

**อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดต่อสมบัติทางกล
บนรอยต่อเกยเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และทองแดง C 11000**

**FRICTION STIR SPOT WELDING PARAMETERS AFFECTING
MECHANICAL PROPERTIES OF LAP JOINT BETWEEN
AISI 1015 CARBON STEEL AND C11000 COPPER ALLOY**

วรพงศ์ สว่างศรี

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

**อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดต่อสมบัติทางกล
บนรอยต่อเกยเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และทองแดง C 11000**

วรพงศ์ สว่างศรี

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดต่อสมบัติทางกล
บนรอยต่อเกย เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และทองแดงผสม C11000
Friction Stir Spot Welding Parameters affecting Mechanical Properties
of lap Joint between AISI 1015 Carbon Steel and C11000 copper alloy

ชื่อ - นามสกุล

นายวรพงศ์ สว่างศรี

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต


อาจารย์ที่ปรึกษา

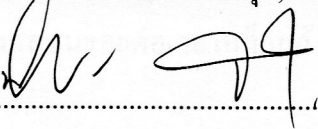
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

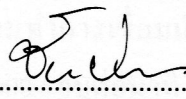
ปีการศึกษา

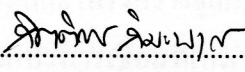
2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต๋อสกุล, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทรัมย์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดต่อสมบัติทางกลบนรอยต่อเกลเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และทองแดงผสม C 11000
ชื่อ - นามสกุล	นายวรพงศ์ สว่างศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดเป็นหนึ่งในวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อโลหะต่างชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้วิธีการเชื่อมนี้กับรอยต่อระหว่างทองแดงและเหล็กมีข้อจำกัด ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติทางกลบนรอยต่อเกลเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 และทองแดงผสม C 11000

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 และทองแดงผสม C 11000 หนา 1.0 มิลลิเมตร รอยต่อเกลถูกทำการเชื่อมทำการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดด้วยตัวแปรที่ประกอบด้วยความเร็วรอบการหมุน 2500 – 4000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 2-8 วินาที และอัตราป้อนตัวกวน 2-8 มิลลิเมตรต่อนาที รอยต่อเกลที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่ถูกกำหนดนำมาทำการศึกษาเพื่อหาความแข็งแรง ความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกล

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมแสดงค่าแรงดึงสูงสุด 4715 คือ ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัวกวน 6 มิลลิเมตรต่อนาที และเวลากดแช่ 4 วินาทีการเพิ่มอัตราป้อนและเวลากดแช่ส่งผลทำให้ความสูงของบ่าเชื่อมบริเวณใต้บ่าตัวกวนลดลงและลดความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกลการเพิ่มขึ้นของปริมาณของทองแดงที่ผิวสัมผัสของรอยต่อเกลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การเชื่อมแรงเสียดทานแบบจุด รอยต่อเกล ความแข็งแรงดึงเฉือน

Thesis Title	Friction Stir Spot Welding Parameters affecting Mechanical Properties of lap Joint between AISI 1015 Carbon Steel and C11000 copper alloy
Name – Surname	Mr. Worapong Sawangsri
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

Friction stir spot welding is one of the welding techniques which has been efficiently implemented in metal welding. However, applying this technique for joining metal and copper has some limitations. From this reason this research aimed to study the effects of welding parameters of the friction stir spot welding on the mechanical properties of AISI 1015, the low carbon steel, and C11000, the copper alloys.

The materials used in the experiment were the AISI 1015 carbon steel sheet metal and the C11000 copper alloys with 1.0 mm thickness. The parameters of the lap joint welded by the Friction Stir Spot welding were the rotating speed of 2,500-4,000 rpm with 2-8 second holding time, and 2-8 mm/second feed rate. The lap joint obtained from the welding was utilized as the study parameter for investigating its hardness, strength, and microstructure.

The experimental results concluded that the optimum welding parameter providing the highest strength (4715) was the rotating speed of 3,500 rpm with 6 mm/second feed rate, and 4 second holding time. The increasing of the feed rate and holding time of pin insert resulted in the decreasing of the height of the welding edge under the pin insert, and the strength of the lap joint. Additionally, the increasing of the amount of copper alloys at the contact interface of the overlap edge increased the shear strength of the lap joint.

Keywords: friction stir spot welding, lap joint, tensile shear strength

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ประณีตพลกรัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล คณะกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณวิทยาลัยเทคนิคชัยนาท และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษา และทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้ และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรพงศ์ สว่างศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	14
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 วัสดุ.....	16
2.2 การเชื่อม(Welding).....	21
2.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	24
2.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค.....	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 การเลือกวัสดุและอุปกรณ์การเชื่อม.....	34
3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง.....	38
3.3 การทดสอบรอยเชื่อม.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	47
4.1 ผลกระทบของเวลาทดแซ้ในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล.....	47
4.2 ผลกระทบของอัตราป้อนในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล	52
4.3 ผลกระทบของความเร็วรอบในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล	57
4.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบการพังทลายของรอยต่อเกย	62
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน	73
ภาคผนวก ข ลักษณะรูปแบบการพังทลาย.....	82
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	105
ประวัติผู้เขียน	119

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐานASTM.....	17
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของทองแดงและทองแดงผสมตามมาตรฐานASTM.....	19
ตารางที่ 2.3 ขนาดชิ้นงานทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน	26
ตารางที่ 2.4 น้ำยาคัดผิวชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานASTM E407-99.....	30
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของทองแดงเกรด C 11000(Wt%)	35
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI1015(Wt%)	35

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด	22
รูปที่ 2.2 กลไกการรวมตัวของรอยต่อในขณะที่วัสดุเกิดการอ่อนตัว	22
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างและส่วนต่างๆของตัวกวน	23
รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงเฉือนเดียวของรอยต่อเกย	25
รูปที่ 2.5 ชิ้นงานทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน	26
รูปที่ 2.6 การทดสอบแรงดึงเนื้อตรงหรือแบบสวนทาง	27
รูปที่ 2.7 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งVickers	28
รูปที่ 2.8 การเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค	31
รูปที่ 2.8 การขัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทราย	31
รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	34
รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบต่อเกย	36
รูปที่ 3.3 ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือเชื่อม	36
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	37
รูปที่ 3.5 เครื่องกัดประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด	38
รูปที่ 3.6 การปรับสภาพผิวของชิ้นงาน โดยการใช้กระดาษทรายขัด	40
รูปที่ 3.7 การเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างทองแดงC11000และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำAISI1015	41
รูปที่ 3.8 ทิศทางการดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรดAISI1015และทองแดงC11000	41
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Testing Machine)	42
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์	43
รูปที่ 3.11 จุดการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมด้วยเครื่องVickers Micro harness Test	43

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 เครื่องตัดไมโครไฟเบอร์	44
รูปที่ 3.13 ตัวเรือน(Mounting)	44
รูปที่ 3.14 เครื่องขัดจานหมุน	45
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	46
รูปที่ 4.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมและ โครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตรา ป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแช่ 2-8 วินาที	48
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของบ่าเชื่อมกับความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแช่ 2-8 วินาที	49
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงเดือนกับความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที อัตรา ป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแช่ 2-8 วินาที	50
รูปที่ 4.4 ลักษณะการพังทลายรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแช่ 2-8 วินาที	51
รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งบริเวณรอยต่อเชื่อมได้บ่ากวน ระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ AISI 1015 ความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลา ทดแช่ 2-8 วินาที	52
รูปที่ 4.6 ผิวหน้ารอยเชื่อมและ โครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที เวลา ทดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตรต่อ/นาที	53
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของบ่าเชื่อมกับด้วยความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที เวลา ทดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตรต่อ/นาที	54
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงเดือนกับความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาทดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตรต่อ/นาที	55
รูปที่ 4.9 ลักษณะการพังทลายรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาทดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตรต่อ/นาที	56
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งบริเวณรอยต่อเชื่อมได้บ่ากวน ระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ AISI 1015 ด้วยความเร็วยรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาทดแช่ 4 วินาที และอัตรา ป้อน 2-8 มิลลิเมตรต่อ/นาที	57

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 ผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยเวลาทดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที	58
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของบ่าเชื่อมกับด้วยเวลาทดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที	59
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงเทียบกับเวลาทดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที	60
รูปที่ 4.14 ลักษณะการพังทลายรอยต่อเกณฑ์ที่เชื่อมด้วยเวลาทดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที	61
รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งบริเวณรอยต่อเชื่อมได้บ่ากวน ระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ AISI 1015 ด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาทดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที	62
รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงเหนือนต่ำ อัตราป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที เวลาทดแช่ 2 วินาที และความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที	63
รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงเหนือนสูง อัตราป้อน 6 . มิลลิเมตร/นาที เวลาทดแช่ 4 วินาที และความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที	64
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุด้วย EDS-Line scan รอยต่อเชื่อมของความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที และ 3500 รอบ/นาที	65
รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุ(Element %) ด้วยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ EDS-Line scan ด้วยความเร็วรอบ 2500 และ 3500 รอบ/นาที	66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

FSSW	การเชื่อมเสียดทานกวนจุด (Friction Stir Spot Welding)
RSW	การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding)
SSW	การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
TMAZ	บริเวณกระทบร้อน
kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
mm	มิลลิเมตร
mm/min	ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed)
rpm	ความเร็วรอบ (Rotations Speed) รอบ/นาที
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รอยต่อของวัสดุที่แตกต่างกันนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านเทคนิคและประโยชน์จากสมบัติเฉพาะของวัสดุเหล่านั้น [1] แต่ในวัสดุโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและทองแดง มีความยากลำบากในการต่อยึดเข้าด้วยกันด้วยวิธีปกติโดยทั่วไป เช่น การเชื่อมแก๊ส, การเชื่อมอาร์ก, การเชื่อมความต้านทานแบบจุด, และการบัดกรี เพราะทองแดง มีความสามารถในการแพร่กระจายความร้อนได้สูงกว่าโลหะอื่น นอกจากนี้ยังเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิหลอมละลาย ส่งผลทำให้ความร้อนทำให้เกิดรอยแตกร้าวในรอยต่อสมบัติทางกลลดลงได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนากระบวนการเชื่อมรูปแบบอื่นๆ ในการเชื่อมรอยต่อโลหะต่างชนิดและพบว่า การเชื่อมโลหะในสถานะของแข็งที่ไม่มีหลอมละลายที่เรียกว่าการเชื่อมเสียดทานกวน (Friction Stir Welding, FSW) สามารถสร้างรอยต่อโลหะต่างชนิดได้ ในปัจจุบันเทคนิค FSW ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วและสามารถเชื่อมต่อยึดโลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง, อลูมิเนียม, ไทเทเนียม, เหล็ก เป็นต้น [2-4] ถึงแม้ว่าเทคนิค FSW สามารถประยุกต์ในการเชื่อมรอยต่อโลหะต่างชนิดได้ แต่เทคนิคมีข้อจำกัดในงานเชื่อมรอยต่อต่างชนิดที่รอยต่อประกอบด้วยโลหะแผ่นบาง ด้วยเหตุนี้เทคนิค FSW จึงได้ถูกพัฒนาวิธีการเชื่อมเพื่อสามารถเชื่อมโลหะแผ่นบางได้ กระบวนการดังกล่าวจึงถูกเรียกชื่อใหม่อีกครั้งว่า การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction stir spot welding, FSSW) กระบวนการเชื่อม FSSW นี้ เครื่องมือเชื่อมทรงกระบอกที่หมุนด้วยความเร็วถูกกดลงไปบนรอยต่อเกิดความร้อนจากแรงเสียดทานทำให้เกิดการรวมตัวเป็นรอยต่อขึ้นได้

ที่ผ่านมา มีการรายงานผลการทดลองการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุดในการเชื่อมวัสดุต่างๆ มากมาย ศึกษาตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อกระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000 ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด 864 นิวตัน คือ ความเร็วรอบ 3,500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มิลลิเมตร/นาที และระยะเวลาในการกดแชนท์ 4 วินาที [5] การเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อกระหว่างอะลูมิเนียมเกรด 6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อ มีค่าใกล้เคียงกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [6] ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างพื้นที่ผิวบ่าเครื่องมือ

และโลหะเชื่อม ส่งผลทำให้ความหนาของลูนีเยียมด้านล่างบ่าเครื่องมือที่ผิวสัมผัสรอยต่อเกิดลดลง และทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกัดลูนีเยียมออกจากผิวสัมผัสซึ่งจะลดการรวมตัวของโลหะเชื่อมการใช้ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยบ่าเครื่องมือเชื่อมแบบแบนเรียบ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที และอัตราการป้อนเครื่องมือ 8 มิลลิเมตร/นาที จะได้รอยต่อที่มีขนาดความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด 2110 นิวตัน และความแข็ง 63 วิคเกอร์สเกล [7]

อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 กับทองแดงผสม C11000 ยังไม่พบว่ามีผลการรายงานผล ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวความคิดในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของรอยต่อของโลหะต่างชนิดดังกล่าว ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบจุดประกอบด้วย ความเร็วรอบของตัวกวน (รอบต่อนาที) อัตราความเร็วในการป้อนกวน (มิลลิเมตรต่อนาที) และการกดแซ่(วินาที) ถูกทำการศึกษาเพื่อหาความแข็งแรงดึงสูงสุด นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและโครงสร้างทางจุลภาคของรอยต่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือน ของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และทองแดงผสม C11000

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยา และความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และทองแดงผสม C11000

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด รอยต่อแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร และแผ่นทองแดง C11000 ขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร

1.3.2 ตัวกวนเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 รูปทรงกระบอกผิวเรียบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 0.7 มิลลิเมตร และบ่าของเครื่องมือเชื่อม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

1.3.3 การเชื่อมรอยต่อโดยกำหนดให้ระยะรอยต่ออยู่ที่ 30 มิลลิเมตร ทองแดงอยู่ด้านบน และเหล็กกล้าคาร์บอน อยู่ด้านล่าง

1.3.4 การศึกษาตัวแปรการเชื่อม

1) ความเร็วรอบของตัวกวนที่ 2500 - 4000 รอบต่อนาที

2) ความเร็วเคลื่อนในการเชื่อมที่ 2 - 8 มิลลิเมตรต่อนาที

3) เวลาในการกดแช่ที่ 2 - 8 วินาที

4) ระยะเวลาขยายปลายหัวกวนในการกด 0.7 มิลลิเมตร

5) ความลึกในการกดตัวกวนที่ 1.0 มิลลิเมตร

1.3.5 การทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดึง
เฉือนและทดสอบความแข็งของบริเวณรอยเชื่อม

1.3.6 การศึกษาโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่บริเวณรอยเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าตัวแปรการเชื่อมกวนเสียดทานแบบจุดที่ทำให้เกิดความ
แข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และทองแดง C11000

1.4.2 สามารถนำไปใช้เป็นเอกสารที่เป็นองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมความ
เสียดทานแบบจุด เพื่อใช้ในการวิจัยต่อไป

1.4.3 เพื่อเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการพัฒนาการเชื่อม
ในแบบสถานะของแข็ง (Solid-State Welding) ต่อไปในอนาคต

1.4.4 เป็นทางเลือกในการเชื่อมรอยต่อของวัสดุต่างชนิด เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน
อุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุ

2.1.1 เหล็กกล้า (Steel) [8]

หมายถึง โลหะผสมระหว่างธาตุเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะหลักและคาร์บอนเป็นธาตุผสม ปริมาณของธาตุคาร์บอนที่เติมลงไป โลหะผสมเป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของเหล็กกล้า เมื่อพิจารณาปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมในเหล็กกล้าสามารถแบ่งรูปแบบของเหล็กกล้า ออกได้ดังนี้

1) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)

เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.25% นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และเหล็กประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันไม่ต่ำกว่า 90% เนื่องจากขึ้นรูปง่าย เชื่อมง่าย และราคาไม่แพง โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ตัวถังรถยนต์ ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ กระจังรถจักรยาน ลังกะสีมุงหลังคา เครื่องใช้ในครัวเรือน และในสำนักงาน

2) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel)

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.5 - 0.5% มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่มีความเหนียวน้อยกว่า สามารถนำไปชุบแข็งได้ เหมาะกับงานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก ไชควง เป็นต้น

3) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.5 - 1.5% มีความแข็ง ความแข็งแรง และความเค้นแรงดึงสูง เมื่อชุบแข็งแล้วจะเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ทนต่อการสึกหรอ ใช้ในการทำเครื่องมือ สปริงแหนบ ลูกปืน เป็นต้น

แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีอยู่หลายระดับที่มีคุณภาพที่และสามารถใช้ได้ในหลายเกรด โดยทั่วไปเหล็กกล้าคาร์บอนประกอบด้วยคาร์บอนได้ถึงประมาณ 2% และองค์ประกอบอื่น ๆ เพิ่มเข้ามา แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐานอาจจะเหมาะสำหรับการใช้งาน โครงสร้างต่างๆ รายละเอียดตามมาตรฐาน ASTM ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบโลหะแผ่นของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM [8]

Steel designation		Chemical composition limits, %			
UNS	SAE or AISI No.	C	Ma	P(a)	S(a)
G10060	1006	0.08(a)	0.45(a)	0.04	0.05
G10080	1008	0.10(a)	0.50(a)	0.04	0.05
G10090	1009	0.15(a)	0.60(a)	0.04	0.05
G10100	1010	0.08–0.13	0.30–0.60	0.04	0.05
G10120	1012	0.10–0.15	0.30–0.60	0.04	0.05
G10150	1015	0.12–0.18	0.30–0.60	0.04	0.05
G10160	1016	0.12–0.18	0.60–0.90	0.04	0.05
G10170	1017	0.14–0.20	0.30–0.60	0.04	0.05
G10180	1018	0.14–0.20	0.60–0.90.	0.40	0.05
G10190	1019	0.14–0.20	0.70–1.00 0.	0.40	0.05
G10200	1020	0.17–0.23	0.30–0.60 0.	0.40	0.05
G10210	1021	0.17–0.23	0.60–0.90	0.04	0.05
G10220	1022	0.17–0.23	0.70–1.00	0.04	0.05
G10230	1023	0.19–0.25	0.30–0.60	0.04	0.05
G10250	1025	0.22–0.28	0.30–0.60	0.04	0.05
G10260	1026	0.22–0.28	0.60–0.90	0.04	0.05
G10300	1030	0.27–0.34	0.60–0.90	0.04	0.05

2.1.2 ทองแดงและทองแดงผสมอัลลอย (Coppers and Copper Alloys) [9]

เป็นโลหะชนิดแรกที่ถูกค้นพบและนำมาใช้ประโยชน์มาก ทองแดงที่มีสีเหลือง-แดงเป็นวัสดุที่มีความเหนียว (Extremely Ductile) ที่มีโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ฐักในนามลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-Center-Cubic หรือ FCC) มีค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ที่ 97% ดีสุดเป็นอันดับสองรองจากโลหะ เงิน (Silver) มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่สูงมากใกล้เคียง เงิน และทองคำ (Gold) ปัจจุบันมีทองแดงผสมอัลลอยต่างๆ เกือบ 400 ชนิดขึ้นอยู่กับ

กับ ลักษณะการใช้งาน เช่น เป็นเส้น (Rods), แผ่นหนา/บาง/เส้น (Plates/Sheets/Strips), ท่อหนา/บาง (Tubes/Pipes), ชนิดที่ผ่านกระบวนการบีบอัด (Extrusions), แผ่นฟอยล์ (Foil), ชนิดที่ผ่านกระบวนการทุบขณะร้อน (Forgings), แบบเส้นลวด (Wires) และการหล่อ (Casting) จากโรงงานหล่อโลหะต่างๆ

มาตรฐานทองแดงของยุโรปเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาโดย Comité Européen de Normalisation (CEN) โดยระบบนี้ใช้เลขหกหลัก แอลฟา-เชิงตัวเลขในการระบุ ตัวอักษรตัวแรก "C" จะแสดงทองแดงผสม ตัวอักษรตัวที่สองจะแสดงรูปแบบการผลิต เช่น B คือจากแท่งอิงกอท สำหรับการหลอมใหม่เพื่อการหล่อผลิตภัณฑ์, C คือผลิตภัณฑ์จากการหล่อ, F คือวัสดุเติมเต็มสำหรับการประสาน และเชื่อม, M คือ โลหะผสมหลัก, R คือ Refined unwrought copper, S คือ เศษ, W คือ ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป และ X วัสดุไม่ได้มาตรฐาน หมายเลขสามหลักถูกใช้ในการระบุวัสดุ และตัวอักษรตัวสุดท้ายจะแสดงกลุ่มวัสดุของทองแดง และเพื่อขยายระบบจำนวนชื่อที่ระบุ

ในอเมริกาได้ มาตรฐานของทองแดงสำหรับทองแดงผสมจะใช้ของ Unified Numbering System (UNS) ที่ออกโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) และ Society of Automotive Engineers (SAE) ภายใต้ระบบของ UNS ทองแดง และทองแดงผสมจะระบุโดยใช้ตัวเลขห้าหลักที่ขึ้นต้นด้วยตัวอักษร C โดยรหัสห้าหลักนี้จะใช้พื้นฐานของการแทนที่ระบบตัวเลขเดิมที่มีสามหลัก ที่พัฒนาโดย U.S. copper and brass industry

ในระบบ UNS หมายเลขจาก C10000 ถึง C79999 หมายถึงอัลลอยด์ที่ทำขึ้น ในขณะที่อัลลอยด์จากการหล่อจะมีชื่อจาก C80000 ถึง C99999 จากสองประเภทนี้สามารถแบ่งกลุ่มส่วนประกอบของทองแดงผสมได้เป็นหกกลุ่มใหญ่คือ ทองแดง, ทองแดงผสมอัลลอยด์ที่ปริมาณสูง (high-alloy coppers), ทองเหลือง, บรอนซ์, นิกเกิล และนิกเกิลเงิน ส่วนอัลลอยด์ที่ไม่อยู่ในหกกลุ่มนี้ และถูกแบ่งเป็น ทองแดง-สังกะสี อัลลอยด์ ส่วนประกอบที่ทำขึ้น หรืออัลลอยด์พิเศษ และการหล่อส่วนประกอบ

มาตรฐานทองแดงของญี่ปุ่น JIS มีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน ISO การกำหนดชื่อจะเริ่มต้นด้วยตัวอักษร JIS และตามด้วยตัวอักษร C สำหรับทองแดงที่หล่อขึ้น และทองแดงผสม หมายเลขสี่หลักที่ใช้จะขึ้นอยู่กับธาตุผสมที่ใส่เข้าไป ตัวอย่างเช่น JIS C1020 ประกอบด้วย Cu 99.9%, JIS C2720 คือ Cu-Zn (ทองเหลือง), JIS

ทองแดงเป็นโลหะที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ 1) ทองแดงหล่อผสมอัลลอย (Cast Copper Alloys) มีรหัส UNS C80000 ถึง C99999 ปกติจะมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ มากกว่า 1 ธาตุขึ้นไป และ 2) ทองแดงรีดผสม (Wrought Copper Alloys) มีรหัส UNS C10000 ถึง C79999 สามารถผลิตด้วยกรรมวิธีที่หลากหลาย เช่น การอบอ่อน (Annealed), การขึ้นรูปเย็น (Cold

Worked), การชุบแข็งด้วยการอบคืนไฟ (Hardened by Heat Treatments), การคลายความเค้น (Stress Relieved)

การจัดกลุ่มประเภทของทองแดงและทองแดงผสมอัลลอย เกรดทองแดงถูกแบ่งเป็น 6 กลุ่มใหญ่ๆคือ ทองแดงบริสุทธิ์, ทองแดงผสมสูง(High-Copper Alloys) , ทองเหลือง, บรอนซ์, ทองแดง-นิกเกิล อัลลอยด์ และนิกเกิล-เงิน อัลลอยด์

ทองแดงบริสุทธิ์เป็นโลหะที่มีธาตุทองแดงผสมอยู่อย่างน้อย 99.3% หรือมากกว่าที่ใช้ในการค้าเป็นหลัก เพราะมีน้ำหนักเบา และอ่อน อีกทั้งยังมีธาตุอื่นๆผสมอยู่ไม่ถึง 0.7% เกรดของทองแดงบริสุทธิ์ที่ระบุโดย UNS คือ C10100 ถึง C13000 โดยเกรดทองแดงที่เบาๆประกอบด้วยธาตุผสมเพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของทองแดงอย่างใดอย่างหนึ่ง

ทองแดงผสมสูง (High-Copper Alloys) C11000 ปกติทองแดงรีดผสม (Wrought-Copper Alloys) จะมีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่ระหว่าง 99.3 - 96% ในขณะที่ ทองแดงหล่อผสม (Cast-Copper Alloys) มีปริมาณทองแดงผสมอยู่เกิน 94% และผสมธาตุเงินเข้าไป C11000 ทำมาจากทองแดงขี้ลอบ ซึ่งทองแดงได้ผ่านการปรับแต่งให้มีสภาพการนำไฟฟ้า และ C11000 เป็นเกรดทองแดงที่ใช้ในการนำไฟฟ้าโดยทั่วไป เพราะมีสภาพการนำไฟฟ้าสูง มากกว่า 100% IACS และมีปริมาณออกซิเจนเท่ากับ C12500 แต่มีส่วนประกอบซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน โดย C11000 มีความไม่บริสุทธิ์ของโลหะอยู่ทั้งหมด 50 ppm รวมทั้งซัลเฟอร์

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมี ของทองแดงและทองแดงผสม ตามมาตรฐาน ASTM

Alloy number (and name)	Nominal composition, %	Commercial forms	Mechanical properties				Elongation in 50 mm (2in.), % (b)
			Tensile strength		Yield strength		
			MPa	ksi	MPa	ksi	
C10100 (oxygen-free electronic copper)	99.99 Cu	F, R, W, T, P, S	221- 455	32- 66	69- 365	10- 53	55-4

C10200 (oxygen-free copper)	99.95 Cu	F, R, W, T, P, S	221- 455	32- 66	69- 365	10- 53	55-4
C10300 (oxygen-free extralow- phosphorus copper)	99.95 Cu, 0.003 P	F, R, T, P, S	221- 379	32- 55	69- 345	10- 50	50-6
C10400, C10500, C10700 (oxygen-free silver-bearing copper)	99.95 Cu	F, R, W, S	221- 455	32- 66	69- 365	10- 53	55-4
C10800 (oxygen- free lowphosphorus copper)	99.95 Cu, 0.009 P	F, R, T, P	221- 379	32- 55	69- 345	10- 50	50-4
C11000 (electrolytic tough pitch copper)	99.90 Cu, 0.04 O	F, R, W, T, P, S	221- 455	32- 66	69- 365	10- 53	55-4

2.2 การเชื่อม (Welding) [10]

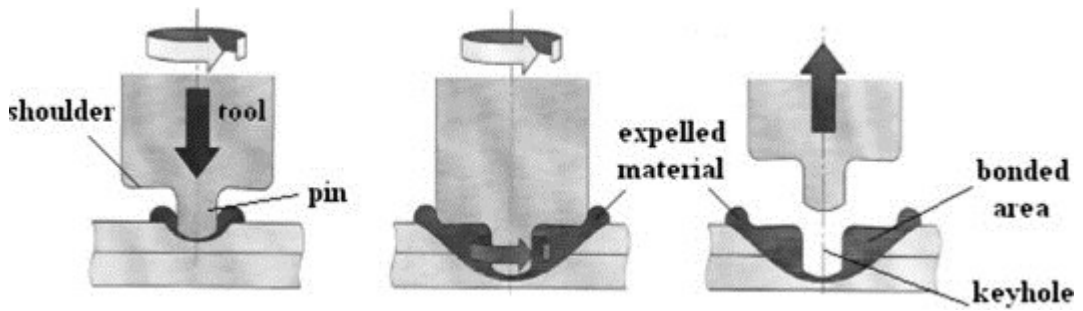
การเชื่อม หมายถึง การต่อวัสดุโดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลาย และการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม การเชื่อมสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1) การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) คือ การประสานโลหะสองชิ้นให้รอยต่อเกิดเป็นแนวเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแนวประสาน โดยใช้ความร้อนและลวดเชื่อมเติมเนื้อประสาน การเชื่อมอาจจะใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานหรืออาจจะไม่ใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานก็ได้ นอกจากนี้ยังจำแนกชนิดการเชื่อมได้ตามลักษณะของพลังงานความร้อนที่นำมาใช้เชื่อมตามลักษณะของมันเป็นที่ปกคลุมบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมขณะโลหะหลอมละลายไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศได้

2) การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) คือ การประสานโลหะสองชนิดให้ติดกัน โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโดยอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เช่น การเชื่อมจุด (Spot welding) การเชื่อมจากเปลวแก๊ส (Gas press welding) การเชื่อมจากสารเคมีพร้อมแรงอัดไม่ใช้ความร้อนเช่นการเชื่อมอัดเย็น (Cold press welding) และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นต้น

2.2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด (Friction Stir Spot Welding FSSW)

กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เป็นกระบวนการเชื่อมวัสดุในสถานะของแข็ง (Solid State) ที่ได้รับการพัฒนาบนหลักการพื้นฐานของการเชื่อมกวนแรงเสียดทาน (Friction Stir Welding: FSW) ซึ่งมีข้อจำกัดในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางที่ไม่สามารถทำได้จึงได้มีการพัฒนาการเชื่อมวัสดุแผ่นบางขึ้นมาด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ซึ่งเป็นการเชื่อมวัสดุโดยอาศัยความร้อนจากการเสียดสี (Frictional Heating) ระหว่างผิวของแกนหมุนกับเนื้อโลหะหรือวัสดุนั้นๆ มีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดหลอมละลาย จึงส่งผลให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก (Plastic deformation) กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด มีกระบวนการเชื่อมพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องมือเชื่อมที่ประกอบไปด้วยตัวกวนที่หมุนถูกกดลงไปบนรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) จนกระทั่งปลายของตัวกวนถูกสอดเข้าไปในระยะที่กำหนดในชิ้นงานที่รอยต่อ เกย ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวเครื่องมือเชื่อมทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนหรือการกวนของเนื้อวัสดุเนื่องจากตัวกวนดังรูปที่ 2.1(ข) ทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุบริเวณจุดเชื่อมที่รอยต่อ ตัวกวนนี้จะถูกสอดแซ่อยู่ตามระยะเวลาหนึ่งที่กำหนด จากนั้นตัวกวนจะถูกยกขึ้น ดังรูปที่ 2.1(ค) และทำให้เกิดรอยเชื่อมเสียดทานขึ้นที่จุดๆหนึ่งบนรอยต่อ [10]



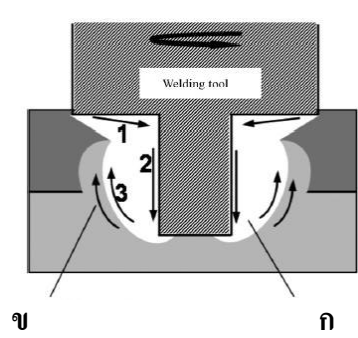
(ก) การกด

(ข) การกวน

(ค) การถอนตัว

รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด (Friction Stir Spot Welding : FSSW) [10]

กลไกการรวมตัวของเนื้อวัสดุบริเวณการกวน (Stir zone) ที่ตัวกวนถูกสอดเข้าไปในระยะที่กำหนดในชิ้นงานที่รอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.2 แล้วทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสี (Frictional heating) ระหว่างผิวของแกนหมุนกับเนื้อโลหะจนเนื้อของโลหะวัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรอยู่ในสภาวะพลาสติก (Plastic deformation) ในขณะที่เกิดการหมุนเครื่องมือเชื่อมวัสดุที่อ่อนตัวบริเวณตัวกวนจะถูกดันให้ไหลวนไปตามขอบของตัวกวน ภาพที่ 2.2(ก) ในขณะเดียวกันบริเวณรอบนอกภายใต้เท้าเครื่องมือเชื่อมวัสดุที่เกิดการอ่อนตัวจะเกิดการไหลวนโดยจะถูกลากไปตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อมรูปที่ 2.2(ข) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของวัสดุบริเวณนั้น ดังนั้นตัวแปรต่าง ๆ ของการเชื่อม จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะนำไปสู่ความแข็งแรงของรอยต่อตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญต่าง ๆ ประกอบไปด้วย

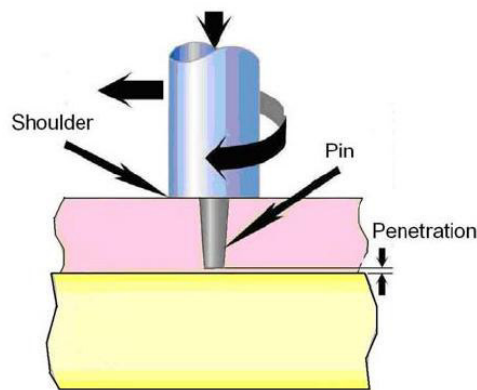


ข

ก

รูปที่ 2.2 กลไกการรวมตัวของรอยต่อในขณะที่วัสดุเกิดการอ่อนตัว [10]

เครื่องมือเชื่อม(ตัวกวน) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่เป็นตัวกลางในการหมุนกวนเสียดสีให้เกิดความร้อนขึ้นระหว่าง ชิ้นงานทั้งสอง ซึ่งเราเรียกว่า เครื่องมือเชื่อมหรือตัวกวน หน้าที่หลักของตัวกวนคือ เป็นผิวสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานโดยทำให้เกิดความร้อน โดยการเสียดสี (Frictional Heating) และเกิดการรวมของวัสดุรอบรอยต่อในแนวเชื่อมเข้าด้วยกัน[18] ดังนั้นเครื่องมือเชื่อมจึงจำเป็นจะต้องทนต่อความร้อนสูงได้โดยไม่เปลี่ยนรูปหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (ตัวกวน) ที่สำคัญจะมี 2 ส่วนคือ



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างและส่วนต่างๆของตัวกวน [11]

บ่าให้ความร้อน (Tool Shoulder) คือส่วนที่ทำให้ความร้อนโดยการหมุนสัมผัสกับผิวชิ้นงานที่จะเชื่อมซึ่งความเร็วและพื้นที่สัมผัสของบ่านั้นจะมีผลโดยตรงต่อการให้ความร้อนนอกจากนี้บ่าของหัวกดเชื่อมยังทำหน้าที่ในการส่งแรงกดสู่เนื้อวัสดุเพื่อให้เกิดการซึมลึกของเนื้อเชื่อม โดยส่วนใหญ่ยังไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดขนาดของบ่าให้ความร้อน แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาขนาดของบ่าให้ความร้อนที่ดีควรอยู่ที่ 3-4 เท่าของความหนาวัสดุที่ทำการเชื่อม

แกนหมุน (Pin) คือส่วนที่ทำหน้าที่หมุนกวนเนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนจนมีสภาพอ่อนตัวเป็นพลาสติกทำให้เกิดการรวมตัวของเนื้อวัสดุโดยมีลักษณะเป็นแกนยื่นออกไปจากบ่าให้ความร้อนขนาดของสลักแกนหมุนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่าค่าความหนาของวัสดุชิ้นงานซึ่งให้ผลด้านความแข็งแรงของสลักแกนหมุนที่ดี เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องเข้าไปอยู่ในเนื้อของชิ้นงาน จากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยในต่างประเทศโดยส่วนใหญ่นิยมให้ระยะห่างระหว่างแผ่นรองหลังกับผิว

ปลายหน้าตัดแกนหมุน (Pin) มีระยะเผื่ออยู่ในช่วง 0.3 - 0.1 มิลลิเมตรและเรียกระยะนี้ว่าระยะ Penetration [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ลักษณะของเครื่องมือเชื่อมจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าโดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลม โดยมีบ่าของเครื่องมือ (Tool Shoulder) เป็นตัวสัมผัสกับผิวชิ้นงานด้านบนทำให้เกิดการเสียดสีของวัตถุ และมีตัวกวน (Pin) ที่เข้าไปอยู่ในเนื้อของชิ้นงานทำให้เกิดการกวนไหลวนของเนื้อวัสดุที่อ่อนตัวในบริเวณแกนกวน (Stir zone) เกิดการรวมตัวกันของเนื้อโลหะทั้งสองทำให้เกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound, IMC) ขึ้นใหม่บริเวณที่แกนกวน (Stir zone) ของโลหะแผ่นทั้งสองจึงเชื่อมติดกันที่บริเวณรอยต่อ[5, 7]

ตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อม FSSW เป็นระบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC Milling) ที่เป็นตัวกำหนดตัวแปรในการเชื่อมได้แก่ ความเร็วรอบ(รอบต่อนาที) ความเร็วเดินป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที) ของเครื่องมือเชื่อมในการสอดตัวกวนลงสู่รอยต่อและระยะเวลาในการกดแช่ (วินาที) ตัวแปรต่างๆเหล่านี้ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณแนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยความเร็วรอบที่แตกต่างกันนั้นทำให้วัสดุรอบๆ ตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนที่แตกต่างกันไปและเกิดความร้อนจากการเสียดทานที่ต่างกัน ในขณะที่เดียวกันความเร็วเดินป้อนของเครื่องมือเชื่อมในการสอดตัวกวนลงสู่รอยต่อก็จะทำให้เกิดแรงกดในการเคลื่อนย้ายเนื้อวัสดุที่หมุนกวนจากด้านล่างของตัวกวนไปสู่ด้านบนในขณะที่ระยะเวลาในการกดแช่ ทำให้แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ที่แตกต่างกันไป ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมนั้นจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างความเร็วรอบกับระยะเวลาในการกดแช่ ในแนวเชื่อมว่าสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใดซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำการเชื่อมด้วย

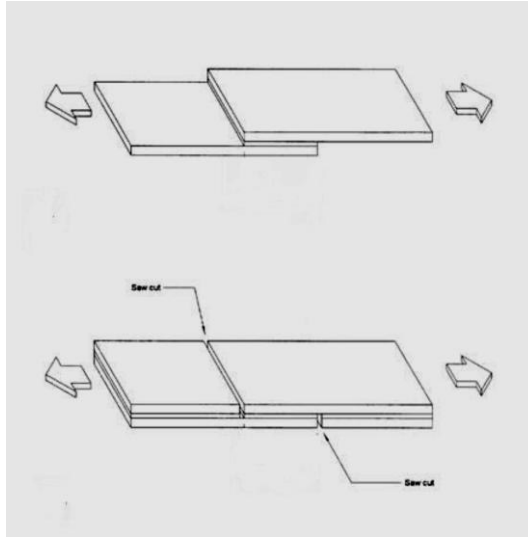
2.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

2.3.1 การทดสอบแรงเฉือน [12]

การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวขนานกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ การเฉือนนี้แตกต่างจากการดึงและการตัดซึ่งใส่แรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน การทดสอบแรงเฉือนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ แรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) และแรงเฉือนจากการบิด (Torsional Shear)

แรงเฉือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการใส่แรงสวนทางกันสองทิศทาง โดยแรงเฉือนตรงสามารถแยกออกได้เป็นสองแบบคือแรงเฉือนเดี่ยว (Single Shear) กับแรงเฉือนคู่ (Double Shear) แรงเฉือนเดี่ยวจะเกิดขึ้นตลอดแนวระนาบเดี่ยว ในขณะที่แรงเฉือนคู่จะเกิดระหว่างสองระนาบ พร้อมกัน ในทางทฤษฎีความแข็งแรงแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวกับแรงเฉือนคู่ควรมีค่าเท่ากัน แต่

เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดจึงทำให้แรงเฉือนทั้งสองอาจไม่เท่ากันเสมอไป ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของรอยต่อเกย [12]

ข้อจำกัดในการใช้การทดสอบแรงเฉือนตรง เนื่องจาก

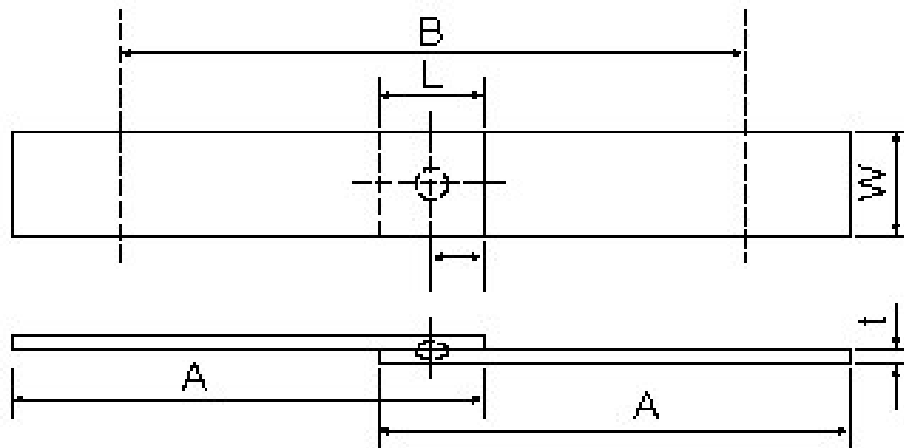
- กำลังรับแรงเฉือนที่ได้เป็นค่าโดยประมาณของกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ
- หน่วยแรงคัด (Bending Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน/ระยะเยื้องศูนย์กลาง
- แรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือทดสอบ
- ระดับความแข็งและความคมของแผ่นเหล็กที่ใช้หนีตัวอย่างทดสอบ
- ไม่สามารถหาสมบัติอื่นๆเช่น Elastic Strength และ Shearing Modulus of Elasticity

ของวัสดุได้ เนื่องจากไม่สามารถวัดหาค่า Shearing Strain

ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบนั้นผ่านกระบวนการตัดเฉือนที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ ความสะอาดของชิ้นงานก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดสอบเช่นกัน ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบนั้น ต้องเก็บรักษาในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อป้องกันค่าคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ร้อนและเย็นเกินไป ชิ้นทดสอบรอยเชื่อมจุดด้วยวิธีการดึงโดยตรง ชิ้นทดสอบ (Specimens) โดยการดึงนั้น จะมีลักษณะภาคตัดขวางหลายแบบคือ อาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดจะยึดตามมาตรฐาน (JIS G 3136) โดยมีสัดส่วนขนาดของชิ้นทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 ขนาดชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน (JIS G 3136)

Nominal thickness (t)	Width (W)	Lap allowance (L)	Test specimen length (A)	Distance between clamps (B)
$0.3 \leq t < 0.8$	20	20	75	70
$0.3 \leq t < 0.8$	30	30	100	90
$0.3 \leq t < 0.8$	40	40	120	110
$0.3 \leq t < 0.8$	50	50	150	110

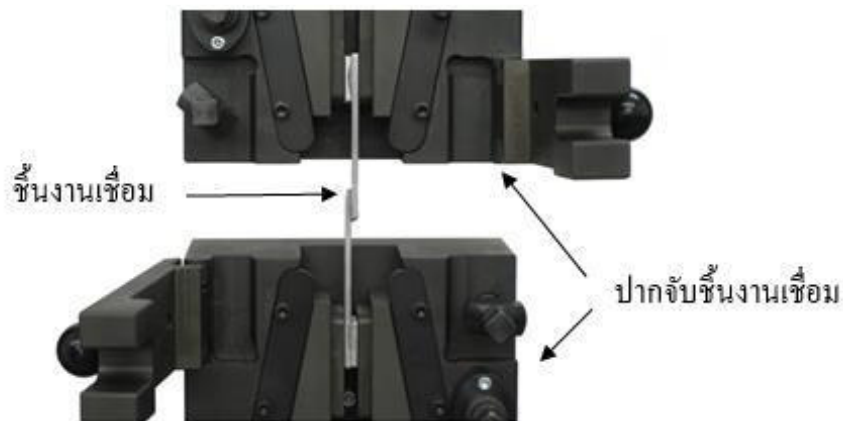


รูปที่ 2.5 ชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน (JIS G 3136)

สำหรับการทดสอบแรงดึงโดยตรง เป็นวิธีการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมจุด โลหะเหล็กและที่ไม่ใช่เหล็กในทุกความหนา ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในหลายๆวิธี โดยการใช้แรงดึงโดยตรงให้ผิวหน้าร่วมของรอยเชื่อมจุด (Interface of Spot Weld) ขาดออกจากกัน [13]

การเนื้อมตรงและการเนื้อมบิดส่วนใหญ่มจะทดสอบด้วยการทดสอบแรงเนื้อม โดยใน การทดสอบแรงเนื้อมตรงหรือแบบสวนทางนั้น ชิ้นทดสอบจะถูกตรึงสวนทางกัน การทดสอบแรงเนื้อมแบบสวนทางนี้ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเนื้อมของวัสดุ โดยความเนื้อมของค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความคมของชุดอุปกรณ์ตรึงยึด ชิ้นทดสอบข้อจากัดอื่น ๆ ในการทดสอบแรง

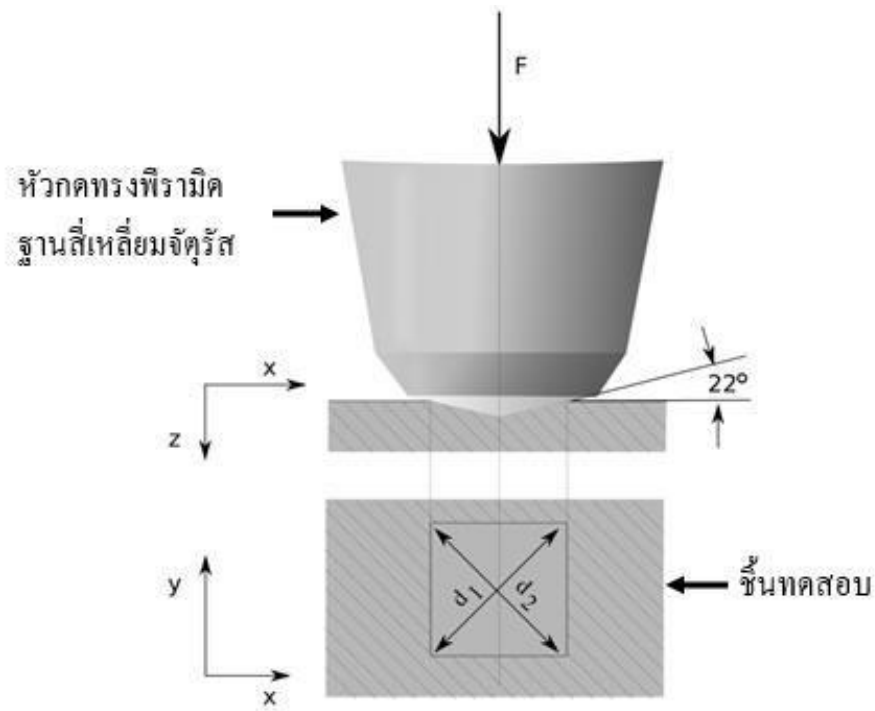
เงื่อนไขแบบสวนทางคือไม่สามารถทำการจัดเก็บ ข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลส่วนนี้ได้ทำให้ไม่สามารถ กำหนดค่าความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่นหรือ Modulus of Rigidity ได้สมบัติทางกลที่สามารถบอกได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางมีเฉพาะแรงที่จำเป็นในการเฉือน ชิ้นทดสอบเท่านั้น และเมื่อนำไปเทียบกับขนาดหน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบทำให้สามารถ กำหนดค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุโดยประมาณได้



รูปที่ 2.6 การทดสอบแรงเฉือนตรงหรือแบบสวนทาง

2.3.2 การทดสอบความแข็งแบบ Vickers [14]

เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1-120 กิโลกรัมแรง โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของ หัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังรูป 2.6 ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.7 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers

ความแข็งของวิกเกอร์ส = แรงกด/พื้นที่ผิวรอยกด

$$\begin{aligned}
 HV &= 0.102 F/S \\
 &= 0.102 \sin\alpha/2 \cdot 2F/d^2 \\
 &= 0.1831 F/d^2
 \end{aligned}$$

เมื่อ HV = ความแข็ง

F = แรงกด (kgf)

D = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (mm) ของเส้นทแยงมุม d_1 และเส้นทแยงมุม d_2

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัด ความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วนหรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกุด
- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกุดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกุดควรมีขนาด ไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกุด

2.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

2.4.1 การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค (Macro Structure Examination) เป็นการตรวจสอบทางกายภาพหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า จุดประสงค์ของการตรวจสอบเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของบริเวณเชื่อม ความแตกต่างรูปร่างของการเชื่อมเสียดทานแบบจุด การแบ่งเขตชั้นของรอยเชื่อม ลักษณะการผสมรวมกันของเนื้อโลหะบริเวณพื้นที่กวนเชื่อม (Stir zone) ความกว้างของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ตลอดจนลักษณะจุดบกพร่องต่างๆ ของรอยเชื่อมสำหรับน้ำยากัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E-340

2.4.2 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค (Micro Structure Examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงกว่า 10 เท่า ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้ เป็นการตรวจสอบเพื่อดูกระจายตัวและลักษณะเกรนของโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affect Zone) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) สำหรับน้ำยากัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E407-99 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 น้ำยาคัดผิวชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E407-99

น้ำยาคัดผิวตรวจสอบ	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	จุ่มหรือเช็ดด้วยสำลี นาน 5-15 วินาที
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก 1 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

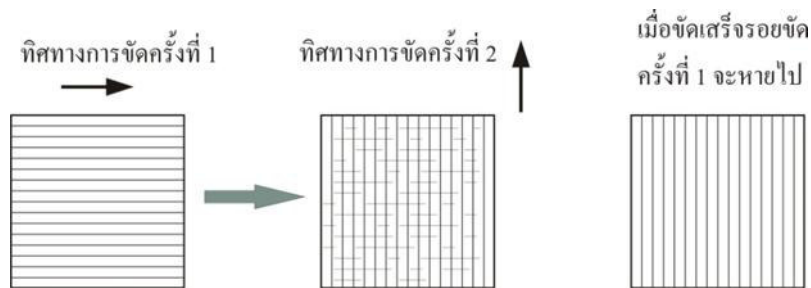
การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานต้องตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไป ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาดได้ ขนาดของชิ้นทดสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตรหรือนิ้วและความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าควรมีขนาด 25×25×20 มิลลิเมตรทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้ง่าย [15] ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเล็กมากควรที่จะหุ้มชิ้นทดสอบด้วยเรซิน โดยการหล่อให้หน้าตัดของชิ้นทดสอบอยู่ภายนอกเรซิน ในการเตรียมแบบหล่อเรซิน แบบหล่อนี้จะต้องได้ระดับไม่เอียงไปทางใดทางหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ทำการหล่อ

ออกมาไม่ได้ระดับ ฐานรองชั้นงานควรจะมีผิวเรียบ ซึ่งจะช่วยให้วางชั้นทดสอบได้ง่ายและได้ระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเตรียมชั้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค

การขัดผิวชั้นตรวจสอบหลังจากหล่อหุ้มด้วยเรซินเรียบร้อยแล้ว ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่ เบอร์ 400 600 800 1,000 1,200 และขัดจนถึงเบอร์ 1,500 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น และจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ ออกให้หมดในการขัดชั้นทดสอบเมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายใหม่ ควรขัดชั้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิมจนกระทั่งรอยขัดครั้งก่อนหน้าจะหายไปทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การขัดผิวชั้นทดสอบด้วยกระดาษทราย

การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้เป็นการขัดผิวต่อจากการขัดผิวด้วยกระดาษทรายแผ่นสุดท้ายเรียบร้อยแล้ว เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide))และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอนและการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนเครื่องขัดซึ่งมีจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาดโดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมันแล้วนั้น จะต้องล้างออกด้วยแอลกอฮอล์จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา (Etching) ซึ่งจะเลือกน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ ต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tanaka and Kumagai [6] ใช้ FSJ เชื่อมรอยต่อเกยอลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายของตัวกดสอดเข้าไปในอลูมิเนียมกับรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม กับความเร็วรอบของตัวกวน พบว่าความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาทีให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุดและค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ระยะห่างระหว่างปลายตัวกวนและรอยต่อของเหล็ก/อลูมิเนียมที่ค่า 0.2-0.3 มม. ค่าความแข็งแรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าสารประกอบกึ่งโลหะปริมาณเล็กน้อยก่อตัวขึ้นที่บริเวณรอยต่อแต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องจากรอยฉีกขาด (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้นผ่านแนวนี้ แต่เป็นการฉีกขาดแบบดึงขาดรอบรอยต่อ (Pulled Out Fracture)

T. Saecida, A. Abdollah-zadehb, B. Sazgarib [2] ได้ศึกษารอยต่อเกยของโลหะผสมอลูมิเนียม 1060 และทองแดงบริสุทธิ์ โดยการเชื่อมเสียดทานกวนและผลของความเร็วในการเชื่อมบริเวณผิวสัมผัส (interface) ศึกษาทางสัณฐานวิทยา, และความแข็งแรงที่ถูกรตรวจสอบ ผลการทดลองพบว่าในอลูมิเนียมใกล้กับบริเวณผิวสัมผัส (interface) จะเกิดโลหะประกอบ Al /Cu มีพื้นที่มีดที่ถูกสร้างขึ้นในบริเวณนี้สารประกอบโลหะ (intermetallic) ของ Al_4Cu_9 และ Al_2Cu และบางส่วนตรวจพบการแตกร้าว (Microcracks) จำนวนของการแตกร้าว (Microcracks) ดังกล่าวลดลงด้วยความเร็วการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าความเร็วสูงขึ้นในการเชื่อมจาก 118 และ 190 มม./นาที, ข้อบกพร่องที่เป็นโพรงกำลังก่อตัวขึ้นภายในรอยต่อเป็นผลมาจากความร้อนไม่เพียงพอ ผลของการทดสอบแรงดึงเฉือนเผยให้เห็นว่าแรงดึงเฉือนสูงสุดของรอยต่อได้ที่ความเร็วการเชื่อมจาก 95 มม./ นาที ที่ความเร็วการเชื่อมนี้ ไม่มีข้อบกพร่องในโพรงและรอยแตกร้าว (Microcracks) น้อยที่พบในการเชื่อม

อดิศร เปลี่ยนดิษฐ์ [16] ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุกระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างพื้นที่ผิวบ่าเครื่องมือและโลหะเชื่อม ส่งผลทำให้ความหนาอลูมิเนียมด้านบ่าเครื่องมือที่ผิวสัมผัสรอยต่อแยกลดลง และทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกำจัดอลูมิเนียมออกจากผิวสัมผัสซึ่งจะ ลดการรวมตัวของโลหะเชื่อมการใช้ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยบ่าเครื่องมือเชื่อมแบบแบนเรียบ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที และอัตราการป้อนเครื่องมือ 8 มิลลิเมตร/นาที จะได้รอยต่อที่มีขนาดความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด 2110 นิวตัน และความแข็ง 63 วิคเกอร์สเกล

บทที่ 3

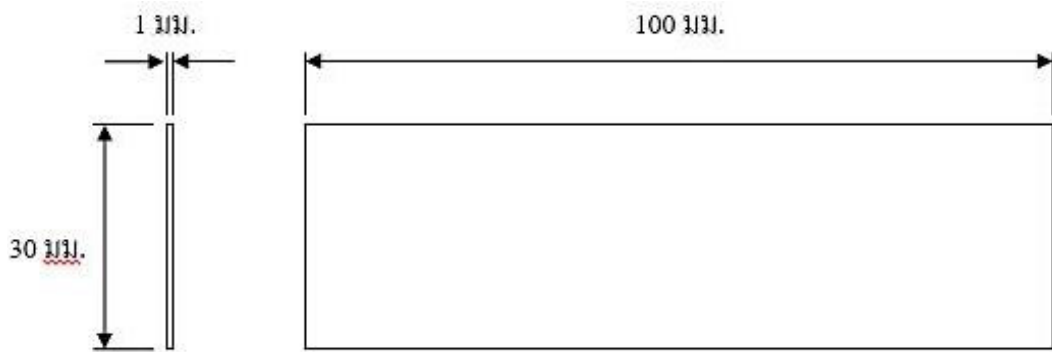
วิธีการดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้ได้วางแผนการดำเนินการเพื่อศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทาน แบบจุด (Friction Stir Spot Welding: FSSW) ในการเชื่อมรอยต่อเกยวัสดุต่างชนิดระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 โดยทำการเชื่อมลักษณะรอยต่อเกยขึ้นทดสอบแรงดึงเฉือน (Shear Tensile Test) ซึ่งผลของการเชื่อมตามลักษณะข้างต้นทำให้วัสดุสองชนิดสามารถยึดติดกันได้ และสามารถศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่างๆ โดยนำรอยเชื่อมมา ศึกษาสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบแรงดึง โดยใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ และทำการศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมขึ้นทดสอบเพื่อเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของรอยเชื่อมและแนวการพังทลาย

3.1 การเลือกวัสดุและอุปกรณ์การเชื่อม

3.1.1 วัสดุ

1) ทองแดง C 11000 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาการดำเนินงาน แผ่นรีดในการมีขนาดยาว 100 มม. กว้าง 30 มม. และหนา 1 มม. โดยทิศทางของการรีดมีทิศทางขนานด้านยาวของชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

ส่วนผสมทางเคมีของทองแดง C 11000 จากการศึกษาการทดสอบมีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของทองแดงเกรด C 11000 (wt%)

Si	Mn	Pb	Cr	Ni	Al	Sn	Zn	Cu	Fe
0.007	0.013	0.008	0.012	0.010	0.010	0.008	0.019	99.94	0.010

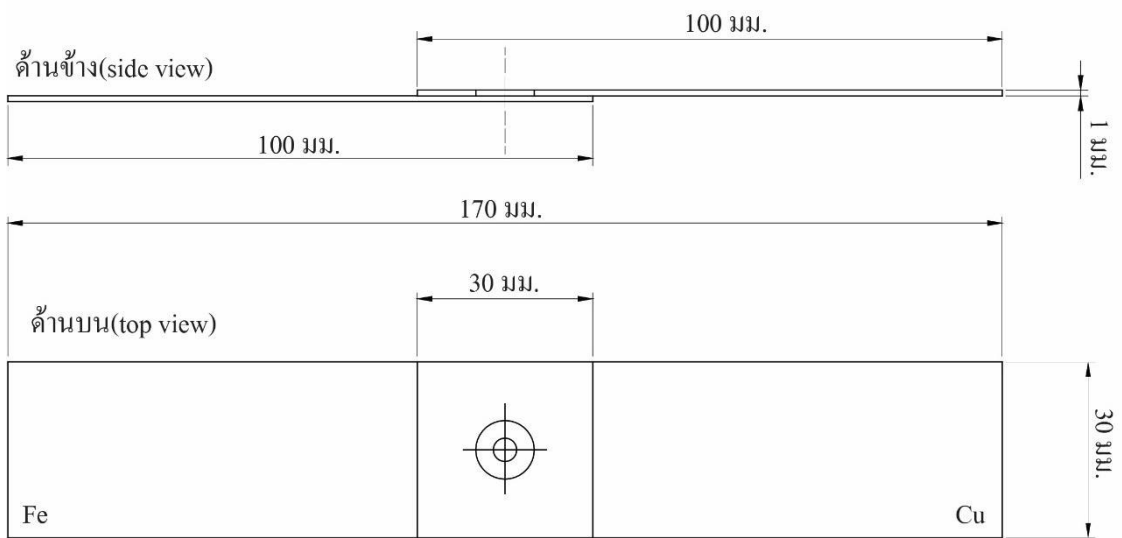
2) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาการดำเนินงานอีกชนิดหนึ่ง แผ่นรีดในการทดสอบ โดยขนาดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาดยาว 100 มม. กว้าง 30 มม. และหนา 1 มม. โดยทิศทางของการรีดมีทิศทางขนานด้านยาวของชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 3.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 มีส่วนผสมทางเคมีจากการทดสอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Sn	Ti	Cu	Fe
0.152	0.221	0.392	0.008	0.011	0.030	0.029	0.009	0.001	0.007	0.045	Bal.

3.1.2 ลักษณะของรอยต่อเกย (Lab joint)

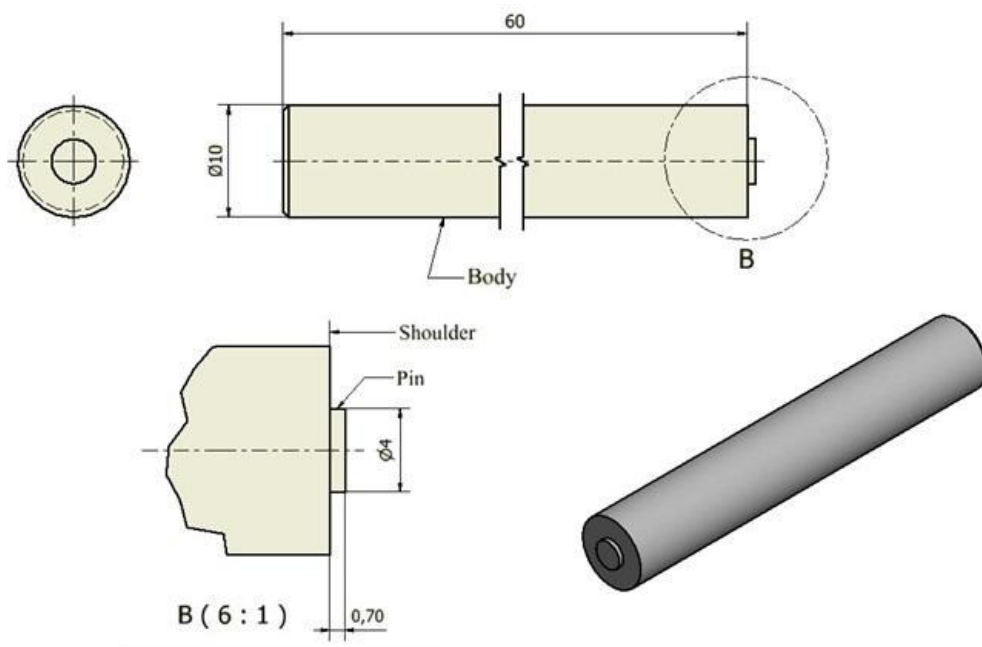
เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ ทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 แผ่นรีดความหนา 1 มม. ซึ่งถือเป็นวัสดุที่ต่างชนิดกัน ดังนั้นลักษณะของการเชื่อมในการทดลองนี้จึงได้เลือกรอยเชื่อมเป็นแบบรอยต่อเกย (Lab joint) คือการนำเอาชิ้นงานสองชิ้นมาวางในลักษณะเกยซ้อนกัน ดังรูปที่ 3.2 แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะรับแรงเฉือน ซึ่งเหมาะสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด โดยที่แผ่นทองแดงจะวางต่อเกยทับบนแผ่นเหล็กเข้าไป และแผ่นวัสดุทั้งสองจะถูกยึดติดอยู่ในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) ที่ยึดแน่นอยู่บน Table ของเครื่องกัด (CNC Milling) ขนาดของชิ้นงานได้มีการอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3136



รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบต่อเกลย (หน่วย : มิลลิเมตร) JIS Z 3136

3.1.3 ตัวกวนหรือเครื่องมือเชื่อม (Tools)

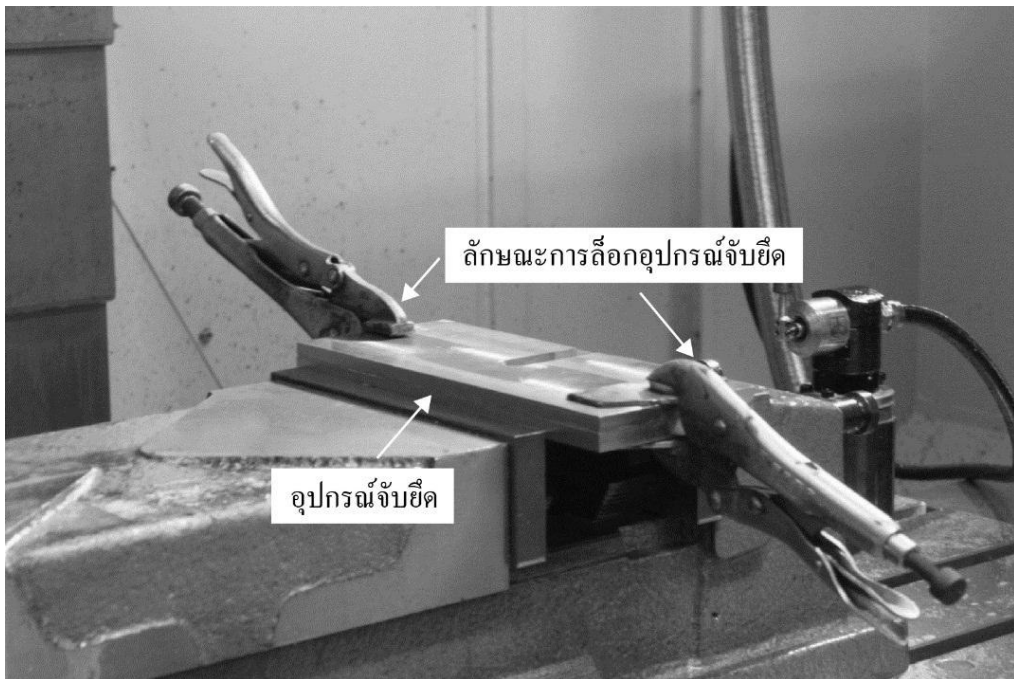
ตัวกวนหรือเครื่องมือเชื่อม ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 รูปทรงกระบอกผิวเรียบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ยาว 0.7 มม. และบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อม (Tools) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ยาว 60 มม. ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือเชื่อม

3.1.4 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

ฟิกเจอร์ คือ เครื่องมือที่สร้างขึ้นมาเพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่ง ยึดจับชิ้นงาน รองรับชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องมั่นคงในขณะที่เครื่องจักรทำงาน โดยการออกแบบฟิกเจอร์จะคำนึงถึงขนาดและลักษณะของรอยต่อของชิ้นงาน รวมถึงแรงกระทำและความร้อนที่เครื่องเชื่อมส่งผ่านจากตัวกวางลงมาสู่แผ่นชิ้นงานทั้งสองระหว่างทำการเชื่อม ซึ่ง ฟิกเจอร์นี้จะประกอบไปด้วย ฐานรอง ฝาปิดประกบ และคีมล็อก โดยในการทำงานนั้นจะนำแผ่นเหล็กวางลงบนฐานรองก่อน แล้วจึงนำแผ่นทองแดงวางทับด้านบนของแผ่นเหล็ก ใช้ฝาปิดประกบปิดทับแผ่นชิ้นงานทั้งสอง แล้วใช้คีมล็อก ล็อกทั้งสองข้างของฟิกเจอร์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

3.1.5 เครื่องกัดที่ประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด(CNC Milling)

เครื่อง CNC เป็นเครื่องจักรที่ใช้ระบบควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาจากคำว่า Computerized Numerical Control ส่วนประกอบของเครื่อง CNC ส่วนที่เป็น Hardware จะแยกเป็นส่วนที่เป็น Controller และ Mechanical โดยที่ Controller คือ ส่วนที่เป็นแผงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้า และมอเตอร์ ส่วน Mechanical คือ ส่วนที่เป็นกลไก และสำหรับการดำเนินงานครั้งนี้ ได้ใช้เครื่อง CNC ยี่ห้อ Eumaoh รุ่น LMC 1000 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องกัดที่ประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (CNC Milling)

3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ได้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่มีผลต่อสมบัติ ทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลของรอยต่อวัสดุต่างชนิดกัน จากผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา เช่น

ประดิษฐ์ สังข์ศิริ [5] ศึกษาตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000 ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด 864 นิวตัน คือ ความเร็วรอบ 3,500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มิลลิเมตร/นาที และระยะเวลาในการกดแช่ 4 วินาที ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบและความเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้น โครงสร้างทางมหภาคของโลหะเชื่อมบริเวณใต้ปากกวนมีลักษณะการก่อตัวที่เป็นตะขอสองที่ผิวสัมผัสของรอยต่อ โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซแสดงพื้นที่การรวมตัวของทองแดงและอะลูมิเนียมและส่งผลทำให้รอยต่อเกยมีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูง

อดิศร เปลียนดิษฐ์ [16] ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างพื้นที่ผิวบ่าเครื่องมือและโลหะเชื่อม ส่งผลทำให้ความหนาอลูมิเนียมด้านล่างบ่าเครื่องมือที่ผิวสัมผัสรอยต่อเกษตรลดลง และทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกำจัดอลูมิเนียมออกจากผิวสัมผัสซึ่งจะ ลดการรวมตัวของโลหะเชื่อมการใช้ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยบ่าเครื่องมือเชื่อมแบบแบนเรียบ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที และอัตราการป้อนเครื่องมือ 8 มิลลิเมตร/นาที จะได้รอยต่อที่มีขนาดความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด 2110 นิวตัน และความแข็ง 63 วิกเกอร์สเกล

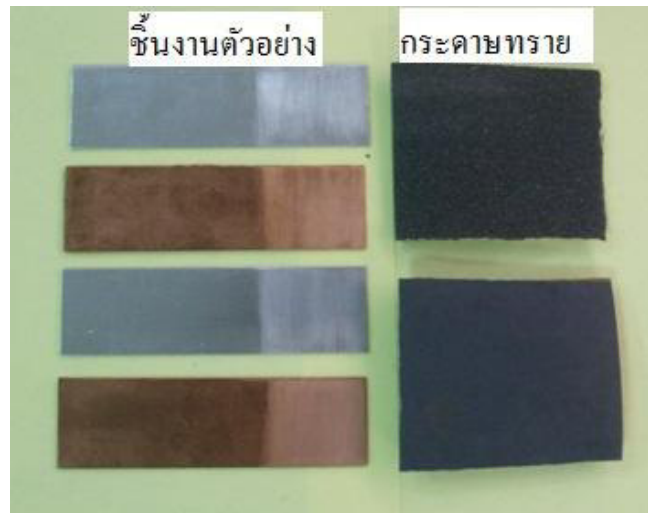
ศุวิณัย โสดาเจริญ [7] ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมกวนแบบจุดต่อโครงสร้างจุดภาคและความแข็งแรงดึงของรอยต่อเกษตรระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และ AA5052 ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรเชื่อมที่มีค่าแรงดึงสูงสุด 6020 นิวตัน คือ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อ/นาที อัตราป้อนตัวกวน 8 มิลลิเมตร/นาที เวลาทดแช่ 3 วินาที ความเร็วรอบและเวลาทดแช่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความแข็งแรงรอยต่อเพิ่มขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดและได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC Milling) ในการเชื่อมโดยจะควบคุมตัวแปรต่างๆตามที่กำหนดในการทดลอง ซึ่งได้แก่ ความเร็วรอบของตัวกวน อัตราความเร็วในการสอดตัวกวนและระยะเวลาในการทดแช่ตัวกวน ในแต่ละตัวแปรจะมีอยู่ 4 ระดับดังนี้

- 3.2.1 ความเร็วรอบตัวกวนที่ 2500, 3000, 3500 และ 4000 รอบ/นาที
- 3.2.2 เวลาในการทดแช่ที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที
- 3.2.3 อัตราป้อน 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที
- 3.2.4 ความลึกของการสอดตัวกวนที่ลดลงไปโดยวัดระยะจากผิวด้านบนของแผ่นทองแดงผสมกดลึกลงไปมีระยะเท่ากับ 1 มม.

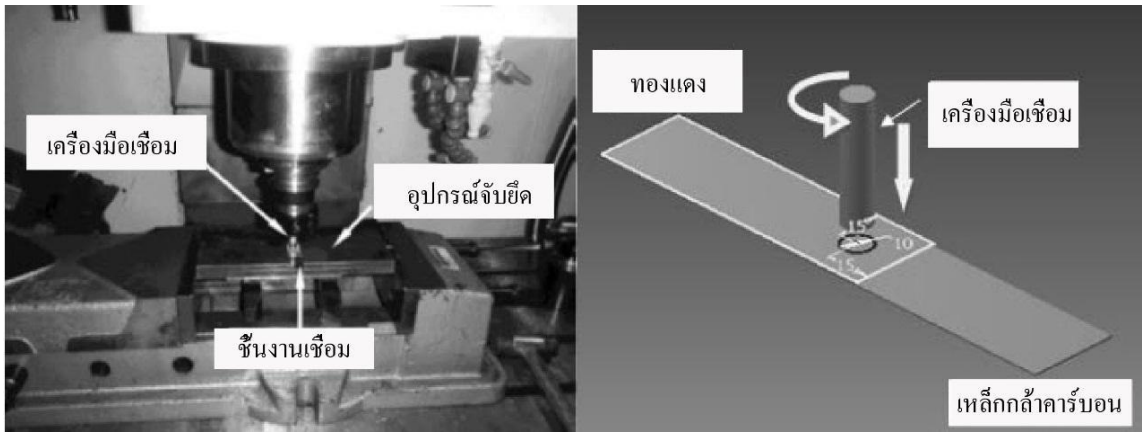
การเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding: FSSW) มีขั้นตอนหลังจากการกำหนดขอบเขตการดำเนินงาน คือการนำอุปกรณ์การจับยึดชิ้นงาน (Fixture) มาติดตั้งกับ Table ของเครื่องกัด (CNC Milling) และจัดทำในส่วนของโปรแกรมคำสั่งที่ใช้ในการเชื่อมให้เรียบร้อย โดยในขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงานนั้น ให้ทำการเตรียมชิ้นงานตามขนาดมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือนำแผ่นทองแดงและแผ่นเหล็กมาทำการตัดให้ได้ขนาดกว้าง 30 มม. ยาว 100 มม. มา

ปรับสภาพผิวของชิ้นงาน โดยการใช้กระดาษทรายขัดเพื่อทำการเปิดเนื้อผิวแท้หรือนำออกไซด์ที่เคลือบผิวชิ้นงานออก ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การปรับสภาพผิวของชิ้นงาน โดยการใช้กระดาษทรายขัด

จากนั้นนำแผ่นทองแดงและแผ่นเหล็กวางลงบนอุปกรณ์การจับยึดชิ้นงาน (Fixture) ที่ติดตั้งกับ Table ของเครื่องกัด (CNC Milling) ให้เรียบร้อย พร้อมทั้งใช้คีมถือช่วยยึดระหว่างฐานรองและแผ่นประกบไว้ โดยในทุกๆ การเชื่อมแต่ละครั้งจะวางแผ่นเหล็กไว้ด้านล่างและมีแผ่นทองแดงวางต่อเกยทับบนแผ่นเหล็กเข้าไปที่ระยะ 30 มิลลิเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการหลอมเหลวของทองแดงนั้นมีค่าน้อยกว่าเหล็ก และกำหนดให้ระยะกดลึกของตัวกวนลดลงไปในชิ้นงานจากทางด้านบนของทองแดงลดลงที่ระยะอินเทอร์เฟส นั่นคือ 1 มิลลิเมตร และทำการเชื่อมตามตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดในขอบเขตการดำเนินงาน พร้อมทั้งตรวจสอบชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วและสภาพการใช้งานของตัวกวนให้อยู่ในสภาพเดิมเสมอ เพื่อให้ผลของการดำเนินงานที่ได้มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือ ดังรูปที่ 3.7

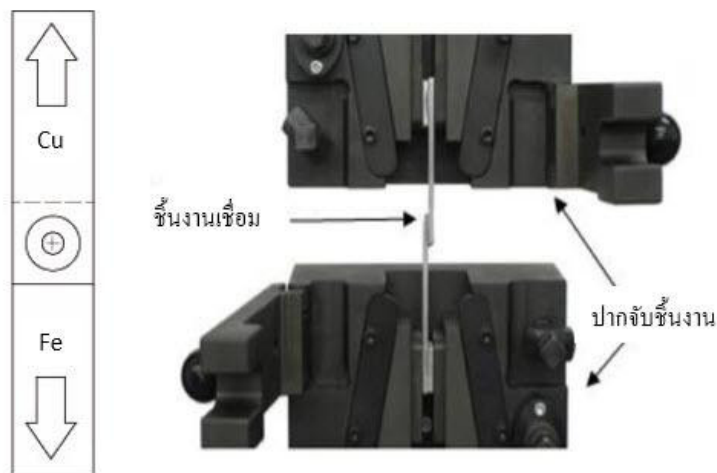


รูปที่ 3.7 การเชื่อมรอยต่อเกลระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015

3.3 การทดสอบรอยเชื่อม

3.3.1 ทดสอบแรงดึงเฉือน

การเตรียมชิ้นงานเชื่อมเพื่อทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136 ทำการทดสอบแรงดึงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ยี่ห้อ United Model SHEM โดยใช้ความเร็วในการดึงเคลื่อนที่ (Displacement speed) 1 มิลลิเมตร/นาที และแรงในการดึง (Load speed) 0.50 MPa โดยทำการจับยึดชิ้นงานให้พื้นที่การเชื่อมอยู่ในแนวเดียวกับแนวแรงดึงและดึงจนแนวเชื่อมหรือชิ้นงานขาดหรือถลอกออกจากกัน แสดงดังในรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 ทิศทางการดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1015 กับทองแดงผสมเกรด C11000

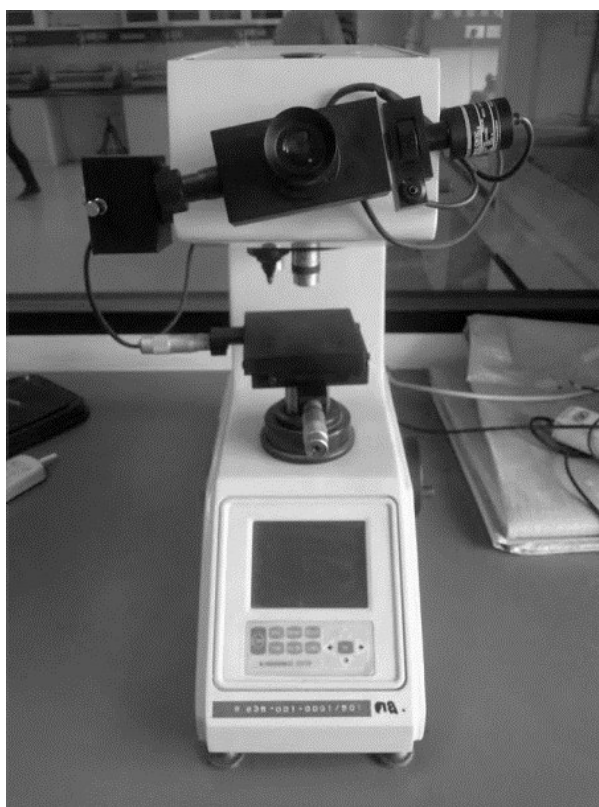


รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

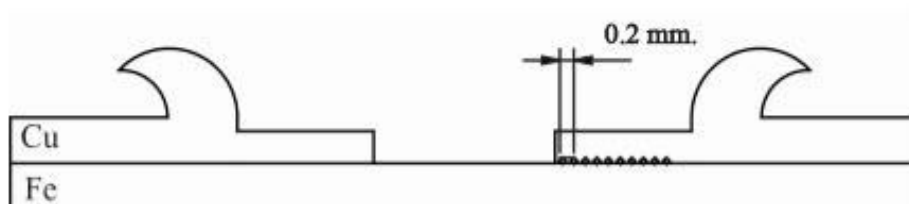
3.3.2 การทดสอบความแข็ง

เมื่อทำการเชื่อมชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานที่เชื่อมจะถูกนำไปเตรียมชิ้นทดสอบ และตัดผิวชิ้นงานทดสอบ เพื่อการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม ทำการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E92 – 82 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ ดังรูปที่ 3.10

มาทำการตรวจสอบความแข็งบริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงกับเหล็ก โดยแรงที่ใช้ในการกดทดสอบ 100 กรัม เวลาที่ใช้ในการกดประมาณ 10 วินาที ระยะห่างของรอยกดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 10 จุด ตามตำแหน่งการทดสอบเฉพาะจุดบริเวณใต้ปากกวน แสดงดังในรูปที่ 3.11 แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อทำการเปรียบเทียบในแต่ละช่วงเวลากดแช่ และหาแนวโน้มของค่าความแข็ง



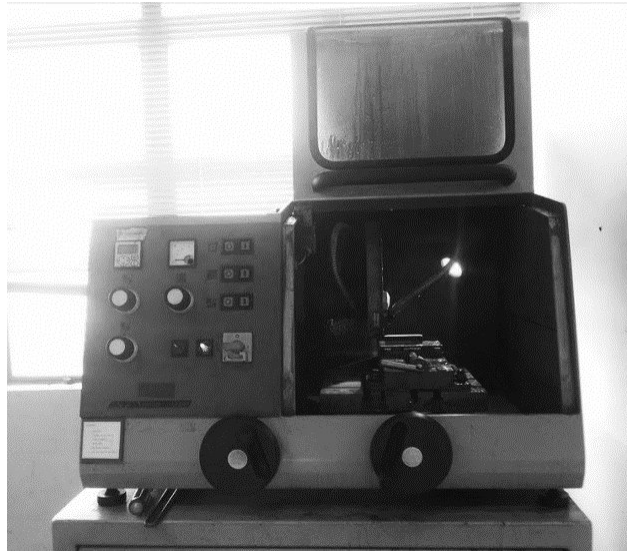
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์



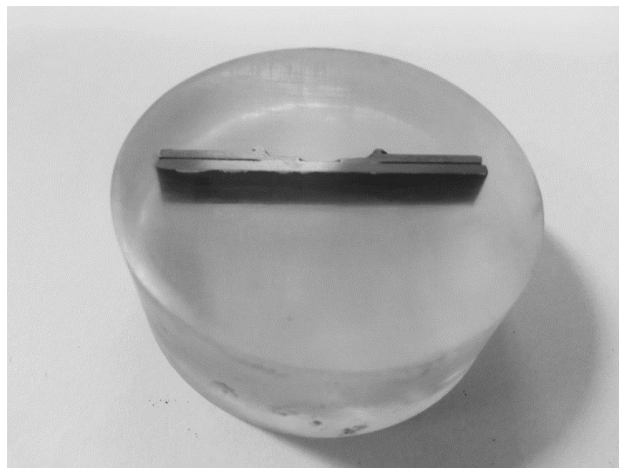
รูปที่ 3.11 จุดการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมด้วยเครื่อง Vickers Micro hardness Test

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยาของรอยเชื่อม

ทำการเชื่อมชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานที่เชื่อมจะถูกนำไปตัดตรงบริเวณรอยเชื่อม ด้วยเครื่องตัดไมโครไฟเบอร์ ดังรูปที่ 3.12 เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงและสะดวกต่อการนำไปขัด จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ทำการตัดเป็นที่เรียบร้อยแล้วไปทำการหล่อเรซินเพื่อทำตัวเรือน (Mounting) ชิ้นงานที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 เครื่องตัดไมโครไฟเบอร์



รูปที่ 3.13 ตัวเรือน (Mounting)

หลังจากได้ตัวเรือน (Mounting) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายน้ำ ตั้งแต่เบอร์ 400, 1000 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นถึงนำชิ้นงาน ไปขัดด้วยผ้าสักหลาดพร้อมกับการใช้ผงขัด (Polishing) ในระหว่างการขัด เพื่อช่วยให้ชิ้นงานมีความเรียบมากยิ่งขึ้น แล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าให้แห้งด้วยลมเย็น ในกระบวนการขัดชิ้นงานนี้จะขัดอยู่บนเครื่องขัดจานหมุนดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องขัดจานหมุน

หลังจากทำการขัดชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปกัดกรด โดยทำการกัดกรดที่มีส่วนผสมของกรดตามมาตรฐาน ASTM E407 [17] ประกอบด้วย กรดไฮโดรคลอริก 10 มล. กรดไนตริก 5 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เพื่อดูโครงสร้างเหล็กและกรดไนตริก (HNO_3) 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90 มิลลิลิตร เพื่อดูโครงสร้างทองแดง การทำให้เห็นโครงสร้างได้อย่างชัดเจน ต้องใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 10 วินาที จากนั้นจึงล้างออกด้วยน้ำสะอาด เป่าให้แห้งด้วยลมเย็น นำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical micro scope) เพื่อตรวจสอบดูความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.15 ทำการบันทึกภาพเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์โครงสร้าง



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical micro scope)

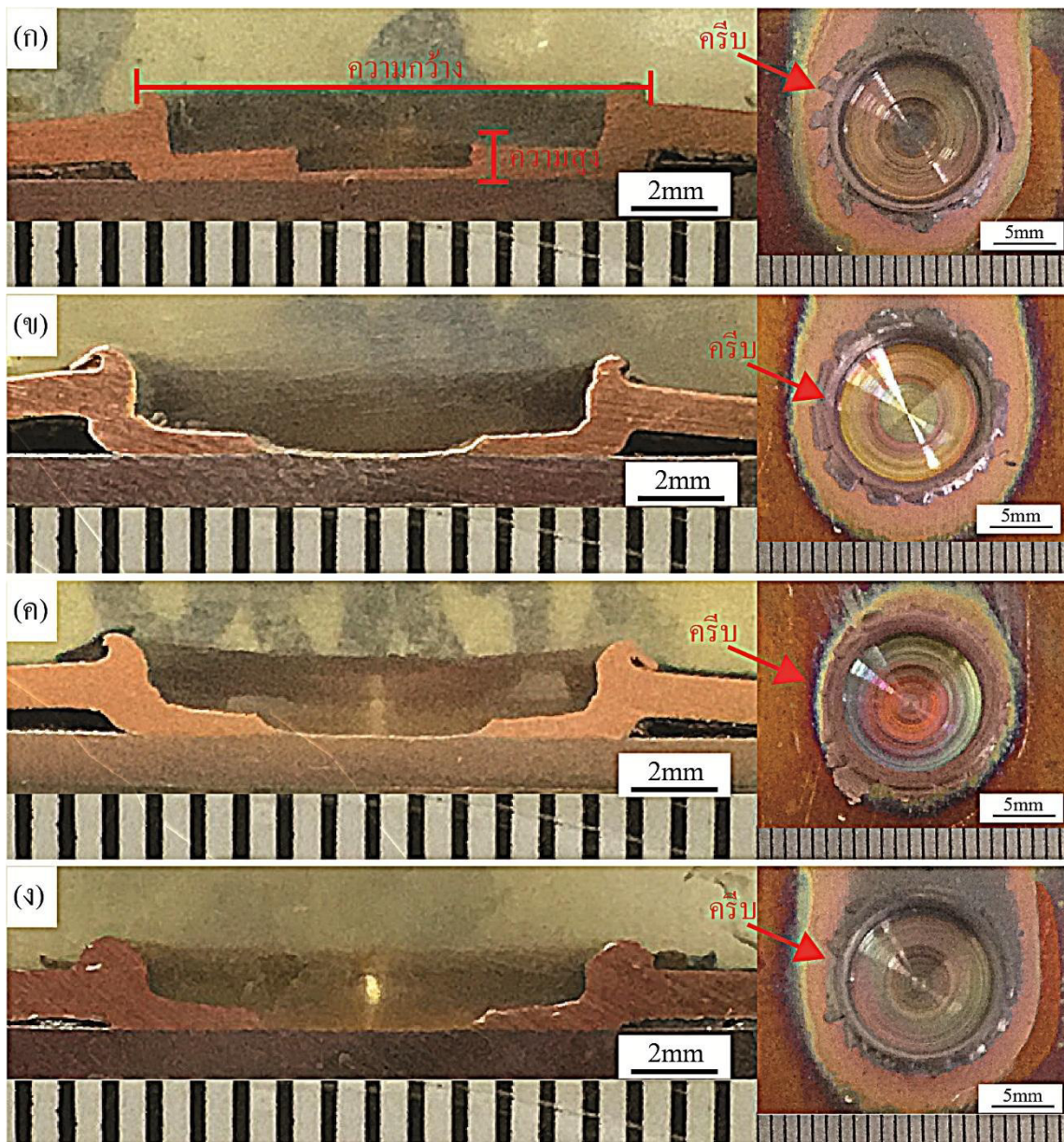
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ในการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดทองแดง C 11000 และ เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ใช้เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 เป็นตัวกวนหรือเครื่องมือเชื่อม (Tools) โดยได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค การทดสอบความแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม แนวการพังทลาย แล้วนำมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดผลการเปรียบเทียบตามหัวข้อดังนี้

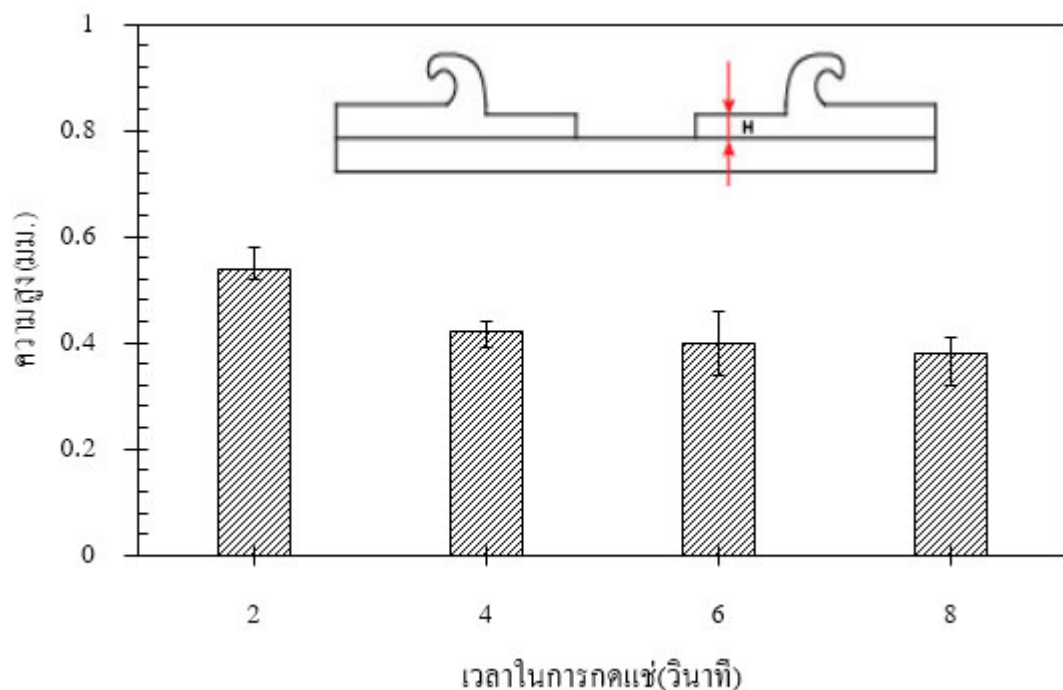
4.1 ผลกระทบของเวลาทดแซในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมและ โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ ต่อนาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแซ 2 - 8 วินาที พบว่า ที่เวลาทดแซ 2 วินาที บริเวณ รอบนอกของบ่าเชื่อม เกิดครีบลักษณะกว้างที่บริเวณขอบแนวเชื่อมและเกิดแตกออกเป็นบางส่วน แสดงดังในรูปที่ 4.1(ก) บริเวณผิวด้านบน (Upper Surface) ของรอยเชื่อม แสดงความกว้างของรอย เชื่อมบริเวณหน้าตัดรอยเชื่อม (Cross-Section) มีค่าประมาณ 16 มิลลิเมตร และเมื่อเวลาทดแซที่ 4 วินาที พบว่า บริเวณรอบนอกของบ่าเชื่อมลักษณะการเกิดครีบและรอยฉีกขาดของครีบลักษณะแบน เรียบกว้างแตกบางส่วน มีค่าความกว้างบริเวณรอบนอกของบ่าเชื่อมมีขนาดลดลงมีค่าประมาณ 15 มิลลิเมตร บริเวณผิวด้านบนและบริเวณหน้าตัดรอยเชื่อม แสดงดังในรูปที่ 4.1(ข) ขณะที่เมื่อทำการ เพิ่มเวลาทดแซที่ 6 พบว่า บริเวณรอบนอกของบ่าเชื่อมลักษณะการเกิดครีบและรอยฉีกขาดของครีบ ลักษณะแบนเรียบกว้างแตกเป็นช่วงๆ มีค่าความกว้างบริเวณรอบนอกของบ่าเชื่อมมีขนาดเพิ่มขึ้น มี ค่าประมาณ 16 มิลลิเมตร แสดงดังในรูปที่ 4.1(ค) และ 8 วินาที พบว่า บริเวณครีบบนรอบนอกมีลักษณะ ฉีกขาดเป็นสีดำของครีบและเริ่มหลุดออก เมื่อวัดค่าความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลงโดยมี ค่าประมาณ 13 มิลลิเมตร แสดงดังในรูปที่ 4.1(ง)

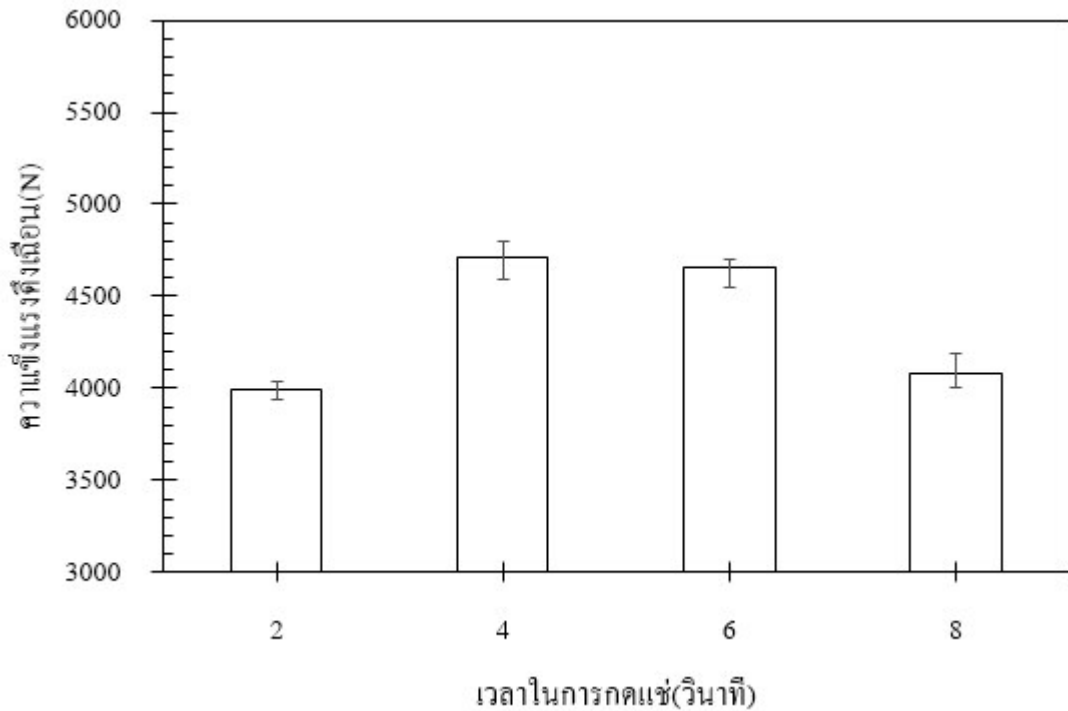


รูปที่ 4.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาคดแซ่ (ก)2 วินาที (ข)4 วินาที (ค)6 วินาที (ง)8 วินาที

รูปที่ 4.2 แสดงการวัดค่าความสูงขोलโหะที่อยู่ข้างล่างของง่าเชื่อมของรอยต่อเกยที่เชื่อม ด้วย ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแซ่ 2-8 วินาที พบว่า ที่ เวลาทดแซ่ 2 วินาที มีค่าความสูงของง่าเชื่อมมีค่าประมาณ 0.54 มิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งแรงดีถึง เกือบต่ำ เมื่อเพิ่มเวลาทดแซ่ที่ 4 วินาที ความสูงบริเวณง่าเชื่อม มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยมีค่าประมาณ 0.42 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มเวลาทดแซ่สูงขึ้น ที่ 6 และ 8 วินาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับเวลาที่ทดแซ่ เพิ่มขึ้น ค่าความสูงบริเวณง่าเชื่อมจะลดลง และส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดีถึงเกือบมีแนวโน้มลดลง ที่ ได้แสดงในรูปที่ 4.3



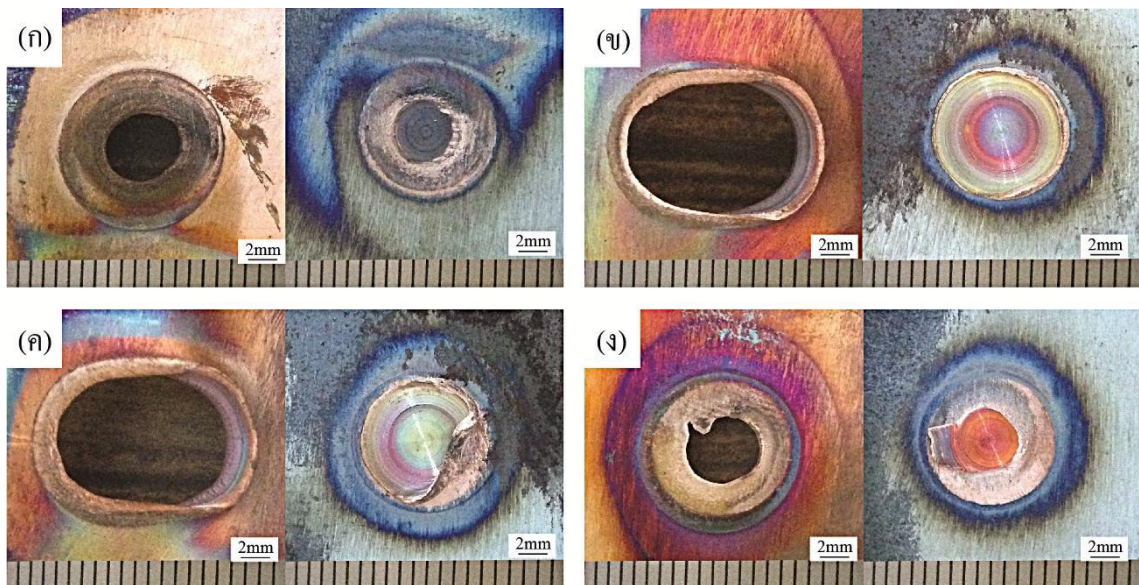
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของง่าเชื่อมกับความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลาทดแซ่ 2-8 วินาที



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยกับความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตรา
ป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลากดแช่ 2-8 วินาที

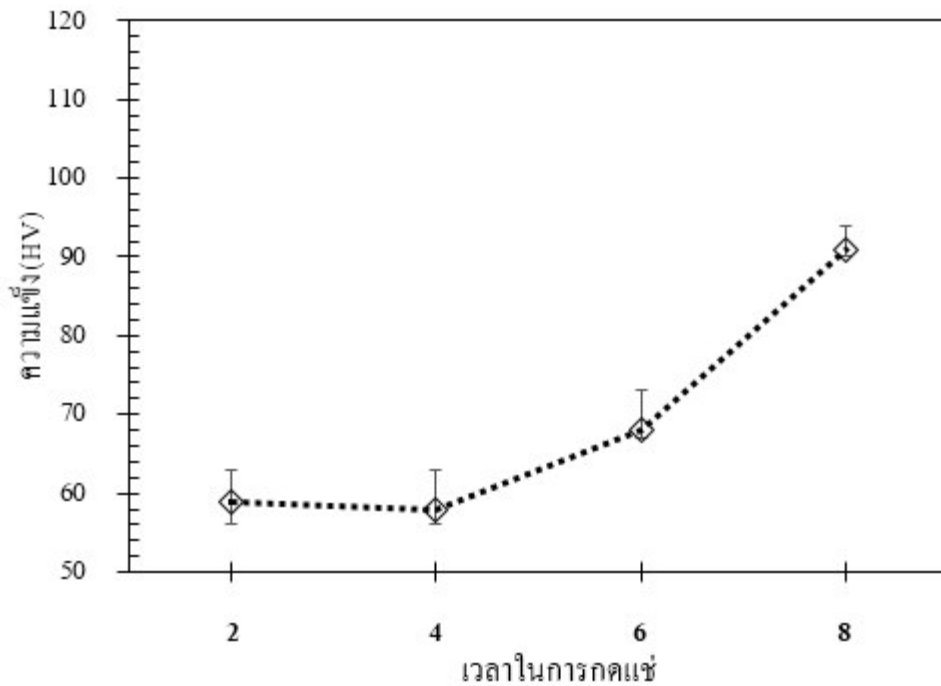
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุกรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 กับทองแดงผสมเกรด C11000 ที่เวลาในการกดแช่ที่ 2 - 8 วินาที อัตราป้อนที่ 6 มิลลิเมตร/นาที ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที พบว่าที่เวลากดแช่เชื่อมเริ่มต้น 2 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 3992 นิวตัน รอยต่อเกิดการพังทลายถูกดึงขาดออกมาเป็นรูปกลมตามตัวกวนที่พื้นผิวพังทลายบริเวณอินเทอร์เฟซ (Interfacial Fracture Surface) บริเวณรอยเชื่อมจุด [18] แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Piccini and Svoboda[19] ที่ให้ค่าแรงพังทลายต่ำ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการกดแช่มากขึ้นเป็น 4 วินาที ผลของค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4715 นิวตัน และเมื่อเพิ่มเวลากดแช่เพิ่มขึ้นเป็น 6 วินาที และ 8 วินาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของรอยเชื่อมเสียดแบบจุกมีค่าแนวโน้มลดต่ำลง โดยมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 4662 นิวตัน และ 4477 นิวตัน ตามลำดับ ขณะที่ลักษณะการพังทลายที่เวลาในการกดแช่ 4 และ 6 วินาที พบว่าที่แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่ด้านล่างของรอยเชื่อมเกิดการพังทลายฉีกขาดเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส (Interface fracture) และมีเนื้อวัสดุเชื่อมของทองแดงติดอยู่บริเวณแผ่นเหล็ก ขณะที่แผ่นทองแดงด้านบนเกิดฉีกขาดเสียรูปที่รุนแรงของเนื้อวัสดุทองแดงซึ่งคล้ายกับ Piccini and

Svoboda[19] ที่ให้ค่าแรงฟังกหลายสูง ขณะที่ลักษณะการฟังกหลายที่เวลากดแช่นานที่ 8 วินาที พบว่าการฟังกหลายมีลักษณะคล้ายกับเวลาในการกดแช่ที่ 2 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงเฉือนที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มลดต่ำลง แสดงดังในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ลักษณะการฟังกหลายรอยต่อเข็มที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลากดแช่ (ก)2 วินาที (ข)4 วินาที (ค)6 วินาที (ง)8 วินาที

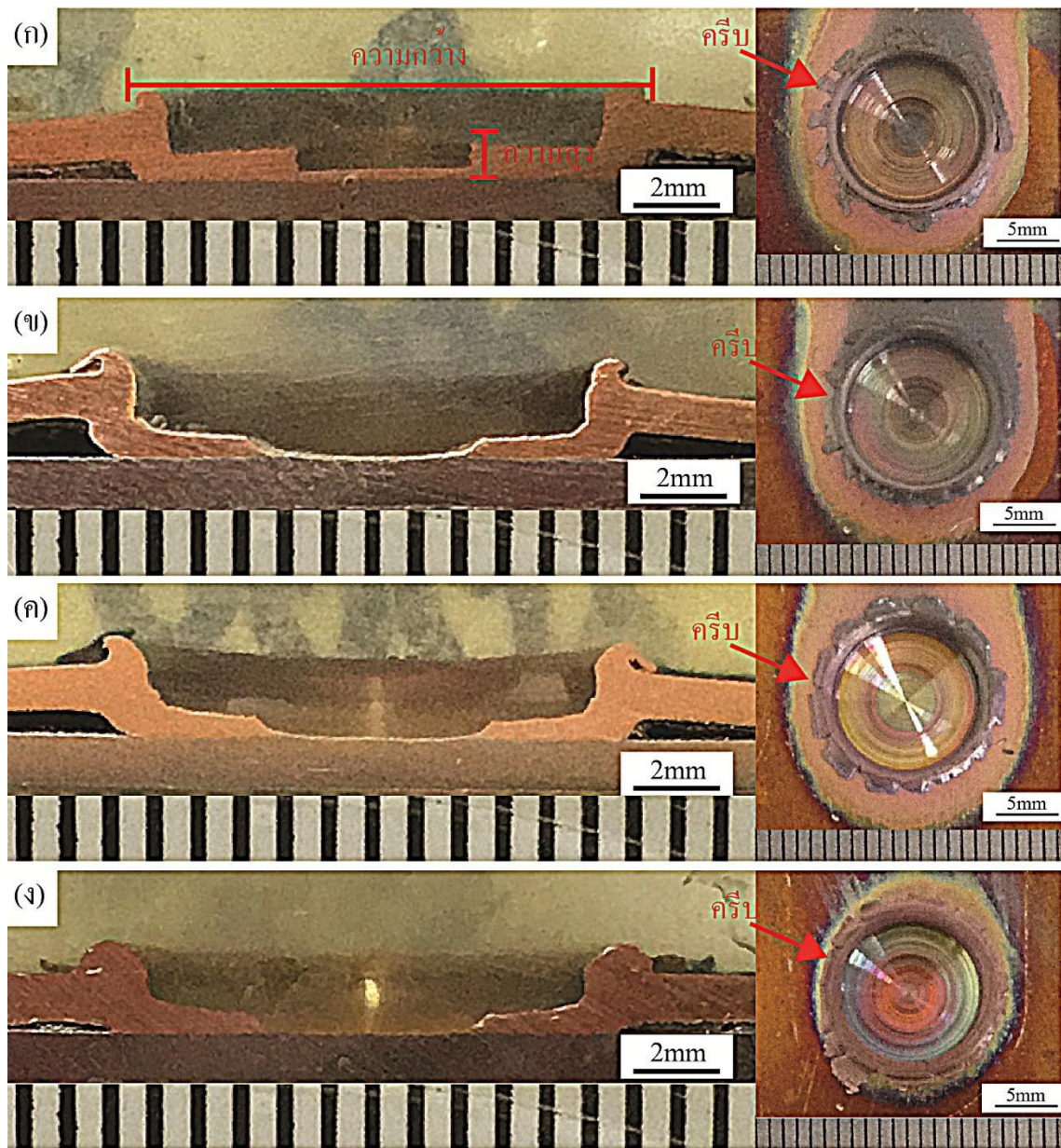
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าความแข็งที่เวลากดแช่ 2 - 8 วินาที ที่อัตราป้อนตัวกวน 6 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที บริเวณรอยต่อเชื่อมได้ปากวาระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 พบว่า เมื่อทำการตรวจสอบค่าความแข็งเวลากดแช่ที่ 2 วินาที ค่าความแข็งของบริเวณรอยต่อเชื่อมมีค่าเฉลี่ย 59 HV และเมื่อตรวจสอบค่าความแข็งเวลากดแช่ 4 วินาที พบว่ามีค่าความแข็งใกล้เคียงกับเวลากดแช่ที่ 2 วินาที และเมื่อเพิ่มเวลากดแช่ที่ 6 และ 8 วินาที พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีค่าความแข็งอยู่ที่ 68 HV และ 91 HV ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งกับลักษณะการฟังกหลายพบว่าชิ้นงานทดสอบที่มีเวลากดแช่นานและมีความแข็งสูงส่งผลต่อการฟังกหลายลักษณะที่รุนแรงแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งบริเวณรอยต่อเชื่อมได้บ่ากวน ระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และเวลากดแช่ 2-8 วินาที

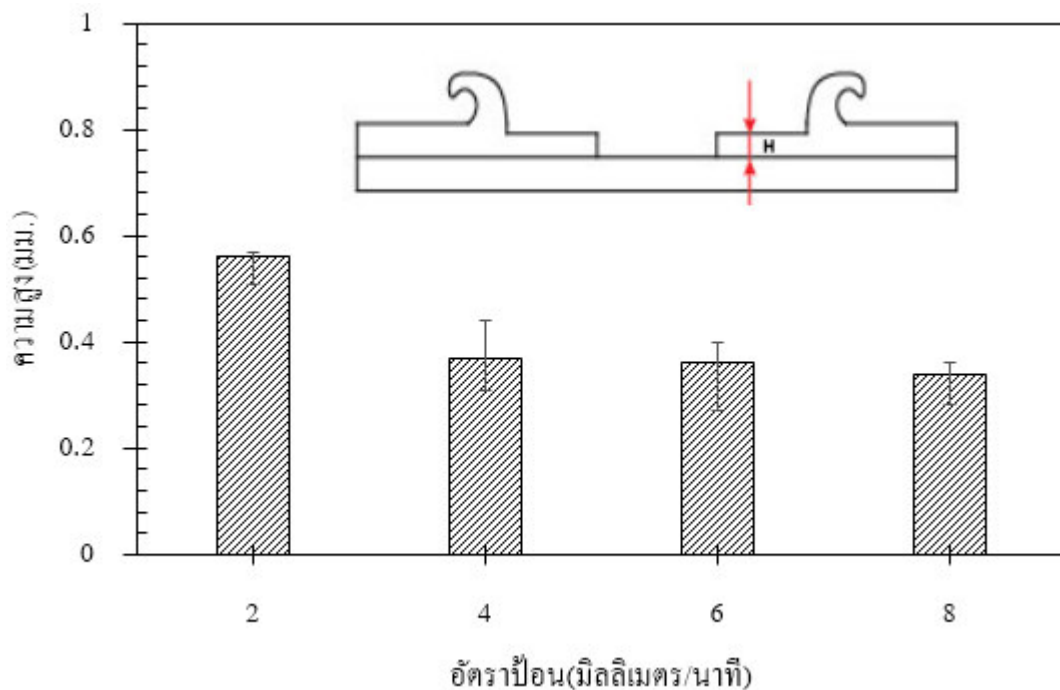
4.2 ผลกระทบของอัตราป้อนในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

รูปที่ 4.6 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาในการกดแช่ 2 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตร/นาที พบว่าที่อัตราป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที บริเวณรอบนอกของบ่่าเชื่อม เกิดครีบลักษณะกว้างที่บริเวณขอบแนวเชื่อมและเกิดแตกออกบางส่วน มีลักษณะขาดเป็นช่วงๆ แสดงดังในรูปที่ 4.6(ก) และในอัตราป้อนที่ 4 มิลลิเมตร/นาที พบว่าครีบบที่แตกออกมามีขนาดสั้นลง แสดงดังในรูปที่ 4.6(ข) และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนไปที่ 6 มิลลิเมตร/นาที พบว่าครีบบนั้นมีการแตกออกอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังในรูปที่ 4.6(ค) ซึ่งมีลักษณะคล้ายในอัตราป้อนที่ 8 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังในรูปที่ 4.6(ง) และทำการวัดค่าความกว้างของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดรอยเชื่อม (Cross-Section) ทั้ง 4 ชิ้นงาน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 16 มิลลิเมตร

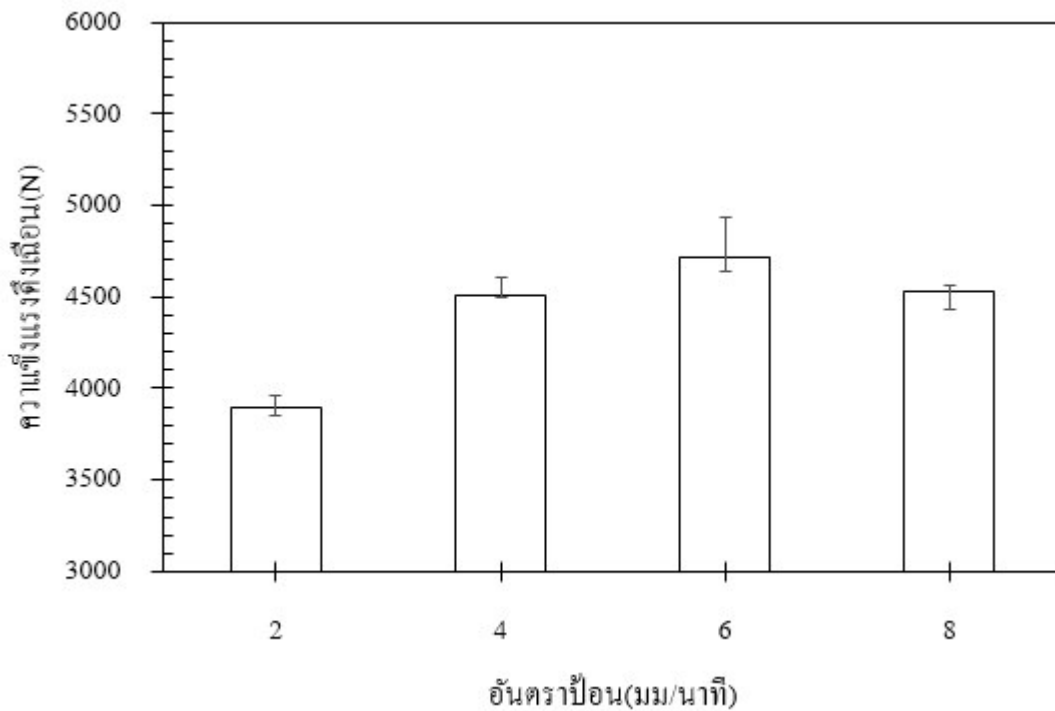


รูปที่ 4.6 ผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาบัด
 แซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน (ก)2 มิลลิเมตร/นาที (ข)4 มิลลิเมตร/นาที (ค)6 มิลลิเมตร/นาที
 (ง)8 มิลลิเมตร/นาที

รูปที่ 4.7 แสดงการวัดค่าความสูงของป่าเชื่อม พบว่า ที่อัตราป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความสูงของป่าเชื่อมมีค่าประมาณ 0.56 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงเดือนต่ำ เมื่อเพิ่มอัตราป้อนที่ 4 มิลลิเมตร/นาที ความสูงบริเวณป่าเชื่อม มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยมีค่าประมาณ 0.37 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสูงขึ้น ที่ 6 และ 8 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับเวลาที่กดแช่เพิ่มขึ้น ค่าความสูงบริเวณป่าเชื่อมจะลดลง และส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเดือนมีแนวโน้มลดลง ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7



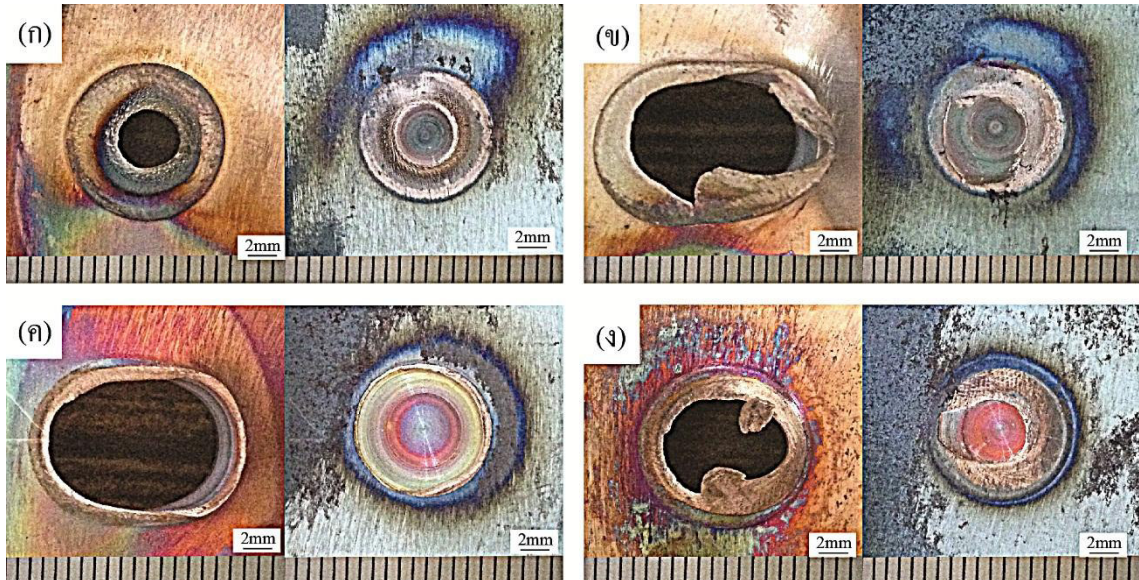
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของป่าเชื่อมกับความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลากดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนกับความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลา กัดเซาะ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตร/นาที

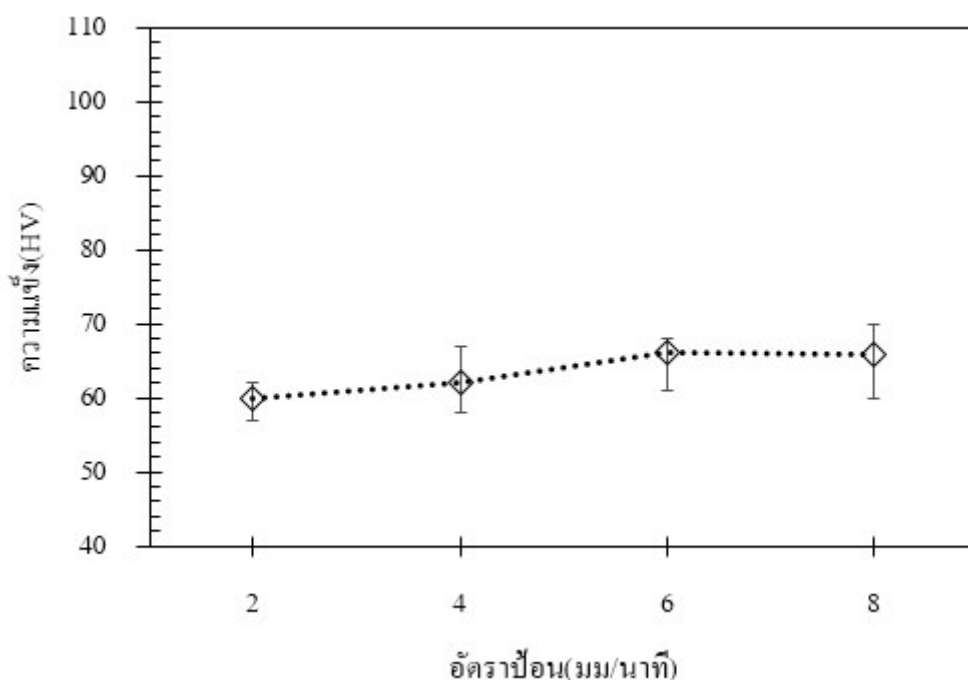
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจตุรรอยต่อ เกย ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 กับทองแดงผสม C11000 ที่อัตราป้อนที่ 2-8 มิลลิเมตร/นาที เวลาในการกัดเซาะที่ 4 วินาที ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที พบว่าที่อัตราป้อนเชื่อมเริ่มต้น 2 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนประมาณ 3897 นิวตัน รอยต่อเกยเกิดการพังทลายถูกดึงขาด ออกมาเป็นรูกลมตามตัวกวนที่พื้นผิวพังทลายบริเวณอินเตอร์เฟซบริเวณรอยเชื่อมจุด แสดงดังรูปที่ 4.9 (ก) ให้ค่าแรงพังทลายต่ำ และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนมากขึ้นเป็น 4 มิลลิเมตร/นาที ผลของค่าความแข็งแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4504 นิวตัน พบบริเวณพังทลายที่แผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบนมากขึ้น และเพิ่มในอัตราป้อนที่ 6 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนประมาณ 4715 นิวตัน ซึ่งมีค่าแรงพังทลายสูง พบว่าการพังทลายของเนื้อวัสดุทองแดงที่อยู่ด้านบนถูกดึงฉีกขาด และเนื้อวัสดุทองแดงยึดเกาะบริเวณอินเตอร์เฟซของเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นจำนวนมาก และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนที่ 8 มิลลิเมตร/นาที พบว่า การพังทลายมีลักษณะคล้ายกับอัตราป้อนที่ 4

มิลลิเมตร/นาที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงเฉือนที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มลดลง แสดงดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 ลักษณะการพังทลายรอยต่อเฉือนที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที่ เวลาทดสอบ 4 วินาที และอัตราป้อน (ก) 2 มิลลิเมตร/นาที่ (ข) 4 มิลลิเมตร/นาที่ (ค) 6 มิลลิเมตร/นาที่ (ง) 8 มิลลิเมตร/นาที่

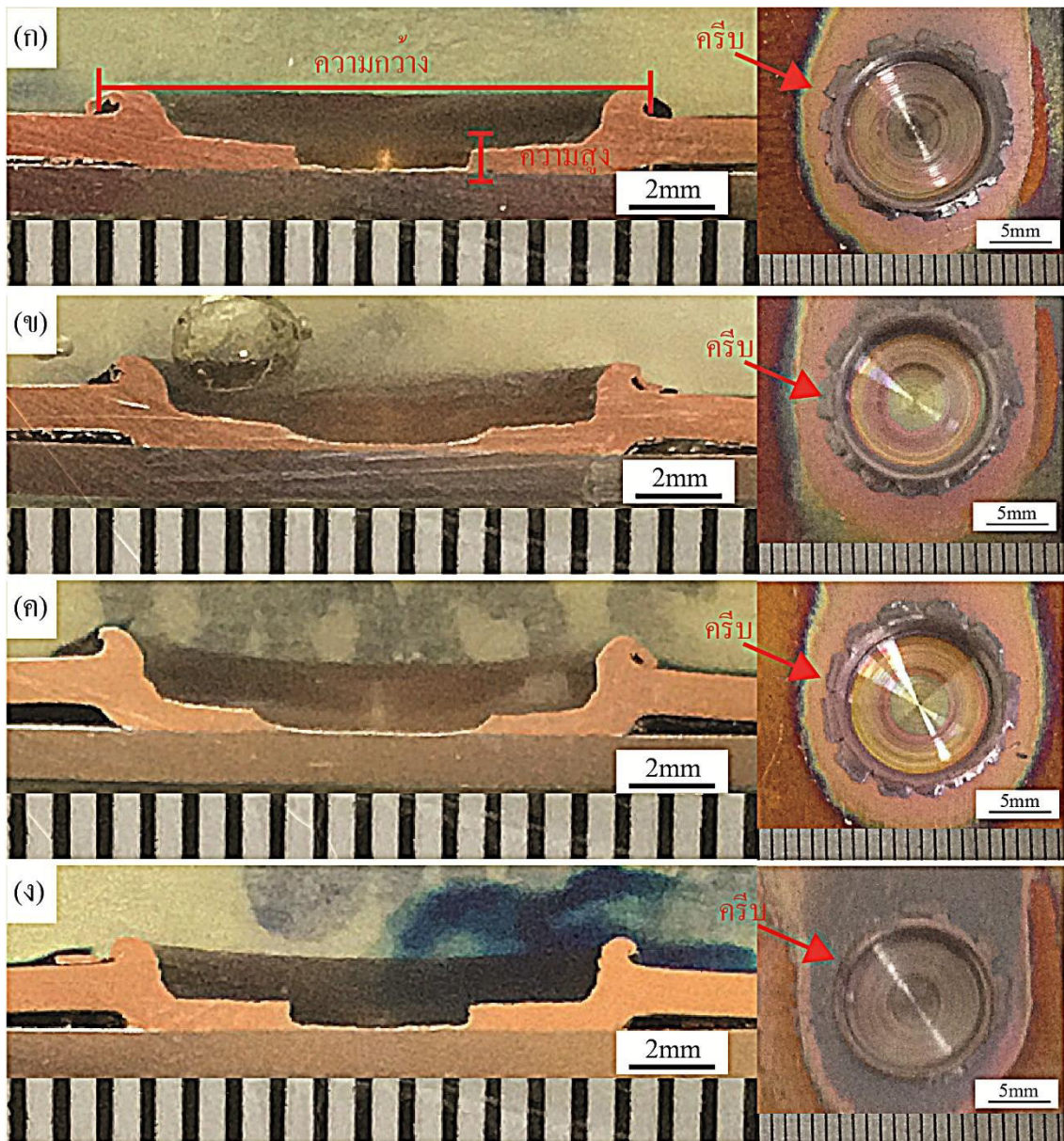
รูปที่ 4.10 การทดสอบค่าความแข็งที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที่ เวลาทดสอบ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยต่อเชื่อมได้ปากวาระหว่างทองแดง C 11000 และ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 พบว่าที่อัตราป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที่ มีค่าความแข็งของบริเวณรอยต่อเชื่อมมีค่าเฉลี่ยประมาณ 60 HV ขณะที่เพิ่มความเร็วของอัตราป้อน 4 และ 6 มิลลิเมตร/นาที่ พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ผลการทดสอบค่าความแข็งที่อัตราป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที่ พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยกับการพังทลายดังรูปที่ 4.8 พบว่าความแข็งสูงส่งผลต่อการพังทลายลักษณะที่รุนแรงแสดงดังรูปที่ 4.8 (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งคล้ายกับรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งบริเวณรอยต่อเชื่อมใต้ปากววน ระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาถดเซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2-8 มิลลิเมตร/นาที

4.3 ผลกระทบของความเร็วรอบในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

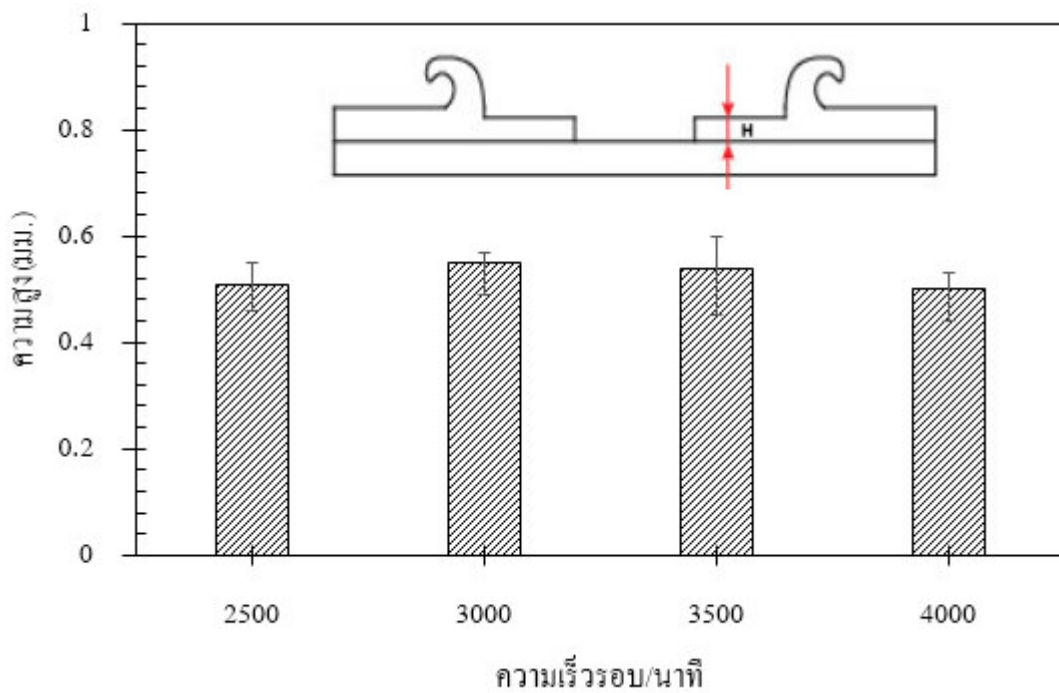
รูปที่ 4.11 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมและ โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยเวลาถดเซ่ 4 วินาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2000-4000 รอบ/นาที พบว่า ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที บริเวณรอบนอกของบ่าเชื่อม เกิดครีบลักษณะกว้างที่บริเวณขอบแนวเชื่อมและเกิดแตกออก บริเวณผิวด้านบนของรอยเชื่อม ความกว้างของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดรอยเชื่อม มีค่าประมาณ 16 มิลลิเมตร แสดงดังในรูปที่ 4.11(ก) และเมื่อเวลาความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที พบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที แสดงดังในรูปที่ 4.11(ข) ขณะที่เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที บริเวณรอบนอกของบ่าเชื่อม เกิดครีบลักษณะกว้างและแบนที่บริเวณขอบแนวเชื่อมและเกิดแตกออก และความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที พบว่าบริเวณครีบบนอ้อมมีลักษณะนิกขนาดของครีบลและเริ่มหลุดออก เมื่อวัดค่าความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลงโดยมีค่าประมาณ 12 มิลลิเมตร แสดงดังในรูปที่ 4.11 (ง)



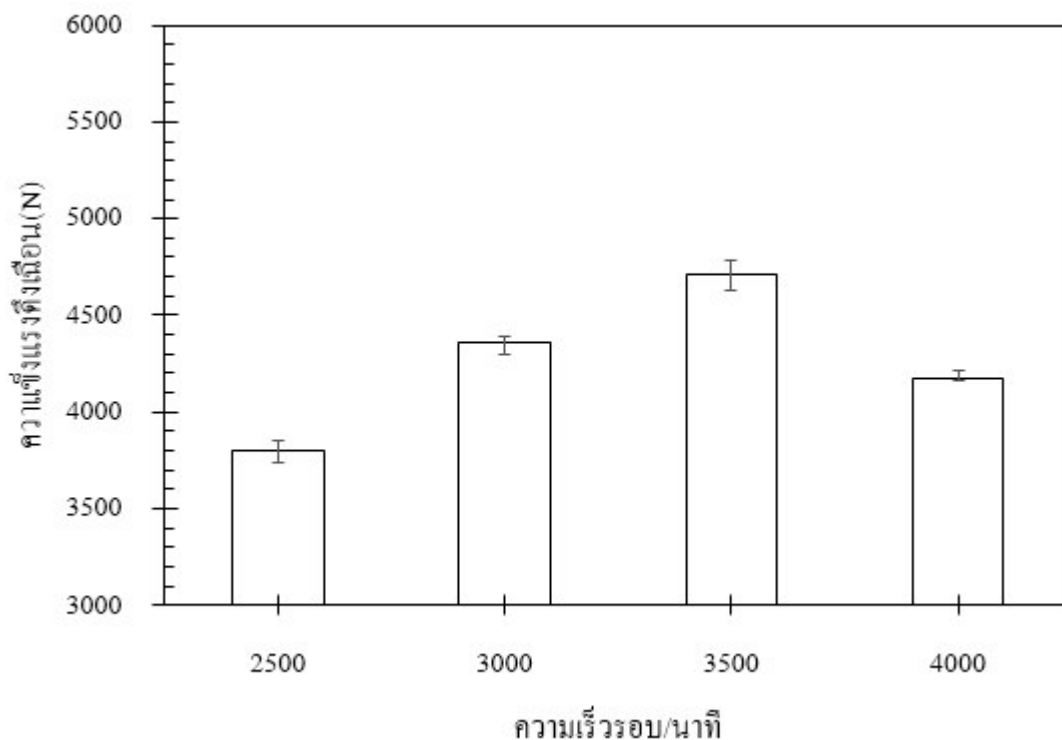
รูปที่ 4.11 ผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาค ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ (ก)2500 รอบ/นาที (ข)3000 รอบ/นาที (ค)3500 รอบ/นาที (ง)4000 รอบ/นาที

รูปที่ 4.12 แสดงการวัดค่าความสูงของโลหะด้านล่างของบ่าเชื่อม พบว่าที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที มีค่าความสูงของบ่าเชื่อมมีค่าประมาณ 0.51 มิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งแรงดีถึงเดือนต่ำ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ความสูงบริเวณบ่าเชื่อม มีแนวโน้มสูงขึ้นเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.55

มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที พบความสูงของบ่าเชื่อมมีความใกล้เคียงกับความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ซึ่งมีสูงลดลงมาเล็กน้อย เฉลี่ยประมาณ 0.54 มิลลิเมตร และความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที มีความสูงของบ่าเชื่อมลดลง เฉลี่ยประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาพบริเวณผิวด้านบน แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบแผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบน จะมีครีบทที่หลุดออกทำให้บ่าเชื่อมลดลง



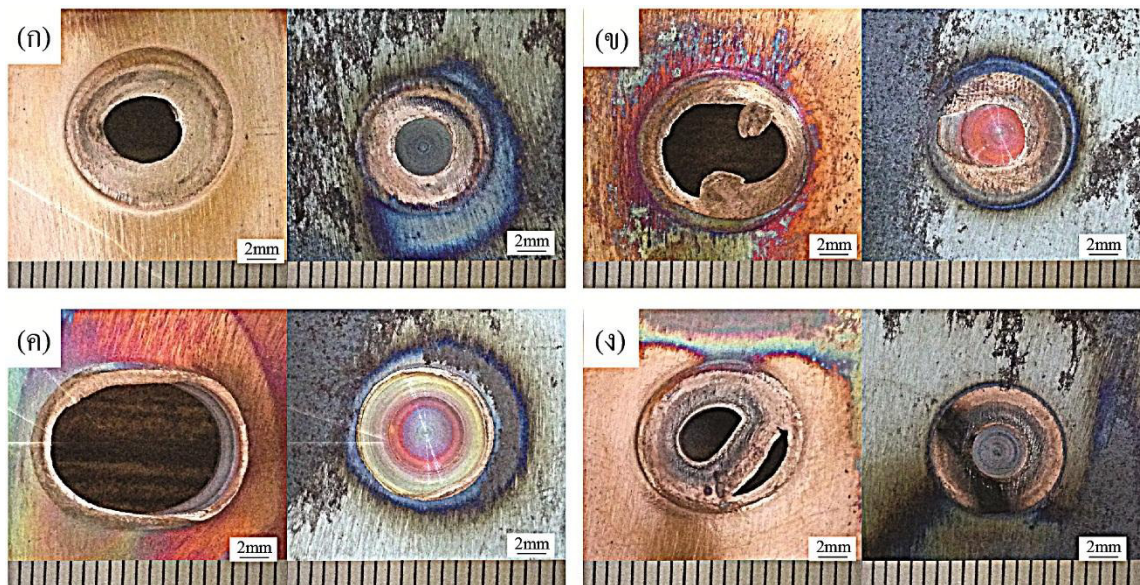
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของบ่าเชื่อมกับเวลาทดสอบ 4 วินาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยกับ เวลาทดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วย เวลาในการทดแช่ที่ 4 วินาที อัตราป้อนที่ 6 มิลลิเมตร/นาที ที่ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที พบว่าที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 3370 นิวตัน รอยต่อเกิดการพังทลายโดยถูกดึงขาดออกมาเป็นรูปกลมตามตัวกวนที่พื้นผิวพังทลายบริเวณอินเตอร์เฟซ แสดงดังรูปที่ 4.14 (ก) ที่ให้ค่าแรงพังทลายต่ำ เมื่อเพิ่มเวลาในการทดแช่มากขึ้นเป็น ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ผลของค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4367 นิวตัน พบบริเวณพังทลายถูกดึงขาดที่แผ่นทองแดงเล็กน้อยและมีทองแดงฉีกขาดติดบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนที่อยู่ด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 4.14 (ข) และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 3500 รอบ/นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของรอยต่อ มีค่าแนวโน้มเพิ่มสูงสุดโดยมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 4715 นิวตัน ขณะที่ลักษณะการพังทลายแผ่นทองแดงถูกดึงฉีกขาดเป็นรูใหญ่ เนื้อทองแดงติดอยู่บนเหล็กกล้าคาร์บอนมีจำนวน

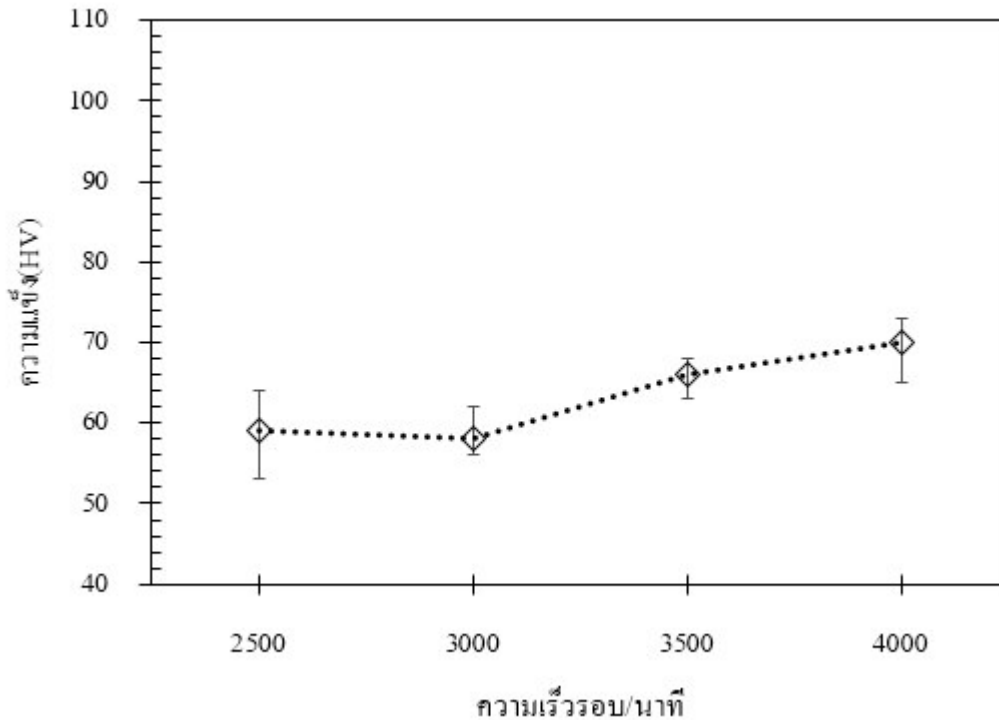
มากเป็นวงกลมใหญ่แสดงดังรูปที่ 4.14 (ค) และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 4000 รอบ/นาที พบว่าค่าค่าความแข็งดิ่งเดือนมีค่าลดลง พบการพังทลายแผ่นทองแดงด้านบนขนาดเป็นรูปกลม แสดงดังรูปที่ 4.14 (ง) ลักษณะคล้ายกับความเร็วยรอบ 2500 รอบ/นาทีซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดิ่งเดือนที่ให้ค่าแรงดิ่งเดือนมีแนวโน้มลดต่ำลง



รูปที่ 4.14 ลักษณะการพังทลายรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 4 วินาทีอัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ (ก)2500 รอบ/นาที (ข)3000 รอบ/นาที (ค)3500 รอบ/นาที (ง)4000 รอบ/นาที

รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าความแข็งที่อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที เวลากดแช่ 4 วินาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที บริเวณรอยต่อเชื่อมใต้ปากวงระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 พบว่า ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ในการเชื่อมเริ่มต้นพบว่าค่าความแข็งของบริเวณรอยต่อเชื่อมมีค่าเฉลี่ย 59 HV และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที พบว่าซึ่งมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ 3500และ4000 รอบ/นาที พบว่า ค่าความแข็งเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 66 HV และ 70 HV ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อ

เปรียบเทียบค่าแฉิ่งกับรอยฟังกหลายพบว่าค่าความแฉิ่งเฉลี่ยสูงส่งผลต่อการฟังกหลายที่รุนแรง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.5 และ 4.10

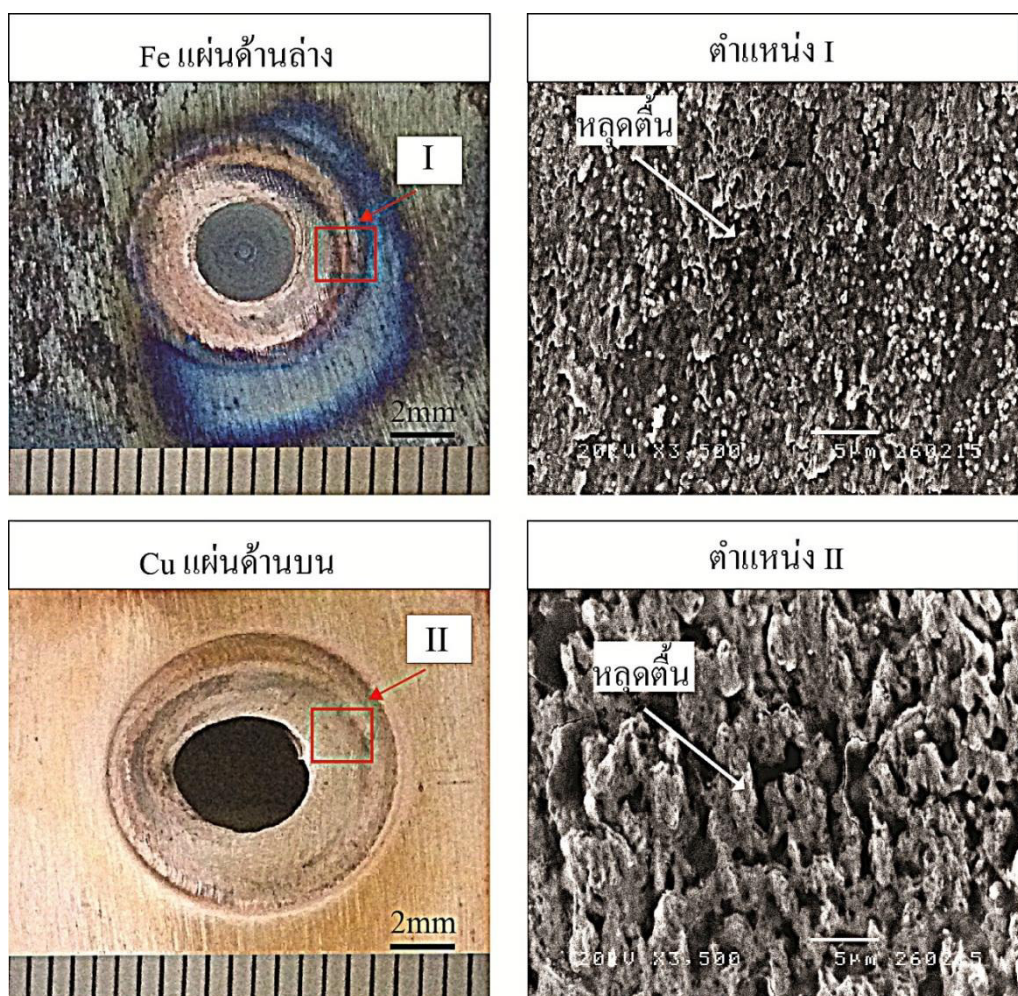


รูปที่ 4.15 ค่าความแฉิ่งบริเวณรอยต่อเชื่อมใต้ปากกวน ระหว่างทองแดง C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที เวลากดแช่ 4 วินาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที

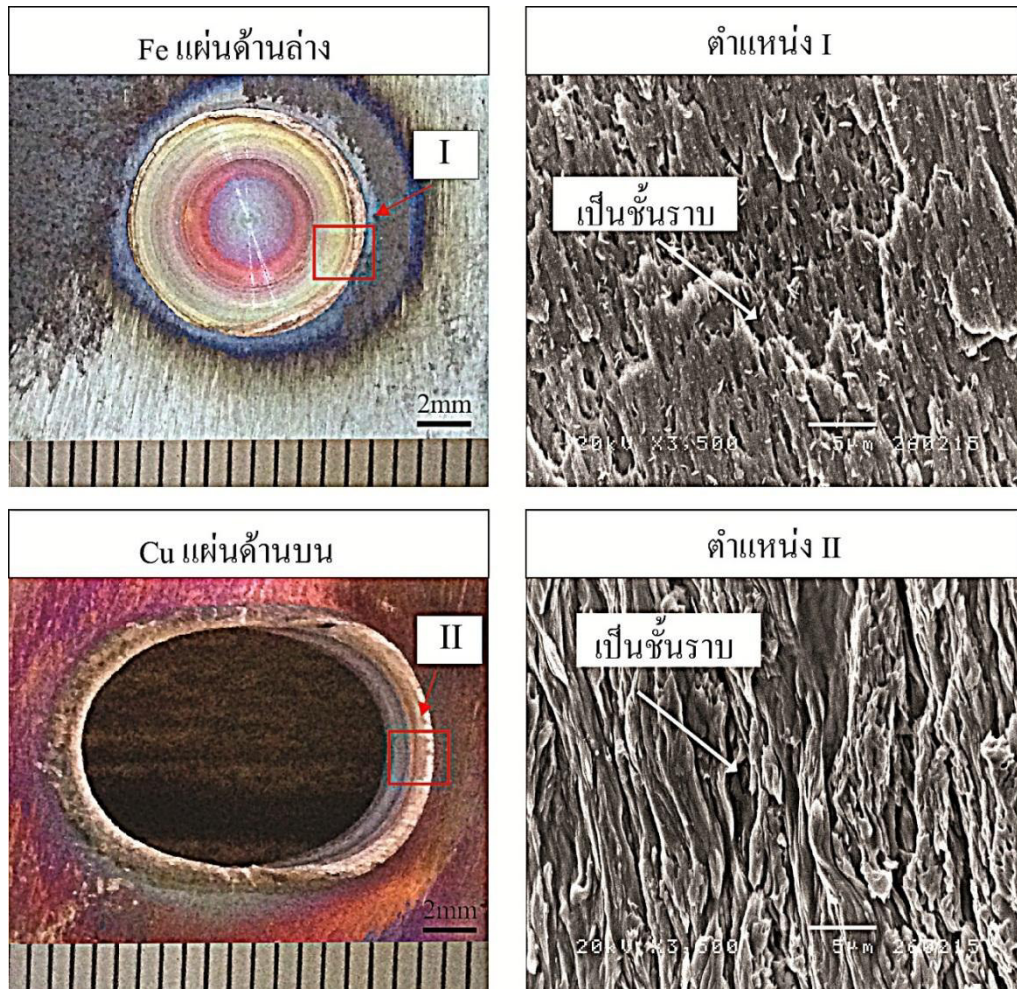
4.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบการฟังกหลายของรอยต่อเกย

รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ของต่อเกยที่เชื่อม ด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที และเวลาในการกดแช่ 2 วินาที ซึ่งเป็นรอยต่อเกยที่มีการดึงให้เกิดการฉีกขาดรอบๆตัวกวนและเกิดการฉีกขาดด้านทองแดงด้านบนเป็นวงกลม ทำการตรวจสอบตำแหน่งที่ I ของแผ่นเหล็ก และตำแหน่งที่ II ของแผ่นทองแดง พบว่าผิวการฟังกหลายมีลักษณะเป็นหลุดตื้น เป็นแผ่นระนาบ รอยฉีกขาดไม่พบการยึดตัวของโลหะออกมา ทำให้รอยต่อแสดงค่าความแฉิ่งแรงค่อนข้างต่ำ [20] เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการฟังกหลายของรอยต่อที่แสดงค่าความแฉิ่งสูง ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งเชื่อมด้วย

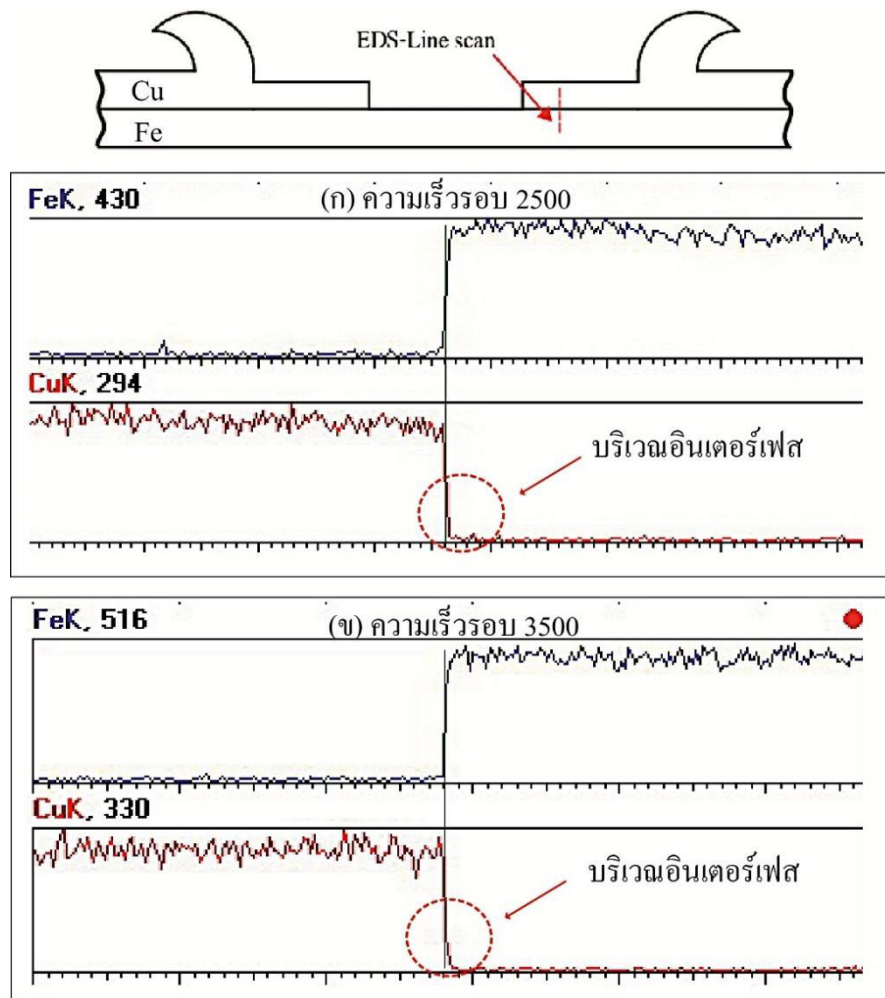
ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลาในการกัดแค่ 4 วินาที พบว่า รอยต่อแข็งแรงถึงสูงสุด มีรอยฉีกขาดทั้งสองตำแหน่งเป็นลักษณะการฉีกขาดหรือการพังทลายของ ทองแดงที่หลุดติดด้านบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน และมีทิศทางการฉีกขาดตามแนวตั้งของการ ทดสอบแรงดึงเหมือน ลักษณะการฉีกขาดหรือรอยพังทลายโดยรวมมีลักษณะเป็นชั้นราบขนาดใหญ่ ลึก และตื้นสลับกัน เกิดการยึดตัวของรอยฉีกขาดทั้งสองตำแหน่งทางด้านแผ่นทองแดงและแผ่น เหล็กกล้าคาร์บอน แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการพังทลายของรอยเชื่อมมีลักษณะแตกหักหรือพังทลาย แบบเหนียว [21] ซึ่งเป็นการพังทลายของรอยเชื่อมที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงถึงสูงสุด



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงถึงแผ่นต่ำ อัตราป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที เวลากัดแค่ 2 วินาที และความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที

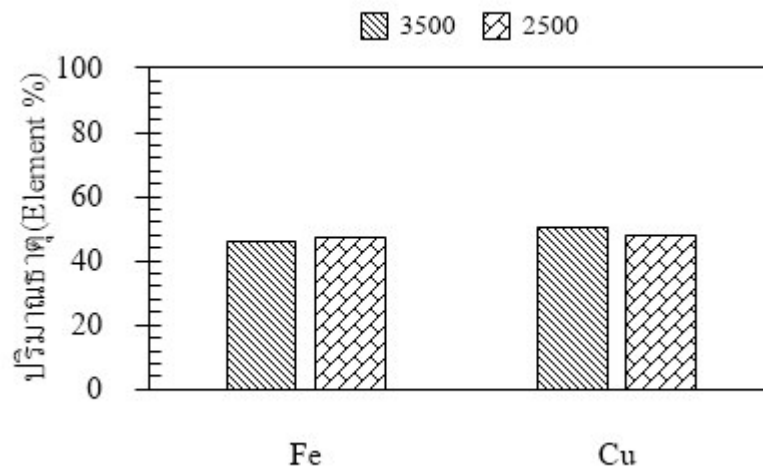


รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูง อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที เวลาคดแซ่ 4 วินาที และความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุด้วย EDS-Line scan รอยต่อเชื่อมของความเร็รรอบ 2500 รอบ/นาที และ 3500 รอบ/นาที

รูปที่ 4.18 ตำแหน่งการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS-Line scan ของรอยต่อที่เชื่อมด้วย ความเร็วรอบ 2500 ที่แสดงรอยต่อเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ พบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีความสม่ำเสมอและบริเวณอินเทอร์เฟซทองแดงมีการแทรกตัวในเหล็กกล้าคาร์บอนน้อย แสดงดังรูปที่ 4.18 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็รรอบ 3500 พบว่าความเข้มข้นของทองแดงจำนวนมากมีการกระจายตัวสม่ำเสมอเช่นเดียวกันแต่บริเวณอินเทอร์เฟซทองแดงมีการแทรกตัวในเหล็กกล้าคาร์บอนมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทรกตัวของทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนบริเวณอินเทอร์เฟซมากจะส่งผลทำให้ความแข็งดึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุ(Element %) ด้วยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ EDS-Line scan ด้วยความเร็วรอบ 2500 และ 3500 รอบ/นาที

รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุ (Element %) ด้วยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ EDS-Line scan โดยการวิเคราะห์ผ่านรอยต่อเชื่อมระหว่างทองแดงกับเหล็กกล้าคาร์บอนแสดงตำแหน่งการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.18 พบว่าที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาทีมีค่าความแข็งแรงดึงเหนือสูงที่บริเวณรอยต่อเชื่อมมีปริมาณของธาตุทองแดงพบการแทรกตัวมากกว่าในความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุในความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ที่มีค่าความแข็งแรงดึงเหนือต่ำพบว่าปริมาณของธาตุทองแดงและเหล็กกล้าคาร์บอนบริเวณรอยต่อพบว่ามีปริมาณธาตุน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้ ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อเคมีการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่าง ทองแดงผสม C11000 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 โดยมี การศึกษาตัวแปรการเชื่อม ที่ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน ความเร็วในการเดินป้อนตัวกวน และระยะเวลาในการกดแช่ โดยชิ้นงานที่เป็น ทองแดงผสม C11000 มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร และ ความหนา 1 มิลลิเมตร จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงเหนือนสูงสุด ของรอยต่อเคาระหว่างทองแดงผสม C11000 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ระยะเวลาในการสอดตัวกวน 1 มิลลิเมตร คือ ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที และ ความเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มม./ นาที ระยะเวลาในการกดแช่ 4 วินาที โดยให้ค่าแรงดึงเหนือน 4715 นิวตัน

5.1.2 รูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่แรงดึงเหนือนสูงสุด มีรูปแบบลักษณะ เป็นการพังทลายที่โลหะทองแดงผสม C11000 ซึ่งมีการยึดติดที่ดีกว่า ชิ้นงานทดสอบที่แรงดึงเหนือนต่ำ ลักษณะการพังทลายจะเป็นแบบ การพังทลายที่ผิวสัมผัส

5.1.3 การเพิ่มขึ้นของเวลากดแช่ส่งผลทำให้ความกว้างบริเวณบ่าเชื่อมของทองแดงผสม C11000 ที่อยู่ด้านบนมีขนาดลดลง ซึ่งมีแนวโน้มส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเหนือนลดลง

5.1.4 การเพิ่มขึ้นของเวลากดแช่ ส่งผลให้ความแข็งแรงบริเวณบ่าเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเหนือนลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นส่วนสำคัญ จะต้องเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน จะต้องทำการตกแต่งครีปที่เกิดจากการตัดให้หมด เพราะถ้ากำจัดครีปไม่หมดจะส่งผลกระทบต่อ การเชื่อมยึดของรอยต่อ และในการเตรียมชิ้นทดสอบจะต้องไม่ให้ชิ้นทดสอบเกิดการบิดเบี้ยว ซึ่งหากชิ้นทดสอบเกิดการบิดเบี้ยวก็จะส่งผลกระทบต่อ การเชื่อมยึดของรอยต่อเช่นกัน

5.2.2 ก่อนทำการเชื่อมควรทำความสะอาดของชิ้นทดสอบให้สะอาดปราศจากสิ่งสกปรกต่างๆ ในขณะที่ประกอบชิ้นทดสอบกับอุปกรณ์จับยึดจะต้องตรวจสอบชิ้นทดสอบไม่ให้เกิดการหลวมคลอน

5.2.3 เมื่อทำการเชื่อมไปสักระยะจะเกิดความร้อนสะสมในอุปกรณ์จับยึด เครื่องมือเชื่อม ควรหยุดเชื่อมเพื่อลดความร้อน

5.2.4 ควรตรวจสอบเครื่องมือเชื่อมเป็นระยะๆ เพราะการทดลองที่มีชิ้นงานจำนวนมาก จะทำให้ขนาดเครื่องมือเชื่อมเปลี่ยนแปลง

บรรณานุกรม

- [1] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, and K. Tour Sangsaraki, "The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints," *Materials & Design*, vol. 43, pp. 80-88, 1// 2013.
- [2] A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, and B. Sazgari, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 460, pp. 535-538, 7/28/ 2008.
- [3] C.-S. Jeon, S.-T. Hong, Y.-J. Kwon, H.-H. Cho, and H. N. Han, "Material properties of friction stir spot welded joints of dissimilar aluminum alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, pp. s605-s613, 2012/12/01 2012.
- [4] C. W. Tan, Z. G. Jiang, L. Q. Li, Y. B. Chen, and X. Y. Chen, "Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints produced by friction stir welding," *Materials & Design*, vol. 51, pp. 466-473, 10// 2013.
- [5] ประดิษฐ์ สังข์ศิริ, "ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกย อลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557.
- [6] K. Tanaka, M. Kumagai, and H. Yoshida, "Dissimilar joining of aluminum alloy and steel sheets by friction stir spot welding," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol. 56, pp. 317-322, 2006.
- [7] สุวินัย โสดาเจริญ, "อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมกวนแบบจุดต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงดึงของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และAA5052," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2557.
- [8] ASM International, "ASM Handbook, Volume 01 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys." vol. Volume 01, ed, 2005, pp. 337-380.
- [9] ASM International, "ASM Handbook, Volume 02 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," vol. Volume 02 -, 2005.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] S. M. Q. Yanga, Y.S. Satob, K. Okamoto, "Material flow during friction stir spot welding. Materials," *Science and Engineering* vol. A. 527, pp. 4389–4398, 2010.
- [11] Y. F. Sun and H. Fujii, "Microstructure and mechanical properties of dissimilar spot friction stir welded Zr55Cu30Al10Ni5 bulk metallic glass to pure copper," *Intermetallics*, vol. 33, pp. 113-119, 2// 2013.
- [12] มานพ ตันตระบัณฑิตย์, งานทดสอบวัสดุวิศวกรรม(ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2546.
- [13] นิรันดร์ เอี่ยมสาออง และรัชชชัย นามวิเศษ, "การเชื่อมพริกชั้นแบบจุดบนรอยต่อเกย," *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2549.
- [14] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. Vickers hardness [Online]. Available: https://th.wikipedia.org/wiki/Vickers_hardness
- [15] ASTM Committees, "ASTM E92 - 82 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials," in *2nd ed. ASTM (American Society for Testing and Materials). USA.*, ed, 2003.
- [16] อติสร เปลี่ยนดิษฐ, "อิทธิพลของรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304," *ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, วิศวกรรมศาสตร์*, 2557.
- [17] ASTM International, "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys E 407-99," in *Annual Book of ASTM Standard*. vol. 03.01, ed, 1996, pp. 1-21.
- [18] P. C. Lin, J. Pan, and T. Pan, "Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 74-89, 1// 2008.
- [19] J. M. Piccini and H. G. Svoboda, "Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-steel joints," *Procedia Materials Science*, vol. 9, pp. 504-513, // 2015.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, "A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 844-851, 4/1/ 2010.
- [21] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, and B. Zou, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 4461-4470, 9// 2011.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที

ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	132	136	137	176
2	117	137	167	158
3	142	115	115	145
ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ย	130	129	140	160
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	12	8	27	16
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	14	15	2	14

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที

ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	191	248	188	235
2	208	262	188	275
3	177	284	238	244
ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ย	192	265	205	251
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	16	19	34	24
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	15	17	17	16

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที

ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	259	287	248	247
2	239	304	269	267
3	242	266	285	290
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	246	286	268	268
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	12	19	18	22
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	7	19	19	21

ตารางที่ 4 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที

ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	126	200	141	240
2	121	155	130	220
3	161	175	114	226
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	136	177	128	229
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	25	23	13	11
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	15	22	15	9

ตารางที่ 5 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	178	248	186	258
2	180	235	169	239
3	201	266	179	274
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	186	250	178	257
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	15	16	8	17
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	8	15	9	18

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	296	317	310	314
2	250	332	325	299
3	297	301	317	329
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	281	317	318	314
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	16	15	8	15
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	31	15	7	15

ตารางที่ 7 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	248	356	364	301
2	246	349	358	287
3	247	346	320	306
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	247	350	347	298
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	1	6	17	8
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	1	5	27	11

ตารางที่ 8 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	222	329	312	242
2	237	353	325	261
3	250	311	328	253
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	236	331	322	252
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	13	22	7	9
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	14	20	10	10

ตารางที่ 9 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	272	262	209	262
2	236	226	235	276
3	253	246	230	266
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	253	245	224	268
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	18	17	10	8
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	17	18	16	6

ตารางที่ 10 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	317	354	325	279
2	286	381	294	293
3	300	341	323	263
ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ย	301	358	314	279
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	16	22	11	15
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	15	18	20	15

ตารางที่ 11 ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	311	365	397	325
2	318	376	336	309
3	325	385	379	338
ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนเฉลี่ย	318	375	371	324
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	7	9	8	14
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	7	10	35	15

ตารางที่ 12 ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที

ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	323	367	339	309
2	291	346	314	295
3	302	369	343	307
ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนเฉลี่ย	305	360	332	304
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	18	8	11	5
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	15	15	18	8

ตารางที่ 13 ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที

ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 2 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	239	343	292	268
2	238	333	256	254
3	229	349	274	265
ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนเฉลี่ย	235	341	274	262
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	4	8	18	6
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	6	9	18	8

ตารางที่ 14 ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที

ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 4 มม./นาที	เวลาในการกดแซ่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	310	341	342	281
2	270	352	316	288
3	292	383	360	275
ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนเฉลี่ย	291	359	339	281
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	19	24	21	7
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	20	17	23	6

ตารางที่ 15 ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที

ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 6 มม./นาที	เวลาทดในการแช่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	277	329	314	297
2	279	357	315	293
3	317	326	342	311
ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนเฉลี่ย	291	337	324	300
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	26	19	18	10
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	14	12	10	7

ตารางที่ 16 ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนของรอยเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที

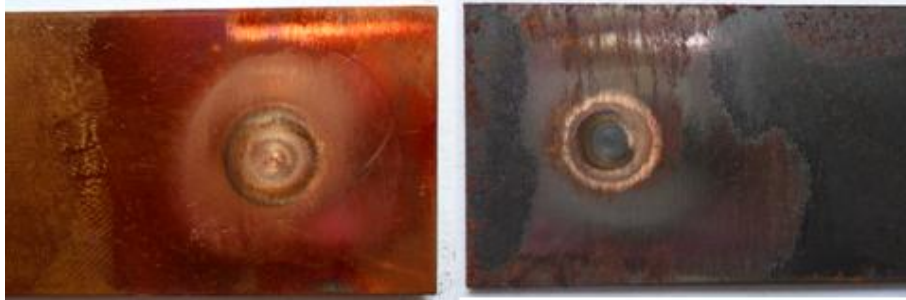
ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อัตราป้อน 8 มม./นาที	เวลาในการทดแช่ (วินาที)			
	2	4	6	8
ชั้นที่	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²	นิวตัน/มม. ²
1	260	242	247	224
2	246	231	237	231
3	277	255	268	202
ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนเฉลี่ย	261	243	250	219
ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด	16	12	18	12
ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	15	11	14	17

ภาคผนวก ข
ลักษณะรูปแบบการพังทลาย

ลักษณะรูปแบบการพังทลาย

ผลการทดสอบแรงดึงเฉือน ที่เวลาในการกดแ่งที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที ความเร็วรอบของตัวกวนที่ 2500, 3000, 3500 และ 4000 รอบ/นาที และอัตราป้อนที่ 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที

1) ลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ที่เวลาในการกดแ่งที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที และอัตราป้อนที่ 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที



รูปที่ 1 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกดแ่ง 2 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 2 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกดแ่ง 2 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 3 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 4 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 5 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 6 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 7 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 8 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแช่ 4 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 9 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 10 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 11 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 12 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 13 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 14 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 15 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 16 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที

2) ลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ที่เวลาในการรูดแซ่ที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที และอัตราป้อนที่ 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที



รูปที่ 17 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 18 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 19 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 20 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 21 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการทดสอบ 4 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 22 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการทดสอบ 4 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 23 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการทดสอบ 4 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 24 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 25 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 26 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 27 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 28 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 29 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 30 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 31 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 32 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที

3) ลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ที่เวลาในการรูดแช่ที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที และอัตราป้อนที่ 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที



รูปที่ 33 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแช่ 2 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 34 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแช่ 2 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 35 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแช่ 2 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 36 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 37 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 38 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 39 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 40 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 41 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 42 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 43 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 44 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 45 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 46 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 47 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 48 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที

4) ลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที ที่เวลาในการกัดแซ่ที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที และอัตราป้อนที่ 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที



รูปที่ 49 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 50 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 51 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 52 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 2 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 53 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 54 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 55 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 56 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 4 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



รูปที่ 57 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 58 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 59 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวถวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 60 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 6 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที



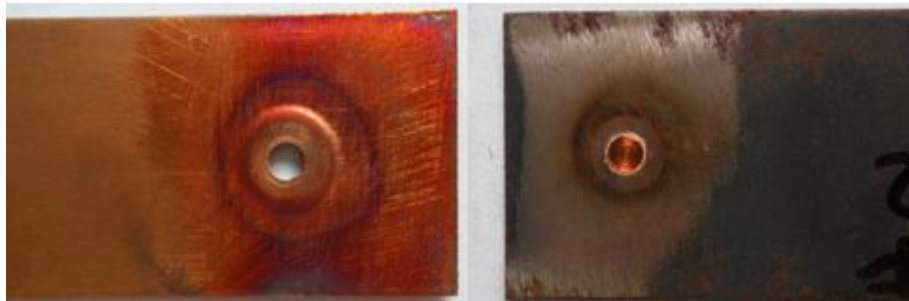
รูปที่ 61 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 2 มม./นาที



รูปที่ 62 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการรูดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 4 มม./นาที



รูปที่ 63 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 6 มม./นาที



รูปที่ 64 แสดงลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาที เวลาในการกัดแซ่ 8 วินาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการ
ด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ

**Thailand Welding and
Inspection Technology Conference**

วันที่ 5-6 พฤศจิกายน 2558

ณ โรงแรม เดอะ ซายน์ พัทยา จังหวัดชลบุรี

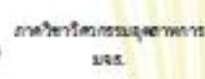


Organized by

Institute for Scientific and Technological Research and Services
King Mongkut's University of Technology Thonburi

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering
Mahidol University

Sponsors





Thailand Welding and Inspection Technology 2015 (TWIT 2015)
การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

การประชุมวิชาการ

ด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558

Thailand Welding and Inspection Technology 2015 (TWIT 2015)

วันที่ 5-6 พฤศจิกายน 2558

ณ โรงแรม เดอะ ซายน์ พัทยา จังหวัดชลบุรี

จัดโดย

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ร่วมกับ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

ลิขสิทธิ์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ISBN 978-974-456-770-3

จัดทำโดย ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



Thailand Welding and Inspection Technology 2015 (TWIT 2015)
การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สารจากอธิการบดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) มีวิสัยทัศน์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ มุ่งมั่นที่จะเป็นสถาบันอุดมศึกษาที่มีบทบาทโดดเด่นด้านการวิจัย การจัดการประชุมวิชาการจึงเป็นส่วนหนึ่งของพันธกิจ ที่มหาวิทยาลัยให้ความสำคัญอย่างต่อเนื่อง

การจัดการประชุมเชิงวิชาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558 หรือ Thailand Welding and Inspection Technology 2015 (TWIT 2015) ที่จัดขึ้นนี้ นับเป็นโอกาสอันดีที่งานนี้จะเป็นเวทีที่นักวิจัย นักวิชาการ ตลอดจนนักศึกษา ได้มาพบปะ แลกเปลี่ยนความเห็นและประสบการณ์ซึ่งกันและกัน อันจะก่อให้เกิดการเผยแพร่พัฒนาการและนวัตกรรมใหม่ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศไทยในท้ายที่สุด

เทคโนโลยีด้านการเชื่อมและการตรวจสอบ มีบทบาทและความสำคัญต่อวงการอุตสาหกรรมมาตั้งแต่ยุคอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการเชื่อมมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมของไทยที่ต้องอาศัยการลงทุนจากต่างประเทศเป็นหลัก โครงการขนาดใหญ่ต่างๆ ที่เกิดขึ้นมีความต้องการเทคโนโลยีทั้งด้านการเชื่อมและการตรวจสอบอย่างมาก เพื่อให้สามารถดำเนินการโครงการดังกล่าวให้สอดคล้องกับมาตรฐานนานาชาติที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรวมถึงความต้องการของลูกค้าและผู้ว่าจ้างด้วย

ผมขออวยพรให้การประชุมเชิงวิชาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558 นี้ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์รินทร์ ภูมิรัตน์)

อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



Thailand Welding and Inspection Technology 2015 (TWIT 2015)

การประชุมวิชาการด้านเทคนิคที่มีการเรียนรู้และแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ระหว่างปี 2558

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

16:35	Roles of Academic, Industrials, and Professional Organizations in Development of Welding and Non-Destructive Testing in Thailand (KMUTT, KMUTNB, WIT, TWIS, TSNDT, Industries, etc)	- การศึกษานโยบายการบูรณาการระหว่างมหาวิทยาลัยและหน่วยงานภาคเอกชนเพื่อส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่และนวัตกรรมในอุตสาหกรรม (ดร.พิเชฐ ตานะเสน และ อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง)
16:50		- การพัฒนาใช้เทคโนโลยีของอุตสาหกรรมวิจัยและนวัตกรรมเชิงบูรณาการเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ ดร.วิเชียร สุทธิรักษ์)
17:05		- ผลกระทบของสังคมและการเชื่อมโยงระบบนิเวศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและบริการในอุตสาหกรรม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ, อ.วิเชียร สุทธิรักษ์, อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง และ อ.สุวิทย์ ราษฎร์ศิริ)
17:40	Network Activity	
18:30	Banquet Dinner	

Friday November 6 th , 2015		
9:00	Seminar Session (40 min) Inspection Technology and Failure Analysis: The Case Study (นาง อธิญาญญา, SMA, Testing Inspection & Consulting Co., Ltd.)	Seminar Session (40 min) Integrated Systems for Welding and Cutting Automation (Dusana Vitkonkit, Thermal Mechanics Co., Ltd.)
9:40	Informative Session (30 min) TIG Speed Welding Technology (Jitamong Kanching, Phuwanan Intermole, Co.,Ltd.)	Informative Session (30 min) Statistical in Welding Technology (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ, Solution Center Co., Ltd.)
10:15	- สิทธิบัตรการตรวจวิเคราะห์วัสดุผสมจากเครื่องเชื่อมด้วยพลาสมา ความเข้มของแสง-ความร้อนของวัสดุเชื่อมผสม AA1100 และวัสดุเชื่อมผสม AA 3052 (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ อ.วิเชียร สุทธิรักษ์)	- การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยพลาสมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานเชื่อม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ อ.วิเชียร สุทธิรักษ์)
10:30	Break	
10:50	- Development of Vertical Welding Process on Thick Steel Plate using Hot-wire Laser Welding Method (Bekkachai Watanasak, Kaei Hattida, Manich Yamamoto, Kenji Shimozaki, Koki Kudo, Takaharu Ueno, Hiroshi Yajima, Tetsuro Kudo, Shin Nakayama, Tetsuro Hara, Syoko Tsudiyu, Hiroki Watanabe, and Takuro Kaneko)	- การศึกษานโยบายการบูรณาการในเชิงงานเชื่อมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ของ 2.25Cr-1Mn เป็นปัจจัยของเชื่อมออสเทนไนต์ (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ, อ.วิเชียร สุทธิรักษ์ และ อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง)
11:05	- สิทธิบัตรการตรวจวิเคราะห์วัสดุผสมจากเครื่องเชื่อมด้วยพลาสมา ความเข้มของแสง-ความร้อนของวัสดุเชื่อมผสม AA1100 และวัสดุเชื่อมผสม AA 3052 (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ อ.วิเชียร สุทธิรักษ์)	- พฤติกรรมของฟิล์มโลหะของฟิล์มผสมเชื่อมโลหะกล้า 3.5% โครเมียม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง)
11:20	- ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในผิวของกระบวนการเชื่อมด้วยพลาสมาของวัสดุผสมจากเครื่องเชื่อม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ, อ.วิเชียร สุทธิรักษ์ และ อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง)	- การศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมด้วยพลาสมาของวัสดุเชื่อมผสมออสเทนไนต์ของฟิล์มโลหะของฟิล์มผสมเชื่อมโลหะกล้า 3.5% โครเมียม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ, อ.วิเชียร สุทธิรักษ์ และ อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง)
11:35	- การวิเคราะห์ความละเอียดของฟิล์มเชื่อมด้วยพลาสมาของวัสดุเชื่อมผสมจากเครื่องเชื่อม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ อ.ศุภพร อรุณเรืองแสง)	- ความสามารถของฟิล์มเชื่อมด้วยพลาสมาในการเชื่อมของวัสดุเชื่อมโลหะกล้าของฟิล์มโลหะของฟิล์มผสมเชื่อมโลหะกล้า 3.5% โครเมียม (ดร.วิวัฒน์ ขวัญวิเศษ และ อ.วิเชียร สุทธิรักษ์)
11:50	- Award Presenting - Closing the Conference	
12:00	Lunch	



Thailand Welding and Inspection Technology 2015 (TWIT 2015)
 การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สารบัญ

	หน้า
ปกใน	i
สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ii
สารจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล	iii
สารจากผู้อำนวยการ สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	iv
สารจากประธานคณะกรรมการการประชุมวิชาการ TWIT 2015	v
กำหนดการประชุม	vi
สารบัญ	viii

บทความฉบับสมบูรณ์

A001	3-Dimensional Observation of the Interior Fatigue Fracture Mechanism on Friction Stir Spot Welded AISI 1012 Cold Rolled-steel <i>(Somp Jay-A-Ea, Hiroyuki Akahara, Masahiro Kuro, Asumi Sugita, Yutong Sun and Shiroshi Fujii)</i>	1
A002	Fatigue Damage Evaluation of Friction Stir Spot Welded AISI 1012 Cold Rolled-steel under Repeated Two-step Force Amplitudes <i>(Somp Jay-A-Ea, Hiroyuki Akahara, Masahiro Kuro, Asumi Sugita, Yutong Sun and Shiroshi Fujii)</i>	9
A003	Fatigue Damage Evaluation of Friction Stir Spot Welded AISI 1012 Cold Rolled-steel under Random Force Amplitudes <i>(Somp Jay-A-Ea, Hiroyuki Akahara, Masahiro Kuro, Asumi Sugita, Yutong Sun and Shiroshi Fujii)</i>	16
A004	ใช้วิธีตรวจสอบความเสียหายและตรวจสอบค่าการเชื่อมเป็นลักษณะการจุดต่อความถี่ของรอยเชื่อมแบบ AA1100 และจุดเชื่อมแบบ AA6062 <i>(สุวิณี ไตรเวทย์ และ พิสิทธิ์ คุ้มผล)</i>	24
A005	Development of Vertical Welding Process on Thick Steel Plate using Hot-wire Laser Welding Method <i>(Shinichi Wakabayashi, Kouji Habita, Minoru Yamamoto, Kazuhiro Suzuki, Kenji Kashi, Takahiro Terino, Hiroshi Takai, Tetsuo Fukui, Shin Nakayama, Tetsuo Nawa, Syoko Tsuchiya, Hiroshi Watanabe, Takaoji Kawamura)</i>	31
A006	ใช้วิธีตรวจสอบการเชื่อม ที่เชื่อมต่อค่าความถี่ของแรงเค้นของรอยเชื่อมแบบเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 กับรอยเชื่อมแบบ C11000 ศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยวิธีตรวจสอบแบบจุด <i>(สุวิณี ไตรเวทย์ และ พิสิทธิ์ คุ้มผล)</i>	38
A007	ผลการทดสอบจุดเชื่อมไฟฟ้าในลักษณะรอยเชื่อมแบบ สำหรับกระบวนการตรวจสอบการเชื่อมแบบไม่แบบ <i>(สุวิณี ไตรเวทย์, พิสิทธิ์ คุ้มผล และ ไชยวัฒน์ คุ้มผล)</i>	46
A008	การวิเคราะห์การไหลของเหล็กขึ้นรูปเพื่อศึกษาการเชื่อมแบบไม่แบบ <i>(สุวิณี ไตรเวทย์, พิสิทธิ์ คุ้มผล, สุวิณี ไตรเวทย์ และ สุวิณี ไตรเวทย์)</i>	52
B001	ความไม่แน่นอนของการทดสอบความถี่แบบการเชื่อมแบบเหล็กกล้าคาร์บอน <i>(สุวิณี ไตรเวทย์ และ สุวิณี ไตรเวทย์)</i>	60



อิทธิพลของเวลาคลench ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเดือนของรอยต่อเกลเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 กับทองแดงผสม C11000 ด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด

Influence of Holding Time on Tension Shear of Friction Stir Spot Welding Affecting on AISI 1015 Carbon Steel and C11000 Copper Alloy

วรพงษ์ สว่างศรี¹ อิศศิริพงษ์ กิมะพงษ์²

Worapong Sawangsrī¹ Kittipong Kimapong²

บทคัดย่อ

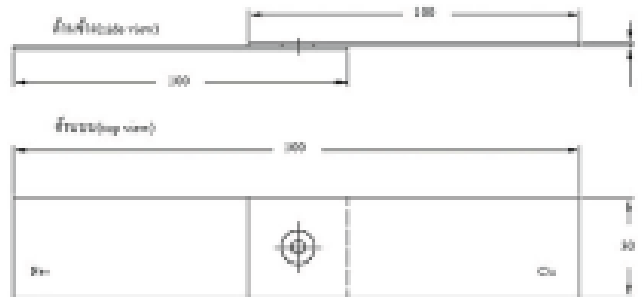
การเชื่อมเสียดทานความแบบจุดเป็นหนึ่งในกระบวนการเชื่อมที่สำคัญที่สามารถทำให้อิทธิพลของโลหะต่างชนิดกระบวนการนี้สามารถทำให้อิทธิพลของเวลาคลenchที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเดือนของรอยต่อเกลเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และทองแดงผสม C11000 รอยต่อที่ผ่านการเชื่อมถูกนำมาทำการตรวจสอบค่าสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มเวลาคลenchส่งผลทำให้เพิ่มความกว้างของพื้นที่การเชื่อมและลดความแข็งแรงดึงเดือนของรอยต่อเกล การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากสารเพิ่มปริมาณของทองแดงและเหล็กที่มีส่วนผสมของรอยต่อเกล ความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4715 นิวตันเมื่อเวลาคลenchมีค่า 6 มม.นาที

คำสำคัญ การเชื่อมแรงเสียดทานแบบจุด, รอยต่อเกล, เวลาคลench

Abstract

Friction stir spot welding (FSSW) is one of the welding processes that could produce the joint between dissimilar metals. This process could produce a joint that indicated a high strength with no filler metal requirement in process. This research aims to study an effect of a FSSW holding time on tensile shear strength of a lap-joint between AISI1015 carbon steel and C11000 copper alloy. The FSSW parameter was a holding time of 2-8 s, a rotating speed of 3500 rpm and a pin inserted rate of 6 mm/min. The welded lap joint was investigated for mechanical properties and microstructure. The summarized results are as follows. Increase of a holding time affected to increase the width of welded area and decrease the tensile shear strength of the lap joint. This was caused by an increase of the copper and iron amount at the joint interface. The maximum tensile shear strength was 4715 N when the holding time was about 6 mm/min.

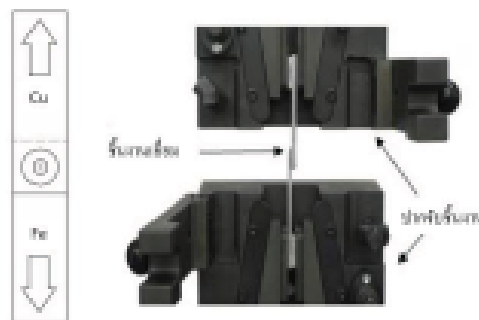
Keywords : Friction stir spot welding, Lap joint, Holding time



รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบคอตตอส (หน่วย : มิลลิเมตร) JIS Z 3136

2.1 ทดสอบแรงดึงเบื้องต้น

การเตรียมชิ้นงานเชื่อมเพื่อทดสอบความแข็งแรงดึงเบื้องต้นตามมาตรฐาน JIS Z 3136 ทำการทดสอบแรงดึงเบื้องต้นด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ยี่ห้อ United Model SHIM โดยให้ความเร็วในการดึงที่ต่อเนื่องที่ (Displacement speed) 1 มิลลิเมตร/นาที และแรงในอัตราคงที่ (Load speed) 0.50 MPa โดยทำการจับยึดชิ้นงานให้ยึดแน่นที่การเชื่อมอยู่ในแนวเดียวกับแนวการดึงและดึงจนจนกว่าชิ้นงานหรือชิ้นงานจากเนื้อเนื้อจะแตกหัก และบันทึกในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีการดึงของแท่งเชื่อมอาร์บอบมาตรฐาน AISI 1015 กับพอลิเอทิลีนมาตรฐาน CI1000

2.2 ทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมด้วยการทดสอบค่าความแข็ง โดยนำมาชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมการเชื่อมด้วยแรงเชื่อมตามแบบชุด บนรอยต่อของรอย ร่องที่เชื่อมด้วยมาตรฐาน AISI 1015 และ พอลิเอทิลีน CI1000 ที่ความถี่หรือรอบต่อวินาที 3500 รอบ/นาที อัตราเชื่อม 6 มิลลิเมตร/นาที และ เวลาในการเชื่อม 2-3 วินาที ตามลำดับ ทำการตรวจสอบความแข็งบริเวณรอยต่อด้วยหัวทดสอบของเครื่องวัดค่าความแข็งมาตรฐาน ASTM-E93-02 โดยแรงที่ใช้ในการทดสอบ 100 กรัม เวลาที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 10 วินาที และค่าของรอยต่อประมาณ 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 10 จุด ตามตำแหน่งการทดสอบบนเนื้อเชื่อมในรูปที่ 3 แล้วนำค่าเฉลี่ยเพื่อทำการเปรียบเทียบในแต่ละช่วงรอยต่อและหาแนวโน้มของค่าความแข็ง



รูปที่ 3 จุดการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมด้วยวิธี Vickers Micro hardness Test

2.3 ตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

นำชิ้นงาน ไปขัดเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างโลหะ และ โครงสร้างจุลภาค ทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ คัดเบอร์ 400, 600, 1000, 1200 และ 2500 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยผงขัดอะลูมินา (Aluminum Oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 1-3 ไมครอน การขัดจะขัดตาม



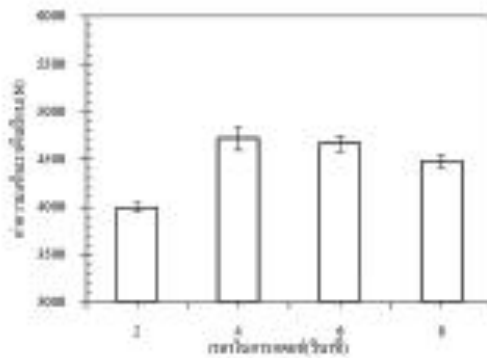
เครื่องจักร โครงสร้างที่มีลักษณะจุดที่เชื่อมเป็นหัวตึกเหล็กหนา โดยการนำผงเชื่อมชนิดที่มีส่วนผสมของธาตุผสมกับธาตุเติมที่จัดผิวหน้าเป็นมันเงาผิวหน้าและ
 ศึกษารายละเอียดของหัวตึกของข้อต่อ เมื่อใช้แม่พิมพ์ และทำการกัดกรวดเพื่อให้เห็นบริเวณต่างๆของผิวชิ้นงาน โดยมีส่วนผสมของสารละลายไฮโดรฟลูออริก
 10 มิลลิโมลาร์ สารไนตริก 5 มิลลิโมลาร์ และน้ำกลั่น 5 มิลลิโมลาร์ ตามมาตรฐาน ASTM D607

3.ผลการวิจัย

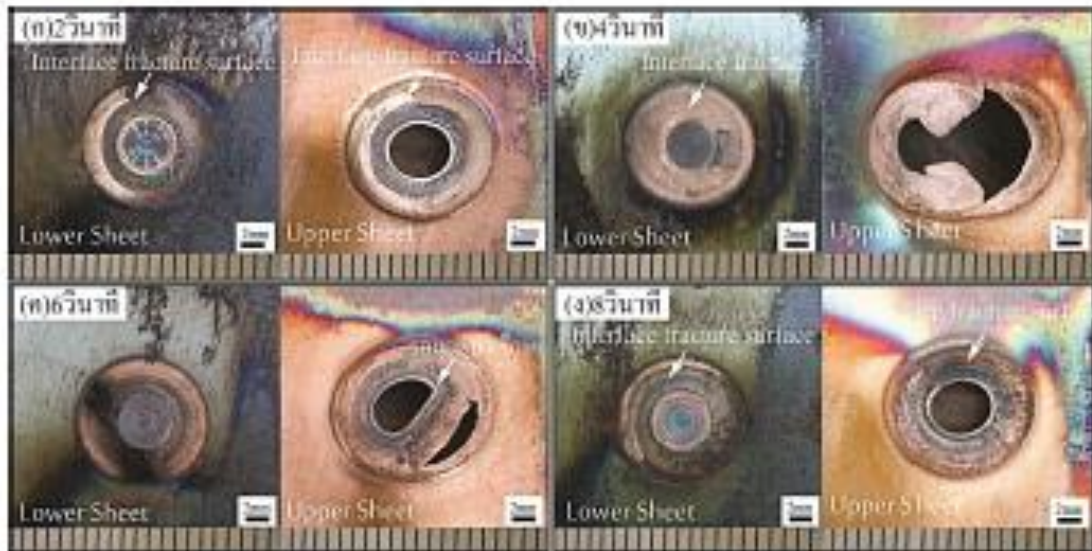
C11000 AISI1015	2 วันาที	4 วันาที	6 วันาที	8 วันาที
Upper Surface				
Cross-section				

รูปที่ 4 ผิวหน้าของเชื่อมและ โครงสร้างเมทาลูร์ยีคที่เชื่อมด้วยความร้อน 3500 องศาเซลเซียส
 อัตราเย็น 6 มิลลิเมตรนาที และเวลาหลอม 2-8 วันาที

รูปที่ 4 แสดงผิวหน้าของเชื่อมและ โครงสร้างเมทาลูร์ยีคที่เชื่อมด้วยความร้อน 3500 องศาเซลเซียส อัตราเย็น 6 มิลลิเมตรนาที และ
 เวลาหลอม 2 - 8 วันาที พบว่าที่เวลาหลอม 2 วันาที บริเวณรอบนอกของปลั๊กเชื่อม (Shielded air zone) สัทธิบริบผิวหน้าจะกว้างที่บริเวณขอบแนวเชื่อม
 และเมื่อเวลาเชื่อมมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดงดังในรูปที่ 4 (ก) บริเวณผิวด้านบน (Upper Surface) ของรอยเชื่อม โดยวัดค่าความกว้างของรอย
 เชื่อมบริเวณหน้าตัดรอยเชื่อม (Cross-Section) มีค่าประมาณ 16 มิลลิเมตร ดังในรูปที่ 4 (ข) และเมื่อเวลาหลอมที่ 4 วันาที พบว่าลักษณะการเกิด
 กริมและรอยแตกขาดของกริมเกิดขึ้นอย่างชัดเจน แต่มีค่าความกว้างบริเวณรอยเชื่อมของปลั๊กเชื่อมมีขนาดลดลงมีค่าประมาณ 13 มิลลิเมตร
 ดังในรูปที่ 4 (ค) บริเวณผิวด้านบนและบริเวณหน้าตัดรอยเชื่อม ขณะที่เมื่อทำการเพิ่มเวลาหลอมที่ 6 และ 8 วันาที พบว่าบริเวณกริมรอบ
 นอกที่มีลักษณะสีน้ำตาลแดงจากการเกิดกริมและรอยแตกขาดของกริมจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลงโดยมีค่าประมาณ 12 และ 11 มิลลิเมตร
 ดังในรูปที่ 4 (ง) และ (จ) ซึ่งจากการศึกษาการเกิดกริม Phase and Structure ได้สืบสาววิถีของผิวด้านบนจะถูกยึดของสภาพบริเวณรอบนอกของ
 ปลั๊กเชื่อม [5]

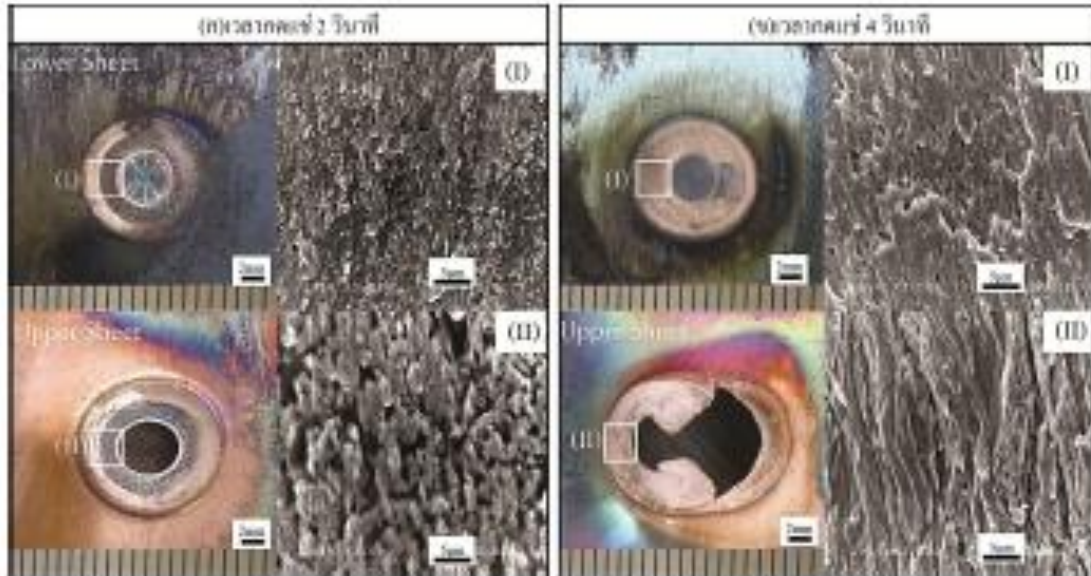


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของหัวเชื่อมกับเวลาในการหลอม 2-8 วันาที และความร้อน 3500 องศาเซลเซียส
 อัตราเย็น 6 มิลลิเมตรนาที

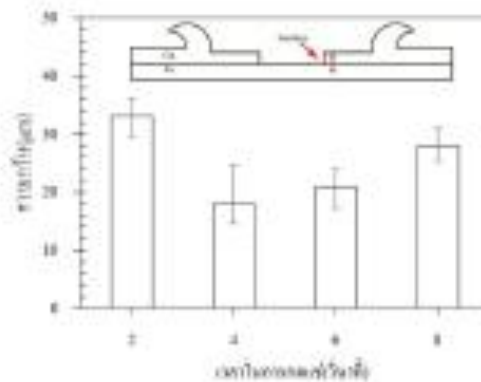


รูปที่ 6 ลักษณะการพังทลายของท่อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม 3500 รอบต่อนาที
 อัตราป้อนสาร และอุณหภูมิ และเวลาทดสอบ 2-8 วันภาย

รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึงเชิงสถิตของชิ้นงานเชื่อมด้วยแรงดึงของพลาสม่าแบบจุด ระหว่างสมรรถนะการเชื่อมของมาตรฐาน ASME B31.3 กับของผล
 พลาสมา C11000 ที่เวลาในการทดสอบที่ 2 - 8 วันภาย อัตราป้อนสาร 6 มิลลิเมตร/นาที ที่ความถี่รอบ 3500 รอบ/นาที พบว่าที่เวลาทดสอบที่สั้น
 เริ่มที่ 2 วันภาย มีค่าความแข็งแรงเชิงสถิตประมาณ 3992 นิวตัน การพังทลายของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่ด้านล่าง (Lower Sheet) และแผ่น
 ของผลงออยู่ด้านบน (Upper Sheet) พบบริเวณที่พังทลายถูกดึงออกจากรอยเชื่อมตรงตามแนวความถี่ที่ผิวพังทลายบริเวณอินเตอร์เฟซ (Interface
 Fracture Surface) บริเวณรอยเชื่อมจุด [6] แสดงดังรูปที่ 6 (ก) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Piccini and Svoboda ที่ใช้ค่าแรงดึงของค่า [5] แต่เมื่อ
 เพิ่มเวลาในการทดสอบมากขึ้นเป็น 4 วันภาย ผลของค่าความแข็งแรงเชิงสถิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4715 นิวตัน แสดงดังใน
 รูปที่ 5 และเมื่อเพิ่มเวลาทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 6 วันภาย และ 8 วันภาย พบว่าค่าความแข็งแรงเชิงสถิตของรอยเชื่อมเชิงสถิตแบบจุดมีค่าแนวโน้มลดลง
 โดยที่ค่าความแข็งแรงเชิงสถิตประมาณ 4662 นิวตัน และ 4477 นิวตัน ตามลำดับ ขณะที่ลักษณะการพังทลายที่เวลาในการทดสอบ 4 วันภาย พบว่า
 ที่แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่ด้านล่างของรอยเชื่อมมีลักษณะการแตกหักที่บริเวณผิวชั้น (Interface Fracture) และมีรอยร้าวที่เชื่อมของ
 ของผลงอที่อยู่บริเวณแผ่นเหล็กซึ่งมีลักษณะการแตกหักที่บริเวณรอยเชื่อมที่รุนแรงของเมื่อใช้ค่าของ Piccini and Svoboda ที่
 ใช้ค่าแรงดึงของค่าของผลงอที่เวลาในการทดสอบที่สั้นตามแนวแรงดึงเชิงสถิตในการทดสอบที่ค่าความแข็งแรงเชิงสถิตสูงดังในรูป
 ที่ 5 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการแตกหักที่เวลาทดสอบ 6 วันภาย แสดงดังในรูปที่ 6 (ก) พบว่าการพังทลายของเมื่อใช้ค่าของผลงอการแตกหัก
 รูปบริเวณใกล้รอยเชื่อม ซึ่งขณะที่ลักษณะการแตกหักที่เวลาทดสอบที่ 8 วันภาย พบว่า การพังทลายมีลักษณะคล้ายกับเวลาในการทดสอบที่ 2
 วันภาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงเชิงสถิตที่ค่าความแข็งแรงเชิงสถิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปในการเชื่อมเชิงสถิต อย่างไรก็ตาม
 ชิ้นงานเชื่อมเชิงสถิตแบบจุดที่ใช้ค่าความแข็งแรงเชิงสถิตสูงและค่าจุดของพลาสมาทดสอบด้วยการพังทลายด้วยแรงดึงของพลาสมาแบบจุดของ
 การทดสอบดังในรูปที่ 7 พบว่า การพังทลายของรอยเชื่อมที่เวลาทดสอบ 2 วันภาย ที่ใช้ค่าความแข็งแรงเชิงสถิตต่ำสุด พบว่าการแตกหักที่ผิว
 รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นแบบรอยร้าว (Disrupt) ของแผ่นเหล็กของค่าของ (I) และ (II) แสดงผลดังในรูปที่ 7 (ก) และเมื่อเปรียบเทียบกับเวลา
 ทดสอบ 4 วันภาย พบลักษณะการพังทลายอีกจากลักษณะที่บนชิ้นงานตามลักษณะการเชื่อมที่คาร์บอนอยู่ด้านล่างส่วนใหญ่มักเป็นแบบเฉือน (Shear fracture) บริเวณ
 ชั้นที่เชื่อมของแผ่นเหล็ก [7] แสดงดังในรูปที่ 7 (ข) ส่วนของ (I) และแผ่นของผลงอด้านบนมีลักษณะการพังทลายอีกจากบริเวณที่ตรวจสอบเป็นแบบ
 รอยเชื่อมของผลงอในรูปที่ 7 (ข) ส่วนของ (II)

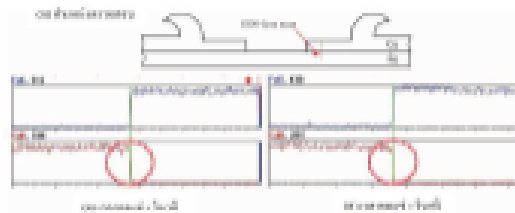


รูปที่ 7 ภาพถ่าย Scanning electron microscope (SEM) การตัดขวางของรอยเชื่อมที่ค่าความเข้มแสงคือ 10 ไมครอนของแผ่นที่ 4 และ 2 วินาที

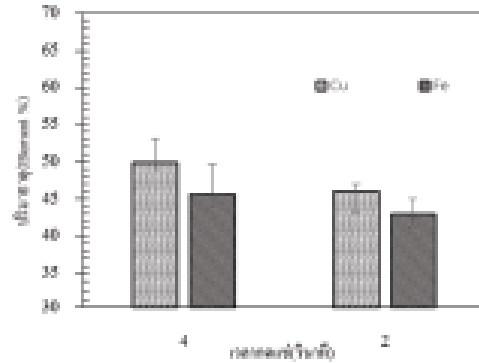


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยต่อเชื่อม กับเวลาในการเชื่อมและความเร็วของหัวถั่ว 3500 รอบต่อนาที ที่อัตราเชื่อมคงที่ 6 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 8 แสดงการวัดค่าความกว้างบริเวณฮินเทอร์ฟอซพบว่า ที่เวลาเชื่อม 2 วินาที มีช่องว่าง (Gap) ที่ตำแหน่งรอยเชื่อมมีค่าความกว้างของรอยต่อระหว่างทองแดงกับเหล็กมีค่าความกว้างประมาณ 35 ไมครอน ส่วนโลหะที่มีค่าความเข้มแสงเดิมมีขนาด เมื่อกั้นเวลาเชื่อมที่ 4 วินาที บริเวณรอยต่อเชื่อมมีค่าความกว้างมีแนวโน้มลดลงเหลือมีค่าประมาณ 18 ไมครอน ส่วนโลหะที่มีค่าความเข้มแสงเดิมมีขนาดสูง แสดงดังในรูปที่ 8 และเมื่อเพิ่มเวลาเชื่อมที่ 6 และ 8 วินาที พบว่าค่าความกว้างบริเวณรอยต่อเชื่อมมีค่าความกว้างเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เชื่อมเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อค่าความเข้มแสงเดิมมีแนวโน้มลดลง



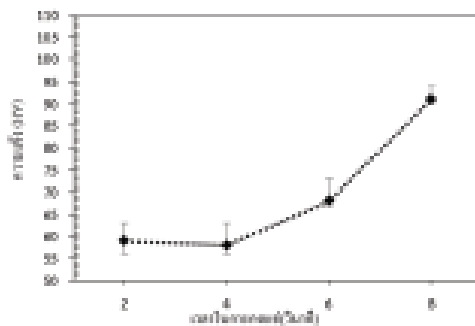
รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของธาตุด้วย EDS-Line scan ของรอยเชื่อม



รูปที่ 10 ปริมาณธาตุ (Element %)

รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุ (Element %) ของการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ EDS-Line scan ของรอยเชื่อม 2 และ 4 วันชาติ

รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุ (Element %) ของการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ EDS-Line scan โดยการวิเคราะห์ตำแหน่งรอยเชื่อมระหว่างรอยเชื่อมระหว่างรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมและตำแหน่งการวิเคราะห์รูปที่ 9 พบว่าที่เวลาทดสอบที่ 4 วันชาติ มีความเข้มข้นของธาตุที่บริเวณรอยเชื่อมเป็นปริมาณของธาตุของแหล่งผสมการเชื่อมต่ำกว่าเวลาที่ 2 วันชาติ (10) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุในเวลาลดลงที่ 2 วันชาติ ที่มีความเข้มข้นของธาตุที่ต่ำกว่าเวลาที่ 4 วันชาติ (10) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุของแหล่งและที่ทำการเชื่อมบริเวณรอยเชื่อมพบว่าปริมาณธาตุเมื่อเวลาที่ 2 วันชาติ (10) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่เวลาทดสอบที่ 4 วันชาติ (10)



รูปที่ 11 ค่าความเข้มข้นบริเวณรอยเชื่อมที่ได้จากการ ระหว่างรอยเชื่อม C 11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 ที่เวลาทดสอบ 2 - 8 วันชาติ

รูปที่ 10 ผลการทดสอบค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบ 2 - 8 วันชาติ ที่ใช้การเชื่อมด้วยไฟฟ้า ความเร็วเชื่อม 3500 รอบนาที บริเวณรอยเชื่อมระหว่างรอยเชื่อมและที่ทำการเชื่อม พบว่า ค่าความเข้มข้นของบริเวณรอยเชื่อม มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความเข้มข้นของบริเวณรอยเชื่อมที่ค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และสำหรับรูปที่ 11 คือ เมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบ

4. สรุปผลการทดลอง

กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบหมุนบริเวณระหว่างรอยเชื่อม C11000 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1015 โดยใช้เหล็กกล้าเครื่องมือ SCD 11 เป็นตัวกลาง ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเชื่อมรอยเชื่อมที่เวลาทดสอบที่ 2 วันชาติ พบว่าค่าความเข้มข้นของธาตุที่บริเวณรอยเชื่อมที่เวลาทดสอบที่ 2 วันชาติ (10) เมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบที่ 4 วันชาติ (10) และเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบที่ 6 วันชาติ (10) และเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบที่ 8 วันชาติ (10) และเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบที่ 8 วันชาติ (10) และเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นที่เวลาทดสอบที่ 8 วันชาติ (10)



5. เนื้อหาการประชุม

ผู้วิจัยของบทคัดย่อ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์อุตสาหกรรม/ สถาบันอุตสาหกรรม/ สถาบันวิศวกรรมอุตสาหกรรม และ วิศวกรเทคนิค
 จำนวน 10 ท่านจะบรรยายเกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเชื่อม

6. บรรณานุกรม

- [1] H. Bimeli, A. Tavakoli, M. Tour Sangurski, and K. Tour Sangurski, "The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints," *Materials & Design*, vol. 43, pp. 88-98, 10/ 2013.
- [2] Y. F. Sun and H. Fujii, "Microstructure and mechanical properties of dissimilar spot friction stir welded Zn55Cu30Al10Ni5 bulk metallic glass to pure copper," *Intermetallics*, vol. 33, pp. 113-119, 20/ 2013.
- [3] D. A. Wang and S. C. Lee, "Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum-6061-T6 sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 194, pp. 291-297, 2007.
- [4] D. Wang, J. Shen, and L.-r. Wang, "Effects of the types of overlap on the mechanical properties of FSSW welded AZ series magnesium alloy joints," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 19, pp. 231-235, 2012/03/01 2012.
- [5] J. M. Vecini and H. G. Sobhede, "Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-steel joints," *Proceeds Materials Science*, vol. 9, pp. 304-313, 8/ 2015.
- [6] F. C. Lin, J. Pan, and T. Pan, "Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 34-49, 10/ 2008.
- [7] W. Li, J. Li, Z. Zhang, D. Gao, W. Wang, and C. Deng, "Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect," *Materials & Design*, vol. 62, pp. 247-254, 10/ 2014.

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นายวรพงศ์ สว่างศรี
วัน เดือน ปีเกิด	7 ธันวาคม 2530
ที่อยู่	หมู่บ้านเอื้ออาทรศรีอินทราทิตย์ 1014 ม.2 ต.ท่าแค อ.เมือง จ.ลพบุรี
การศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ(คอบ.) ปีการศึกษาที่สำเร็จ พ.ศ.2553
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งครูจ้างสอน แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท พ.ศ. 2557 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	083-3088139 , 096-6644719
อีเมล	onizukeng@gmail.com