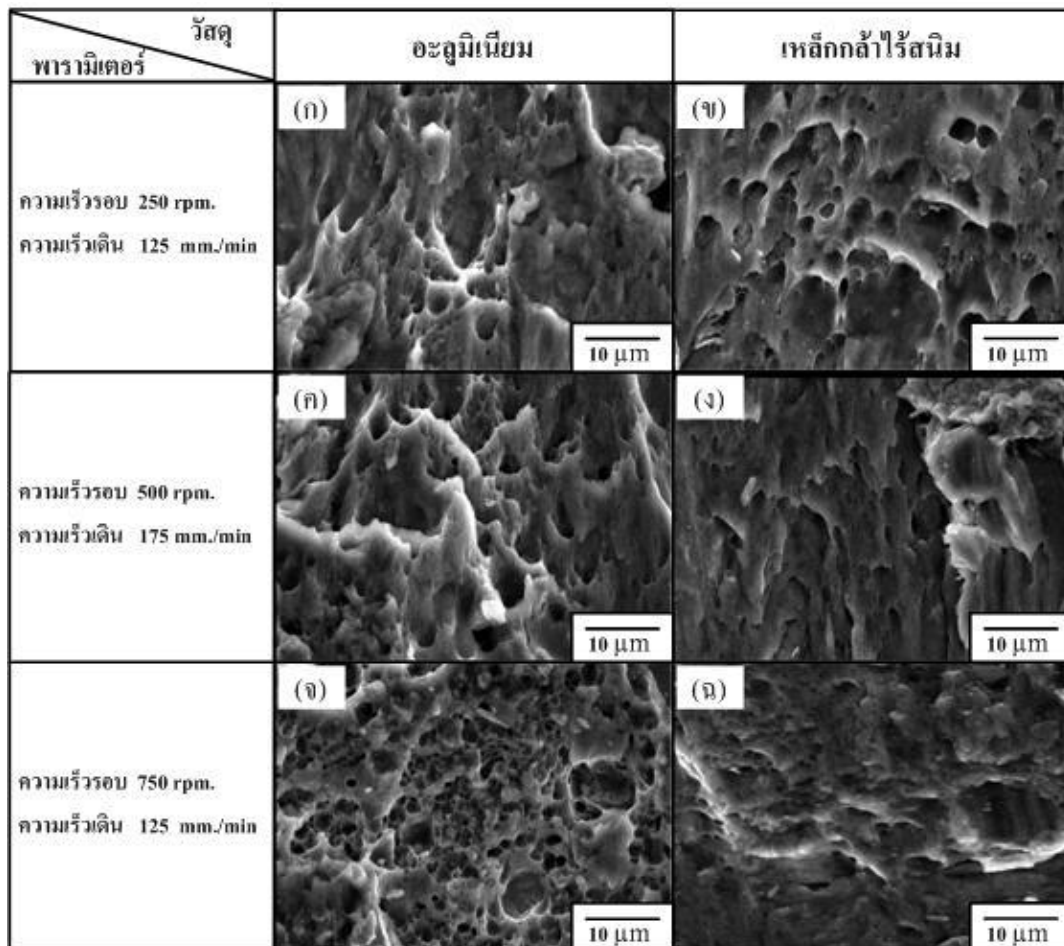
ส่วนลักษณะการฉีกขาดที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรูป (ข) (ง) และ (ฉ) ตามลำดับ พบว่า มีลักษณะการฉีกขาดที่คล้ายกับลักษณะการฉีกขาดที่ผิวของอะลูมิเนียม ดังที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น



รูปที่ 4.69 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่า ของรอยฉีกขาดหลังทดสอบแรงดึงเหนือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา

รูปที่ 4.69 (ก) (ข) (ค) และ (จ) ตามลำดับ แสดงลักษณะการฉีกขาดจากการทดสอบแรงดึงที่ผิวของอะลูมิเนียมและผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ตามลำดับพบว่า ลักษณะการฉีกขาดมีความคล้ายคลึงกัน คือ มีหลุมขนาดเล็กใหญ่สลับกันที่ขอบของหลุมมีลักษณะกลมมนและมีการยึดตัวของ

เนื้ออะลูมิเนียมตามทิศทางแรงดึงเฉือน ซึ่งมีความแตกต่างจากรูป (ง) และ (ฉ) แสดงถึงรอยฉีกขาดที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าเกิดหลุมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและเป็นหลุมขนาดเล็ก ผิวรอยฉีกขาดมีความเรียบเป็นชั้นๆ ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความแตกต่างจากลักษณะการฉีกขาดที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูป (ข) และ (ง) ตามลำดับ ดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.70 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1,800 เท่า ของรอยฉีกขาดหรือทดสอบแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย

ลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ผิวอะลูมิเนียมภายในรอยเชื่อมพบว่า การฉีกขาดมีการยึดตัวที่ขอบของหลุมตามทิศทางแรงดึง ดังรูปที่ 4.70 (ก) และ (ค) ตามลำดับ พบว่า หลุมมีขนาดใหญ่ขอบมน ซึ่งมีความแตกต่างจากรูป (ข) ที่เกิดหลุมขนาดเล็กค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีลักษณะที่เหมือนกับการฉีกขาดที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีลักษณะการฉีกขาดเป็นชั้นบางๆ ไม่สม่ำเสมอ และมีความลึกตื้นๆ ขอบของหลุมมีลักษณะเป็นเหลี่ยมตามทิศทางแรงดึงเฉือน

ตารางที่ 4.1 สรุปลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อมจากการทดสอบแรงดึงเงื่อนไขด้วยตัวกวนชนิดต่างๆ

ชนิดตัวกวน	ความเร็วรอบ – ความเร็วเดิน	ลักษณะการฉีกขาด	
		เปราะ	เหนียว
ทรงกระบอก	250 rpm. – 50 mm./min	●	
	500 rpm. – 50 mm./min		●
	750 rpm. – 75 mm./min	●	
ทรงกระบอก เกลียวขวา	250 rpm. – 50 mm./min		●
	500 rpm. – 125 mm./min	●	
	750 rpm. – 150 mm./min		●
ทรงกระบอก เกลียวซ้าย	250 rpm. – 125 mm./min		●
	500 rpm. – 175 mm./min	●	
	750 rpm. – 125 mm./min		●
กรวย	250 rpm. – 25 mm./min	●	
	500 rpm. – 50 mm./min	●	
	750 rpm. – 50 mm./min		●
กลวยเกลียวขวา	250 rpm. – 75 mm./min	●	
	500 rpm. – 75 mm./min	●	
	750 rpm. – 25 mm./min	●	
กลวยเกลียวซ้าย	250 rpm. – 125 mm./min	●	
	500 rpm. – 175 mm./min	●	
	750 rpm. – 125 mm./min	●	

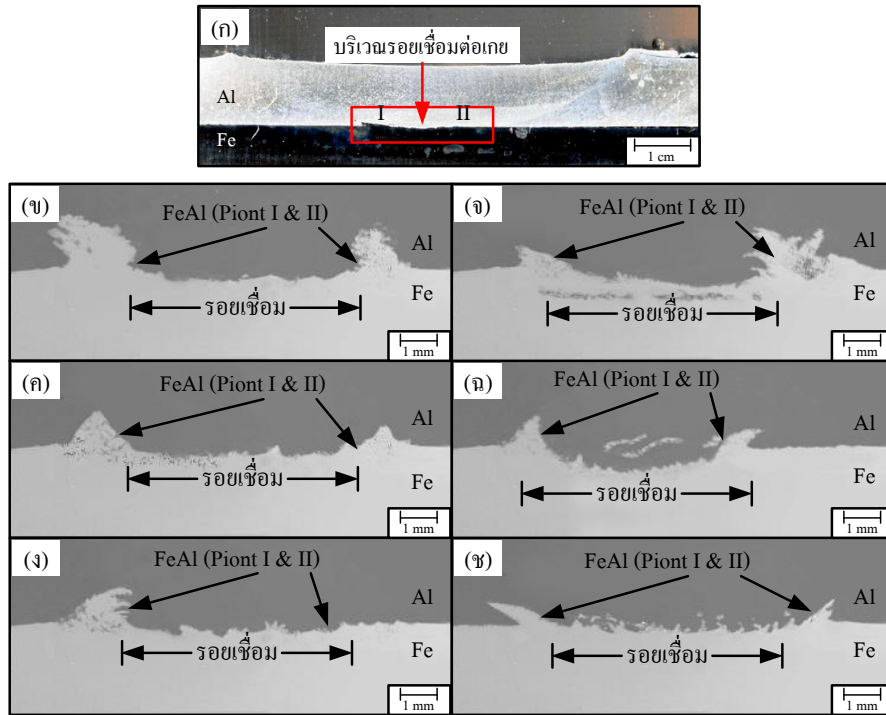
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยฉีกขาดหลังจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเงื่อนไขของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ในลักษณะต่อเกลียวที่ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope : SEM) พบว่า ภายในรอยฉีกขาดของเหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียมที่นำมาเชื่อมด้วยสภาวะความเร็วรอบตัวกวน 250 500 และ 750 รอบ/นาที และได้ค่าความแข็งแรงดึงเงื่อนไขที่ดีที่สุดในสภาวะความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน มีลักษณะการฉีกขาดภายในรอยเชื่อมของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ในทิศทางที่สอดคล้องกัน และมีความแตกต่างกันอยู่ 2 ลักษณะที่มีผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kittipong K. และคณะ [28] คือ การพังทลายที่มีลักษณะการฉีกขาดแบบเปราะและแบบเหนียว ซึ่งได้อธิบายลักษณะทั้ง 2 แบบไว้ในรายละเอียดข้างต้นแล้ว และได้

เปรียบเทียบลักษณะการึกษาของวัสดุทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงต่างๆ ไว้ดังตารางที่ 4.1 สรุปได้ลักษณะการึกษาของชิ้นงานเชื่อมเกิดการึกษาภายในรอยต่อภายหลังทดสอบแรงดึง เนื่องที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทำการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบ พบว่าเกิดการึกษาแบบเปราะเป็นส่วนมากเกือบทุกสภาวะการเชื่อม [28]

4.7 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกย

รอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างจุลภาคอินเทอร์เฟซภายในรอยเชื่อมที่มีความสอดคล้องกันดังที่ได้อธิบายในหัวข้อการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเกย ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ด้านข้างอินเทอร์เฟซซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปสู่อะลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งบอกว่าตำแหน่งด้านข้างของอินเทอร์เฟซได้รับอิทธิพลจากตัวถ่วงมากที่สุดและเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นอย่างดี จึงทำการวิเคราะห์ โครงสร้างอินเทอร์เฟซด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน (Electron dispersive spectrometry : EDS) ในตำแหน่งที่ I และ II ของชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนดีที่สุดของตัวถ่วงแต่ละรูปทรง ที่บริเวณรอยเชื่อมดังตัวอย่างรูปที่ 4.71 (ก) พบสารประกอบกึ่งโลหะ FeAl ที่เกิดขึ้นระหว่างอินเทอร์เฟซของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ดังส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 4.2

รูปที่ 4.71 (ข)-(ค) ตามลำดับ แสดงอินเทอร์เฟซบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะของอินเทอร์เฟซที่คล้ายกัน ด้านข้างของอินเทอร์เฟซ พบว่ามีการแทรกตัวของเหล็ก (Fe) เข้าไปในอะลูมิเนียมในปริมาณที่มาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีจาก ดังตารางที่ 4.2 ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดการพังทลายมักเกิดขึ้นที่บริเวณฝั่งของอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากบริเวณด้านข้างทั้งสองของอินเทอร์เฟซรอยต่อเกย พบ เหล็ก (Fe) ปริมาณมาก แสดงให้เห็นถึงการจับยึดกันระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกให้เห็นถึงความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนตรงกลางบริเวณแนวเชื่อมมีผิวลึกลงเข้าไปในส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากตัวถ่วงที่กดคืบเข้าไปในส่วนของผิวหน้าเหล็ก 0.2 มม. จึงทำให้อะลูมิเนียมถูกอัดเข้าไปแทรกตัวในส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าบริเวณนี้มีเหล็กกล้าไร้สนิมที่แทรกเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมที่เล็กน้อยและมีผิวที่ขรุขระไม่สม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม ผลการศึกษามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kittipong K.[28] ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลการทดลองมีความชัดเจนและมีความแม่นยำยิ่งขึ้นควรทำการศึกษาขั้นสูงในลำดับต่อไป



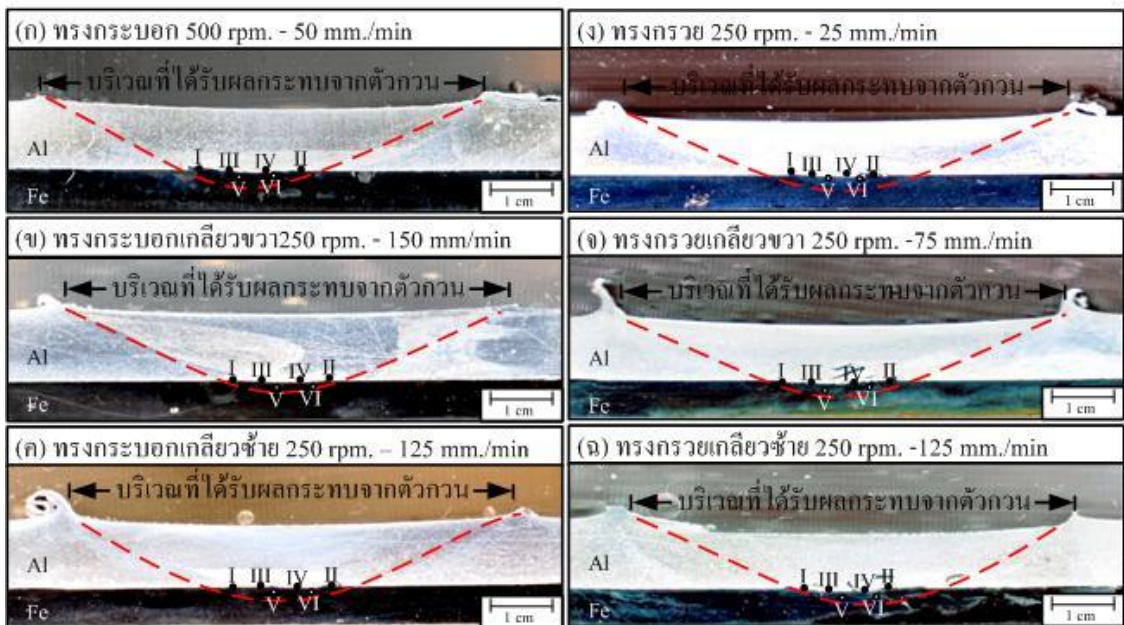
รูปที่ 4.71 โครงสร้างจุลภาคที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อเกาะ : (ก) บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกาะ (ข) ตัวกวนทรงกระบอก (ค) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา (ง) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย (จ) ตัวกวนทรงกรวย (ฉ) ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และ (ช) ตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกาะระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมที่เชื่อมด้วยตัวกวนต่างๆ

ลักษณะของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อม	ตำแหน่งตรวจสอบ	ปริมาณธาตุ (% โดยอะตอม)					
		Fe	Al	O	Mg	Si	Cr
ทรงกระบอก	I	29.58	62.7	5.82	0.72	0.56	0.62
	II	19.12	69.15	9.51	0.10	1.53	0.59
ทรงกระบอกเกลียวขวา	I	25.03	67.21	2.52	0.67	0.28	4.29
	II	28.18	55.4	9.22	0.29	1.32	5.59
ทรงกระบอกเกลียวซ้าย	I	46.43	37.36	6.09	0.31	0.58	9.23
	II	20.45	65.43	9.6	0.49	0.23	3.8
ทรงกรวย	I	24.99	60.34	6.58	1.04	1.82	5.23
	II	45.02	33.37	10.46	0.47	1.85	8.83
ทรงกรวยเกลียวขวา	I	18.45	65.76	8.65	0.72	2.3	4.12
	II	35.92	45.01	8.74	0.46	3.71	6.16
ทรงกรวยเกลียวซ้าย	I	53.57	31.75	5.24	0.31	0.56	8.57
	II	57.8	28.21	4.39	0.06	0.64	8.9

4.8 ศึกษาค่าความแข็งของรอยเชื่อม

ตัวแปรเชื่อมเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวนนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์บริเวณอินเทอร์เฟซ เพื่อนำมาพิจารณาให้มีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมา โดยได้ผลการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดิ่งเหนือดีที่สุดในแต่ละชนิดตัวกวน โดยใช้แรงกดที่ (Load) 100 gf. ณ ตำแหน่งต่างๆเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งมาตรฐาน ของอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังรูปที่ 4.72 และอธิบายค่าความแข็งไว้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.72 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ตัวกวนรูปทรงต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430

วัสดุทดสอบ	ค่าความแข็ง (Scale Hv)			
	Load 100 gf.			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063	48.3	41.8	49.9	49.66
เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430	130.1	128.4	139.9	132.80

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยเชื่อมของแต่ละชนิดรูปทรงตัวกวน

ตำแหน่ง ทดสอบ	ค่าความแข็ง (Scale Hv)					
	Load 100 gf.					
	ทรงกระบอก	ทรงกระบอก เกลียวขวา	ทรงกระบอก เกลียวซ้าย	ทรงกรวย	ทรงกรวย เกลียวขวา	ทรงกรวย เกลียวซ้าย
I	121.2	141.1	133.6	155.7	112.5	107.2
II	120.1	108.0	122.8	142.6	138.3	128.6
III	57.4	95.3	71.9	60.5	75.5	55.5
IV	62.8	85.9	84.6	64.3	74.7	51.8
V	152.5	212.1	191.7	206.2	148.2	187.8
VI	166.3	197.5	182.5	198.1	162.8	170.1

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยเชื่อมจากการทดสอบความแข็งบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม ตำแหน่งที่ I และ II เป็นบริเวณที่เกิดการแทรกตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมของรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมทุกชนิดตัวกวน ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากตัวกวนและเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนบนรอยเชื่อมมีค่าความแข็งของทั้งหกชนิดรูปทรงตัวกวน ที่ค่อนข้างมากซึ่งถือว่าเป็นค่าความแข็งที่สูงรองจากตำแหน่ง V และ VI ที่มีค่าความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน ดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากเป็นบริเวณอินเทอร์เฟซฝั่งของเหล็กกล้าไร้สนิมจึงทำให้มีค่าความแข็งมีค่ามาก เมื่อเทียบกับบริเวณอินเทอร์เฟซฝั่งอะลูมิเนียม ตำแหน่ง III และ IV ได้ค่าความแข็งที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของอะลูมิเนียมมาตรฐาน ดังตารางที่ 4.3 แต่มีค่าเมื่อเทียบกับค่าความแข็งตำแหน่งที่ I II V และ IV ตามลำดับ จากการทดสอบค่าความแข็ง ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ความแข็งบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดขึ้นและการบีบอัดของตัวกวนที่มีผลโดยตรงต่อกระบวนการเชื่อม [29] อิทธิพลเหล่านี้ล้วนแต่ทำให้ผลการทดสอบค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอะลูมิเนียมในหลักการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ยังต้องมีการศึกษาต่อไป

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของรอยเชื่อมต่อเคาระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น ทำให้ทราบถึงผลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบอย่างเห็นได้ชัด ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยรอยเชื่อม การหาความความแข็งแรงดึงเฉือน การวิเคราะห์พื้นผิวพังทลาย การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและมหภาค การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ตลอดจนการทดสอบหาค่าความแข็งบริเวณอินเทอร์เฟซ นั้นแสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์ผลการทดลองในกระบวนการเชื่อมเสียดทานมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นฐานข้อมูลของงานวิจัยที่จะต้องมีการพัฒนาและหาวิธีการเชื่อมเพื่อนำประประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการที่ได้เชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 โดยใช้ตัวกวนที่มีรูปทรงต่างๆ ได้แก่ ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย เพื่อทำการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกยที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมดีที่สุด โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการสรุปผลการทดลองในบทนี้จะแบ่งการสรุปผลการทดลองออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้คือ สรุปในส่วนของค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่สูงสุดของแต่ละรูปทรงตัวกวน ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงสูงสุดกับ โครงสร้างจุลภาค ลักษณะรอยพังทลาย ตลอดจนการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในรอยเชื่อมอื่นๆ อธิบายได้ดังนี้

5.1.1 ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด

ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่เกิดจากการทดสอบแรงดึงสามารถสรุปผลของค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดรูปทรงตัวกวน ดังต่อไปนี้

- 1) ตัวกวนทรงกระบอก มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 13.401 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที และความเร็วดิ้นแนวเชื่อม 50 มม./นาที
- 2) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 12.784 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที และความเร็วดิ้นแนวเชื่อม 150 มม./นาที
- 3) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 13.750 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที และความเร็วดิ้นแนวเชื่อม 175 มม./นาที
- 4) ตัวกวนรูปทรงกรวย มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 11.578 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที และความเร็วดิ้นแนวเชื่อม 25 มม./นาที
- 5) ตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 11.53 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที และความเร็วดิ้นแนวเชื่อม 75 มม./นาที
- 6) ตัวกวนทรงกรวยเกลียวซ้าย มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 13.047 kN ที่ความเร็วรอบตัวกวน 250 รอบ/นาที และความเร็วดิ้นแนวเชื่อม 125 มม./นาที

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงเดือนมีค่าสูงสุด คือ 13.750 kN ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 175 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย

5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

เมื่อทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุด ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย ที่ความเร็วรอบตัวกวน 500รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 175 มม./นาที พบว่า โครงสร้างของรอยเชื่อมปรากฏเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิม แทรกตัวเข้าไปในอะลูมิเนียม ในลักษณะของกิ่งก้านในส่วนขอบบริเวณด้านข้างของรอยเชื่อม ในส่วนกลางบริเวณของรอยเชื่อม พบว่าเนื้อของวัสดุทั้งสองมีการผสานเข้ากันมากพอสมควร เมื่อเทียบกับรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุดลักษณะของโครงสร้างการเกิดอินเทอร์เฟสของเนื้อวัสดุพบว่า เนื้อวัสดุทั้งสองชนิดการแทรกตัวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียม ปริมาณที่น้อยมากจนแทบที่จะไม่สามารถมองเห็นได้ จึงเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด

5.1.3 ลักษณะรอยพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดการพังทลายหลังทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเดือนของรอยต่อเชื่อมมีลักษณะการฉีกขาดที่ฝั่งของอะลูมิเนียมเป็นส่วนมาก เนื่องจากพบอะลูมิเนียมหลุดติดที่รอยเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณที่มาก และทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบลักษณะของรอยฉีกขาดบนผิวอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมพื้นผิวขรุขระเป็นชั้นเรียบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการฉีกขาดของรอยเชื่อมมีลักษณะแบบเปราะที่มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่ให้ค่าดีที่สุดของแต่ละรูปทรงตัวกวน

5.1.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน

บริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมทุกๆชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดของแต่ละรูปทรงตัวกวน จากที่ได้ทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน พบสารประกอบกึ่งโลหะ คือ FeAl ในปริมาณที่มาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณ เหล็ก (Fe) ที่แทรกตัวเข้าไปในส่วนของอะลูมิเนียมเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมเกิดความแข็งแรงมาก จากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเดือนทุกๆสภาวะที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม

5.1.4 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม

การทดสอบความแข็งบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม ได้ค่าความแข็งบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมทุกๆ รูปทรงตัวกวน ตรงกลางแนวเชื่อมมีค่าความแข็งต่ำสุด ด้านข้างทั้งสองมีค่าความแข็งมากกว่าตำแหน่งกลาง ส่วนบริเวณอินเทอร์เฟสฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่าความแข็งมากที่สุด เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากตัวกวน ความร้อน การบีบอัดของตัวกวน และค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรเชื่อมที่เหมาะสม นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งที่บริเวณอินเทอร์เฟสมีส่วนที่ทำให้เกิดการฉีกขาดของรอยเชื่อมในลักษณะต่างๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในการทำวิจัยในครั้งนี้พบว่ากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ในลักษณะการต่อเกลยสามารถที่จะประยุกต์การเชื่อมไปใช้ทำการทดลองและปรับปรุงในส่วนต่างๆ ได้อีก เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ที่มีความสำคัญต่อการทำงานในระบบงานทางด้านวิศวกรรมหรือส่วนอื่นที่มีความเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างประเด็นหัวข้อในการศึกษาดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อเกลยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ในลักษณะที่ตัวกวนทำมุม 45 องศา บนรอยต่อเกลย

5.2.2 ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อเกลยระหว่างอะลูมิเนียมแผ่นรีด AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 โดยการเพิ่มที่ขั้วการเชื่อมซ้ำหลายๆ รอบ

5.2.3 ศึกษาในส่วนของรูปทรงของตัวกวนที่มีความหลากหลายมากกว่าการทดลองในครั้งนี้ เช่น ตัวกวนรูปทรงสามเหลี่ยม และตัวกวนรูปทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น

5.2.4 นำรอยเชื่อมไปทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเนื่องหลังจากการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อน



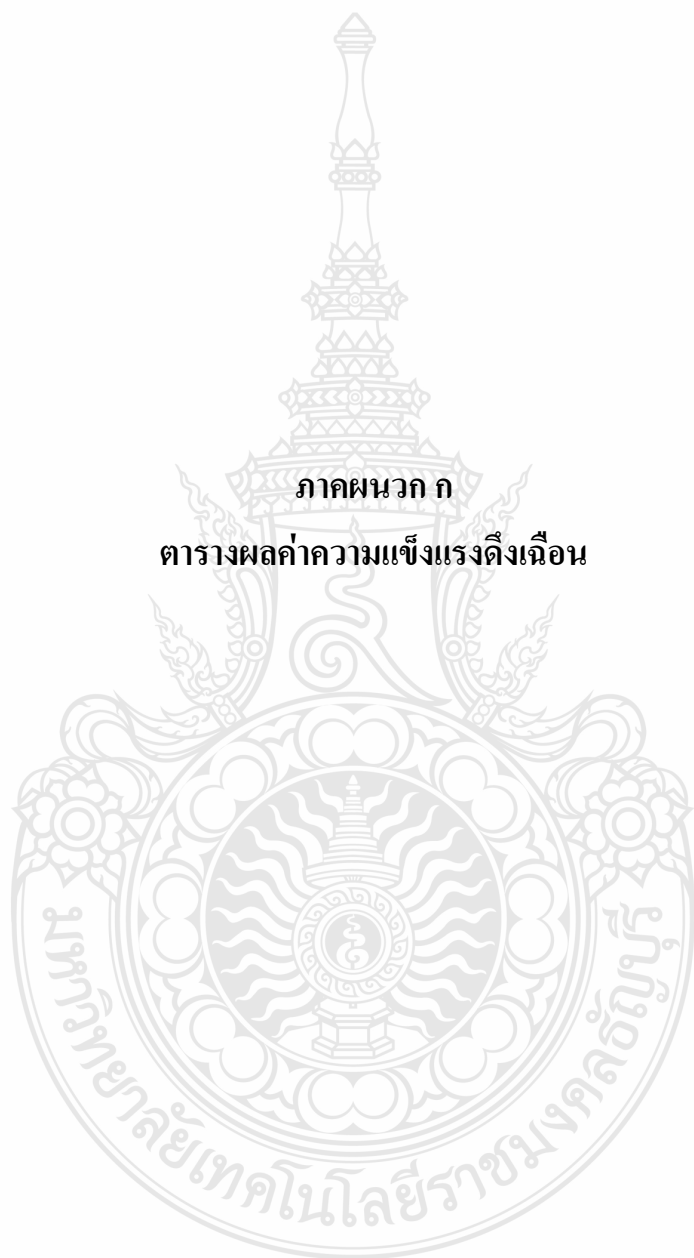
เอกสารอ้างอิง

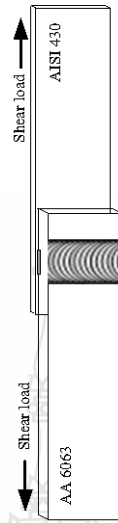
- [1] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, อนินต์ มีมนต์, และ ประกอบ บุญยงค์. การเชื่อมรอยต่อชนอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมฟริกชันสเตอร์.
- [2] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, บุญส่ง จงกลณี, และ สมควร แววดี. อิทธิพลรูปร่างตัวกวนต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่ออะลูมิเนียม 6063-T1 และเหล็กกล้า AISI 1015. เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6.
- [3] ณัฐ แก้วสกุล, เรวัตน์ ช่อมสุข, และ กิตติพงษ์ กิมะพงษ์. อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติทางกลของรอยต่ออะลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430. เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6.
- [4] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, อนินต์ มีมนต์. อิทธิพลการเชื่อมฟริกชันสเตอร์ต่อสมบัติรอยต่อของอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคัลญบุรี, หน้า 54-61.
- [5] ไพจิตร คำไสย, สุวิรัตน์ ทองวันดี, และ นัทธร พิสัยพันธ์. อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติทางกลของรอยต่ออะลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 403. ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2552 หน้า 41-51.
- [6] www.akesteel.com/index.php?m=3&art=45438 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 1 มีนาคม 2553).
- [7] <http://www.maceducation.com/knowledge/241221210002.htm> [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 18 ตุลาคม 2553).
- [8] ณัฐ แก้วสกุล, กิตติพงษ์ กิมะพงษ์. อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติทางกลของรอยต่ออะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2551.
- [9] http://www.ie.psu.ac.th/ienet_2008/papers/network2008/paper/MFEMFE_028.pdf [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 25 มิถุนายน 2553).
- [10] Brandon, D. and Kaplan, W.D. 1997. Joining Processes, An introduction. New York. John Wiley & Sons.
- [11] Kimapong, K. and Watanabe, T. 2004. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel. Welding Journal. 84-10: 277s-282s.
- [12] 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.

- [13] http://eng.sut.ac.th/cemattestpdf50mat_test_5.pdf [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 9 พฤศจิกายน 2553).
- [14] [http://e-book.ram.edue-bookmMY318\(51\)MY318-11.pdf](http://e-book.ram.edue-bookmMY318(51)MY318-11.pdf) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 18 กรกฎาคม 2553).
- [15] http://elearning.spu.ac.th/allcontentStructure_in_Architecturecourse_outline5.html [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 5 สิงหาคม 2553).
- [16] http://www.princess-it.org/kp9hrh-projectsfile20060327_sammakkeeAeeLunlaindex.htm [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (วันที่ค้นข้อมูล : 12 กันยายน 2553).
- [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://www.psr.d.hawaii.edu/June04/silicatesMeteorites.html> (วันที่ค้นข้อมูล : 20 สิงหาคม 2553).
- [19] Niels H. Harrit, Jeffrey Farrer. *Chemical Physics Journal*. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://therearenosunglasses.wordpress.com/2009/04/06/>. (วันที่ค้นข้อมูล : 5 สิงหาคม 2553).
- [20] Gven Beck. *Edelmetall-Taschenbuch*. Degussa AG. Frankfurt Huething, 1995.
- [21] Japanese Industrial Standard.1992. *Handbook of Non-Ferrous Metals&Metallurgy*. Tokyo Japanese Industrial Standard Association.
- [22] 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.
- [23] Kimapong, K., Watanabe,T.2005. Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding. *Materials Transaction*, 46-4:835-841
- [24] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2550. การเชื่อมฟริกชันสเตอร์อลูมิเนียมผสมเกรด A5053 และเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*. 18-2: 64-68.
- [25] ขวัญชัย อยู่สะอาด และ ชาลิต นุชวงษ์. 2551 .อิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 T-1. *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*.
- [26] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2552. การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304. ม.ป.ท.

- [27] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, อนินท์ มีมนต์ และบุญส่ง จงกลณี. 2551. การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบ กวนรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม430 . ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [28] กิตติพงษ์ และคณะ. 2550. การเชื่อมต่อเกยอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเสียดทานแบบกวน รายงานที่ 1อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อกลสมบัติของรอยต่อเกย. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5. 10-11 พฤษภาคม 2550.
- [29] กิตติพงษ์ และคณะ. 2553. โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยเชื่อมวัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่. รายงานการวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ.



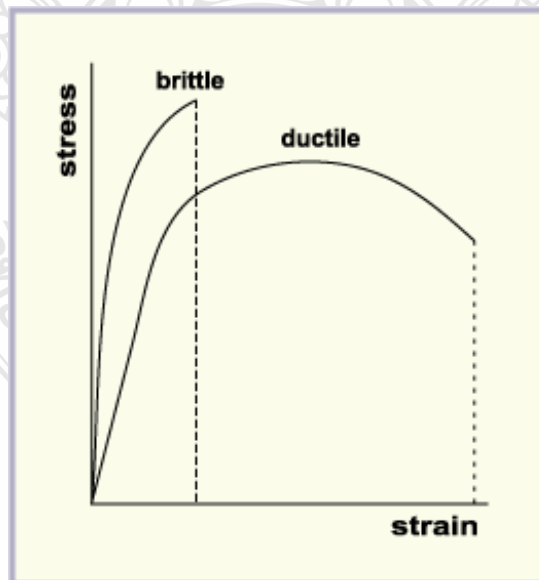




รูปที่ 1 ก. ลักษณะชิ้นงานทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือน

ตารางที่ 1 ก. ตัวอย่างค่าคงที่ และ ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	Modulus of elasticity 10^6 psi	Shear Modulus 10^6 psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Stainless Steel (18/8)	28.0	9.5



รูปที่ 2 ก. เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

ตารางที่ 1 ก ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนทรงกระบอก

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเร็วเดิน (มม./นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง (kN)			ค่าความแข็งแรงดึง เฉลี่ย (kN)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
250	25	8.853	12.924	10.915	10.897
	50	14.366	11.868	13.67	13.301
	75	9.593	8.212	9.416	9.074
	100	6.936	12.384	7.546	8.955
	125	9.134	9.099	8.769	9.001
	150	8.003	7.181	10.51	8.565
	175	10.103	8.183	7.083	8.456
500	25	6.836	12.567	13.285	10.896
	50	15.834	11.138	13.231	13.401
	75	8.546	8.728	8.483	8.586
	100	9.972	11.926	10.742	10.88
	125	9.385	9.342	9.657	9.461
	150	9.685	9.186	8.972	9.281
	175	8.354	11.922	10.484	10.253
750	25	9.138	9.108	8.769	9.005
	50	8.789	9.695	9.491	9.325
	75	10.922	10.86	8.304	10.029
	100	10.181	7.035	9.543	8.92
	125	8.06	8.113	8.219	8.131
	150	9.121	8.381	7.281	8.261
	175	8.069	7.519	7.136	7.575

ตารางที่ 2 ก ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนทรงกระบอก
เกลียวขวา

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเร็วเดิน (มม./นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง (kN)			ค่าความแข็งแรงดึง เฉลี่ย (kN)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
250	25	8.691	7.603	9.611	8.635
	50	10.824	8.968	9.849	9.88
	75	8.216	6.858	7.147	7.407
	100	7.127	7.212	8.225	7.521
	125	10.242	7.278	8.875	8.798
	150	7.082	6.252	8.188	7.174
	175	7.511	7.272	7.002	7.262
500	25	8.085	7.593	7.984	7.887
	50	11.839	8.004	7.295	9.046
	75	10.823	8.677	9.652	9.717
	100	10.74	10.833	10.014	10.529
	125	11.887	10.583	12.29	11.587
	150	11.172	12.004	10.383	11.186
	175	11.524	7.368	8.149	9.014
750	25	12.079	13.184	10.704	11.989
	50	7.461	8.302	8.385	8.049
	75	13.512	9.157	11.601	11.423
	100	12.257	13.471	9.848	11.859
	125	13.302	9.705	11.011	11.339
	150	12.872	12.985	12.494	12.784
	175	7.104	8.227	7.393	7.575

ตารางที่ 3 ก ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนทรงกระบอก
เกลียวซ้าย

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเร็วเดิน (มม./นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง kN)			ค่าความแข็งแรงดึง เฉลี่ย (kN)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
250	25	11.3419	14.403	10.19	11.978
	50	10.842	10.68	10.011	10.511
	75	12.986	12.765	10.055	11.935
	100	11.326	11.965	10.375	11.222
	125	13.026	12.316	12.912	12.751
	150	11.526	12.975	12.793	12.431
	175	12.958	11.0535	8.245	10.752
500	25	10.05	7.465	8.008	8.508
	50	9.216	10.109	6.821	8.715
	75	8.662	8.789	8.227	8.559
	100	9.118	10.364	8.047	9.176
	125	9.333	10.248	8.229	9.27
	150	12.81	11.432	9.071	11.104
	175	14.38	14.875	11.995	13.75
750	25	8.955	9.632	9.547	9.378
	50	7.212	9.521	7.267	8
	75	7.117	7.948	8.159	7.741
	100	8.848	8.185	8.409	8.481
	125	10.302	11.513	8.097	9.971
	150	9.546	8.863	9.244	9.218
	175	7.657	9.769	7.06	8.162

ตารางที่ 4 ก ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนทรงกรวย

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเร็วเดิน (มม./นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง (kN)			ค่าความแข็งแรงดึง เฉลี่ย (kN)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
250	25	10.382	11.098	13.253	11.578
	50	9.703	11.035	10.066	10.268
	75	10.927	8.571	8.982	9.493
	100	9.963	8.279	8.491	8.911
	125	11.003	12.575	8.35	10.643
	150	8.501	8.546	8.33	8.459
	175	7.204	7.638	7.003	7.282
500	25	10.016	7.038	7.163	8.072
	50	12.675	10.685	11.029	11.463
	75	9.686	8.326	9.517	9.176
	100	8.285	8.466	8.38	8.377
	125	10.555	6.585	9.339	8.826
	150	7.275	7.298	6.288	6.954
	175	9.551	6.575	7.606	7.911
750	25	7.469	4.998	6.494	6.32
	50	11.83	6.009	10.005	9.281
	75	8.013	6.007	10.281	8.1
	100	10.469	6.295	7.132	7.965
	125	7.25	6.039	5.845	6.378
	150	6.148	6.742	6.115	6.335
	175	7.823	7.251	8.398	7.824

ตารางที่ 5 ก ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเสี้ยคทานแบบกวนด้วยตัวกวนทรงกรวย
เกลียวขวา

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเร็วเดิน (มม./นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง (kN)			ค่าความแข็งแรงดึง เฉลี่ย (kN)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
250	25	8.056	6.003	7.009	7.023
	50	8.091	8.001	5.509	7.2
	75	12.22	11.05	11.319	11.53
	100	7.255	7.103	6.677	7.012
	125	9.001	6.411	6.189	7.2
	150	12.66	10.302	10.038	11
	175	11.004	6.015	8.003	8.341
500	25	8.222	8.511	8.33	8.354
	50	11.7211	9.101	10.123	10.315
	75	14.058	13.575	12.868	13.5
	100	8.924	8.74	8.655	8.773
	125	9.665	8.295	8.001	8.654
	150	9.301	7.514	8.782	8.532
	175	8.259	7.958	7.471	7.896
750	25	11.749	6.828	7.951	8.843
	50	6.79	9.198	8.549	8.179
	75	7.913	6.078	7.01	7
	100	9.835	6.225	8.047	8.036
	125	9.395	6.919	6.435	7.583
	150	8.001	7.028	7.172	7.4
	175	6.043	8.25	7.287	7.193

ตารางที่ 6 ก ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนทรงกรวย
เกลียวซ้าย

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเร็วเดิน (มม./นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง (kN)			ค่าความแข็งแรงดึง เฉลี่ย (kN)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
250	25	12.351	12.558	12.302	12.404
	50	11.004	10.779	10.65	10.811
	75	14.111	10.939	10.755	11.935
	100	11.425	11.409	11.83	11.555
	125	15.519	11.611	12.01	13.047
	150	13.502	11.967	12.187	12.552
	175	9.801	10.923	10.816	10.513
500	25	8.139	8.54	8.778	8.486
	50	7.277	11.621	7.248	8.715
	75	9.631	8.747	8.409	8.929
	100	9.373	9.155	9.202	9.243
	125	7.442	10.745	10.533	9.573
	150	11.528	11.776	11.595	11.633
	175	10.203	12.526	12.192	11.64
750	25	8.499	9.779	9.855	9.378
	50	8.004	8.117	7.888	8.003
	75	8.031	7.26	7.134	7.475
	100	8.103	8.71	8.001	8.271
	125	12.565	7.679	7.593	9.279
	150	9.54	9.801	9.552	9.631
	175	8.518	8.521	8.218	8.419



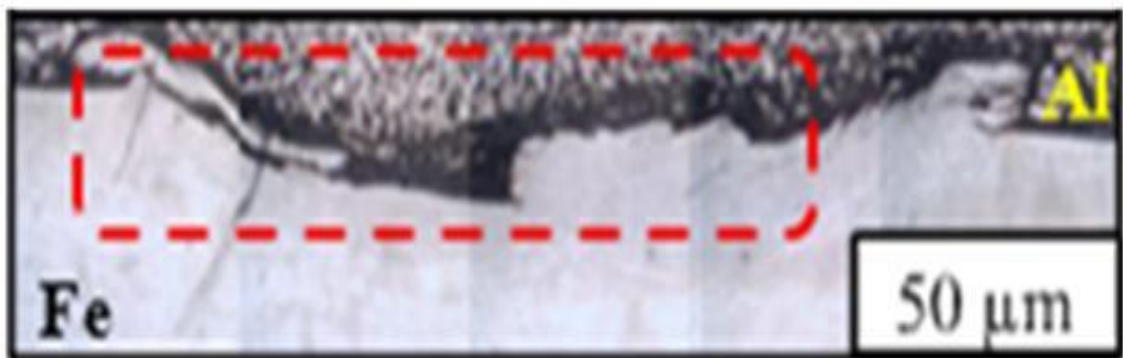
ภาคผนวก ข

ภาพโครงสร้างจุลภาค มหาภาคของรอยเชื่อม
เครื่องมือกลและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง
กราฟแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน
การกำหนดเทมเปอร์สำหรับอะลูมิเนียมผสม
ตารางแปลงหน่วย
มาตรฐานทดสอบความแข็งแบบ Vickers hardness test

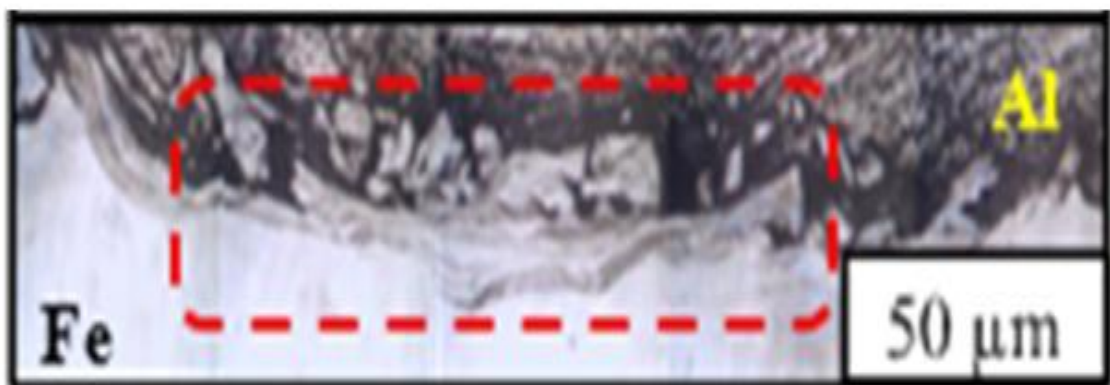
ภาพโครงสร้างจุลภาค มหาภาคของรอยเชื่อม



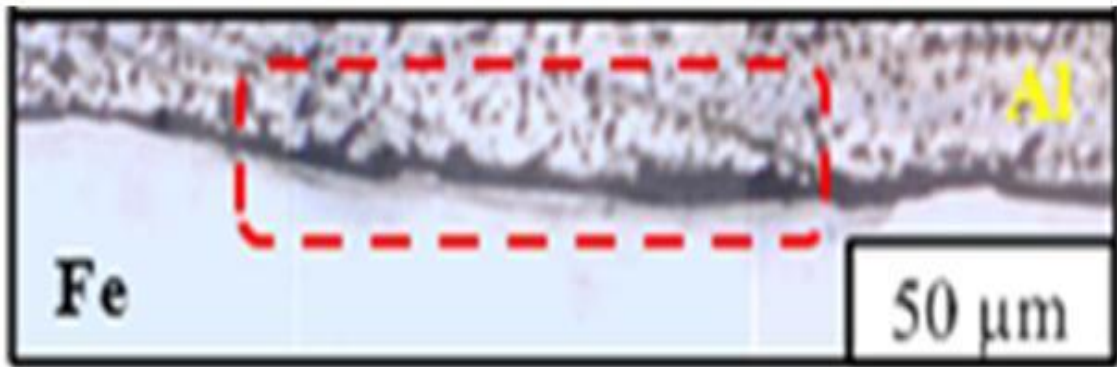
รูปที่ 1 ข. โครงสร้างมหภาคบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อม



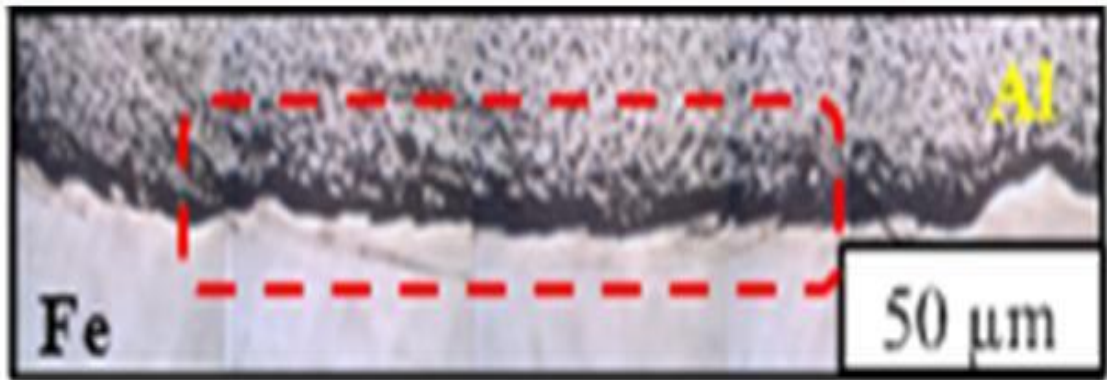
รูปที่ 2 ข. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่ดีที่สุด ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย



รูปที่ 3 ข. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่ดีที่สุด ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย



รูปที่ 4 ข. ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเหนือนต่ำที่สุด
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวซ้าย



รูปที่ 5 ข. ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเหนือนต่ำที่สุด
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย

เครื่องมือกลและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6 ข. เครื่องกัดอัตโนมัติแนวตั้งที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รูปที่ 7 ข. เครื่องตัดชิ้นงานที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



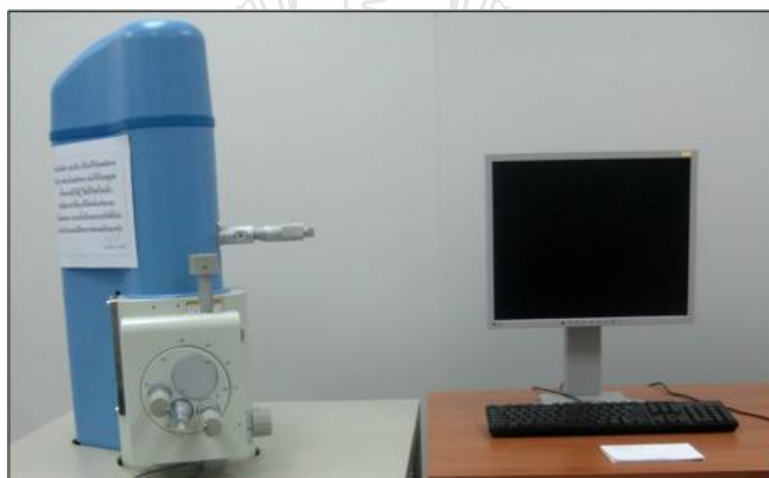
รูปที่ 8 ข. เครื่องทดสอบแรงดึงที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รูปที่ 9 ข. เครื่องขัดผิวชิ้นงานทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รูปที่ 10 ข. กล้องส่องดูโครงสร้างจุลภาคที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



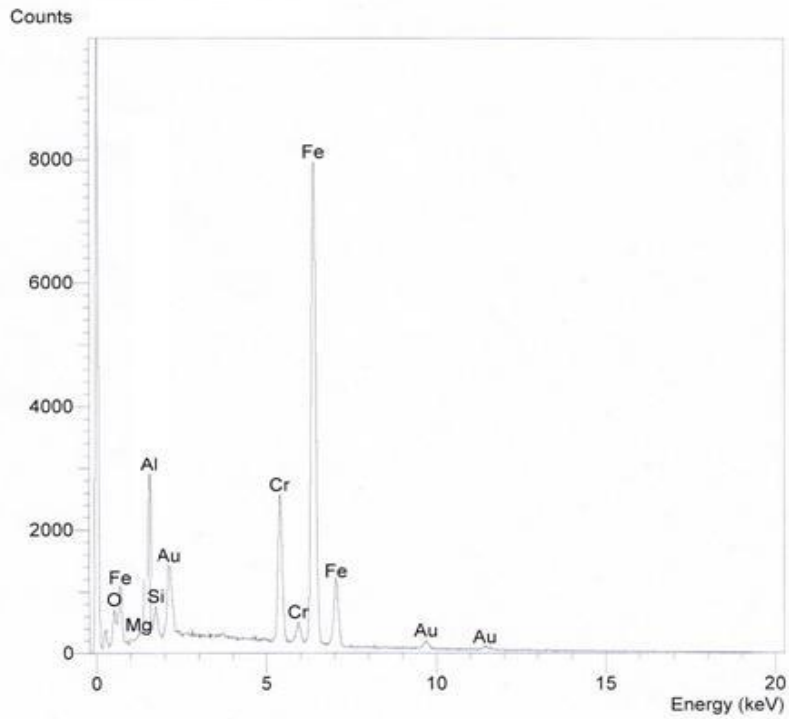
รูปที่ 11 ข. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่สถาบันวิจัยและวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย



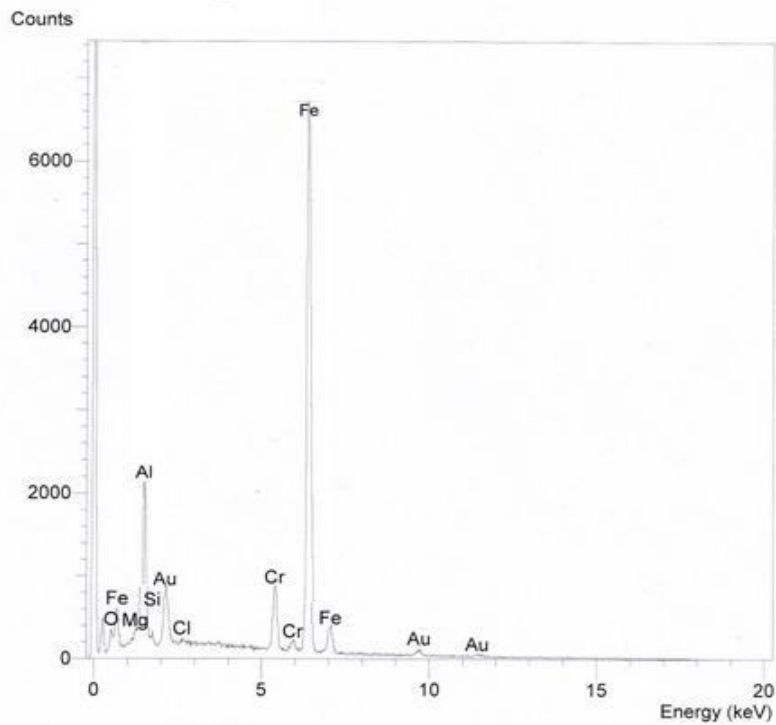
รูปที่ 12 ข. เครื่องทดสอบความแข็งที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



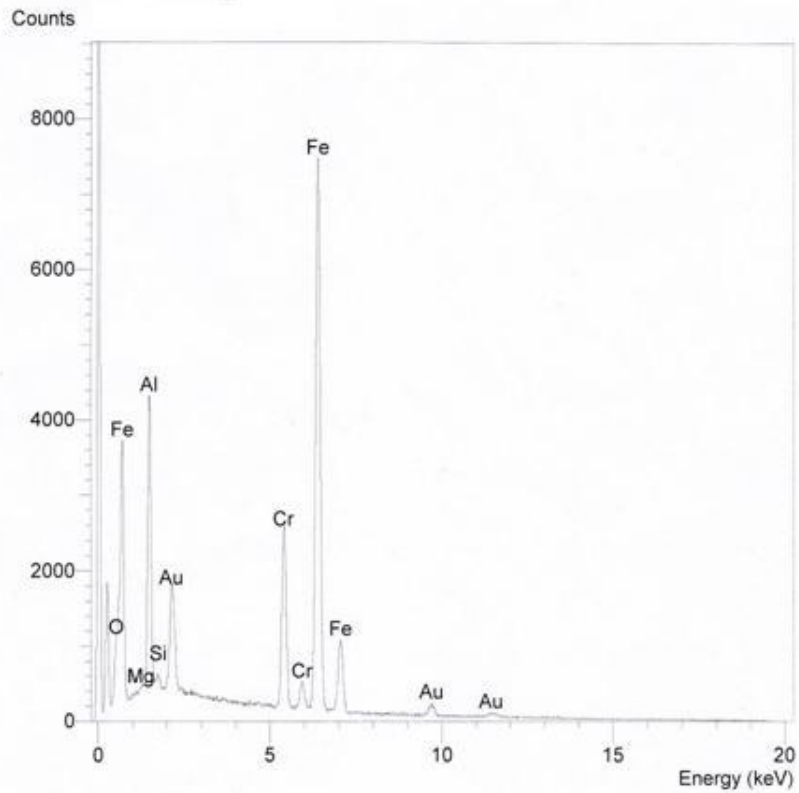
กราฟแสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน



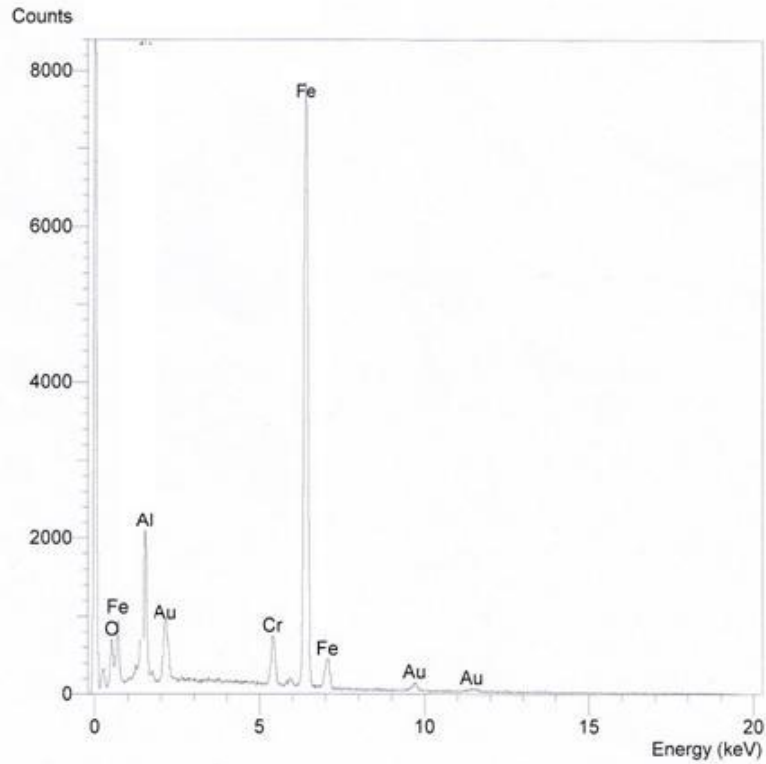
รูปที่ 13 ข. กราฟแสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก



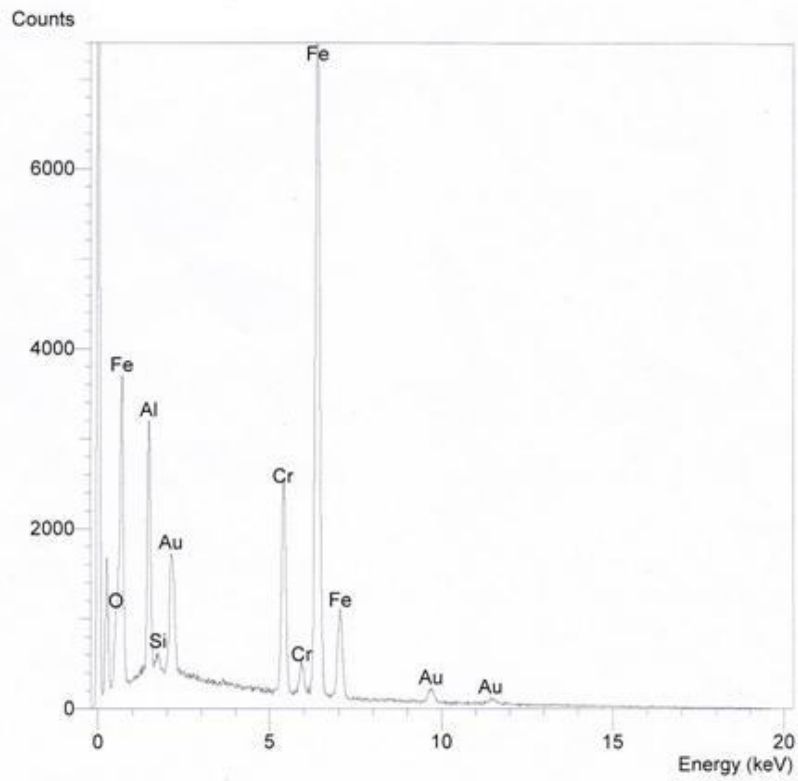
รูปที่ 14 ข. กราฟแสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา



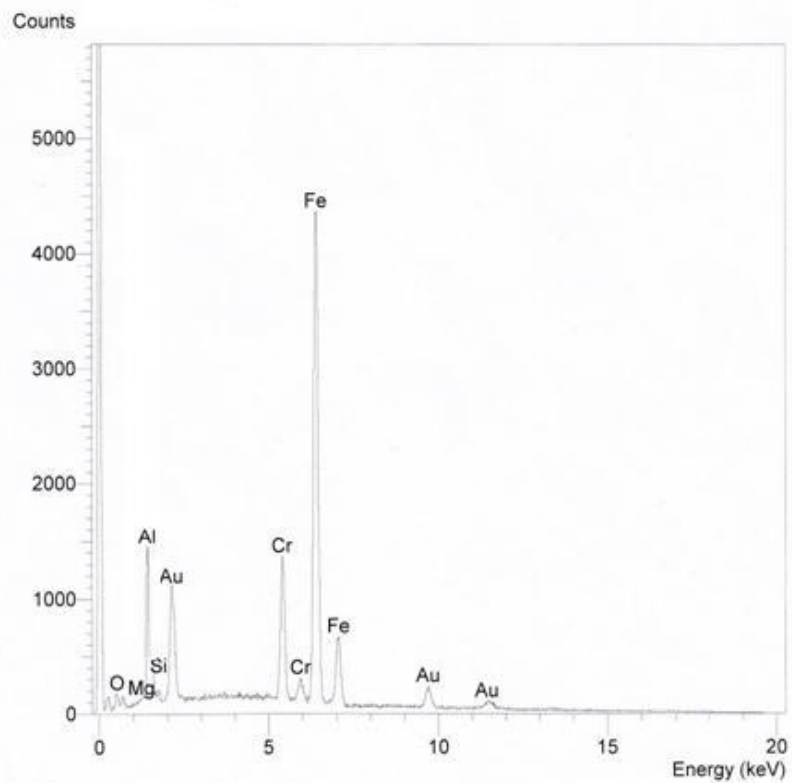
รูปที่ 15 ข. กราฟแสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย



รูปที่ 16 ข. กราฟแสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย



รูปที่ 17 ข. กราฟแสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกาวรูปทรงกรวยเกลียวขวา



รูปที่ 18 ข. กราฟแสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยตัวกาวรูปทรงกรวยเกลียวซ้าย

การกำหนดเทมเปอร์สำหรับอะลูมิเนียมผสม

4

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 to 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 that 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 mechanical 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 mechanical property limits.

T5 — Cooled from an elevated temperature shaping process and then artificially aged. Applies to products which are cooled 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 strength.

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 elevated 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.



Pressure units

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

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

มาตรฐานทดสอบความแข็งแบบ Vickers hardness test

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
$F \geq 49,03$	\geq HV 5	Vickers hardness test
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 to $<$ HV 5	Low-force Vickers hardness test
$0,098\ 07 \leq F < 1,961$	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 $\pm 0,001$ mm (see Bibliography [2]-[5]).

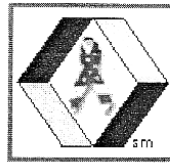
For specific materials and/or products, particular International Standards exist.

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*



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	31	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:

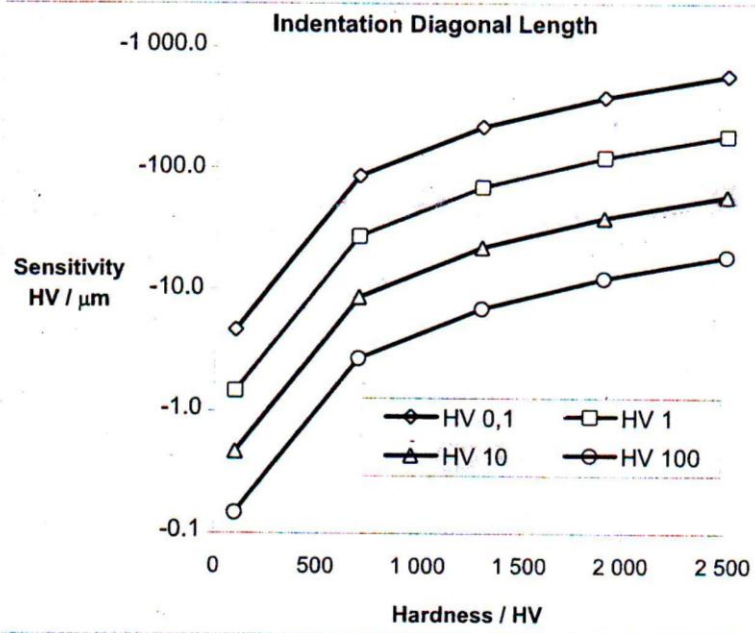
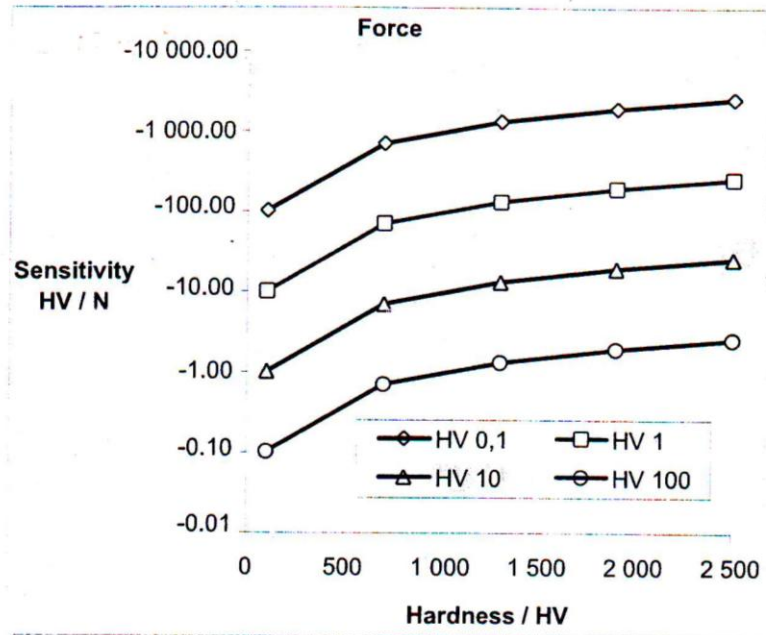
$$\frac{\partial HV}{\partial F} = \frac{HV}{F}$$

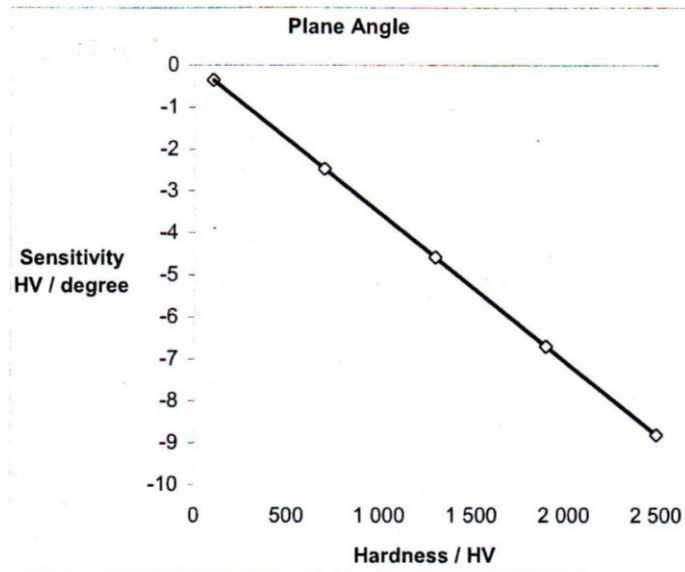
$$\frac{\partial HV}{\partial \alpha} = \frac{HV}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

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

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:







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

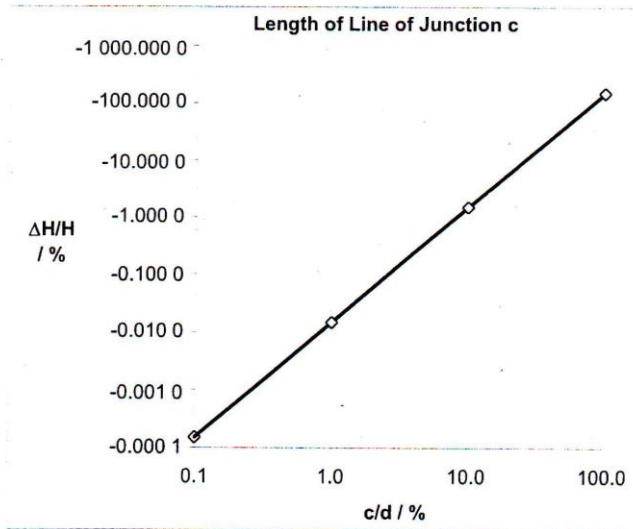
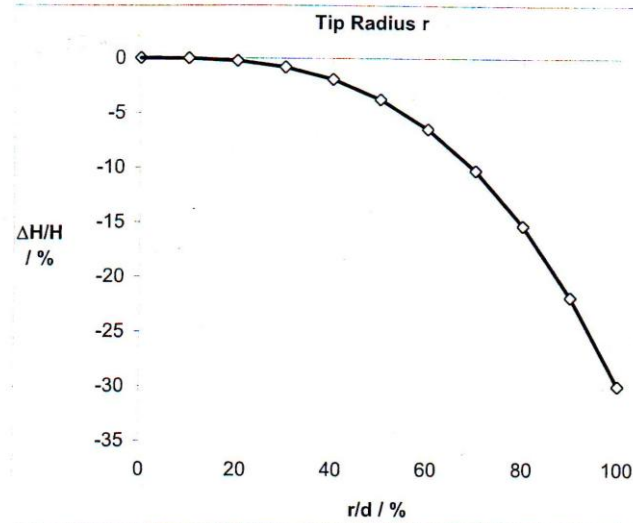
$$\frac{\partial HV}{\partial r} = -0.3 \left(\frac{r}{d} \right)^3$$

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

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”.

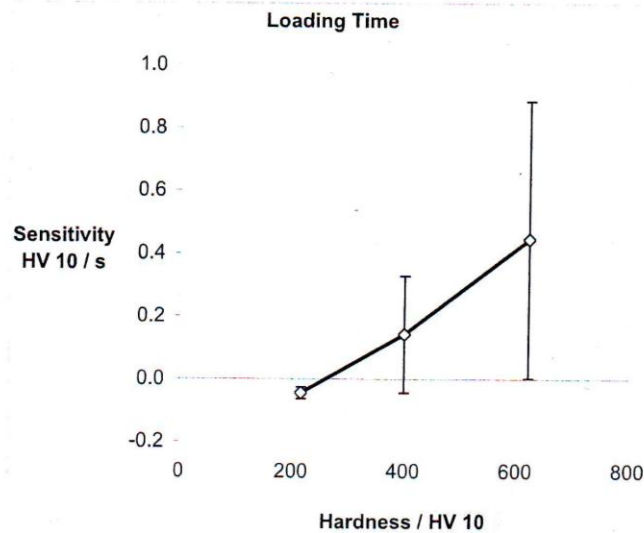
For both ranges, five hardness tests were carried out on each of three blocks of different nominal hardnesses, at different values of the input parameter:

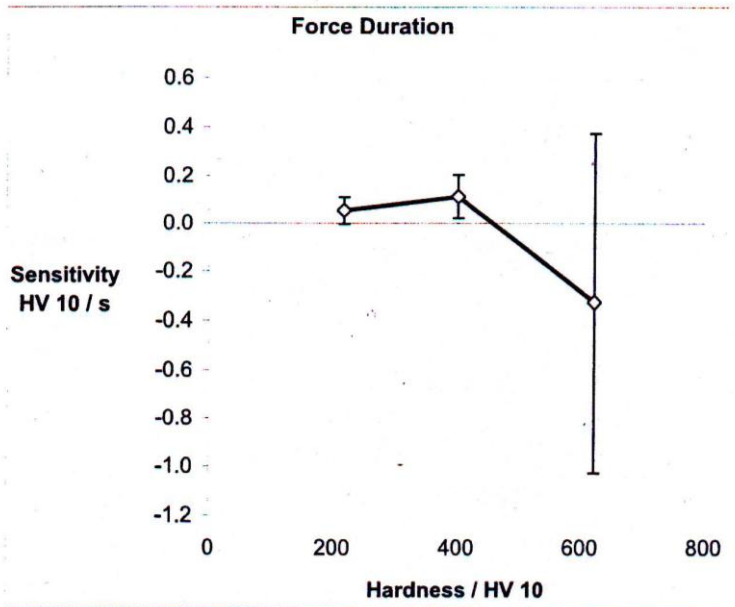
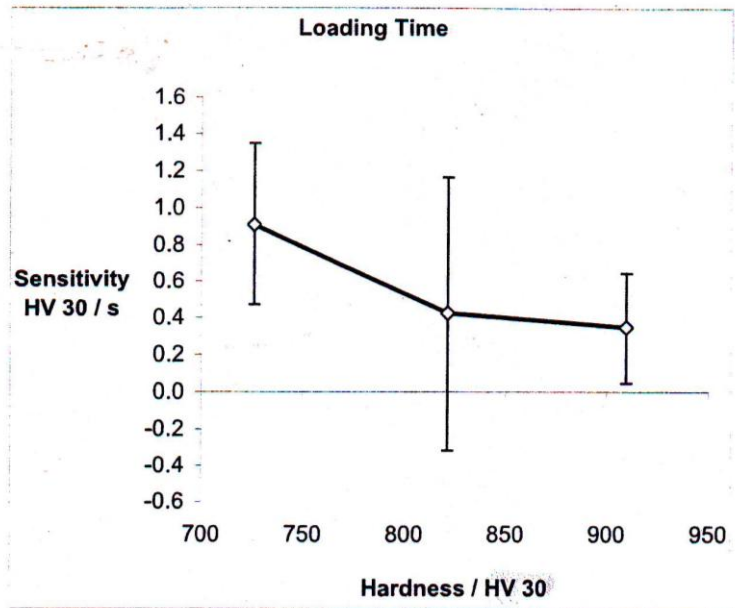
Range	Force	Parameter	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
HV 10	98.07 N	Application time	2 s	4 s	6 s	8 s
		Force duration	10 s	13 s	15 s	N/A
HV 30	294.2 N	Application time	2 s	4 s	6 s	8 s
		Force duration	10 s	13 s	15 s	N/A

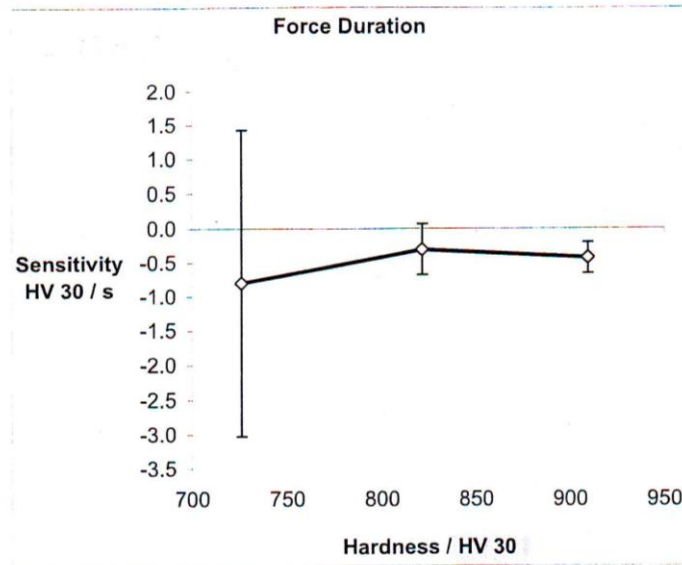
The forces were not applied in a single linear profile, but in two linear sections - 80 % of the force in 25 % of the time followed by the final 20 % of the force in the remaining 75 % of the time:

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·s ⁻¹	19.61 N	1.5 s	13.08 N·s ⁻¹
	4 s		1.0 s	78.46 N·s ⁻¹		3.0 s	6.538 N·s ⁻¹
	6 s		1.5 s	52.30 N·s ⁻¹		4.5 s	4.359 N·s ⁻¹
	8 s		2.0 s	39.23 N·s ⁻¹		6.0 s	3.269 N·s ⁻¹
HV 30	2 s	235.4 N	0.5 s	470.7 N·s ⁻¹	58.8 N	1.5 s	39.23 N·s ⁻¹
	4 s		1.0 s	235.4 N·s ⁻¹		3.0 s	19.61 N·s ⁻¹
	6 s		1.5 s	156.9 N·s ⁻¹		4.5 s	13.08 N·s ⁻¹
	8 s		2.0 s	117.7 N·s ⁻¹		6.0 s	9.807 N·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 $\pm 2 \times$ the standard error associated with the estimate of the gradient (sensitivity coefficient).







Sensitivity to force value

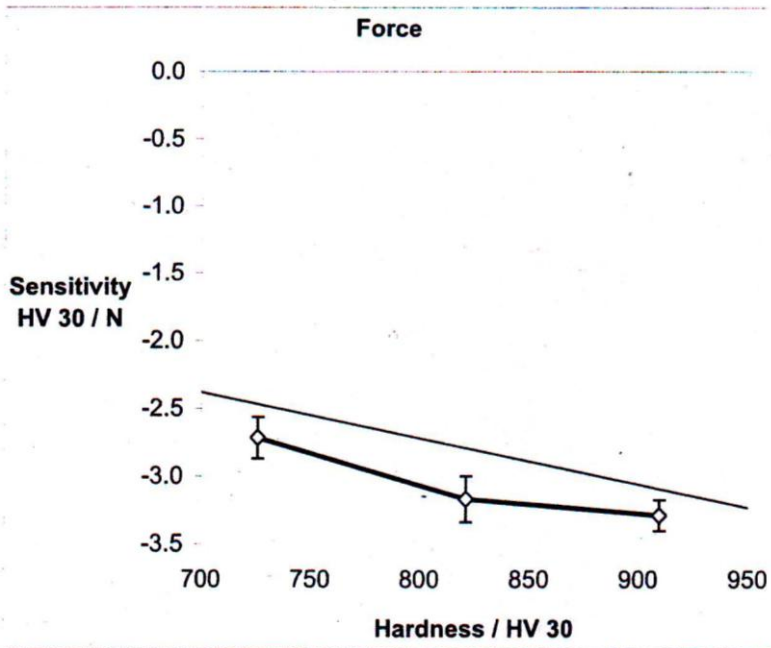
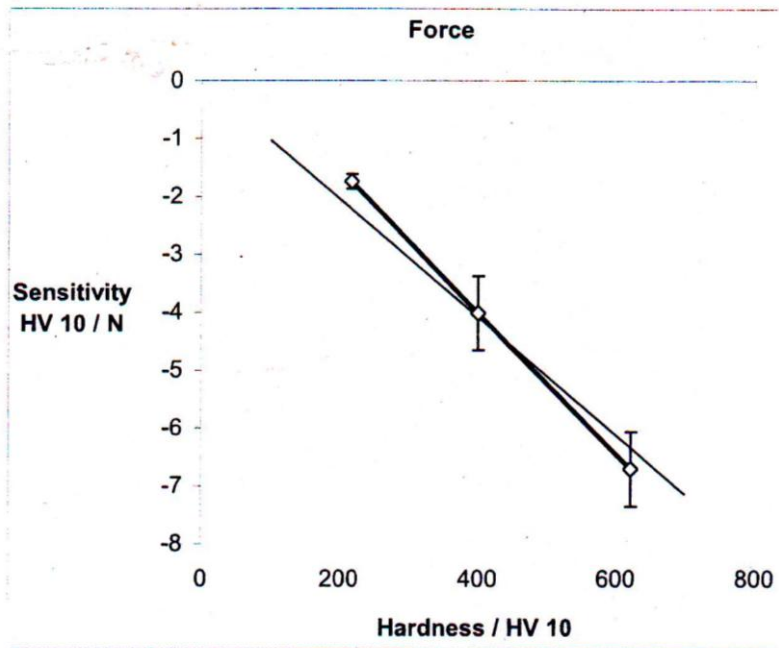
ISO 6507-2 specifies that, for forces of 1.961 N (HV 0.2) and above, each of three force verification measurements in the machine (made by an ISO 376 Class 1 proving device) shall agree with the nominal force to within a tolerance of $\pm 1.0\%$.

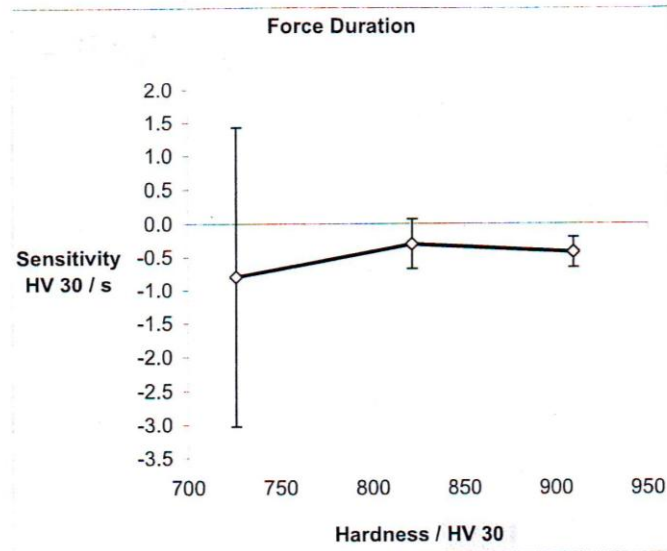
For both ranges, five hardness tests were carried out on each of three blocks of different nominal hardnesses, at different values of force:

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 $\pm 2 \times$ 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.







Sensitivity to force value

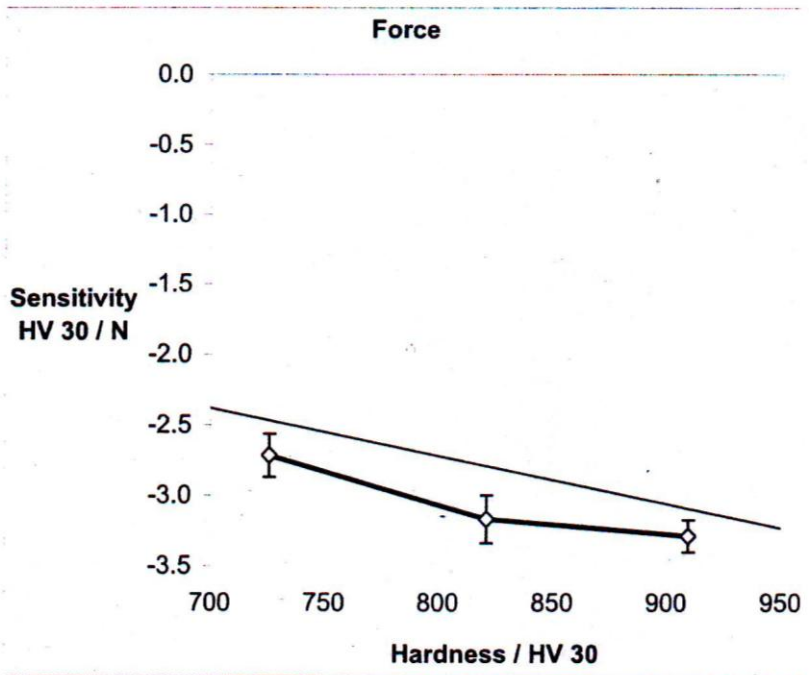
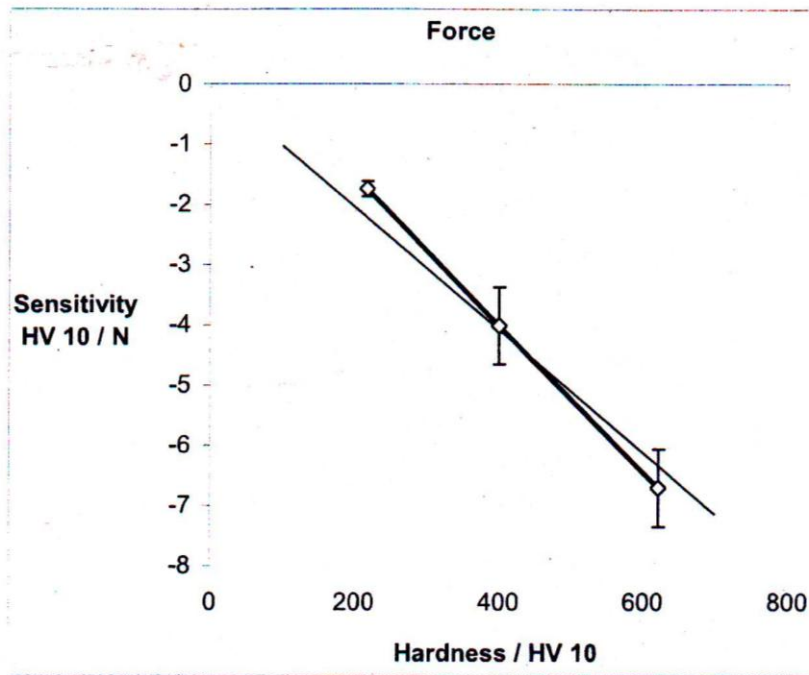
ISO 6507-2 specifies that, for forces of 1.961 N (HV 0.2) and above, each of three force verification measurements in the machine (made by an ISO 376 Class 1 proving device) shall agree with the nominal force to within a tolerance of $\pm 1.0\%$.

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 $\pm 2 \times$ 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.

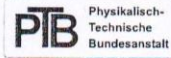




COMPARATIVE MEASUREMENTS OF HARDNESS SCALES FOR ESTABLISHING THE HARDNESS STANDARD OF SLOVENIA



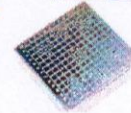
Anton Štiber, ZAG Ljubljana, SLOVENIA • Konrad Herrmann, PTB Braunschweig, GERMANY
 Thomas Polzin, MPA-NRW Dortmund, GERMANY • Alessandra Germak, IMGC Torino, ITALY



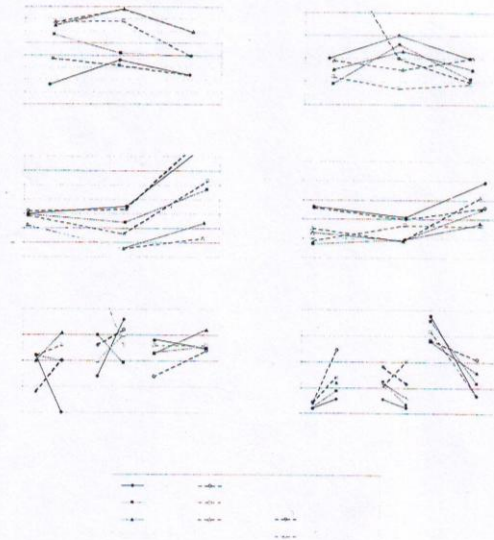
MOTIVATION

DIRECT CALIBRATION METHOD

Procedure	Force N	relative errors (%)		
		force applied	repeatability	maintenance of force
		a	b	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
HRC	F = 98,07	1,29	0,48	
	F' = 1471	0,02	0,01	0,03
	F'' = 98,07	1,05	0,28	



RESULTS OF COMPARATIVE MEASUREMENTS



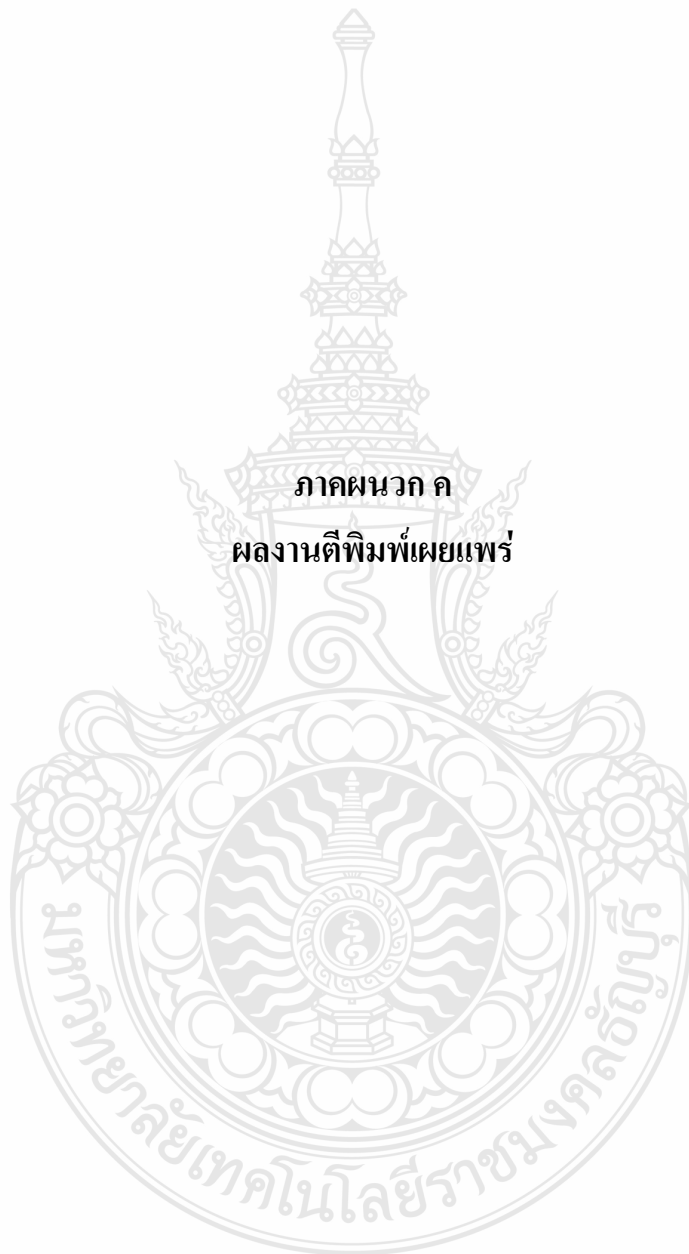
INDIRECT CALIBRATION METHOD

PLAN OF COMPARISON

CONCLUSION

Anton Štiber, ZAG Ljubljana, Dimrova 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, E-mail: anton.stiber@zag.si • Konrad Herrmann, PTB Braunschweig, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany, E-mail: konrad.herrmann@ptb.de
 Thomas Polzin, MPA-NRW, Marsbockstrasse 166, 44287 Dortmund, Germany, E-mail: ths24@mpa.nrw.de • Alessandra Germak, IMGC, Strada delle Cacce 73, 10135 Torino, Italy, E-mail: A.Germak@imgc.it

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



Proceedings

IE NETWORK CONFERENCE 2010

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2553

13-15 ตุลาคม 2553

โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์
จังหวัดอุบลราชธานี





ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ
ผศ.ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค
รศ.ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย
รศ.ดร.ปารเมศ ชุตติมา
รศ.จิรพัฒน์ เกาประเสริฐวงศ์
ผศ.ประเสริฐ อัครประถมพงศ์
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.นภัสวงศ์ โอสถศิลป์
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน์

ผศ.ดร.วิภาวี ชรรมาภรณ์พิลาศ
ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร
ผศ.ดร.สีรง ปรีชานนท์
ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
อ.ภูมิ เหลืองจามีกร
อ.สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา
ผศ.ดร.มานพ เรี่ยวเดชะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ชัชพันธ์ ขำญาติ
ผศ.ดร.รุ่งรัตน์ ภิสิทธิ์เพ็ญ
ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน
ดร.วรวุฒิ หวังวัชรกุล

ดร.สุวิษภรณ์ วิชกุล
ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์
ดร.นันทชัย กานदानันตะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ

ผศ.ชานนท์ มูลวรรณ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ
ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ
ผศ.ดร.วิสนัย วรธนะจจวิทยา
ผศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.วิมลนิน เหล่าศิริถาวร

ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภานแดง
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์
ผศ.สันติชัย ชิวสุทธิศิลป์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.ปภากร สุนานนท์
ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล
ผศ.ดร.ยงยุทธ เสริมสุขธื่อนวัฒน์

ญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร.กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล	ผศ.สมชาย พรชัยวิวัฒน์
ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี	รศ.ดร.อรรถกร เก่งพล
ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์	รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร
ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.ณฐา กุปัดษ์เชิฐียร	ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
ดร.ระพี กาญจนะ	ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
ผศ.ดร.ศิวกร อย่างทอง	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผศ.พิเชษฐ์ เวศนารัตน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.สุพรรณ สุขสนธิ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.จิรวรรณ กล้อยภยันต์	ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร	ผศ.นริศ เจริญพร
ผศ.ดร.วราวัฒน์ กังสัมฤทธิ์	รศ.ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง
ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาะราช	รศ.ดร.มณฑล ศาสสนันท์
ผศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์	รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ดร.ณัฐพัชร อารีรัชกุลกานต์	ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
ผศ.ดร.ชัยพล มงคลิก	ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร.จักรวาล คุณะติลก	ผศ.ดร.บรรหาญ ลีลา
ดร.ฤกษ์วัลย์ จันทรส	รศ.เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป
ดร.บพิท บุปผาโชติ

ดร.สุดสาคร อินธิเดช
ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร

มหาวิทยาลัยรังสิต

ดร.พิษณุ มนัสปิติ
ผศ.ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์
ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ จริงจิตร

ผศ.สินี สุขกรมใส
อ.ศิลปชัย วัฒนเสย

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

อ.กัม พรประเสริฐ
อ.นันทพงศ์ นันทสำเร็จ

อ.เดชโสภณ ถนอมสุข
ดร.กลอเคลีย วณะวิชากร

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
ดร.วราธร ปัญญางาม
ดร.สิรเดช ชาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
อ.อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ดร.ธรีณี มณีศรี
อ.จักรพันธ์ กัณหา
อ.ชวลิต มณีศรี
อ.ชนิน ศรีวรรมย์

อ.พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์
อ.พิสุทธิ์ รัตนแสนวงษ์
อ.วรพจน์ พันธุ์คง
อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง
ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
ผศ.วันชัย ลีลากวีวงศ์

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์
ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

ผศ.ดร.ชเนศ รัตนวิไล

ผศ.ดร.รัญชนา สินธวาลัย

ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์

อ.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.ดร.อรุณ สังขพงศ์

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.วนิดา รัตนมณี

รศ.สมชาย ชูโณม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อ.จิตลดา ชิมเจริญ

อ.ทงศักดิ์ ทวีศรี

อ.นิศากร สมสุข

อ.อรอุมา กอสนาน

อ.อัญชลี สุพิทักษ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ. ประยูร สุรินทร์

ผศ.ชัยพฤกษ์ อาภาเวท

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.วิภู ศรีสืบสาย

ดร.อนิรุท ไชยจรรูนิช

ดร.อุดม จันทรจรัสสุข

ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ผศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรรัตน์

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล

รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์

รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์

ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม

ผศ.เจริญ ชุมมวล

ผศ.ดร.นลิน เพ็ชรทอง

ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.สุริยา ไชคสวัสดิ์

ผศ.อิศว ปัทมธรรมกุล

ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี

อ.ไท แสงเทียน

ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์

อ.ตะวันฉาย โพธิ์หอม

ดร.สัณฑ์ โอพาพิริยกุล

ดร.ธารชุตตา พันธุ์นิกุล

อ.ลลอง ผโลดม

อ.สุรเชษฐ์ ก้อนจันทร์

		หน้า
MEG 32	การเปรียบเทียบสมบัติรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนหลายรูปแบบ สมชาย วนไทยสงค์* และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	140
MEG 33	การประเมินความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มเคลือบแข็งบนวัสดุพื้นเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ* วารุณี เปรมานนท์ และ พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์	141
MEG 34	การศึกษาพฤติกรรมของล้าอาร์คที่ถูกกระตุ้นโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อม GTAW สมพร เพียรสุขมณี* รัฐมน มุมทอง รักพงศ์ พงศ์พันธ์งาม และ ศิวพล บุระพันธ์	142
MEG 35	การทำนายความสึกหรอของคมมีดตัดในกระบวนการกลึงจากแรงตัด ศักดิ์ดา ศรีอนุศาสตร์* และ ศรวัฒน์ วงษา	143
MEG 36	อัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีผลกระทบต่อคุณภาพงานกดตันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่น ฉัตรแก้ว สุริยะภา* อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ และ บุญส่ง ฤทธิ์ตา	144
MEG 37	อิทธิพลการอบชุบด้วยความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งแรงดึงของโลหะเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมผสม AA6063 กิตติพงษ์ กิมะพงศ์* ไพฑูรย์ ประทีปสุข สุรัตน์ ตรียวนพงศ์ และ สมชาย วนไทยสงค์	145
MEG 38	อิทธิพลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะสอดตัวกวนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อชนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ณัฐ แก้วสกุล* เรืองศักดิ์ ภูธรราช และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	146

การเปรียบเทียบสมบัติรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และ
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทาน
แบบกวนหลายรูปแบบ

COMPARISON OF AA6063 ALUMINUM AND AISI430
STAINLESS STEEL LAP JOINT USING VARIOUS FRICTION
STIR WELDING STIRRER GEOMETRIES

MEG 32

สมชาย วนไทยสงค์* และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: Pae_327@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีรูปร่างต่าง ๆ เช่น ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และตัวกวนทรงกรวยเกลียว และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของรอยต่อเกย ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบ 250-750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-175 mm/min อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ด้านล่างโดยมีระยะต่อเกย 30 มม. และความลึกของตัวกวนจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 0.2 มม. ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมนำไปทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งแรงเฉือนและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป ผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุด คือ 13.5 kN ที่ความเร็วรอบ 500 rpm. และความเร็วเดิน 75 mm/min ด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา ผลที่ได้นี้เกิดจากอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีการแทรกตัวระหว่างกันและเกิดการเกาะยึดกันได้อย่างแน่นหนาของวัสดุทั้งสองชนิด จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือนมีค่าสูงสุดด้วย

คำสำคัญ : อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม, การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, ตัวกวน

การเปรียบเทียบสมบัติรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนหลายรูปแบบ
COMPARISON OF AA6063 ALUMINUM AND AISI430 STAINLESS STEEL LAP JOINT USING VARIOUS FRICTION STIR WELDING STIRRER GEOMETRIES

สมชาย วนไทยสงค์^{ก*} และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์^ก

^{ก,ก} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: Pae_327@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีรูปร่างต่างๆ เช่น ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และตัวกวนทรงกรวยเกลียว และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของรอยต่อเกย ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบ 250-750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-175 mm/min อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ด้านล่างโดยมีระยะต่อเกย 30 มม. และความลึกของตัวกวนจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 0.2 มม. ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมนำไปทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งแรงเฉือนและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป ผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุด คือ 13.5 kN ที่ความเร็วรอบ 500 rpm. และความเร็วเดิน 75 mm/min ด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา ผลที่ได้นี้เกิดจากอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีการแทรกตัวระหว่างกันและเกิดการเกาะยึดกันได้อย่างแน่นหนาของวัสดุทั้งสองชนิด จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือนมีค่าสูงสุดด้วย

คำสำคัญ : อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม, การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, ตัวกวน

Abstract

This research aims to friction stir weld a lap joint between AA6063 aluminum and AISI430 stainless steel by various stirrer geometries such as a cylindrical stirrer, a cone stirrer, a screw cylindrical stirrer and a screw cone stirrer. The welding parameters were a rotating speed of 250-750 rpm, a welding speed of 25-175 mm/min, an aluminum plate was overlapped a stainless steel plate by 30 mm and the depth of the stirrer end that plunged into steel plate was 0.2 mm. The welded joint was prepared for shear strength testing and microstructure examination. The summarized results are as following. The maximum shear strength of 13.5 kN was achieved when the joint was welded by a rotating speed of 500 rpm, a welding speed of 75 mm/min and a screw cylindrical stirrer. This result was due to aluminum and steel could combine and bond completely and affected directly to increase the shear strength.

Keywords: Aluminum, Stainless steel, Friction stir welding, Stirrers

1. บทนำ

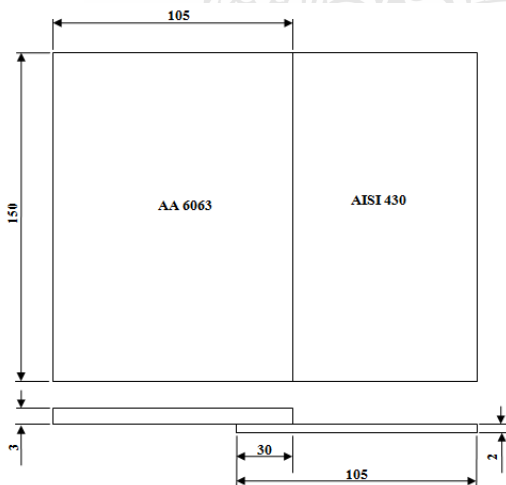
อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันมีการนำเอาวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อลูมิเนียมผสมเข้ามาใช้แทนชิ้นส่วนบางอย่างที่ทำจากเหล็ก เพื่อเป็นการลดน้ำหนัก

โครงสร้างภายในของรถยนต์ และยังเป็นการช่วยลดภาวะที่เกิดน้ำหนักที่มากของโครงสร้าง เช่น ประหยัดพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้น(Sun and Karppi,1996) การเชื่อมวัสดุต่างชนิดนั้นมีความอยาก

ลำบาก เนื่องจากวัสดุต่างชนิดกันมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางกลที่แตกต่างกัน จึงมักเกิดปัญหาต่างๆ ขึ้นตามมา เช่น เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างส่วนผสมของวัสดุ ทำให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่แข็งและเปราะอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงต่ำ ดังนั้นการใช้กระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในการต่อวัสดุที่ต่างชนิดกันจึงมีความสำคัญในการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเรื่อยมา (กิตติพงษ์ และ คณะ, 2549)

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่มีการคิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อลูมิเนียมผสม (Thomas et al, 1991) กระบวนการเชื่อมนี้เป็นการเชื่อมวัสดุต่างชนิดให้ติดกัน ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบัน ลักษณะของกระบวนการเสียดทานแบบกวน เริ่มจากตัวกวนสอดเข้าไปบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองแผ่น เมื่อความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับวัสดุ ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหลและเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้ป้าของเครื่องมือเชื่อม เมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่วัสดุในสภาวะของไหลจะถูกถ่ายเทมาอยู่ด้านหลังของตัวกวน จากนั้นตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ ป้าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมจะกดอัดและผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นแนวเชื่อมขึ้น (ณัฐ และ คณะ, 2551)

ในการศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทาน

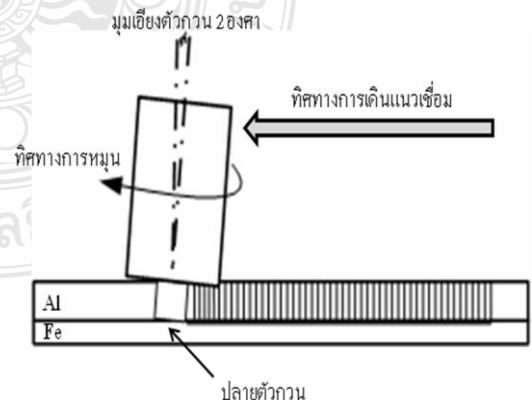


(ก) การต่อแยกของชิ้นงานเชื่อม

แบบกวนที่ผ่านๆ มา มีการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างของการต่อชนระหว่างอลูมิเนียม 6063 T1 และ เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ด้วยตัวกวนที่มีรูปร่างต่างๆ (กิตติพงษ์ และ คณะ, 2551) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติทางกลของรอยต่อแยกระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด A 5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS 400 โดยตัวแปรคือความเร็วของตัวกวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และความลึกของตัวกวนที่สอดเข้าไปในเนื้อโลหะเท่านั้น (กิตติพงษ์ และ อนินต์, 2550) ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการประยุกต์ใช้การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน โดยมีจุดประสงค์ในการเชื่อมรอยต่อแยกระหว่างอลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ด้วยตัวกวนที่มีรูปร่างต่างๆ แล้วเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อแยก โดยคาดว่า การรวมตัวกันระหว่างวัสดุจะสามารถทำได้ดีขึ้นและค่าความแข็งแรงของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นได้ (กิตติพงษ์ และ คณะ, 2551)

2. วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมเกรด 6063 หนา 3 มม. และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หนา 2 มม. วัสดุทั้งสองมีขนาดความกว้าง 90 มม. และยาว 150 มม. ทำการต่อแยกกันที่ระยะ 30 มม. โดยเหล็กอยู่ด้านล่างและอลูมิเนียมอยู่ด้านบน แสดงดังรูปที่ 1 (ก) ใช้เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 ทำเป็นตัวกวนในการเชื่อมวัสดุ



(ข) มุมเอียงของตัวกวนและทิศทางในการเดินแนวเชื่อม

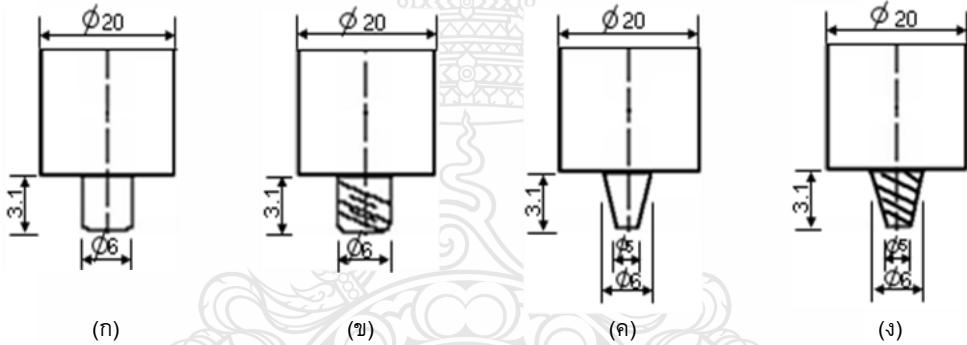
รูปที่ 1 ลักษณะของชิ้นงานเชื่อม

สอบ ตัวกวนที่ได้ทำการออกแบบมานั้นต้องทำการชุบแข็งมาเรียบร้อยแล้วซึ่งมีลักษณะรูปร่างและขนาด (หน่วย: มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 2

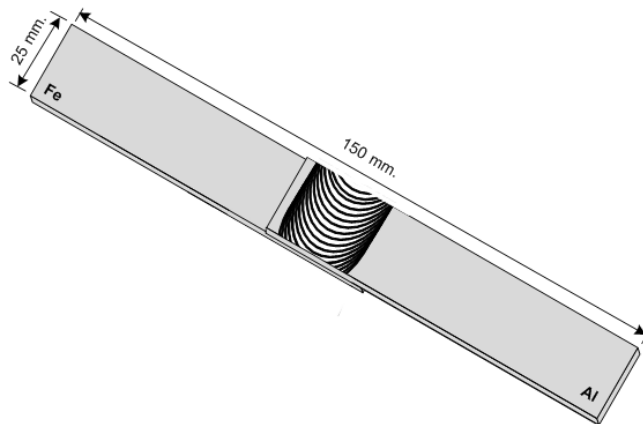
ก่อนทำการต่อเกยวัสดุทั้งสองถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 240 และ 500 ตามลำดับ โดยขัดที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสของวัสดุทั้งสองเพื่อกำจัดออกไซด์บนผิวหน้าของเหล็กและอลูมิเนียม แล้วทำความสะอาดด้วยยาซีโตนอีกครั้ง การเชื่อมใช้ความเร็วรอบ 125-750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-175 mm./min ความลึกของการกดตัวกวนลงในเหล็กกล้า 0.2 mm. จากผิวหน้าของเหล็ก มุมเอียงของตัวกวนเมื่อเทียบกับแกนหมุนของเครื่องกัด 2 องศา แสดงดังรูปที่ 1(ข) ชิ้นงานที่เชื่อมแล้วจะนำไปเตรียมเพื่อนำไปทดสอบแรงดึงเฉือนและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยกำหนดให้มีขนาดชิ้นงานทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

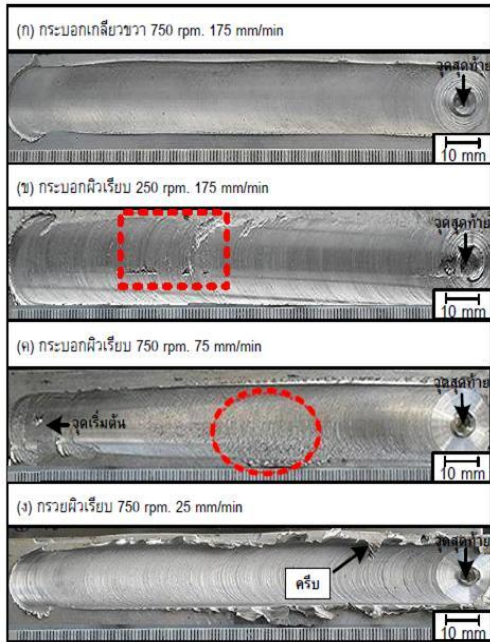
ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนรูปทรงต่างๆ พบว่าผิวหน้าของแนวเชื่อมมีลักษณะที่เหมือนกันบนทุกๆ ชิ้นงานเชื่อม ซึ่งส่วนมากจะมีความสมบูรณ์ในแนวเชื่อมและมีจุดบกพร่องเป็นส่วนน้อย แสดงดังรูปที่ 4 ชิ้นงานทุกชิ้นเกิดจุดบกพร่องเป็นรูเล็กๆ วงกลมตามลักษณะของตัวกวนที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม รูปที่ 4 (ก) มีแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ที่สุดตั้งแต่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายของแนวเชื่อม ไม่เกิดครีบริหว่างขอบ ซึ่งแตกต่างจากรูปอื่นที่เกิดจุดบกพร่องระหว่างแนวเชื่อม แสดงด้วยกรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 4 (ข) เกิดหลุมตื้นๆ ตรงกลางและขอบของแนวเชื่อม เกิดความไม่ละเอียดของผิวหน้าแนวเชื่อมซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เกิดขึ้นกลางแนวเชื่อมแสดงด้วยวงรีในรูปที่ 4 (ค) อีกทั้งยังเกิดครีบริหว่างขอบในปริมาณที่มากทั้ง



รูปที่ 2 รูปร่างตัวกวน : (ก) ทรงกระบอกผิวเรียบ, (ข) ทรงกระบอกเกลี่ยขวาว, (ค) ทรงกรวยผิวเรียบ และ (ง) ทรงกรวยเกลี่ยขวาว



รูปที่ 3 ลักษณะชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงเฉือน



รูปที่ 4 ผิวหน้าของแนวเชื่อมในลักษณะต่างๆ

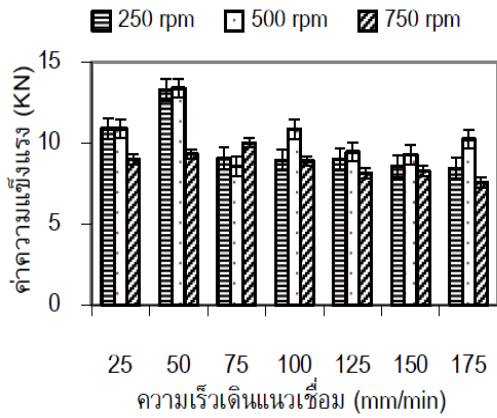
สองข้างตลอดแนวเชื่อมซึ่งเกิดจากตัวกวนต้นพอลูมิเนียมขึ้นหน้าข้างบน ดังรูปที่ 4 (ง) ลักษณะของแนวเชื่อมค่อนข้างหยาบเมื่อเทียบกับความเร็วเดินที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งผิวหน้าแนวเชื่อมเกิดความเรียบและละเอียดมากกว่าผิวหน้าแนวเชื่อมตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาและตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบที่ความเร็วรอบ 750 rpm. เท่ากัน แตกต่างกันที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงสุดผิวหน้าแนวเชื่อมมีความละเอียดและไม่เกิดครีบและที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำสุดผิวหน้าแนวเชื่อมมีความหยาบและเกิดครีบในปริมาณมากตลอดแนวเชื่อม

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉือนที่ความเร็วรอบตัวกวน 250-750 rpm. และความเร็วเดินแนวเชื่อม 25-175 mm/min พบว่าค่าความแข็งแรงเฉือนที่ได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความสมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อมและแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 mm/min ความเร็วรอบ 500 rpm. มีค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเกยมากที่สุดเท่ากับ 13.4 KN และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 75-175 mm/min ความแข็งแรงมีค่าสูงต่ำสลับกัน แสดงดังรูปที่ 5 (ก) เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 5 (ข) ความเร็วรอบตัวกวน 750 rpm. มีค่าความแข็งแรงดึงสูงในความเร็วเดินที่เพิ่มมากขึ้นด้วยตั้งแต่ 75-150 mm/min ซึ่งมีค่าสูงสุดคือ

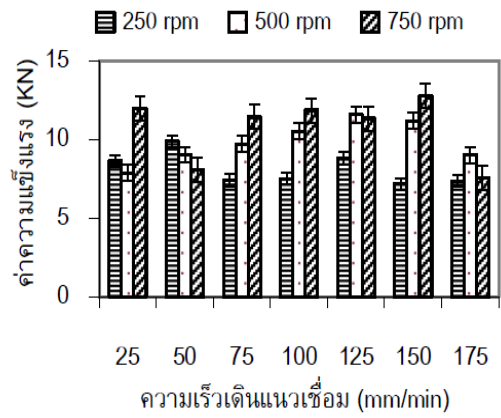
12.784 KN ที่ความเร็วรอบ 250-750 rpm. ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 5 (ค) ซึ่งสังเกตจากความเร็วเดินแนวเชื่อมตั้งแต่ 25-150 mm/min พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อค่าความเร็วรอบตัวกวนเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเร็วรอบ 500 rpm. ความเร็วเดิน 50 mm/min มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 11.578 KN ส่วนตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา ดังรูปที่ 5 (ง) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับตัวกวนรูปทรงอื่น แนวโน้มค่าความแข็งแรงที่ความเร็วรอบ 500 rpm. มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความเร็วเดินเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 100-175 mm/min แต่ที่ความเร็วเดิน 50 mm/min ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุดคือ 13.5 KN

การตรวจสอบภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงเฉือนของตัวกวนรูปทรงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัวกวนและความเร็วเดินแนวเชื่อมตั้งที่อธิบายไว้ข้างต้น ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบที่ความเร็วรอบ 500 rpm. ความเร็วเดิน 50 mm/min ดังรูปที่ 6 (ก) พบอลูมิเนียมติดอยู่ที่ผิวของเหล็กของแนวเชื่อมแสดงด้วยลูกศรในวงรี เกิดการฉีกขาดค่อนข้างสมบูรณ์เมื่อเทียบกับรูปที่ 6 (ข) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวาความเร็วรอบ 250 rpm. ความเร็วเดิน 50 mm/min มีอลูมิเนียมติดบนเหล็กในแนวเชื่อมน้อยมากแตกต่างจากรูปที่ 6 (ค) และ (ง) ตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบที่ความเร็วรอบ 250 rpm. ความเร็วเดิน 25 mm/min และตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวาความเร็วรอบ 500 rpm. ความเร็วเดิน 75 mm/min พบว่ามีอลูมิเนียมติดที่ผิวเหล็กบนแนวเชื่อมในปริมาณที่มากและมีแนวการฉีกขาดมีขนาดที่กว้าง แสดงด้วยลูกศรในวงรี ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงตั้งที่อธิบายไว้ข้างต้น

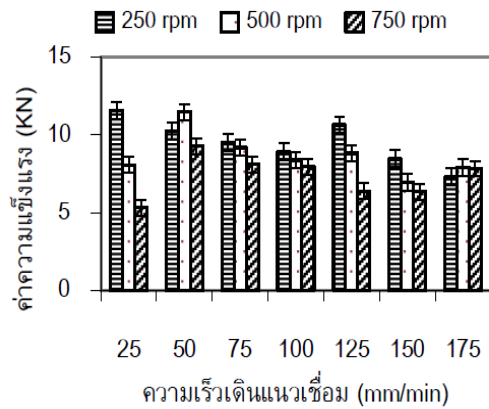
ลักษณะแนวการฉีกขาดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนมีความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ค่าต่างๆ ของตัวกวนรูปทรงที่ไม่เหมือนกันแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงและรอยฉีกขาดภาคตัดขวางที่อธิบายไว้แล้ว จากรูปที่ 7 (ก) พบว่าเกิดแนวการฉีกขาดที่กว้างและมีอลูมิเนียมติดที่ผิวหน้าบนเหล็กของแนวเชื่อมตลอดทั้งแนวในปริมาณที่มากเมื่อเทียบกับรูปที่ 7 (ข) แนวเชื่อมบนเหล็กมีอลูมิเนียมติดน้อยและบางมากแนวการฉีกขาดมีขนาดเล็กกว่าผิวหน้าพังทลายของรอยเชื่อมที่ตัวกวนอื่นๆ รูปที่ 7 (ค) มีอลูมิเนียมติดในปริมาณที่มาก โดยเฉพาะที่บริเวณขอบของแนวเชื่อมและมีขนาดแนวการฉีกขาดที่ไม่กว้างมากนักซึ่งมีความแตกต่างจากรูปที่ 7 (ง)



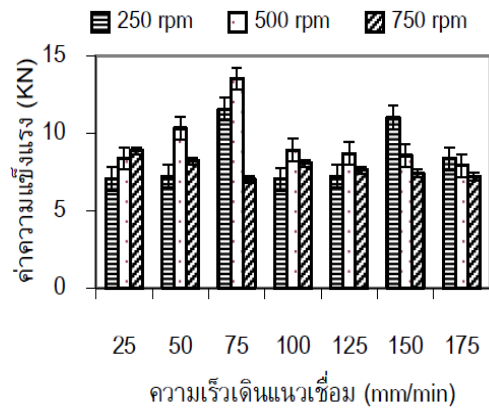
(ก) ครอบอกผิวเรียบ 500 rpm. 50 mm/min



(ข) ครอบอกเกลี่ยขวา 250 rpm. 50 mm/min

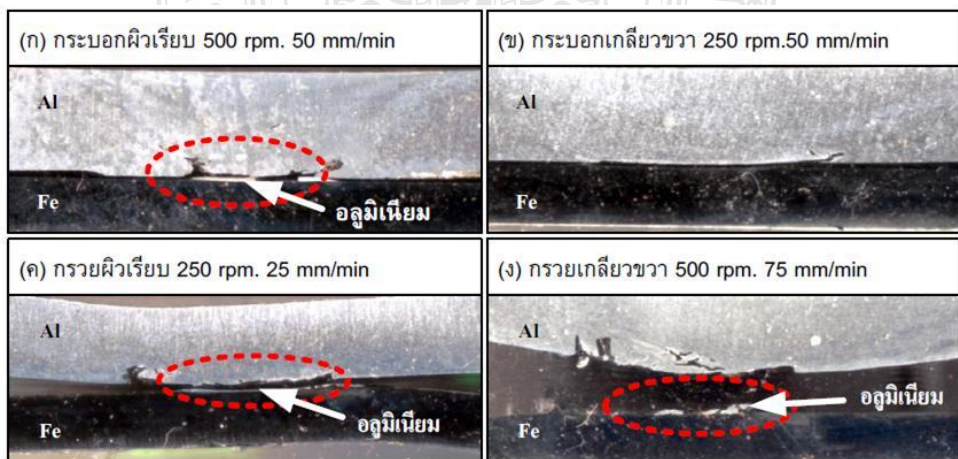


(ค) กรวยผิวเรียบ 250 rpm. 25 mm/min



(ง) กรวยเกลี่ยขวา 500 rpm. 75 mm/min

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของตัวกวน



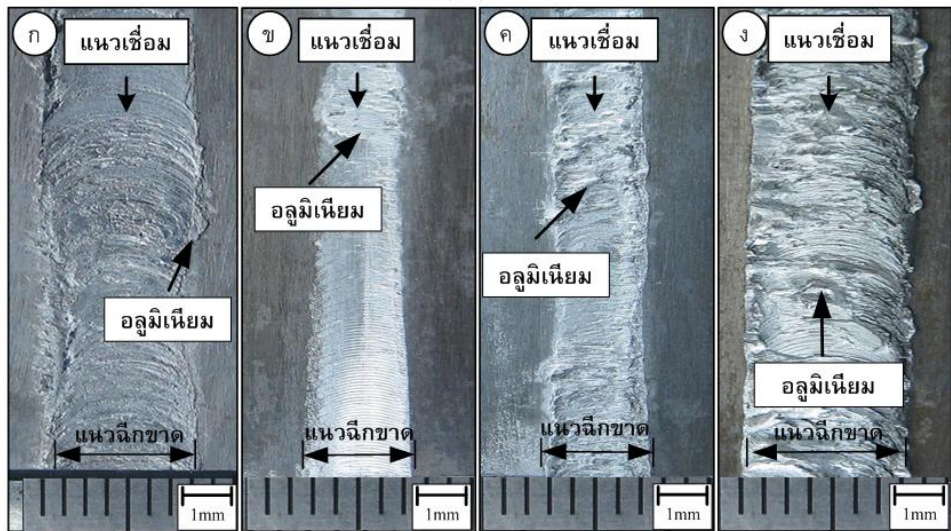
รูปที่ 6 รอยฉีกขาดภาคตัดขวางแนวเชื่อมตัวกวนรูปทรงต่างๆ

ที่มีปริมาณอลูมิเนียมติดที่ผิวหน้าของเหล็กบนแนวเชื่อมในปริมาณที่มากตลอดแนวเชื่อมและการฉีกขาดมีขนาดที่กว้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับรอยฉีกขาดบนผิวเหล็กในแนวเชื่อมที่ตัวกวนต่างๆ มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่มากและรอยฉีกขาดภาคตัดขวางที่มีอลูมิเนียมเกาะติดที่ผิวเหล็กบนแนวเชื่อมในปริมาณที่มาก

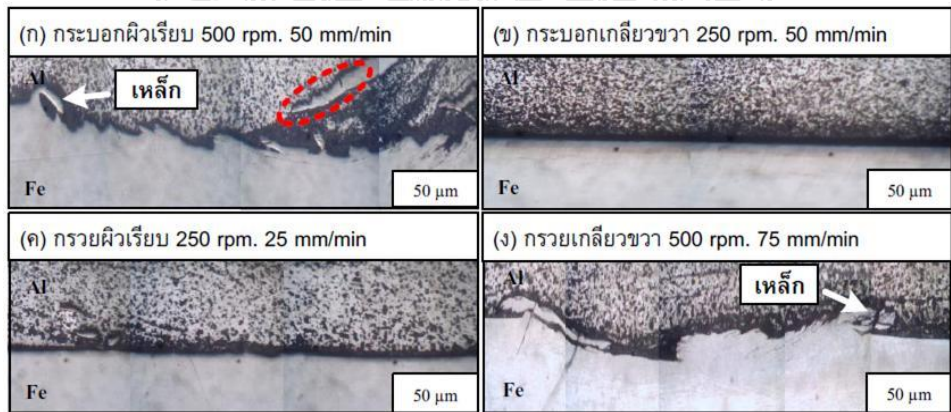
รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมซึ่งให้ให้เห็นว่ามีการเกิดอินเทอร์เฟสบนรอยต่อของอลูมิเนียมและเหล็กในลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 8 (ก) และ (ง) ตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm. ความเร็วเดิน 50 mm/min และ ตัวกวนทรงกรวย

เกลียวขวาที่ความเร็วรอบ 500 rpm. ความเร็วเดิน 75 mm/min ตามลำดับ พบว่าอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแทรกตัวของเนื้อเหล็กเข้าสู่เนื้ออลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัดแสดงด้วยลูกศร นั้นแสดงว่าเหล็กถูกดันขึ้นสู่ออลูมิเนียมและเกิดการกอดตัวของปาดตัวกวนจึงทำให้อลูมิเนียมแทรกเข้าไปอยู่ในส่วนของเหล็กที่ถูกกุด้วยปลายตัวกวน จึงสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่ามาก เกิดโพรงภายในแนวเชื่อมที่เนื้ออลูมิเนียมแสดงถึงจุดบกพร่องที่เกิดในแนวเชื่อมดังรูปวงรี ซึ่งเกิดจากการแทนที่ของอลูมิเนียมขณะไหลตัวไม่เพียงพอ

รูปที่ 8 (ข) และ (ค) ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา



รูปที่ 7 ผิวการพังทลายของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก

ที่ความเร็วรอบ 250 rpm.ความเร็วเดิน 50 mm/min และตัว
กวนทรงกรวยผิวเรียบ ที่ความเร็วรอบ 250 rpm.ความเร็ว
เดิน 25 mm/min ตามลำดับ พบว่าพื้นที่อินเทอร์เฟซ
ระหว่างรอยต่อมีความเรียบเมื่อเทียบกับรูปที่ 8 (ก) และ (ง)
ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด บ่งบอกถึงค่าความ
แข็งแรงเฉือนที่มีค่าน้อย เนื่องจากไม่มีส่วนของเหล็กที่เข้า
ไปแทรกตัวเกาะอยู่ในเนื้ออลูมิเนียมซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิด
ความแข็งแรงภายในรอยเชื่อมต่อของอลูมิเนียมและ
เหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วรอบตัวกวนและความเร็ว
เดินแนวเชื่อมที่เหมาะสมด้วย ลักษณะของอินเทอร์เฟซ
ภายในรอยเชื่อมไม่สามารถศึกษาได้ละเอียดที่มากกว่านี้
จากกล้องจุลทรรศน์ได้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาด้วย
เครื่องมือขั้นสูงต่อไปในอนาคต

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปเปลี่ยนรูปร่างตัวกวน
ความเร็วรอบ และความเร็วเดินของตัวกวนในแนวเชื่อม
เสียดทานแบบกวน ที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของ
รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม AA 6063 กับเหล็กกล้าไร้
สนิม AISI 430 โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ตัวกวนรูปทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงจากการ
ทดสอบแรงดึงสูงสุด คือ 13.4 kN ที่ความเร็วรอบ 500
รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 50 มม./นาที
2. ตัวกวนรูปทรงกระบอกเป็นเกลียวทิศทางการหมุน
ตามเข็มนาฬิกามีค่าความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึง
สูงสุด คือ 9.88 kN ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที
ความเร็วเดินที่ 50 มม./นาที
3. ตัวกวนรูปทรงกรวยมีค่าความแข็งแรงจากการ
ทดสอบแรงดึงสูงสุด คือ 11.578 kN ที่ความเร็วรอบ 250
รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 25 มม./นาที
4. ตัวกวนรูปทรงกรวยเป็นเกลียวทิศทางการหมุน
ตามเข็มนาฬิกามีค่าความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึง
สูงสุด คือ 13.5 kN ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที
ความเร็วเดินที่ 75 มม./นาที

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, อนินต์ มีมนต์, และ ประกอบ บุญยงค์.
2549. "การเชื่อมฟริกชันสเตอร์รอยต่อชนอลูมิเนียม
และเหล็กกล้า" วารสารเทพสตรีวิจัย ครั้งที่ 1.,
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี. หน้า1-5.
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, บุญสง จงกลนี้, และ สมควร แวดดี.
2551. "อิทธิพลรูปร่างตัวกวนต่อความต้านทาน
แรงดึงของรอยต่ออลูมิเนียม6063-T1 และเหล็กกล้า
AISI1015" รายงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรม
ศาสตร์ ครั้งที่ 6., มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
หน้า 555-560.
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ อนินต์ มีมนต์. 2550. "อิทธิพล
การเชื่อมฟริกชันสเตอร์ต่อสมบัติรอยต่อของ
อลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า" วารสารวิศวกรรม
ศาสตร์ราชชมงคลธัญบุรี ปีที่ 4., มหาวิทยาลัยราช
ชมงคลธัญบุรี. หน้า 54-61
ณัฐ แก้วสกุล, เรวัณน์ ช่อมสุข, และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์.
2551. "อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทาน
แบบกวนต่อสมบัติทางกลของรอยต่ออลูมิเนียม 6063
และเหล็กกล้าไร้สนิม430" รายงานประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6., มหาวิทยาลัยสง
ขลานครินทร์. หน้า567-572.
Sun, Z. and Karppi, R. 1996. **The Application of Elec
tron Beam Welding for the Joining of Dissi.
Metals: An Overview.** J. of Mater. Proc Tech
59.pp. 257-267
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 App. No9125978.8.

ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นายสมชาย วนไทยสงค์
วัน เดือน ปีเกิด	30 กรกฎาคม 2529
ที่อยู่	303 หมู่ 12 ถ. ชัยภูมิ-สีคิ้ว บ้านกอก ต.บ้านกอก อ.จักร์สุ จ.ชัยภูมิ 36130
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ.2552
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2553 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	

สมชาย วนไทยสงค์ และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, การเปรียบเทียบสมบัติรอยต่อเกลระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนหลายรูปแบบ. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2553 (IE Network Conference 2010), มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ระหว่างวันที่ 13 - 15 ตุลาคม 2553, ณ โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี.