

การศึกษาทดลองในการเชื่อมต้านทานแบบจุดรอยต่อเกยระหว่าง  
อลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

RESISTANCE SPOT WELDING EXPERIMENTAL STUDY OF  
AA 1100 ALUMINUM ALLOY AND SGACD ZINC COATED  
STEEL LAP JOINT

ทิวพร ใจกว้าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาทดลองในการเชื่อมต้านทานแบบจุ่มรอยต่อเกยระหว่าง  
อลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

ทิวพร ใจกว้าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**RESISTANCE SPOT WELDING EXPERIMENTAL STUDY OF  
AA 1100 ALUMINUM ALLOY AND SGACD ZINC COATED  
STEEL LAP JOINT**

**THIWAPORN JAIKWANG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN MANUFACTURING ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**ACADEMIC YEAR 2013**

**COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาทดลองในการเชื่อมต้านทานแบบจุดรอยต่อเกยระหว่าง  
อลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

Resistance Spot Welding Experimental Study of AA1100 Aluminum  
Alloy and SGACD Zinc Coated Steel Lab Joint

ชื่อ - นามสกุล

นางทิวพร ใจกว้าง

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาทดลองในการเชื่อมด้านทานแบบจุ่มรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD
ชื่อ- นามสกุล	นางทิวพร ใจกว้าง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

การเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าต้องอาศัยกระบวนการควบคุมตัวแปรในการเชื่อมให้มีความเหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากจุดหลอมละลายของวัสดุทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ความต้องการในการใช้รอยต่อแบบนี้มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะรอยต่อชนิดนี้สามารถลดน้ำหนักรวมของรถยนต์และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบจุ่มที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อวัสดุอลูมิเนียมกับเหล็กกล้าโดยการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้การทดสอบรอยต่อวัสดุอลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ที่เชื่อมต่อกันด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุ่ม โดยการทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรการเชื่อมซึ่งประกอบด้วย กระแสไฟเชื่อม เวลา கடແຂ່ງ และแรงดัน கடປລາຍ อีเล็กโทด จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบแรงดึงเพื่อหาความแข็งแรงของรอยต่อและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อเปรียบเทียบกัน

จากผลการทดลองพบว่าขนาดของกระแสไฟ เวลา கடແຂ່ງ และแรง கடທີ່ใช้ในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ เพิ่มขนาดกระแสไฟจะทำให้การกระจายตัวของอลูมิเนียมบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อเกิดขึ้น เวลา கடແຂ່ງ โทดที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่งผลทำให้การเกาะยึดของโลหะดีขึ้น และการใช้แรงดัน கடอีเล็กโทดที่เหมาะสม จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงสูง ซึ่งขนาดตัวแปรการเชื่อมที่สุดคือการใช้ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลา கடແຂ່ງ 10 cycle และแรงดัน கடປລາຍ อีเล็กโทด 0.10 MPa ซึ่งจะให้รอยต่อมีความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 2200 N อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าตัวแปรที่ไม่เหมาะสมมีผลทำให้โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยต่อเกยเสียรูปและการเกาะยึดของวัสดุที่ผิวสัมผัสลดลง ส่งผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง โครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกยอยู่ในระดับ C ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z31339 สามารถนำไปใช้ในงานผลิตรถยนต์ได้

**คำสำคัญ** อลูมิเนียม เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี การเชื่อมด้านทานแบบจุ่ม ความแข็งแรง

**Thesis Title** Resistance spot welding experimental study of AA1100 aluminum alloy and SGACD zinc coated steel lap joint  
**Name - Surname** Ms. Thiwaporn Jaikwang  
**Program** Manufacturing Engineering  
**Thesis Advisor** Asst. Prof. Kittipong Kimapong, Ph.D.  
**Academic Year** 2013

## ABSTRACT

Joint welding of an aluminum alloy and a carbon steel are difficult due to of the difference of the material properties. However, the need of this joint is increasing in an automobile industry because it could reduce the gross automobile weight and reserve the energy. This research aims to study the influence of the resistance spot welding parameters of the aluminum and the carbon steel materials on the tensile strength and the welded microstructure.

The experiments were carried out by using the AA1100 aluminum alloys and the SGACD zinc coated steel. The resistance spot welding process was conducted by varying the three welding parameters i.e. welding current, holding time and electrode tip pressure. The welded samples were tested by using tensile test and microstructure test. The tests results were analyzed to identify the influences of those parameters.

The experimental results showed that welding current, holding time and electrode tip pressure were directly influence the tensile strength and the welded microstructure the joints. The shear tensile strength of the joint tended to increase when increasing the current and the holding time. However applied too high electrode tip pressure was affected the joint macrostructure and microstructure and also decreased the bonging between the materials. The optimum parameters for the electrode tip pressure were 95 kA welding current, 10 cycle holding time and 0.10 MPa tip pressure, which had a tensile strength of up to 2200 N however. The macrostructure profile of the joint was similar to the C class of the JIS Z31339, which could apply in automobile industry.

**Keyword** aluminum, zinc coated steel, resistance spot welding, strength

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิวกร อ่างทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทร์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาลดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาบ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ได้จนประสบความสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านในการให้ความร่วมมือและอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์รวมทั้งสถานที่ในการทดลองทดสอบวัสดุและศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้ผลการทดสอบขั้นสูง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้ความรักและกำลังใจในการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตจนสำเร็จการศึกษา

ทิวาพร ใจกว้าง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(16)
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding).....	3
2.2 ส่วนประกอบของเครื่องเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด.....	5
2.3 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อม.....	10
2.4 วัสดุ.....	12
2.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	18
2.6 การส่องกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คูโครงสร้างมหภาค.....	22
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
<b>3 วิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>29</b>
3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	29



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ .....	49
4.1 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กไว้ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านล่าง .....	49
4.2 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและแผ่นเหล็กไว้ด้านล่าง .....	57
4.3 อิทธิพลของเวลากดแซ่ที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็ก SGACD และ อลูมิเนียม AA1100.....	65
4.4 อิทธิพลของแรงดันกดที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็ก SGACD และอลูมิเนียม AA1100.....	85
4.5 วิเคราะห์ลักษณะรอยเชื่อมด้วยเทคนิค Electron Probe Microanalysis .....	104
5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	121
5.1 สรุปผล .....	121
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	122
รายการอ้างอิง.....	123
ภาคผนวก.....	127
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	128
ภาคผนวก ข รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบ .....	149
ภาคผนวก ค กราฟวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน .....	155
ภาคผนวก ง JIS Z3139 .....	162
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	164
ประวัติผู้เขียน .....	178

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่	2.1 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม.....	13
ตารางที่	2.2 สมบัติของอลูมิเนียมผสม.....	14
ตารางที่	2.3 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กที่ร้อนทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน	16
ตารางที่	2.4 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กที่เย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน.....	17
ตารางที่	2.5 รายละเอียดของน้ำยากัดขึ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก.....	21
ตารางที่	2.6 รายละเอียดของน้ำยากัดขึ้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก.....	22
ตารางที่	3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม AA1100.....	30
ตารางที่	3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD.....	30
ตารางที่	3.3 การเลือกใช้วัสดุสำหรับการเชื่อมแบบจุด.....	30
ตารางที่	4.1 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles.....	75
ตารางที่	4.2 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 2 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ตั้งแต่ 1 - 20 Cycles.....	75
ตารางที่	4.3 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดตั้งแต่ 0.10 - 0.30 MPa.....	94
ตารางที่	4.4 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 2 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดตั้งแต่ 0.10 - 0.30 MPa.....	95
ตารางที่	4.5 ปริมาณธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง.....	106
ตารางที่	4.6 ปริมาณธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง.....	108
ตารางที่	4.7 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซ (ตำแหน่ง A และ B)....	109
ตารางที่	4.8 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมบริเวณรอยพังทลายวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA-Mapping.....	109

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	การเกิดความต้านทานในการเชื่อมด้านทานแบบจุด..... 3
รูปที่ 2.2	รอบการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด ..... 5
รูปที่ 2.3	รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุด..... 7
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความแข็งแรงของรอยเชื่อม..... 11
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงกด..... 12
รูปที่ 2.6	หลักการของแรงเหนือนเดี่ยว..... 19
รูปที่ 2.7	การเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค..... 20
รูปที่ 2.8	การขัดผิวชิ้นทดสอบ..... 21
รูปที่ 2.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด..... 24
รูปที่ 2.10	อำนาจแยกแยะของ SEM..... 24
รูปที่ 2.11	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด..... 25
รูปที่ 2.12	สัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร..... 26
รูปที่ 2.13	สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ..... 26
รูปที่ 2.14	สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ..... 27
รูปที่ 2.15	สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี..... 27
รูปที่ 3.1	ขนาดของแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่ตัดทำการทดสอบ..... 32
รูปที่ 3.2	ขนาดของแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ที่ตัดทำการทดสอบ..... 32
รูปที่ 3.3	รูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบรอยต่อเกยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ ด้านบน..... 33
รูปที่ 3.4	รูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบรอยต่อเกยกำหนดให้แผ่น อลูมิเนียมอยู่ด้านบน..... 33
รูปที่ 3.5	ฝาประกบด้านบน..... 34
รูปที่ 3.6	ฝาประกบด้านล่าง..... 35
รูปที่ 3.7	อุปกรณ์จับยึด (Jig)..... 36
รูปที่ 3.8	หัวอิเล็กโทรดแบบทูป..... 36
รูปที่ 3.9	เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ..... 38

## สารบัญญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	3.10	การลบคมของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250.....	38
รูปที่	3.11	การขัดทำความสะอาดแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่น อลูมิเนียม AA1100.....	39
รูปที่	3.12	การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (Jig) กับเครื่องเชื่อมด้านทานแบบจุด.....	39
รูปที่	3.13	การกำหนดระยะของอุปกรณ์จับยึด.....	40
รูปที่	3.14	การวางแผ่นวัสดุลงบนอุปกรณ์จับยึด (Jig) .....	40
รูปที่	3.15	การถอดชิ้นงานเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนทำการเชื่อม.....	41
รูปที่	3.16	การตั้งค่าบนเครื่องเชื่อม.....	42
รูปที่	3.17	การเชื่อมด้านทานแบบจุด RSW.....	42
รูปที่	3.18	ชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการเชื่อมด้านทานแบบจุด (RSW).....	43
รูปที่	3.19	เครื่องทดสอบแรงดึงเหนือน GOTECH รุ่น GT-7001-LA-C50.....	43
รูปที่	3.20	ตำแหน่งและระยะการวัดรอยกด.....	44
รูปที่	3.21	การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทำเรื่อน (Mounting).....	45
รูปที่	3.22	การเตรียมชิ้นงานทดสอบโครงสร้าง.....	45
รูปที่	3.23	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	46
รูปที่	3.24	สารเคมีที่ใช้ในการกัดงานทดสอบเพื่อดูโครงสร้าง.....	47
รูปที่	3.25	กล้องตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)...	48
รูปที่	3.26	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM).....	48
รูปที่	4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมต่อความแข็งแรงเหนือนดึงและการยึด ตัวของรอยต่อโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน.....	50
รูปที่	4.2	รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเหนือนดึงด้วยกระแสไฟตั้งแต่ 85- 105 kA ระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมโดยวางแผ่นเหล็กอยู่ด้านบนการเชื่อม....	51
รูปที่	4.3	ความลึกของรอยกดอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่ออยู่ที่กระแสไฟตั้งแต่ 85- 105 kA กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม.....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.4	อัตราส่วนความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์โทรคนบนผิวรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟตั้งแต่ 85 -105 kA.....	54
รูปที่ 4.5	โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	55
รูปที่ 4.6	โครงสร้างจุลภาคของกระแสไฟตั้งแต่ 85 – 105 kA กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง.....	56
รูปที่ 4.7	ความสูงรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซที่กระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85 - 105 kA...	57
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าต่อความแข็งแรงเนื่องดึง และการยึดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบน.....	58
รูปที่ 4.9	รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเนื่องดึงที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมโดยวางอลูมิเนียมอยู่ด้านบนการเชื่อม.....	59
รูปที่ 4.10	ความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์โทรคนบนผิวรอยต่อเกยที่กระแสไฟตั้งแต่ 85-105 kA กำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนแผ่นเหล็ก.....	61
รูปที่ 4.11	อัตราส่วนความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์โทรคนบนผิวรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ....	62
รูปที่ 4.12	โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้าง.....	63
รูปที่ 4.13	โครงสร้างจุลภาคของกระแสไฟตั้งแต่ 85-105 kA โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กอยู่ด้านล่าง.....	64
รูปที่ 4.14	ความสูงรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซที่กระแสเชื่อม 85-105 kA.....	65
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาทดสอบต่อความแข็งแรงเนื่องดึง และการยึดตัวของรอยต่อเกย แบบที่ 1 กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนแผ่นอลูมิเนียม.....	66
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาทดสอบต่อความแข็งแรงเนื่องดึง และการยึดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็ก...	67
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเนื่องดึงรูปแบบรอยต่อ และเวลาทดสอบตั้งแต่ 1 – 20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2.....	68

## สารบัญญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัว รูปแบบรอยต่อและเวลากดแช่ตั้งแต่ 1 – 20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2.....	69
รูปที่	4.19	รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลากด 1 Cycles.....	70
รูปที่	4.20	รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลากด 5 Cycles.....	71
รูปที่	4.21	รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลากด 10 Cycles.....	73
รูปที่	4.22	รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลากด 15 Cycles.....	74
รูปที่	4.23	รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลากด 20 Cycles.....	75
รูปที่	4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกดอเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และเวลากดแช่ ตั้งแต่ 1-20 Cycles.....	77
รูปที่	4.25	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่อความหนาของแผ่น โลหะของรอยต่อเกยที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles...	78
รูปที่	4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกดอเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 และเวลากดแช่ ตั้งแต่ 1-20 Cycles.....	79
รูปที่	4.27	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาของแผ่น โลหะของรอยต่อเกยที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles...	80
รูปที่	4.28	โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบ โครงสร้าง.....	81
รูปที่	4.29	โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 1 Cycles.....	82
รูปที่	4.30	โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 5 Cycles.....	82
รูปที่	4.31	โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 10 Cycles.....	83
รูปที่	4.32	โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 15 Cycles.....	83
รูปที่	4.33	โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 20 Cycles.....	84
รูปที่	4.34	ความสูงแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2.....	84
รูปที่	4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกดต่อความแข็งแรงเฉือนดึงและการยึดตัวของรอยต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนแผ่นอลูมิเนียม.....	86

## สารบัญญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทดสอบต่อความแข็งแรงเนื่องดิ่งและการยึดตัวของรอยต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนบนแผ่นเหล็ก.....	87
รูปที่	4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเนื่องดิ่งรูปแบบรอยต่อ และแรงดันทดสอบ ตั้งแต่ 0.1 – 0.3 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2.....	88
รูปที่	4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัวและรูปแบบรอยต่อมีค่าแรงดันทดสอบตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2.....	89
รูปที่	4.39	รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งด้วยแรงดันทดสอบ 0.10 MPa.....	90
รูปที่	4.40	รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งด้วยแรงดันทดสอบ 0.15 MPa.....	91
รูปที่	4.41	รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งด้วยแรงดันทดสอบ 0.20 MPa.....	92
รูปที่	4.42	รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งด้วยแรงดันทดสอบ 0.25 MPa.....	93
รูปที่	4.43	รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งด้วยแรงดันทดสอบ 0.30 MPa.....	94
รูปที่	4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกค็อเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และแรงดันทดสอบตั้งแต่ 0.10-0.30 MPa.....	97
รูปที่	4.45	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกคบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่อความหนาของแผ่น โลหะที่ใช้แรงดันทดสอบตั้งแต่ 0.10 -0.30 MPa.....	97
รูปที่	4.46	ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกค็อเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 และแรงดันทดสอบ ตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa.....	98
รูปที่	4.47	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกคบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาของแผ่น โลหะที่ใช้แรงดันทดสอบตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa.....	99
รูปที่	4.48	โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้าง.....	100
รูปที่	4.49	โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันทดสอบ 0.10 MPa.....	100

## สารบัญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	4.50	โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันทด 0.15 MPa.....	101
รูปที่	4.51	โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันทด 0.20 MPa.....	102
รูปที่	4.52	โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันทด 0.25 MPa.....	102
รูปที่	4.53	โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันทด 0.30 MPa.....	103
รูปที่	4.54	ความสูงแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของแรงดันทดตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2.....	104
รูปที่	4.55	ตำแหน่งการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-Line scan.....	105
รูปที่	4.56	ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-Line scan ของรอยเชื่อม กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง.....	106
รูปที่	4.57	ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-Line scan ของรอยเชื่อม กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง.....	108
รูปที่	4.58	วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันทด 0.1 Mpa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังทลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn.....	111
รูปที่	4.59	วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10Cycles แรงดันทด 0.3 Mpa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังทลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn.....	112
รูปที่	4.60	วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันทด 0.1 Mpa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังทลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn.....	114



## สารบัญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	4.61	วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.25 Mpa กำหนดให้แผ่น อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังทลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn.....	115
รูปที่	4.62	ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูง มากที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 Mpa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่.....	116
รูปที่	4.63	ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูง มากที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.3 Mpa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง.....	117
รูปที่	4.64	ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูง มากที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 Mpa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง.....	119
รูปที่	4.65	ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูง มากที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.25 Mpa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง.....	120

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AA	สมาคมอะลูมิเนียม (Aluminum Association)
BSE	สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron)
EDS	การวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry)
FeCl <sub>3</sub>	กรดเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride Acid)
HCl	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)
HNO <sub>3</sub>	กรดไนตริก (Nitric Acid)
HSLA	เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy)
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
JIS	มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standards)
MPa	เมกกะปาสกาล (Megapascal)
N	นิวตัน (Newton)
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)
RWMA	สมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association)
RSW	การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding)
SCRs	ตัวควบคุมการเรียงกระแสตรงชนิดซิลิกอน (Silicon Controlled Rectifiers)
SE	สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
WDS	การวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Wavelength Dispersive Spectrometry)
kA	กิโลแอมแปร์ (kilo Ampere)
mm	มิลลิเมตร (millimeter)
ml	มิลลิลิตร (milliliter)
µm	ไมโครเมตรหรือ ไมครอน (micrometer / micron)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การเชื่อมด้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง กระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เห็นได้จากรถยนต์หนึ่งคันมีปริมาณการยึดต่อด้านทานแบบจุดของชิ้นส่วนระหว่างวัสดุเดียวกัน วัสดุต่างชนิดหรือ วัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ในปริมาณมากกว่าหนึ่งพันจุด [1] หนึ่งในข้อดีของการเชื่อมด้านทานแบบจุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมทิก คือ รอยเชื่อมของการเชื่อมด้านทานแบบจุดนั้นเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ ขณะที่รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกเกิดขึ้นบริเวณด้านนอก ลักษณะเช่นนี้ทำให้รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกนั้นมีความง่ายต่อการตกแต่งมากกว่า [2]

ขณะเดียวกันในมุมมองของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันที่มุ่งเน้นในการผลิตรถยนต์ ที่มีการใช้น้ำมันอย่างประหยัด เพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมยานยนต์ได้พยายามคิดค้นหาวิธีการในการลดการใช้น้ำมันของรถยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ หนึ่งในวิธีการที่มีการใช้งานในปัจจุบัน คือ การทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลดลง ซึ่งทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy : HSLA) วัสดุประกอบ (Composite Materials) หรืออลูมิเนียมผสม เข้ามาแทนที่ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าที่มีน้ำหนักสูงกว่า [3] วัสดุน้ำหนักเบาที่นิยมนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นในการทดแทนเหล็กในปัจจุบัน คือ อลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักสูงกว่าเหล็กประมาณ 2 เท่า [4] อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้านทานแบบจุด รอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม นั้น มีความยากลำบากในการเชื่อม เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีประสิทธิภาพสูงและวัสดุบางตัวมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทย คือ รอยต่อเกาะระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และอลูมิเนียม AA 1100 ซึ่งเป็นวัสดุ ที่ใช้งานมากในการผลิตตัวถังของรถยนต์ยังไม่มีมีการรายงานไว้ ดังนั้นหากมีการทำการทดลองเพื่อเตรียมข้อมูลไว้ อาจทำให้เกิดประโยชน์อย่างสูงในอนาคตเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไทยต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเคาะระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคที่มีสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ตัวแปรการเชื่อมต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 อลูมิเนียม AA1100 หนา 1.2 mm และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD หนา 1.0 mm เชื่อมต่อกันด้วยรอยต่อเคาะ

1.3.2 ศึกษาตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบด้านทานแบบจุดที่ประกอบไปด้วย กระแสการเชื่อม 85 - 105 kA เวลาการเชื่อม 1-20 Cycles แรงดันกคดอเล็กโตรด 0.10 – 0.30 MPa และการวางชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กวางอยู่ด้านบนบนแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นอลูมิเนียมวางอยู่ด้านล่างบนแผ่นเหล็ก

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ด้วยการทดสอบแรงเฉือนดึง (Shear Tensile Test)

1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเคาะ

1.3.5 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยกล้องอิเล็กตรอนส่องกวาด (SEM)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการศึกษามีปัจจัยใดบ้าง และปัจจัยนั้นมีผลเกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

1.4.2 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไปโดยการพัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานของการเชื่อมวัสดุแผ่นบางต่างชนิดในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์

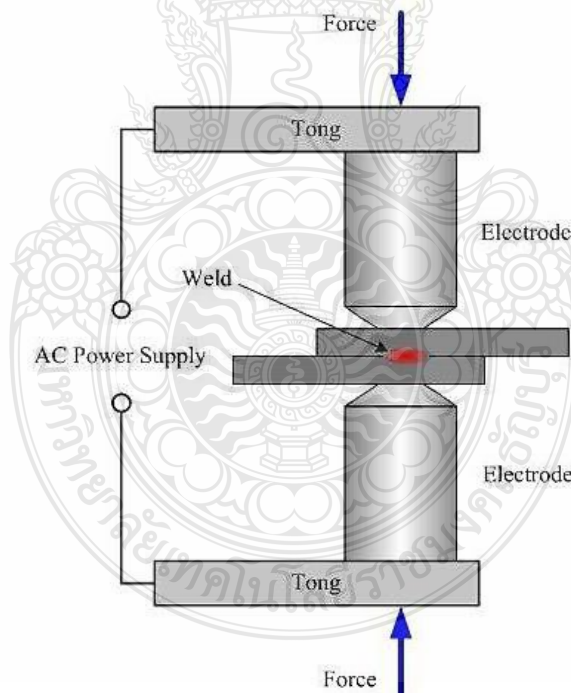
1.4.3 ได้เรียนรู้และศึกษาหลักการของการเชื่อมด้านทานแบบจุด เพื่อมาประยุกต์ใช้และหาปัจจัยหลักที่มีผลต่ออิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเคาะระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และนำปัจจัยนั้นมาวิเคราะห์ว่าเป็นสาเหตุจริงหรือไม่

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding)

การเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุด (Resistance Spot Welding : RSW) เป็นกระบวนการเชื่อมชิ้นงานที่ผิวหน้าสัมผัสกันตั้งแต่หนึ่งจุดหรือมากกว่า โดยความร้อนเกิดขึ้นจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานภายใต้แรงกดจากอิเล็กโทรด บริเวณผิวหน้าสัมผัสระหว่างเป็นจุดรวมของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าต่ำและช่วงเวลาสั้น ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการหลอมละลาย และเย็นตัวลงภายใต้แรงกดจนกระทั่งเกิดการแข็งตัวโดยสมบูรณ์ในช่วงเวลาสั้นๆ เกิดเป็นรอยเชื่อมตรงเชื่อมตรงผิวสัมผัสกันของชิ้นงานที่เรียกว่า “นั๊กเกต (Nugget)” ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดรอยเชื่อมตรงตำแหน่งที่มีความร้อนสูงที่สุด [4]

ตำแหน่งที่เกิดรอยเชื่อมนั้นเกิดจากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากความต้านทานระหว่างบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชิ้นงานซึ่งเป็นจุดที่มีความต้านทานทางไปไฟฟ้าสูงสุด

#### 2.1.1 การเกิดความร้อนในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด

ในการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด ความร้อนเกิดจากการต้านทานของชิ้นงานที่มีต่อการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า จำนวนความร้อนที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 อย่าง คือ กระแสไฟฟ้า ความต้านทานของชิ้นงาน และเวลาที่กระแสผ่าน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ 2.1 [4]

$$Q = I^2RT \quad (2.1)$$

โดยที่

Q = ความร้อนที่เกิดขึ้น (จูล)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R = ความต้านทานของชิ้นงาน (โอห์ม)

T = เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (วินาที)

#### 2.1.2 รอบการเชื่อม (Welding Cycle)

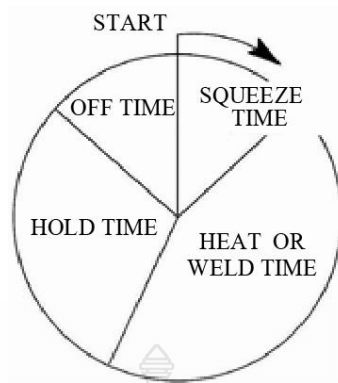
การเชื่อมต้านทานแบบจุดเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น โดยทั่วไปกระแสที่ใช้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุดมีค่าที่ 60 Cycles โดยที่ 60 Cycles มีค่าเท่ากับ 1 วินาที เวลาในการเชื่อมต้านทานแบบจุดแสดงได้ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยเวลาหลัก 4 ส่วน [5] ดังนี้

1) เวลากด (Squeeze Time) เป็นเวลาที่เริ่มระหว่างเวลาที่เริ่มเข้ามาของสัญญาณเชื่อมและกระแสเชื่อมในครั้งแรกเป็นช่วงเวลาที่มั่นใจได้ว่าหัวอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงาน และมีแรงกดจากหัวอิเล็กโทรดเพียงพอก่อนที่กระแสเชื่อมในครั้งแรกจะถูกปล่อยออกมา

2) เวลาเชื่อม (Weld Time) เป็นเวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ในช่วงลักษณะการเชื่อมหนึ่งครั้ง

3) เวลาค้ำ (Hold Time) เป็นช่วงเวลาที่แรงกดจากหัวอิเล็กโทรดที่ยังกระทำต่อชิ้นงาน หลังจากการเชื่อมในช่วงเวลาท้ายสุดสิ้นสุดลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวที่มากพอที่จะสร้างความแข็งแรงให้เกิดขึ้นในรอยเชื่อมจนสามารถยอมรับได้

4) เวลาเย็นตัว (Off Time) เป็นช่วงเวลาที่หัวอิเล็กโทรดสิ้นสุดการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมที่ตำแหน่งที่ต้องการต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อมซ้ำรอบการเชื่อมเดิมดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รอบการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด [6]

## 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด [7]

โดยทั่วไปแล้วเครื่องเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือส่วนของวงจรไฟฟ้า ส่วนของอุปกรณ์ควบคุม และส่วนของอุปกรณ์เครื่องจักรกล

### 2.2.1 ส่วนของวงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit)

วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนป้อนภูมิและทุติยภูมิ โดยทางด้านทุติยภูมินั้นครอบคลุมถึงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการนำกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมเข้าสู่ชิ้นงานต้องการทำการเชื่อม และรวมไปถึงในส่วนของตัวเองด้วย ในบางกรณีส่วนของพลังงานสะสมก็รวมอยู่ในระบบไฟฟ้าด้วย ทั้งกระแสไฟเชื่อมชนิดสลับและกระแสไฟเชื่อมชนิดตรงที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความต้านทานซึ่งสามารถแบ่งได้ คือ

1) เครื่องเรียงกระแสตรง (Rectifier Type Machine) เครื่องเรียงกระแสตรงนี้จะรับพลังงานโดยตรงจากการจ่ายไฟฟ้าในชนิดกระแสสลับผ่านส้อมแปลงเชื่อมและถูกเรียงกระแสให้มีลักษณะเป็นกระแสตรง ซึ่งชุดเรียงกระแสตรงชนิด “ซิลิกอน-ไดโอด” ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบวงจรไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเนื่องจากมีประสิทธิรูปที่ค่อนข้างคงที่และสม่ำเสมอ เครื่องเรียงกระแสตรงนี้สามารถใช้กับเครื่องเชื่อมชนิดหนึ่งเฟส อย่างไรก็ตามประโยชน์อีกหนึ่งของระบบการเชื่อมชนิดกระแสตรงนั้นสามารถใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับไฟสามเฟสผ่านเข้าเครื่องเรียงกระแสตรงทางด้านทุติยภูมิ การทำเช่นนี้สามารถสร้างความสมดุลให้เกิดขึ้นระหว่างกระแสไฟฟ้าป้อนภูมิของเฟสของสายไฟทั้งหมด

2) เครื่องแปลงความถี่ (Frequency Converter Machine) อุปกรณ์นี้ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าในงานเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดพิเศษ ที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าทางด้านป้อนภูมิเป็นชนิด 3 เฟส และจะเปลี่ยนเป็น 1 เฟส ออกมาทางด้านของทุติยภูมิ กระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนภูมิจะถูกควบคุมด้วยหลอด

จุดไฟ (Ignitron Tube) หรือ ตัวควบคุมการเรียงกระแสตรงชนิดซิลิกอน (Silicon Controlled Rectifiers : SCRs) ในส่วนของครึ่งหนึ่งของไฟ 3 เฟส ด้านปฐมภูมินั้นไม่ว่าจะเป็นทางด้านขั้วบวกหรือว่าขั้วลบ เป็นช่วงเวลา โดยช่วงเวลาที่เกิดขึ้นมานั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าภายในตัวของหม้อแปลงนั้นๆ โดยที่ระยะของช่วงเวลานั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นๆ หม้อแปลงไฟฟ้าจะให้สัญญาณออกมาในลักษณะของพัลส์ของกระแสเชื่อมชนิดตรง โดยการสลับสับเปลี่ยนขั้วทางไฟฟ้าที่ด้านปฐมภูมิครึ่งรอบขั้วไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิก็จะเกิดการสลับเกิดขึ้น โดยการเชื่อมสามารถทำให้เกิดพัลส์ที่เป็นลักษณะของพัลส์เชื่อมกระแสตรงได้ทั้งในลักษณะพัลส์เดียวหรือหลายพัลส์ก็ได้

3) เครื่องสะสมพลังงาน (Stored Energy Machine) พลังงานที่เกิดขึ้นกับเครื่องลักษณะนี้เกิดจากการที่ไฟฟ้า 1 เฟสที่มีการเก็บสะสมพลังงานได้เก็บสะสมพลังงานเอาไว้ และปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นๆทำให้เกิดการเชื่อมได้ โดยเครื่องเชื่อมในลักษณะนี้มีอุปกรณ์หลักที่เป็นหัวใจสำคัญคือ ส่วนของการเก็บประจุไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าสำหรับการปล่อย การบรรจุกระแสไฟจากตัวที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ค่าของความต่างศักย์ที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 1500-3000 โวลต์

4) อิเล็กโทรด (Electrode) ทองแดง คือ โลหะที่นิยมนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุด จุดประสงค์หลักในการใช้อิเล็กโทรด คือ เพื่อเป็นตัวนำกระแสการเชื่อมผู้ขึ้นงาน บริเวณจุดที่มีแรงกดกระทำ เพื่อนำความร้อนออกจากผิวหน้าชิ้นงาน และเพื่อรักษาคุณลักษณะของความร้อนและกระแสไฟฟ้าการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมขณะทำการเชื่อมปลายอิเล็กโทรดทำจากทองแดงผสมหรือวัสดุอื่นๆ โดยสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association : RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper Based Alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I - V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุดเมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งและอุณหภูมิการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง
- กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory Metal) เป็นโลหะผงขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น ของผสมระหว่างทองแดงและไททาเนียม ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อนและความต้านทานการกัดกัดที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 ยกตัวอย่างเช่น กลุ่ม 10 หมายถึง ค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของทองแดง ค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น



รูปแบบของอิเล็กโทรดมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทานทั้ง 6 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.3 แสดงด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษรตั้งแต่ A ถึง F อิเล็กโทรด A แบบจุด (Type a Pointed) ใช้สำหรับงานที่ต้องการค่าความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางของนักเกตสูง อิเล็กโทรด D แบบรูปร่างผิดปกติ (Eccentric Type) ใช้กับพื้นที่แคบๆ หรือมุมอับ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุด [8]

พิจารณาขั้นตอนการเชื่อมด้านทานแบบจุด พบว่าขนาดของนักเกตนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดของปลายอิเล็กโทรด [5] โดยปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนักเกตควรมีขนาดที่เล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดเล็กน้อย ถ้าปลายอิเล็กโทรดมีค่าน้อยจะส่งผลทำให้นักเกตมีขนาดที่เล็กและไม่แข็งแรง แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดนั้นมีขนาดที่ใหญ่เกินไปจะส่งผลทำให้นักเกตมีขนาดที่ใหญ่ เกินความสูงมากเกินไป และทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนได้ การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดของการเชื่อมอิเล็กโทรดสามารถหาค่าได้โดยการใช้สูตรดังต่อไปนี้ ดังสมการที่ 2.2

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} = 0.100'' + 2t \quad (2.2)$$

เมื่อ  $t$  คือความหนาของวัสดุมีหน่วยเป็นนิ้ว สมการนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่าง กันได้ ดังนั้นหากทำการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่างกันแล้ว ปลายอิเล็กโทรดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน เช่น ตัวอย่างดังต่อไปนี้

ทำการเชื่อมชิ้นงานสองแผ่นขนาดความหนา 0.062" ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดทั้งสองด้านต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสามารถหาค่าได้ คือ

$$\begin{aligned}
 \text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} &= 0.100'' + 2t \\
 &= 0.100'' + 2(0.062'') \\
 &= 0.224 \text{ นิ้ว}
 \end{aligned}$$

หรือหากต้องการเชื่อมวัสดุสองแผ่นความหนา 0.062'' และ 0.094'' ต้องออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดดังนี้

แผ่นความหนา 0.062''

$$\begin{aligned}
 \text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} &= 0.100'' + 2t \\
 &= 0.100'' + 2(0.062'') \\
 &= 0.224 \text{ นิ้ว}
 \end{aligned}$$

แผ่นความหนา 0.094''

$$\begin{aligned}
 \text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} &= 0.100'' + 2t \\
 &= 0.100'' + 2(0.094'') \\
 &= 0.288 \text{ นิ้ว}
 \end{aligned}$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.3 นี้แตกต่างจากสมการที่เสนอโดยสมาคมโลหะอเมริกา [9] ที่แสดงสมการสำหรับคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดสำหรับแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่เกิน 3 mm (1/8 นิ้ว) เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่มีค่า ดังสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$D_2 = \sqrt{t} \tag{2.3}$$

เมื่อ  $D_2$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดในหน่วย mm และ  $t$  คือ ความหนาของแผ่นวัสดุ โดยเมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F แล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางน้กเกตหรืออาจมีค่าเท่ากับ  $D$  ดังสมการที่ 2.4

$$D = D_2 = 5\sqrt{t} \tag{2.4}$$

เมื่อทำการเชื่อมวัสดุที่มีความหนาต่างกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรด และเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นบางกว่าเป็นหลัก หรือหากทำการเชื่อม โลหะสามแผ่นเข้าด้วยกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นที่สอง

หากใช้อิเล็กโทรดแบบ A หรือ B สมการที่ 2.3 อาจไม่สามารถใช้ได้ ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะขึ้นอยู่กับความกว้างของแผ่นประกบซึ่งอาจสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.4 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการใช้งานจากสภาพการใช้งานจริงแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจึงต้องมีการปรับปรุงให้มีขนาดที่ยอมรับได้เสมอ ซึ่งขนาดที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่าไม่เกิน 30% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดเริ่มต้น

### 2.2.2 อุปกรณ์ของส่วนควบคุม (Control Equipment)

อุปกรณ์ควบคุมการเชื่อมควรมีฟังก์ชันดังต่อไปนี้

- 1) กระแสที่ใช้ในตอนเริ่มและสิ้นสุดสำหรับแปลงกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม
- 2) การควบคุมขนาดของกระแส
- 3) กลไกการกระตุ้นและคลายแรงขั้วไฟฟ้า

สามารถแบ่งเครื่องมือเป็น 3 กลุ่มตามวัตถุประสงค์คือ ชุดตัดต่อการเชื่อมหรือตัวกำหนดช่วงเวลา, ตัวควบคุมลำดับขั้นตอนต่างๆรวมทั้งการควบคุมกระแสเชื่อม และชุดปรับแต่งต่างๆ ชุดตัดต่อการเชื่อมหรือตัวกำหนดช่วงเวลาจะเป็นตัวเชื่อมและตัดต่อระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิกับหม้อแปลงไฟฟ้าตัวตัดต่อนั้น โดยส่วนมากใช้ Silicon Control Rectifiers (SCRs) หรือ หลอดจุดไฟ (Ignitron tube) ในการตัดกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

ช่วงเวลาและการควบคุมลำดับขั้นตอนต่างๆ นั้นเป็นตัวกำหนดช่วงระยะที่ใช้ในการเชื่อม รวมถึงแรงที่กระทำจากขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมกระแสที่ออกจากเครื่องเชื่อมที่ถูกควบคุมโดยตัวเทปของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือ ตัวควบคุมความร้อน อุปกรณ์ควบคุมความร้อนนั้นจะใช้ในการเชื่อมต่อเข้ากับหลอดจุดไฟ หรือ SCRs อุปกรณ์ดังกล่าวจะควบคุมกระแสโดยการเปิดหน้าของ SCRs ระหว่างช่วงเวลาในแต่ละครั้งรอบการทำงานในการแปรผันเวลาในการเปิดหน้าของ SCRs นั้นเราสามารถทำได้โดยเพิ่ม หรือ ลดเวลาในการดึงกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิมาใช้งาน หรือ อาจเรียกว่า การทำให้เวลาอัตรากระแสเปลี่ยนขึ้น (Upslope Time) หรือ เวลาอัตรากระแสเปลี่ยนลง (Down Slope Time) นั้นเอง

- อัตรากระแสเปลี่ยนขึ้น โดยทั่วไปใช้ป้องกันการให้ค่าความร้อนที่เกินความต้องการ และ การระเบิดของเนื้อเชื่อมขณะที่ทำการเชื่อมซึ่งส่วนใหญ่ใช้เมื่อความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสมีค่าที่สูงมาก
- อัตรากระแสเปลี่ยนลง ใช้ในการควบคุมระยะเวลาการแข็งตัวของรอยเชื่อม เพื่อป้องกันการแตกร้าว หรือ การแข็งตัวที่ไม่สมบูรณ์ในส่วนของรอยเชื่อม

### 2.2.3 ส่วนของระบบอุปกรณ์เครื่องจักรกล (Mechanical System)

เครื่องเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุด ชนิดตะเข็บ มีระบบการทำงานหลักที่คล้ายคลึงกัน ขั้วไฟฟ้าจะเข้าไปใกล้หรือออกจากชิ้นงานตามที่ควบคุม แรงกดที่ขั้วไฟฟ้ากระทำโดยไฮดรอลิก นิวส์เมติก แมกเนติก หรือกลไกทางกลศาสตร์ อัตราการเข้าใกล้ของขั้วไฟฟ้าควรเร็ว และผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไม่ควรเสีรูปร่างเนื่องจากการซ้ำจากการที่หัวอิเล็กโทรดลงมาซ้ำๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นในจุดที่เชื่อมจะทำให้โลหะขยายตัวและหดตัวอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาในการเชื่อม และขั้วไฟฟ้าจะเคลื่อนตามเพื่อรักษาแรงดันและกระแสในการเชื่อม ความสามารถในการเคลื่อนที่ของเครื่องเชื่อมนั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชิ้นส่วนหรือแรงเสียดทานระหว่างส่วนที่เคลื่อนที่ และ โครงสร้างของเครื่องถ้าแรงดันระหว่างขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเชื่อมผิวหน้าสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานจะเกิดความร้อนสูงทำให้ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไหม้ และเสีรูปร่างไปแรงขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในขณะรอยเชื่อมหลอมเหลวนั้นต้องไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการแข็งตัวและป้องกันการเกิดรูพรุน หรือรอยแตก

## 2.3 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อม

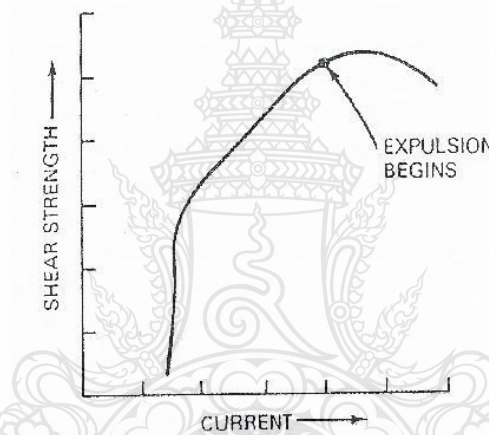
### 2.3.1 กระแสเชื่อม

ในสมการ  $Q = I^2RT$  สมการที่ 2.5 กระแสเชื่อมจะมีอิทธิพลในการทำให้เกิดความร้อนมากกว่าความต้านทานหรือเวลา ดังนั้นจึงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการควบคุม มีตัวแปรอยู่สองอย่างที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมคือ การเปลี่ยนแปลงโวลเตจในสายส่งและค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรทุติยภูมิของเครื่องที่ใช้กระแสสลับ การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของวงจรหรือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในมวลโลหะในวงจรทุติยภูมิของเครื่อง เครื่องเชื่อมกระแสตรงจะไม่มีผลกระทบจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโลหะในส่วนของวงจรทุติยภูมิ แต่จะมีผลจากการเปลี่ยนแปลงของวงจรเพียงเล็กน้อย

$$Q = I^2RT \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $Q$  = ค่าความร้อนและมีค่าเท่ากับ  $H$   
 $I$  = กระแสไฟฟ้า  
 $R$  = ความต้านทาน  
 $T$  = เวลาทำการเชื่อม

ขนาดของน้กเกิดและค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยการเพิ่มความหนาแน่นกระแส แต่การเพิ่มความหนาแน่นกระแสมากเกินไปจะเป็นเหตุทำให้เกิดประกายไฟ เกิดการแตกร้าว และสมบัติทางกลลดลง การใช้กระแสเชื่อมที่มากเกินไปจะเกิดปริมาณความร้อนจำนวนมากที่ชิ้นงาน และมีผลทำให้ชิ้นงานเกิดรอยบวม และส่งผลให้อิเล็กโทรดเสียหายอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความแข็งแรงของรอยเชื่อม [4]

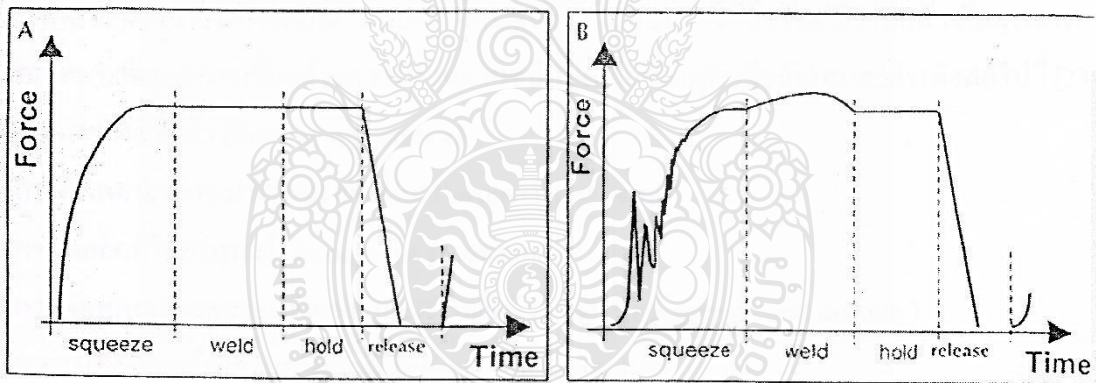
### 2.3.2 เวลาเชื่อม

อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะกับค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดความร้อนมากเกินไปและเกิดความเสียหายแก่อิเล็กโทรด ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคตรงกับเวลา ตัวแปรที่สำคัญคือเกิดการสูญเสียความร้อนด้วยการนำความร้อนรอบๆ ชิ้นงานและที่อิเล็กโทรด การสูญเสียจากการแผ่รังสีจะมีจำนวนน้อย การสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาเชื่อมและอุณหภูมิในโลหะงาน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ไม่สามารถควบคุมได้ในขณะเชื่อมจุด เวลานั้นที่สุดที่ต้องการสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อทำให้เกิดการหลอมที่เหมาะสมที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ

การใช้เวลาเชื่อมที่นานเกินไปจะมีผลกระทบต่อชิ้นงาน และอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดต่อกับการใช้กระแสเชื่อมที่มากเกินไป ดังนั้นพื้นที่ที่เกิดผลกระทบทางความร้อน (Heat – Affected Zone) จะแผ่กว้างเข้าไปในโลหะชิ้นงาน

### 2.3.3 แรงกด

ค่าความต้านทาน (R) ในสมการที่ 2.1 ที่มีอิทธิพลมาจากแรงกดเชื่อม ที่มีผลต่อความต้านทานจากผิวสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงาน แรงกดเชื่อมเกิดขึ้นจากแรงกดที่รอยต่อที่มาจากอิเล็กทรอนิกส์ แรงกดของอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นแบบไดนามิก ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของชิ้นงาน และผลของแรงกดนี้เกิดผลกระทบต่อความต้านทานที่จุดสัมผัส ชิ้นงานเชื่อมจะถูกจับยึดให้แน่นเข้าด้วยกันที่ตำแหน่งเชื่อม เพื่อให้กระแสสามารถไหลผ่านได้ทุกอย่างจะต้องสมดุลกัน เช่น แรงกดอิเล็กทรอนิกส์หรือแรงกดเชื่อมที่เพิ่มขึ้น แอมแปร์จะต้องเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัดที่กำหนด ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดอาจจะตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มแรงกดค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสและความร้อนที่เกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่ออาจจะลดลง ในการเพิ่มความร้อนเพื่อให้ได้ระดับที่ต้องการ จะต้องเพิ่มแอมแปร์หรือเวลาเพื่อเพื่อชดเชยความต้านทานที่ลดลงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับแรงกด [10]

## 2.4 วัสดุ

### 2.4.1 อลูมิเนียม (Aluminum) [11,12]

1) การแบ่งชนิดของอลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.3 คือ กลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการรีด และกลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ ในที่นี้ขอกล่าวถึงอลูมิเนียมกลุ่มที่ผ่าน

การรีดเท่านั้น โดยที่อลูมิเนียมที่ผ่านการรีดนั้นสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ตัวเลข 4 ตัว และตัวอย่างของอลูมิเนียมบางกลุ่มดังตารางที่ 2.1

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมที่ 99.0% ถึง 99.9% อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรง และสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [11]

กลุ่ม	บริสุทธิ์	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Sn
ผ่านการรีด	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	5XXX	7XXX	8XXX
ผ่านการหล่อ	1XX.X	2XX.X		4XX.X		7XX.X	2XX.X

การทำกรรมวิธีการให้ความร้อน (Heat Treatment) ในการทำให้เนื้ออลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไปในทางที่แข็งแรงขึ้น เพราะอลูมิเนียมกลุ่ม 2XXX, 5XXX บางตัว (ส่วนมากไม่นิยมทำ) 6XXX และ 7XXX สามารถทำให้แข็งแรง โดยการให้ความร้อน ดังนั้นอลูมิเนียมกลุ่มนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นพวกที่ทำกรรมวิธีทางความร้อนได้ (Heat Treatment Alloys)

อลูมิเนียมกลุ่มที่เหลือ คือ 1XXX, 3XXX, 4XXX บางตัว และ 5XXX เป็นพวกที่ไม่อาจจะปรับปรุงสมบัติทางกลให้แข็งแรงเด่นชัดโดยการทำกรรมวิธีทางความร้อน (Non Heat Treatment Alloys) แต่สามารถทำให้แข็งแรงโดยการทำให้แปรรูปเย็น

ตารางที่ 2.2 สมบัติของอลูมิเนียมผสม [12]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี (%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การยึดตัว
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si			
1100	99.0	-	0.6	-	-	0.3	O	90	40
							H18	165	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	20
							T3	485	18
3034	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	22
							H36	260	7
4043	93.6	0.3	0.8	-	-	5.2	O	130	25
							H18	285	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18
							H38	200	3
6063	98.5	-	0.3	0.7	-	0.4	O	90	25
							T4	172	20

- อลูมิเนียมผสมทองแดง (อนุกรม 2xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือ จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีการย้ำหุค

- อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (อนุกรม 3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้

- อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะ



แข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาวะร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติม สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ

- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมเหมือนอนุกรม 4xxx นอกจากนี้ยังนำไปทำถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

- อลูมิเนียมแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

- อลูมิเนียมสังกะสี – แมกนีเซียม (อนุกรม 7xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณดังกล่าวได้ เกิดความแข็งแรงจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

#### 2.4.2 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี [13]

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีคือ เหล็กแผ่นที่เคลือบสังกะสีเพื่อป้องกัน การกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก ซึ่งในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสังกะสีที่เคลือบจะทำหน้าที่เป็นตัวถูกกัดกร่อนแทนเหล็ก

##### 1) ประของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ประเภท

##### (1) แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นลอนหรือลูกฟูก (Corrugated Sheet)

มีลักษณะการใช้งานในการก่อสร้างขนาดเล็กสำหรับใช้กันเป็นอาณาเขตของสถานที่ก่อสร้างและที่พักคนงานรวมถึงการนำมาสร้างเป็นสังกะสีมุงหลังคาและฝ้าบ้านกลุ่มลูกค้าส่วนใหญ่เป็นประชาชนในต่างจังหวัดเช่นกลุ่มลูกค้าในภาคเกษตรกรรม

##### (2) แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นเรียบ (Plain Sheet)

สังกะสีชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องเช่นอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องไฟฟ้าชิ้นส่วนรถยนต์เฟอร์นิเจอร์เครื่องทำความร้อนท่อของเครื่องปรับอากาศรางน้ำ ฝ้าโถง และแท่งค้ำน้ำ เป็นต้นเนื่องจากการผลิตแผ่นสังกะสีแบบเรียบจะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในอดีตก่อนปี 2536 ประเทศไทยมีผู้ผลิตสังกะสีแผ่นเรียบรายเดียวคือบริษัทกรุงเทพผลิตเหล็กในปัจจุบันมีผู้ผลิตแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีแผ่นเรียบรายใหญ่เพิ่มเป็น 2 รายคือบริษัทกรุงเทพผลิตเหล็กจำกัดบริษัท บีเอสพีสตีล (ประเทศไทย) จำกัดและนอกจากนี้ผู้ผลิตรายเล็กอื่นๆก็สามารถผลิตแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีได้แต่มีปริมาณไม่มากนัก

2) เกรดและสัญลักษณ์ แบ่งตามโลหะพื้นฐานของเหล็ก (Base Metal) ในเหล็กรีดร้อน แบ่งเป็น 6 เกรด ดังตารางที่ 2.3 และสำหรับเหล็กรีดเย็นแบ่งเป็น 10 เกรด ดังตารางที่ 2.4

3) สมบัติของเหล็กเคลือบสังกะสี

(1) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน สังกะสีมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการกัดกร่อนแบบการเสียสละ โดยการเสียสละตัวเองเกิดการทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนแทนเหล็กช่วยป้องกันการเกิดสนิมบริเวณผิวเปิด หรือขอบตัดซึ่งเป็นจุดที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

(2) การเชื่อมเหล็กเคลือบสังกะสี เหล็กเคลือบสังกะสีซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีด้วยวิธีชุบร้อนแบบต่อเนื่องทำให้แผ่นเหล็กมีผิวเคลือบที่ทนทานไม่แตกกะเทาะหรือลอกในระหว่างการเชื่อม การขึ้นรูป ตัด โค้ง และปั๊มลึก

ตารางที่ 2.3 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดร้อนทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน [13]

สัญลักษณ์ของเกรด	ความหนา (มิลลิเมตร)	การใช้
SGHC		เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ
SGHC340		โครงสร้างคุณภาพ
SGH400	มากกว่า 1.6 ถึง 6.0	
SGH440		
SGH490		
SGH500		

ตารางที่ 2.4 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน [13]

สัญลักษณ์ของเกรด	ความหนา (มิลลิเมตร)	การใช้
SGCC	มากกว่า 0.25 ถึง 3.2	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ
SGCH	มากกว่า 0.11 ถึง 1.0	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ, ชั้นความแข็ง
SGCD1(SGACD45/45)	มากกว่า 0.40 ถึง 2.3	คุณภาพการขึ้นรูป, ชั้น 1
SGCD2(SGACD45/45)		คุณภาพการขึ้นรูป, ชั้น 1
SGCD3	มากกว่า 0.40 ถึง 2.3	คุณภาพการขึ้นรูป, ชั้น 1
SGC340	มากกว่า 0.25 ถึง 3.2	โครงสร้างคุณภาพ
SGC400		
SGC440		
SGC490		
SGC570	มากกว่า 0.25 ถึง 2.0	

(3) ความหนา ความกว้าง เหล็กเคลือบสังกะสี มีขนาดความหนา ตั้งแต่ 0.23 มม. ถึง 1.60 มม. ส่วนความกว้างมีให้เลือก 710 - 1265 มม. และระดับมวลสารของชั้นเคลือบตั้งแต่ Z12 ถึง Z35 ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

การนำเหล็กเคลือบสังกะสีไปใช้งาน

การใช้ประโยชน์ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้มีการนำเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการผลิตประตูรถยนต์ (Door Car) ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ลักษณะด้วยกัน [13]

- PNL FR DRINR LH/RH (S/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มม. กว้าง 280 มม. ยาว 1660 มม. และขนาดเหล็กหนา 0.7 มม. กว้าง 1,050 มม. ยาว 1,690 มม. ซึ่งเป็นประตูรถปีกอัปประเภท 2 ประตู 1 ตอน
- PNL FR DRINR LH/RH (C/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มม. กว้าง 255 มม. ยาว 1670 มม. และขนาดเหล็กหนา 0.7 มม. กว้าง 1,040 มม. ยาว 1,690 มม. ซึ่งเป็นประตูรถปีกอัปประเภท 2 ประตู 2 ตอน

- PNL RR RH (D/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มม. กว้าง 255 มม. ยาว 950 มม. และขนาดเหล็กหนา 0.7 มม. กว้าง 925 มม. ยาว 1285 มม. ซึ่งเป็นประตูล็อกบี้อัพประเภท 4 ประตู

## 2.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

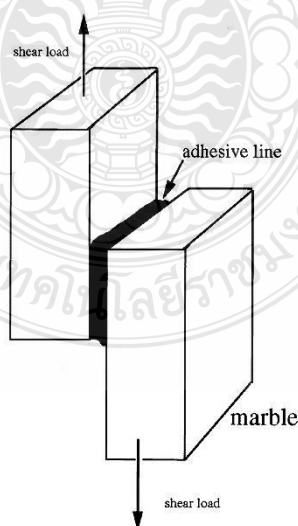
### 2.5.1 การทดสอบแรงเฉือน

การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวขนานกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ การเฉือนนี้แตกต่างจากการดึงและการตัดซึ่งใส่แรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน

การทดสอบแรงเฉือนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ

- 1) แรงเฉือน โดยตรง (Direct Shear)
- 2) แรงเฉือนจากการบิด (Torsional Shear) [14]

แรงเฉือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการใส่แรงสวนทางกันสองทิศทางโดยแรงเฉือนตรงสามารถแยกออกได้เป็นสองแบบคือแรงเฉือนเดี่ยว (Single Shear) กับแรงเฉือนคู่ (Double Shear) แรงเฉือนเดี่ยวจะเกิดขึ้นตลอดแนวระนาบเดียวในขณะที่แรงเฉือนคู่จะเกิดระหว่างสองระนาบพร้อมกันในทางทฤษฎีความแข็งแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวกับแรงเฉือนคู่ควรมีค่าเท่ากันแต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดจึงทำให้แรงเฉือนทั้งสองอาจไม่เท่ากันเสมอไปดังในรูปที่ 2.6 แสดงหลักการของแรงเฉือนเดี่ยว [15]



รูปที่ 2.6 หลักการของแรงเฉือนเดี่ยว [15]

ข้อจำกัดในการใช้การทดสอบแรงเฉือนตรง

- กำลังรับแรงเฉือนที่ได้เป็นค่าโดยประมาณของกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ
- หน่วยแรงดัด (Bending Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน/ระยะเยื้องศูนย์กลาง
- แรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือทดสอบ
- ระดับความแข็งและความคมของแผ่นเหล็กที่ใช้เฉือนตัวอย่างทดสอบ

ไม่สามารถหาสมบัติอื่นๆเช่น Elastic Strength และ Shearing Modulus of Elasticity ของวัสดุได้เนื่องจากไม่สามารถวัดหาค่า Shearing Strain [15]

#### 2.5.2 ชิ้นทดสอบ (Specimens)

ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบนั้นผ่านกระบวนการตัดเฉือนที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ ความสะอาดของชิ้นงานก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดสอบเช่นกัน ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบนั้น ต้องเก็บรักษาในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อป้องกันค่าคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ร้อนและเย็นเกินไป

#### 2.5.3 วิธีการทดสอบ

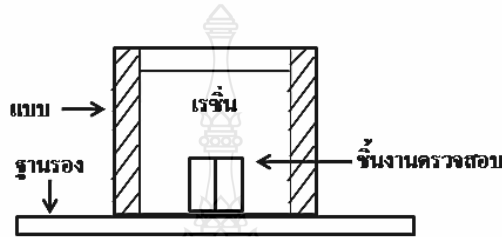
การเฉือนตรงและการเฉือนบิดส่วนใหญ่จะทดสอบด้วยการทดสอบแรงเฉือนโดยในการทดสอบแรงเฉือนตรงหรือแบบสวนทางนั้นชิ้นทดสอบจะถูกตรึงสวนทางกันการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางนี้ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุโดยความแม่นยำของค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งและความคมของชุดอุปกรณ์ตรึงยึดชิ้นทดสอบข้อจำกัดอื่นๆในการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางคือไม่สามารถทำการจัดเก็บข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นได้และเมื่อไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลส่วนนี้ได้ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่าความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่นหรือ โมดูลัสริจิสได้สมบัติทางกลที่สามารถบอกได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางมีเฉพาะแรงที่จำเป็นในการเฉือนชิ้นทดสอบเท่านั้นและเมื่อนำไปเทียบกับขนาดหน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบทำให้สามารถคำนวณค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุโดยประมาณได้ [15]

#### 2.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

##### 1) การเตรียมชิ้นตรวจสอบ

การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาดสำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2.5 มม. และความสูงไม่น้อยกว่า 15 มม. แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าควรมีขนาด 25×25×20 มม. ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้ง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค [16]

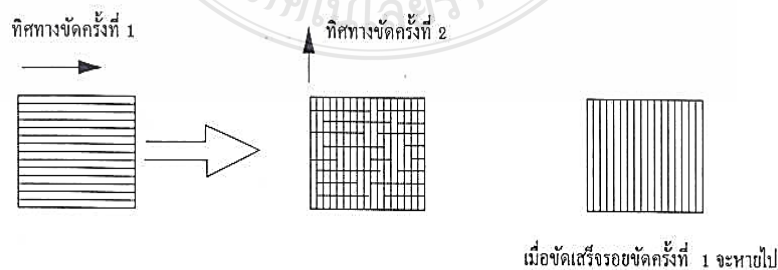


รูปที่ 2.7 การเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค [16]

หลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นต่อไปเพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบ โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ

การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 600 800 1,000 และขัดจนถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบ ไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้ายดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การขัดผิวชิ้นทดสอบ [16]

การกัดผิวตรวจสอบควรรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

2) การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2-4 ผสมแอลกอฮอล์

ตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [4] ตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6 แสดงรายละเอียดของชื่อน้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้บอกเวลาในการกัดด้วยน้ำยาเหล่านั้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก [16]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไนตริก (Ferric Chloride and Nitric)	ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ) ในกรดไฮโดร	เหล็กเคลือบสังกะสี	จุ่มแช่หรือเช็ดด้วยสำลี นาน 5-120
ไนตริกและอะเซติก (Nitric and Acetic Acid)	ไนตริกแอซิด (HNO <sub>3</sub> ) 30 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้มเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ) 2 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้มอะเซติกแอซิด (CH <sub>3</sub> COOH) 20 มิลลิลิตร	เหล็กเคลือบสังกะสี ที่ส่วนผสมของนิกเกิลและโคบอลต์เป็นจำนวนมาก	เช็ดด้วยสำลีชุบกรด นาน 10-30 วินาที

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดของน้ำยาคัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [16]

น้ำยาคัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ ถึง 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือเช็ดนาน 15-45 วินาที
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสม กับน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	เช็ดด้วยสำลีนาน 10-15 วินาที

3) การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน [16]

## 2.6 การส่องกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ดูโครงสร้างมหภาค

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่องดูวัตถุที่มีขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถมองเห็นรายละเอียดได้ด้วยตาเปล่าสามารถเลือกใช้กล้องได้ตามกำลังขยายของรูปที่ต้องการ กล้องจุลทรรศน์มี 2 แบบ คือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) [17]

### 2.6.1 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

- Light Microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่พบอยู่ทั่วไป โดยเวลาส่องดูจะเห็นพื้นหลังเป็นสีขาว และจะเห็นเชื้อจุลินทรีย์มีสีเข้มกว่า
- Dark Field Microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีพื้นหลังเป็นสีดำเห็นเชื้อจุลินทรีย์สว่าง เหมาะสำหรับใช้ส่องจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กที่ติดสียาก
- Phase Contrast Microscope ใช้สำหรับส่องเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังไม่ได้ทำการย้อมสี จะเห็นชัดเจนกว่า Light Microscope
- Fluorescence Microscope ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น อัลตราไวโอเลต ส่องดูจุลินทรีย์ที่ย้อมด้วยสารเรืองแสง ซึ่งเมื่อกระทบกับแสง UV จะเปลี่ยนเป็นแสงช่วงที่มองเห็นได้แล้วแต่ชนิดของสารที่ใช้ พื้นหลังมักมีสีดำ

### 2.6.2 ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์



- ช่วยในการมองเห็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าที่เราจะมองเห็น
- ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลหลักฐานทางชีววิทยา

### 2.6.3 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

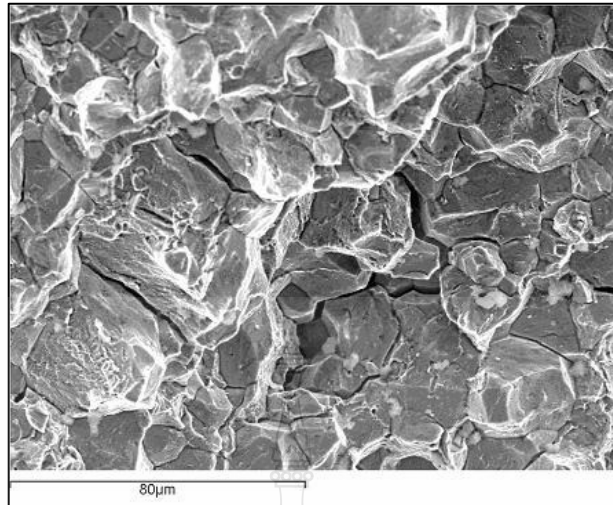
กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็กซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้นซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (Magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด (Resolution / Resolving Power) หมายถึงความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุดซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two Points of Discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ [17]

### 2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [18]

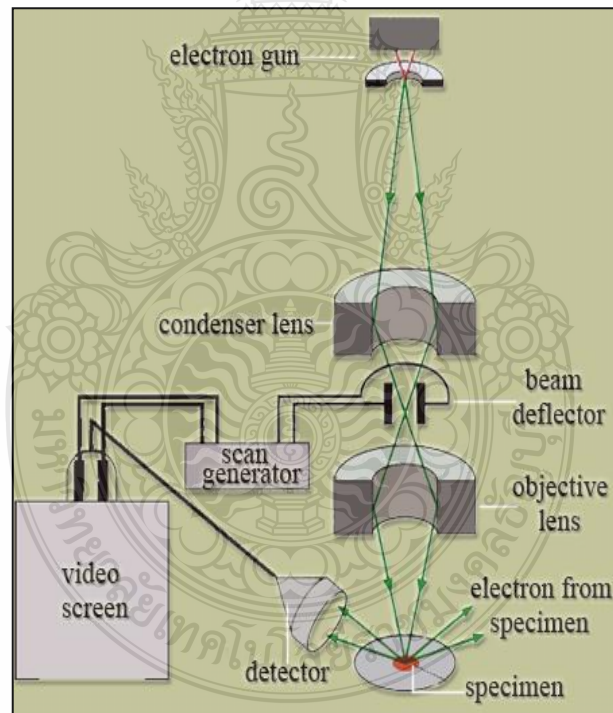
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติบางประการของสสารที่มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ดังรูปที่ 2.9 ทั้งนี้เป็นเพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตรและด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆได้ทำให้ภาพมีความชัดลึกสูง ดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆเช่นการวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry : EDS) และเวฟเล็งชิติสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (Wavelength Dispersive Spectrometry : WDS) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีด้วย



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [18]



รูปที่ 2.10 อำนาจแยกแยะของ SEM [18]

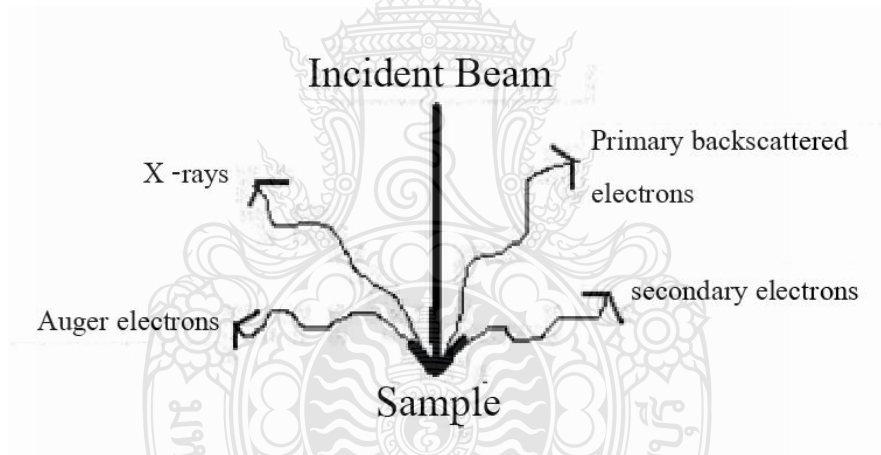


รูปที่ 2.11 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [18]

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM

อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งภายในมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV (บางครั้งเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยแอมเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งานเลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First Condenser Lens) อาจนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทรานส์พอร์ตของอิเล็กตรอน (Electron Optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยคอยกราดภาพ (Scan Coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยมคล้ายกับการกราดภาพบนจอโทรทัศน์ดังรูปที่ 2.11

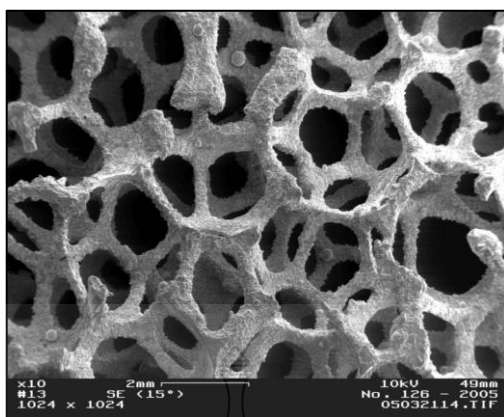
### 2.7.1 สัญญาณต่างๆ (Various Types of Signal)



รูปที่ 2.12 สัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร [18]

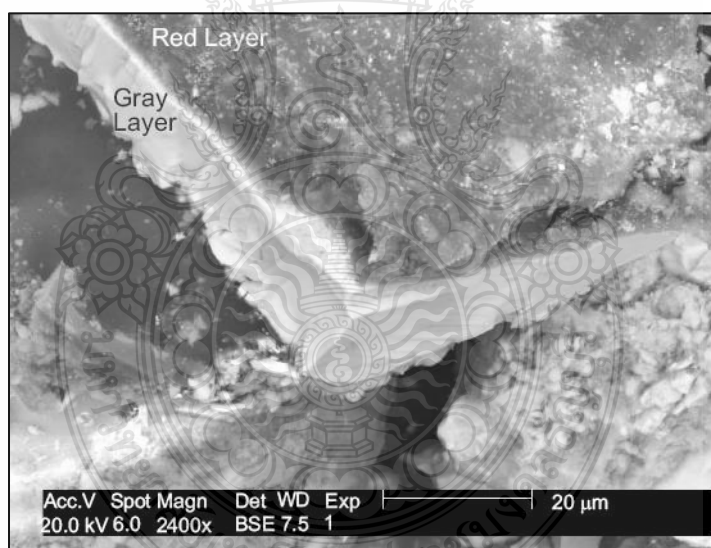
สัญญาณแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสารและอันตรกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นตามมามีดังรูปที่ 2.12

1) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron: SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวและเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุดอิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อยๆอีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิดดังรูปที่ 2.13



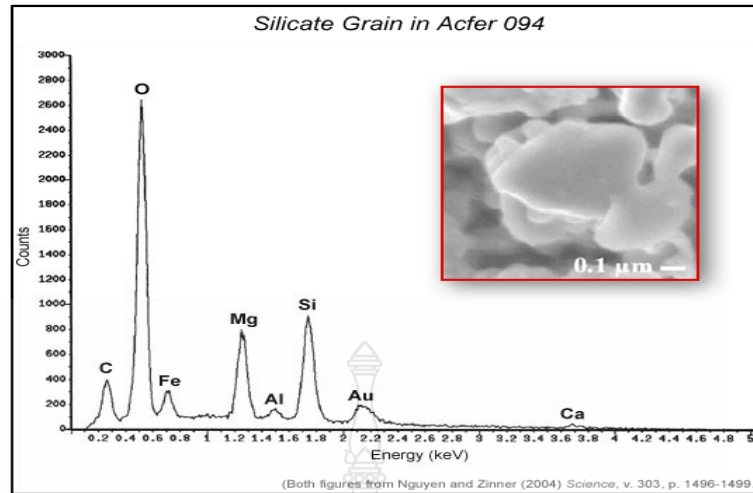
รูปที่ 2.13 สัณฐานอิเล็กทรอนิกส์ทศนิยม [18]

2) สัณฐานแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron : BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมีและลักษณะโทโพกราฟฟีของพื้นผิวดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สัณฐานอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับ [18]

3) สัณฐานแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบเป็น สัณฐานที่ใช้เทคนิค EDS และ WDS ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (EDS) [18]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และอนินท์ มีมนต์ [19]

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนแบบต่อเถระหว่างอลูมิเนียมผสมเบอร์ A5083 และ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเบอร์ SS400 ได้ถูกทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบฟริกชั่นสเตอร์ภายใต้ การเปลี่ยนแปลงการเชื่อม เช่นความเร็วในการเชื่อม ความลึกกวนเข้าไปในเนื้อของวัสดุ ผลการ ทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็วทำให้ค่าความแข็งแรงต่อลดลงเนื่องจากการเพิ่มความเร็วของความเร็ว รอบทำให้ IMC ชนิดเปราะที่มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของความ แข็งแรงของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบกวนต่ำการพังทลายเกิดในอลูมิเนียมเป็นแบบคัดไทล์ ขณะที่ ความเร็วรอบสูงเป็นการพังทลายแบบเปราะเกิดขึ้นที่ชั้นหน้าของ IMC การเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อม ทำให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การเพิ่มความลึกของตัวกวนสอดคล้องในแนวเชื่อมที่ก่อให้เกิด จุดบกพร่อง

นิวัตร คุณนวนวงศ์ [20]

การเชื่อมชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยความต้านทานชนิดจุด มักพบปัญหาเกิดที่ผิวหน้าชิ้นงานที่มี อลูมิเนียมออกไซด์เกิดเป็นฟิล์มชั้นบางๆ เคลือบเอาไว้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยในการ ทดลองส่วนแรกนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อขนาดและความแข็งแรงของรอยเชื่อม เนื่องจากสภาพผิวหน้าของชิ้นงานในการเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุดโดยพารามิเตอร์ที่ใช้ใน การศึกษามี 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ระดับ ได้แก่ สภาพการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (ผิวหน้า ชิ้นงานไม่ถูกกำจัดออกไซด์, ถูกกำจัดออกไซด์ด้วยวิธีทางกล และถูกกำจัดออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี)

ปรัชญา เพ็ญสุระและบวร โชคผู้พัฒนา [21]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเฝ้าติดตามการวัดค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อเชื่อมมาควบคุมความสมบูรณ์ของกระบวนการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดโดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดค่าความต้านทานในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองกับเหล็กกล้าอะลูมิเนียม SS400 ใน 3 สถานะการเชื่อมคือชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดชิ้นงานที่มีคราบน้ำมันกันสนิมและชิ้นงานที่เชื่อมด้วยอิเล็กโทรดที่มีการเปลี่ยนรูปซึ่งเป็นสถานะการจริงที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการทดสอบแรงดึงเหนือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136:1999 และทำการทดสอบโครงสร้างมหภาคตามมาตรฐาน JIS Z 3139 : 1978 ผลการทดลองปรากฏว่าชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดจะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.29-0.37 มิลลิโอม์ชิ้นงานเชื่อมที่มีคราบน้ำมันกันสนิมจะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.38-0.46 มิลลิโอม์พบว่าจะมีค่าความต้านทานสูงส่งผลให้มีปริมาณความร้อนมากขึ้นและชิ้นงานที่เชื่อมด้วยอิเล็กโทรดที่มีการเปลี่ยนรูปจะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.27-0.38 มิลลิโอม์ค่าความต้านทานจะมีค่าที่น้อยกว่าสถานะอื่นที่มีความสมดุลและมีค่าความต้านทานสูงมากถึง 3 ไซเคิลและลดลงในไซเคิลต่อไปมากกว่าทั้ง 2 สถานะเนื่องจากกระแสสามารถไหลผ่านชิ้นงานเชื่อมได้อย่างสะดวก

นราธิป แสงซ้าย และบรรเจิด ดอนเนตรงาม [22]

การลากชิ้นรูปและการประกอบด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในอุตสาหกรรมงานเชื่อมนั้นนิยมใช้เหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCD ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าการทดสอบความแข็งแรงดึง-เหนือนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนเหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCD ที่ความหนา 2 mm โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษานี้คือแรงกดระหว่างชิ้นงานกระแสไฟฟ้าเวลาในการกดระหว่างชิ้นงานและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมการศึกษานี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองทางสถิติชนิด 2K พบว่าปัจจัยต่างๆ ข้างต้นมีผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยเรียงจากปัจจัยที่มีผลกระทบจากน้อยไปหามากตามลำดับดังนี้กระแสไฟฟ้าเวลาในการกดผลร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมผลร่วมระหว่างเวลาในการกดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมจากการทดสอบทำให้สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมโดยสามารถส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง-เหนือนจากการเชื่อมอยู่ในระดับ 5.166 ถึง 5.492 KN

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 วิธีการดำเนินงาน

การเชื่อมด้านทานแบบจุดนั้นเป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะกระบวนการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์ ดังนั้นคุณภาพของกระบวนการเชื่อมต้องคงทนต่อการใช้งานของวัสดุที่ทำการเชื่อม จึงจำเป็นต้องศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คืออลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟ เวลาในการเชื่อม และแรงดันกด ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลโดยตรงในการทดลองนี้ซึ่งการทดลองนี้ใช้ระยะเวลาในการดำเนินการทดลองได้อย่างเหมาะสม จึงได้วางแผนงานและดำเนินงานให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ตามกำหนด

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นกระบวนการเชื่อมแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD เพื่อศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและคุณภาพผิวรอยเชื่อม โดยตั้งเงื่อนไขการเชื่อม 2 กรณี คือ กรณีกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง และกรณีที่ 2 โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง เพื่อทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของผลการทดลองที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งการดำเนินการได้จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามข้อกำหนดและตัวแปรการทดลอง ศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง แสดงขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

##### 3.2.1 วัสดุที่ทำการทดสอบ

สำหรับวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานเชื่อม เพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติรอยต่อภายในการทดสอบ คือ แผ่นอลูมิเนียม AA1100 มีขนาดความหนา 1.20 mm และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD มีขนาดความหนา 1 mm โดยวัสดุทั้งสองมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.1** ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม AA1100

ธาตุ	Al	Fe	Si	Mn	Cu	P	S
AA1100	สมดุล	-	0.095	0.050	0.150	-	-

**ตารางที่ 3.2** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

ธาตุ	Al	Fe	Si	Mn	Cu	P	S
SGACD	-	สมดุล	-	-	0.006	0.014	0.024

ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมต่อนำวัสดุมาตัดให้ได้ตามขนาดดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตัดตามแนวรีดและขวางแนวรีด เพื่อไปทดสอบแรงดึง โดยผลการทดสอบทำให้ทราบว่า การตัดชิ้นงานขวางแนวรีดให้ความแข็งแรงมากกว่าตัดตามแนวรีด ในการทดสอบครั้งนี้ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z3136 [23] และเลือกใช้วัสดุสำหรับการเชื่อมด้านทานแบบจุดดังตารางที่ 3.3 และแสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุดังนี้

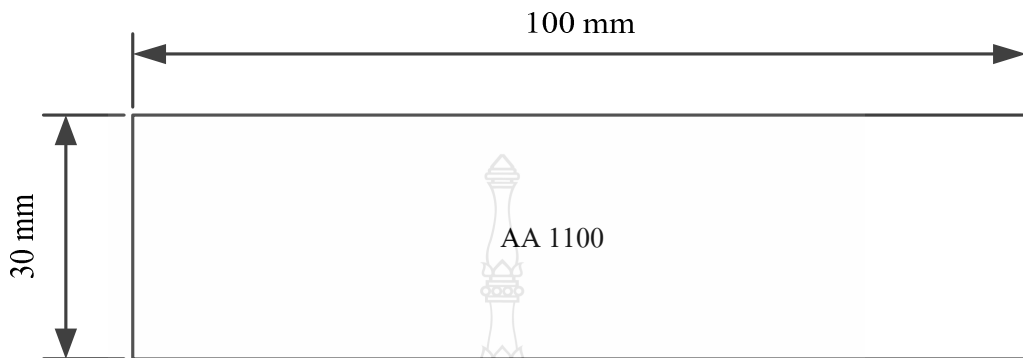
**ตารางที่ 3.3** การเลือกใช้วัสดุสำหรับการเชื่อมแบบจุด [23]

ความหนาของชิ้นงาน (T)	ความกว้าง (W)	ความยาว (L)	ระยะต่อเกย (P)
ต่ำกว่า 0.8	20	75	20
0.8 ถึง 1.3	30	100	30
1.3 ถึง 2.5	40	125	40
2.5 ถึง 3.5	50	150	55
3.5 ถึง 4.4	50	150	70
4.4 ถึง 5.0	50	150	80



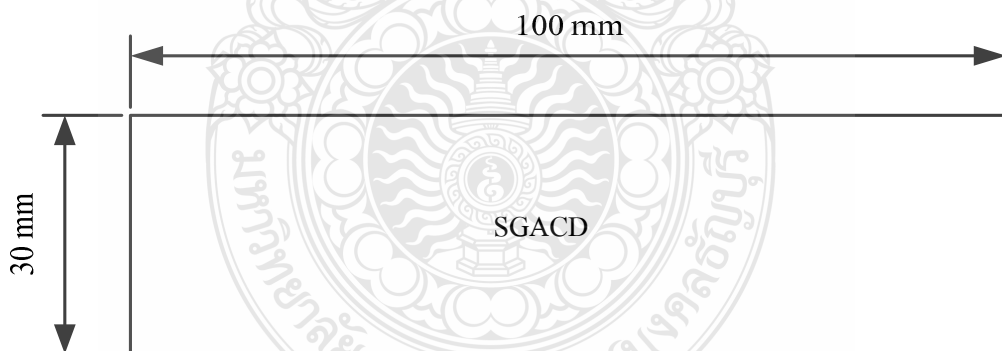
การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1) นำแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่มีความหนา 1.20 mm มาตัดให้มีขนาดความกว้าง 30 mm และความยาว 100 mm ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดของแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่ตัดทำการทดสอบ

2) นำแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี SGACD ที่มีความหนา 1 mm มาตัดให้มีขนาดความกว้าง 30 mm และความยาว 100 mm ดังรูปที่ 3.2

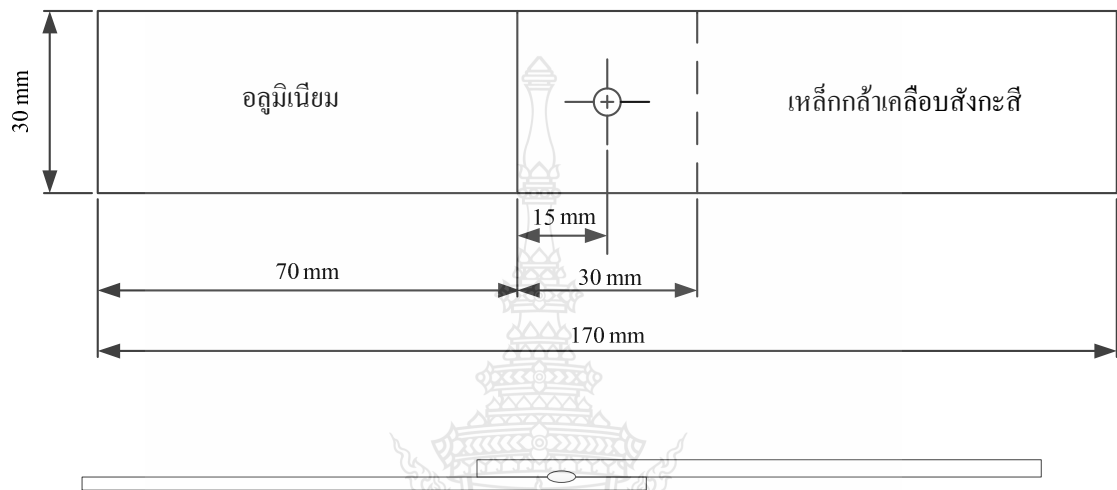


รูปที่ 3.2 ขนาดของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี SGACD ที่ตัดทำการทดสอบ

หลังจากที่ได้ขนาดของชิ้นงานทดสอบดังกล่าวตามมาตรฐานแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อม โดยการนำแผ่นอลูมิเนียม และแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีทำการ

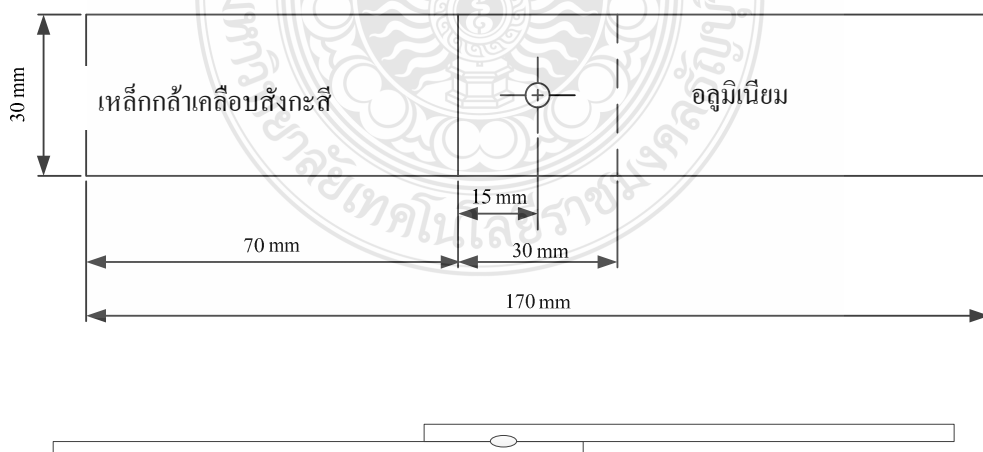
ตัดเสร็จแล้ว มาวางต่อเกยกันให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน JIS Z3136 ซึ่งชิ้นงานทดสอบสำหรับการเชื่อมด้านทานแบบจุด ถูกนำมาวางต่อเกยตามลักษณะการเชื่อม

3) การวางต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบรอยต่อเกยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน

4) การวางต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีอยู่ด้านล่างและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมแบบรอยต่อเกยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน

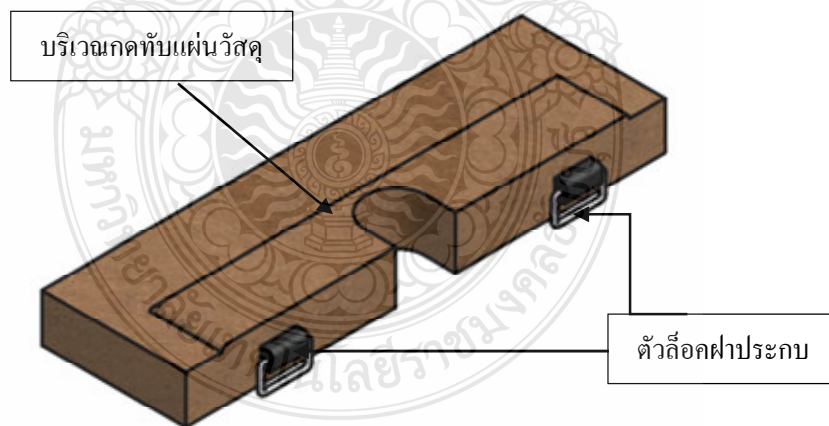
## การเตรียมอุปกรณ์การเชื่อม

ขั้นตอนนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแบบการเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) ซึ่งในการทดสอบได้ทำการศึกษารายต่อรายของชิ้นงานทดสอบ สำหรับการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม แบบการเชื่อมต้านทานแบบจุดมีดังนี้

### 1) การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig)

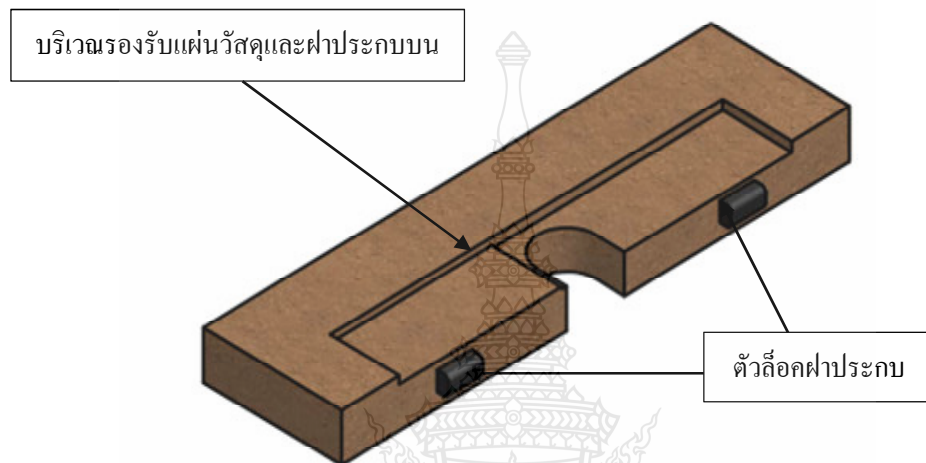
อุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการเชื่อมชิ้นงาน คือ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) การออกแบบอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานจะต้องให้มีความแข็งแรงมั่นคง เนื่องจากในขณะทำการเชื่อมการเชื่อมต้านทานแบบจุด (RSW) ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนและอุณหภูมิที่สูงระหว่างการเชื่อม ดังนั้นอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการต้านการสั่นสะเทือนหรือลดการสั่นสะเทือนให้ได้มากที่สุด เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม วัสดุที่นำมาทำ Jig ควรจะมีสมบัติเป็นฉนวน และมีฝาประกบด้านบนและล่างเพื่อจับยึดให้ชิ้นงานสองชิ้นแนบสนิทกัน

(1) ฝาประกบด้านบนเลือกใช้ไม้เป็นวัสดุ ซึ่งไม่มีสมบัติเป็นฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้า ตรงบริเวณฝาประกบด้านบนจะมีส่วนยื่นนูนออกมาประมาณ 1 mm เพื่อกดชิ้นงานให้แนบสนิทกับฝาประกบล่าง ทำให้มีความแน่นเพื่อป้องกันการหลุดเลื่อนของแผ่นวัสดุขณะทำการเชื่อม ดังรูปที่ 3.5



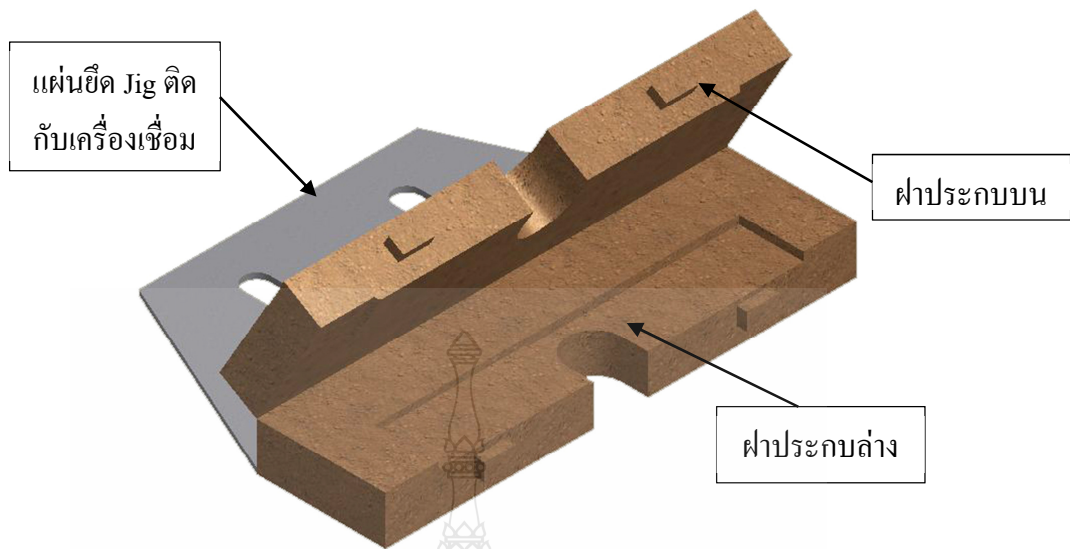
รูปที่ 3.5 ฝาประกบด้านบน

(2) ฝาประกบด้านล่างทำจากไม้ ตรงบริเวณที่วางแผ่นวัสดุจะลึกลงไปจากระดับของฝาประกบล่างประมาณ 3 mm เพื่อรองรับกับความหนาของแผ่นวัสดุทั้ง 2 ชั้น และฝาประกบด้านบนเมื่อนำชิ้นงานทั้ง 2 ชั้นมาใส่ใน Jig และปิดฝาประกบล่างจะทำให้การจับยึดมีความมั่นคงทนต่อการสั่นสะเทือนป้องกันการหลุดเคลื่อนของแผ่นวัสดุขณะทำการเชื่อมดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ฝาประกบด้านล่าง

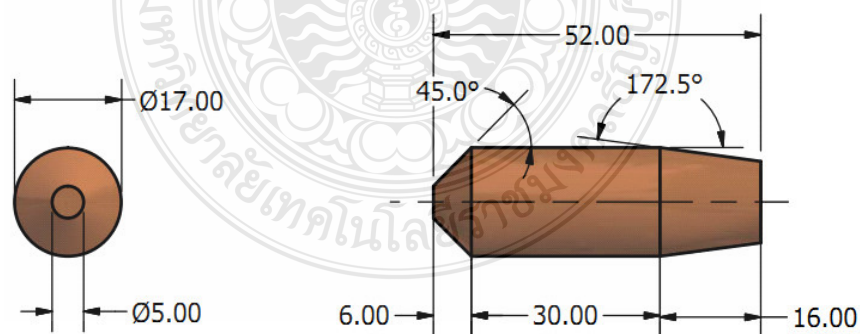
(3) ยึดฝาประกบด้านบนและฝาประกบด้านล่างด้วยบานพับตรงบริเวณด้านข้าง เพื่อการใช้งานที่สะดวกและรวดเร็วในการเชื่อม แล้วนำแผ่นอลูมิเนียมมาตัดทำฐานเพื่อยึด Jig ติดกับเครื่องเชื่อมดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig)

2) หัวอเล็กโตรด

หัวอเล็กโตรดที่เลือกนำมาทำการทดลองทำมาจากทองแดงบริสุทธิ์เป็นหัวอเล็กโตรดแบบ Type E Truncated ก่อนทำการเชื่อมควรมีการออกแบบหัวอเล็กโตรด ดังรูปที่ 3.8 (ก) ให้ได้ขนาดและทำการกลึงหัวอเล็กโตรดตามแบบสั่งงาน เมื่อได้อเล็กโตรดแล้วควรตรวจสอบขนาดของหัวอเล็กโตรดให้มีขนาด 5 mm และเอียง  $45^\circ$  [22] ทำการตกแต่งผิวด้วยกระดาษทรายเพื่อลบครีบกม ดังรูปที่ 3.8 (ข)



(ก) แบบ Drawing หัวอเล็กโตรดแบบ Type E Truncated ตามมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมนานาชาติ

รูปที่ 3.8 หัวอเล็กโตรดแบบทูป



(ข) ลักษณะของอ็เล็กโทรดทึบที่ทำมาจากทองแดงบริสุทธิ์

### รูปที่ 3.8 หัวอ็เล็กโทรดแบบทึบ (ต่อ)

#### 3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นอกจากเครื่องมือที่ได้ออกแบบเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมด้านทานแบบจุดแล้ว เครื่องจักรก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมอย่างมากเช่นกันซึ่งหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนของการดำเนินงาน โดยมีเครื่องจักรกลต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เครื่องเชื่อมด้านทานแบบจุด อุปกรณ์การหล่อเช่นเครื่องทดสอบแรงดึงเครื่องขัดเพื่อส่งคู โครงสร้างของชิ้นทดสอบ และกล้องจุลทรรศน์เป็นต้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

##### 1) ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม

ในขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมนี้ มีวิธีการดังต่อไปนี้

(1) เตรียมแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่นอลูมิเนียม AA1100 โดยตัดแผ่นโลหะทั้งสองชนิดให้มีขนาดกว้าง 30 mm และยาว 100 mm ด้วยเครื่องตัดโลหะดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ

(2) นำแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่ตัดได้ขนาดเรียบร้อยแล้วมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250 เพื่อทำการลบคมที่เกิดจากการตัดแผ่นวัสดุทั้งสองชนิดดังรูปที่ 3.10 (ก) และ (ข)



(ก) การขัดลบคมด้านกว้างของแผ่น โลหะ



(ข) การขัดลบคมด้านยาวของแผ่น โลหะ

รูปที่ 3.10 การลบคมของชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250

(3) นำแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่ทำการลบคมเรียบร้อยแล้วมาเชื่อมทำความสะอาดโดยแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD จะทำความสะอาดด้วย

เอทิลแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 3.11 (ก) และแผ่นอลูมิเนียม AA1100 นั้น เช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ดังรูปที่ 3.11 (ข)



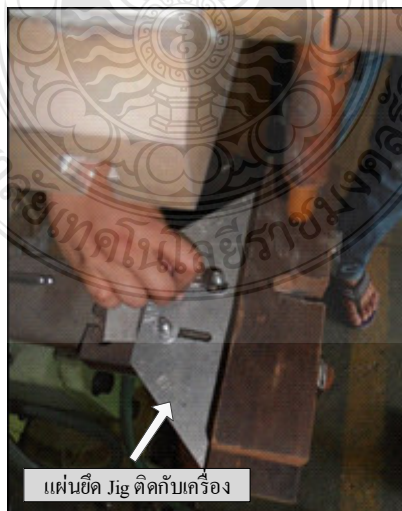
(ก) แผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD จะทำความสะอาดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์



(ข) แผ่นอลูมิเนียม AA1100 นั้น เช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน

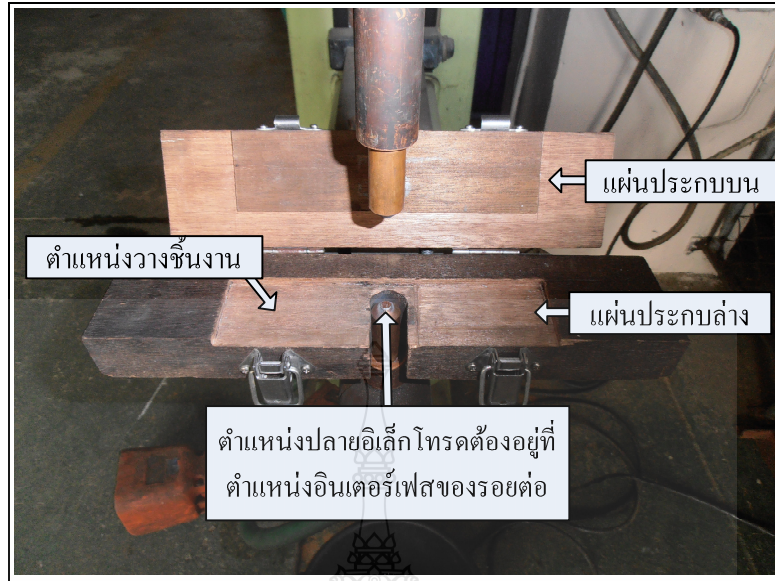
รูปที่ 3.11 การเช็ดทำความสะอาดแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่นอลูมิเนียม AA1100

(4) ทำการติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (Jig) กับเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) และกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์จับยึด ให้สมบูรณ์เพื่อใช้สำหรับการเตรียมทำการเชื่อมโลหะทั้งสองชนิดดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13



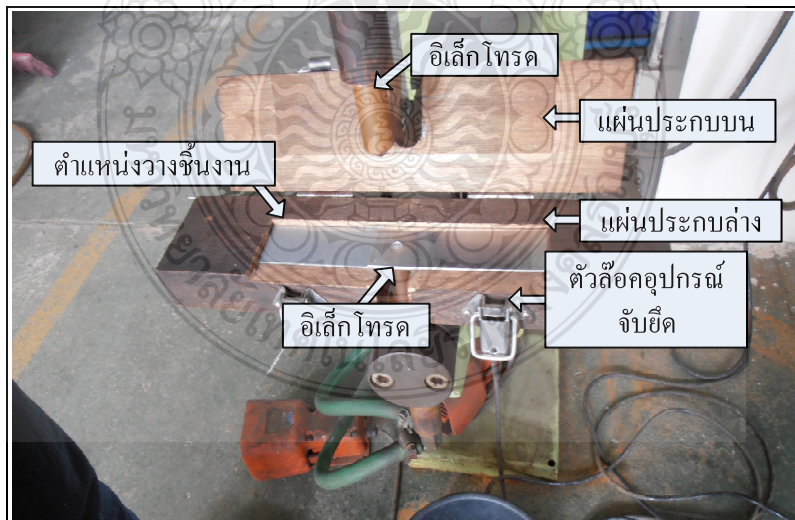
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (Jig) กับเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด





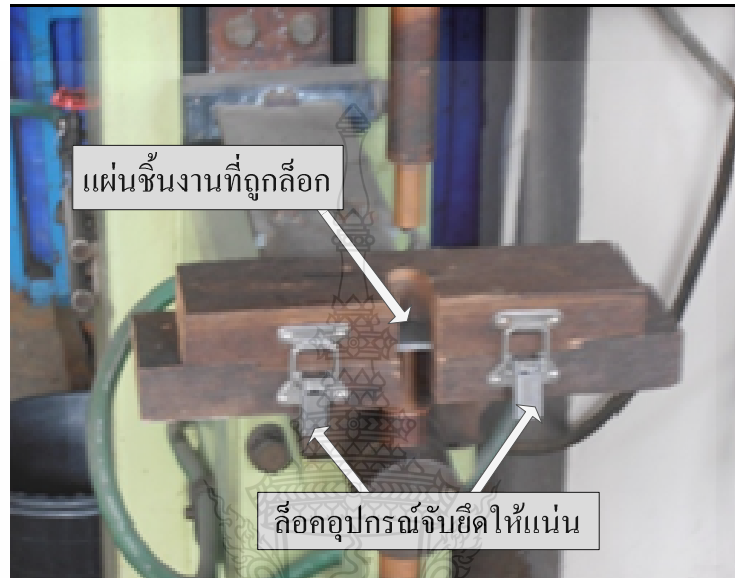
รูปที่ 3.13 การกำหนดระยะของอุปกรณ์จับยึด

(5) นำแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่เตรียมไว้ขนาด กว้าง 30 mm ยาว 100 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3136 ไปทำการเชื่อมโดยวางบริเวณอุปกรณ์จับยึด ชิ้นงาน (Jig) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวางแผ่นวัสดุลงบนอุปกรณ์จับยึด (Jig)

(6) เมื่อวางชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้วทำการตรวจเช็คให้แน่ใจว่าวางแผ่นเหล็กที่เตรียมไว้ตรงกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ทำการล็อคอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานให้แน่นเพื่อความปลอดภัยในการเชื่อมและความแม่นยำในตำแหน่งเชื่อมเพื่อให้พร้อมที่จะทำการเชื่อมชิ้นงานดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การกดยึดชิ้นงานเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนทำการเชื่อม

## 2) การเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

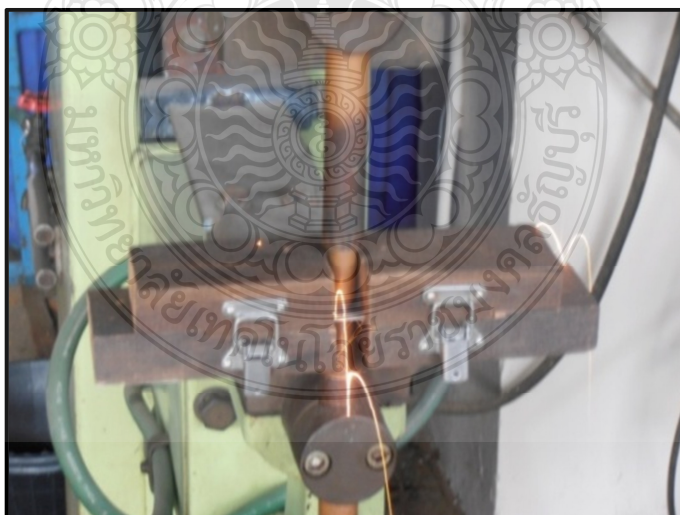
(1) ตัวแปรการเชื่อมความต้านทานแบบจุดดังรูปที่ 3.16 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ประกอบด้วย 4 ตัวแปร คือ

- กระแสไฟ 85 – 105 kA
- แรงดันกดอิเล็กโทรด 0.10 – 0.30 MPa
- เวลากดแช่ 1–20 Cycles
- ตำแหน่งการวางแผ่น โลหะ โดยกำหนดให้แผ่นอะลูมิเนียมอยู่ด้านบน และแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง



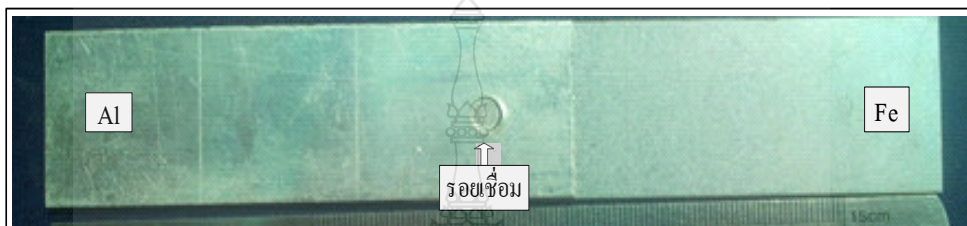
รูปที่ 3.16 การตั้งค่าบนเครื่องเชื่อม

(2) ทำการเชื่อมด้านทานแบบจุด RSW ระหว่างแผ่นอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเชื่อมด้านทานแบบจุด RSW

(3) ชิ้นงานเมื่อผ่านการเชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้วนำชิ้นทดสอบออกจากอุปกรณ์จับยึดปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้องและตรวจสอบความเรียบร้อยของชิ้นทดสอบ หลังจากทำการเชื่อมเสร็จแล้ว ทำการตรวจสอบหัวอิเล็กโทรด์ทุกครั้งก่อนลงมือทำการเชื่อมชิ้นทดสอบครั้งต่อไปซึ่งได้ชิ้นทดสอบเชื่อมที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 3.18 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงเฉือนดึง (Shear Tension Testing) [23, 24]



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการเชื่อมด้านทานแบบจุด (RSW)

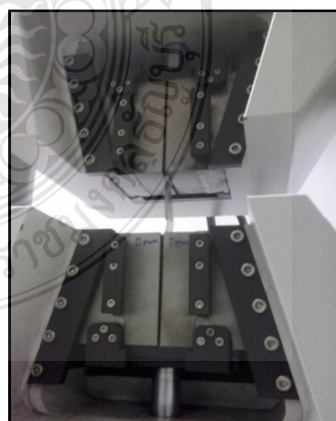
### 3.2.3 การทดสอบสมบัติของรอยเชื่อม

#### 1) การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบความแข็งแรงเฉือนดึง (Shear Tension Testing) สำหรับการเชื่อมแบบจุด เพื่อหาค่าความแข็งแรงของการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ เป็นการทดสอบรอยเชื่อมด้วยการดึงเฉือน ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน JIS Z3136 [23] โดยการทดสอบค่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม



(ก) เครื่องทดสอบแรงดึงเฉือน



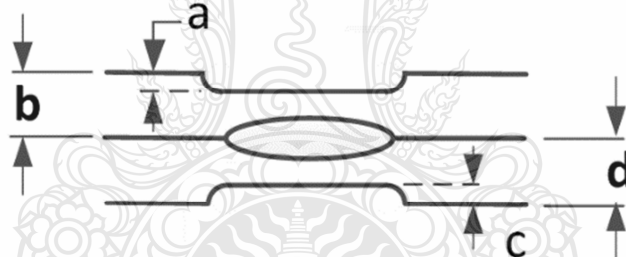
(ข) ตัวล็อกชิ้นงานของเครื่องทดสอบ

รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบแรงดึงเฉือน GOTECH รุ่น GT-7001-LA-C50

ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเดือน GOTECH รุ่น GT-7001-LA-C50 ดังรูปที่ 3.19 (ก) ใช้ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที แรงในการดึง 1,000 N จากนั้นทำการทดสอบดึงขึ้นทดสอบให้ขาดออกจากกันดังรูปที่ 3.19 (ข) ในการทดสอบแรงดึงเดือนนั้นต้องทำการดึงขึ้นงานทดสอบทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาเฉลี่ยของขึ้นงาน ก่อนทำการทดสอบควรนำแผ่นเหล็กหรือแผ่นอลูมิเนียมรองที่ปลายของทั้ง 2 ด้านเพื่อให้แรงดึงทั้งหมดลงบริเวณกึ่งกลางของขึ้นงานเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่เที่ยงตรง

### 2) การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

วัดขนาดความลึกของรอยกดเชื่อม ดังรูปที่ 3.20 เพื่อยืนยันผลการทดสอบ นำขึ้นทดสอบที่ได้จากการเชื่อมมาวัดเพื่อหาค่าความลึกของรอยกด ความลึกของรอยกดด้านบนขึ้นงานทดสอบกำหนดให้เป็น  $a$  และความลึกของรอยกดด้านล่างของขึ้นงานทดสอบกำหนดให้เป็น  $c$  หลังจากวัดความลึกของขึ้นงานทดสอบแล้วทำการหาอัตราส่วนระหว่างความลึกรอยกดและความหนาแผ่นบน ( $a/b$ ) อัตราส่วนระหว่างความลึกรอยกดและความหนาแผ่นล่าง ( $c/d$ ) เพื่อหาค่าระดับคุณภาพของรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดตามมาตรฐานญี่ปุ่นหมายเลข JIS Z3139 [25] เพื่อหาตัวแปรที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบระดับคุณภาพ



รูปที่ 3.20 ตำแหน่งและระยะการวัดรอยกด [25]

### 3) การทดสอบสมบัติทางเคมี

ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคโดยการนำเฉพาะขึ้นงานทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานต่าง ที่ทำการตรวจสอบ โดยนำขึ้นงานทดสอบมาทำการตัดขวางตามกึ่งกลางของขึ้นงานทดสอบ นำไปขึ้นตัวเรือนเรซิน หลังจากนั้นก็นำมาขัดและกัดกรด จากนั้นนำไปส่องโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ทำการบันทึกภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์

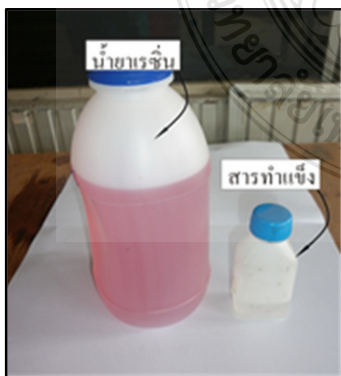
การเตรียมขึ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม (Macro Structure) และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Microstructure) นำขึ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จมาทำการตัดผ่านรอยเชื่อมโดยให้ขึ้นงานมีความกว้างประมาณ 5-10 mm ซึ่งการตัดขึ้นงานจะใช้เครื่องตัดไม

โครตเตอร์ดังรูปที่ 3.21 เพื่อให้ชิ้นงานมีการสันสะท้อนน้อยเพื่อลดการแตกหักบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานเวลาตัดชิ้นงานควรเปิดน้ำหล่อเย็นเพื่อลดความร้อนของชิ้นงาน ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง



รูปที่ 3.21 การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทำเรื่อน (Mounting)

4) การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์สะท้อนแสง(Optical Microscope) ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานทดสอบต้องถูกเตรียมเพื่อสามารถนำไปทดสอบ ก่อนทำการตรวจสอบโครงสร้างได้นั้น ต้องนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทำเรื่อน (Mounting) มีลักษณะดังรูปที่ 3.22 (ข) เพื่อให้ความสะอาดและปลอดภัยต่อการจับถือ เตรียมชิ้นงานในขั้นตอนการขัดคูโครงสร้าง สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว การทำเรื่อน (Mounting) สามารถทำโดยการผสม เรซิน 98% โคบอลท์ (Cobalt) 0.20 –0.40% ตัวทำให้แข็ง (Hardener) 1 – 2% ดังรูปที่ 3.22 (ก) เมื่อผสมเสร็จเทใส่เบ้าหล่อ ทิ้งไว้ประมาณ 20 –30 นาทีสามารถนำมาขัด โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 400 800 และเบอร์ 1,000 เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ



(ก) อุปกรณ์การหล่อชิ้นงาน

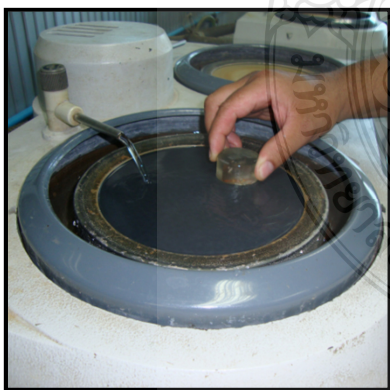


(ข) เรื่อน (Mounting) ชิ้นงาน

รูปที่ 3.22 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ โครงสร้าง

### 5) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม (Macro Structure)

ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค ต้องขัดผิวชิ้นงานให้เรียบตามลำดับตั้งแต่กระดาษทรายเบอร์ 250 400 600 800 1,000 1,200 และ 2,000 ในการขัดไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไปเพราะอาจส่งผลให้กระดาษทรายเกิดการเสียหายและโครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบดพร่อง ดังรูปที่ 3.23 (ก) จากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัด (Polishing) ที่มีขนาด  $1 - 3 \mu\text{m}$  เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงเพชร (Diamond Paste) การขัดผงขัดนี้ทำบนเครื่องขัด ดังรูปที่ 3.23 (ค) จะใช้เครื่องขัดที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดผสมกับ Lubricant เกลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดจนเกิดความมันวาว และ ตามด้วยการกัดกรดส่วนผสมของกรดที่ใช้ คือ กรดไฮโดรฟลูออริก 1/2 ถึง 2 mL ผสมน้ำ 100 mL จุ่มหรือเช็ดบริเวณด้านอนุมิเนียม ประมาณ 15 - 45 วินาที ล้างด้วยน้ำกลั่นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง และ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 3 mL ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 mL และเมทิลแอลกอฮอล์ 100 mL จุ่มหรือเช็ดนานบริเวณด้านเหล็ก ประมาณ 10 - 30 วินาที ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง เมื่อทำการกัดกรดเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ที่กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า โดยนำบริเวณรอยเชื่อมวางกลางบริเวณที่แสงผ่าน ให้ลำกล้องเล็งลงมาอยู่ใกล้ชิ้นตรวจสอบมากที่สุด รูปที่ปรากฏพบว่าบริเวณขอบเกรนเป็นสีดำ ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนี้เพื่อให้เห็นบริเวณที่แตกต่างกันของชิ้นงาน เช่น ขอบเกรน บริเวณที่เชื่อมและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม



(ก) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทราย



(ข) อุปกรณ์การขัดละเอียด



(ค) การขัดชิ้นงานทดสอบด้วยผ้าสักหลาด

รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

#### 6) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Microstructure)

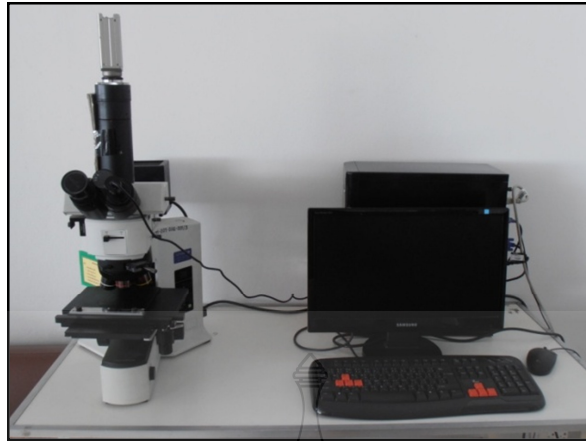
ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ต้องขัดผิวชิ้นงานให้เรียบตามลำดับตั้งแต่กระดาษทรายเบอร์ที่หยาบสุดถึงกระดาษทรายเบอร์ละเอียดสุดในการขัดไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไปเพราะจะส่งผลให้กระดาษทรายเกิดการเสียหายและโครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกร่องดังรูปที่ 3.24 (ก) จากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัด (Polishing) ที่มีขนาด  $1 - 3 \mu\text{m}$  เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงเพชร (Diamond Paste) การขัดผงขัดนี้จะทำบนเครื่องขัด ดังรูปที่ 3.24 (ค) ใช้เครื่องขัดที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดผสมกับ แอลกอฮอล์ เเทลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดจนมันเงาเพื่อเปิดหน้าผิวของชิ้นงานทดสอบ



#### รูปที่ 3.24 สารเคมีที่ใช้ในการกัดชิ้นงานทดสอบเพื่อดูโครงสร้าง

ชิ้นงานที่ขัดจนมีความมันวาว ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง แล้วนำมากัดกรดที่เตรียมไว้ ซึ่งกรดที่นำมากัดกรด มีส่วนผสมที่ประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก 1/2 ถึง 2 mL ผสมน้ำ 100 mL จุ่มหรือแช่บริเวณด้านอลูมิเนียม ประมาณ 15 - 45 วินาที ล้างด้วยน้ำกลั่นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง และ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 3 mL ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 mL และเมทิลแอลกอฮอล์ 100 mL จุ่มหรือแช่นานบริเวณด้านเหล็ก ประมาณ 10 - 30 วินาที ดังรูปที่ 3.24 ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง นำมาส่องโครงสร้างที่กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope) ดังรูปที่ 3.25 ที่กำลังขยายมากกว่า 10 เท่า จนถึง 1000 เท่า เพื่อให้เห็นบริเวณที่แตกต่างกัน เช่น บริเวณพื้นที่อินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นใหม่ เพื่อนำมาวิเคราะห์





รูปที่ 3.25 กล้องตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)

3) การตรวจสอบกระจายตัวของอิเล็กตรอน (EDS) ของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) [18]

การส่องโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM) โดยใช้กำลังขยายสูง เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและมหภาค และ

ศึกษาการกระจายตัวของอิเล็กตรอน (EDS) ของรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซและรอยพังทลาย โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดพอเหมาะที่จะเอาเข้าเครื่องได้ นำไปขัดผิว ให้เรียบด้วยกระดาษทรายขัดเหล็กหล่อลื่นด้วยน้ำในขณะที่ขัด โดยเริ่มขัดจากหยาบไปหาละเอียด เริ่มจากเบอร์ 220 320 400 600 800 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ในบางกรณีอาจใช้ถึงเบอร์ 3,000 การขัดแต่ละครั้งจะต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดชิ้นงาน ขัดต่อจนรอยเดิมหายไปจากนั้นขัดเงา ด้วยผงอะลูมินา บนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุน ปกติจะนิยมใช้ผง อะลูมินาที่มีเม็ดขนาด 10.25 และ 0.05  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ล้างน้ำทุกครั้งที่เปลี่ยนผงขัด การขัดเป็นการขัดผิวตัวอย่างส่วนที่เสียรูปไปเนื่องจากการตัด ซึ่งจะต้องพยายามขัดให้ผิวที่แปรรูปออกไปให้หมด จนถึงบริเวณที่เป็น โครงสร้างที่แท้จริง ดังรูปที่ 3.26



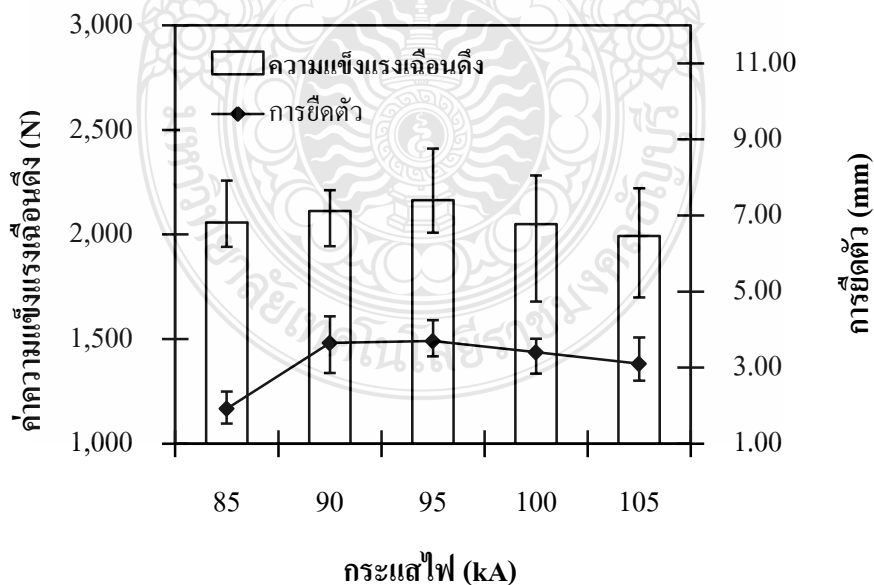
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

#### 4.1 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเบื้องต้นของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กไว้ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านล่าง

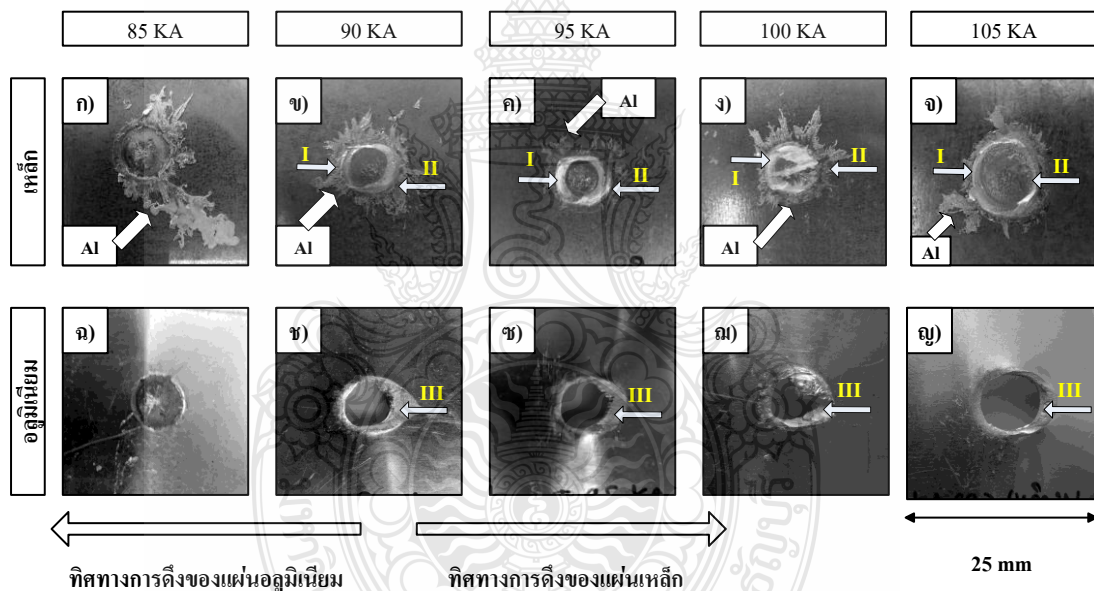
การทดลองเชื่อมด้านทานแบบจุดพบว่าหากนำแผ่นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าแผ่นเหล็กไว้ด้านบนทำให้แผ่นอลูมิเนียมเกิดการเสียรูป ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของแนวรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นของแรงดันกดหัวอิเล็กโทรด จึงตั้งสมมติฐานข้างต้นไว้ว่า “หากนำแผ่นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าแผ่นอลูมิเนียมวางไว้ข้างบนและทำการเชื่อม ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน”

ดังนั้นจึงเริ่มต้นการเชื่อมโดยกำหนดให้รอยต่อเกยระหว่างแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมวางต่อเกยกันตามเงื่อนไข โดยการนำแผ่นเหล็กวางบนแผ่นอลูมิเนียม และกำหนดตัวแปรในการเชื่อม โดยเริ่มใช้กระแสไฟเชื่อมระหว่าง 85 90 95 100 และ 105 kA เวลาที่ใช้ในการเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.10 MPa ทำการทดสอบความแข็งแรงเบื้องต้นของรอยต่อเกยโดยค่าความแข็งแรงและการยึดตัวของรอยต่อ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมต่อความแข็งแรงเบื้องต้นและการยึดตัวของรอยต่อเกย โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความแข็งแรงเชื่อมตึง และการยึดตัวของรอยต่อเกลียวโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟตั้งแต่ 85–105 kA เวลาในการเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1MPa พบว่ากราฟมีค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงเพิ่มขึ้นและมีค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงสูงสุดที่กระแส 95 kA โดยมีค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงประมาณ 2,200 N และการยึดตัวประมาณ 3.70 mm การเพิ่มค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงเกิดขึ้นเพราะการเพิ่มกระแสส่งผลทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มกระแสไฟในการเชื่อมเป็น 100-105 kA มีค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงน้อยลง ส่งผลทำให้การยึดตัวมีค่าน้อยลงเช่นกัน แต่เมื่อเทียบกับการลดลงของกระแสที่มีค่าต่ำกว่า 95 kA พบว่าค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงและการยึดตัวมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งการพังทลายของชิ้นงาน โดยทั่วไปเป็นการพังทลายที่แตกต่างกันตามตัวแปรที่กำหนด [1, 21]



รูปที่ 4.2 รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเชื่อมตึงด้วยกระแสไฟตั้งแต่ 85-105 kA ระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมโดยวางแผ่นเหล็กอยู่ด้านบนการเชื่อม

รูปที่ 4.2 แสดงผิวหน้าการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเชื่อมตึงที่กระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85-105 kA รูปการพังทลายแถวด้านบนเกิดการแยกแผ่นเหล็กที่อยู่ด้านบนให้ห่างขึ้น โดยปกติแล้วแผ่นเหล็กต้องคว่ำประกบลงบนแผ่นอลูมิเนียมเพื่อทำการถ่ายภาพ ขณะที่แถวด้านล่าง คือ รอยพังทลายของแผ่นอลูมิเนียมหลังทำการดึงขาดออกจากกันซึ่งการทดสอบค่าความแข็งแรงเชื่อมตึงนั้นแสดงผล

ดังรูปที่ 4.1 โดยแผ่นเหล็กถูกดึงไปทางด้านขวา ส่วนแผ่นอลูมิเนียมถูกดึงไปทางด้านซ้าย เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมที่เกิดจากความร้อนที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม

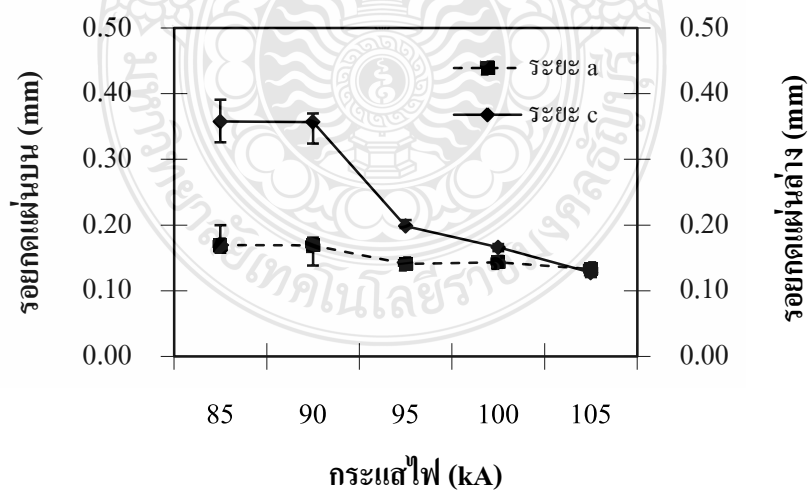
รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหรือเศษหลอมเหลวที่เกิดจากการหลอมละลายของอลูมิเนียมหรือเรียกว่า Spatter กระจายตัวออกรอบๆ รอยเชื่อมในปริมาณที่มาก สังเกตได้ดัง รูปที่ 4.2 (ก) เศษอลูมิเนียมมีการกระจายตัวสูงทำให้พื้นที่รับแรงของรอยต่อ มีค่าแรงเฉือนดิ่งน้อยลง เกิดรอยฉีกขาดบนแนวเชื่อม ส่วนรูปที่ 4.2 (ข) บริเวณพื้นที่อินเทอร์เฟซไม่พบเศษเหล็กบนผิวอลูมิเนียมซึ่งการฉีกขาดนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวอินเทอร์เฟซระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมเมื่ออลูมิเนียมเกิดการกระจายตัวที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงต่ำ ดังรูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งมีค่าประมาณ 2,000 kN รูปที่ 4.2 (ข) พบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมมีการกระจายตัวสูงแต่มีปริมาณลดน้อยลงซึ่งสังเกตได้จากบริเวณที่ I เป็นการรวมตัวระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมที่เกิดจากความร้อนของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ส่วนบริเวณที่ II พื้นที่รอยฉีกขาดมีเนื้ออลูมิเนียมติดอยู่ที่บริเวณรอยเชื่อมเป็นจำนวนมาก และบริเวณที่ III เกิดจากการทดสอบแรงเฉือนดิ่งพบว่าผิวของอลูมิเนียมที่หายไปติดอยู่กับบริเวณรอยเชื่อมที่ II ทำให้พื้นที่รับแรงของรอยต่อ มีค่าแรงเฉือนดิ่งสูงขึ้นรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงและมีค่าความยึดตัวสูงกว่ากระแส 85 kA ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) พบว่าเศษอลูมิเนียมหลอมเหลว (Spatter) มีการกระจายตัวน้อยลงสังเกตได้จากบริเวณที่ I เป็นการรวมตัวระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมที่เกิดจากความร้อนของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมมีบริเวณที่กว้างมากขึ้น ส่วนบริเวณที่ II พื้นที่รอยฉีกขาดมีเนื้ออลูมิเนียมติดอยู่ที่บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระตรงบริเวณอินเทอร์เฟซนั้นหมายถึง บริเวณพื้นที่อินเทอร์เฟซมีการยึดติดของอลูมิเนียมกับเหล็กที่แน่นหนาขึ้น ทำให้มีค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 ที่กระแสเชื่อม 95 kA มีค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งสูงและการยึดตัวก็สูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนบริเวณที่ III ผิวของอลูมิเนียมมีการขาดหายไปซึ่งเกิดจากการทดสอบแรงเฉือนดิ่งทำให้ที่กระแสเชื่อม 95 kA มีค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งสูงสุดที่ค่าประมาณ 2,200 N และการยึดตัวของผิวอลูมิเนียมมีค่าประมาณ 3.70 mm ซึ่งเป็นค่าที่อลูมิเนียมบริเวณรอยเชื่อมมีการยึดตัว ส่วนเนื้อที่ขาดหายไปจากบริเวณส่วนที่ III ติดอยู่กับบริเวณรอยเชื่อมที่ II ทำให้พื้นที่รับแรงของรอยต่อมีค่าแรงเฉือนดิ่งสูง [23,24] มีค่าความแข็งแรงและมีค่าความยึดตัวสูงกว่ากระแส 85 –90 kA

รูปที่ 4.2 (ง) และ (ฉ) บริเวณรอบรอยเชื่อมพบเศษอลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมที่เกิดจากความร้อนที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การหลอมละลาย (Spatter) ที่เกิดจากหัวของอิเล็กโทรดส่งผลให้อลูมิเนียมมีการแตกตัวและกระจายตัวออกนอกรอบบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ I เป็นการฉีกขาดของอลูมิเนียมที่เกิดจากการทดสอบแรงเฉือนดิ่ง ซึ่งการฉีกขาดของบริเวณที่ I นั้นเป็นการฉีกขาดผ่าน

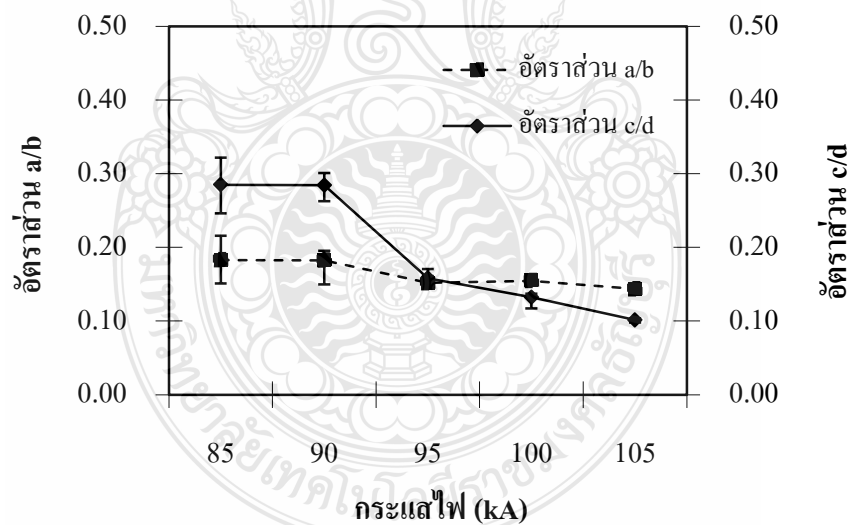
กลางแนวเชื่อมจึงทำให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งลดน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งรอยที่ลักษณะนั้นก็มีลักษณะที่แตกต่างดังรูปที่ 4.2 (ค) และ (ช) โดยสิ้นเชิง ในบริเวณที่ II พื้นที่รอยฉีกขาดมีเนื้ออลูมิเนียมติดอยู่บริเวณรอยเชื่อมเป็นบางส่วน เกิดจากการทดสอบแรงเนื่องดิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ใช้กระแส 95 kA แล้วสาเหตุที่รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งต่ำกว่าก็คือ พื้นที่ของรอยเชื่อมมีบริเวณการรับแรงที่น้อยกว่าอาจเกิดจากอลูมิเนียมในการหลอมละลาย (Spatter) เกิดการกระจายตัวออกรอบๆ แนวเชื่อมจึงทำให้อลูมิเนียมบางส่วนติดอยู่ที่บริเวณรอยเชื่อม [24] ดังรูปที่ 4.2 (ง) และบริเวณที่ III เกิดจากการทดสอบแรงเนื่องดิ่งผิวของอลูมิเนียมที่หายไปติดอยู่กับบริเวณรอยเชื่อมที่ II ทำให้พื้นที่รับแรงของรอยต่อมีค่าแรงเนื่องดิ่งสูงขึ้นรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงและมีค่าความยึดตัวสูงกว่ากระแส 85 kA ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.2 (จ) และ (ญ) การกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) บนแผ่นเหล็กมีการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมไม่มากนัก ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณที่ I เป็นการรวมตัวระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมที่เกิดจากความร้อนของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมีลักษณะผิวที่ขรุขระแสดงถึงการฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ไม่แข็งแรงเพราะผิวขรุขระที่เกิดขึ้นเกิดจากเศษของอลูมิเนียมติดอยู่ที่บริเวณรอยเชื่อมแต่ไม่ซึมเข้าเหล็กทำให้มีการรับแรงที่น้อย ส่วนบริเวณที่ II พื้นที่บริเวณรอยฉีกขาดมีเนื้ออลูมิเนียมติดอยู่ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณรับแรงแต่มีปริมาณที่น้อย และบริเวณที่ III เกิดจากการทดสอบแรงเนื่องดิ่ง [26] เห็นได้ว่าผิวของอลูมิเนียมที่หายไปติดอยู่กับบริเวณรอยเชื่อมที่ II ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสเชื่อมที่ 100 kA แต่น้อยกว่ากระแส 95 kA



รูปที่ 4.3 ความลึกของรอยกุดคือเล็กโทรคบนผิวรอยต่ออยู่ที่กระแสไฟตั้งแต่ 85– 105 kA กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม

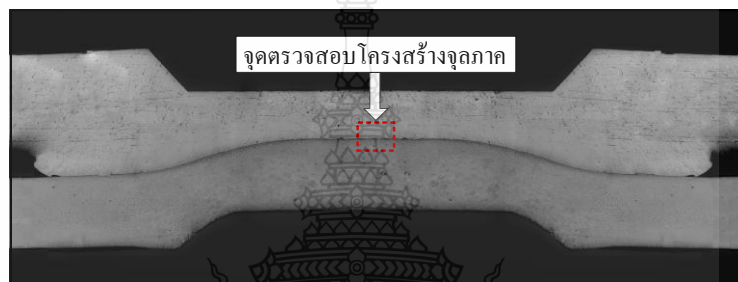
รูปที่ 4.3 จากการทดสอบได้ทำการวัดความลึกของรอยกุดที่เกิดจากหัวอิเล็กโทรด รอยที่เกิดขึ้นมีความลึกลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น ความลึกของรอยกุดที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่นเหล็กที่ถูกกำหนดไว้ด้านบน (a) มีค่าประมาณ 0.13- 0.17 mm และมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 85 - 105 kA เมื่อนำค่าความลึกของรอยกุดไปเปรียบเทียบกับความลึกของแผ่นอลูมิเนียมที่ถูกกำหนดไว้ที่ด้านล่าง (c) พบว่า ความลึกของรอยกุดมีค่าสูงประมาณ 0.12- 0.36 mm และมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้นผลของความลึกรอยกุดที่วัดได้เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับค่าคุณภาพแนวเชื่อมด้านทานแบบจุดของผลิตภัณฑ์ยานยนต์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หมายเลข JIS Z3139 [25] พบว่าความลึกของรอยกุดด้านแผ่นอลูมิเนียมของกระแสไฟเชื่อม 85 และ 90 kA นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากความลึกของรอยกุดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์การยอมรับนั่นคือมีค่ารอยกุดมากกว่า 0.30 mm ขณะที่ความลึกของรอยกุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟ 95 -105 kA นั้นมีค่าความลึกอยู่ในช่วงระดับ C มีค่าความลึกของรอยกุดอยู่ที่ 0.10 -0.30 mm จึงถือได้ว่ารอยเชื่อมระหว่างกระแสเชื่อม 95-105 kA นั้นมีลักษณะผิวรอยเชื่อมที่มีคุณภาพปานกลางต้องตกแต่งผิวก่อนและสามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากไม่พบการเกิดรอยแตกร้าว (Crack) ขึ้นในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนความลึกของรอยกุดอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อที่กระแสไฟตั้งแต่ 85 -105 kA

รูปที่ 4.4 ความลึกรอยกุดของหัวอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาของแผ่นวัสดุหากความลึกของรอยกุดมีค่ามากอาจทำให้แผ่นงานมีพื้นที่ในการรับแรงลดน้อยลงได้ ดังนั้นจึง

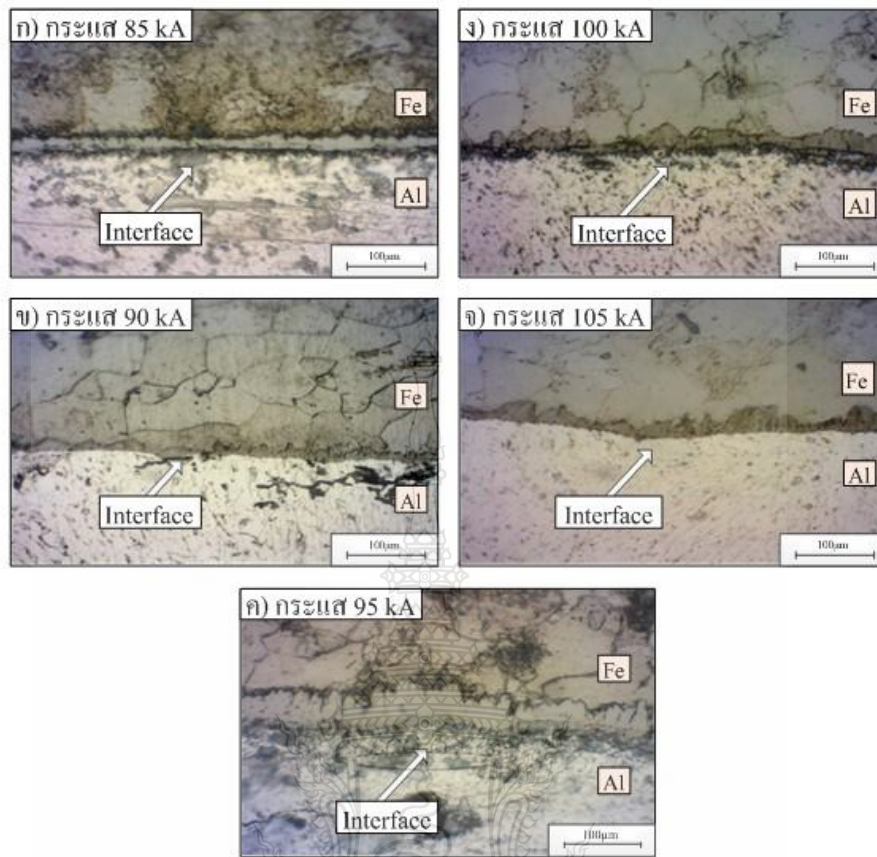
จำเป็นต้องหาค่าอัตราส่วนระหว่างรอยกดของหัวอิเล็กโทรดที่อยู่บนผิวของรอยต่อเกยต่อความหนาของแผ่นโลหะ โดยกำหนดไว้ตาม JIS Z3139 ว่าอัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.30 mm จึงสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้ เพราะถือว่าระดับคุณภาพแนวเชื่อมยอมรับได้ในระดับ C อัตราส่วนระหว่างรอยกดของอิเล็กโทรดต่อความหนาของแผ่นโลหะ ที่พบว่าค่าอัตราส่วนของความลึกรอยกดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามที่กระแสไฟ 85 kA ควรหลีกเลี่ยงกับการนำไปใช้งาน เนื่องจากค่าอัตราส่วนของความลึกรอยกดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าใกล้เคียงกับค่าขีดจำกัดการยอมรับมากเกินไป [27]



#### รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

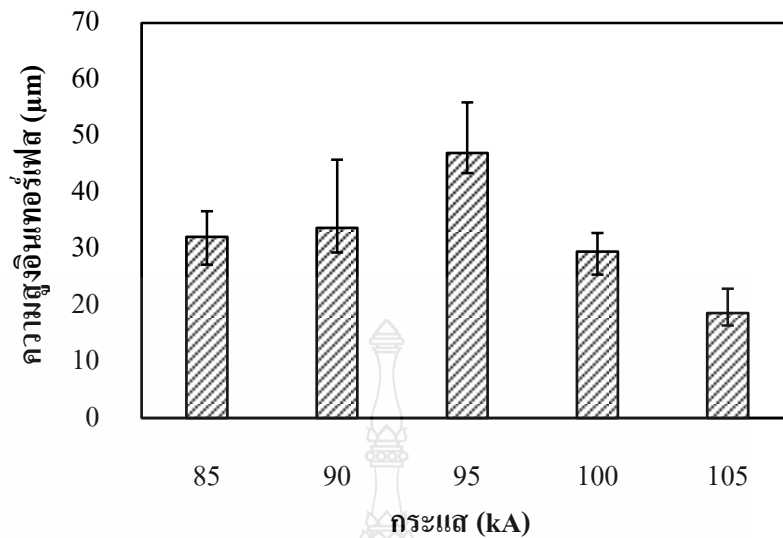
รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคบริเวณการตรวจสอบรอยเชื่อม โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม การตรวจสอบพื้นที่รอยเชื่อมอินเทอร์เฟซ บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ดังแสดงในกรอบ เนื่องจากบริเวณรอยฉีกขาดดังที่กล่าวมา พบว่ารอยฉีกขาดเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ รอยกดทำให้ค่าที่ได้ไม่แข็งแรง ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม ไม่มีการฉีกขาด จึงเลือกตรวจสอบบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม ทำการตรวจสอบโดยใช้กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 1,000 เท่า





รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของกระแสไฟตั้งแต่ 85 - 105kA กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

รูปที่ 4.6 การตรวจสอบโครงสร้างบริเวณความสูงของอินเทอร์เฟซที่มีแรงดันกด 0.10 MPa ใช้เวลาในการกดแค่ 10 Cycles ซึ่งทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟในการเชื่อมตั้งแต่ 85 -105 kAพบว่ารอยต่อบริเวณความสูงของอินเทอร์เฟซที่กระแส 85 kA มีลักษณะ เป็นเส้นตรงและขนาน มีช่องว่างระหว่างรอยต่อของบริเวณอินเทอร์เฟซ และที่กระแส 90 kA บริเวณความสูงของอินเทอร์เฟซมีลักษณะสูงและต่ำ ตลอดบริเวณรอยต่อของอินเทอร์เฟซ มีระยะบริเวณอินเทอร์เฟซเฉลี่ยแล้วน้อยที่สุดดังรูปที่ 4.6 ซึ่งกระแส 95 kA ทางด้านซ้ายของรูปบริเวณระยะอินเทอร์เฟซมีขนาดใหญ่ มีความต่ำกว่าทางด้านขวา มีความกว้างของระยะบริเวณอินเทอร์เฟซเฉลี่ยสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.6 ขณะที่กระแส 100 -105 kA มีระยะบริเวณรอยต่อของอินเทอร์เฟซที่มีความสูงความต่ำไม่เท่ากัน มีระยะอินเทอร์เฟซเฉลี่ยแล้วมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน [28]



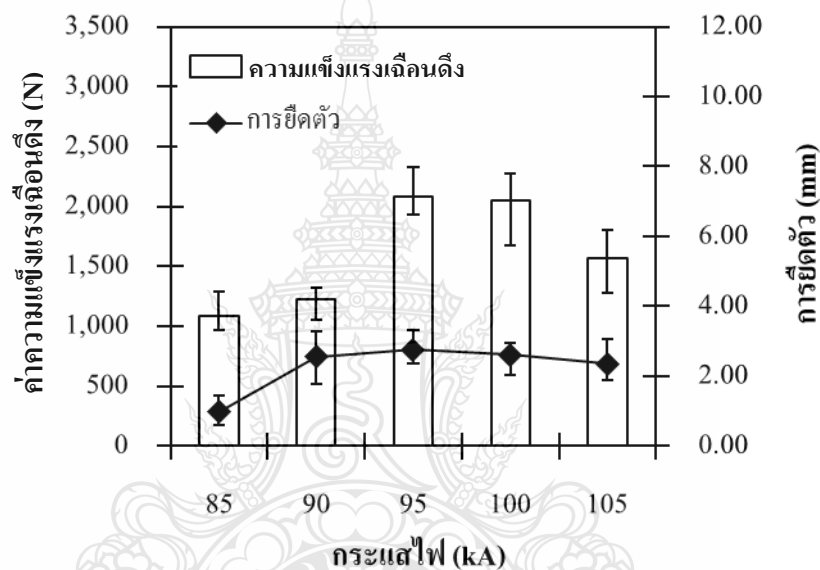
รูปที่ 4.7 ความสูงรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟสที่กระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85 - 105 kA

รูปที่ 4.7 กระแสเชื่อมที่ 85-105 kA ซึ่งทำการวางแผ่นเหล็กไว้ด้านบนแผ่นอลูมิเนียม โดยมีแรงดันกดในการเชื่อมเท่ากับ 0.10 MPa พบว่ากระแสเชื่อมที่ 85 kA มีความสูงของอินเทอร์เฟสสูงกว่ากระแสเชื่อมที่ 90 kA และเมื่อทำการเพิ่มกระแสเชื่อมขึ้นที่ 95-105 kA พบว่าบริเวณระยะอินเทอร์เฟสมีแนวโน้มค่าเฉลี่ยสูงขึ้นตามกระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้น บริเวณความสูงที่ระยะอินเทอร์เฟสเฉลี่ยสูงสุด คือ กระแสเชื่อมที่ 95 kA มีค่าเท่ากับ 36.69  $\mu\text{m}$  และระยะอินเทอร์เฟสเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ กระแสเชื่อมที่ 90 มีค่าเท่า 23.10  $\mu\text{m}$

ในส่วนของการทดลองนี้ได้ทำการเชื่อมด้านทานแบบจุดของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD โดยทำการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ ผลการศึกษาสำคัญมีการเชื่อมด้านทานแบบจุดสามารถทำให้เกิดรอยต่อเกยที่มีความสมบูรณ์ การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงและการยึดตัวของรอยต่อเกยมีค่าเพิ่มขึ้น สภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดประมาณ 2,200 N และการยึดตัวของรอยต่อเกย 2.8 mm คือ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.10 MPa ความลึกรอยกดของอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุดบนผิวหน้ารอยต่อเกยมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราส่วนอัตราส่วนรอยกดต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้นและความสูงของอินเทอร์เฟสมีความเกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงเฉือนดึงยิ่งความสูงของอินเทอร์เฟสมีค่ามาก ค่าความแข็งแรงดึงก็มีมากขึ้นด้วย [28]

#### 4.2 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและแผ่นเหล็กไว้ด้านล่าง

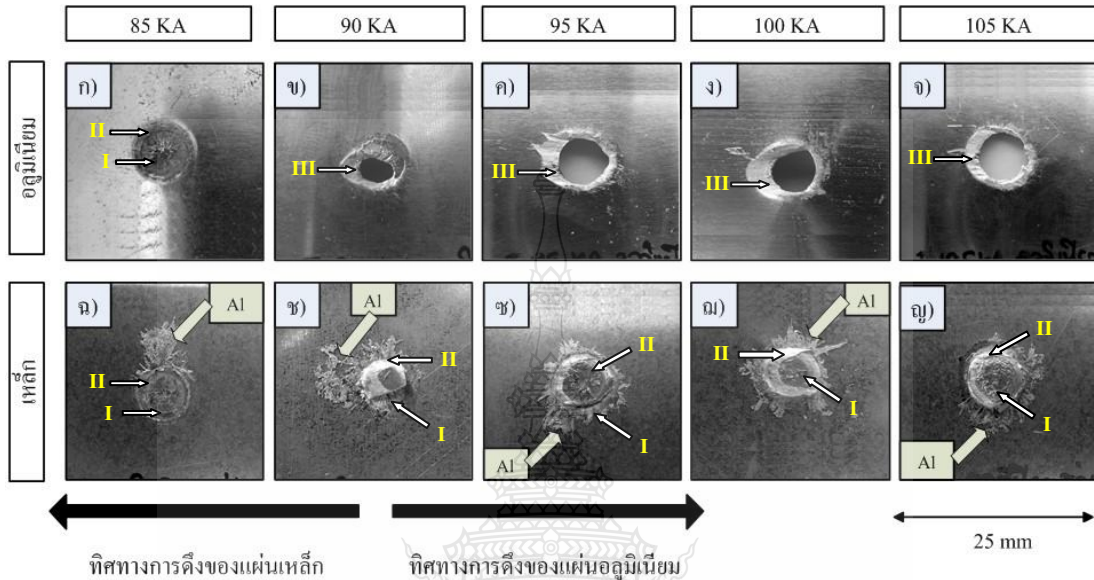
ในการทดลองเชื่อมด้านทานแบบจุด โดยจะกำหนดให้รอยต่อเกยของแผ่นอลูมิเนียมวางต่อเกยตามเงื่อนไข โดยการนำแผ่นอลูมิเนียมวางด้านบนของแผ่นเหล็ก และกำหนดตัวแปรในการเชื่อม โดยจะเริ่มกำหนดให้เริ่มใช้กระแสไฟเชื่อม ระหว่าง 85 90 95 100 และ 105 kA เวลาที่ใช้ในการเชื่อม 10 Cycle และ แรงกด 0.10 MPa จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อเกยโดยที่ค่าความแข็งแรงและการยืดตัวของรอยต่อ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าต่อความแข็งแรงเนื่องดึง และการยืดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบน

รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมต่อความแข็งแรงเนื่องดึง และการยืดตัวของรอยต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็กนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟต่างๆ เวลาในการเชื่อม 10 Cycle และแรงกด 0.10 MPa พบว่ากราฟจะมีค่าความแข็งแรงเนื่องดึงเพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งแรงเนื่องดึงสูงสุดที่กระแส 95 kA โดยมีค่าความแข็งแรงเนื่องดึงประมาณ 2,100 N และการยืดตัวประมาณ 2.76 mm การเพิ่มค่าความแข็งแรงเนื่องดึงเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มกระแสส่งผลทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อมีค่าสูงขึ้น และพบว่ากระแสที่เพิ่มส่งผลต่อการเพิ่มความร้อนในรอยต่อเมื่อกระแสไฟในการเชื่อมมีค่าเท่ากับ 100-105 kA และค่าความแข็งแรงเนื่องดึงน้อยลง [29] ส่งผลทำให้การยืดตัวมีค่าลดน้อยลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ

ลดลงของกระแสที่มีค่าต่ำกว่า 95 kA พบว่าค่าความแข็งแรงเนื่องดึงและการยึดตัวมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งการพังทลายของชิ้นงานโดยทั่วไปจะมีการพังทลายที่แตกต่างกันตามตัวแปรที่กำหนด

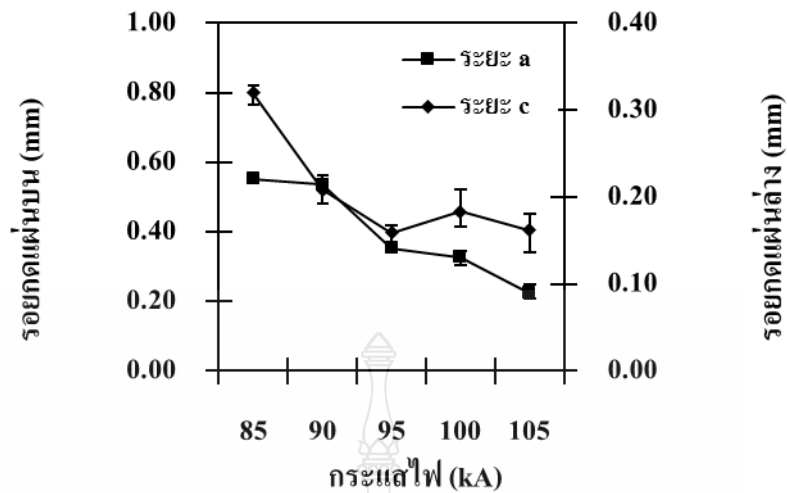


รูปที่ 4.9 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเนื่องดึงที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม โดยวางอลูมิเนียมอยู่ด้านบนการเชื่อม

รูปที่ 4.9 แสดงผิวหน้าการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเนื่องดึงที่กระแสไฟเชื่อมต่างๆ รูปการพังทลายจากแถวด้านบนเกิดจากการแยกแผ่นอลูมิเนียมที่อยู่ด้านบนให้หงายขึ้น โดยแผ่นอลูมิเนียมจะคว่ำประกบลงบนแผ่นเหล็กเพื่อทำการถ่ายภาพ ขณะที่แถวด้านล่าง คือ รอยพังทลายของแผ่นเหล็กหลังจากดึงขาดออกจากกันซึ่งการทดสอบค่าความแข็งแรงเนื่องดึงนั้นจะแสดงผลดังรูปที่ 4.9 โดยแผ่นอลูมิเนียมจะถูกดึงไปทางด้านขวา ส่วนแผ่นเหล็กจะถูกดึงไปทางด้านซ้าย เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) ที่เกิดจากความร้อนที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม [24] รูปที่ 4.9 (ก) เป็นการทดสอบโดยใช้กระแสไฟในการเชื่อมที่ต่ำที่สุด จะเห็นว่ารอยเชื่อมโดยรวมจากการทดสอบแรงเนื่องดึงไม่มีเศษเหล็กติดอยู่กับแผ่นของอลูมิเนียม ซึ่งหมายถึงการฉีกขาดของแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมมีลักษณะค่อนข้างสมบูรณ์โดยมองจากรอยรอบๆ ของรอยเชื่อม จะเห็นได้จากบริเวณที่ I II และ III แผ่นเหล็กและอลูมิเนียมบริเวณอินเทอร์เฟซของแนวรอยเชื่อมมีการยึดติดกันเพียงเล็กน้อย ทำให้ไม่เกิดรอยฉีกขาดระหว่างแผ่นทั้งสอง และค่าการยึดตัวก็ค่อนข้างต่ำแล้ว ยังทำให้เกิดการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมเพียงเล็กน้อยอีกด้วย

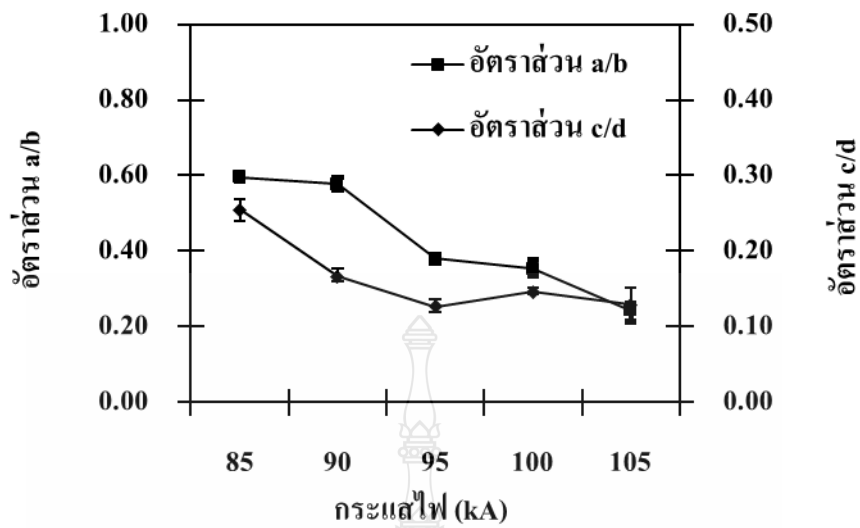
รูปที่ 4.9 (ข) และ (ค) เป็นการทดสอบโดยใช้กระแสไฟเชื่อมที่ 90 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมเกิดการฉีกขาดแตกต่างจากกระแสไฟเชื่อม 85 kA และมีการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) เพิ่มมากขึ้นแต่กระจายตัวสม่ำเสมอรอบๆแนวเชื่อม แสดงให้เห็นว่าลักษณะการยึดตัวของแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียมบริเวณอินเทอร์เฟซของแนวรอยเชื่อมนั้นมีการยึดติดกันเพิ่มขึ้นจึงทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงซึ่งที่เพิ่มมากขึ้น รูปที่ 4.9 (ค) และ (ค) เป็นการทดสอบโดยใช้กระแสไฟในการเชื่อมที่ 95 kA จะเห็นว่าแนวรอยเชื่อมโดยรวมจากการทดสอบแรงเฉือนดังนั้นมีลักษณะการฉีกขาดของแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมค่อนข้างที่สมดุลที่สุดและเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบจากการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 90 kA โดยมองจากรอยรอบๆ ของรอยเชื่อม จะเห็นได้จากบริเวณที่ I II และ III แผ่นเหล็กและอลูมิเนียมเกิดการยึดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากบริเวณอินเทอร์เฟซของแนวรอยเชื่อมมีการยึดติดกันมากขึ้นและยังทำให้เกิดการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมเพียงเล็กน้อยอีกด้วย ส่วนรูปที่ 4.9 (ง) และ (ง) เป็นการทดสอบโดยใช้กระแสไฟในการเชื่อมที่ 100 kA จะเห็นว่าแนวรอยเชื่อมจากการทดสอบแรงเฉือนดังนั้นมีลักษณะการฉีกขาดของแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นแต่ค่อนข้างน้อยกว่าการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 95 kA โดยรอยรอบๆ ของรอยเชื่อมจากบริเวณที่ I II และ III แผ่นเหล็กและอลูมิเนียมเกิดการยึดตัวลดลงเนื่องจากบริเวณอินเทอร์เฟซของแนวรอยเชื่อมมีการยึดติดกันน้อยลงทำให้เกิดการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมลดเพียงเล็กน้อยแต่สม่ำเสมอ

รูปที่ 4.9 (จ) และ (จ) เป็นการทดสอบโดยใช้กระแสไฟในการเชื่อมที่ 105 kA จะเห็นว่าแนวรอยเชื่อมจากการทดสอบแรงเฉือนดังนั้นมีลักษณะการฉีกขาดของแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นแต่จากการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 100 kA โดยรอยรอบๆ ของรอยเชื่อมจากบริเวณที่ I เป็นการรวมตัวของเหล็กและอลูมิเนียม ส่วนบริเวณที่ II ที่ถูกดึงติดอยู่ที่บริเวณแผ่นเหล็ก และ บริเวณที่ III จะเห็นได้ว่าเนื้อของอลูมิเนียมจะถูกดึงหายไปติดที่ ทำให้แผ่นเหล็กและอลูมิเนียมเกิดการยึดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากบริเวณอินเทอร์เฟซของแนวรอยเชื่อมมีการยึดติดกันมากขึ้นยังทำให้เกิดการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) เพียงเล็กน้อยแต่สม่ำเสมอซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับกระแสเชื่อมที่ 100 kA แต่น้อยกว่ากระแสเชื่อมที่ 95 kA หรือมีค่าใกล้เคียงกัน [24, 26]



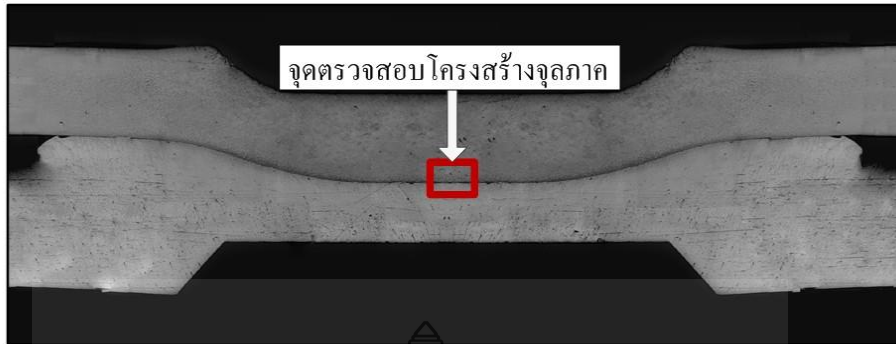
รูปที่ 4.10 ความลึกของรอยกดอเล็กโทรบนผิวรอยต่อเกยที่กระแสไฟตั้งแต่ 85-105 kA กำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนแผ่นเหล็ก

รูปที่ 4.10 การทดสอบได้ทำการวัดความลึกของรอยกดที่เกิดจากหัวอเล็กโทรพบว่ารอยที่เกิดขึ้นมีความลึกลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น ความลึกของรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่นเหล็กที่ถูกกำหนดไว้ด้านบน (a) มีค่าประมาณ 0.22- 0.55 mm และมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 85 ถึง 95 kA แต่ตั้งแต่ที่กระแส 95-105 kA ความลึกของรอยกดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าความลึกของรอยกดบนแผ่นเหล็กไปเปรียบเทียบกับความลึกของแผ่นอลูมิเนียมที่ถูกกำหนดไว้ที่ด้านล่าง (c) พบว่า ความลึกของรอยกดมีค่าสูงประมาณ 0.16 – 0.32 mm โดยเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้นความลึกของรอยกดมีแนวโน้มลดลง โดยผลของความลึกรอยกดที่วัดได้เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับค่าคุณภาพแนวเชื่อมด้านทานแบบจุดของผลิตภัณฑ์ยานยนต์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หมายเลข JIS Z3139 [25] พบว่าความลึกของ รอยกดด้านแผ่นอลูมิเนียมของกระแสไฟเชื่อม 85 และ 90 kA นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากความลึกของรอยกดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์การยอมรับนั่นคือมีค่ารอยกดมากกว่า 0.30 mm ขณะที่ความลึกของรอยกดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 95-105 kA นั้นมีค่าความลึกอยู่ในช่วงระดับ C มีค่าความลึกของรอยกดอยู่ที่ 0.10-0.30 mm จึงถือได้ว่ารอยเชื่อมระหว่างกระแสเชื่อม 95-105 kA นั้นมีลักษณะผิวรอยเชื่อมที่มีคุณภาพปานกลางต้องตกแต่งผิวก่อนและสามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากไม่พบการเกิดรอยแตกร้าว (Crack) ขึ้นในบริเวณเนื้อโลหะที่ทำการเชื่อม



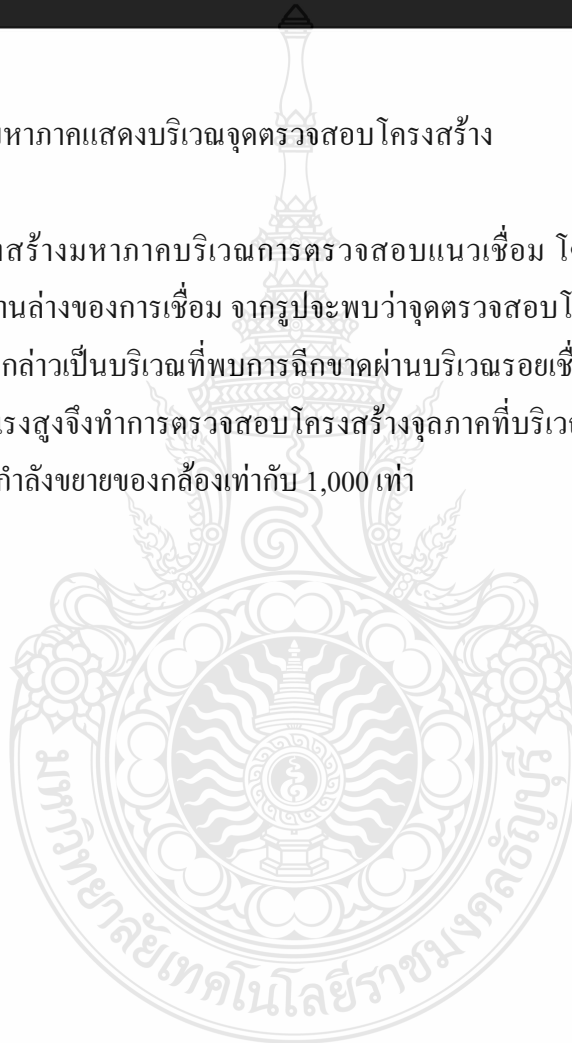
รูปที่ 4.11 อัตราส่วนความลึกของรอยกดอเล็กโทรดบนผิวรอยต่อเกย ที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ

รูปที่ 4.11 ความลึกรอยกดของหัวอเล็กโทรดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาของแผ่นวัสดุถ้าความลึกของรอยกดอเล็กโทรดมีค่ามากอาจทำให้แผ่นงานมีพื้นที่ในการรับแรงลดน้อยลงได้ ฉะนั้นจึงจำที่จำเป็นต้องหาค่าอัตราส่วนระหว่างรอยกดของหัวอเล็กโทรดที่อยู่บนผิวของรอยต่อเกยที่มีต่อความหนาของแผ่นโลหะ โดยกำหนดไว้ตาม JIS Z3139 ว่าอัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.30 mm จึงจะสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้เพราะถือว่าระดับคุณภาพแนวเชื่อมยอมรับได้ในระดับ C อัตราส่วนระหว่างรอยกดของอเล็กโทรดต่อความหนาของแผ่นโลหะดังแสดงไว้รูปที่ 4.11 โดยอัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยที่มีต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟเชื่อมต่างๆ ที่พบว่าค่าอัตราส่วนของความลึกรอยกดบนผิวของรอยต่อเกย ต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่กระแสไฟ 85 kA ควรหลีกเลี่ยงกับการนำไปใช้งาน เนื่องจากค่าอัตราส่วนของความลึกรอยกดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าใกล้เคียงกับค่าขีดจำกัดการยอมรับมากเกินไป

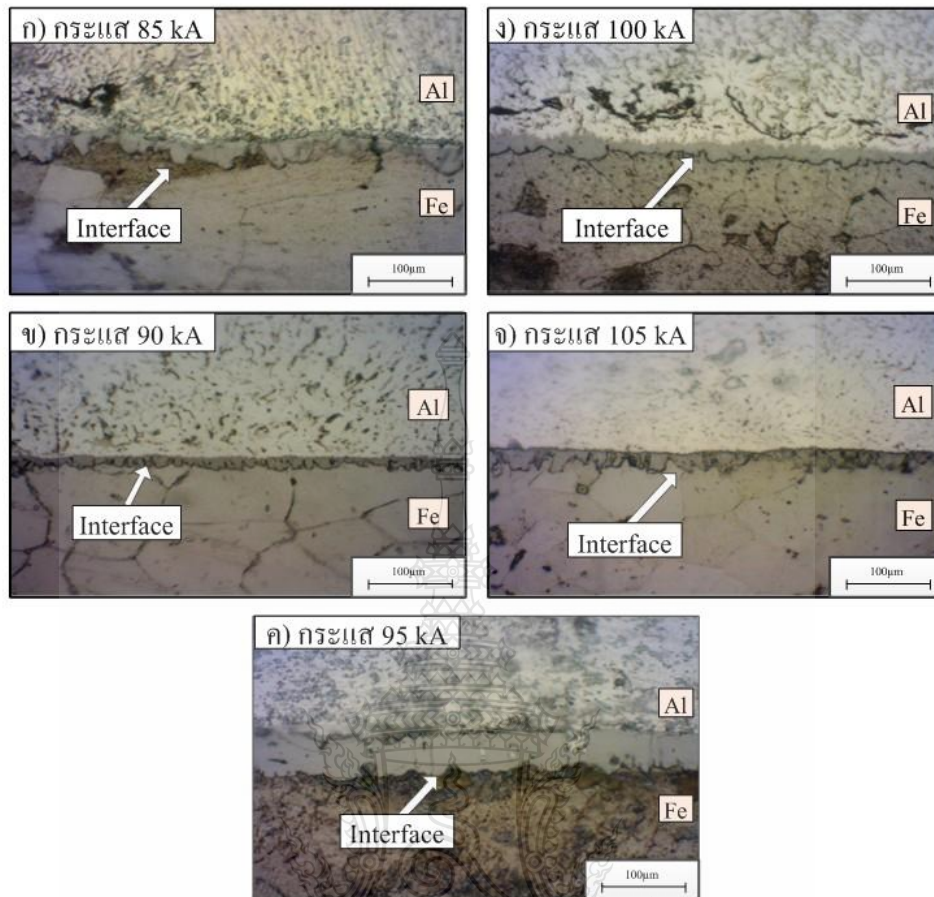


รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้าง

แสดงโครงสร้างมหภาคบริเวณการตรวจสอบแนวเชื่อม โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กอยู่ด้านล่างของการเชื่อม จากรูปจะพบว่าจุดตรวจสอบโครงสร้างจะอยู่บริเวณกลางแนวเชื่อมซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่พบการฉีกขาดผ่านบริเวณรอยเชื่อมน้อยมากจึงทำให้บริเวณตรงกลางมีความแข็งแรงสูงจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณกลางแนวเชื่อมที่แสดงดังรูปที่ 4.12 จาก โดยใช้กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 1,000 เท่า

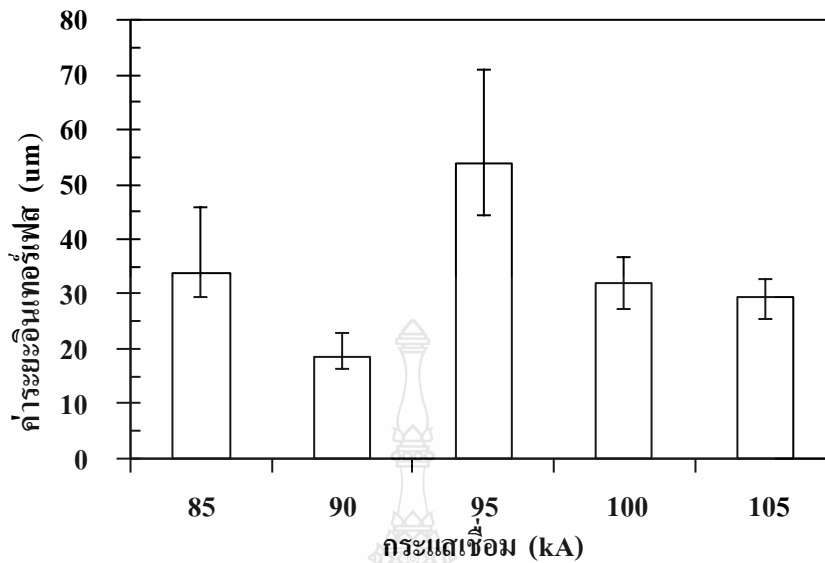






รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของกระแสไฟตั้งแต่ 85-105 kA โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กอยู่ด้านล่าง

รูปที่ 4.13 การตรวจสอบ โครงสร้างบริเวณความสูงของอินเทอร์เฟซที่มีแรงกด 0.10 MPa ใช้เวลาในการกดแช่ 10 Cycles ซึ่งทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟในการเชื่อมตั้งแต่ 85 - 105 kA โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนและเหล็กอยู่ด้านล่างพบว่ารอยต่อบริเวณความสูงของอินเทอร์เฟซที่กระแส 95 kA มีลักษณะกว้างที่สุดเมื่อเทียบกับลักษณะของอินเทอร์เฟซแต่ละกระแส ซึ่งมีลักษณะที่มีขนาดเล็ก มีผิวไม่เรียบ และมีขนาดที่ใกล้เคียงกันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



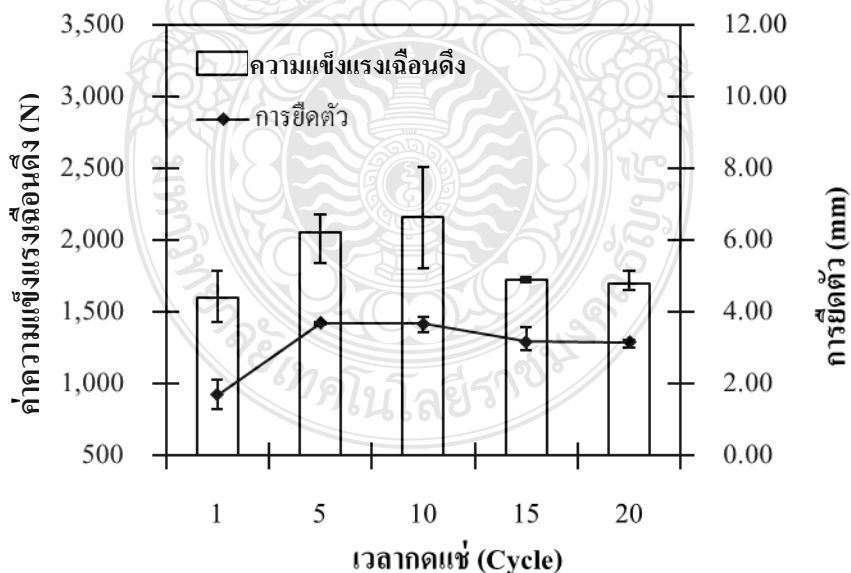
รูปที่ 4.14 ความสูงรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟสที่กระแสเชื่อม 85-105 kA

รูปที่ 4.14 โดยทำการวางแผนอนุกรมวิธานไว้ด้านบนแผ่นเหล็ก และมีแรงกดในการเชื่อมเท่ากับ 0.1 MPa ที่กระแสเชื่อม 85-105 kA พบว่า กระแสเชื่อมที่ 85 kA จะมีบริเวณระยะอินเทอร์เฟสสูงกว่ากระแสเชื่อมที่ 90 kA และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมขึ้นที่ 95 kA พบว่าความกว้างบริเวณระยะอินเทอร์เฟสมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 57.76  $\mu\text{m}$  และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมที่ 100-105 kA พบว่าบริเวณระยะอินเทอร์เฟสมีค่าความกว้างเฉลี่ยแนวโน้มลดลงและค่าความกว้างบริเวณระยะอินเทอร์เฟสต่ำที่สุดในตัวแปรนี้คือที่กระแส 90 kA ซึ่งขนาดของอินเทอร์เฟสที่มีขนาดที่แตกต่างกันส่งผลต่อความต้านทานแรงเฉือนซึ่งที่มีค่าน้อยแตกต่างกันเช่นเดียวกัน [28,30] แสดงให้เห็นว่าขนาดของอินเทอร์เฟสมีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือน

#### 4.3 อิทธิพลของเวลากดแช่ที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็ก SGACD และ อลูมิเนียม AA1100

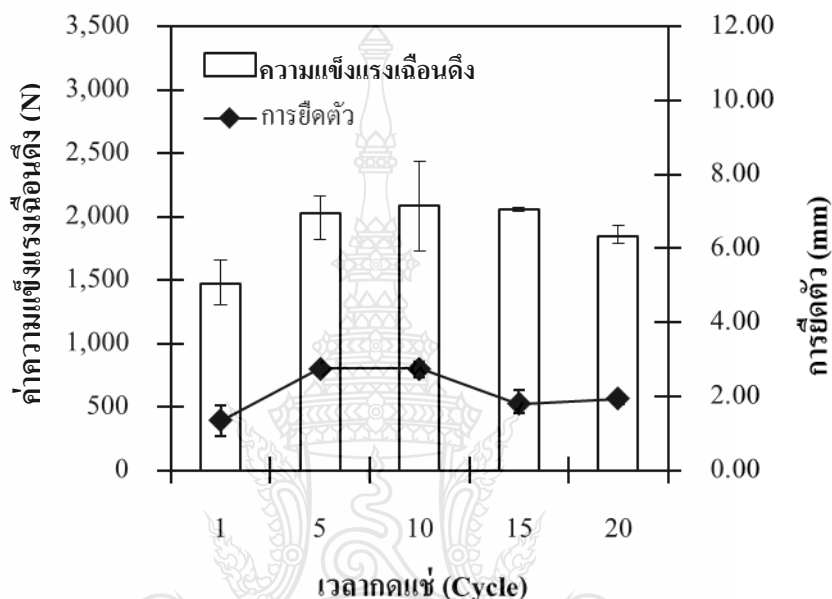
ในการเชื่อมชิ้นงานนอกจากกระแสแล้ว ยังต้องมียุทธศาสตร์ประกอบในการเชื่อม ซึ่งตัวแปรในการทดสอบการเชื่อมด้านทานแบบจุดตัวที่ 2 นี้ คือ เวลาในการกดแช่หัวอิเล็กโทรดคดลงบนผิวของรอยต่อ ซึ่งช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาในการแข็งตัวมากพอ ที่จะสร้างความแข็งแรงขึ้นภายในรอยเชื่อม ดังนั้น เวลากดแช่ในการเชื่อมจึงมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม จึงทำการทดสอบการเชื่อม โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ประกอบด้วย กระแสไฟเชื่อม 95 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงสูงสุดในการเชื่อมรอยต่อเกยในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ที่ผ่านมา โดยมีเวลาในการเชื่อมเป็นตัวแปรที่ทำการศึกษาในหัวข้อนี้กำหนดให้ 1-20 Cycles แรงดันกดของหัวอิเล็กโทรด 0.1 MPa

ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงเฉือนดึงสูงสุดในครั้งนี้ เป็นการเชื่อมรอยต่อที่มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน กล่าวคือ “รอยต่อเกยแบบที่ 1” หมายถึงรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางเกยบนแผ่นอลูมิเนียม และ “รอยต่อเกยแบบที่ 2” ที่หมายความถึง รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยบนแผ่นเหล็ก ผลการทดสอบรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยเวลากดแช่ต่างๆ โดยเปรียบเทียบได้รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



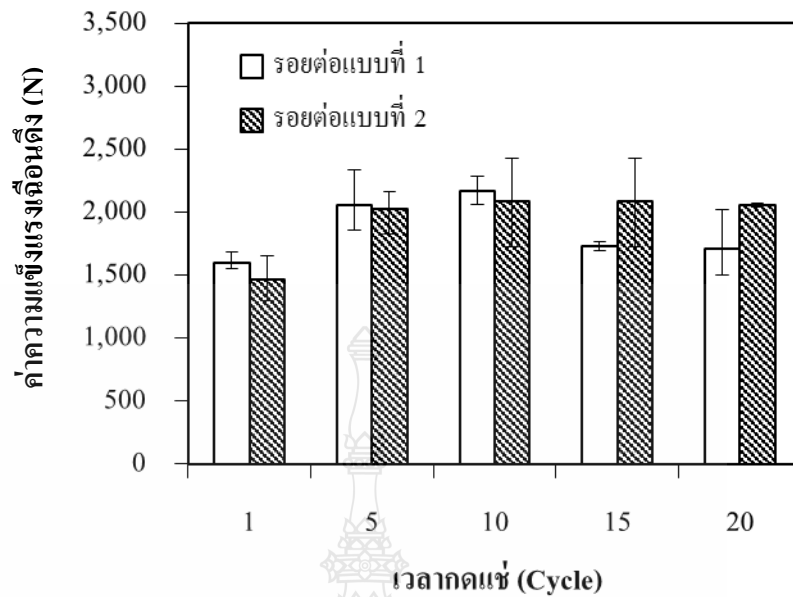
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากดแช่ต่อความแข็งแรงเฉือนดึง และการยืดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนบนแผ่นอลูมิเนียม

รูปที่ 4.15 เป็นรูปที่แสดงการต่อเกยแบบที่ 1 คือ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางเกยบนแผ่นอลูมิเนียมจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงเฉือนดึงก็มีค่ามากขึ้น และมีค่าความแข็งแรงเฉือนดึงมากที่สุดที่เวลาทดสอบ 10 Cycles ซึ่งอัตราการยืดตัวของรอยเชื่อมก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นและสูงสุดที่เวลาทดสอบ 10 Cycles เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาทดสอบต่อความแข็งแรงเฉือนดึง และการยืดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็ก

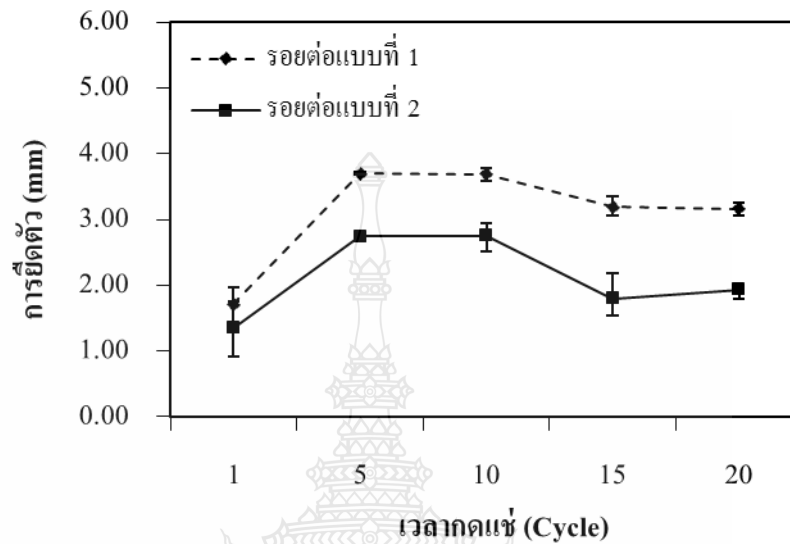
รูปที่ 4.16 เป็นรูปที่แสดงการต่อเกยแบบที่ 2 หมายถึง รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยอยู่บนแผ่นเหล็ก เห็นได้ว่าเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงเฉือนดึงก็มีที่เพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งแรงเฉือนดึงมากที่สุดที่เวลาทดสอบ 10 Cycles ซึ่งอัตราการยืดตัวของรอยเชื่อมก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นและสูงสุดที่เวลาทดสอบ 10 Cycles เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.15 และ 4.16 ความสัมพันธ์ของกราฟจะมีผลออกมาเหมือนกันคือ เมื่อเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงเฉือนดึงก็เพิ่มขึ้น และการยืดตัวของรอยเชื่อมก็เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน แต่จะสังเกตได้ว่า การต่อเกยแบบที่ 1 คือ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางเกยบนแผ่นอลูมิเนียม จะมีค่าที่มากกว่าแบบที่ 2 คือ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยอยู่บนแผ่นเหล็ก ดังรูปที่ 4.17 จะแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการต่อเกยแบบที่ 1 และการต่อเกยแบบที่ 2



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเค้นดึงรูปแบบรอยต่อ และเวลากดแช่ ตั้งแต่ 1 – 20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเค้นดึงและเวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles พบว่ารอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2 มีผลการทดสอบที่แตกต่างกันการเปรียบเทียบจะพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อแบบที่ 1 รอยต่อแบบที่เชื่อมด้วย เวลากดแช่ 5 และ 10 Cycles มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลากดแช่ที่ 1 Cycles และรอยต่อแบบที่ 2 รอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 และ 10 Cycles มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเช่นกันเมื่อเทียบกับเวลากดแช่ที่ 1 Cycles การทดสอบพบว่าที่เวลากดแช่ 10 Cycles คือ เวลากดแช่ที่ให้ค่าความแข็งแรงเค้นดึงสูงสุด การทดลองการเชื่อมด้วยเวลากดแช่ต่างๆ และเมื่อเพิ่มเวลากดแช่เป็น 15-20 Cycles ค่าความแข็งแรงเค้นดึงของรอยต่อแบบที่ 1 มีแนวโน้มลดลงตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับเวลากดแช่ 10 Cycles อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อแบบที่ 2 ค่าความแข็งแรงเค้นดึงมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยหรืออยู่ในระดับเกือบไม่มีการลดลงที่เวลากดแช่ 15 และ 20 Cycles มีค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเค้นดึงที่เพิ่มขึ้น และลดลง เมื่อเทียบกับเวลากดแช่ 10 Cycles สำหรับการทดสอบนี้ เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงเค้นดึงของรอยต่อแบบที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 1-10 Cycles แล้วพบว่าค่าความแข็งแรงเค้นดึงของรอยต่อแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงเค้นดึงรอยต่อแบบที่ 2 ดังที่ได้เกิดขึ้นมาแล้วในการเปรียบเทียบรอยต่อทั้งสองแบบในหัวข้อที่ 4.2 เกิดเนื่องจาก

การแทรกซึมระหว่างอลูมิเนียมที่เข้าไปทำการหลอมละลายและยึดติดที่แผ่นเหล็กเป็นจำนวนมากจึงทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนคิ่งมีแนวโน้มที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด [24,28]

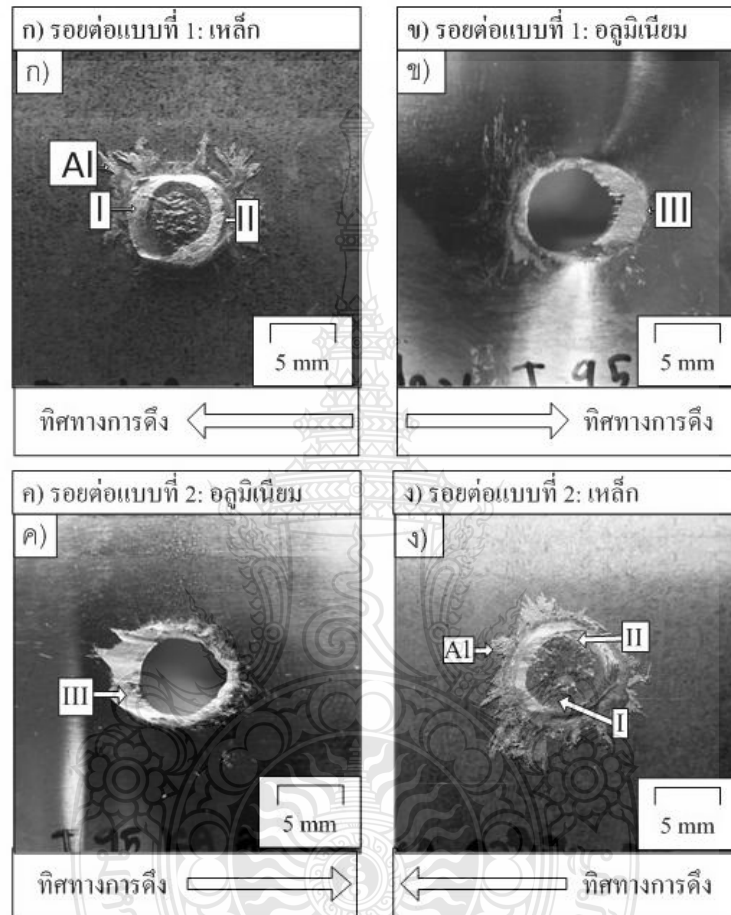


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัว รูปแบบรอยต่อและเวลาทดสอบตั้งแต่ 1 – 20 Cycles ของ รอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2

รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์การยึดตัว รูปแบบรอยต่อ และเวลาทดสอบที่ 1-20 Cycles ระหว่างของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2 พบว่า รอยต่อแบบที่ 1 มีการยึดตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาทดสอบ 1 Cycles และรอยต่อแบบที่ 2 มีการยึดตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อเทียบกับเวลาทดสอบ 1 Cycles เมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 10 Cycles ซึ่งเป็นค่าที่ค่าความแข็งแรงเฉือนคิ่งสูงสุดพบว่า การยึดตัวมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาทดสอบที่ 5 Cycles ที่รอยต่อแบบที่ 1 เมื่อเวลาทดสอบมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 15 – 20 Cycles พบว่าค่าการยึดตัวของรอยต่อมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลาทดสอบ 10 Cycles ส่วนรอยต่อแบบที่ 2 เมื่อเวลาทดสอบมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 15 – 20 Cycles พบว่าค่าการยึดตัวของรอยต่อมีค่าลดลงร้อยละ 35 และ 30 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลาทดสอบ 10 Cycles

รูปแบบการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 และแบบที่ 2 การศึกษาจะพบการรื้อถอนของชิ้นงาน 2 ลักษณะ กล่าวคือ “การรื้อถอนผ่านบริเวณรอยเชื่อม” หมายถึง การรื้อถอนที่ขาดบริเวณโดยรอบของรอยเชื่อมซึ่งการรื้อถอนแบบนี้ส่วนมากจะมีค่าความแข็งแรงเฉือนคิ่งที่มาก เพราะมีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซที่ดี และการรื้อถอนอีกแบบหนึ่งคือ การรื้อถอนบริเวณอินเทอร์เฟซ หมายถึง

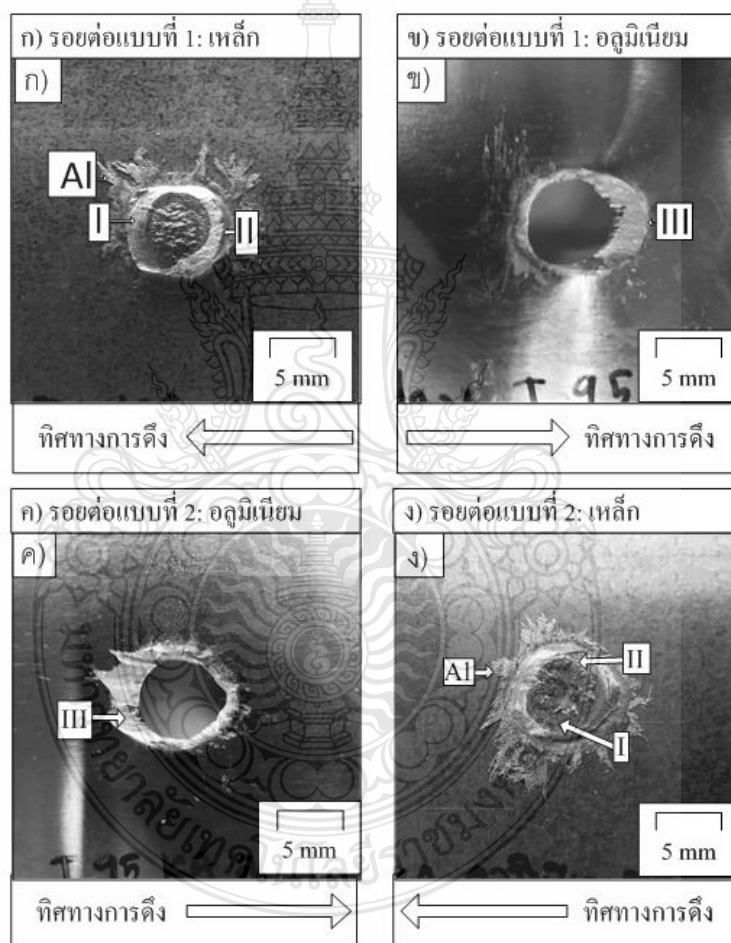
การฉีกขาดบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานบ่งบอกถึงความไม่แข็งแรงของรอยเชื่อม เนื้อของโลหะไม่ซึมเข้าหากัน หรือซึมน้อย ทำให้การยึดติดไม่แข็งแรงจึงรับแรงได้น้อยกว่าการฉีกผ่านบริเวณรอยเชื่อม [28]



รูปที่ 4.19 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลากด 1 Cycles

รูปที่ 4.19 แสดงถึงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยเวลากด 1 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการฉีกขาดคล้ายกับการพังทลายของรอยต่อทั้งสองแบบที่เชื่อมด้วย 85-105 kA ดังหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ที่เวลากด 1 Cycles การกระจายของอลูมิเนียมรอบๆ รอยต่อดังรูปที่ 4.19 (ก) และ (ง) อลูมิเนียมเกิดการกระจายตัวออกด้านข้างรอยเชื่อมซึ่งแสดงด้วยลูกศร AI ในรูปที่ 4.19 (ก) แต่เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) บนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 มี

รูปร่างของการกระจายตัวที่สมมาตรออกทุกด้านมากกว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 2 ดังด้วยลูกศร AI ในรูปที่ 4.19 (ก) และ (ง) การกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) รอบๆ รอยเชื่อมคาดว่าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดของวัสดุทั้งสองไม่แข็งแรงและเป็นสาเหตุของการพังทลายที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อเนื่องไม่สามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดังแสดงด้วยลูกศรที่ I และ II ดังในรูปที่ 4.19 (ก) และดังด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.19 (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้แตกต่างการฉีกขาดของรอยต่อแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.19 (ค) และ (ง) อย่างไรก็ตามการฉีกขาดที่เกิดขึ้นยังเป็นการฉีกขาดที่บริเวณอินเทอร์เฟซคล้ายดังเกิดในรอยต่อแบบที่ 1



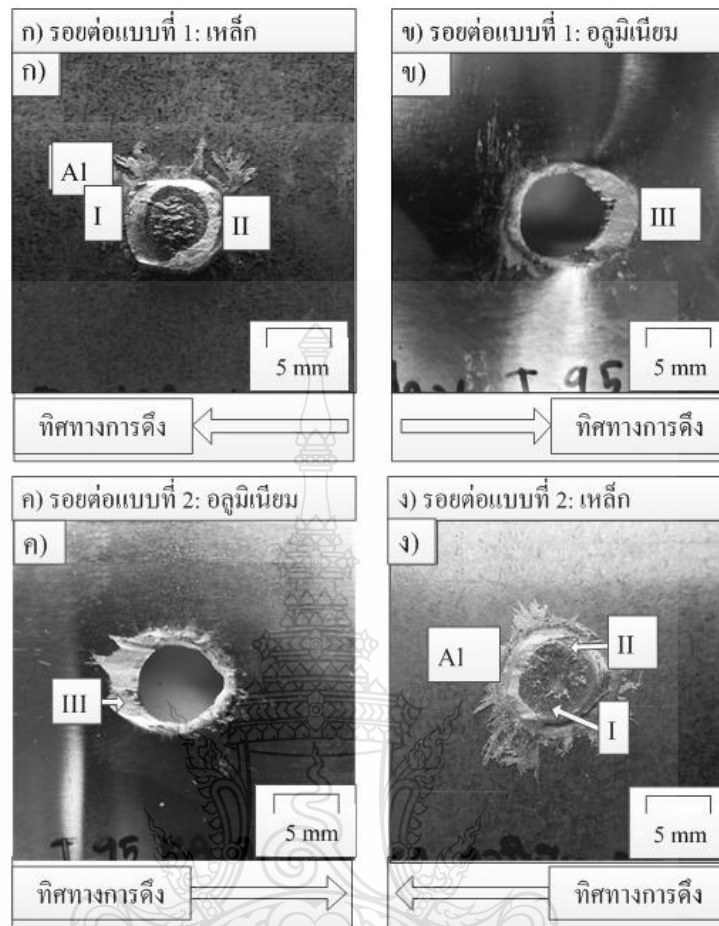
รูปที่ 4.20 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเสียดทานด้วยเวลาทดสอบ 5 Cycles

รูปที่ 4.20 แสดงการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเสียดทานที่เชื่อมด้วยเวลาทดสอบ 5 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าอลูมิเนียมมีการกระจายตัวเนื่องความร้อนและการกด แต่เมื่อ



เปรียบเทียบกันระหว่างรอยต่อเกยทั้งสองแบบพบอูมิเนียมที่กระจายตัวรอบๆ แนวเชื่อมของรอยต่อ เกยแบบที่ 1 ดังแสดงด้วยลูกศร AI ในรูปที่ 4.20 (ก) มีการกระจายตัวน้อยกว่าการเกิดกระจายตัวของ อูมิเนียมรอบๆ แนวเชื่อมของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังด้วยลูกศร AI ในรูปที่ 4.20 (ง) ซึ่งคาดว่า อูมิเนียมที่เกิดการกระจายตัวมากกว่าส่งผลทำให้เกิดการเชื่อมยึดของรอยต่อเกยลดลง ทำให้ค่าความ แข็งแรงเนื่องดิ่งน้อยลง พื้นที่ของการกคเชื่อมอเล็กโทรคของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังด้วยลูกศร I ใน รูปที่ 4.20 (ก) มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ของการกคเชื่อมของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังด้วยลูกศร I ในรูปที่ 4.20 (ง) และพื้นที่ของการกคเชื่อมของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1 Cycles ดังด้วยลูกศร I ใน รูปที่ 4.20 (ก) และ (ง) ตำแหน่งที่เกิดการฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 ดังด้วยลูกศร II ในรูป ที่ 4.20 (ก) และ (ง) สามารถตรวจสอบพบว่าเกิดการฉีกขาดที่โลหะหลัก คือ แผ่นอูมิเนียม ซึ่งเป็น ลักษณะที่มีความแตกต่างการฉีกขาดที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการฉีก ขาดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1 Cycles ขนาดของรอยฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังด้วย ลูกศร II ในรูปที่ 4.20 (ก) มีขนาดใหญ่กว่ารอยฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังด้วยลูกศร II ในรูปที่ 4.20 (ง) ซึ่งเป็นสาเหตุแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงเนื่องดิ่งมีค่าสูงกว่า พื้นที่การยึดตัว ของอูมิเนียมของรอยต่อทั้งสองแบบดังด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.20(ข) และ (ค) แสดงการยึดตัวของ รอยต่อที่เกิดการฉีกขาด พบว่ารอยต่อที่เป็นแนวการฉีกขาดของรอยต่อแบบที่ 2 มีค่ามากกว่ารอยต่อ เกยแบบที่ 1 แต่การวัดค่าการยึดตัวพบรอยต่อเกยมีค่าการยึดตัวของรอยต่อมีค่ามากกว่า [24,26]

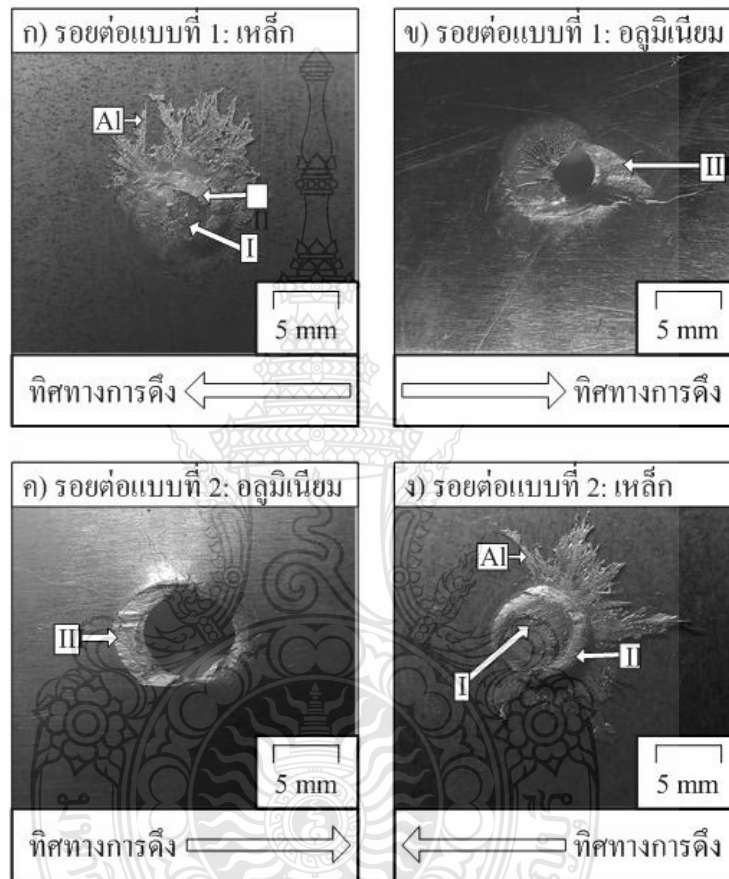
รอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองทำการเชื่อมด้านทานแบบจุด ด้วยเวลากดแช่ต่างๆ ในหัวข้อนี้ คือ รอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycles ดังรูป ที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 Cycles พบความ ต่างที่ ทำให้รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycles มีความแข็งแรงมากกว่า คือ อูมิเนียมที่ กระจายรอบๆ รอยเชื่อมที่เกิดความร้อนและแรงดันกคอเล็กโทรคนั้นมีปริมาณการกระจายตัวออก ด้านข้างรอยเชื่อมในปริมาณที่น้อยกว่า การกระจายออกไปด้านข้างที่น้อยกว่าแสดงให้เห็นว่า อูมิเนียมส่วนใหญ่เกิดการยึดเหนี่ยวเข้ากับเนื้อโลหะเชื่อมมากกว่า นอกนั้นที่ตำแหน่งการฉีกขาด รอบๆ แนวเชื่อมของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycles ดังแสดงด้วยลูกศรที่ II ในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่ารอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 Cycles



รูปที่ 4.21 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเสียดทานด้วยเวลาทดสอบ 10 Cycles

รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเสียดทานที่เชื่อมด้วยเวลาทดสอบ 10 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) บนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 ดังลูกศร AI ในรูปที่ 4.21 (ก) มีปริมาณการกระจายตัวมากกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลาทดสอบ 10 Cycles การกระจายตัวสูงของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) ทำให้อลูมิเนียมเกิดการเกาะยึดกับโลหะเชื่อมน้อยลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพื้นที่การเชื่อมที่ถูกลดด้วยอิเล็กโทรดดังลูกศร I และพื้นที่การฉีกขาดดังลูกศร II พบว่ามีขนาดเล็กกว่าทำให้รอยต่อนี้แสดงค่าความแข็งแรงเสียดทานต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระจายตัวของอลูมิเนียมของรอยต่อแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.21 (ง) พบว่าของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) มีการกระจายตัวน้อยกว่า (ลูกศร AI) นอกจากนี้รอยคอดอิเล็กโทรด (ลูกศร I) และรอยฉีกขาด (ลูกศร II) มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่ารอยต่อแบบที่ 1 และเป็นสาเหตุทำให้รอยต่อแบบที่ 2 แสดงค่าความแข็งแรงเสียดทานสูงกว่า รอยฉีกขาดด้าน

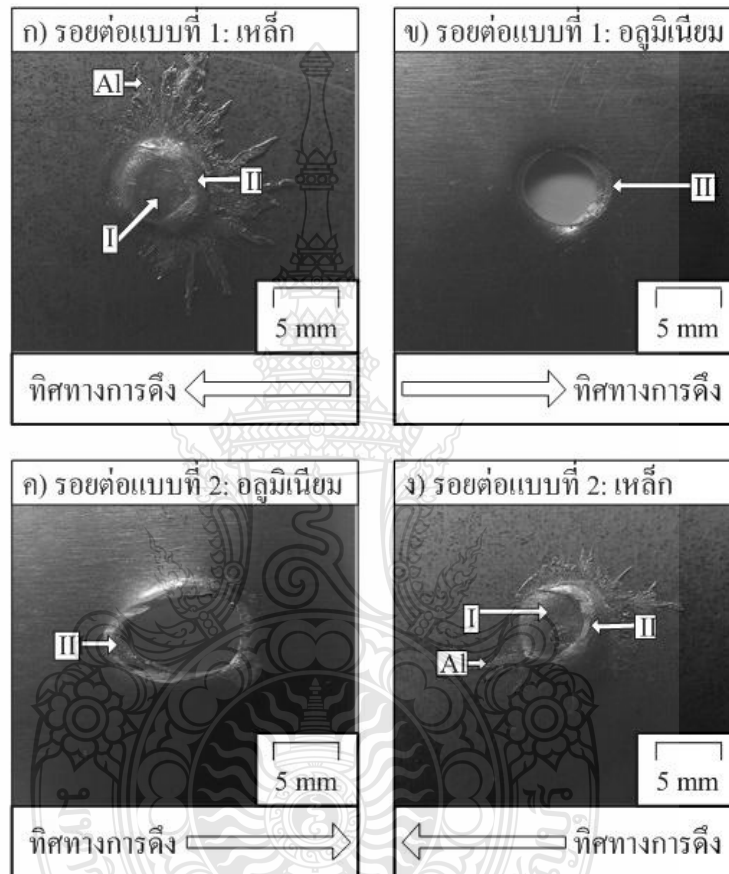
อลูมิเนียมของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ดังลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.21 (ข) และ (ค) แสดงผลการตรวจสอบที่แสดงให้เห็นว่ารอยต่อแบบที่ 2 มีค่าความแข็งแรงสูงกว่ารอยต่อแบบที่ 1 เนื่องพื้นที่การฉีกขาดของรอยต่อมีค่ามากกว่า ผลการตรวจสอบการฉีกขาดที่ได้สามารถอธิบายสาเหตุที่ทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงเกินดังแสดงในรูปที่ 4.21 และการยึดตัวของรอยต่อดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.22 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยเวลาทดสอบ 15 Cycles

รูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยเวลาทดสอบ 15 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ที่เป็นเวลาทดสอบสูงสุดในการทดลองในหัวข้อนี้ พบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ดังลูกศร A1 ดังรูปที่ 4.22 (ก) และ (ง) มีปริมาณการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) สูงกว่ากว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลาทดสอบ 15 Cycles พื้นที่การรูดเชื่อมของอิเล็กโทรดดังลูกศร I และรอยฉีกขาดดังลูกศร II ในรูปที่ 4.32 (ก) และ (ง) มีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกับรอยต่อที่เวลาทดสอบ 15 Cycles นอกนั้นรอยฉีกขาดของแผ่น

อลูมิเนียมดั่งลูกศร III ในรูปที่ 4.22 (ก) และ (ง) มีภาพร่างและขนาดคล้ายกับรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นในรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลาคดแซ่ 10 Cycles ขนาดและรูปร่างของรอยฉีกขาดที่คล้ายกันนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อเกยที่ได้แสดงค่าใกล้เคียงกับความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยที่เชื่อมด้วยเวลาคดแซ่ 10 Cycles [26]



รูปที่ 4.23 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเนื่องดึงด้วยเวลาคด 20 Cycles

รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเนื่องดึงที่เชื่อมด้วยเวลาคดแซ่ 20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ที่เป็นเวลาคดแซ่สูงสุดในการทดลองในหัวข้อนี้ พบว่าการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมหลอมละลาย (Spatter) บนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ดังลูกศร AI ในรูปที่ 4.23 (ก) และ (ง) มีปริมาณการกระจายตัวสูงกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลาคดแซ่ 15 Cycles พื้นที่การกดเชื่อมของอิเล็กโทรดดังลูกศร I และรอยฉีกขาดดังลูกศร II ในรูปที่ 4.23 (ก) และ (ง) มีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกับรอยต่อที่เวลาคดเชื่อม 15 Cycles นอกนั้นรอยฉีกขาดของแผ่นอลูมิเนียม ดัง

ลูกศร III ในรูปที่ 4.23 (ก) และ (ง) มีรูปร่างและขนาดคล้ายกับรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นในรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 Cycles ขนาดและรูปร่างของรอยฉีกขาดที่คล้ายกันนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อเกยที่ได้แสดงค่าใกล้เคียงกับความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 Cycles [24]

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ตั้งแต่ 1 – 20 Cycles

เวลากดแช่ (Cycles)	1	5	10	15	20
การฉีกขาดผ่านอินเทอร์เฟซ	√				
การฉีกขาดผ่านแนวเชื่อม		√	√	√	√

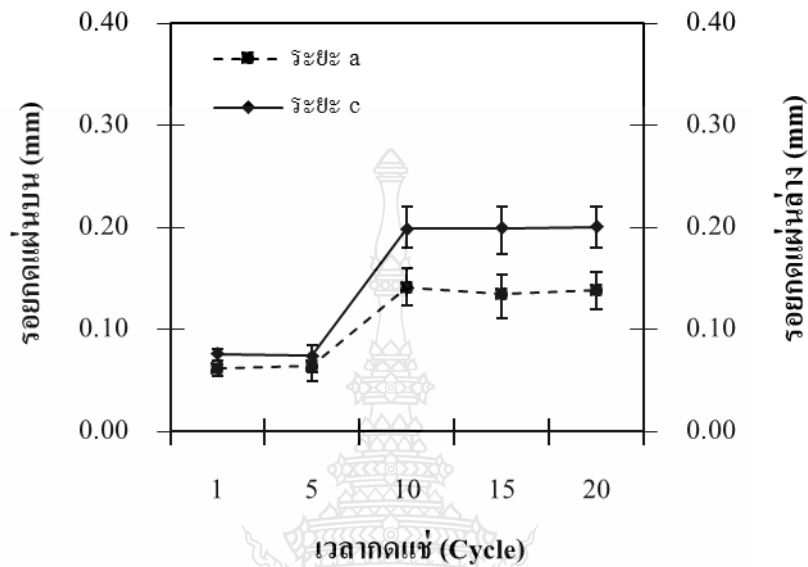
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1 – 20 Cycles

เวลากดแช่ (Cycles)	1	5	10	15	20
การฉีกขาดผ่านอินเทอร์เฟซ	√				
การฉีกขาดผ่านแนวเชื่อม		√	√	√	√

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1- 20 Cycles โดยรอยที่เกิดการฉีกขาดจะมีแนวการฉีกขาดผ่านอินเทอร์เฟซและ มีการฉีกขาดผ่านบริเวณแนวเชื่อมซึ่งการฉีกขาดนั้นสามารถบอกได้ถึง ความแข็งแรงเหนือนของแนวเชื่อมที่ทำการทดสอบ โดยใช้สัญลักษณ์ √ เพื่อบ่งบอกลักษณะของรอยที่เกิดการฉีกขาด

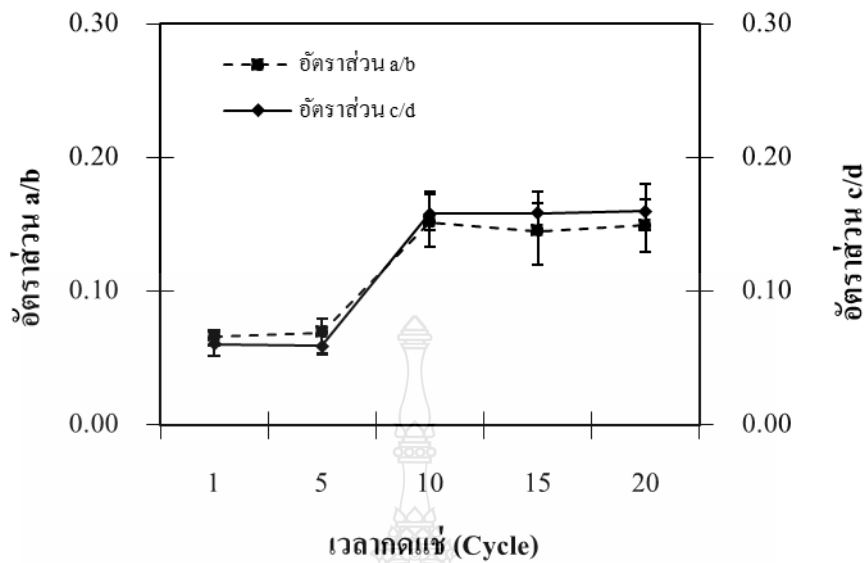
ตารางที่ 4.1 และ 4.2 สรุปได้ว่า ที่เวลากดแช่ 1 Cycles จะเกิดการฉีกขาดผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซ ส่วนเวลากดแช่ที่ 5-20 Cycles จะเกิดการฉีกขาดผ่านบริเวณแนวเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงเหนือนดึงของการฉีกขาดผ่านบริเวณแนวเชื่อมมีค่ามาก สามารถรับแรงได้มากกว่าการฉีกขาดผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซ เพราะการฉีกขาดผ่านบริเวณแนวเชื่อมนั้น ผิวอลูมิเนียมจะซึมลึกเข้าสู่ผิวเหล็กทำให้เกิดการยึดที่แข็งแรง การฉีกขาดจึงเกิดขึ้นบริเวณรอบๆของรอยเชื่อมตามการตรวจสอบรูปร่างของรอยต่อที่ได้จากการเชื่อมด้านทานแบบจุดตามมาตรฐาน JIS Z3139 เป็นสิ่งสำคัญในการนำชิ้นงาน ไปใช้งานอุตสาหกรรมเนื่องรูปร่างของรอยต่อที่เป็นไปตามข้อกำหนดมีผลทำให้การ

ประยุกต์ใช้งานเกิดประโยชน์สูงสุดได้ ผลการตรวจสอบรูปร่างของรอยต่อเกยในตำแหน่งตรวจสอบ ดังรูปที่ 4.2 ได้ผลการตรวจสอบขนาดดังต่อไปนี้



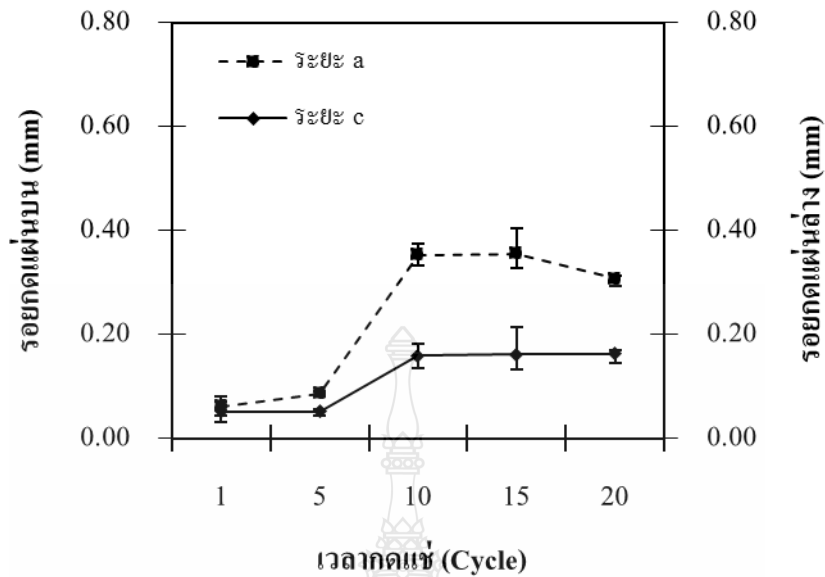
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกุดคิเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และเวลาทดสอบตั้งแต่ 1-20 Cycles

รูปที่ 4.24 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกุดคิเล็กโทรดบนผิวทั้งสองด้านของ รอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่เวลาทดสอบต่างๆ พบว่าความลึกของรอยกุดคิเล็กโทรดลงบนผิวของรอยต่อทั้ง ด้านบน (แผ่นเหล็ก) และด้านล่าง (แผ่นอลูมิเนียม) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น เวลาทดสอบที่น้อยทำให้อลูมิเนียมมีเวลาน้อยในการรวมเข้ากับเนื้อโลหะเชื่อมและส่งผลทำให้รอยต่อมี พื้นที่การเชื่อมยึดระหว่างโลหะน้อยและส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อมีค่าต่ำกว่า ขณะเดียวกันเวลาทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้อลูมิเนียมสามารถเชื่อมยึดเข้ากับโลหะเชื่อมได้เพิ่มสูงขึ้น และส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงเนื่องดึงที่ได้จากการทดสอบดังข้างต้น



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวของรอยต่อเกลยแบบที่ 1 ต่อความหนาของแผ่นโลหะของรอยต่อเกลยที่เวลาทดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles

รูปที่ 4.25 ค่าระยะความลึกรอยกดของอิเล็กโทรดบนผิวของรอยต่อเกลยแบบที่ 1 ถูกนำมาหาค่าความสัมพันธ์กับความหนาของแผ่นรอยต่อและได้ผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.25 โดยผลการตรวจสอบมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทดแช่เพิ่มขึ้น การเกิดแนวโน้มลักษณะนี้เนื่องเวลาทดแช่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความลึก ระยะเวลาที่อิเล็กโทรดเกิดการสัมผัสกับผิวของรอยต่อเพิ่มขึ้น ทำให้โลหะมีเวลาในการเกิดกระบวนการเชื่อมยึดการเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยกดต่อความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อเกลยแบบที่ 1 ทุกค่ามีค่าต่ำกว่า 0.2 mm ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้สำหรับการเชื่อมด้านทานแบบจุดคลหะที่มีความหนาไม่เกิน 1.3 mm ที่ต้องมีค่าอัตราส่วนนี้อยู่ที่ค่าต่ำกว่า 0.3 mm

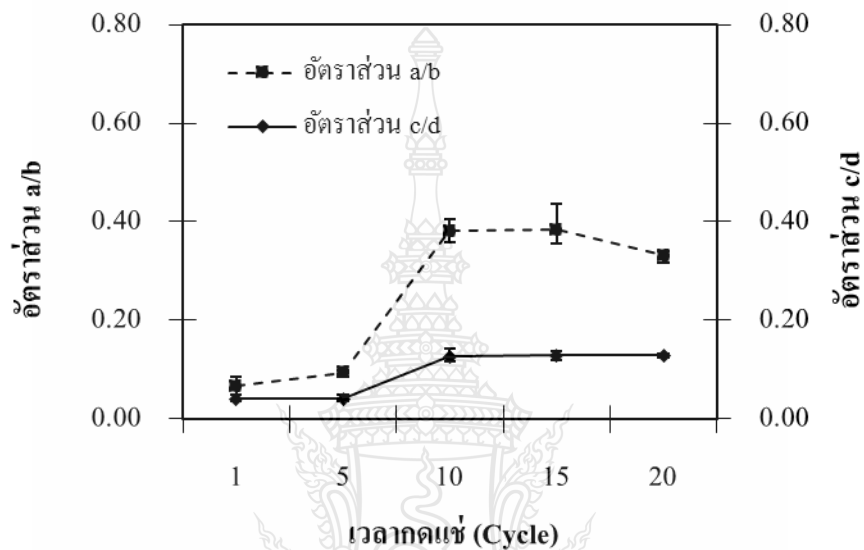


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกัดอิเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 และเวลาทดสอบตั้งแต่ 1 - 20 Cycles

รูปที่ 4.26 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อด้านบน (อลูมิเนียม) และผิวรอยต่อด้านล่าง (เหล็ก) ของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่เชื่อมที่เวลาทดสอบต่างๆ ผลการตรวจสอบพบว่าเวลาในการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อแบบที่ 2 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.25 พบว่าความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดบนผิวด้านบน (อลูมิเนียม) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มเป็น 10-20 Cycles ผลการตรวจสอบที่ได้นี้เป็นข้อยืนยันผลการตรวจสอบในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ได้ว่า การเชื่อมรอยต่อของวัสดุต่างชนิด คือ อลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี หากกำหนดให้อลูมิเนียมไว้ด้านบนของรอยต่อ (รอยต่อแบบที่ 2) ส่งผลทำให้ผิวของอลูมิเนียมถูกกัดลงไปสู่ด้านล่างและเกิดการเสียหายได้ ความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดในรูปที่ 4.18 ได้แสดงข้อมูลเพิ่มเติมที่น่าสนใจ คือ รอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลาทดสอบ 10-15 Cycles นั้นมีค่าระดับคุณภาพต่ำกว่าระดับ C เนื่องจากความลึกของรอยกัดเหล่านี้มีค่ามากกว่า 0.3 mm นอกนั้นเมื่อนำเอาความลึกของรอยกัดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นโลหะแล้วสามารถแสดงผลการตรวจสอบได้ดังรูปที่ 4.18 อัตราส่วนของระยะรอยกัดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อด้านบน (a/b) และด้านล่าง (c/d) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น ที่เวลาทดสอบต่ำ 1-5 Cycles อัตราส่วนของระยะรอยกัดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อมีค่าที่สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้ แต่ที่เวลาทดสอบต่ำ 10-20 Cycles อัตราส่วนของระยะรอย



กดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อไม่เหมาะสมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม [27] เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนที่มากกว่า 0.3 mm อย่างไรก็ตามเนื่องการเชื่อมที่เวลากดแช่ต่ำ 1-5 Cycles นั้นมีความแข็งแรงเหมือนดังต่ำกว่าความแข็งแรงเหมือนดังของรอยต่อที่เวลากดแช่ต่ำ 10-20 Cycles ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ เพิ่มเติมต่อไป



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาของแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles

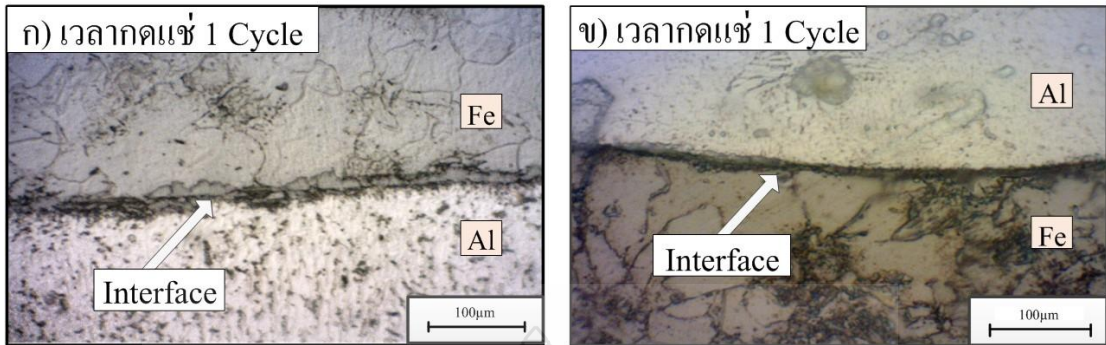
รูปที่ 4.27 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกดอเล็กโตรดบนผิวรอยต่อด้านบน (อลูมิเนียม) และผิวรอยต่อด้านล่าง (เหล็ก) ของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่เชื่อมที่เวลากดแช่ต่างๆ ผลการตรวจสอบพบว่าเวลาในการกดแช่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความลึกของรอยกดอเล็กโตรดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 2 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.26 พบว่าความลึกของรอยกดอเล็กโตรดบนผิวด้านบน (อลูมิเนียม) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลากดแช่เพิ่มเป็น 10-20 Cycles ผลการตรวจสอบที่ได้นี้เป็นข้อยืนยันผลการตรวจสอบในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.1 ได้ว่า การเชื่อมรอยต่อเกยของวัสดุต่างชนิด คือ อลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีหากกำหนดให้อลูมิเนียมไว้ด้านบนของรอยต่อเกย (รอยต่อเกยแบบที่ 2) ส่งผลทำให้ผิวของอลูมิเนียมถูกกดลงไปสู่ด้านล่างและเกิดการเสียหายได้ ความลึกของรอยกดอเล็กโตรด ดังรูปที่ 4.27 ได้แสดง รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10-15 Cycles นั้นมีค่าระดับคุณภาพต่ำกว่าระดับ C เนื่องจากความลึกของรอยกดเหล่านี้มีค่ามากกว่า 0.3 mm นอกนั้นเมื่อนำเอาความลึกของรอยกดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นโลหะแล้ว

สามารถแสดงผลการตรวจสอบได้ ดังรูปที่ 4.27 อัตราส่วนของระยะรอยกุดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อด้านบน (a/b) และด้านล่าง (c/d) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น ที่เวลาทดสอบต่ำ 1-5 Cycles อัตราส่วนของระยะรอยกุดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อมีค่าที่สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้ [25] แต่ที่เวลาทดสอบต่ำ 10-20 Cycles อัตราส่วนของระยะรอยกุดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อไม่เหมาะสมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากอัตราส่วนที่มากกว่า 0.3 อย่างไรก็ตามเนื่องการเชื่อมที่เวลาทดสอบต่ำ 1-5 Cycles นั้นมีความแข็งแรงเนื่องดิ่งต่ำกว่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งของรอยต่อที่เวลาทดสอบต่ำ 10-20 Cycles ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ เพิ่มเติมต่อไป



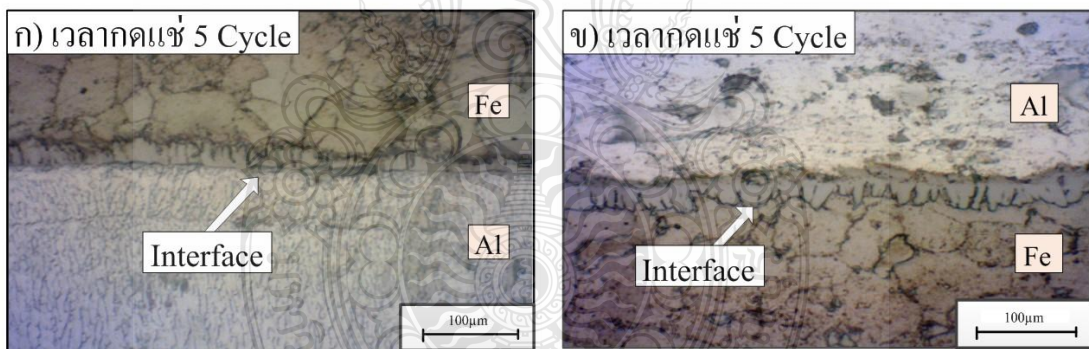
รูปที่ 4.28 โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้าง

รูปที่ 4.28 เป็นโครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณกรอบสีแดง ของเวลาในการทดสอบที่รอบการเชื่อมตั้งแต่ 1 - 20 Cycles เพื่อเปรียบเทียบความสูงของแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างแผ่นเหล็กอยู่ด้านบนอลูมิเนียมและอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็ก โดยใช้กำลังขยายที่ 1,000 เท่าเพื่อทำการตรวจสอบแนวเชื่อม



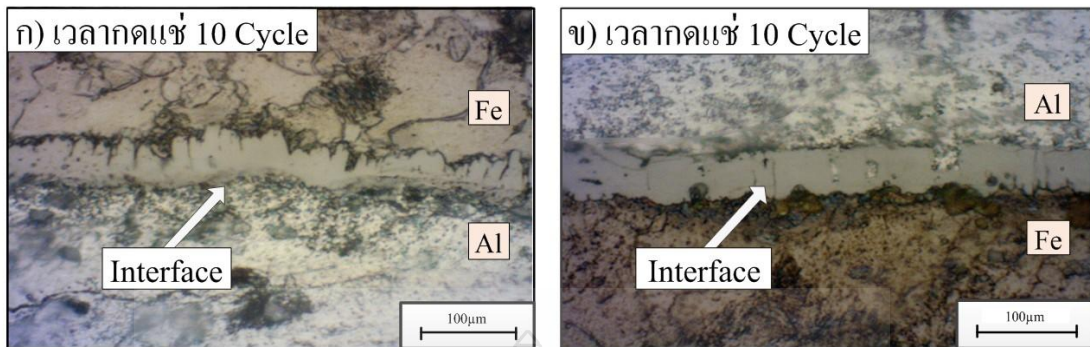
รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 1 Cycles

รูปที่ 4.29 จะพบรอยเชื่อมต่อเกาะแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลากดแช่ที่ 1 Cycles ที่และค่อนข้างสูงสม่ำเสมอตลอดแนวมากกว่ารอยเชื่อมแบบต่อเกาะแบบที่ 2 ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกาะแบบที่ ข. นั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกาะแบบที่ 1 มีความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่ดีกว่า



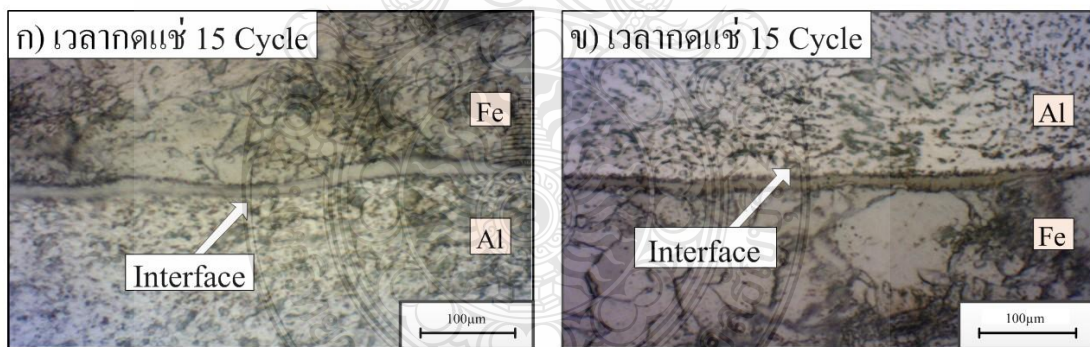
รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคที่เวลากดแช่ 5 Cycles

รูปที่ 4.30 พบว่ารอยเชื่อมต่อเกาะแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลากดแช่ที่ 5 Cycles และค่อนข้างสูงมากสม่ำเสมอตลอดแนวมากกว่ารอยเชื่อมแบบต่อเกาะแบบที่ 2 ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกาะแบบที่ ข. นั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกาะแบบ ก. มีความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่เพิ่มมากขึ้น



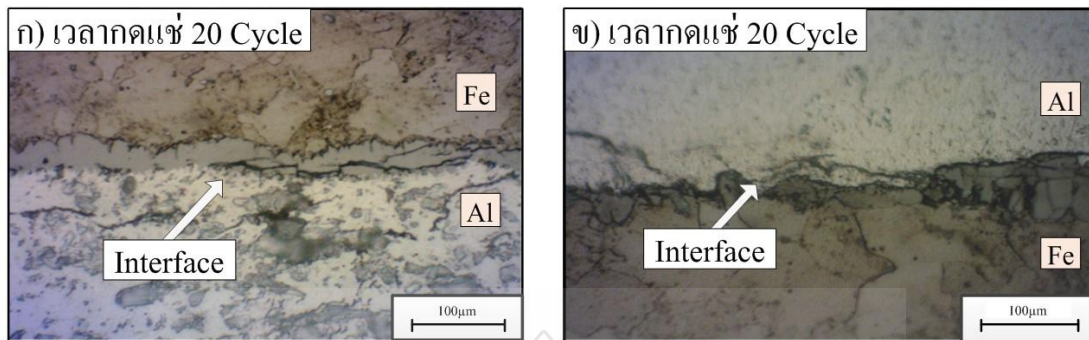
รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคที่เวลาทดสอบ 10 Cycles

รูปที่ 4.31 พบรอยเชื่อมต่อเกยแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลาทดสอบที่ 10 Cycles และสูงมากและสม่ำเสมอตลอดแนวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยเวลาทดสอบที่ผ่านมาและรอยเชื่อมแบบต่อเกยแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกยแบบ ข. นั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกยแบบ ก. มีความแข็งแรงเกินสิ่งที่ดี



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคที่เวลาทดสอบ 15 Cycles

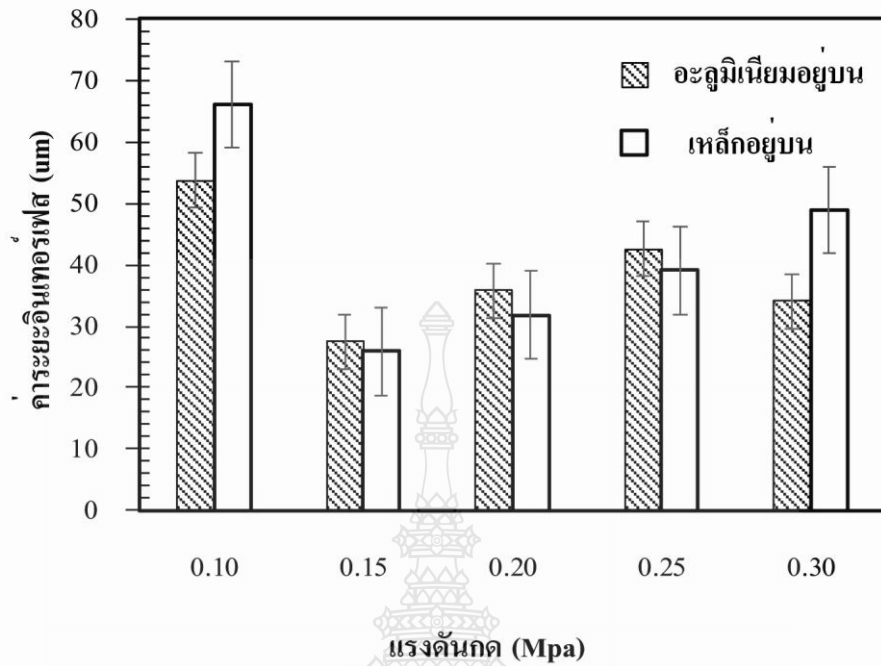
รูปที่ 4.32 พบรอยเชื่อมต่อเกยแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลาทดสอบที่ 15 Cycles และสูงมากลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยเวลาทดสอบที่ผ่านมาและรอยเชื่อมแบบต่อเกยแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อเกยแบบ ข. นั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกยแบบ ก. มีความแข็งแรงเกินสิ่งที่สูงแต่น้อยกว่าเวลาทดสอบที่ 10 Cycles



รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคที่เวลาทดสอบ 20 Cycles

รูปที่ 4.33 พบรอยเชื่อมต่อแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลาทดสอบที่ 10 Cycles และสูงแต่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมด้วยเวลาทดสอบที่ผ่านมาและรอยเชื่อมแบบต่อแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมต่อแบบ ข. นั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อแบบ ข. อาจทำให้มีความแข็งแรงเนื่องดิ่งลดน้อยลงด้วย

รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่าระยะห่างบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่างของเวลาในการทดสอบ โดยมีกระแสในการเชื่อมที่ 95 kA แรงดันกด 0.1 MPa พบว่าเวลาทดสอบ 0.1 Cycles แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนมีระยะบริเวณอินเทอร์เฟซสูงกว่าแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง โดยที่เวลาทดสอบ 0.15 Cycles แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่างมีระยะห่างบริเวณอินเทอร์เฟซลดลงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง เวลาทดสอบที่ 0.25 Cycles และเวลาทดสอบ 0.3 Cycles ระยะห่างบริเวณอินเทอร์เฟซแผ่นอลูมิเนียมอยู่บนมีค่าต่ำกว่าแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง [24,28]



รูปที่ 4.34 ความสูงแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2

การทดลองเชื่อมรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ด้วยเวลาแช่ 1-20 Cycles ด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แรงดันกด 0.1 MPa ได้ผลการทดลองที่น่าสนใจ คือ เวลาแช่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การเกาะยึดของโลหะในโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นและทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงเนื่องดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2165 N ที่เวลาแช่ 10 Cycles ด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แรงดันกด 0.1 MPa โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาแช่ส่งผลทำให้ความสามารถในการควบคุมรูปร่างของรอยต่อ

รอยต่อแบบที่ 2 ที่กำหนดให้วางแผ่นอลูมิเนียมอยู่บนแผ่นเหล็กไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องทำให้ผิวของอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง และไม่ปฏิบัติตามเกณฑ์การนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม

#### 4.4 อิทธิพลของแรงดันกดที่มีผลต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อเกย ระหว่างเหล็ก SGACD และอลูมิเนียม AA1100

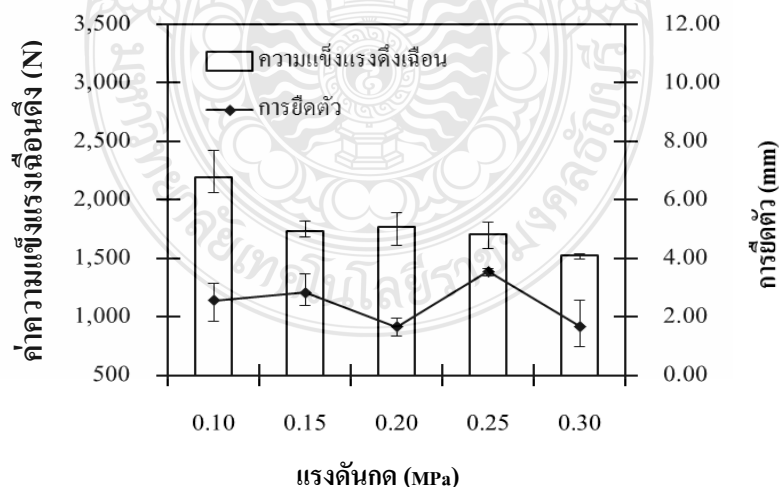
การทดลองที่ 4.1 4.2 และ 4.3 พบว่าตัวแปรในการทดสอบการเชื่อมด้านทานแบบจุดนั้น นอกจากจะมีกระแสเวลาในการกดแล้วยังมีตัวแปรอีกตัว คือ แรงดันกด แรงดันกด จะมีความสำคัญในการเชื่อมด้านทานแบบจุดมาก เมื่อหัวอิเล็กโทรดตกลงบนชิ้นงานต่อเกยปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาในการแข็งตัวจะพบว่าแรงดันกดก็มีความสำคัญจึงทำการทดสอบการเชื่อม โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ประกอบด้วย

กระแสไฟเชื่อม 95 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดึงสูงสุดในการเชื่อมรอยต่อเกยในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ที่ผ่านมา

เวลาในการกดขณะทำการเชื่อมดังทดลองในหัวข้อ 4.3 ซึ่งค่าที่ดีที่สุดในการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 คือ เวลากดแค่ที่ 10 Cycles

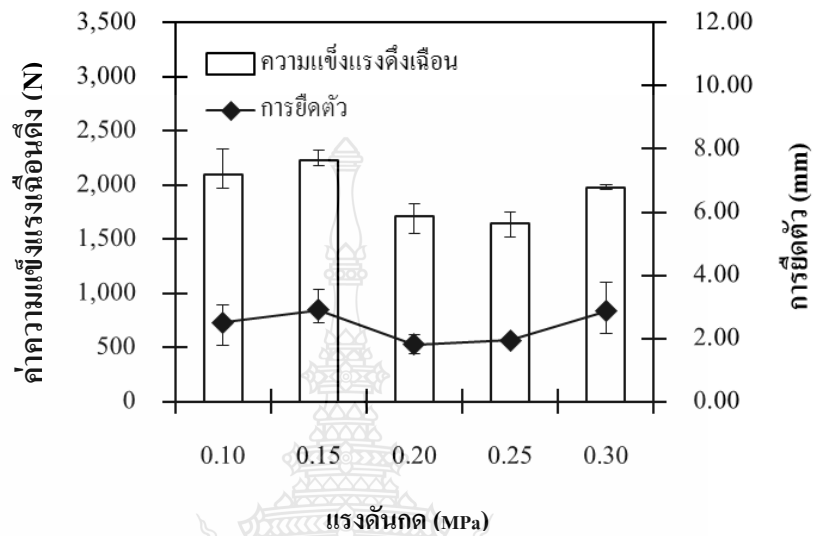
ทำการทดลองแรงดันกดของหัวอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.1-0.3 MPa

ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงเนื่องดึงสูงสุดในครั้งนี้ เป็นการเชื่อมรอยต่อที่มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันกล่าวคือ “รอยต่อเกยแบบที่ 1” หมายถึงรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางเกยบนแผ่นอลูมิเนียม และ “รอยต่อเกยแบบที่ 2” ที่หมายความว่า รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยบนแผ่นเหล็ก ซึ่งผลจากการทดสอบรอยต่อจะต้องนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับ โคนใช้แรงดันกดที่มีค่าตั้งแต่ 0.1-0.3 MPa โดยเปรียบเทียบได้จากข้อมูลต่อไปนี้



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกดต่อความแข็งแรงเนื่องดึงและการยืดตัวของรอยต่อเกย โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนบนแผ่นอลูมิเนียม

รูปที่ 4.35 รูปแสดงการต่อเกยแบบที่ 1 ซึ่งรอยต่อเกยแบบที่หนึ่งนั้นจะกำหนดให้แผ่นเหล็กวางต่อเกยอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงเนื้อดิ่งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆแสดงให้เห็นว่าที่แรงด้นกด 0.1 MPa มีค่าความแข็งแรงเนื้อดิ่งสูงสุดและมีอัตราการยืดตัวที่สูงเหมือนกัน

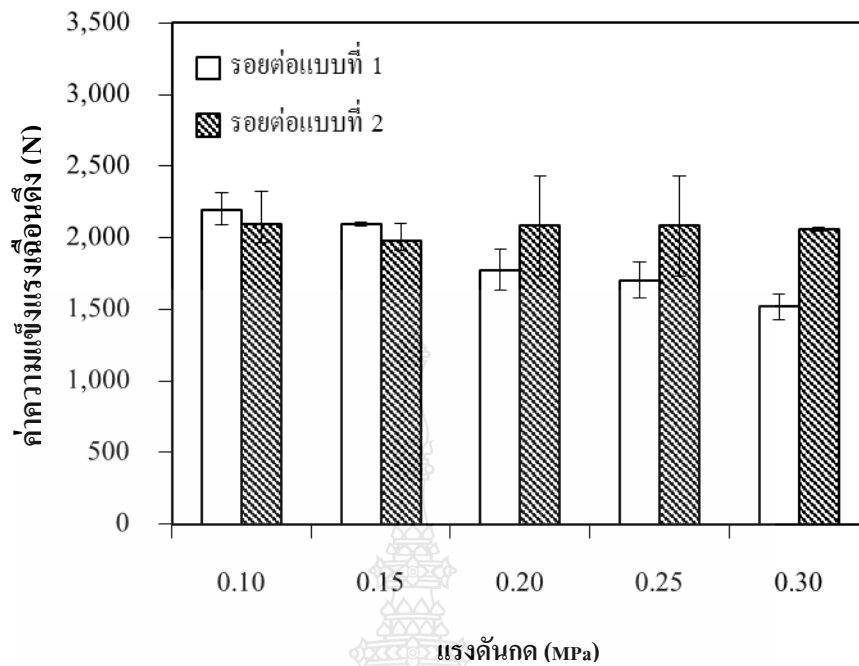


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้นกดต่อความแข็งแรงเนื้อดิ่งและการยืดตัวของรอยต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็ก

รูปที่ 4.36 เป็นรูปที่แสดงการต่อเกยแบบที่ 2 ซึ่งรอยต่อเกยแบบที่ 2 นั้นจะกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยอยู่บนแผ่นเหล็ก จะเห็นว่าที่แรงด้นกด 0.1 MPa กับ 0.15 MPa จะมีค่าความแข็งแรงเนื้อดิ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและที่แรงด้นกด 0.20 MPa กับ 0.25 MPa จะมีค่าลดลง ส่วนที่แรงด้นกด 0.3 MPa จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการต่อเกยแบบที่ 2 ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุดจะอยู่ที่ 0.15 MPa แต่เมื่อเทียบกับอัตราการยืดตัวแล้วจะพบว่าที่แรงด้นกด 0.10 MPa จะมีค่าความแข็งแรงเนื้อดิ่งที่สูงและมีอัตราการยืดตัวที่ดีกว่าแรงด้นกด 0.15 MPa เกิดเนื่องจากแรงที่ใช้ในการกดมีผลต่อค่าความต้านทานแรงเนื้อดิ่ง [29,31]

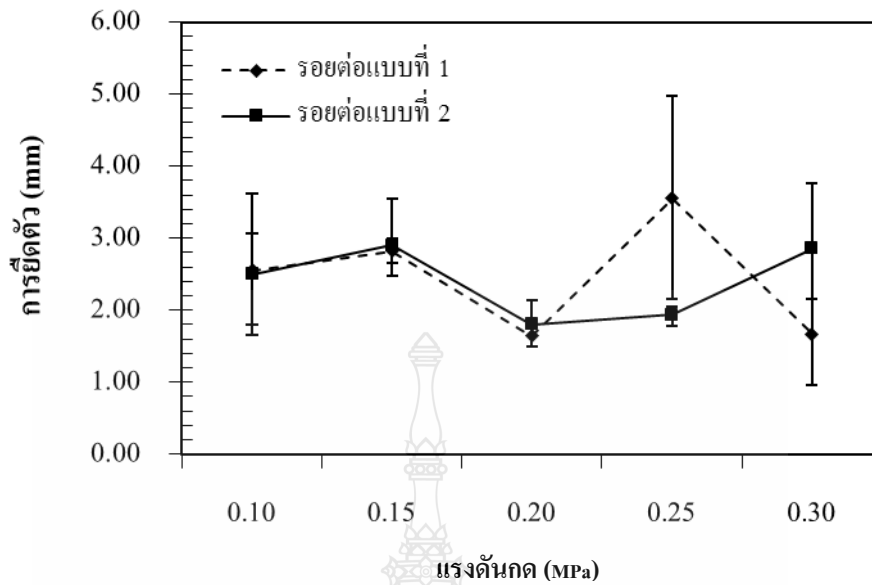
เห็นได้ว่ารูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของกราฟจะมีผลออกมาคล้ายคลึงกันคือมีค่าความแข็งแรงเนื้อดิ่งที่สูงกว่าแรงด้นกดอื่นๆ แต่จะสังเกตได้ว่า การต่อเกยแบบที่ 1 คือ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางบนแผ่นอลูมิเนียม จะมีค่าที่เหมาะสมแก่การใช้งานมากกว่าแบบที่ 2 คือ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยอยู่บนแผ่นเหล็กจะแสดงดังรูปที่ 4.37 จะเปรียบเทียบระหว่างการต่อเกยแบบที่ 1 และการต่อเกยแบบที่ 2





รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงแรงเฉือนดึงรูปแบบรอยต่อ และแรงดันกดตั้งแต่ 0.1 – 0.3 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2

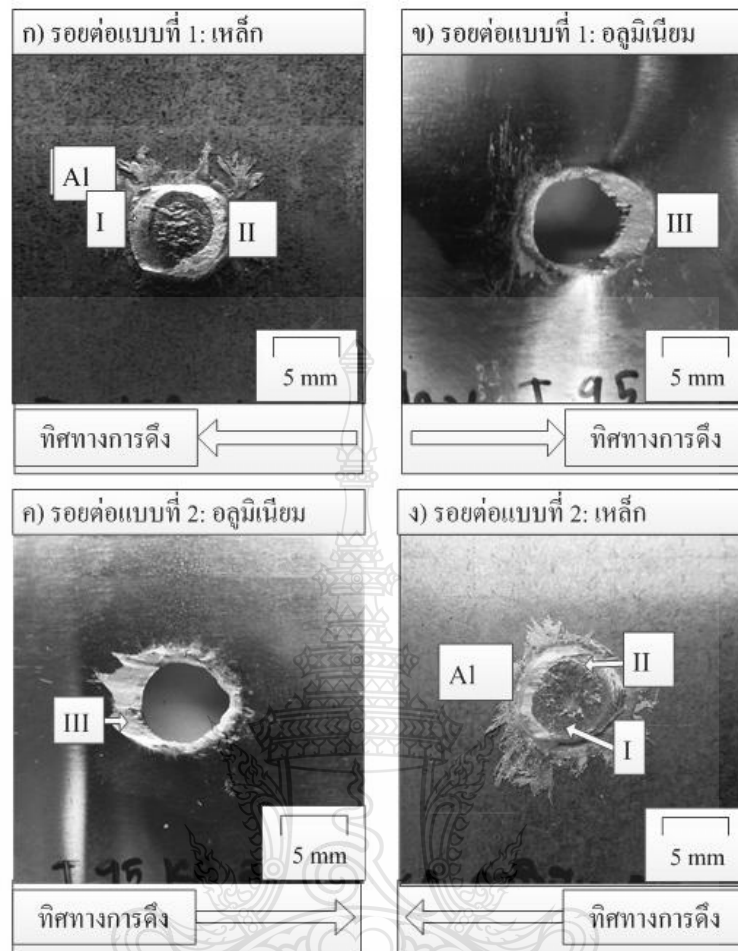
รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงแรงเฉือนดึงและแรงดันกดตั้งแต่ 0.1 – 0.3 MPa พบว่ารอยต่อแบบที่ 1 จะมีความแข็งแรงแรงเฉือนดึงมากกว่า ของการเชื่อมทั้งหมด โดยมีความแข็งแรงแรงเฉือนดึงประมาณ 2,200 N ซึ่งมีความแข็งแรงรอยต่อแบบที่ 2 และค่าความแข็งแรงแรงเฉือนดึงก็มีการลดลงเมื่อแรงดันกดเพิ่มขึ้น และการยึดตัวของรอยต่อแบบที่ 1 ส่วนรอยต่อแบบที่ 2 จะมีความแข็งแรงแรงเฉือนดึงน้อยกว่าการต่อแบบที่ 1 รอยต่อแบบที่ 2 นั้นมีความแข็งแรงแรงเฉือนดึงมีค่าไม่แน่นอนสูง ต่ำ ตามแรงดันกด แต่อัตราการยึดมีค่าสูงกว่ารอยต่อแบบที่ 1



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัวและรูปแบบรอยต่อมีค่าแรงดันกดตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2

รูปที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์การยึดตัวและรูปแบบรอยต่อโดยใช้แรงดันกดในการเชื่อมตั้งแต่ 0.10-0.30 MPa ระหว่างรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2 พบว่า รอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2 ที่ใช้แรงดันกดในการเชื่อม 0.10-0.15 MPa มีการยึดตัวเพิ่มขึ้นและมีค่าการยึดตัวต่ำสุดในแรงดันกด 0.20 MPa ส่วนรอยต่อแบบที่ 1 มีค่าการยึดตัวสูงกว่ารอยต่อแบบที่ 2 ที่แรงดันกด 0.25 MPa และมีแนวโน้มลดลงที่แรงดันกด 0.30 MPa และพบว่ารอยต่อแบบที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่แรงดันกด 0.30 MPa [21,24]

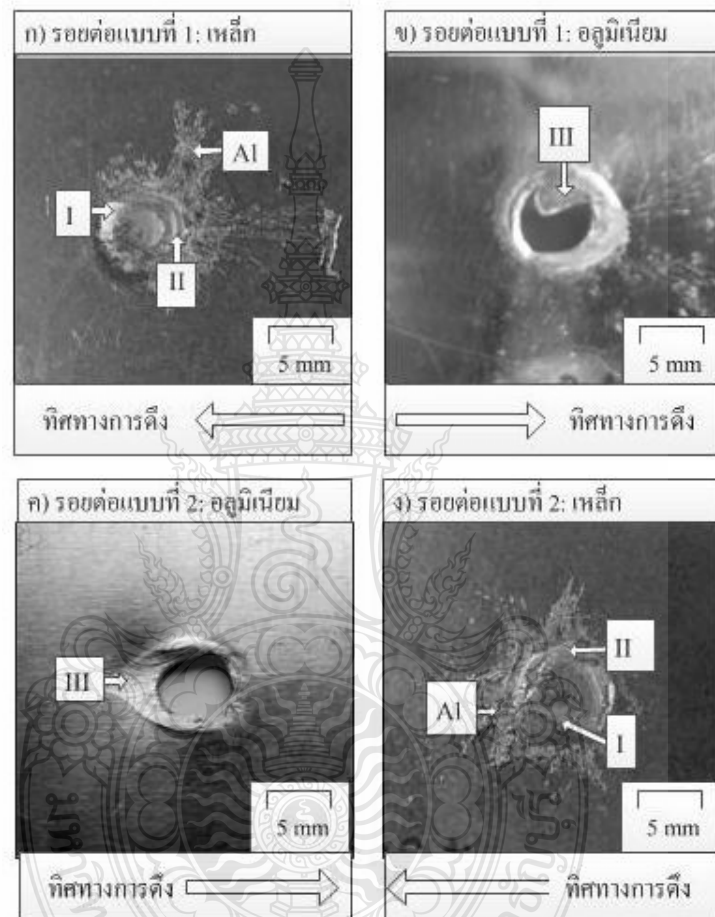
รูปแบบการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จากการศึกษาค้นคว้าจะพบการร้าวของชิ้นงาน 2 ลักษณะ กล่าวคือ “การร้าวผ่านบริเวณรอยเชื่อม” หมายถึง การร้าวที่ขาดบริเวณโดยรอบของรอยเชื่อมซึ่งการร้าวแบบนี้ส่วนมากจะมีค่าความแข็งแรงเหมือนเดิมที่มาก เพราะมีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซ และการร้าวอีกแบบหนึ่งคือ “การร้าวบริเวณอินเทอร์เฟซ” หมายถึงการร้าวบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานบ่งบอกถึงความไม่แข็งแรงของรอยเชื่อม เนื้อของโลหะไม่ซึมเข้าหากัน หรือซึมน้อย ทำให้การยึดติดไม่แข็งแรงจึงรับแรงได้น้อยกว่าการร้าวผ่านบริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 4.39 รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเฉือนดิ่งด้วยแรงด้นกด 0.10 MPa

รูปที่ 4.39 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยแรงด้นกด 0.10 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการฉีกขาดคล้ายกันกับการพังทลายของรอยต่อเกยทั้งสองแบบ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1, 4.2 และหัวข้อที่ 4.3 ที่ผ่านมาแล้วโดยในหัวข้อที่ 4.4 นี้พบว่าที่แรงด้นกดเชื่อม 0.10 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.39 (ก) และ (ข) นั้นเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีรูปร่างของการกระจายตัวซึ่งแสดงด้วยลูกศร AI น้อยกว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมในการเชื่อมแบบรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.39 (ค) และ (ง) ซึ่งมีการกระจายตัวที่มากกว่าโดยการกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ รอยเชื่อมของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ซึ่งคาดว่าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดของวัสดุทั้งสองมีความแข็งแรงน้อยกว่าการเชื่อมด้วยแรงด้นกดของการต่อเกยแบบที่ 1 เนื่องจากการพังทลายของรอยเชื่อมที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อนั้นสามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดัง

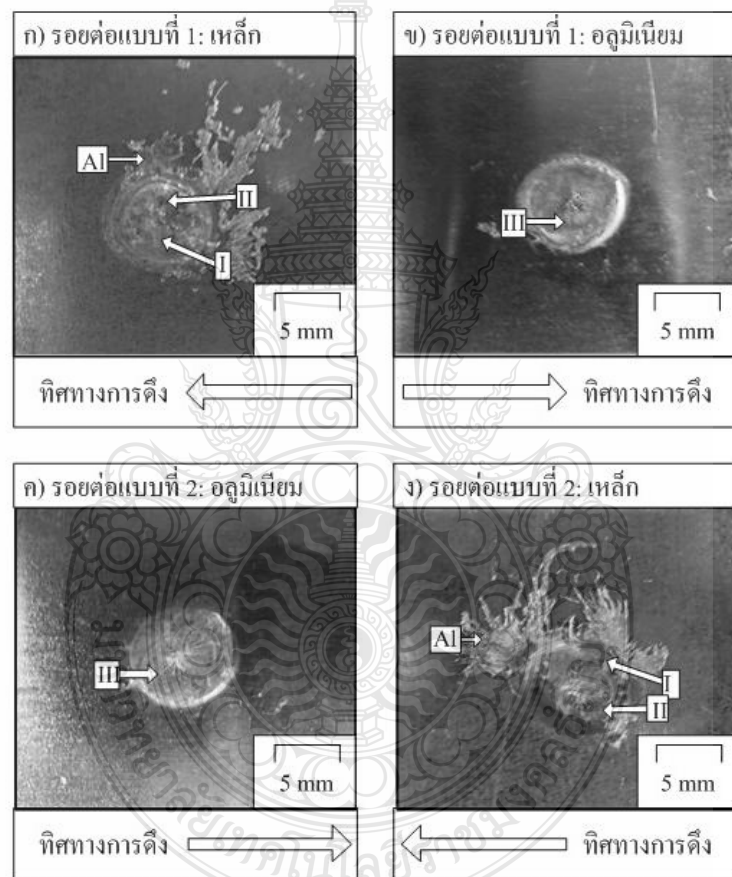
ลูกศรที่ I และ II ดังแสดงในรูปที่ 4.49 (ก) และดังลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.49 (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้แตกต่างจากการศึกษาของรอยต่อแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.49 (ค) และ (ง) อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงเนื่องดิ่งของรอยต่อเกลของการเชื่อมแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2 มีความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่ต่างกัน



รูปที่ 4.40 รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งด้วยแรงด้นกด 0.15 MPa

รูปที่ 4.40 แสดงถึงรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดิ่งที่เชื่อมด้วยแรงด้นกด 0.15 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการศึกษาคคล้ายกันกับการพังทลายของแรงด้นกดเชื่อม 0.15 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.40 (ก) และ (ข) นั้นเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 มีรูปร่างของการกระจายตัวที่กระจายออกมากกว่าซึ่งแสดงด้วยลูกศร AI และกระจายตัวของอลูมิเนียม

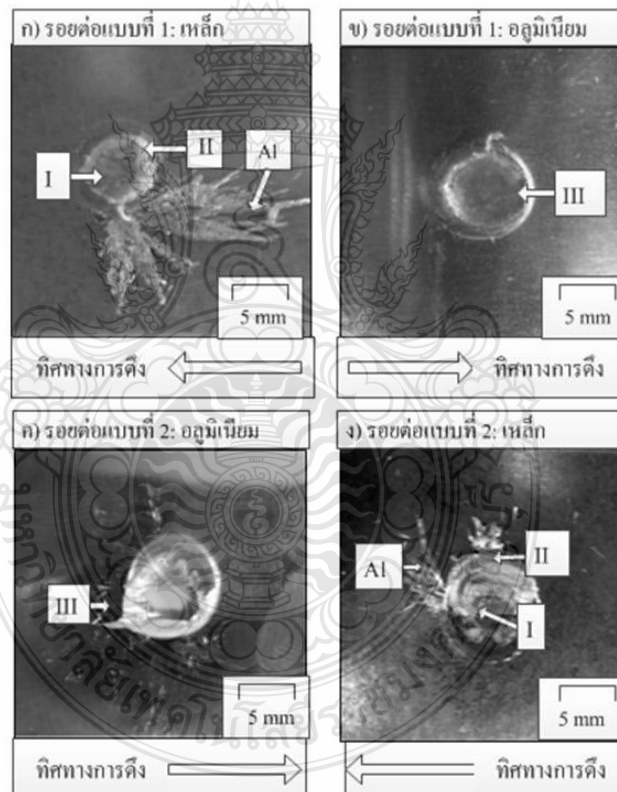
และในการเชื่อมแบบรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.40 (ค) และ (ง) ซึ่งมีการกระจายตัวที่มากเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ รอยเชื่อมของรอยต่อเกยทั้งสองแบบของการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.10 MPa นั้นมีการกระจายตัวที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดของวัสดุทั้งสองมีความแข็งแรงน้อยลงเนื่องจากการพังทลายของรอยเชื่อมที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อนั้นสามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดังลูกศรที่ I และ II ดังรูปที่ 4.40 (ก) และดังลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.40 (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.15 MPa มีความแข็งแรงเหนือนดึงมีค่าลดลง [24]



รูปที่ 4.41 รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเหนือนดึงด้วยแรงดันกด 0.20 MPa

รูปที่ 4.41 แสดงถึงรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเหนือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.20 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการฉีกขาดต่างอย่างสิ้นเชิงกับการพังทลายของแรงดันกดเชื่อม 0.15 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.41

(ก) และ (ข) นั้นเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 มีรูปร่างของการกระจายตัวที่กระจายออกมากขึ้นแสดงด้วยลูกศร AI และกระจายตัวของอลูมิเนียมและในการเชื่อมแบบรอยต่อแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.41 (ค) และ (ง) ซึ่งมีการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นมากเช่นกันแต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ รอยเชื่อมของรอยต่อแบบทั้งสองของการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.15 MPa นั้นมีการกระจายตัวที่เพิ่มมาอย่างแตกต่าง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดของวัสดุทั้งสองมีความแข็งแรงน้อยลงมากว่าเนื่องจากการพังทลายของรอยเชื่อมที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อนั้นสามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดังลูกศรที่ I และ II ดังรูปที่ 4.41 (ก) และดังลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.41 (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อแบบที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.20 MPa มีความแข็งแรงเนื่องดึงมีค่าลดลงเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม [24]

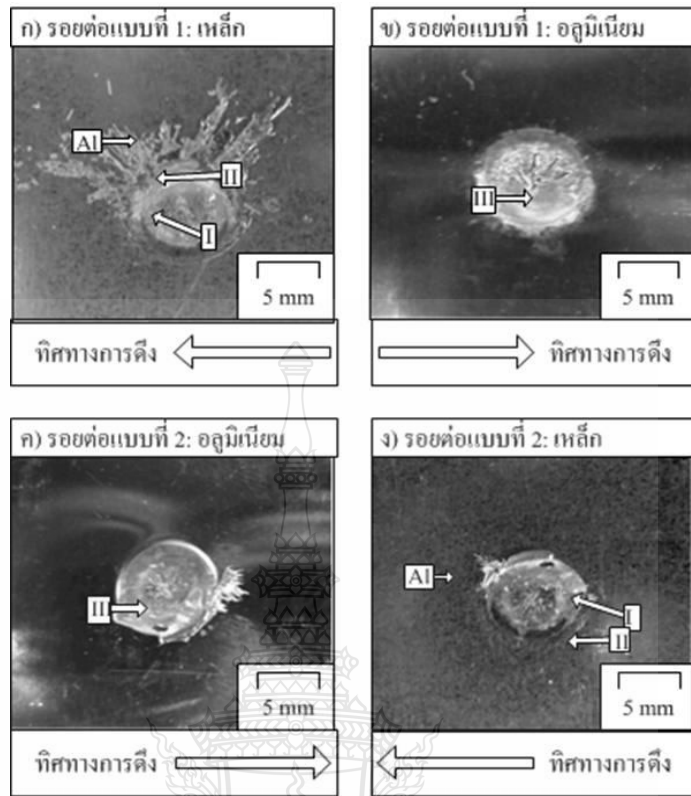


รูปที่ 4.42 รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดึงด้วยแรงดันกด 0.25 MPa

รูปที่ 4.42 แสดงถึงรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเนื่องดึงที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.25 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการฉีกขาด

ที่แตกต่างกันกับการพังทลายของแรงดันกดเชื่อม 0.20 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.42 (ก) และ (ข) นั้นเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีรูปร่างของการกระจายตัวที่กระจายออกมากขึ้นแสดงด้วยลูกศร AI และกระจายตัวของอลูมิเนียมและการเชื่อมแบบรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.42 (ค) และ (ง) ซึ่งมีการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นมากเช่นกันแต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ รอยเชื่อมของรอยต่อเกยทั้งสองแบบของการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.20 MPa นั้นมีการกระจายตัวที่เพิ่มมาอย่างแตกต่าง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดของวัสดุทั้งสองมีความแข็งแรงน้อยลงมากกว่าเนื่องจากการพังทลายของรอยเชื่อมที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อนั้นสามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดังลูกศรที่ I และ II ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (ก) และดังแสดงด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.42 (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงเหน็ดของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.25 MPa มีความแข็งแรงเหน็ดมีค่าลดลงเพิ่มขึ้นมากกว่า

รูปที่ 4.43 แสดงถึงรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเหน็ดที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.30 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการฉีกขาดที่แตกต่างกันมากที่สุดกับการพังทลายของแรงดันกดเชื่อม 0.25 MPa ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.41 (ก) และ (ข) นั้นเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีรูปร่างของการกระจายตัวที่กระจายออกมากขึ้นแสดงด้วยลูกศร AI และกระจายตัวของอลูมิเนียมและการเชื่อมแบบรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.43 (ค) และ (ง) ซึ่งไม่มีการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นมากเช่นกันแต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ รอยเชื่อมของรอยต่อเกยทั้งสองแบบของการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.25 MPa นั้นมีการกระจายตัวที่มากอย่างแตกต่าง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยึดของวัสดุทั้งสองมีความแข็งแรงน้อยลงมากกว่าเนื่องจากการพังทลายของรอยเชื่อมที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อนั้นสามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดังลูกศรที่ I และ II [27] ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (ก) และดังแสดงด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงเหน็ดของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยแรงดันกด 0.30 MPa มีความแข็งแรงเหน็ดมีค่าลดลงเพิ่มขึ้นมากกว่า



รูปที่ 4.43 รูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงเฉือนดึงด้วยแรงดันกด 0.30 MPa

การศึกษาลักษณะการแตกของตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 และ รอยต่อแบบที่ 2 นั้นสามารถสรุปผลได้ ดังตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงดันกดในการเชื่อม 0.10-0.30 MPa

แรงดันกดในการเชื่อม (MPa)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
การแตกผ่านอินเทอร์เฟซ	√				
การแตกผ่านแนวเชื่อม		√	√	√	√

ตารางที่ 4.3 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงดันกดในการเชื่อมเริ่มต้นที่ 0.10-0.30 โดยใช้สัญลักษณ์ √ แทนการแตกผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซ



ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่แรงดันทดในการเชื่อมที่ 0.10 MPa พบว่าการฉีกขาดผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซแสดงว่ามีค่าความแรงเฉือนดิ่งต่ำ การรับแรงในการเชื่อมน้อย และแรงดันทดในการเชื่อมที่ 0.15-0.30 MPa เป็นการฉีกขาดผ่านบริเวณแนวเชื่อม การฉีกขาดบริเวณนี้จะพบว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งสูง สามารถรับแรงในการกดได้มาก มีเนื้ออลูมิเนียมผสมอยู่ในผิวเหล็กทำให้เกิดการยึดตัวและแข็งแรงขึ้นเมื่อทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงดันทดในการเชื่อม 0.1-0.30 MPa

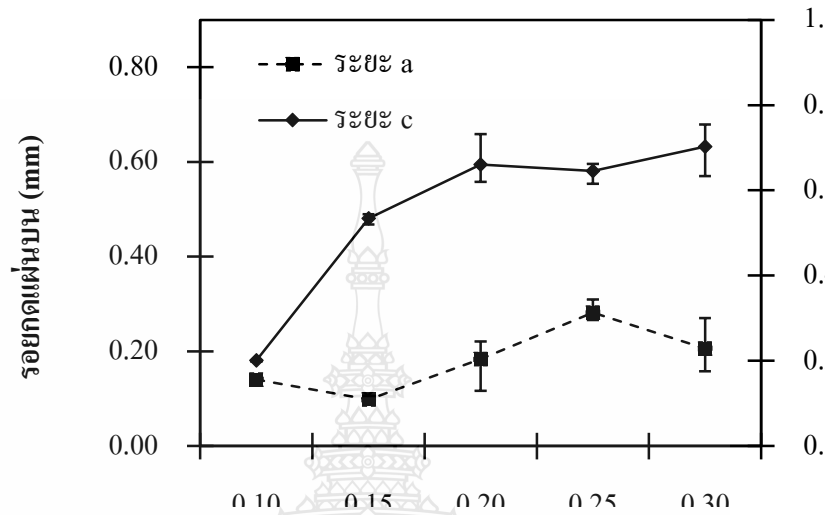
แรงดันทดในการเชื่อม (MPa)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
การฉีกขาดผ่านอินเทอร์เฟซ			√		√
การฉีกขาดผ่านแนวเชื่อม	√	√		√	

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงดันทดในการเชื่อมมีค่าเริ่มต้น 0.10-0.30 MPa โดยใช้สัญลักษณ์ √ แทนการฉีกขาดผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซ

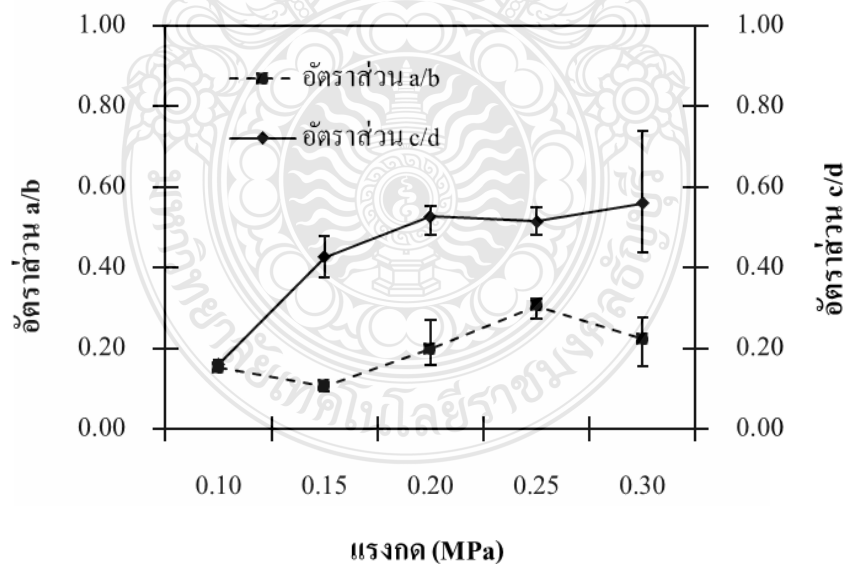
ตารางที่ 4.2 ที่แรงดันทด 0.20 และ 0.30 MPa ในการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการฉีกขาดผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซ และแรงในการกดที่ 0.10, 0.15 และ 0.25 MPa เป็นการฉีกขาดผ่านแนวเชื่อม จะพบว่ามีค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งมากเกิดการยึดที่แข็งแรง การฉีกขาดจึงเกิดขึ้นบริเวณรอบๆของรอยเชื่อมตามการตรวจสอบรูปร่างของรอยต่อที่ได้จากการเชื่อมด้านทานแบบจุดตามมาตรฐาน JIS Z3139 เป็นสิ่งสำคัญในการนำชิ้นงานไปใช้งานอุตสาหกรรมเนื่องจากรูปร่างของรอยต่อที่เป็นไปตามข้อกำหนดมีผลทำให้การประยุกต์ใช้งานเกิดประโยชน์สูงสุดได้

รูปที่ 4.44 ค่าระยะความลึกรอยกดของอิเล็กโทรดบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ถูกนำมาหาค่าความสัมพันธ์กับความหนาของแผ่นรอยต่อและได้ผลการตรวจสอบ ดังรูปที่ 4.44 โดยผลการตรวจสอบมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันทดเพิ่มขึ้น การเกิดแนวโน้มลักษณะนี้เนื่องจากแรงที่ใช้ในการกดเชื่อมนั้นเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความลึก ระยะเวลาที่อิเล็กโทรดเกิดการสัมผัสกับผิวของรอยต่อเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดกระบวนการเชื่อมยึดการเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยกดต่อความหนาของแผ่น โลหะรอยต่อเกยแบบที่ 1 ทุกค่ามีค่าต่ำกว่า 0.2 mm ซึ่งเป็นค่าที่

สามารถยอมรับได้สำหรับการเชื่อมด้านทานแบบจุดโลหะที่มีความหนาไม่เกิน 1.3 mm ที่ต้องมีค่าอัตราส่วนนี้อยู่ที่ค่าต่ำกว่า 0.3 mm



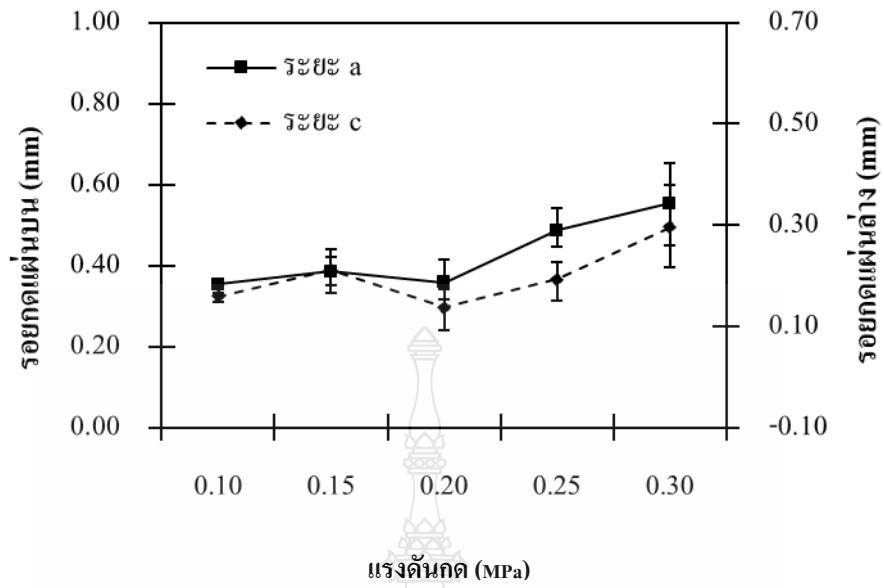
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกดเล็กน้อยของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และแรงคั้นกดตั้งแต่ 0.10-0.30 MPa



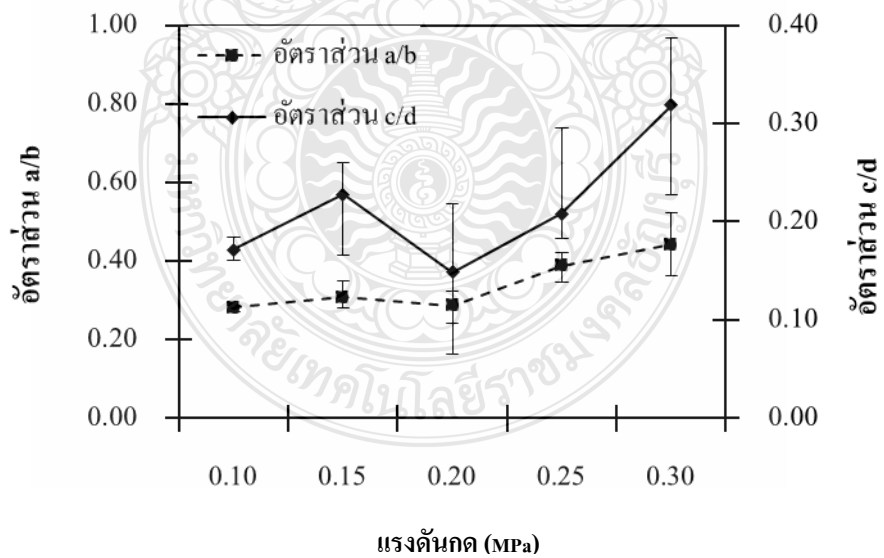
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่อความหนาของแผ่นโลหะที่ใช้แรงคั้นกดตั้งแต่ 0.10 -0.30 MPa

รูปที่ 4.45 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกดอเล็กโตรคบนผิวรอยต่อด้านบน (เหล็ก) และผิวรอยต่อด้านล่าง (อลูมิเนียม) ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่เชื่อมที่แรงดันกดเชื่อมต่างๆ พบแรงในการกดเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความลึกของรอยกดอเล็กโตรคบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 1 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.44 พบว่าความลึกของรอยกดอเล็กโตรคบนผิวด้านบน (เหล็ก) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อช่วงแรงดันกดตั้งแต่ 0.15-0.30 MPa ผลการตรวจสอบที่ได้นี้เป็นข้อยืนยันผลในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ได้ว่า การเชื่อมรอยต่อเกยของวัสดุต่างชนิดคือ อลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี หากกำหนดให้เหล็กไว้ด้านบนของรอยต่อเกย (รอยต่อเกยแบบที่ 1) นั้นมีค่าระดับคุณภาพต่ำกว่าระดับ C เนื่องจากความลึกของรอยกดเหล่านี้มีค่ามากกว่า 0.3 mm นอกจากนั้นเมื่อนำเอาความลึกของรอยกดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นโลหะแล้วสามารถแสดงผลการตรวจสอบได้ ดังรูปที่ 4.45 อัตราส่วนของระยะรอยกดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อด้านบน (a/b) และด้านล่าง (c/d) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันกดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.15-0.30 MPa จะทำให้มีความลึกที่สูงขึ้นตามไปด้วยและอาจทำให้มีความแข็งแรงเนื่องดิ่งต่ำกว่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงดันกดที่ 0.10 MPa ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ เพิ่มเติมต่อไป

รูปที่ 4.46 ค่าระยะความลึกรอยกดของอเล็กโตรคบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ถูกนำมาหาค่าความสัมพันธ์กับความหนาของแผ่นรอยต่อและได้ผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.46 โดยผลการตรวจสอบมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่แรงดันกดเชื่อมที่ 0.10 MPa และเมื่อแรงดันกดเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆตั้งแต่ 0.15-0.30 MPa ความลึกของแรงดันกดก็จะสูงตามไปด้วยนี้เนื่องจากแรงที่ใช้ในการกดเชื่อมนั้นเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความลึก ระยะเวลาที่อเล็กโตรคเกิดการสัมผัสกับผิวของรอยต่อเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดกระบวนการเชื่อมยึดการเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยกดต่อความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อเกยแบบที่ 2 ทุกค่ามีค่าต่ำกว่า 0.2 mm ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้สำหรับการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่โลหะที่มีความหนาไม่เกิน 1.3 mm ที่ต้องมีค่าอัตราส่วนนี้อยู่ที่ค่าต่ำกว่า 0.3 mm



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยกดคิเล็กโทรคของรอยต่อเกยแบบที่ 2 และแรงดันกกดตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa



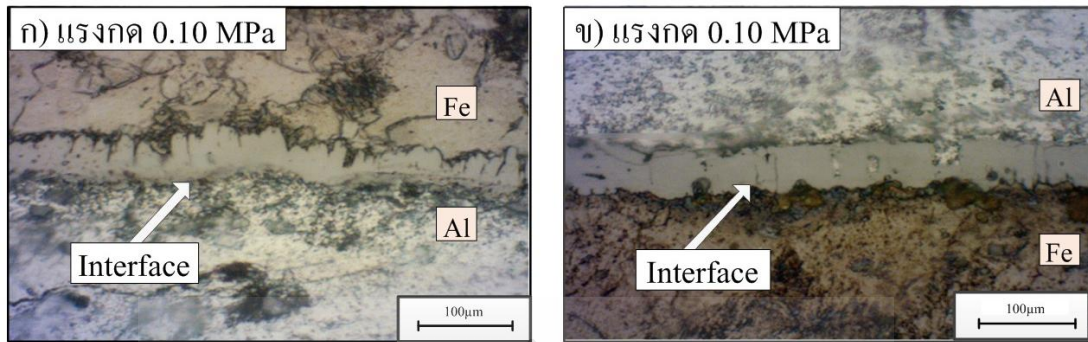
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาของแผ่นโลหะที่ใช้แรงดันกกดตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa

รูปที่ 4.47 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกดอเล็กโทรคบนผิวรอยต่อด้านบน (อลูมิเนียม) และผิวรอยต่อด้านล่าง (เหล็ก) ของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่เชื่อมที่แรงดันกดเชื่อมต่างๆ พบแรงในการกดเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความลึกของรอยกดอเล็กโทรคบนผิวรอยต่อเกย แบบที่ 2 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.46 พบว่าความลึกของรอยกดอเล็กโทรคบนผิวด้านบน (อลูมิเนียม) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อช่วงแรงดันกดตั้งแต่ 0.15-0.30 MPa ผลการตรวจสอบที่ได้นี้เป็นข้อยืนยันผลในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ได้ว่าการเชื่อมรอยต่อเกยของวัสดุต่างชนิด คือ อลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี หากกำหนดให้เหล็กไว้ด้านบนของรอยต่อเกย (รอยต่อเกยแบบที่ 2) นั้นมีค่าระดับคุณภาพต่ำกว่าระดับ C เนื่องจากความลึกของรอยกดเหล่านี้มีค่ามากกว่า 0.3 mm นอกจากนั้นเมื่อนำเอาความลึกของรอยกดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นโลหะแล้วสามารถแสดงผลการตรวจสอบได้ดังรูปที่ 4.47 อัตราส่วนของระยะรอยกดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อด้านบน (a/b) และด้านล่าง (c/d) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันกดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.15-0.30 MPa จะทำให้มีความลึกที่สูงขึ้นตามไปด้วย [25] และอาจทำให้มีความแข็งแรงเนื่องดิ่งต่ำกว่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงดันกดที่ 0.10 MPa ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ เพิ่มเติมต่อไปด้วย



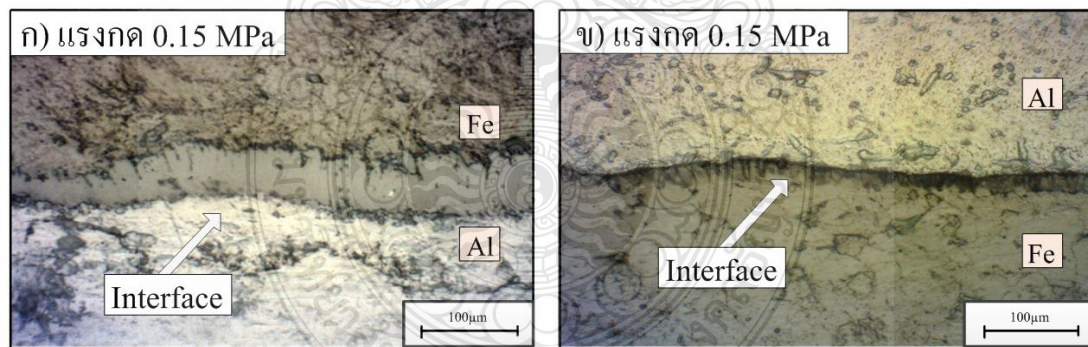
รูปที่ 4.48 โครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณ

รูปที่ 4.48 เป็นโครงสร้างมหภาคแสดงบริเวณจุดตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณกรอบสีแดง ของแรงดันกดเชื่อมต่างๆ ตั้งแต่ 0.10-0.30 MPa เพื่อเปรียบเทียบความสูงของแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างแผ่นเหล็กอยู่ด้านบนอลูมิเนียมและอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็กโดยใช้กำลังขยายที่ 1,000 เท่าเพื่อทำการตรวจสอบแนวเชื่อม



รูปที่ 4.49 โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันกด 0.10 MPa

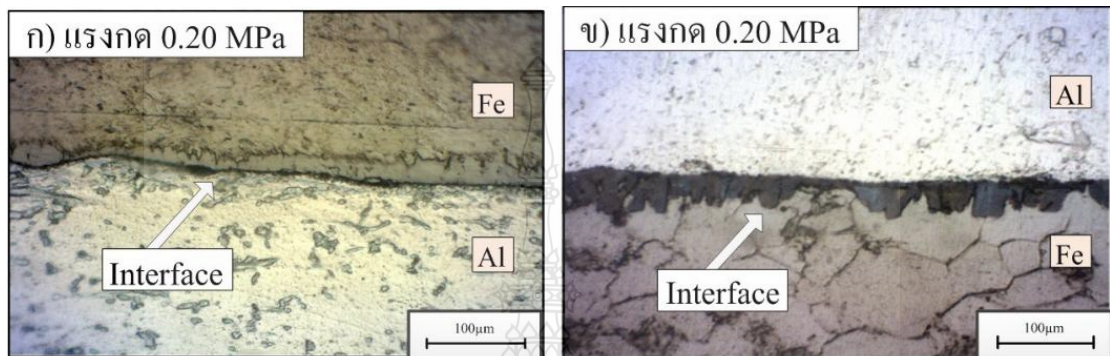
รูปที่ 4.59 พบว่ารอยเชื่อมการต่อแบบ ก. และ รอยเชื่อมการต่อแบบ ข. ด้วยแรงดันกดที่ 0.10 MPa เมื่อทำการเปรียบเทียบบริเวณแนวรอยเชื่อมอินเทอร์เฟซของ ดังรูปที่ 4.49 (ก) และ (ข) พบว่ามีความสูงของแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซที่ภาพ 4.49 (ก) มีความสูงการสลับฟันปลาที่ค่อนข้างสมดุลกันส่วนอาจส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่ดีโดยรูปที่ 4.49 (ข) พบว่าความสูงของแนวเชื่อมอินเทอร์เฟซไม่มีลักษณะของการสลับฟันปลาจึงอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งมีค่าที่ต่ำ [28] กว่ารูปที่ 4.49 (ก) เล็กน้อย



รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันกด 0.15 MPa

รูปที่ 4.50 พบรอยเชื่อมต่อแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.15 MPa ดังรูปที่ 4.50 (ก) นั้นจะมีความสูงของการสลับฟันปลาบริเวณแนวรอยเชื่อมอินเทอร์เฟซที่มากแต่ความสม่ำเสมอตลอดแนวค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.10 MPa ของการเชื่อมต่อแบบที่ 1 จึงอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเนื่อง

ดังนั้นน้อยกว่า ส่วนรอยเชื่อมแบบต่อเกยแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซ นั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าอย่างสิ้นเชิงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแนวรอยต่อเกยแบบที่ 2 ของ แรงดันกดที่ 0.10 MPa และส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกยแบบที่ 2 ที่เชื่อมด้วยแรงดันกดที่ 0.15 MPa อาจส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่น้อยลง [25,31]

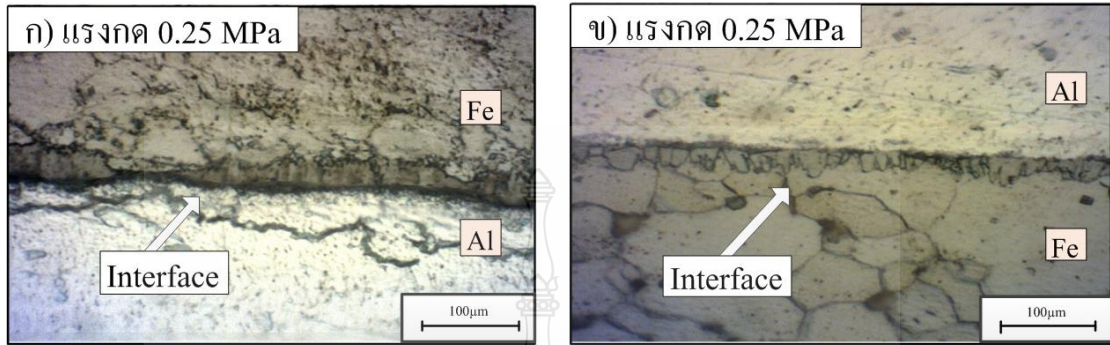


รูปที่ 4.51 โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันกด 0.20 MPa

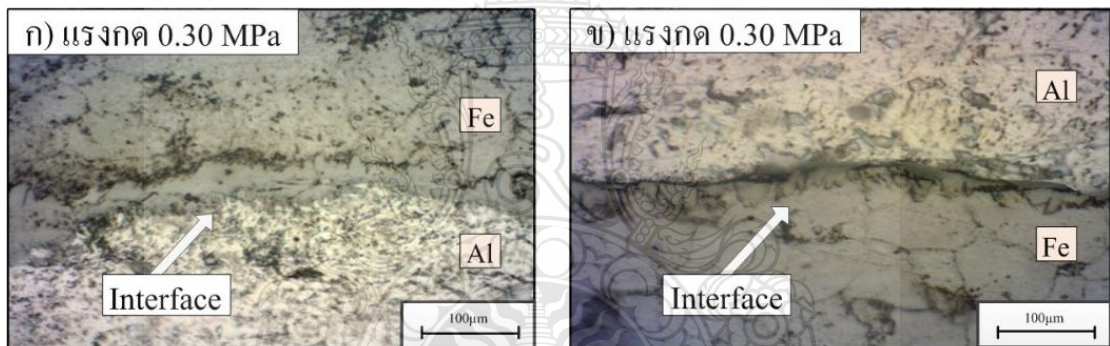
รูปที่ 4.51 พบรอยเชื่อมต่อเกยแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซ การเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.20 MPa ดังรูปที่ 4.61 (ก) นั้นจะมีความสูงของการสลับฟันปลาบริเวณแนว รอยเชื่อมอินเทอร์เฟซที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.15 MPa ของการเชื่อมต่อ เกยแบบ ก. จึงอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งนั้นน้อยกว่า ส่วนรอยเชื่อมแบบต่อเกยแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซนั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและมีการเรียงตัวสลับฟัน ปลาที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแนวรอยต่อเกยแบบ ข. ของแรงดันกดที่ 0.15 MPa และส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกยแบบ ข. ที่เชื่อมด้วยแรงดันกดที่ 0.20 MPa อาจส่งผลให้มี ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่น้อยลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยแรงดันกดที่ผ่านมา

รูปที่ 4.52 พบรอยเชื่อมต่อเกยแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณ อินเทอร์เฟซการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.25 MPa ดังรูปที่ 4.52 (ก) นั้นจะมีความสูงของการสลับฟันปลา บริเวณแนวรอยเชื่อมอินเทอร์เฟซที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.20 MPa ของ การเชื่อมต่อเกยแบบ ก. จึงอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งนั้นน้อยกว่า ส่วนรอยเชื่อมแบบต่อ เกยแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซนั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและมีการเรียงตัว สลับฟันปลาที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแนวรอยต่อเกยแบบ ข. ดังรูปที่ 4.52 (ข) ของแรงดันกดที่ 0.25 MPa และส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อเกยแบบ ข. ที่เชื่อมด้วยแรงดันกดที่

0.25 MPa อาจส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่น้อยลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยแรงดันกดที่ผ่าน  
มา



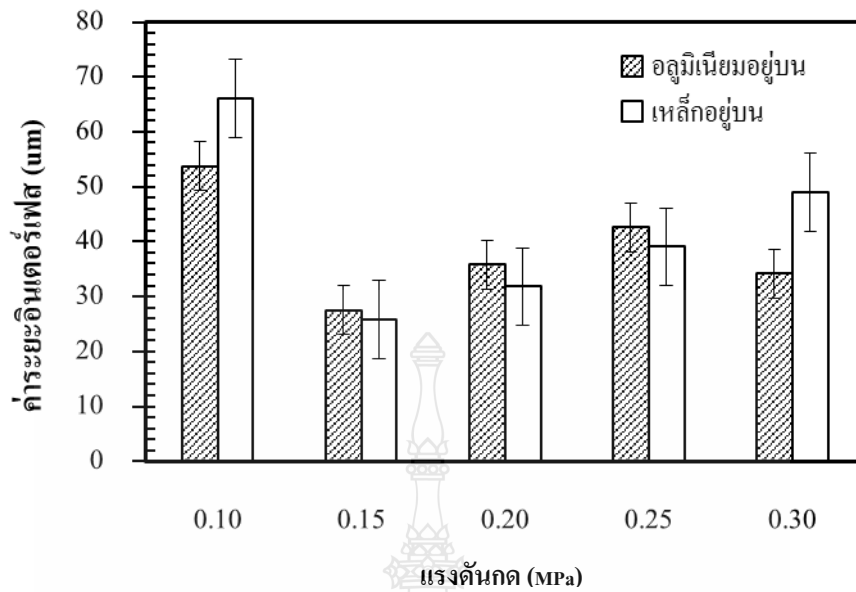
รูปที่ 4.52 โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันกด 0.25 MPa



รูปที่ 4.53 โครงสร้างจุลภาคที่แรงดันกด 0.30 MPa

รูปที่ 4.53 พบรอยเชื่อมต่อแบบ ก. จะมีค่าความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซการเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.30 MPa ดังรูปที่ 4.53 (ก) นั้นจะมีความสูงของการสลับพื้นปลาบริเวณแนวรอยเชื่อมอินเทอร์เฟซที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแรงดันกด 0.25 MPa ของการเชื่อมต่อแบบที่ 1 จึงอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่น้อยลงกว่า ส่วนรอยเชื่อมแบบต่อแบบ ข. ซึ่งความสูงของแนวรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซนั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าและมีการเรียงตัวสลับพื้นปลาที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแนวรอยต่อแบบ ข. ของแรงดันกดที่ 0.25 MPa และส่งผลทำให้รอยเชื่อมต่อแบบ ข. ที่เชื่อมด้วยแรงดันกดที่ 0.25 MPa อาจส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งที่น้อยลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยแรงดันกดที่ผ่านมา [24,27,28]



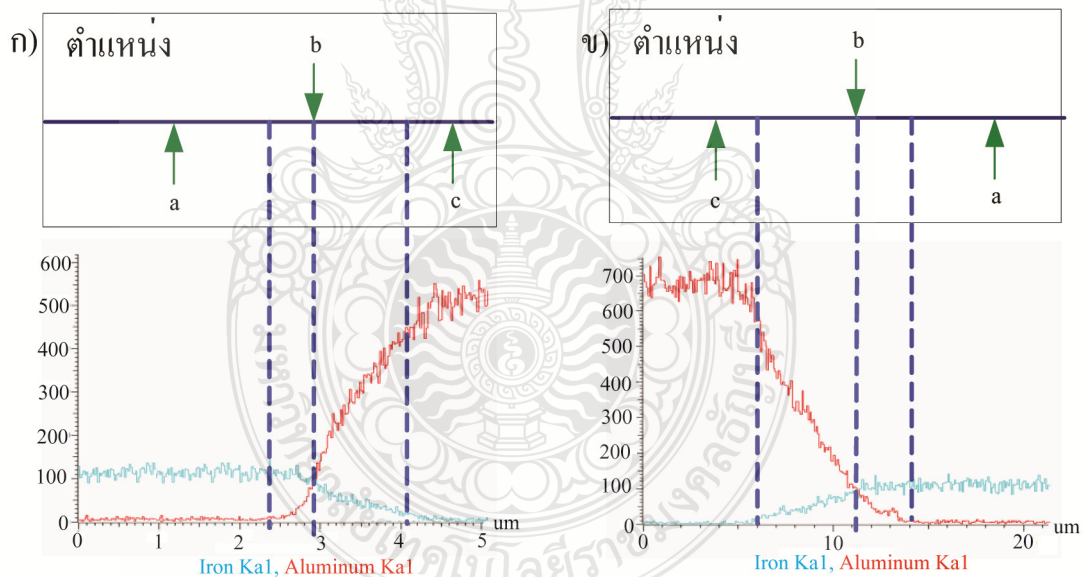


รูปที่ 4.54 ความสูงแนวเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟสของแรงดันกวดตั้งแต่ 0.10 – 0.30 MPa ของรอยต่อแบบที่ 1 และรอยต่อแบบที่ 2

รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบค่าระยะห่างบริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านบนของเวลาในการกวดแช่ โดยมีกระแสในการเชื่อมที่ 95 kA แรงดันกวด 0.1 MPa พบว่าเวลาการกวดแช่ 0.1 Cycles แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนมีระยะบริเวณอินเทอร์เฟสสูงกว่าแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน โดยที่เวลาการกวดแช่ 0.15 Cycles แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านบนมีระยะห่างบริเวณอินเทอร์เฟสลดลงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง เวลาการกวดแช่ที่ 0.25 Cycles และเวลาการกวดแช่ 0.3 Cycles ระยะห่างบริเวณอินเทอร์เฟสแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนมีค่าต่ำกว่าแผ่นเหล็กอยู่ด้านบน ซึ่งส่งผลต่อความความต้านทานแรงเฉือนดึงที่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละสภาวะการทดสอบ [23,28]

#### 4.5 วิเคราะห์ลักษณะของรอยเชื่อมด้วยเทคนิค Electron Probe Microanalysis (EPMA)

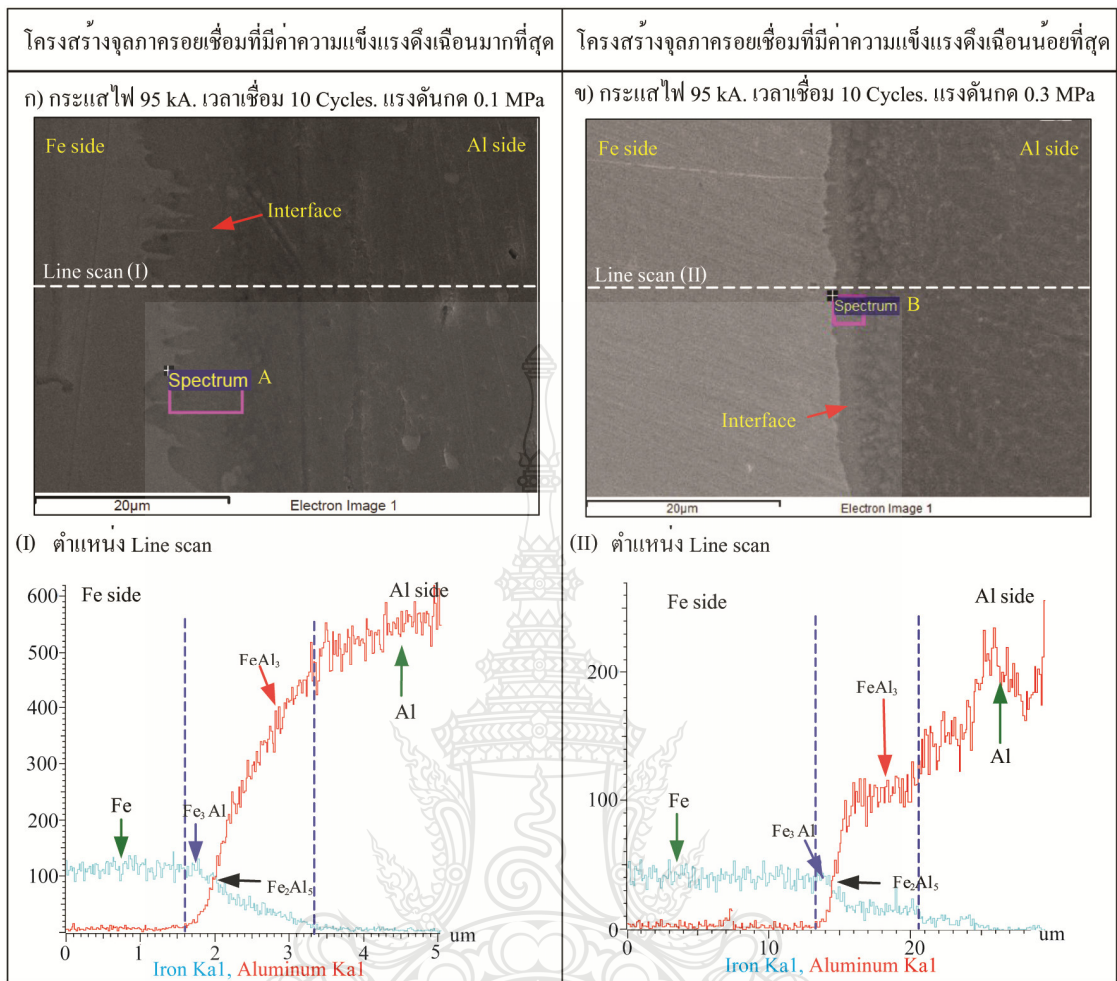
การศึกษานี้มีผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อระหว่างเหล็ก SGACD และอลูมิเนียม AA1100 โดยทำการศึกษาดัชนีที่ส่งผลต่อวัสดุทดสอบทั้งสองชนิดได้แก่ กระแสเชื่อมระหว่าง 85-105 kA เวลาที่ใช้ในการเชื่อมระหว่าง 1-20 Cycles และแรงดันกดของหัวอิเล็กโทรด 0.1-0.3 MPa ซึ่งทำการศึกษากระแสไฟ เวลาที่ใช้ในการเชื่อม และแรงดันกดของหัวอิเล็กโทรดนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดของแต่ละตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมพบว่ารอยเชื่อมระหว่างเหล็ก SGACD และอลูมิเนียม AA1100 เชื่อมแบบต้านทานแบบจุดที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเนื่องดึงมากที่สุดโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง เมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa ส่วนรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเนื่องดึงน้อยที่สุดเมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.3 MPa ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรเชื่อมต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องดึงมีค่าที่แตกต่างกันจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม



รูปที่ 4.55 ตำแหน่งการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-Line scan

ก) แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

ข) แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง



รูปที่ 4.56 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-Line scan ของรอยเชื่อมกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายในของรอยเชื่อมและรูปแบบการพังทลายของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโดยใช้เทคนิค Electron Probe Microanalysis (EPMA), EDS-Line Scan, EPMA-Mapping ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของธาตุที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบของรอยเชื่อมที่ทำการทดสอบแบบทำลายและแบบไม่ทำลาย โดยแสดงตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหรือปริมาณธาตุของรอยเชื่อมในตำแหน่งต่างๆตามภาพตัดขวางของชิ้นงานทดสอบ สามารถแสดงตำแหน่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS-Line Scan บริเวณอินเทอร์เฟซได้ดังรูปที่ 4.55 โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและ

อลูมิเนียมอยู่ด้านล่างและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูง

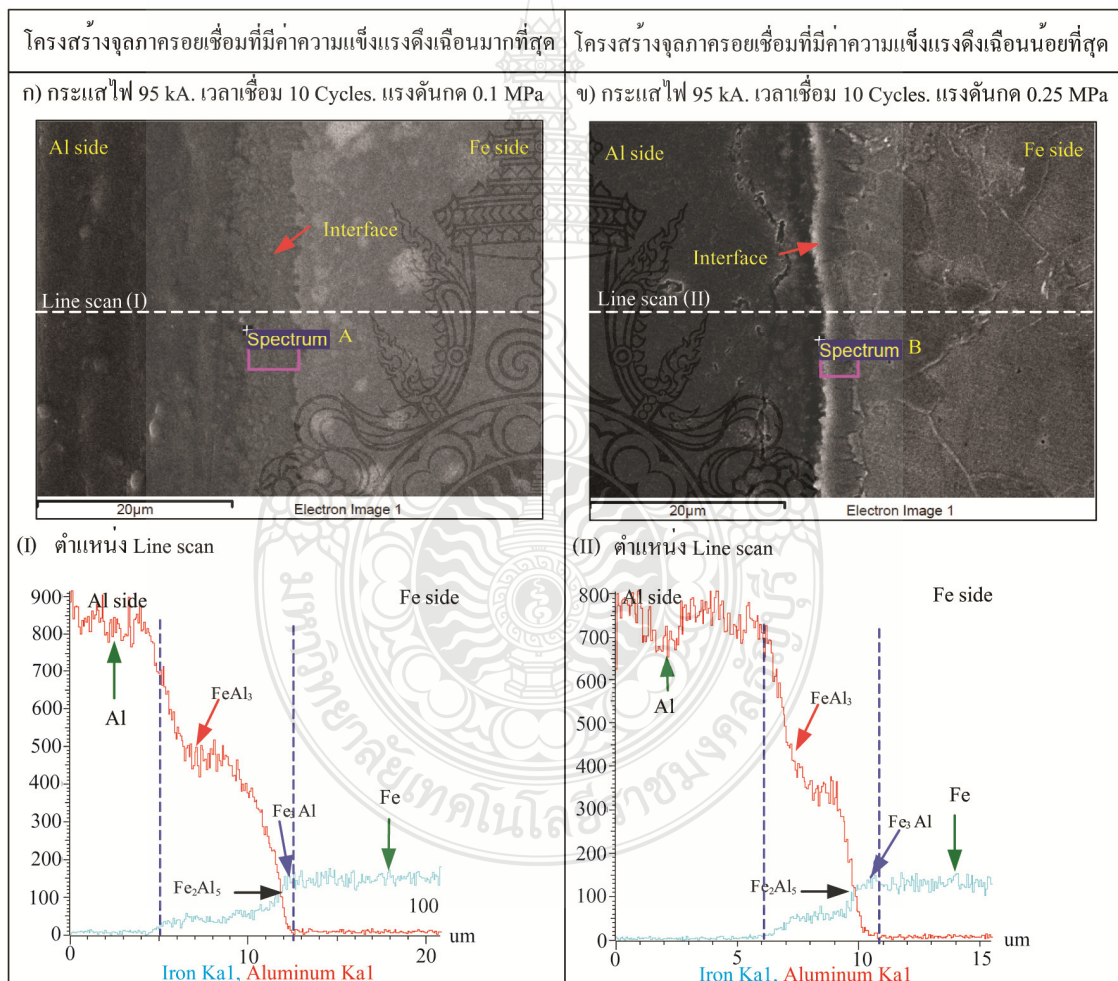
ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 MPa				กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.3 MPa			
ตำแหน่ง	Fe	Al	IMC	ตำแหน่ง	Fe	Al	IMC
a	100	-	-	a	100	-	-
b	42.62	57.38	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	b	38.65	61.35	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>
c	-	100	-	c	-	100	-

มากที่สุดและน้อยที่สุดดังรูปที่ 4.56 แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมด้วยเทคนิค EDS-Line Scan เมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa ดังรูปที่ 4.56 ก) โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กวางอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่างซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงมากที่สุดและรูปที่ 4.56 ข) เป็นรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงน้อยที่สุดแสดงตำแหน่ง Line Scan (I) และ (II) ตามลำดับ โดยแสดงลักษณะของปริมาณธาตุตั้งเส้นกราฟจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน (Electron Dispersive Spectrometry: EDS) ดังรูปที่ 4.56 ตำแหน่ง (I) และ (II) พบลักษณะของเส้นกราฟที่เกิดการรวมตัวของ Fe และ Al ในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวเริ่มเกิดสารประกอบกึ่งโลหะ Fe<sub>3</sub>Al และ FeAl<sub>3</sub> ในปริมาณมากน้อยแตกต่างกันจากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณอินเทอร์เฟซ ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5 พบธาตุเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> ในตำแหน่ง b [32] ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการตัดกันของเส้นกราฟที่แสดงปริมาณธาตุ แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวมีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงที่มากและน้อยแตกต่างกันตามสภาวะตัวแปรทดสอบ

วิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนด้วยเทคนิค EDS – Line scan ของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงมากที่สุดและน้อยที่สุด โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่างพบว่ามีค่าลักษณะอินเทอร์เฟซนี้ไม่แตกต่างไปจากรอยเชื่อมที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่บนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่างแสดงรูปที่ 4.57 พบว่าอินเทอร์เฟซรอยเชื่อมนี้มีค่าความ

ด้านทานแรงเฉือนดึงมากมีขนาดที่ใหญ่กว่าอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงน้อยที่สุด ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากอิทธิพลของตัวแปรเชื่อมที่ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะทดสอบเกิดขึ้นในสภาวะที่แตกต่างกัน [32, 33] จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.6 และลักษณะของกราฟปริมาณธาตุ ดัง รูปที่ 4.57 ก) และ ข) ในตำแหน่ง (I) และ (II) ตามลำดับ พบว่าบริเวณที่วิเคราะห์แบบ Line scan พบปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) ในปริมาณที่มากและน้อยแตกต่างกันในตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งในบริเวณที่เริ่มเกิดการรวมตัวระหว่างเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) จะพบสารประกอบกึ่งโลหะ  $Fe_3Al$  และ  $FeAl_3$



รูปที่ 4.57 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-Line scan ของรอยเชื่อม กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง

ตารางที่ 4.6 ปริมาณธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง

กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 MPa				กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.25 MPa			
ตำแหน่ง	Fe	Al	IMC	ตำแหน่ง	Fe	Al	IMC
a	100	-	-	a	100	-	-
b	43.06	56.97	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	b	39.13	60.87	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>
c	-	100	-	c	-	100	-

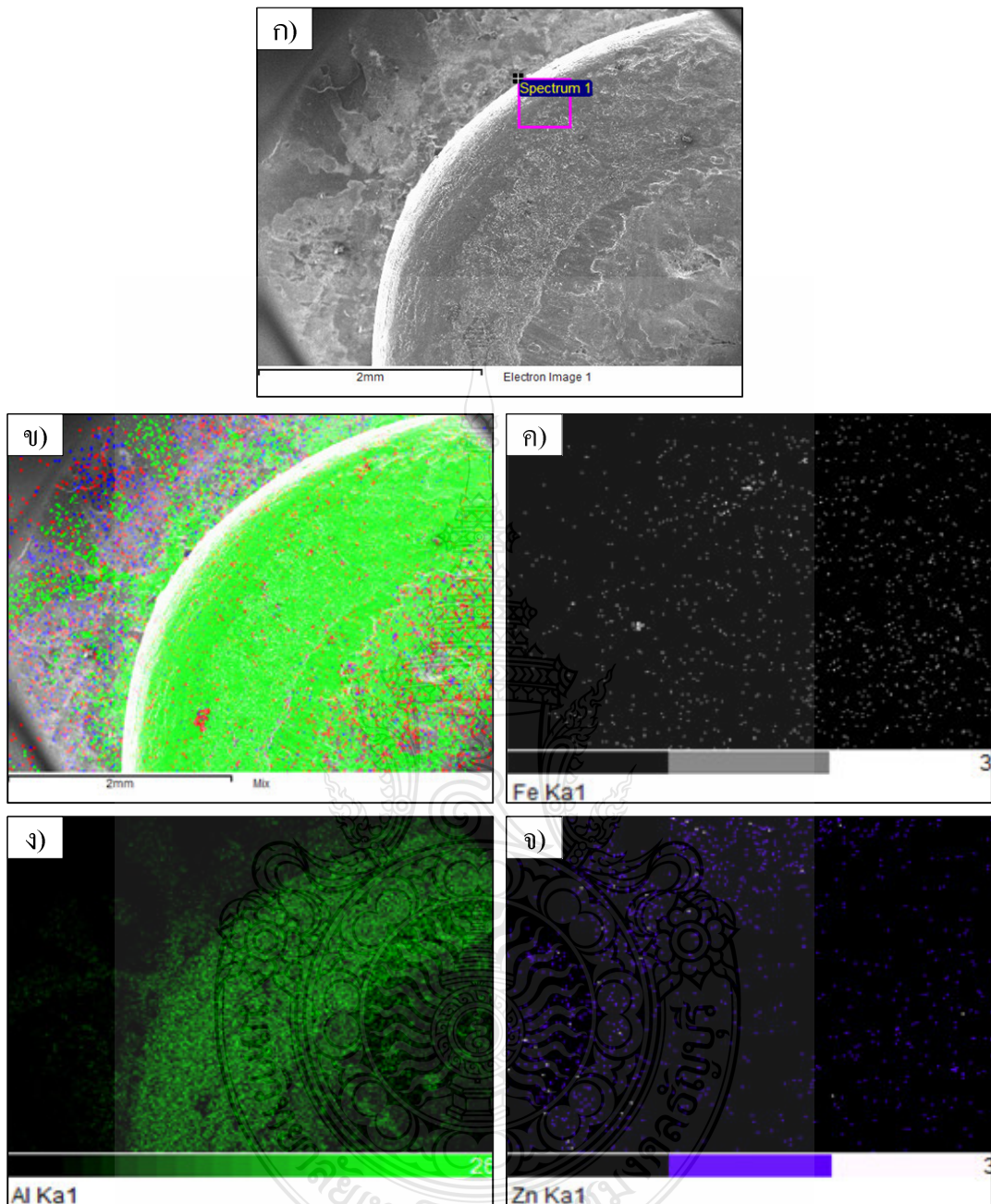
ส่วนปริมาณที่เกิดการตัดเนื้อของเส้นกราฟแสดงปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จะเกิดสารประกอบกึ่งโลหะ Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> ที่ได้จากการวิเคราะห์เฉพาะบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมทั้งสองในตำแหน่ง A และ B บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงเนื่องดึงมากที่สุด [32] เมื่อเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa พบธาตุเหล็ก (Fe) ในปริมาณที่มากกว่ารอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงเนื่องดึงน้อยที่สุด คือเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.25 MPa ปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) ที่เกิดการแทรกซึมและเกิดการรวมกันระหว่างโลหะทั้งสองชนิดในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน หรือแตกต่างกันมากย่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องดึงที่เกิดขึ้นของรอยเชื่อม [32, 33] แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม ได้ดังตารางที่ 4.7 พบว่าบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงเนื่องดึงมากที่สุด (กระแสไฟ 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa) โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่างมีธาตุเหล็ก (Fe) ปริมาณน้อยกว่าธาตุอลูมิเนียม (Al) ในสัดส่วน 42.62 : 57.38 (Weight %) และ 38.65 : 61.35 (Weight %) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด (กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.3 MPa) ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ที่น้อยกว่าปริมาณธาตุบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณธาตุบริเวณพังกาวยรอยเชื่อมหลังการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเนื่องดึงด้วยการวิเคราะห์เทคนิค EPMA – Mapping สามารถพบการกระจายตัวของปริมาณธาตุต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั่วบริเวณการตรวจสอบ แสดงดังรูปที่ 4.58-4.61 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมบริเวณอินเทอร์เฟซ (ตำแหน่ง A และ B)

ตัวแปรเชื่อม	ธาตุ	ปริมาณธาตุ (%)	
		รอยเชื่อมแผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง	รอยเชื่อมแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และเหล็กอยู่ด้านล่าง
กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันกด 0.1 MPa	Fe	42.62	43.06
	Al	57.38	56.97
กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันกด 0.3 MPa	Fe	38.65	39.13
	Al	61.35	60.87

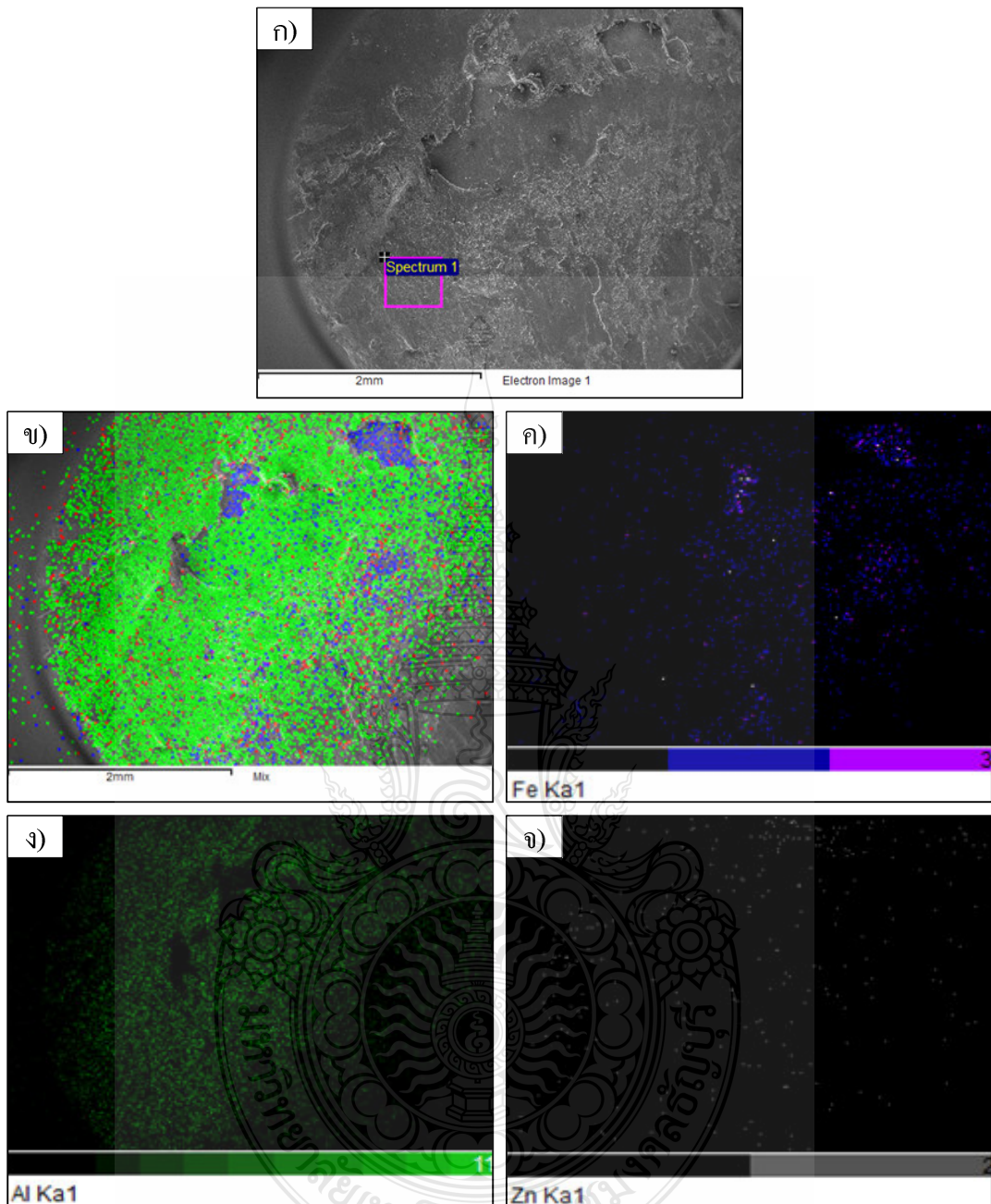
ตารางที่ 4.8 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมบริเวณรอยฟังกหลายวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA-Mapping

ตัวแปรเชื่อม	ธาตุ	ปริมาณธาตุ (%)	
		รอยเชื่อมแผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง	รอยเชื่อมแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และเหล็กอยู่ด้านล่าง
กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันกด 0.1 MPa	Fe	1.83	3.87
	Al	93.10	92.53
	Zn	5.06	3.60
กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันกด 0.3 MPa	Fe	11.10	
	Al	83.96	
	Zn	4.94	
กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันกด 0.25 MPa	Fe		11.37
	Al		83.16
	Zn		5.47



รูปที่ 4.58 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles แรงดันกด 0.1 MPa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังกหลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn





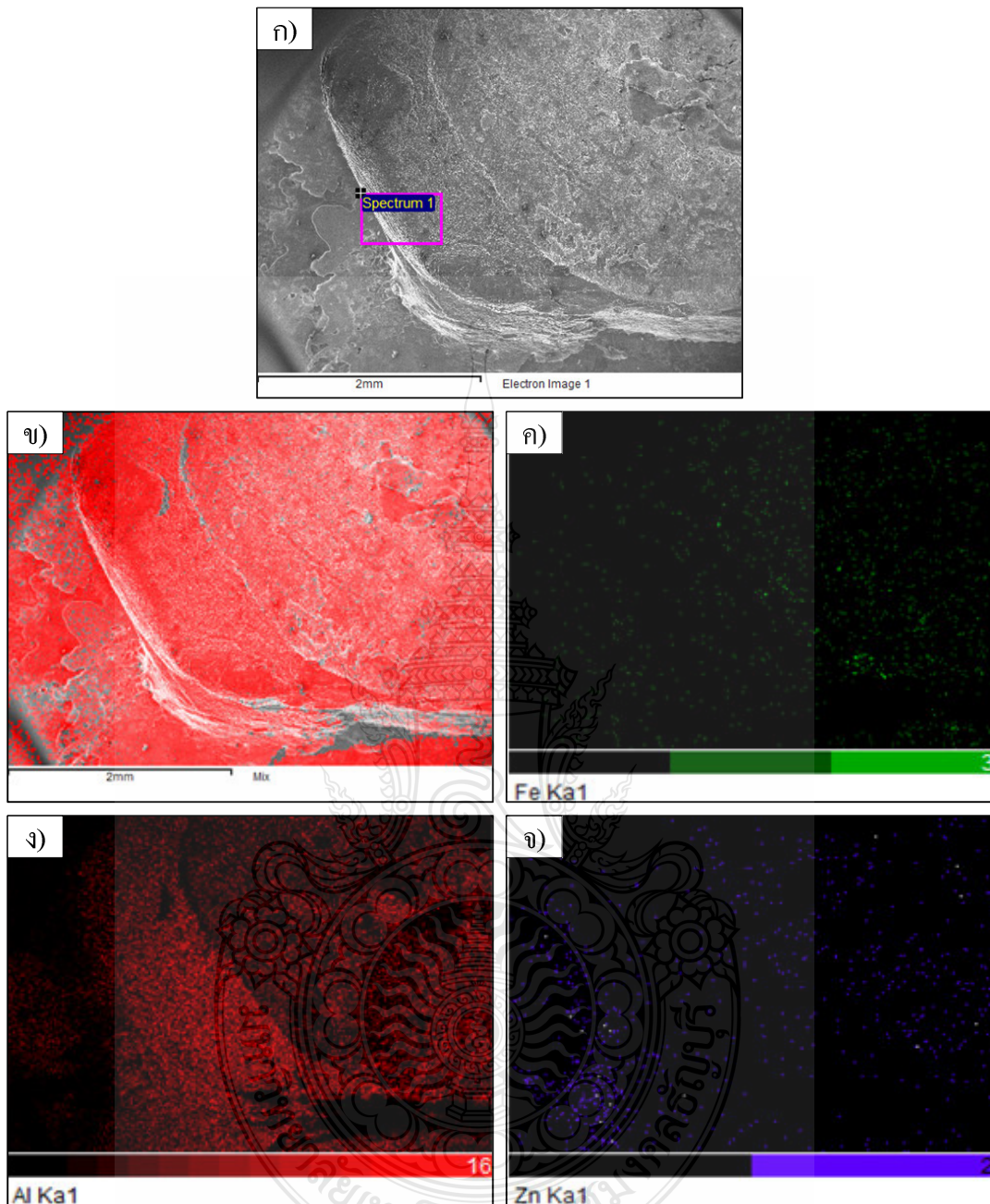
รูปที่ 4.59 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA เวลาเชื่อม 10Cycles แรงดันกด 0.3 MPa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังกหลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn

การวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนแบบ Line Scan (EDS - Line Scan ) จะพบธาตุในปริมาณที่แตกต่างกัน ของธาตุแต่ละชนิด ณ ตำแหน่งเดียวกัน บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมทำ

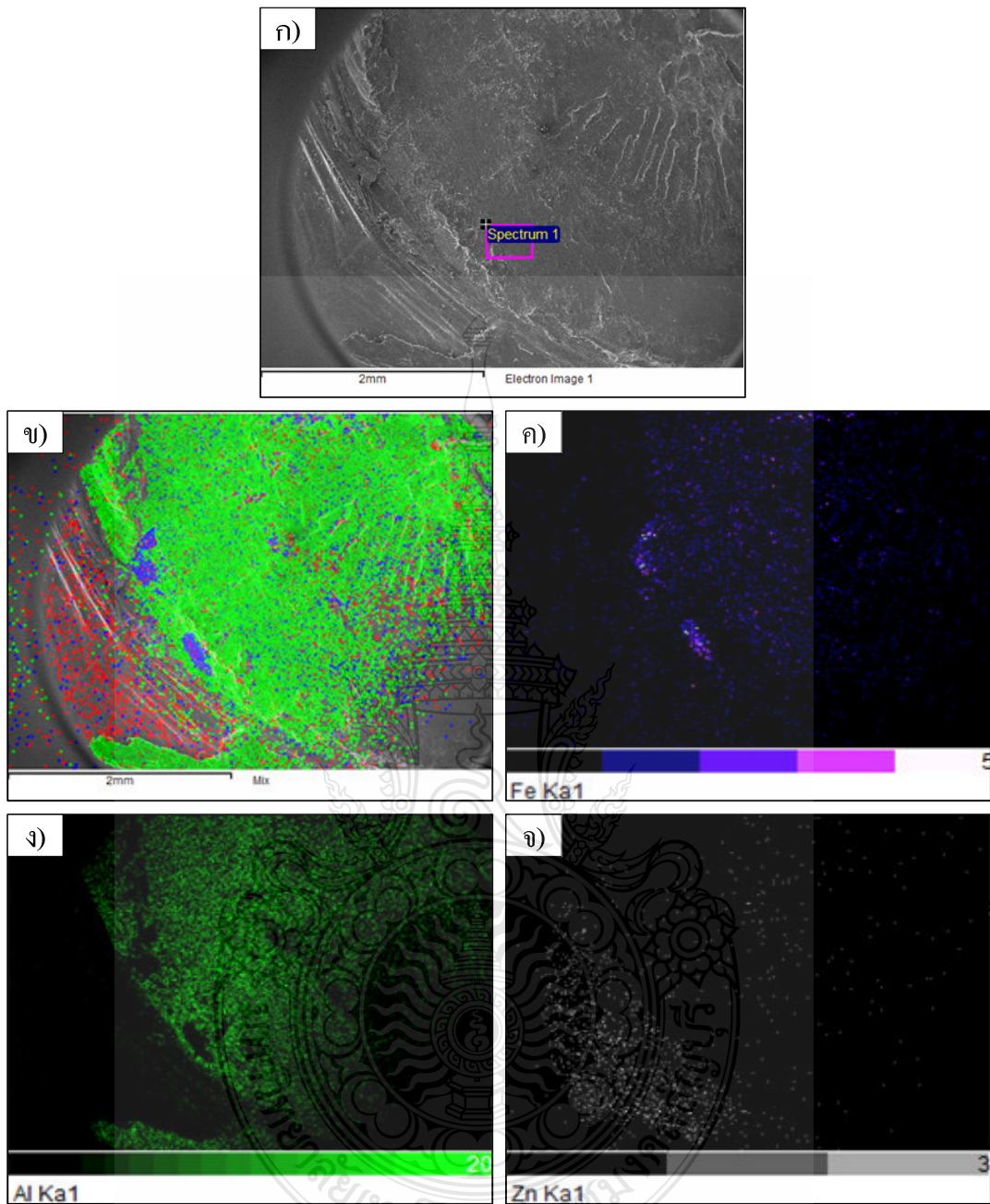
ให้ทราบถึงการรวมตัวกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง เป็นสิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากนั้นจึงทำการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุหลังทำการทดสอบแรงดึงซึ่งเป็นการทดสอบแบบทำลาย โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุจากการกระจายตัวของอิเล็กตรอนด้วยเทคนิค EPMA – Mapping บริเวณรอยพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงเหนียดมากที่สุด โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง และแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่างและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน เมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa และรอยพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงเหนียดน้อยที่สุดเมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.3 MPa แสดงการกระจายตัวของปริมาณธาตุได้ดัง ตารางที่ 4.8

รูปที่ 4.58 ก) แสดงบริเวณการวิเคราะห์ EPMA – Mapping ของรอยพังทลายด้านแผ่นเหล็กพบธาตุเหล็ก (Fe), อลูมิเนียม (Al) และสังกะสี (Zn) ดังรูปที่ 4.58 ข) เป็นลักษณะการกระจายตัวของธาตุรวมที่เกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกัน กล่าวคือ พบธาตุอลูมิเนียม (Al) เป็นจำนวนมากเกาะที่ผิวรอยเชื่อมของแผ่นเหล็ก สังกะสีได้จากการกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียมที่ซ้อนทับธาตุเหล็ก (Fe) แสดงดังรูปที่ 4.58 ค) และ ง) ตามลำดับ และพบธาตุสังกะสีกระจายตัวในปริมาณที่น้อยมากทั่วผิวบริเวณการตรวจสอบดังรูปที่ 4.58 จ) แสดงให้เห็นว่าเกิดการฉีกขาดหรือการพังทลายบริเวณด้านแผ่นอลูมิเนียมในปริมาณที่มากกว่าแผ่นเหล็ก หรือไม่เกิดการฉีกขาดบริเวณด้านแผ่นเหล็กเลยทำให้อลูมิเนียมหลุดและเกาะติดที่บริเวณรอยเชื่อมด้านแผ่นเหล็ก [34, 35] ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้รอยเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุดแสดงดังรูปที่ 4.59 พบธาตุอลูมิเนียมในบริเวณที่น้อยกว่าแต่มีธาตุเหล็ก (Fe) ในปริมาณที่มากกว่าสังกะสีได้จากการกระจายตัวของปริมาณธาตุได้ดังรูปที่ 4.59 ข) และ ค) นั้นแสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมหลังการทดสอบการพังทลายมีค่าความต้านทานแรงเหนียดลดต่ำลงเช่นเดียวกันและพบปริมาณธาตุสังกะสี (Zn) กระจายอยู่ทั่วทั้งภายในและภายนอกของรอยพังทลายดังรูปที่ 4.59 จ) ซึ่งมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันของรอบเชื่อมทั้งสองชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ 4.60 และรูปที่ 4.61 แสดงลักษณะการกระจายตัวของปริมาณธาตุบริเวณรอยพังทลายของรอยเชื่อม โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงเหนียดมากที่สุด เมื่อทำการเชื่อมกระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa และค่าความแข็งแรงเหนียดน้อยที่สุดเมื่อเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.25 MPa ตามลำดับ แสดงปริมาณธาตุได้ดังตารางที่ 4.8 และลักษณะการกระจายตัว

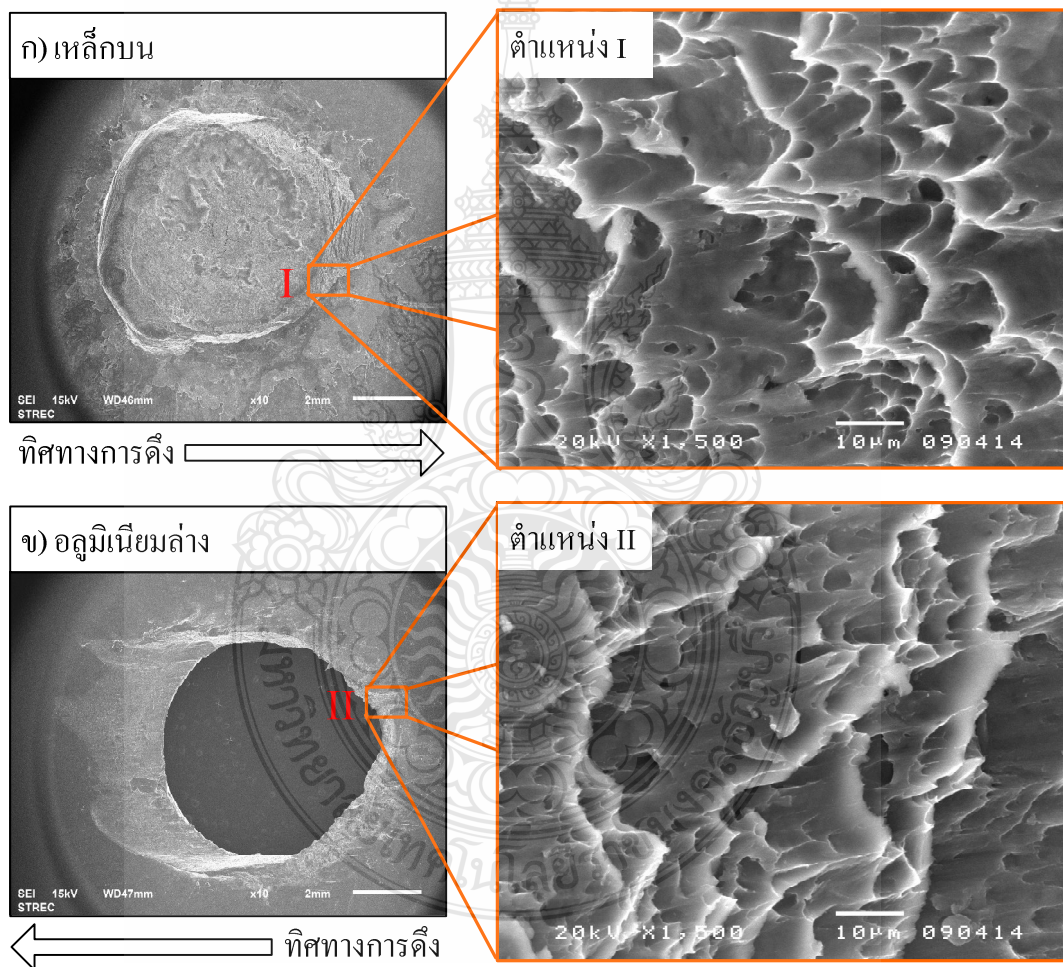


รูปที่ 4.60 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 MPa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังกหลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn



รูปที่ 4.61 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.25 MPa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง ก) รอยพังกหลาย ข) Mix ค) Fe ง) Al และ จ) Zn

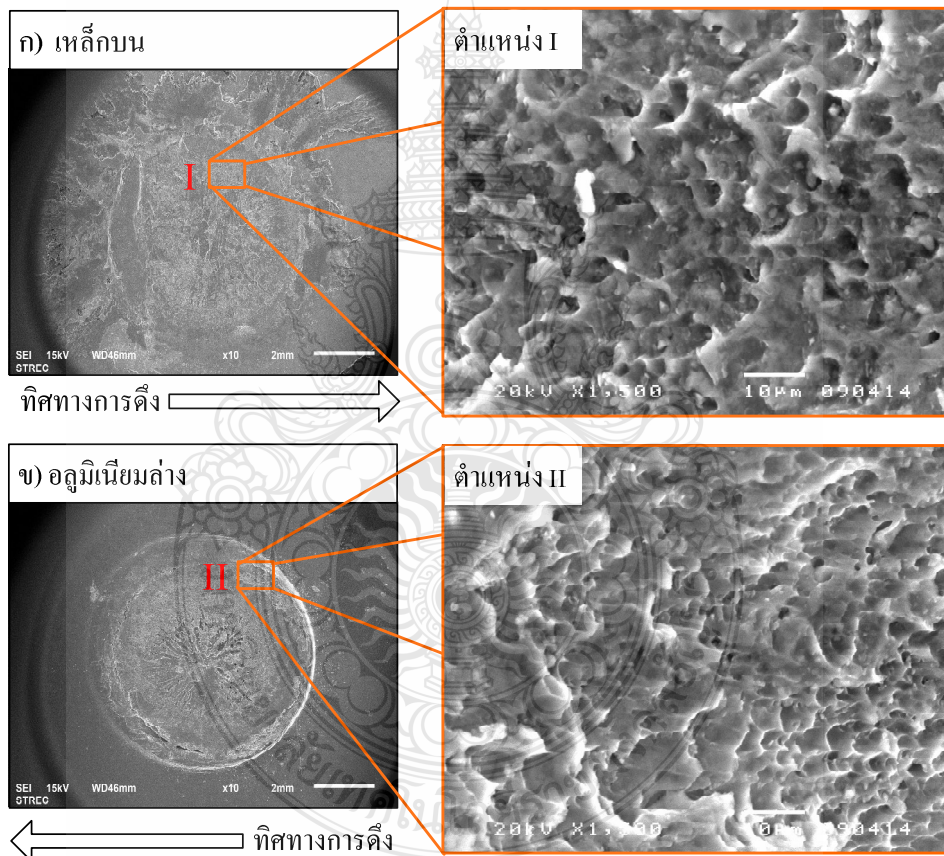
ของธาตุตั้งรูปที่ 4.60 ก) - จ) ตามลำดับ พบธาตุอลูมิเนียม (Al) ในปริมาณที่มากสังเกตได้จากปริมาณการกระจายตัวและความหนาแน่นของธาตุตั้งรูปที่ 4.60 ข) และ จ) แสดงถึงปริมาณธาตุรวมและปริมาณธาตุเดี่ยวของอลูมิเนียม (Al) และมีธาตุเหล็ก (Fe) กับสังกะสี (Zn) กระจายตัวอยู่ในปริมาณที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการกระจายตัวของธาตุบริเวณรอยฟังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมน้อย แสดงตั้งรูปที่ 4.61 พบว่าธาตุเหล็ก (Fe) เพิ่มขึ้นและอลูมิเนียม (Al) ลดน้อยลงเกิดเนื่องจากการยึดติดของอลูมิเนียมที่เกิดขึ้น หลังการทดสอบแรงเฉือนดึงบริเวณรอยฟังทลายมีบริเวณที่น้อยและเกิดการฉีกขาดบริเวณผิวหน้าของเหล็กจึงทำให้ตรวจพบเหล็ก (Fe) สูงขึ้น [32, 33] แต่ธาตุ



รูปที่ 4.62 ภาพถ่าย SEM การฟังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงมากที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 MPa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

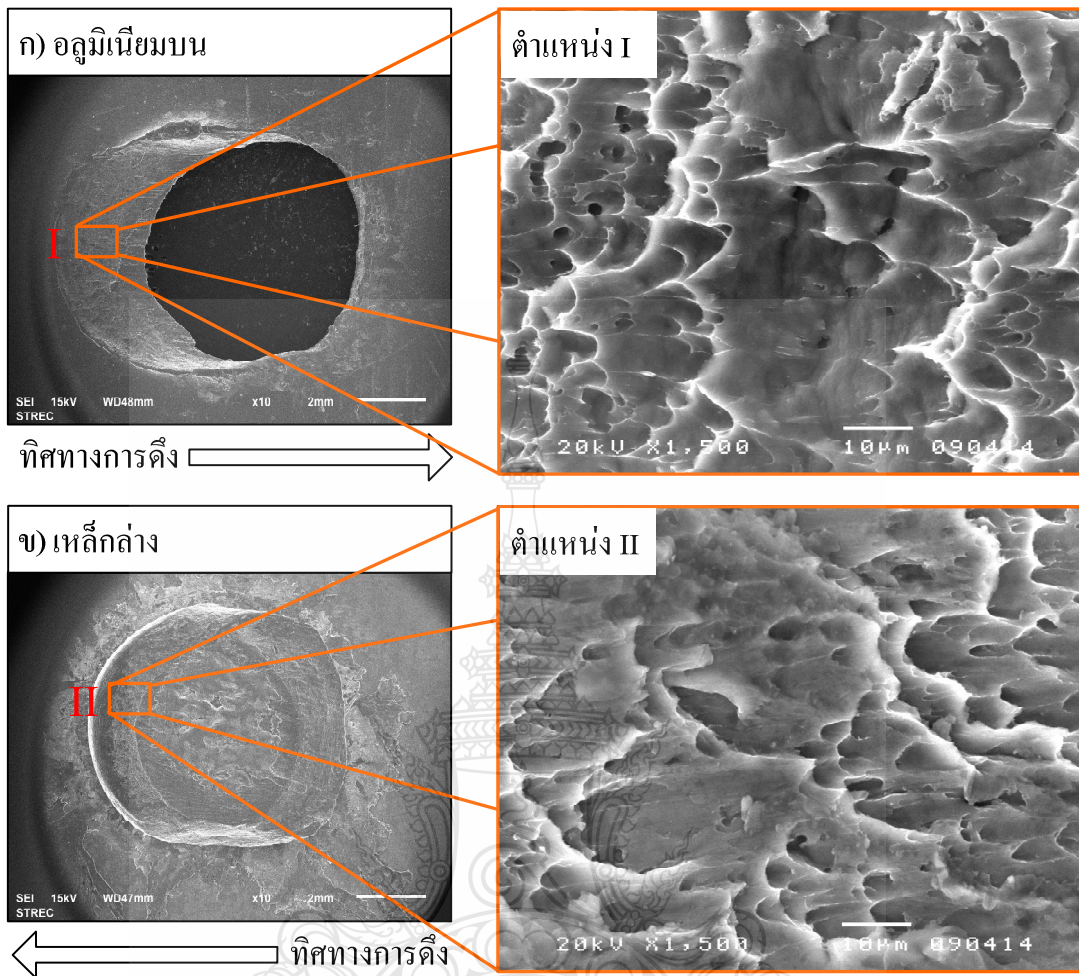
สังกะสี (Zn) มีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณที่ทำกรวิเคราะห์แสดงลักษณะการกระจายตัวของปริมาณธาตุแต่ละชนิดและตำแหน่งการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.61 ก) - จ) ตามลำดับ

รอยเชื่อมต่อเกยที่ผ่านกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบจุด (RSW) ระหว่างเหล็ก SGACD และอลูมิเนียม AA1100 โดยทำการเชื่อมในสภาวะที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนถึงลักษณะของอินเทอร์เฟส ความลึกของรอยกดของอิเล็กโทรดบนผิวรอยเชื่อม และส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมมีลักษณะเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แตกต่างกัน ส่วนลักษณะมีการพังทลายของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นนั้น สามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยภาพถ่ายกำลังขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์



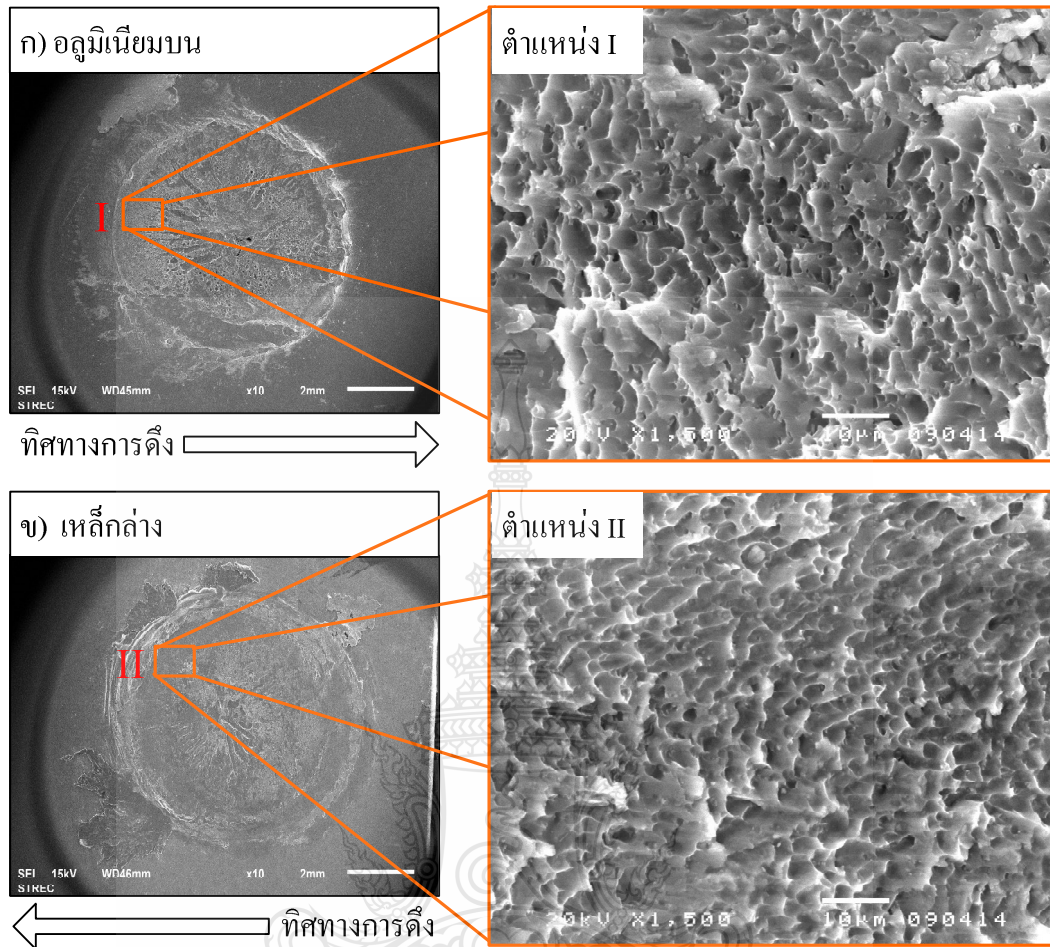
รูปที่ 4.63 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนถึงมากที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.3 MPa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของรอยพังทลายของรอยเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมที่กระแสไฟ 95 kA เวลาเชื่อม 10 Cycles และแรงดันกด 0.1 MPa กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่างแสดงดังรูปที่ 4.62 ก) และ ข) ตามลำดับ ในตำแหน่ง I และ II บนผิวรอยเชื่อม พบว่ารอยฉีกขาดทั้งสองตำแหน่งเป็นลักษณะการฉีกขาดหรือการพังทลายของอลูมิเนียมที่หลุดติดด้านแผ่นเหล็ก และมีทิศทางการฉีกขาดตามแนวตั้งของการทดสอบแรงเฉือนตั้ง กล่าวคือลักษณะการฉีกขาดหรือรอยพังทลายโดยรวมมีลักษณะเป็นชั้นราบขนาดใหญ่เล็กและตั้งสลับกัน เกิดการยึดตัวของรอยฉีกขาดทั้งสองตำแหน่งทางด้านแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม นั้นแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการพังทลายของรอยเชื่อมที่ค่าความต้านทานแรงเฉือนตั้งมากที่สุดมีลักษณะแตกหักหรือพังทลายแบบเหนียว [36] ซึ่งมีความแตกต่างจากรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนตั้งน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.63 ในตำแหน่งที่ I และ II พบว่าลักษณะการฉีกขาดเกิดขึ้นที่ผิวหน้ารอยเชื่อม หรือเกิดการพังทลายผ่านบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม ซึ่งจะเกิดการฉีกขาดบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงเฉือนตั้งต่ำ [37] และเกิดการฉีกขาดของอลูมิเนียมที่หลุดร่อนพังทลายพบว่ามีลักษณะการตรวจสอบมีลักษณะที่เหมือนกัน คือเป็นหลุมตื้นๆ ขนาดเล็ก ซึ่งมีทิศทางการยึดตัวของเนื้อวัสดุเล็กน้อย หรือไม่เกิดการยึดตัวของรอยฉีกขาดของเนื้อวัสดุหรือบางบริเวณเกิดการฉีกขาดในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอตามแนวเชื่อมของรอยพังทลายนั้น แสดงว่าการพังทลายหลังทดสอบแรงเฉือนตั้งของรอยเชื่อมมีลักษณะการแตกหักของเนื้อวัสดุแบบเปราะ ซึ่งเป็นผลทำให้รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงเฉือนตั้งลดลง [38] เมื่อเทียบกับลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนตั้งมาก



รูปที่ 4.64 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงที่สุด เมื่อกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.1 MPa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง





รูปที่ 4.65 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงที่สุด เมื่อ กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงดันกด 0.25 MPa กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง

รูปที่ 4.64 และ 4.65 แสดงลักษณะรอยร้าวของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดและน้อยที่สุดเมื่อกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่างพบว่าลักษณะการพังทลายของรอยเชื่อมหรือรอยร้าวของเนื้อวัสดุมีความแตกต่างกันระหว่างรอยพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าแรงเฉือนสูงและน้อย จากการสังเกตด้วยภาพถ่ายกำลังขยายสูงในตำแหน่งที่ I และ II ของรอยพังทลายบริเวณด้านแผ่นอลูมิเนียมและด้านแผ่นเหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.64 พบว่ามีลักษณะการแตกหักของเนื้อวัสดุที่คล้ายกับรอยพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านแรงดึงสูงเมื่อกำหนดให้แผ่นเหล็กด้านบน ดังรูปที่ 4.62 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น กล่าวถึงรอยร้าวหรือรอบพังทลายเกิดขึ้นที่บริเวณแผ่นอลูมิเนียมและมีลักษณะเป็นชั้นผิวราบขนาดใหญ่ และมีทิศทางการฉีก

ขาดไปตามแนวตั้ง [39] ส่วนลักษณะรอยพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุดเมื่อพังทลายเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 95 kA เวลาเชื่อม 10 cycles และแรงคั่นกด 0.25 MPa มีลักษณะการพังทลาย แสดงดังรูปที่ 4.65 พบการฉีกขาดเกิดขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม ในตำแหน่ง I และ II ซึ่งมีลักษณะฉีกขาดโดยรวมของอลูมิเนียมด้านแผ่นอลูมิเนียมและด้านแผ่นเหล็ก มีลักษณะเป็นผิวโค้งมนขนาดเล็กที่มีบริเวณขอบของวัสดุที่เกิดการพังทลายและมีการยึดตัวเล็กน้อยตามทิศทางการดึง [40] ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับรอยพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุดของชิ้นงานทดสอบโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาค้นคว้าที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้านทานแบบจุดของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD โดยทำการทดสอบตามข้อกำหนดและเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟที่ 85 90 95 100 และ 105 kA เวลาในการกดแช่ที่ 1 5 10 15 และ 20 Cycles และแรงดันกดที่ 0.1 0.15 0.20 0.25 และ 0.25 MPa เพื่อศึกษาค้นคว้าการเชื่อมด้วยการด้านทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกยที่ทำให้มีค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงสูงสุดพร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม และ โครงสร้างทางโลหะวิทยาได้ผลการศึกษาและวิเคราะห์ที่ได้ออกมาแล้วในบทที่ 4 ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 การเชื่อมด้วยด้านทานแบบจุดบนรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA 1100 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD โดยการเชื่อมที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดการเชื่อมต่อเกยของการวางแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีอยู่ด้านบนแผ่นอลูมิเนียมที่กระแสเชื่อม 95 kA เวลาในการกดแช่ที่ 10 Cycles และ แรงดันกดที่ 0.10 MPa คือ 2164.47 N

5.1.2 ลักษณะรอยพังทลายของรอยเชื่อมหลังทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงระหว่างอลูมิเนียม AA 1100 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD เกิดการฉีกขาดที่บริเวณด้านแผ่นอลูมิเนียม และมีลักษณะการยึดตัวของเนื้อวัสดุตามแนวการดึงเป็นปริมาณมาก บ่งบอกได้ว่าการพังทลายมีลักษณะเป็นแบบเหนียวซึ่งส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงมีค่าสูง

5.1.3 บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมพบสารประกอบกึ่งโลหะ  $Fe_2Al_5$  ซึ่งเกิดจากการแทรกซึมของเหล็กและอลูมิเนียมในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลทำให้รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงตามขนาดความกว้างของอินเทอร์เฟซ

5.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและมหภาคพบว่า บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมเกิดการยึดติดกันที่สมบูรณ์ระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งส่งผลทำให้รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงมากและทนต่อการฉีกขาดได้ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

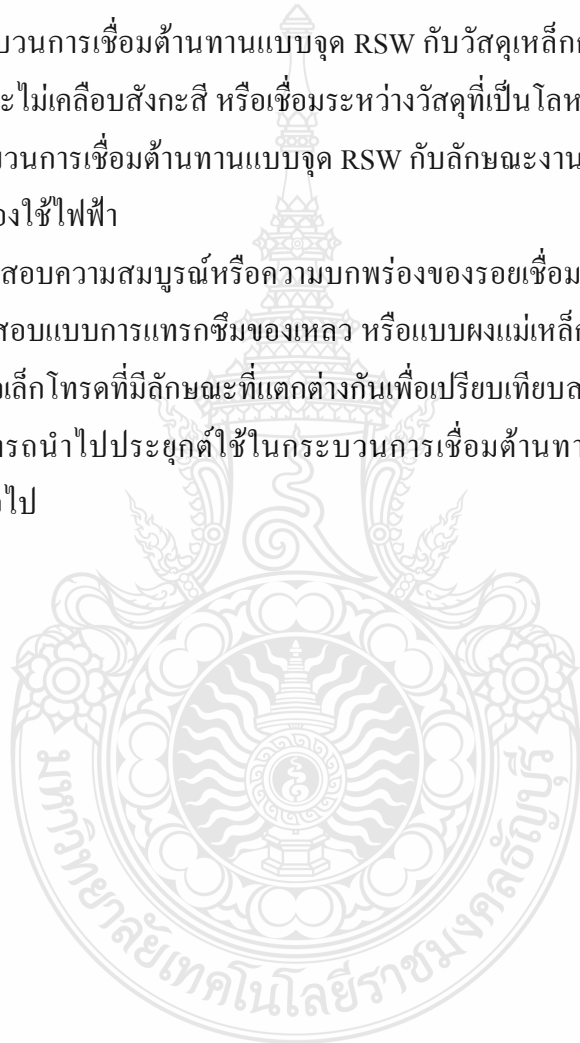
การเชื่อมด้านทานแบบจุดบนรอยต่อเกะระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ในการทดลองนี้มีปัญหาต่างๆมากมายที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการการทดลองจึงส่งผลให้การทำงานเกิดความผิดพลาดและล่าช้า และเกิดความไม่ปลอดภัยในการทำงานเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการเชื่อมด้านทานแบบจุด Resistance Spot Welds ต่อไปในอนาคตจึงได้ จึงได้สรุปแนวทางและข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ศึกษากระบวนการเชื่อมด้านทานแบบจุด RSW กับวัสดุเหล็กกับรีดร้อนและเหล็กรีดเย็นแบบเคลือบสังกะสีและไม่เคลือบสังกะสี หรือเชื่อมระหว่างวัสดุที่เป็นโลหะและอโลหะ

5.2.2 ศึกษากระบวนการเชื่อมด้านทานแบบจุด RSW กับลักษณะงานประกอบ เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ หรือชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า

5.2.3 ทำการตรวจสอบความสมบูรณ์หรือความบกพร่องของรอยเชื่อม โดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การตรวจสอบแบบการแทรกซึมของเหลว หรือแบบผงแม่เหล็ก

5.2.4 เชื่อมด้วยหัวเล็กโทรดที่มีลักษณะที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอเล็กโทรดแต่ละชนิด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเชื่อมด้านทานแบบจุดแบบหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมขั้นสูงต่อไป



## รายการอ้างอิง

- [1] Vural, M. Akkus, A. and Eryurek, B. "Effect of Welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets," *J. of Materials Processing Technology*, 176, pp.127-132, 2006.
- [2] (Online),2556, Available : [www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf), August 4, 2010.(10 ธันวาคม 2556)
- [3] Qiu, R. Shi, H. Zhang, K. Tu, Y. Iwamoto, C. and Satonaka, S. "Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding," *Materials Characterization*, 61, pp.684-688, 2010.
- [4] ASM International, *ASM Handbook Volume 6 Welding, Brazing and Soldering*. Ohio, ASM International, 2000.
- [5] (Online),2556, Available : [http://elearning.spu.ac.th/allcontentStructure\\_in\\_Architecturecourse\\_outline5.html](http://elearning.spu.ac.th/allcontentStructure_in_Architecturecourse_outline5.html) (5 สิงหาคม 2556)
- [6] Kattner, U.R. and Massalski, T.B. "Binary Alloy Phase Diagrams," ASM International, Material Park, OH, pp.147.-1990.
- [7] Handbook for Resistance Spot Welding. (online),2556, Available : [www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf), (7 กรกฎาคม 2556).
- [8] Handbook for Resistance Spot Welding. (online),2556, Available : [www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf), (7 กรกฎาคม 2556).
- [9] ชัยวัฒน์ พรศพวก และ ชนะ รัชคีศิริ. "การศึกษาค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่มีผลมาจากการเดินขึ้นรูปชิ้นงานแบบไซคลอยด์ด้วยมีดตัดเงื่อนไข Insert," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [10] Kattner, U.R. and Massalski, T.B. "Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International," *Material Park*, OH, pp.147. 1990.
- [11] อลูมิเนียม และเกรดอลูมิเนียม.(online),2556, Available : <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=AluminumGrades&LN=TH>  
[http://www.aluminiumlearning.com/html/index\\_introduction.html](http://www.aluminiumlearning.com/html/index_introduction.html). (26 พฤษภาคม 2556)

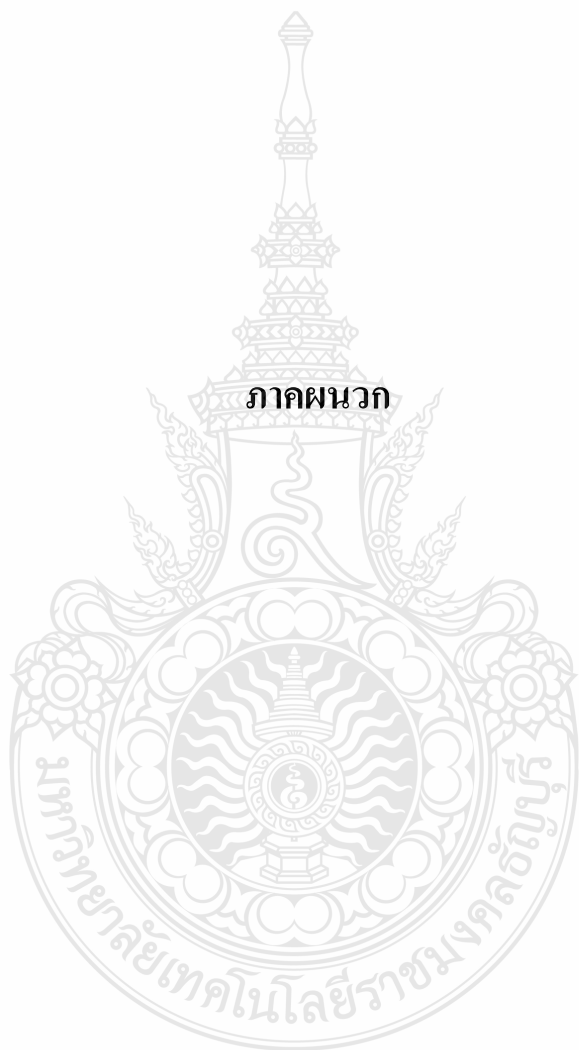
- [12] สมบัติของอลูมิเนียม. , (online),2556, Available :  
www.aluminiumlearning.com/html/index\_properties.html (26 พฤษภาคม 2556)
- [13] สถาบันเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, “การใช้เหล็กในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า,” *โครงการศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหะการ*, ธันวาคม 2550.
- [14] Kattner, U.R. and Massalski, T.B. “*Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International,*”  
Material Park, OH, pp.147. 1990.
- [15] Aslanlar, S. Ogur, A. Ozsarac, U. Tilhan, E. and Demir, Z. “Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding,” *Material and Design*, 28, pp.2-7, 2007.
- [16] ณัฐ แก้วสกุล และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ “อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติทางกลของรอยต่อเกอะอะลูมิเนียมAA6063และ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430,” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551.
- [17] (online),2553, Available: www.maceducation.com-knowledge241221210002.htm (18 ตุลาคม 2553).
- [18] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, (online),2556, Available:  
www.nano.kmitl.ac.th. เข้าถึงได้จาก (3 กุมภาพันธ์ 2556).
- [19] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ อนินท์ มีมนต์, “อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมฟริกชั่นสเตอร์ต่อกลสมบัติ รอยต่อเกอะอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลธัญบุรี*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 8, หน้า 54-63, 2549.
- [20] นิวัฒน์ คุณาวงศ์, “การศึกษาผลกระทบของรอยเชื่อมเนื่องจากการเตรียมสภาพผิวหน้าของอลูมิเนียมผสมในการเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุด” วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551.
- [21] ปรัชญา เพ็ญสุระ และ บวร โชคผู้พัฒน์ “การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเหนียวด้วยการวัดค่าความต้านทาน” ใน การประชุมวิชาการ หน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2550.
- [22] นราธิป แสงชัย และ บรรเจิด ดอนเนตรงาม “การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้ารีดเย็น SPCD (JIS G 3141) โดยหลักการออกแบบการทดลอง,” ใน การประชุมวิชาการ หน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2550.

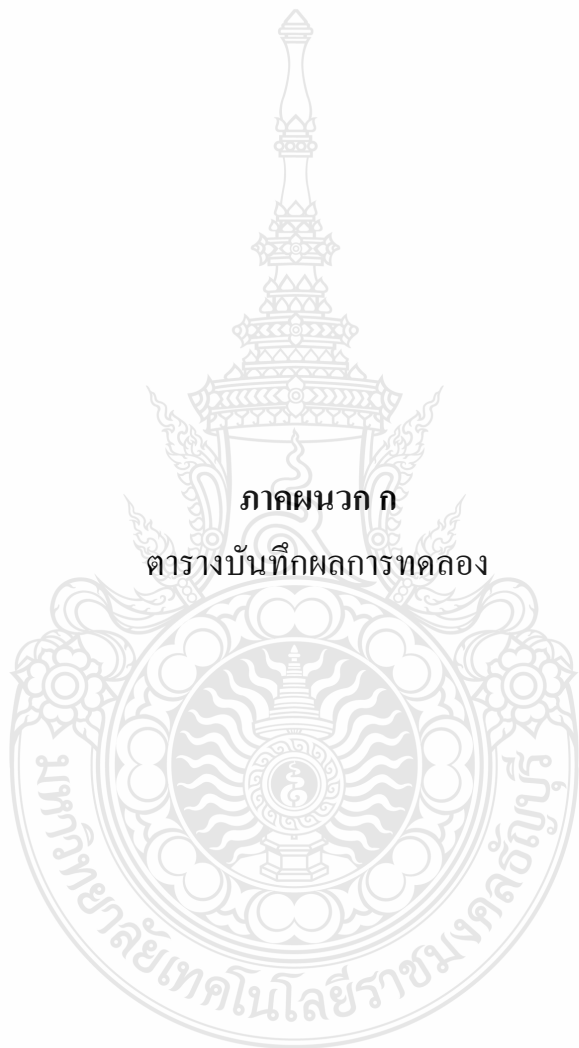
- [23] Japanese Standard Association. (1978). "JIS Handbook: Welding 1," Tokyo, Japanese Standard Association.
- [24] Prachya Pearsura. "Influence of Electrode Force Affecting the Complete of the Resistance Spot Welding," In The 2<sup>nd</sup> RMUTP International Conference 2010, pp. 237-241, 2010.
- [25] Japanese Industrial Standard, *Method of Macro Test for Section of Spot Welded Joint*, Japanese Standard Association, JIS Z 3139-1978, pp. 658-661. Japan. 1995.
- [26] Sun, X. Stephens, E. V. Khaleel, M. A. Shao, H. and M. Kimchi, "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material From Process to Performance Part I: Experimental Study," *WELDING JOURNAL*, pp.188-195. June 2004.
- [27] Nansaarnng, S. Pearsura, P. "The Study of Proper Time Range Welding to Resistance Spot Welding for Mild Steel," In Proceedings of the 1st WSEAS International Conference on MATERIALS SCIENCE (MATERIALS'08).
- [28] Ranfeng, Qiu. Shinobu, Satonaka. and Chihiro, Iwamoto. "Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels," *Materials and Design*, 30, pp.3686-3689, 2009.
- [29] Qiu, R. Iwamoto, C. and Satonaka, S. "Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels," *Material and Design*, 30, pp.3686-3689, 2009.
- [30] Alenius, M. Pohjanne, P. Somervuori, M. and Hanninen, H. "Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels," *Engineering Materials*, Helsinki University of Technology. *WELDING JOURNAL*, pp.305-313, 2007.
- [31] Nizamettin Kahraman, "The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets," *Materials and Design*, 28, pp.420-427. 2007.
- [32] M.J. Rathod and M. Kutsuna, "Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel By Laser Roll Welding," *WELDING JOURNAL*, pp.16-26, 2004.
- [33] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, "เหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบสังกะสีโดยจุ่มความร้อน แผ่นร้อน แผ่นม้วน แผ่นตัดและแผ่นลูกฟูก มอก. 50-2548," ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป. เล่ม 122 ตอนที่ 106. 2548. หน้า 164-169.

- [34] Ranfen, Qiu. Chihiro, Iwamoto. and Shinobu, Satonaka. “The influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding,” *Materials Characterization*, 60, pp.156-159, 2009.
- [35] Mitlin, D. Radmilovic, V. Pan, T. Chen, J. Feng, Z. and Santella, M.L. “Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 611 aluminum,” *Materials Science and Engineering*, A411, pp.79-96, 2006.
- [36] Zhaohua, Zhang. Xinqi, Yang. Jialong, Zhang. Guang, Zhou. Xiaodong, Xu. and Binlian, Zou. “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy,” *Materials and Design*, 32, pp.4461-4470, 2011.
- [37] Mishra, R.S. and Ma, ZY. “Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by resistance spot welding,” *Mater Science Eng*, R 50, pp.1-78, 2005.
- [38] Hyung-Seop, Shin. and Yoon,-Chul Jung. “Characteristics of friction stir spot wilding of Zr-based bulk metallic glass sheets,” *Journal of Alloys and Compounds*, 5045, pp.5279-5282, 2010.
- [39] Hyung-Seop, Shin. and Yoon-Chul, Jung. “Characteristics of dissimilar friction stir spot welding of bulk metallic glass to lightweight crystalline metals,” *Intermetallics*, 18, pp.2000-2004, 2010.
- [40] Florea, R.S. Bammann, D.J. Yellsell, A. Solanki, K.N. and Hammi, Y. “Welding Parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy,” *Materials and Design*, 45, pp.456-465. 2013.



ภาคผนวก





**ภาคผนวก ก**  
**ตารางบันทึกผลการทดลอง**

**ก.1 ผลการทดสอบค่าแรงดึงเฉือน**

1) โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กต่อเกยบนแผ่นอลูมิเนียม

**ตารางที่ ก.1** แสดงค่าแรงดึงเฉือนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่กระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85-105 kA

เวลากดแช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	กระแส เชื่อม (kA.)	Tensile shear (kN)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
10	0.10	85	2233.20	2218.39	1721.29	2057.63	175.57	336.34
		90	2506.45	1720.00	2110.00	2112.15	394.30	2.15
		95	2229.94	2175.48	2088.00	2164.47	65.46	76.47
		100	2322.58	2229.68	1594.84	2049.03	273.55	454.19
		105	2640.00	1858.06	1480.65	1992.90	647.10	512.25

**ตารางที่ ก.2** แสดงค่าแรงดึงเฉือนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20Cycles

กระแส เชื่อม (kA)	แรงกด (MPa)	เวลากด แช่ (Cycle)	Tensile shear (kN)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	0.10	1	1549.59	1559.46	1687.77	1598.94	88.83	49.35
		5	1855.56	1964.13	2339.19	2052.96	286.23	197.4
		10	2062.83	2151.66	2279.97	2164.82	115.15	101.99
		15	1697.64	1717.38	1766.73	1727.25	39.48	29.61
		20	1500.24	1589.07	2023.35	1704.22	319.13	203.98

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าแรงดึงเฉือนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่แรงกดเชื่อมตั้งแต่ 0.1-0.3MPa

กระแส เชื่อม (kA)	เวลากดแช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	Tensile shear (kN)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	10	0.10	2314.15	2180.45	2091.56	2195.39	118.76	103.83
		0.15	2080.42	2095.25	2110.14	2095.27	14.87	29.72
		0.20	1925.32	1758.63	1630.20	1771.38	153.94	141.18
		0.25	1830.65	1692.24	1580.52	1701.14	129.51	120.62
		0.30	1610.25	1528.36	1427.22	1521.94	88.31	94.72

2) โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมต่อเกยบนแผ่นเหล็ก

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าแรงดึงเฉือนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่กระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85-105 kA

เวลากดแช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	กระแส เชื่อม (kA)	Tensile shear (kN)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
10	0.10	85	1286.45	1002.58	969.03	1086.02	200.43	116.99
		90	1322.58	1290.00	1055.00	1222.53	100.05	167.53
		95	2330.32	1994.48	1927.74	2084.18	246.14	156.44
		100	2277.74	2181.29	1673.89	2044.31	233.43	370.42
		105	1800.00	1637.93	1278.13	1572.02	227.98	293.89

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าแรงดึงเฉือนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่ที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20Cycles

กระแส เชื่อม (kA)	แรงกด (MPa)	เวลากด แช่ (Cycle)	Tensile shear (kN)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	0.10	1	1299.15	1445.83	1655.37	1466.78	188.59	167.63
		5	1823.00	2105.88	2158.26	2029.05	129.22	206.05
		10	1728.705	2095.40	2430.66	2084.92	345.74	356.22
		15	2043.015	2053.49	2074.45	2056.98	17.46	13.97
		20	1791.567	1802.04	1927.77	1840.46	87.31	48.89

ตารางที่ ก.6 แสดงค่าแรงดึงเฉือนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่แรงกดเชื่อมตั้งแต่ 0.1-0.3MPa

กระแส เชื่อม (kA)	เวลากด แช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	Tensile shear (kN)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	10	0.10	2328.16	2000.02	1965.32	2097.83	230.33	132.51
		0.15	1908.23	1923.84	2101.32	1977.79	123.52	193.09
		0.20	1825.32	1754.64	1552.25	1710.74	114.58	158.49
		0.25	1753.15	1652.20	1522.52	1642.62	110.53	120.10
		0.30	2000.19	1985.48	1954.26	1979.98	20.21	25.72

## ก.2 อัตราการยึดตัว

1) โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กต่อเกยบนแผ่นอลูมิเนียม

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าอัตราการยึดตัวของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่กระแสไฟเชื่อม ตั้งแต่ 85-105 kA

เวลากด แช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	กระแส เชื่อม (kA)	ค่าการยึดตัว (mm)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
10	0.10	85	1.14	2.70	1.91	1.92	0.01	0.78
		90	3.34	3.71	3.89	3.65	0.24	0.31
		95	3.40	3.80	3.89	3.70	0.20	0.30
		100	0.77	4.18	5.26	3.40	1.86	2.63
		105	2.76	3.22	3.33	3.10	0.23	0.35

ตารางที่ ก.8 แสดงค่าอัตราการยึดตัวของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles

กระแส เชื่อม (kA)	แรงกด (MPa)	เวลากด แช่ (Cycle)	ค่าการยึดตัว (mm)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	0.10	1	1.28	1.89	1.96	1.71	0.25	0.43
		5	3.68	3.70	3.72	3.70	0.02	0.02
		10	3.59	3.69	3.78	3.69	0.09	0.10
		15	3.06	3.16	3.35	3.19	0.16	0.13
		20	3.06	3.16	3.26	3.16	0.10	0.11

ตารางที่ ก.9 แสดงค่าอัตราการยึดตัวของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่แรงกดเชื่อมตั้งแต่ 0.1-0.3MPa

กระแส เชื่อม (kA)	เวลากดแช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	ค่าการยึดตัว (mm)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	10	0.10	1.65	2.38	3.62	2.55	1.07	0.90
		0.15	2.66	2.79	3.00	2.82	0.19	0.16
		0.20	1.50	1.59	1.83	1.64	0.19	0.14
		0.25	2.15	3.53	4.98	3.56	1.43	1.34
		0.30	0.96	1.27	2.79	1.67	1.12	0.71

2) โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมต่อเกยบนแผ่นเหล็ก

ตารางที่ ก.10 แสดงค่าอัตราการยึดตัวของการเชื่อมด้านทานแบบจุดกระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85-105 kA

เวลากด แช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	กระแส เชื่อม (kA)	ค่าการยึดตัว (mm)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
10	0.10	85	0.59	0.91	1.43	0.98	0.45	0.39
		90	1.77	2.65	3.26	2.56	0.70	0.79
		95	2.36	2.61	3.30	2.76	0.55	0.40
		100	2.04	2.80	2.96	2.60	0.36	0.56
		105	1.90	2.10	3.04	2.35	0.69	0.45

ตารางที่ ก.11 แสดงค่าอัตราการยืดตัวของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่ที่เวลากดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles

กระแส เชื่อม (kA)	แรงกด (MPa)	เวลากด แช่ (Cycle)	ค่าการยืดตัว (mm)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	0.10	1	0.92	1.36	1.75	1.35	0.41	0.43
		5	2.69	2.75	2.79	2.74	0.05	0.05
		10	2.51	2.80	2.94	2.75	0.19	0.24
		15	1.54	1.67	2.18	1.79	0.38	0.26
		20	1.80	2.01	2.01	1.94	0.07	0.14

ตารางที่ ก.12 แสดงค่าอัตราการยืดตัวของการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่แรงกดเชื่อมตั้งแต่ 0.1-0.3 MPa

กระแส เชื่อม (kA)	เวลากดแช่ (Cycle)	แรงกด (MPa)	ค่าการยืดตัว (mm)			AVG	Tolerances	
			1	2	3		MAX	MIN
95	10	0.10	1.79	2.63	3.07	2.49	0.57	0.71
		0.15	2.48	2.68	3.55	2.90	0.65	0.42
		0.20	1.50	1.79	2.13	1.80	0.32	0.31
		0.25	1.78	1.99	2.05	1.94	0.11	0.16
		0.30	2.15	2.66	3.76	2.85	0.91	0.71



## ก.2 ผลทดสอบความลึกของรอยกด

### 1) ตัวแปรที่ทดสอบ

- กระแส

ตารางที่ ก.13 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน a โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

กระแส (kA)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.1580	0.1590	0.1400	0.1900	0.2000	0.1694	0.0306	0.0114
90	0.1810	0.1810	0.1740	0.1700	0.1386	0.1689	0.0121	0.0303
95	0.1400	0.1490	0.1380	0.1380	0.1380	0.1406	0.0084	0.0026
100	0.1390	0.1380	0.1480	0.1450	0.1460	0.1432	0.0028	0.0042
105	0.1290	0.1270	0.1390	0.1340	0.1360	0.1330	0.0060	0.0060

ตารางที่ ก.14 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน c โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

กระแส (kA)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.4040	0.3940	0.3620	0.3190	0.3090	0.3576	0.0464	0.0486
90	0.3300	0.3510	0.3550	0.3780	0.3700	0.3568	0.0212	0.0268
95	0.2140	0.1960	0.1920	0.1942	0.1960	0.1984	0.0156	0.0064
100	0.1473	0.1692	0.1692	0.1720	0.1720	0.1659	0.0061	0.0186
105	0.1280	0.1280	0.1230	0.1280	0.1300	0.1274	0.0026	0.0044

ตารางที่ ก.15 การหาอัตราส่วนของความถี่รอยกุดโดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนลูมิเนียม

กระแส (kA)	การหาอัตราส่วน a/b (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.1706	0.1717	0.1512	0.2052	0.216	0.1829	0.033	0.03
90	0.1955	0.1955	0.1879	0.1836	0.1497	0.1824	0.013	0.03
95	0.1512	0.1609	0.149	0.149	0.149	0.1518	0.0091	0.0
100	0.1501	0.149	0.1598	0.1566	0.1577	0.1546	0.0052	0.01
105	0.1393	0.1371	0.1501	0.1447	0.1469	0.1436	0.0065	0.01

\*\*ความหนาของ b เท่ากับ 0.926

ตารางที่ ก.16 การหาอัตราส่วนของความถี่รอยกุดโดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

กระแส (kA)	การหาอัตราส่วน c/d (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.322	0.314	0.288	0.254	0.246	0.285	0.037	0.039
90	0.263	0.280	0.283	0.301	0.295	0.284	0.017	0.021
95	0.171	0.156	0.153	0.155	0.156	0.158	0.012	0.005
100	0.117	0.135	0.135	0.137	0.137	0.132	0.005	0.015
105	0.102	0.102	0.098	0.102	0.104	0.102	0.002	0.004

\*\*ความหนาของ d เท่ากับ 1.255

ตารางที่ ก.17 การวัดความลึกกรอยกดแผ่นบน a โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

กระแส (kA)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.5400	0.5520	0.5537	0.5550	0.5600	0.5521	0.0121	0.0079
90	0.5200	0.5300	0.5332	0.5400	0.5500	0.5346	0.0146	0.0154
95	0.3400	0.3500	0.3522	0.3600	0.3610	0.3526	0.0126	0.0084
100	0.3100	0.3200	0.3254	0.3260	0.3500	0.3263	0.0163	0.0237
105	0.2000	0.2100	0.2297	0.2390	0.2420	0.2241	0.0241	0.0179

ตารางที่ ก.18 การวัดความลึกกรอยกดแผ่นบน c โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

กระแส (kA)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.3000	0.3080	0.318	0.3350	0.3360	0.3194	0.0194	0.0166
90	0.1999	0.2000	0.2083	0.2100	0.2230	0.2082	0.0083	0.0148
95	0.1490	0.1560	0.1598	0.1599	0.1700	0.1589	0.0099	0.0111
100	0.1790	0.1800	0.1832	0.1850	0.1900	0.1834	0.0044	0.0066
105	0.1300	0.1580	0.1631	0.1690	0.1900	0.1620	0.0320	0.0280

ตารางที่ ก.19 การวัดความลึกกรอยกดแผ่นบน a โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

กระแส (kA)	การหาอัตราส่วน a/b (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.5832	0.5961	0.5979	0.5994	0.6048	0.5963	0.0085	0.0131
90	0.5616	0.5724	0.5758	0.5832	0.5940	0.5774	0.0166	0.0158
95	0.3672	0.3780	0.3803	0.3888	0.3898	0.3808	0.0090	0.0137
100	0.3348	0.3456	0.3514	0.3521	0.3780	0.3524	0.0256	0.0176
105	0.2160	0.2268	0.2481	0.2581	0.2613	0.2421	0.0193	0.0261

\*\*ความหนาของ b เท่ากับ 1.255

ตารางที่ ก.20 การวัดความถี่รอยกัดแผ่นบน c โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

กระแส (kA)	การหาอัตราส่วน c/d (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	0.2390	0.2454	0.2534	0.2669	0.2677	0.2545	0.0132	0.0155
90	0.1593	0.1594	0.1660	0.1673	0.1777	0.1659	0.0118	0.0066
95	0.1187	0.1243	0.1273	0.1274	0.1355	0.1266	0.0088	0.0079
100	0.1426	0.1434	0.1460	0.1474	0.1514	0.1462	0.0052	0.0035
105	0.1036	0.1259	0.1300	0.1347	0.1514	0.1291	0.0223	0.0255

\*\*ความหนาของ d เท่ากับ 0.926

• เวลากัดแซ่

ตารางที่ ก.21 การวัดความถี่รอยกัดแผ่นบน a โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

เวลากัดแซ่ (Cycles)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.0546	0.0546	0.0658	0.0658	0.0658	0.0613	0.0045	0.0067
5	0.0493	0.0493	0.074	0.074	0.074	0.0641	0.0099	0.0148
10	0.1233	0.1357	0.1357	0.148	0.1603	0.1406	0.0197	0.0173
15	0.111	0.1233	0.1357	0.148	0.1534	0.1343	0.0191	0.0233
20	0.1198	0.1249	0.1414	0.1497	0.1566	0.1385	0.0182	0.0187

ตารางที่ ก.22 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน c โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

เวลาทดสอบ (Cycles)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.0648	0.0648	0.0761	0.0875	0.088	0.0762	0.0117	0.0114
5	0.0656	0.0656	0.0765	0.0765	0.0875	0.0743	0.0131	0.0087
10	0.1829	0.1858	0.1968	0.2077	0.219	0.1984	0.0206	0.0156
15	0.1842	0.1867	0.1975	0.2082	0.2195	0.1992	0.0203	0.015
20	0.1832	0.1868	0.1981	0.2088	0.2258	0.2005	0.0252	0.0174

ตารางที่ ก.23 การหาอัตราส่วนของความลึกรอยกด โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

เวลาทดสอบ (Cycles)	การหาอัตราส่วน a/b (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.059	0.059	0.071	0.071	0.071	0.0662	0.0048	0.0072
5	0.0533	0.0533	0.0799	0.0799	0.0799	0.0693	0.0107	0.016
10	0.1332	0.1465	0.1465	0.1598	0.1731	0.1518	0.0213	0.0187
15	0.1199	0.1332	0.1465	0.1598	0.1657	0.145	0.0207	0.0251
20	0.1294	0.1348	0.1527	0.1617	0.1692	0.1495	0.0196	0.0202

\*\*ความหนาของ b เท่ากับ 0.926

ตารางที่ ก.24 การหาอัตราส่วนของความถี่รอยกุด โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนลูมิเนียม

เวลาทดสอบ (Cycles)	การหาอัตราส่วน c/d (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.0516	0.0516	0.0607	0.0697	0.0701	0.0607	0.0094	0.0091
5	0.0523	0.0523	0.061	0.061	0.0697	0.0592	0.0105	0.007
10	0.1457	0.1481	0.1568	0.1655	0.1745	0.1581	0.0164	0.0124
15	0.1468	0.1488	0.1573	0.1659	0.1749	0.1587	0.0162	0.012
20	0.146	0.1489	0.1578	0.1664	0.1799	0.1598	0.0201	0.0138

\*\*ความหนาของ d เท่ากับ 1.255

ตารางที่ ก.25 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน a โดยกำหนดให้ลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

เวลาทดสอบ (Cycles)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.0442	0.053	0.0619	0.0707	0.0795	0.0619	0.0177	0.0177
5	0.0797	0.0797	0.0911	0.0911	0.0911	0.0865	0.0046	0.0068
10	0.3313	0.342	0.3526	0.3633	0.374	0.3526	0.0214	0.0214
15	0.3283	0.3496	0.3477	0.3477	0.4031	0.3553	0.0478	0.027
20	0.2924	0.303	0.3137	0.3137	0.3137	0.3073	0.0064	0.015

ตารางที่ ก.26 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน c โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

เวลากดแช่ (Cycles)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.0452	0.0452	0.0452	0.0603	0.0603	0.0513	0.009	0.006
5	0.0452	0.0452	0.0452	0.0603	0.0603	0.0513	0.009	0.006
10	0.1464	0.1464	0.1569	0.1673	0.1777	0.1589	0.0188	0.0125
15	0.1478	0.1594	0.1594	0.171	0.171	0.1617	0.0093	0.0139
20	0.1556	0.1556	0.1663	0.1663	0.1663	0.162	0.0043	0.0064

ตารางที่ ก.27 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน a โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

เวลากดแช่ (Cycles)	การหาอัตราส่วน a/b (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.0477	0.0573	0.0668	0.0763	0.0859	0.0668	0.0191	0.0191
5	0.0861	0.0861	0.0984	0.0984	0.0984	0.0935	0.0049	0.0074
10	0.3577	0.3693	0.3808	0.3924	0.4039	0.3808	0.0231	0.0231
15	0.3545	0.3776	0.3755	0.3755	0.4353	0.3837	0.0516	0.0292
20	0.3157	0.3273	0.3388	0.3388	0.3388	0.3319	0.0069	0.0162

\*\*ความหนาของ b เท่ากับ 0.926

ตารางที่ ก.28 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน c โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

เวลากดแซ่ (Cycles)	การหาอัตราส่วน c/d (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	0.036	0.036	0.036	0.048	0.048	0.0408	0.0072	0.0048
5	0.036	0.036	0.036	0.048	0.048	0.0408	0.0072	0.0048
10	0.1167	0.1167	0.125	0.1333	0.1416	0.1266	0.015	0.01
15	0.1178	0.127	0.127	0.1363	0.1363	0.1289	0.0074	0.0111
20	0.124	0.124	0.1325	0.1325	0.1325	0.1291	0.0034	0.0051

\*\*ความหนาของ d เท่ากับ 1.255

- แรงกดอเล็กโตรด

ตารางที่ ก.29 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน a โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนอลูมิเนียม

แรงกด (MPa)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.3400	0.3500	0.3522	0.3600	0.3610	0.3526	0.0126	0.0084
0.15	0.3500	0.3289	0.3947	0.4167	0.4385	0.3858	0.0358	0.0527
0.20	0.3024	0.3427	0.3427	0.4032	0.4032	0.3588	0.0564	0.0444
0.25	0.4329	0.4805	0.4916	0.5027	0.5282	0.4872	0.0543	0.0410
0.30	0.4541	0.4750	0.5583	0.6208	0.6567	0.5530	0.0989	0.1037



ตารางที่ ก.30 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน c โดยกำหนดให้เหล็กอยู่บนลูมิเนียม

แรงกด (MPa)	การหาอัตราส่วน a/b (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.1490	0.1560	0.1598	0.1599	0.1700	0.1589	0.0099	0.0111
0.15	0.1535	0.1973	0.2192	0.2412	0.2412	0.2105	0.0570	0.0307
0.20	0.0604	0.1432	0.1411	0.1394	0.2016	0.1371	0.0767	0.0645
0.25	0.1687	0.1731	0.1743	0.1748	0.2730	0.1928	0.0241	0.0802
0.30	0.2100	0.2541	0.3167	0.3375	0.3583	0.2953	0.0853	0.0630

ตารางที่ ก.31 การวัดความถี่รอยกุดแผ่นบน a โดยกำหนดให้ลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

แรงกด (MPa)	ตำแหน่งการวัด (mm.)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.3672	0.3780	0.3803	0.3888	0.3898	0.3808	0.0090	0.0137
0.15	0.3780	0.3552	0.4262	0.4500	0.4735	0.4166	0.0570	0.0386
0.20	0.3266	0.3701	0.3701	0.4354	0.4354	0.3875	0.0479	0.0610
0.25	0.4675	0.5189	0.5309	0.5429	0.5704	0.5261	0.0443	0.0586
0.30	0.4904	0.5130	0.6029	0.6704	0.7092	0.5972	0.1120	0.1068

\*\*ความหนาของ b เท่ากับ 0.926

ตารางที่ ก.32 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน c โดยกำหนดให้ลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

แรงกด (MPa)	การหาอัตราส่วน c/d (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.1187	0.1243	0.1273	0.1274	0.1355	0.1266	0.0088	0.0079
0.15	0.1223	0.1572	0.1747	0.1922	0.1922	0.1677	0.0245	0.0454
0.20	0.0481	0.1141	0.1124	0.1111	0.1606	0.1093	0.0514	0.0611
0.25	0.1344	0.1379	0.1389	0.1393	0.2175	0.1536	0.0639	0.0192
0.30	0.1673	0.2025	0.2524	0.2689	0.2855	0.2353	0.0502	0.0680

\*\*ความหนาของ d เท่ากับ 1.255

ตารางที่ ก.33 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน a โดยกำหนดให้ลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

แรงกด (MPa)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.1400	0.1490	0.1380	0.1380	0.1380	0.1406	0.0084	0.0026
0.15	0.0854	0.0861	0.1063	0.1068	0.1072	0.0984	0.013	0.0088
0.20	0.1458	0.1667	0.1671	0.1875	0.2500	0.1834	0.0376	0.0666
0.25	0.2541	0.2757	0.2862	0.2960	0.2974	0.2819	0.0278	0.0155
0.30	0.1423	0.1983	0.2023	0.2336	0.2545	0.2062	0.0639	0.0483

ตารางที่ ก.34 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน c โดยกำหนดให้ลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

แรงกด (MPa)	การหาอัตราส่วน a/b (mm.)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.191	0.192	0.2031	0.2052	0.214	0.2011	-0.0101	-0.002
0.15	0.47	0.5128	0.5131	0.5769	0.5982	0.5342	0.0642	0.064
0.20	0.6041	0.6667	0.6675	0.6708	0.6921	0.6602	0.0561	0.0319
0.25	0.6041	0.6252	0.6475	0.663	0.6875	0.6455	0.0414	0.042
0.30	0.5487	0.6196	0.681	0.7342	0.9282	0.7023	0.1536	0.2259

ตารางที่ ก.35 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน a โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

แรงกด (MPa)	ตำแหน่งการวัด (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.1512	0.1609	0.149	0.149	0.149	0.1518	-0.0028	0.0006
0.15	0.0922	0.093	0.1148	0.1153	0.1158	0.1062	0.0095	0.014
0.20	0.1575	0.18	0.1805	0.2025	0.27	0.1981	0.0719	0.0406
0.25	0.2744	0.2977	0.3091	0.3197	0.3212	0.3044	0.0168	0.03
0.30	0.1537	0.2141	0.2185	0.2523	0.2748	0.2227	0.0522	0.069

\*\*ความหนาของ b เท่ากับ 0.926

ตารางที่ ก.36 การวัดความลึกรอยกดแผ่นบน c โดยกำหนดให้อลูมิเนียมอยู่บนเหล็ก

แรงกด (MPa)	การหาอัตราส่วน c/d (mm)					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	0.1522	0.153	0.1618	0.1635	0.1705	0.1602	0.0103	0.008
0.15	0.3745	0.4086	0.4088	0.4597	0.4767	0.4257	0.051	0.0512
0.20	0.4814	0.5312	0.5319	0.5345	0.5515	0.5261	0.0254	0.0447
0.25	0.4814	0.4982	0.5159	0.5283	0.5478	0.5143	0.0335	0.033
0.30	0.4372	0.4937	0.5426	0.585	0.7396	0.5596	0.18	0.1224

\*\*ความหนาของ d เท่ากับ 1.255

ก.3.1 ความสูงแนวรอยเชื่อมที่เกิดบริเวณอินเทอร์เฟซ

1) โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กต่อเกยบนแผ่นอลูมิเนียม

ตารางที่ ก.37 การวัดระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟซของกระแสตั้งแต่ 85-105 kA

แรงกด (MPa)	ระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟซ ( $\mu\text{m}$ )					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	25.86	31.90	34.48	39.66	46.55	35.69	10.86	9.83
0.15	40.51	62.07	65.94	80.60	81.47	66.12	15.35	25.61
0.20	19.40	28.01	34.05	35.78	41.81	31.81	10.00	12.41
0.25	25.43	39.66	40.94	42.67	46.56	39.05	7.51	13.62
0.30	33.62	48.70	49.57	55.61	57.33	48.97	8.36	15.35

ตารางที่ ก.38 การวัดระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟซของเวลาในการกดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles

แรงกด (MPa)	ระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟซ ( $\mu\text{m}$ )					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	25.86	31.90	34.48	39.66	46.55	35.69	10.86	9.83
0.15	40.51	62.07	65.94	80.60	81.47	66.12	15.35	25.61
0.20	19.40	28.01	34.05	35.78	41.81	31.81	10.00	12.41
0.25	25.43	39.66	40.94	42.67	46.56	39.05	7.51	13.62
0.30	33.62	48.70	49.57	55.61	57.33	48.97	8.36	15.35

ตารางที่ ก.39 การวัดระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟสของแรงกดตั้งแต่ 0.1-0.3 MPa

แรงกด (MPa)	ระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟส ( $\mu\text{m}$ )					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	25.86	31.90	34.48	39.66	46.55	35.69	10.86	9.83
0.15	40.51	62.07	65.94	80.60	81.47	66.12	15.35	25.61
0.20	19.40	28.01	34.05	35.78	41.81	31.81	10.00	12.41
0.25	25.43	39.66	40.94	42.67	46.56	39.05	7.51	13.62
0.30	33.62	48.70	49.57	55.61	57.33	48.97	8.36	15.35

2) โดยกำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมต่อเกยบนแผ่นเหล็ก

ตารางที่ ก.40 การวัดระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟสของกระแสตั้งแต่ 85-105 kA

กระแส (kA)	ระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟส ( $\mu\text{m}$ )					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
85	29.31	32.33	32.76	32.76	41.38	33.71	7.67	4.40
90	16.38	18.53	18.54	18.97	20.69	18.62	2.07	2.24
95	44.40	46.55	50.43	56.47	70.94	53.76	17.18	9.36
100	27.16	30.60	31.47	34.49	36.64	32.07	4.57	4.91
105	25.43	26.72	30.17	32.32	32.76	29.48	3.28	4.05

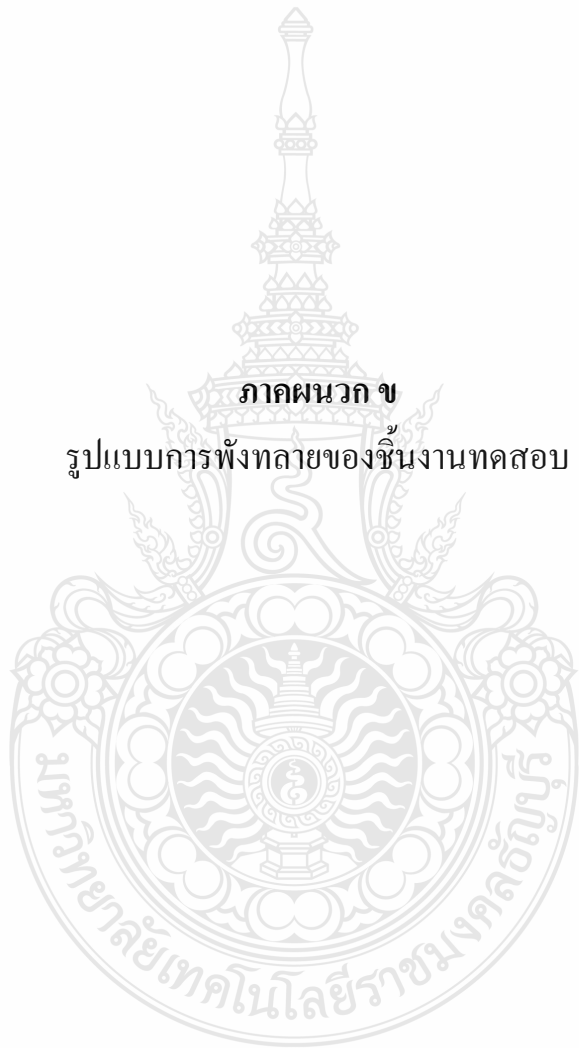
ตารางที่ ก.41 การวัดระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟสของเวลาในการกดแช่ตั้งแต่ 1-20 Cycles

เวลากด แช่ (cycles)	ระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟส ( $\mu\text{m}$ )					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
1	9.49	9.49	11.20	14.66	20.26	13.02	7.24	3.53
5	37.08	37.50	40.94	42.68	44.82	40.60	4.22	3.52
10	44.40	46.55	50.43	56.47	70.94	53.76	17.18	9.36
15	14.22	20.26	20.26	25.00	25.00	20.95	4.05	6.73
20	56.03	57.33	59.05	62.07	64.23	59.74	4.49	3.71

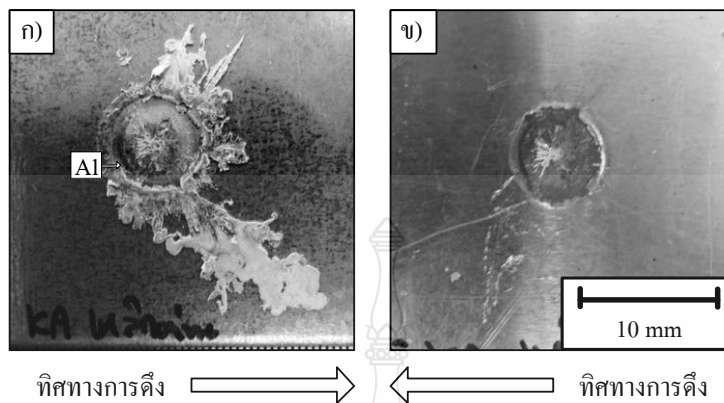
ตารางที่ ก.42 การวัดระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟสของแรงกดตั้งแต่ 0.1-0.3 MPa

แรงกด (MPa)	ระยะความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟส ( $\mu\text{m}$ )					AVG	Tolerances	
	1	2	3	4	5		MAX	MIN
0.10	44.40	46.55	50.43	56.47	70.94	53.76	17.18	9.36
0.15	24.57	24.57	24.57	25.00	28.88	25.52	3.36	0.95
0.20	25.00	31.90	34.91	43.53	43.97	35.86	8.11	10.86
0.25	34.91	40.95	43.53	44.40	49.13	42.58	6.55	7.67
0.30	25.86	30.18	34.91	37.93	41.81	34.14	7.67	8.28

ภาคผนวก ข  
รูปแบบการฟังทลายของชิ้นงานทดสอบ

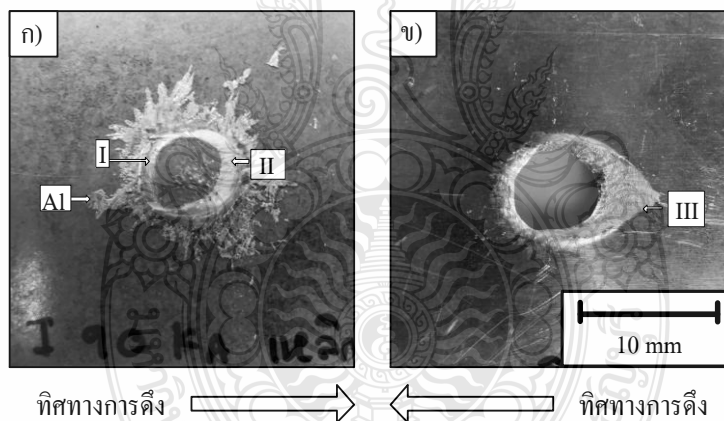


ข.1 รอยฟังกหลายของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กไว้ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านล่าง



รูปที่ ข.1 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเนื้อที่เชื่อมด้วยกระแส 85 kA

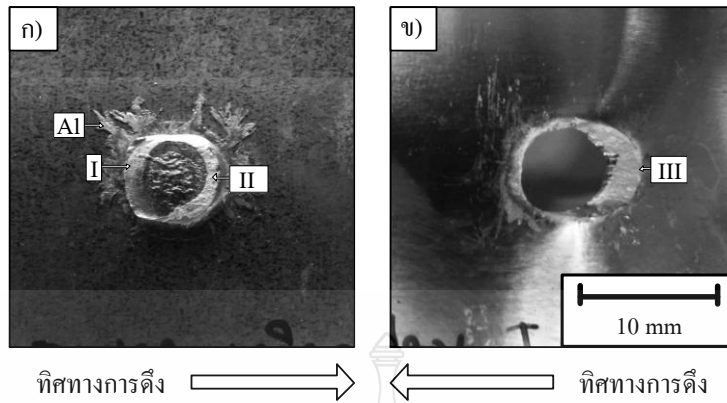
(ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม



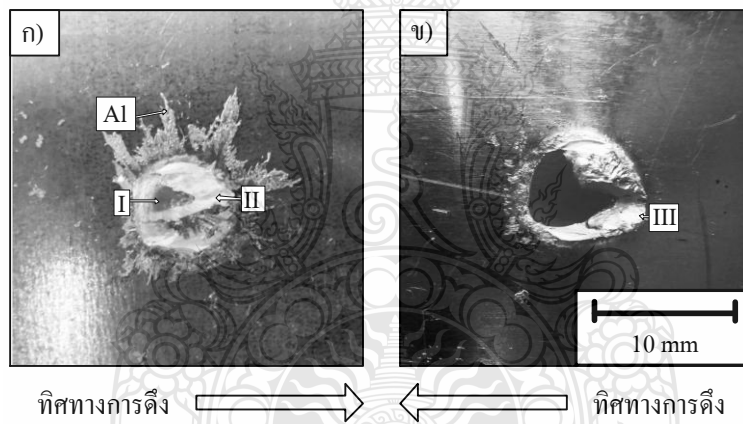
รูปที่ ข.2 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเนื้อที่เชื่อมด้วยกระแส 90kA

(ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

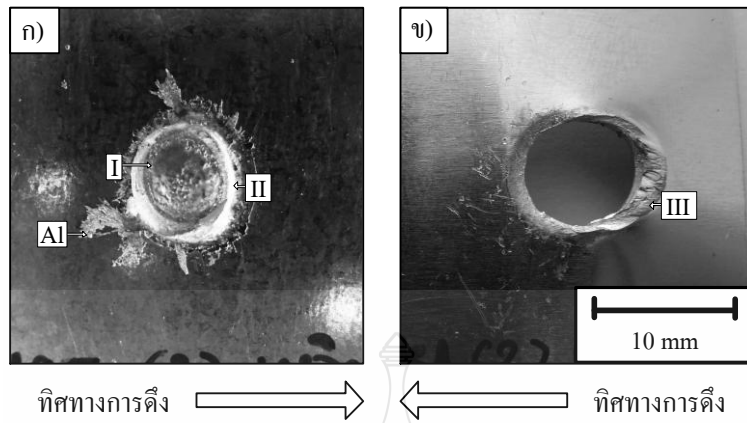




รูปที่ ข.3 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเดือนที่เชื่อมด้วยกระแส 95kA  
(ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

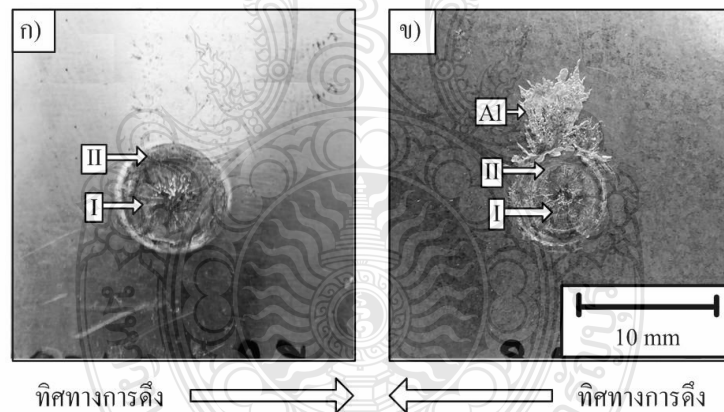


รูปที่ ข.4 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเดือนที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA  
(ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

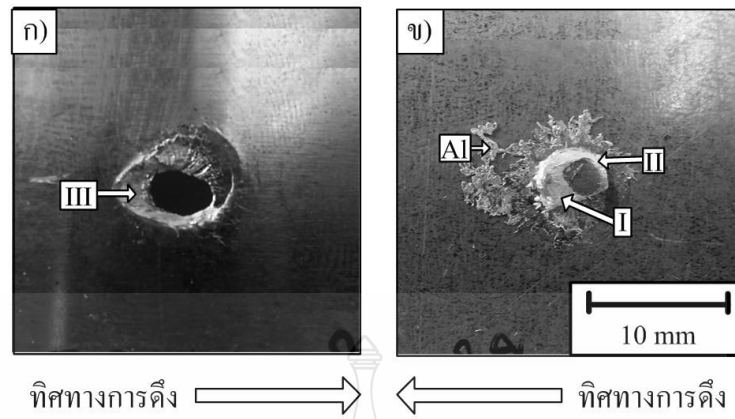


รูปที่ ข.5 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเดือนที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA  
(ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

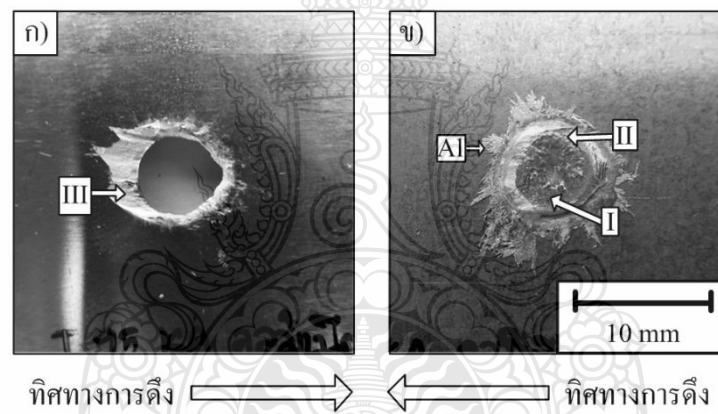
ข.2 รอยพังทลายของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและแผ่นเหล็กไว้ด้านล่าง



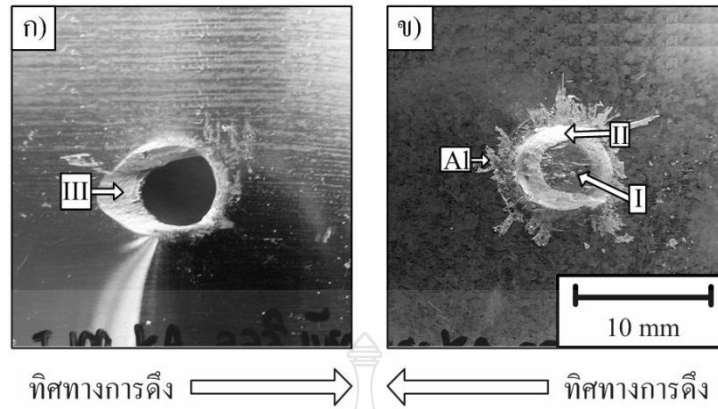
รูปที่ ข.6 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเดือนที่เชื่อมด้วยกระแส 85 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก



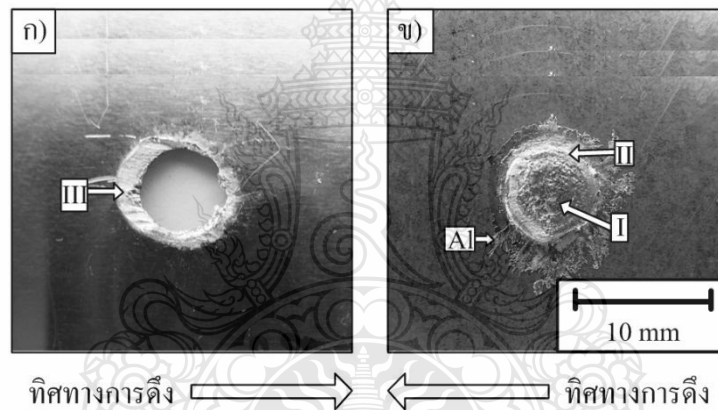
รูปที่ ข.7 รูปแบบการพังทลายของฉนวนทดสอบแรงดีงเดือนที่เชื่อมด้วยกระแส 90 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ(ข) แผ่นเหล็ก



รูปที่ ข.8 รูปแบบการพังทลายของฉนวนทดสอบแรงดีงเดือนที่เชื่อมด้วยกระแส 95 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก



รูปที่ ข.9 รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงดึงเฉือนที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก



รูปที่ ข.10 รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงดึงเฉือนที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก

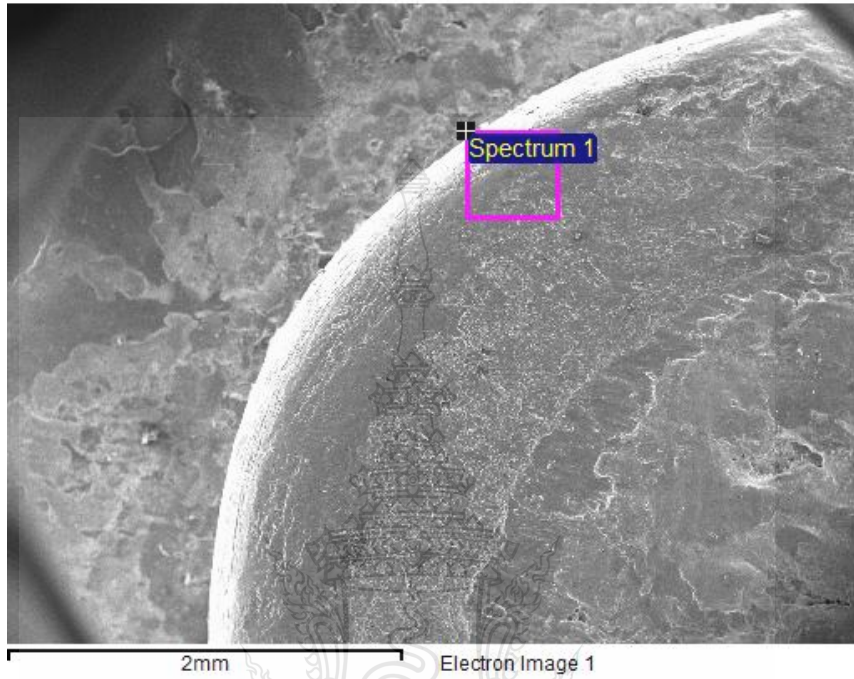


**ภาคผนวก ค**

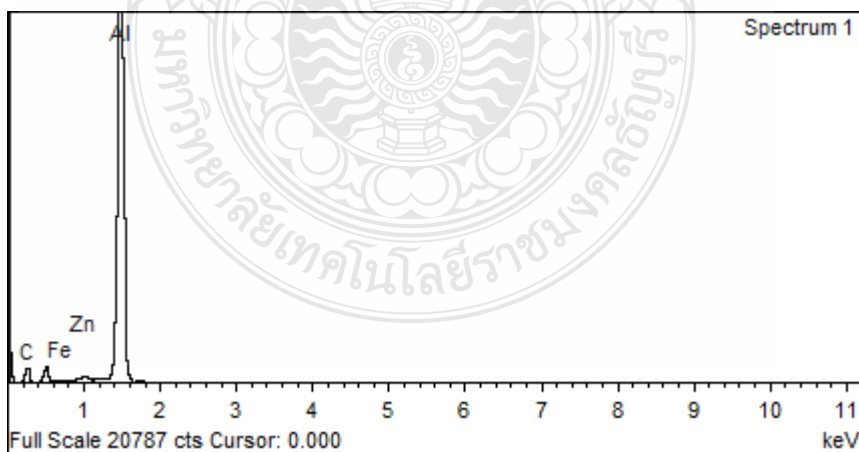
กราฟวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน  
(Electron Dispersive Spectrometry : EDS)

ค.1 วิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน

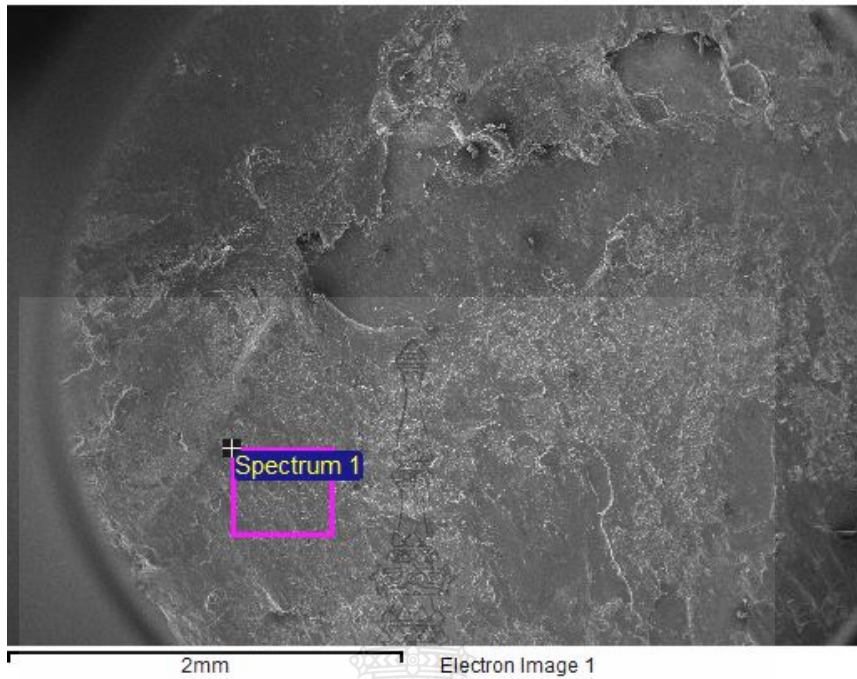
1) กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง



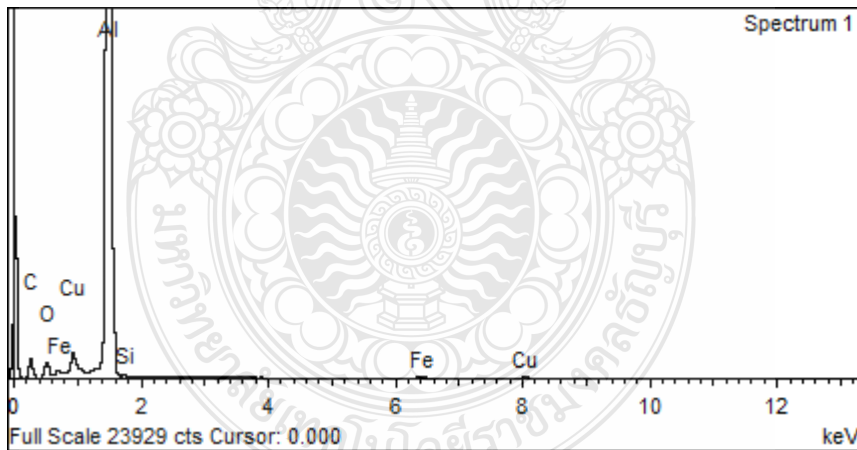
ภาพที่ ค.1 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลายบริเวณ อินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.1 Mpa



ภาพที่ ค.2 กราฟปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลายบริเวณอินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.1 Mpa

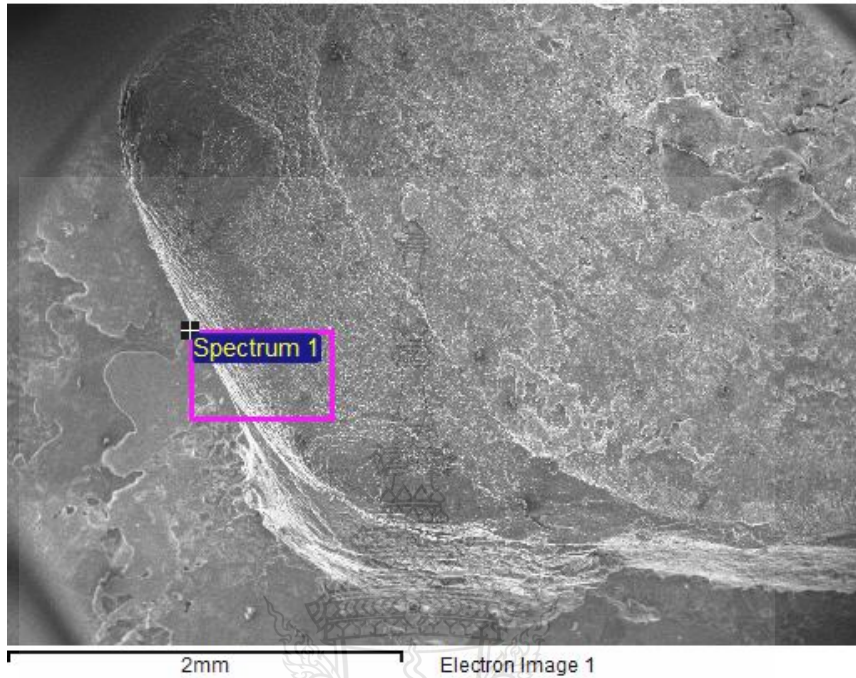


ภาพที่ ค.3 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลายบริเวณ อินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.3 Mpa

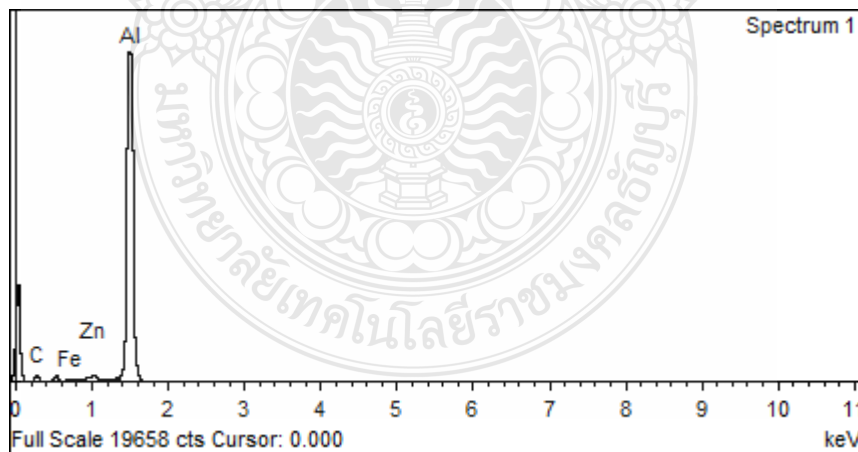


ภาพที่ ค.4 กราฟปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลาย บริเวณอินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.3 Mpa

2) กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่บนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง

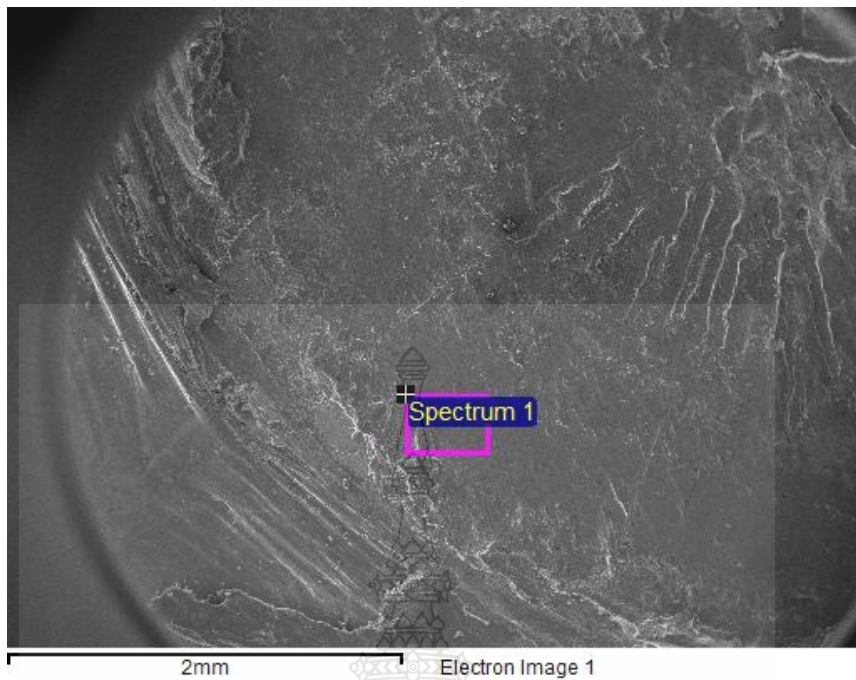


ภาพที่ ค.5 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลายบริเวณ อินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.1 Mpa

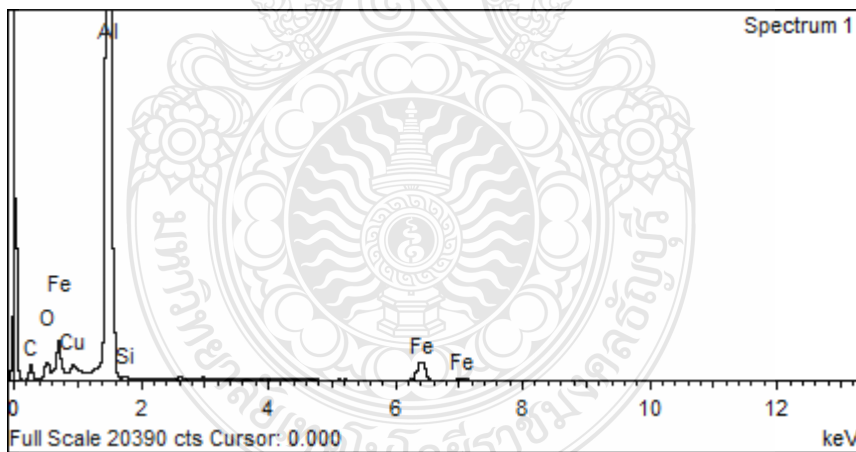


ภาพที่ ค.6 กราฟปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลาย บริเวณอินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.1 Mpa





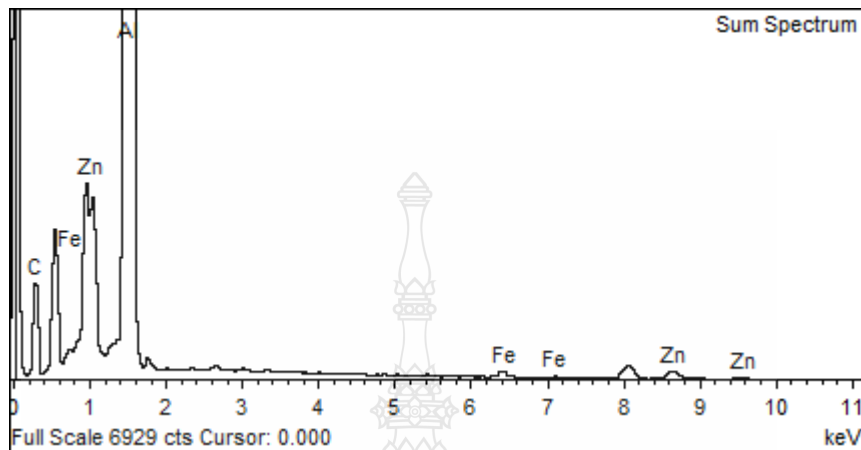
ภาพที่ ค.7 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลายบริเวณ อินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.3 Mpa



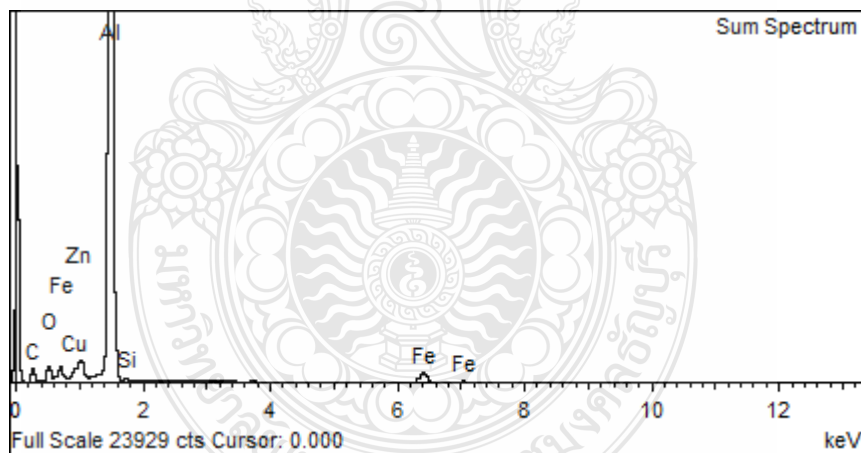
ภาพที่ ค.8 กราฟปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของรอยฟังกหลาย บริเวณอินเทอร์เฟซเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10 Cycles, แรงกด 0.3 Mpa

## ค.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping

1) กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

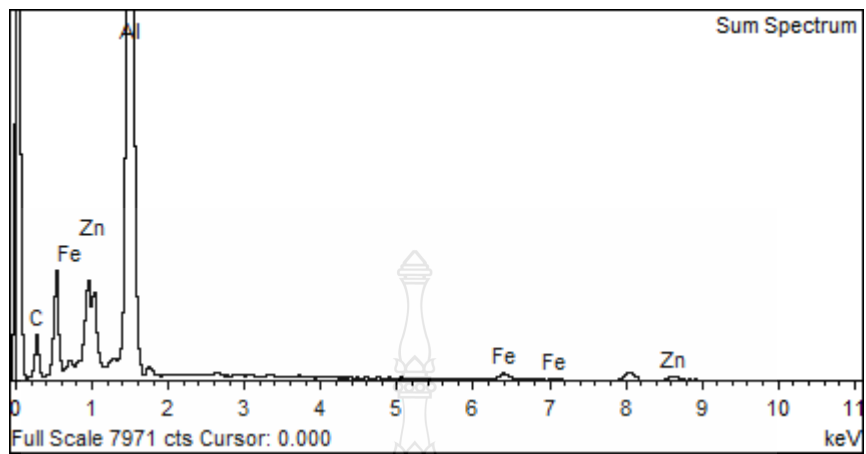


ภาพที่ ค.9 กราฟวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10Cycles, แรงกด 0.1 Mpa

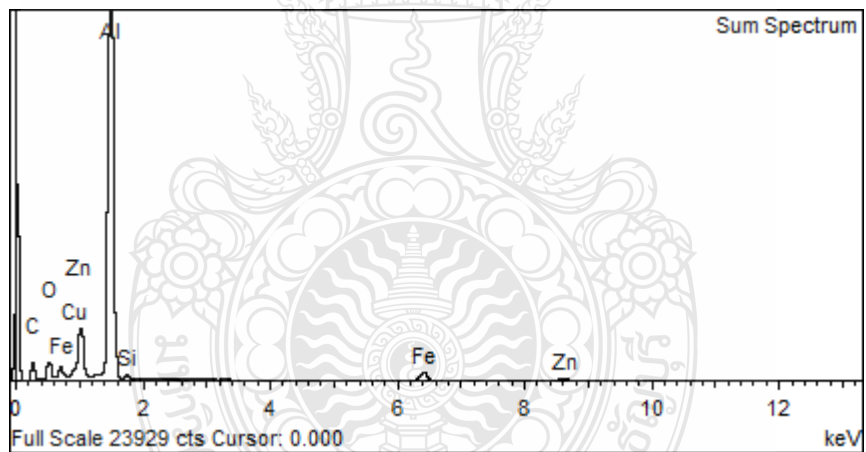


ภาพที่ ค.10 กราฟวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10Cycles, แรงกด 0.3 Mpa

2) กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่บนและแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง



ภาพที่ ค.11 กราฟวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10Cycles, แรงกด 0.1 Mpa



ภาพที่ ค.12 กราฟวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ของรอยเชื่อม กระแส 95 kA, เวลาเชื่อม 10Cycles, แรงกด 0.3 Mpa



ภาคผนวก ง

JIS Z 3139

Method of Macro Test for Section of Spot Welded Joint

## I. REQUIREMENTS

### 4.1 General Requirements

All the equipment of welding machine, ammeter, welding pressure meter, cycle counter, tension tester, and the others shall be maintained adequately and operated in normal condition.

### 4.2 Quality of Welds

#### 4.2.1 Surface Finish

The quality of surface finish shall conform to Table 3.

Table 3

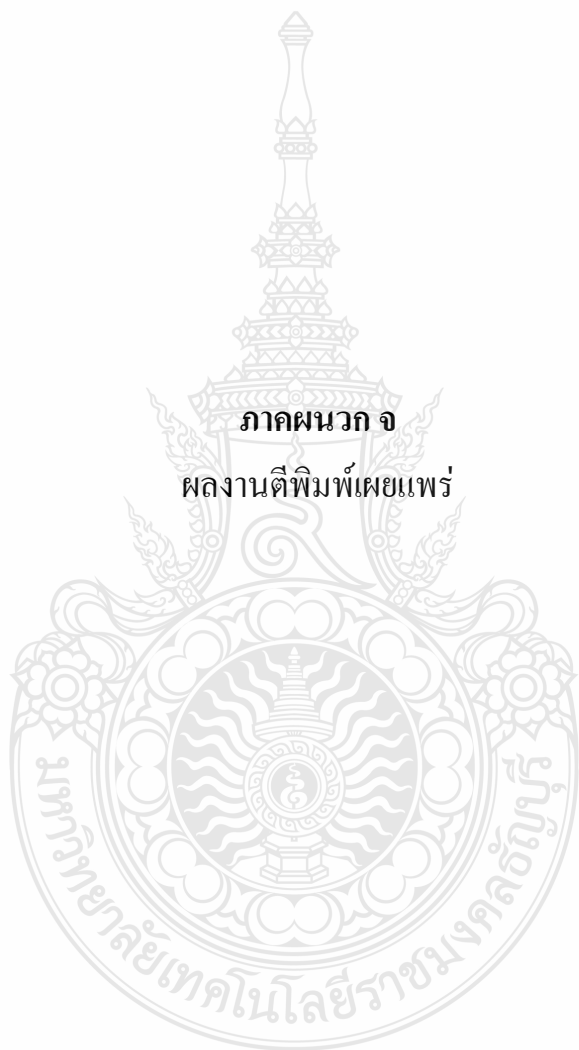
Classification	Quality of Surface Finish
Class A	High quality of surface finish is required. Surface shall be flat and free from indentation, cracks, and pits by visual inspection.
Class B	Fine quality of surface finish is required. Indentation shall be shown below. Free from cracks, distortions, pits, and surface flashes. <div style="text-align: center;"> </div>
Class C	Moderate quality of surface finish is required. Indentation shall be shown below. Free from cracks, pits, and surface flashes. <div style="text-align: center;"> </div>
Class D	Particular consideration is not required. Free from cracks.

#### 4.2.2 Cracks

A weld does not meet this specification if a crack can be visually seen on the surface of the weld or in the area adjacent to the weld.

#### 4.2.3 Indentation

In case of Class D welds, a spot weld is discrepant if the surface depression (a or c in Figure1) caused by either of the electrode tips exceeds 30% of the sheet thickness (b or d in Figure1).



Proceedings

# IE NETWORK CONFERENCE 2010

การประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2553

13-15 ตุลาคม 2553

โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์  
จังหวัดอุบลราชธานี



		หน้า
MEG 24	การศึกษาาระยะห่างขอบเขตที่ส่งผลต่อตัวแปรการตัดชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กมลกริช ตะวรรณวงษ์* และ ณัฐศักดิ์ พรหมศิริ	132
MEG 25	การตรวจสอบคุณภาพของระบบการวัดสำหรับเครื่องเขียนโรกราฟิ จิระพล ศรีเจริญผล* และ ปรีชา จำปาทอง และ ปภากร สุวานนท์	133
MEG 26	ผลของตัวแปรการเจียรนัยต่อความหยาบผิวศรีสังจาว วิทยศักดิ์*	134
MEG 27	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของงานกัดตัวอักษรบนไม้มะพร้าวด้วยเครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ศุภสิทธิ์ ระวีวงศ์* จักรนรินทร์ ฉัตรทอง สุชาติภักดิ์ วิจารณ์ภูด และ จตุพร ใจสว่างค์	135
MEG 28	การใช้อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในการลดปริมาณวันละอองโลหะจากการเชื่อม : การศึกษากระบวนการเตรียมลวดเชื่อม ยศวรศักดิ์ พงษ์อิน นีวัตร คุณาวงษ์* และ ศศนาพงศ์ เศรษฐฐาน	136
MEG 29	อิทธิพลของสมมูลการหมุนของลูกหินขัดข้าวต่อการแตกหักของข้าวสารในเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก รังสรรค์ ไชยเชษฐ์* และ สุข อังคนา สี	137
MEG 30	อิทธิพลสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการกัดกร่อนของรอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้า AISI1015 ปรกช สิริสุวรรณ* ศักดิ์ชัย จันทศรี สมชาย วนไทยสงค์ และ กิตติพงษ์ กิมะพงษ์	138
MEG 31	การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมตำแหน่งแบบจุดรอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD 45/45 ทิวาพร กาหลง* และ กิตติพงษ์ กิมะพงษ์	139





## ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ  
 ศ.ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค  
 รศ.ดำรงศักดิ์ ทวีแสงสกุลไทย  
 รศ.ดร.ปราโมทย์ ชูติมา  
 รศ.ดร.พัฒน งามประเสริฐวงศ์  
 ศ.ดร.ประเสริฐ อัครประภมพพงศ์  
 ศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์  
 ศ.ดร.นภัสสรวงศ์ ไอลสติกมัย  
 ศ.ดร.ประมวณ สุชีจรรย์วัฒน์

ศ.ดร.วิภาวี ชรรฆภรณ์พิลาศ  
 ศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตติเตจเจริญ  
 ศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร  
 ศ.ดร.สิริง ปรีชานนท์  
 ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย  
 อ.ภูมิ เหลืองงามมีกร  
 อ.สุรพงษ์ ศิริภักดิ์วัฒนา  
 ศ.ดร.มานพ เรียวตะชะ

### มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ชัชพันธ์ ชำญาคี  
 ศ.ดร.รุ่งรัตน์ กิลันเพ็ญ  
 ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เดือน  
 ดร.วราวุฒิ หวังวัชรกุล

ดร.สุวิกรมณี วิชากุล  
 ดร.จักรพันธ์ อรามพงษ์พันธ์  
 ดร.นันทชัย กานตานันตะ

### มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ

ศ.ดร.ชานนท์ มูลวรรณ

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.กรกฎ โยบัวเทศ  
 ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ  
 ศ.ดร.วิไลสมัย วรธนังเจดिया  
 ศ.ดร.วิชัย ฉัตรกนิวัฒน์  
 ศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร

ศ.ดร.ศักดิ์เกษม รมิ่งวงศ์  
 ศ.ดร.อภิชาติ โสภานแดง  
 ศ.ดร.อรรถพล สมบุศุภดี  
 ศ.ดร.สันติชัย ชิวสุสุทธิดีป

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.ปภากร สุนานนท์  
 ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ศ.ดร.พรศิริ จงกล  
 ศ.ดร.ยงยุทธ เสริมสุขีอนุวัฒน์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร.ภุชญา อัครรุ่งแสงกุล  
 ดร.กุศล ทิมพาน์สุทธิศรี  
 ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์  
 ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์

ศ.ดร.สมชาย พรชัยวิวัฒน์  
 รศ.ดร.อรุณกร เก่งพล  
 รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศ.ดร.ณัฐา กุปตะเรียว  
 ดร.ระพี กาญจนะ  
 ศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์  
 ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศ.ดร.พิเชษฐ์ เวศนารัตน์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร.สุพรรณ สุตสนะ

ศ.ดร.อภิวัฒน์ มุศดาบระ  
 ศ.ดร.นเร้า เจริญพร  
 รศ.ดร.ตรีทิศ เหล่าศิริหงษ์ทอง  
 รศ.ดร.มณฑล ศาสสนันท์  
 รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

### มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.จิรวรรณ คล้อยภักดิ์  
 ดร.วุฒิชัย วงษ์ศรีเนียร  
 ศ.ดร.วรารัตน์ กัมสัมฤทธิ์  
 ศ.ดร.สวัสดิ์ ภาวราช  
 ศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรมลศุคนธ์

### มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลภานต์  
 ศ.ดร.ชัชพล มงคลิก

ศ.ดร.ปยุตยา พิทักษ์กุล  
 ศ.ดร.ศุภชัย วรรณ

### มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร.จักรวาล คุณะติลก  
 ดร.ณัฐวิทย์ จันทร์สา

ศ.ดร.บรรรพญู ลีลา  
 รศ.เกษม วิวัฒน์ปัญญากุล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ดร.สุตสาคร อินธิเดช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงษ์
ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป	ดร.อรอุมา ลาสูนนท์	ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา	รศ.ดร.นภัทร ศิริวงศ์ไพศาว
ดร.บพิช บุปผาโชติ		ผศ.ดร.ธเนศ รัตนะวิไล	รศ.วรินทร์ รัตนะมณี
มหาวิทยาลัยรามคำแหง		ผศ.ดร.รัฐชนา สินธวาลัย	รศ.สมชาย ชูโณม
ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร		ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์	
มหาวิทยาลัยรังสิต		อ.เสกสรร สุธรรมานนท์	
ดร.พิษณุ มณีสมบัติ	ผศ.สินี สุขกรมใส	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	
ผศ.ดร.ชนวรรณ อัคราไพบุลย์	อ.สิลปชัย วัฒนเสธ	อ.จิตลดา ชิมเจริญ	อ.อรอุมา กอสนาน
ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ จริงจิต	อ.เตชโสภณ ถนอมสุข	อ.ทงตักดิ์ ทวีศรี	อ.อัญชลี สุพิทักษ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี	ดร.คลองเอียด วงนะวิซากร	อ.นิศากร สมสุข	
อ.กัม พรประเสริฐ	ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	
อ.นัทธพงษ์ นันทสำเริง	ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	ผศ.ประยูร สุรินทร์	ผศ.ชัยพฤกษ์ อภาเวท
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	อ.อนุวัฒน์ จุติลาภากร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง	
ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ	อ.พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์	ดร.วิญ ศรีสืบสาย	ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ่มนรินทร์
ดร.วราธร ปัญญางาม	อ.พิสทธิ์ รัตนแสนวงษ์	ดร.อนันท์ ไชยจตุวิช	ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
ดร.สิริเดช ชชาตินิยม	อ.วราพจน์ พันธุ์คง	ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข	รศ.ดร.บุตี มาตุจินท์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม	อ.สุพัฒนา เกษราพงศ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช
ดร.ธรีณี มณีศรี		ผศ.ดร.สภาน์ ถล่องบุญจิต	
อ.จักรพันธ์ กัณหา		มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	
อ.ชวลิต มณีศรี		ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเขาวน	ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี
อ.ธนิน ศรีระมย์		ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะใส	อ.ไท แสงเทียน
มหาวิทยาลัยศิลปากร		ผศ.ดร.ณิศกร ภูนิคม	ดร.จริยาภรณ์ อุณรงค์
ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง		ผศ.เจริญ ชุมมาล	อ.สะวันฉาย โพธิ์หอม
ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร		ผศ.ดร.นลิน เพ็ชรทอง	ดร.สันต์ โอฬารพิริยกุล
ผศ.วันชัย ลีลาแก้ววงศ์		ผศ.ดร.นุชธรา เกียรติกรกฎ	ดร.ธารชуда พันธุ์นิกุล
		ผศ.ดร.ปวีชา เกียรติกรกฎ	อ.ลลอง ฝัลดม
		ผศ.สุวิภา โชคสวัสดิ์	อ.สุระเรษฐ์ ก้อนจันทร์
		ผศ.อิศว ปัทมธรรมกุล	



## กำหนดการประชุมวิชาการชียงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2553

ณ โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี  
วันที่ 13 ตุลาคม 2553

08.00-09.00	ลงทะเบียน
09.00-10.00	พิธีเปิดงาน IE Network Conference 2010 การบรรยายพิเศษ โดย คุณเชาวลิต เอกบุตร เรื่อง "การปรับตัวของวิศวกรอุตสาหกรรมเพื่อให้เป็นต้องการ ของตลาดในเขตเศรษฐกิจอาเซียน"
10.00-10.45	พักรับประทานอาหารว่าง
10.45-11.00	การบรรยายพิเศษ โดย ศ.ดร.วราภรณ์ ขจิตวิยานกุล เรื่อง "การพัฒนาวิทยุกับกรณีศึกษาจริงให้เป็นงานวิจัย ระดับสากล"
11.00-12.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน
12.00-13.00	การนำเสนอบทความวิชาการ
13.00-15.00	พักรับประทานอาหารว่าง
15.00-15.15	การนำเสนอบทความวิชาการ
15.15-17.15	ประชุมหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกสถาบัน พิธีเลี้ยงรับรอง "เงินแสงหมู่เฮาชาวไออี" พร้อมชมการแสดงจาก ดุจดมานเย็น รากแก่น

### วันที่ 14 ตุลาคม 2553

09.00-10.30	การนำเสนอบทความวิชาการ
10.30-10.45	พักรับประทานอาหารว่าง
10.45-12.00	การนำเสนอบทความวิชาการ
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00-14.30	การนำเสนอบทความวิชาการ
15.00-18.00	City tour ภายใน อ.เมือง จ.อุบลราชธานี

### วันที่ 15-16 ตุลาคม 2553

ทัศนศึกษา ประเทศลาว

วันที่ห้อง	CK A12	CK A14	CK A15	CK A16	CK A17	MEG-29	EEM-2	OR-26	ECM-1	MAM-29	SEE-2	QM-G-39	WSI-22
09.00-09.15	MAM-46	OR-15	POM-39	OMG-22	MEG-39	ECM-2	OR-27	ECM-2	MAM-30	SEE-3	QM-G-40	WSI-23	
09.15-09.30	MAM-47	OR-16	POM-23	OMG-23	MEG-30	ECM-3	OR-28	ECM-3	MAM-31	SEE-4	QM-G-41	WSI-24	
09.30-09.45	MAM-48	OR-17	POM-24	OMG-24	MEG-31	ECM-4	OR-29	ECM-4	MAM-32	SEE-5	QM-G-42	WSI-25	
09.45-10.00	MAM-49	OTA-1	POM-25	OMG-25	MEG-32	ECM-5	OR-30	ECM-5	MAM-33	SEE-6	QM-G-43	WSI-26	
10.00-10.15	MAM-50	OTA-2	POM-26	OMG-26	MEG-33	ECM-6	OR-31	ECM-6	MAM-34	SEE-7	QM-G-44	WSI-27	
10.15-10.30	MAM-51	OTA-3	POM-27	OMG-27	MEG-34	ECM-7	OR-32	ECM-7	MAM-35	SEE-8	WSI-28	WSI-29	
10.30-10.45	MAM-52	OTA-4	POM-28	OMG-28	MEG-35	ECM-8	OR-33	ECM-8	MAM-36	SEE-9	WSI-30	WSI-31	
10.45-11.00	MAM-53	OTA-5	POM-29	OMG-29	MEG-36	ECM-9	OR-34	ECM-9	MAM-37	SEE-10	WSI-32	WSI-33	
11.00-11.15	MAM-54	OTA-6	POM-30	OMG-30	MEG-37	ECM-10	OR-35	ECM-10	MAM-38	SEE-11	WSI-34	WSI-35	
11.15-11.30	MAM-55	OTA-7	POM-31	OMG-31	MEG-38	ECM-11	OR-36	ECM-11	MAM-39	SEE-12	WSI-36	WSI-37	
11.30-11.45	MAM-56	OTA-8	POM-32	OMG-32	MEG-39	ECM-12	OR-37	ECM-12	MAM-40	SEE-13	WSI-38	WSI-39	
11.45-12.00	MAM-57	OTA-9	POM-33	OMG-33	MEG-40	ECM-13	OR-38	ECM-13	MAM-41	SEE-14	WSI-40	WSI-41	
12.00-13.00	MAM-58	OTA-10	POM-34	OMG-34	MEG-41	ECM-14	OR-39	ECM-14	MAM-42	SEE-15	WSI-42	WSI-43	
13.00-13.15	MAM-59	OTA-11	POM-35	OMG-35	MEG-42	ECM-15	OR-40	ECM-15	MAM-43	SEE-16	WSI-44	WSI-45	
13.15-13.30	MAM-60	OTA-12	POM-36	OMG-36	MEG-43	ECM-16	OR-41	ECM-16	MAM-44	SEE-17	WSI-46	WSI-47	
13.30-13.45	MAM-61	OTA-13	POM-37	OMG-37	MEG-44	ECM-17	OR-42	ECM-17	MAM-45	SEE-18	WSI-48	WSI-49	
13.45-14.00	MAM-62	OTA-14	POM-38	OMG-38	MEG-45	ECM-18	OR-43	ECM-18	MAM-46	SEE-19	WSI-50	WSI-51	
14.00-14.15	MAM-63	OTA-15	POM-39	OMG-39	MEG-46	ECM-19	OR-44	ECM-19	MAM-47	SEE-20	WSI-52	WSI-53	
14.15-14.30	MAM-64	OTA-16	POM-40	OMG-40	MEG-47	ECM-20	OR-45	ECM-20	MAM-48	SEE-21	WSI-54	WSI-55	

การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมด้านทานแบบจุดรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม  
AA1100 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD 45/45  
RESISTANCE SPOT WELDING FEASIBILITY STUDY OF AA1100 ALUMINUM ALLOY  
AND SGACD 45/45 ZINC COATED STEEL LAP JOINT

ทิวพร กาหลง\* และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์  
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110  
E-mail: kthi04@hotmail.com\*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD 45/45 ซึ่งทำการเชื่อมรอยต่อเกยใน 1 ลักษณะ คือ รอยต่อขึ้นทดสอบแรงดึงเฉือน โดยใช้อิเล็กโทรด Cu ทำจากทองแดงบริสุทธิ์ เส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดขนาด 7 มม. ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย กระแสเชื่อม 75-95 แอมแปร์ และเวลาในการกดแช่ 60-70 ไซเคิล ซึ่งงานที่ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงดึงเฉือน ผลการทดลองที่ได้สรุปได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกย และการยึดตัวกันและแทรกซึมเข้าด้วยกันที่อินเตอร์เฟซระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก สภาวะการเชื่อมที่ทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุด คือ กระแสไฟ 85 แอมแปร์ เวลาในการกดแช่ที่ 70 ไซเคิล ที่ค่าความแข็งแรงดึงเฉือน 1.468 kN

คำสำคัญ : การเชื่อมด้านทานแบบจุด, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี

Abstract

This research aims to study the effect of resistance spot welding parameters on AA1100 aluminum and SGACD 45/45 zinc coated steel the lap joint properties. The 1 kinds of the lap joint such as shear test specimen specimen were resistance spot welded. The electrode in this study was made of Pure copper (Cu) and had an electrode tip diameter of 7 mm. The welding parameters were a welding current of 75-95A and a holding time of 60-70 cycles. The welded specimens were prepared and shear strength tested. The summarized results are as follows. The variation of welding parameters affected the shear strength of the lap joint and the bonding and combination at the interface between aluminum and steel. The optimum condition that produced the maximum shear strength of 1.468 kN was the welding current of 85A and the holding time of 70 cycles.

**Keywords :** Resistance spot welding, Aluminum, Zinc coated steel

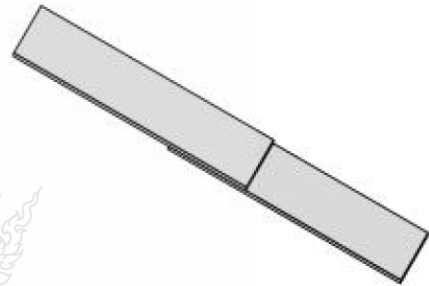
## 1. บทนำ

การเชื่อมด้วยกระบวนการต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ในการเชื่อมโลหะแผ่นที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมประเภทประกอบรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ครัวเรือน โดยมีข้อดีหลายประการ เช่นมีความรวดเร็วในการเชื่อม ใช้งานได้ง่ายมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ให้ประสิทธิภาพของแนวเชื่อมที่ดี ผิวงานหลังการเชื่อมเนียนเรียบ และมีค่าใช้จ่ายน้อย โดยคุณภาพในการเชื่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยในการเชื่อมอันได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงกด ขนาดของลวดเชื่อม และระยะเวลาในการกด แต่จะพบปัญหาหลังจากการเชื่อมที่จะเป็นตัวบ่งชี้ว่ารอยเชื่อมนั้นสมบูรณ์หรือไม่ เนื่องจากปัจจัยบนกรรมวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายนั้นยังไม่สามารถที่ตอบสนองความต้องการของการตรวจสอบได้ แต่จะสามารถใช้วิธีการตรวจสอบแบบทำลายในการตรวจสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาทางด้านต้นทุนการผลิตเวลาที่สูญหายไปขณะทำการตรวจสอบ ซึ่งมีผลงานทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมากมาย โดยผลงานวิจัยของนราธิป แสงชัย ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้ารีดเย็น SPCD (JIS G 3141) โดยหลักการออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคือ แรงกดระหว่างชิ้นงาน กระแสไฟฟ้า เวลาในการกดระหว่างชิ้นงาน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ให้ค่าความแข็งแรงดึง-เฉือนจากการเชื่อมอยู่ในระดับ 5.166 ถึง 5.492 KN (นราธิป และบรรเจิด, 2550)

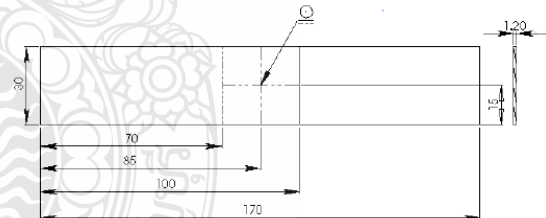
งานวิจัยอีกแนวทางหนึ่ง ที่ การเชื่อมความต้านทานแบบจุดมักพบปัญหาการเกิดที่ผิวหน้าของชิ้นงานที่ทำการทดสอบ คืออลูมิเนียมออกไซด์เกิดเป็นฟิล์มชั้นบางๆ เคลือบเอาไว้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำงานสำหรับพนักงานในการเชื่อม ซึ่งจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อจัดเก็บข้อมูลขั้นต้นโดยใช้พารามิเตอร์ช่วยในการศึกษาคุณสมบัติในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เช่น งานวิจัยของ (นิวัตร, 2551) การศึกษาผลกระทบของรอยเชื่อมเนื่องจากการเตรียมสภาพผิวหน้าของอลูมิเนียมผสมในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด จากผลการทดลองพบว่า ขนาดของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับระดับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสระหว่างการเชื่อมที่แตกต่างกันออกไป และความแข็งแรงของรอยเชื่อมแนวใหม่เพิ่มขึ้นตามขนาดและคุณภาพของรอยเชื่อม (นิวัตร, 2551)

## 2. วิธีการทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็น แผ่นอลูมิเนียม 1100 (99.50%Al, 0.10%Si, 0.10%Fe, 0.05%Mn, 0.10%Zn, 0.05-0.02%Cu, 0.1%อื่นๆ โดยน้ำหนัก) ความหนา 1 มม. และ เหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD (0.002%C, TR Si, 0.014%P, 0.024%S, 0.006%Cu โดยน้ำหนัก) ความหนา 1.2 มม. ชิ้นทดสอบทั้งสองมีความยาว 100 มม. และความกว้าง 30 มม. จากความยาวของวัสดุ โดยอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และเหล็กอยู่ด้านล่าง แสดงด้วยรูปที่ 1 ใช้ อิเล็กโทรดชนิด Cu ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด 7 มม. ซึ่งมีรูปร่างและขนาดดังรูปที่ 2



(ก) รอยต่อชิ้นทดสอบแรงดึงเฉือน



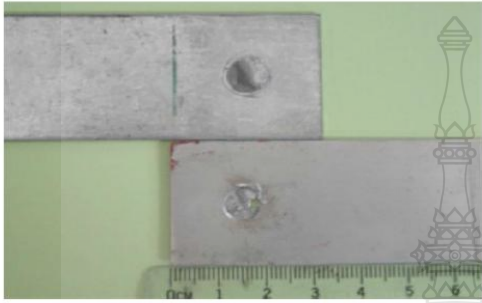
(ข) ขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึงเฉือน

รูปที่ 1 รูปร่างของรอยต่อเกย (หน่วย: มม.)

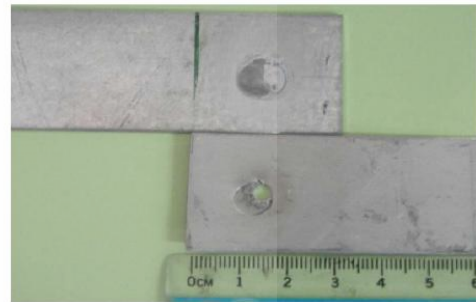
นำชิ้นงานทดสอบที่ได้ไปทำการขัดด้วยกระดาษทราย บริเวณผิวสัมผัสภายในรอยต่อเกยโดยใช้เบอร์ 400 และ 800 ตามลำดับ เพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวของวัสดุทั้งสองชนิดแล้วทำความสะอาดอีกรอบด้วยอะซิโตน เชื่อมด้วยกระแสไฟ 75 – 95 แอมป์แปร เวลาในการกดแหว์อิเล็กโทรด 60, 65 และ 70 ไซเคิลตามลำดับ มีลักษณะการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3 จากนั้นชิ้นงานที่เชื่อมแล้วจะ นำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงเฉือนและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป

เข้าไปในอลูมิเนียม ในพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ถ่ายโอนและจับตัวเป็น  $Al_3Fe$  ทำให้โลหะทั้งสองติดกันได้ เมื่อพิจารณาการฉีกขาดของรอยต่อในรูปที่ 4 พบว่ารอยต่อแยกที่ได้จากการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดมีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ การฉีกขาดของรอยต่อรอบๆ บริเวณที่เกิดการเชื่อมยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กเคลือบสังกะสี อลูมิเนียมเกิดการฉีกขาด

ตรงกลางจุดเชื่อมที่ไม่เหลือผิวหน้าของจุดเชื่อมเลย เนื่องจากอลูมิเนียมถูกเชื่อมติดกับผิวหน้าของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นจำนวนมาก จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัย การฉีกขาดที่เชื่อมรอยต่อแยกระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Stephens, 2004) อย่างไรก็ตามดังกล่าวนี้อาจมีการศึกษาเพื่อพิสูจน์ต่อไป



(ก) เวลาจุดแช่ 60 ไซเคิล กระแสไฟ 90 แอมแปร์

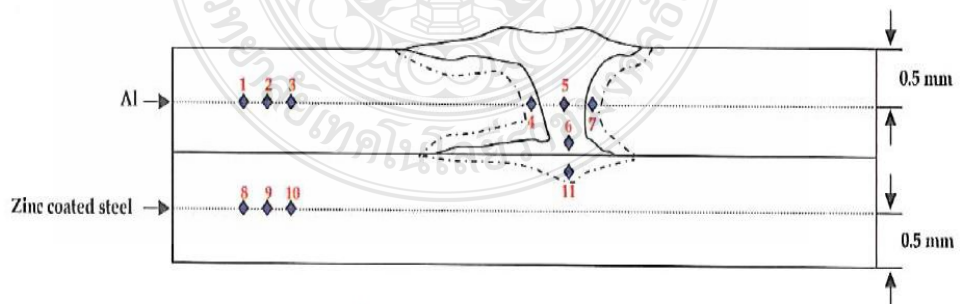


(ข) เวลาจุดแช่ 65 ไซเคิล กระแสไฟ 95 แอมแปร์



(ค) เวลาจุดแช่ 70 ไซเคิล กระแสไฟ 85 แอมแปร์

รูปที่ 4 ลักษณะชิ้นงานเชื่อมแบบรอยต่อแยกหลังการทดสอบแรงดึงเดือน



รูปที่ 5 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ตารางที่ 2 การทดสอบความแข็งแรง (Hardness Testing)

Point No.	Location	Hardness value
		Value (Scale HV)
1	BASE	53.8
2	BASE	53.3
3	BASE	53.8
4	HAZ	33.3
5	WELD	89.7
6	WELD	91.7
7	HAZ	33.6
8	BASE	119.6
9	BASE	120.7
10	BASE	120.5
11	HAZ	34.3

จุดที่ 1-3 เป็นค่าความแข็งแรงของอลูมิเนียมมีค่าเฉลี่ยที่ 53.6 HV จุดที่ 4 7 และ 11 คือบริเวณ heat affected zone (HAZ) ของแนวเชื่อม ค่าความแข็งแรงที่ได้คือ 33.3 HV จากค่าที่ได้นั้นในการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็ก ค่า heat affected zone (HAZ) มีค่าความแข็งแรงต่ำเพราะความร้อนจากอลูมิเนียมดึงออกไป จุดที่ 5 และ 6 คือบริเวณแนวเชื่อม มีค่าความแข็งแรงใน จุดที่ 5 คือ 89.7 HV และ จุดที่ 6 มีค่าความแข็งแรง คือ 91.7 HV ในส่วน จุดที่ 6 มีค่าความแข็งแรงมากกว่า จุดที่ 5 เนื่องจากคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็กเคลื่อนที่เข้าไปฝังอยู่อลูมิเนียมด้วยกระบวนการทางความร้อนและแรงกดของอิเล็กโทรด และ จุดที่ 8-10 เป็นค่าความแข็งแรงของเหล็กเคลือบสังกะสี ค่าเฉลี่ย คือ 120.3 HV

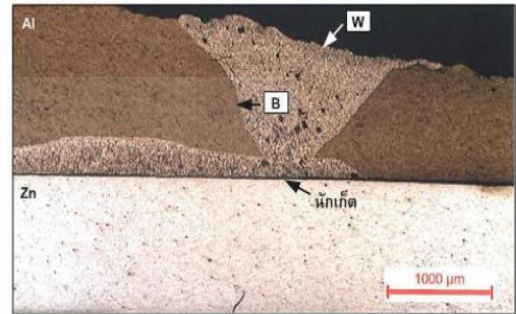
3.3 อิทธิพลของ กระแสไฟและเวลาในการกัดแซ่ที่ส่งผลต่อโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม

รูปที่ 6 ผลการทดสอบแบบโครงสร้างมหภาคสามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นอลูมิเนียมจะเห็นได้ว่าทั้งแรงกดและความร้อนจากความต้านทานทำให้อลูมิเนียมเกิดการหลอมละลาย พื้นที่สีน้ำตาลเข้มเป็นส่วน โครงสร้างเดิม ของอลูมิเนียม แสดงด้วยลูกศร B บริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะคล้ายรูปถ้วยมีสีน้ำตาลอ่อนเกิดจากกระแสไฟและแรงอัดของอิเล็กโทรดทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงด้วยลูกศร W

2. ส่วนที่เป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีพบว่าผิวหน้าของแผ่นเหล็กยังคงสม่ำเสมอปราศจากร่องรอยการหลอม ระดับ

ความร้อนสูงพอ จากร่องรอยที่ปรากฏจะมองเห็นเนื้อเหล็กในบริเวณที่วงมีลักษณะเป็นสารละลายของแข็ง ในขณะที่เนื้อเหล็กโดยรอบยังอยู่ในสภาพของการรีดเย็น



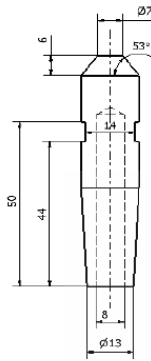
รูปที่ 6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

4. สรุปผลการทดลอง

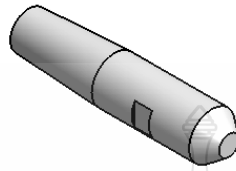
การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกลย และการยึดตัวกันและแทรกซึมเข้าด้วยกันที่อินเตอร์เฟซระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก สภาวะการเชื่อมที่ทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุด คือ กระแสไฟ 85 แอมแปร์ เวลาในการกัดแซ่ที่ 70 ไซเคิล ที่ค่าความแข็งแรงดึงเฉือน 1.468 kN

บรรณานุกรม

- นิวตริ คุณวงศ์. 2551 "การศึกษาผลกระทบของรอยเชื่อมเนื่องจากการเตรียมสภาพผิวหน้าของอลูมิเนียมผสมในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด" วิทยานิพนธ์. สาขาวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร.
- ธวัช หนีเพื่อง. 2551. "การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกลยระหว่างอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430" การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 จังหวัดสงขลา.
- ปรัชญา เพ็ญสุระ และบวรโชค ผู้พัฒนา. 2550. "การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเหนียวด้วยการวัดค่าความต้านทาน" การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 จังหวัดสงขลา.

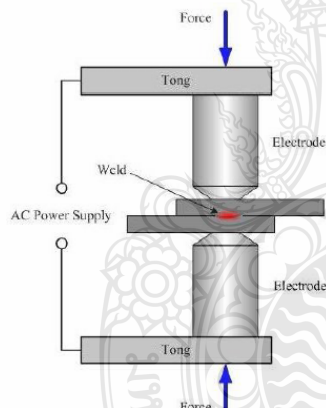


(ก) ขนาดของอิเล็กโทรด



(ข) รูปร่างของอิเล็กโทรด

รูปที่ 2 รูปร่างและขนาดของอิเล็กโทรด (หน่วย: มม.)



รูปที่ 3 ลักษณะการเชื่อม

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1 อิทธิพลของ กระแสไฟและเวลาในการกดแช่ที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเดือนแบบรอยต่อเกลย

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมที่เวลากดแช่ 60 ไซเคิล กระแสไฟตั้งแต่ 75 – 95 แอมแปร์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเดือนนั้นแตกต่างกันแต่ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุด คือ 1.152 kN ที่กระแสไฟ 90 แอมแปร์ เวลากดแช่ที่ 65 ไซเคิล กระแสไฟ 75 – 95 แอมแปร์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเดือนนั้นแตกต่างกันแต่ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงเดือน

สูงสุด คือ 1.269 kN ที่กระแสไฟ 95 แอมแปร์ ส่วนเวลากดแช่ 70 ไซเคิล พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเดือนมีค่าสูงสุดที่กระแส 85 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.468 kN ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเวลากดแช่และกระแสไฟอื่นๆ แสดงด้วยรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแรงดึงรอยต่อเกลย

เวลากดแช่ (cycles)	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงดึง (kN) ที่กระแสไฟ				
	75 A	80 A	85 A	90 A	95 A
60	0.92	1.03	1.02	1.15	0.47
65	0.57	1.09	0.52	0.56	1.26
70	0.24	1.32	1.46	0.49	1.36

#### 3.2 อิทธิพลของ กระแสไฟและเวลาในการกดแช่ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อเกลย

รูปที่ 5 การทดสอบค่าความแข็งแรงของการทดสอบรอยเชื่อมแบบต่อเกลยระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็กเคลือบสังกะสี พบว่าค่าที่ได้ในบริเวณแนวเชื่อมมีค่าสูงกว่าบริเวณ heat affected zone (HAZ) ดังตารางที่ 2 ในการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็กเคลือบสังกะสีในบริเวณ heat affected zone (HAZ) มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าเกิดจาก ความร้อนจากอลูมิเนียมถูกดึงออกไป ในการให้แรงกดอิเล็กโทรดกับชิ้นงานทั้งสอง ความต้านทานของเหล็กทั้ง 2 ชนิดไม่เท่ากันทำให้อลูมิเนียมหลอมมากกว่า นอกจากนี้อลูมิเนียมมีสภาพการนำความร้อนได้ดีกว่าทำให้ความร้อนแพร่กระจายในอลูมิเนียมได้ไกล ทำให้ความร้อนที่ผิวหน้าของเหล็กไม่สามารถทำให้เหล็กหลอมละลาย จึงมีเพียงบางจุดเล็กๆ เท่านั้นที่หลอมละลาย แรงดันจากอิเล็กโทรดและความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้สังกะสีที่เคลือบหลอมละลายไปด้วย จากแผนภาพสมมูล Zn-Al, Al-Zn, Al-Fe และ Fe-Zn พบว่าอลูมิเนียมละลายในเหล็ก สังกะสีละลายในอลูมิเนียม และอลูมิเนียมละลายใน เหล็กได้ปริมาณมากในสภาพของแข็งในขณะที่เหล็กละลายในอลูมิเนียมได้น้อยมากเพราะฉะนั้นทั้งความดันจากอิเล็กโทรด อุณหภูมิที่โลหะหลอมละลายอาจทำให้อะตอมของสังกะสีละลายในอลูมิเนียม ในสภาพที่กำลังหลอมทำให้ชั้นผิวหน้าที่มีสังกะสีเคลือบอยู่ในเหล็กหมดไปทำให้อะตอมของอลูมิเนียมที่หลอมละลายแพร่เข้าสู่ผิวหน้าของเหล็ก (โดยใช้ทฤษฎีของFick's Law) ทำให้อลูมิเนียมเกาะติดกับเหล็ก แต่เนื่องจากเหล็กมีเพียงเฉพาะบางจุดเท่านั้นที่หลอมทำให้อะตอมของเหล็กแพร่



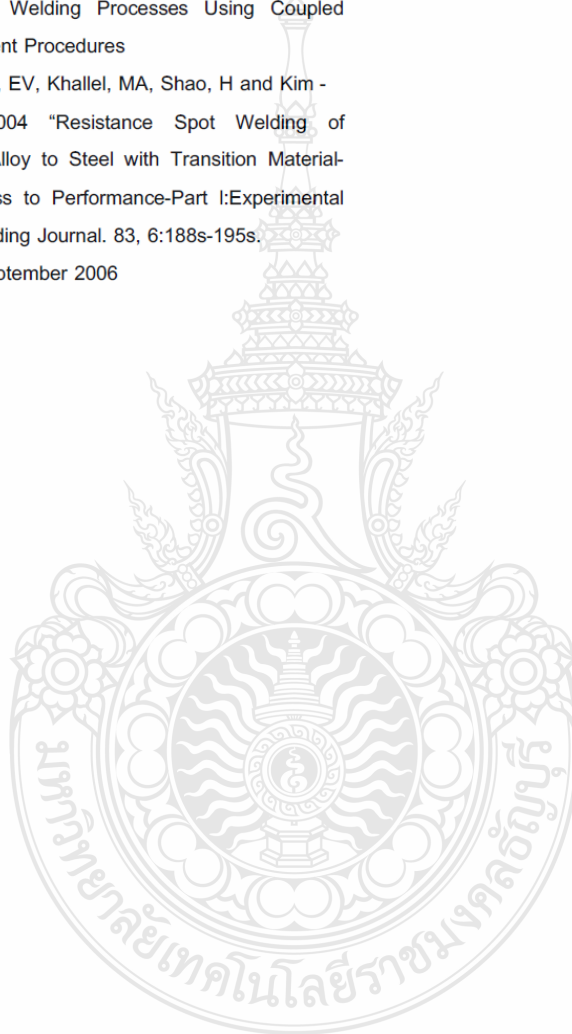
นราธิป แสงชัย และ บรรเจิด ดอนเนตรงาม. 2550

“การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการเชื่อม  
ความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้ารีดเย็น SPCD  
โดยหลักการออกแบบการทดลอง” การประชุม  
วิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัย  
ลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 จังหวัดสงขลา.

SUN X. AND P. DONG Analysis of Aluminum Resistance Spot Welding Processes Using Coupled Finite Element Procedures

Sun, X, Stephens, EV, Khallel, MA, Shao, H and Kim -  
chi, M. 2004 “Resistance Spot Welding of  
Aluminum Alloy to Steel with Transition Material-  
from Process to Performance-Part I:Experimental  
Study.” Welding Journal. 83, 6:188s-195s.

[www.ornl.gov](http://www.ornl.gov), September 2006



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางทิวพร ใจกว้าง
วัน เดือน ปีเกิด	17 มกราคม 2524
ที่อยู่	149 หมู่ 2 ต.บ้านกอก อ.เชิงไโน จ.อุบลราชธานี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ประสบการณ์การทำงาน	ครูอัตราจ้างประจำแผนกช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสาคร
พ.ศ. 2550-2554	อาชีพอิสระ
พ.ศ. 2554 - ปัจจุบัน	
เบอร์โทรศัพท์	082-2986314
อีเมล	Kthi04@hotmail.com

