

การศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด  
ต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม  
ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น  
A STUDY ON THE INFLUENCE OF SECOND-PULSE OF  
RESISTANCE SPOT WELDING ON MECHANICAL PROPERTIES  
OF AA5052 ALUMINUM ALLOY AND COLD-ROLLED STEEL  
WELDED JOINT

นางสาวณัฐพร รัตนราช  
MS. NATTAPORN RATTANARAJ  
นายปพนพัฒน์ ไชยมโน  
MR. PAPONPAT CHAIMANO

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON THE INFLUENCE OF SECOND-PULSE OF  
RESISTANCE SPOT WELDING ON MECHANICAL PROPERTIES  
OF AA5052 ALUMINUM ALLOY AND COLD-ROLLED STEEL  
WELDED JOINT



MS. NATTAPORN RATTANARAJ  
MR. PAPONPAT CHAIMANO

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อ  
คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และ  
เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

A STUDY ON THE INFLUENCE OF SECOND-PULSE OF RESISTANCE  
SPOT WELDING ON MECHANICAL PROPERTIES OF AA5052  
ALUMINUM ALLOY AND COLD-ROLLED STEEL WELDED JOINT

นักศึกษา

นางสาวณัฐพร รัตนราช รหัสประจำตัว 61010343  
นายปพนพัฒน์ ไชยมโน รหัสประจำตัว 61010620

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

## หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

## นักศึกษา

นางสาวณัฐพร รัตนราช  
นายปพนพัฒน์ ไชยมโน

## หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ปีการศึกษา

2564

## อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design และได้ศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมซึ่งตัวแปรตอบสนองของการศึกษานี้คือความสามารถการรับแรงดึงเฉือน และตัวแปรที่ศึกษาคือ 1) ปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง โดยมีค่าระดับคือ 5,000 7,500 และ 10,000 แอมแปร์ 2) ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง โดยมีค่าระดับคือ 5 15 และ 25 ไมโครวินาที โดยที่กำหนดตัวแปรคงที่คือ 1) ปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งโดยมีค่า 10,000 แอมแปร์ 2) ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งโดยมีค่า 15 ไมโครวินาที และ 3) แรงกดของหัวอิเล็กโทรดโดยมีค่า 3,300 นิวตัน พบว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่ 2 มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมซึ่งมีตัวแปรที่ส่งผลคือ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าและอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง โดยรอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเชื่อมด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองอยู่ที่ 5,000 แอมแปร์ และ 25 ไมโครวินาที ตามลำดับ การศึกษาโครงสร้างมหภาคพบว่าเกิดการหลอมละลายโลหะเพียงแค่มุมอลูมิเนียม ขนาดของรอยเชื่อมและระยะซึมลึกแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด การศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่ามีการประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกันระหว่างชิ้นงานทั้งสอง ความสามารถในการรับแรงดึงเฉือน ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากชนิดและลักษณะโครงสร้างชั้นสารประกอบ โดยรอยเชื่อมที่เชื่อมเพียงกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง พบสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_2$  และรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สองที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองอยู่ที่ 5,000 แอมแปร์ และ 25 ไมโครวินาที พบสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	A Study on The Influence of Second-Pulse of Resistance Spot Welding on Mechanical Properties of AA5052 Aluminum Alloy and Cold-Rolled Steel Welded Joint
<b>Student</b>	Ms. Nattaporn Rattanaraj Mr. Paponpat Chaimano
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

This research has the purpose to study on the influence of second-pulse of resistance spot welding on mechanical properties of AA5052 aluminum alloy and cold-rolled steel welded joint. The macrostructure and microstructure examination were analyzed as well. The tensile shear force was determined to be the response variable and the input variables were 1) level of welding current of 2<sup>nd</sup> pulse including 5,000, 7,500 and 10,000 amperes and 2) welding time of the 2<sup>nd</sup> pulse including 5, 15 and 25 cycles. The constant variables determined were 1) level of welding current of 1<sup>st</sup> pulse at 10,000 amperes and 2) welding time of the 2<sup>nd</sup> pulse at 15 cycles and 3) Electrode force at 3,300 newtons. The significant variables were welding time of the 2<sup>nd</sup> pulse and interaction term between both study variables determined. Welding current of 2<sup>nd</sup> pulse at 5000 amperes and welding time of 2<sup>nd</sup> pulse at 25 cycles provided the highest tensile shear force. The macrostructure examination found that the melting occurred only on the aluminum side. The size of nuggets and the penetration depth are directly related to the level of current and welding time in the of the 2<sup>nd</sup> pulse. The microstructure examination found intermetallic compounds at the joint between the base metals. The strength variation was a result of the types and characteristics of intermetallic compound structure. FeAl<sub>2</sub> was found on specimen welded only by 1<sup>st</sup> pulse. FeAl<sub>3</sub> was found on specimen welded by 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> pulse which was set at 5000 amperes and 25 cycles.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นนี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งสามารถสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี ทางคณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาฯ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้รวมทั้ง ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยเหลือ ตลอดจนชี้แนะแนวทางสำหรับการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ในตลอดเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และนายกำธร สุขพิมาย ที่อบรมสั่งสอนให้คำแนะนำความรู้ และให้ความช่วยเหลือในเรื่องของการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และวิธีการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ และขอขอบคุณครอบครัวที่ให้กำลังใจรวมทั้งเพื่อนทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ รวมไปถึงเหล่าเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือเสมอมา ทางคณะผู้ดำเนินการวิจัยหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจศึกษา เพื่อใช้เป็นสื่อจัดการเรียนรู้ และสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

นางสาวณัฐพร รัตนราช

นายปพนพัฒน์ ไชยมโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	5
2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	7
2.2.1 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม.....	7
2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม.....	7
2.2.3 แรงกดของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อม.....	9
2.3 อิเล็กโทรดของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	9
2.3.1 กลุ่ม A - ทองแดงผสม (Copper Based Alloy).....	9
2.3.2 กลุ่ม B - ของโลหะที่ทนความร้อนได้สูง (Refractory Metal Tips).....	9
2.4 อลูมิเนียมอัลลอย.....	11
2.5 เหล็กกล้า.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
2.6 การเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียมอัลลอย.....	14
2.6.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุด ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า .....	15
2.6.2 สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น .....	16
2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18
2.7 การทดสอบแรงดึงเฉือน .....	21
2.8 ลักษณะการแตกหักในการทดสอบแรงดึงเฉือน.....	22
2.9 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล .....	22
2.9.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง .....	24
2.9.2 คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง .....	25
2.9.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง.....	25
2.10 การตรวจสอบโครงสร้างวัสดุ.....	28
2.10.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope).....	28
2.10.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope) .....	28
2.10.3 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope)..	30
2.10.4 กล้องจุลทรรศน์แบบโพรบกวาด (Scanning Probe Microscopy) .....	30
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 กระบวนการออกแบบการทดลอง.....	35
3.2.1 การทดลองเชิง Factorial Design เพื่อทดสอบความสามารถการรับแรงดึงเฉือน.....	35
3.2.2 การทดลองสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม.....	38
3.3 กระบวนการและขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด .....	39
3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน .....	39
3.3.2 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดเพื่อทดสอบการรับแรงดึงเฉือน.....	39
3.3.3 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดขึ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ...	40
3.4 กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยแรงดึงเฉือน .....	41

## สารบัญ

	หน้า
3.5 กระบวนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม.....	42
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย</b>	
4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน .....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน.....	45
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design .....	45
4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง .....	51
4.3 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม .....	53
4.4 ความเสียหายของรอยเชื่อม .....	57
4.4.1 รูปแบบความเสียหายของรอยเชื่อม (Resistance Spot Welding Failure Modes) .	57
4.4.2 ระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อม .....	57
4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม .....	58
4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	62
4.6.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม.....	65
4.6.2 ความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม .....	66
4.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อม .....	67
4.7 การสึกหรอของหัวอิเล็กโทรดหลังผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด .....	70
4.8 การอภิปรายผลการวิจัย.....	71
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 การสรุปผล.....	75
5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองเชิง Factorial Design เพื่อทดสอบ ความสามารถการรับแรงดึงเฉือน.....	75
5.1.2 การวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบความเสียหายของรอยเชื่อม .....	75
5.1.3 การวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม .....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	76

## สารบัญ

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก ก. กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือน .....	82
ภาคผนวก ข. แบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) .....	89
ภาคผนวก ค. การทดสอบโดยใช้วิธีการ Steepest Ascent.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการวิจัย .....	4
ตารางที่ 2.1 ระบบการกำหนดสภาวะคอมมิวนิตีสำหรับออลูมิเนียมอัลลอยสำหรับการตัด (4 หลัก).....	12
ตารางที่ 2.2 ระบบการกำหนดสภาวะคอมมิวนิตีสำหรับออลูมิเนียมอัลลอยสำหรับการหล่อ (4 หลัก).....	12
ตารางที่ 2.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	21
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของออลูมิเนียมอัลลอยAA5052 .....	31
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น .....	32
ตารางที่ 3.3 ค่าของปัจจัยคงที่ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่หนึ่ง.....	36
ตารางที่ 3.4 ค่าของปัจจัยคงที่ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่หนึ่ง.....	37
ตารางที่ 3.5 ตารางการทดลองเชิง Factorial Design เพื่อทดสอบความสามารถการรับแรงดึง .....	38
ตารางที่ 3.6 การทดลองสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม .....	39
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม .....	45
ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA) .....	46
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression ที่วิเคราะห์ได้... ..	46
ตารางที่ 4.4 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA) หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) .....	47
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression ที่วิเคราะห์ได้ หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point).....	48
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงลักษณะกายภาพของรอยเชื่อมที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกัน.....	53
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงลักษณะกายภาพของรอยเชื่อมที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกัน (ต่อ) .....	54
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงลักษณะความเสียหายทางกายภาพของรอยเชื่อม ที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกันหลังการทดสอบแรงดึงเฉือน .....	55
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงลักษณะความเสียหายทางกายภาพของรอยเชื่อม ที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกันหลังการทดสอบแรงดึงเฉือน (ต่อ) .....	56
ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุด .....	57

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค .....	60
ตารางที่ 4.12 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง A ของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS.....	68
ตารางที่ 4.13 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง B ของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS.....	68
ตารางที่ 4.14 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง C ของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS.....	68
ตารางที่ 4.15 พลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs free energy) ของสารประกอบเชิงโลหะ ระหว่างธาตุเหล็กและอลูมิเนียม .....	73



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด .....	6
รูปที่ 2.2 แสดงวงจรวเวลาของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด .....	8
รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด .....	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า .....	16
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม .....	17
รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของเฟสในระบบ Fe-Al.....	17
รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงเส้นทางการแตกหักหลักระหว่างการทดสอบแรงดึงเฉือน.....	22
รูปที่ 2.8 ลักษณะและองค์ประกอบของกระบวนการทดลอง.....	23
รูปที่ 2.9 การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design).....	27
รูปที่ 2.10 กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ.....	27
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM .....	29
รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 (บน) เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (ล่าง).....	32
รูปที่ 3.2 ขนาดของแผ่นรองรับอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 (ซ้าย) เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (ขวา).....	33
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture).....	33
รูปที่ 3.4 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด PANASONIC YR-500CM2 .....	34
รูปที่ 3.5 หัวอิเล็กโทรดชนิดทองแดงผสม .....	34
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU Autograph AG-X-100KN .....	35
รูปที่ 3.7 การประกบชิ้นงานเพื่อเชื่อมความต้านทานแบบจุด .....	40
รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นงานการทดสอบแรงดึง .....	42
รูปที่ 3.9 ลักษณะการตัดขวาง Cross-Section ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม .....	42
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนแบบเย็น.....	43
รูปที่ 4.1 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัย .....	47
รูปที่ 4.2 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัย.....	47
รูปที่ 4.3 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point).....	49
รูปที่ 4.4 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point).....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.5 กราฟ 3 มิติแสดงค่าของตัวแปรตอบสนองในรูปของกราฟพื้นผิว .....	50
รูปที่ 4.6 Residual Plots ของค่าความสามารถรับแรงดึงเดือนรอยเชื่อมตาม การออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design.....	52
รูปที่ 4.7 ลักษณะรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า .....	58
รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่1 เชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไซเคิล ตามลำดับ .....	59
รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่2 เชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไซเคิล ตามลำดับ .....	59
รูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่3 เชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไซเคิล ตามลำดับ .....	59
รูปที่ 4.11 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่4 เชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไซเคิล ตามลำดับ .....	59
รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่5 เชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 7,500 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 15 ไซเคิล ตามลำดับ .....	60
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองเปรียบเทียบ เชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์ และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไซเคิล.....	60
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองที่1 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไซเคิล ตามลำดับ .....	62
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองที่3 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไซเคิล ตามลำดับ .....	63

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองเปรียบเทียบ เชื่อมด้วยกระแส พัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์ และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไมโครวินาที.....	64
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบชั้นของสารประกอบบริเวณรอยเชื่อม.....	67
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งการตรวจสอบปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS.....	67
รูปที่ 4.19 หัวอิเล็กโทรดด้านสัมผัสกับเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (ซ้าย) ด้านสัมผัสกับอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 (ขวา).....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

บทนี้เป็นกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษา ของปริญญาโทเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทาง กลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
4. ขอบเขตของการศึกษา
5. แผนการดำเนินงาน

### 1.1 ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมยานยนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจมาก โดยหลักการของ การออกแบบในอุตสาหกรรมยานยนต์ให้น้ำหนักเบาขึ้นเป็นหนึ่งในกลยุทธ์สำคัญในการตอบสนองความ ต้องการในการลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นมลพิษทางอากาศ ทำให้อุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบันมีความต้องการที่จะลดน้ำหนักของยานพาหนะ และการพัฒนายานพาหนะ ที่ประหยัดน้ำมันเป็นหลักโดยต้องมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น [1], [2]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อลูมิเนียมอัลลอยได้รับความสนใจในการใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวถัง ส่วน ปิดคลุม และแชสซีของตัวรถยนต์ ความสนใจของอลูมิเนียมอัลลอยยังแพร่ขยายไปทั่วทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากอลูมิเนียมอัลลอยมีความหนาแน่นต่ำ ประมาณการได้วามีความหนาแน่นเป็น 1 ใน 3 เท่าของเหล็ก มี อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ง่ายต่อการ นำไปใช้ใหม่ ขึ้นรูปได้ดีเยี่ยม และทนต่อการชนได้ดี นอกจากนี้ยังมีการคาดการณ์ว่าอลูมิเนียมอัลลอยจะถูก นำมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในอนาคต เพื่อนำมาแทนที่เหล็กบางส่วนที่เป็นวัสดุหลักในการสร้างยานยนต์ และยังพบการใช้งานอลูมิเนียมอัลลอยร่วมกับวัสดุอื่นๆเช่น เหล็กกล้าเป็นต้น [3]-[5]

ในการผลิตตัวถังรถยนต์จะมีกระบวนการที่สำคัญคือการเชื่อมโลหะหรืออัลลอยแผ่นที่มีรอยต่อแบบ เกยเข้าด้วยกันนั่นคือ การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) เป็นการเชื่อมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสำคัญอย่างมากและถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการเชื่อมสำหรับประกอบแผ่นโลหะเข้าด้วยกัน โดยได้ถูกใช้มานานแล้วในกระบวนการผลิตข้อต่อคุณภาพสูงของอุตสาหกรรมการบินและการขนส่ง การเชื่อมแบบนี้มีประสิทธิภาพราคาและไม่แพงโดยให้ผลผลิตสูง มีความน่าเชื่อถือสูงและใช้งานง่าย จึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจำนวนมาก นอกจากนี้โดยเฉลี่ยแล้วมีการพบการเชื่อมความต้านทานแบบจุดประมาณ 5000 จุดในการผลิตรถยนต์ 1 คัน [6] อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้านั้นยังมีความยากกว่าการเชื่อมระหว่างชิ้นงานโลหะชนิดเดียวกันอันเนื่องมาจากความแตกต่างของคุณสมบัติของอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า นอกเหนือจากนี้ยังมีปัญหาจากการเกิดสารประกอบเชิงโลหะขึ้น ซึ่งมีความเปราะที่นำไปสู่การเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักของรอยเชื่อมและทำให้เกิดการแตกหักในลักษณะ Interfacial failure เป็นการบ่งบอกได้ว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่ต่ำ [7]

ในปัจจุบันมีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงรอยเชื่อมในหลายรูปแบบคือ การใช้ค่ากระแสการเชื่อมที่สูงและใช้ระยะเวลาในการเชื่อมที่ต่ำเพื่อลดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ แต่ก็อาจจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์ให้สั้นลงรวมทั้งเกิดตำหนิที่รอยเชื่อม [2], [8] หรือการใช้แผ่นโลหะครอบ (Cover Plate) ซึ่งลดปริมาณกระแสไฟที่ใช้เชื่อมลงได้แต่มีผลเสียคือรอยเชื่อมจะมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นจากน้ำหนักของแผ่นโลหะครอบ (Cover Plate), นอกจากนี้ยังมีการใช้แผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี ซึ่งสามารถลดการเพิ่มจำนวนสารประกอบเชิงโลหะ แต่อาจจะส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสการเกิดรูพรุนในรอยเชื่อมจากการระเหยของสังกะสีที่เคลือบบนพื้นผิวของเหล็กกล้า และอีกวิธีการลดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะได้คือการใช้ Tapes หรือ Interlayer ด้วย Carbon Steel หรือ Copper Alloy บนผิวของเหล็กกล้าและ Stainless Steel หรือ Cr-Ni Alloy บนผิวของอลูมิเนียมอัลลอยแต่อย่างไรก็ตามก็อาจจะเป็นการเพิ่มขึ้นตอนในการผลิตรถยนต์ซึ่งส่งผลต่อรอบเวลาการผลิตได้ [9]

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยพัลส์คู่กับเหล็กกล้า ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ลดความเปราะของนิกเกิลที่เกิดโดยวัดได้จากค่าความแข็ง (Hardness) และทำให้เกิดการแตกหักแบบ Pullout Failure (PF) Mode ลักษณะเกิดการแตกหักขึ้นบริเวณโลหะพื้น แสดงว่าการแตกหักที่เกิดขึ้นเพราะความแข็งแรงของโลหะพื้นมิใช่รอยเชื่อม [10], [11] รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากพอสำหรับการรับแรงดึง อีกทั้งเป็นวิธีที่เพิ่มต้นทุนด้านระยะเวลาและการจัดการกระบวนการผลิตน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้อิเล็กทรอนิกส์หรือที่รวดเร็วจากการใช้ค่ากระแสไฟฟ้ที่สูงในพัลส์ที่หนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่พบว่ามีการศึกษาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้า

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองในการเชื่อมความต้านทานจุดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมในด้านความสามารถรับแรงดึงเฉือนระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และหาค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลทำให้รอยเชื่อมรับแรงเฉือนดึงได้มากที่สุด ซึ่งจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ในอนาคต รวมถึงสามารถเป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาการเชื่อมความต้านทานจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้าในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น ต่อความสามารถการรับแรงเค้นดึงของรอยเชื่อม และลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้น
2. เพื่อศึกษาหาอิทธิพลและแนวโน้มของตัวแปรกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมพัลส์ที่สองที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อม
3. เพื่อศึกษาค่าระดับของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองที่ทำให้รอยเชื่อมรับแรงเค้นดึงได้มากที่สุด

## 1.3 ขอบเขตปริญญาณิพนธ์

1. โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น โดยมีขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความกว้าง 30 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z3136 และการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมด้วยการทดสอบการรับแรงเค้นดึง
2. ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลอง ได้แก่ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง โดยกำหนดค่าระดับของตัวแปรด้วยหลักการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design
3. ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาครอยเชื่อมของชิ้นงานร่วมด้วย เพื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับการทดสอบคุณสมบัติทางกล ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าใจอิทธิพลของตัวแปรที่ได้ศึกษามากยิ่งขึ้น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจอิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อม
2. เข้าใจอิทธิพลและแนวโน้มของตัวแปรกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมพัลส์ที่สองที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อม
3. สามารถหาค่าระดับของตัวแปรกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมพัลส์ที่สองที่ทำให้รอยเชื่อมสามารถรับแรงเค้นดึงได้มากที่สุด เพื่อนำไปสู่การใช้งานจริงในอุตสาหกรรมรถยนต์หรือเป็นแนวทางในการวิจัยและต่อยอดเพิ่มเติมในอนาคตของเรื่องที่มีความเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดก่แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

1. โครงการวิจัยนี้ได้กำหนดระยะเวลาในการดำเนินงาน เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 และสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565 โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2564					พ.ศ. 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและกำหนดหัวข้อของงานวิจัย ระบุที่มาและความสำคัญของปัญหา กำหนดวัตถุประสงค์, ขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ										
2. ศึกษาค้นหาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
3. ออกแบบการทดลอง จัดซื้อวัสดุ และจัดเตรียมชิ้นงานสำหรับทดลอง										
4. ทำการเชื่อมชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้										
5. ตรวจสอบคุณสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบแรงดึงเฉือน และทำการวิเคราะห์ผล										
6. ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาครอยเชื่อมของชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล										
7. สรุปผลการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สอง และค่าระดับของตัวแปรที่เหมาะสม										
8. รวบรวมข้อมูลและผลการศึกษ จัดทำเล่มรายงานการวิจัย										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น โดยทำการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุด วัสดุที่ใช้ศึกษา วิธีการออกแบบการทดลอง และการศึกษาโครงสร้างจุลภาคซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแสดงดังต่อไปนี้

1. การเชื่อมความต้านทานแบบจุด
2. พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
3. อิเล็กโทรดของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
4. อลูมิเนียมอัลลอย
5. เหล็กกล้า
6. การเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียมอัลลอย
7. การทดสอบแรงดึงเฉือน
8. ลักษณะการแตกหักในการทดสอบแรงดึงเฉือน
9. การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล
10. การตรวจสอบโครงสร้างวัสดุ

#### 2.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) เป็นวิธีการหนึ่งในการยึดโลหะตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปเข้าด้วยกัน มันถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตมากมาย เพื่อเชื่อมชิ้นส่วนของแผ่นโลหะเข้าด้วยกัน เนื่องจากการเชื่อมแบบนี้สามารถทำได้รวดเร็ว ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการใช้งาน และมีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับข้อต่อแบบต่างๆและวัสดุ [12] การเชื่อมความต้านทานแบบจุดเป็นการนำแผ่นโลหะสองชิ้นหรือมากกว่า โดยที่จะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้มาประกบกันแล้วนำอิเล็กโทรดไปกดโลหะทั้งสองไว้ด้วยกันแล้วปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรด เนื่องจากความต้านทานของแผ่นโลหะนั้นมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ถูกส่งเข้ามา ทำให้มีการแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจนเกิดความร้อนแก่โลหะในบริเวณที่นำอิเล็กโทรดไปกดเอาไว้ ซึ่งพอโลหะได้รับความร้อนจนเกิดการละลายก็จะเกิดเป็นบ่อหลอมเชื่อม

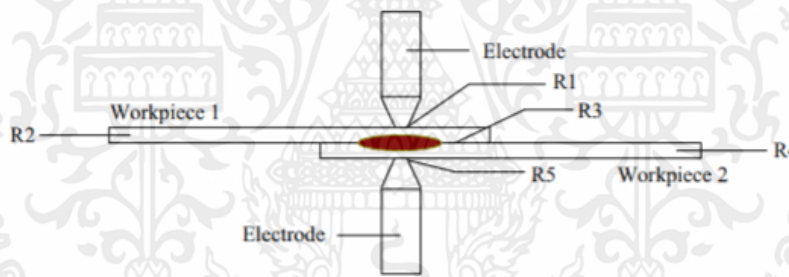
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะให้ยึดติดกัน หลังจากนั้นก็จะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นก็ค่อยๆหายไปจนบ่อหลอมนั้นแข็งตัวเกิดเป็นรอยเชื่อม โดยไม่ลึ้มที่จะส่งแรงกดลงไปยังอิเล็กโทรดเพื่อยึดโลหะทั้งสองเอาไว้ [6], [13] ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปตามกฎของจูล (Joule's law) แสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

โดยที่	Q	คือ ความร้อนที่ถูกป้อนเข้าไป (จูล)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	R	คือ ความต้านทาน (โอ姆)
	t	คือ เวลา (วินาที)

ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ ปริมาณของกระแสไฟฟ้า ขนาดของความต้านทาน และเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน



รูปที่ 2.1 แสดงความต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [6]

จากรูปที่ 1 พบว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดนั้นมีความต้านทานอยู่ 2 ประเภท คือ ความต้านทานของวัสดุ (Bulk Resistance:  $R_2 + R_4$ ) และความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรด (Contact Resistance:  $R_1 + R_5$ ) ซึ่งถูกพบได้ที่บริเวณที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับผิวของโลหะและผิวของแผ่นโลหะทั้งสองในบริเวณที่ติดกัน ( $R_3$ ) นอกจากนี้ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านบน ( $R_U$ ) และอิเล็กโทรดด้านล่าง ( $R_L$ ) นั้นส่งผลต่อความต้านทานรวมทั้งหมด 7 จุด ( $R_U + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_L$ ) ที่บริเวณ  $R_3$  นั้นควรจะมีค่าความต้านทานสูงที่สุดจากความต้านทานทั้งหมด เพื่อให้เกิดความร้อนได้ง่ายจนเกิดบ่อหลอมเชื่อมติดโลหะทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน ที่บริเวณความต้านทานของวัสดุนั้นมีความไวต่ออุณหภูมิแต่แรงกดนั้นไม่มีผลที่บริเวณนั้น ในขณะที่ความต้านทานผิวสัมผัสนั้นมีความไวสูงต่อการกระจายแรงกด อุณหภูมิ สภาพพื้นผิว

และคุณสมบัติของวัสดุ โดยปกติการเพิ่มแรงกดของอิเล็กโทรดนั้นจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะสองชนิด ทำให้ความต้านทานผิวสัมผัสมีค่าลดลง และสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมนั้นก็ส่งผลต่อความต้านทานของผิวสัมผัสด้วย [6]

## 2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

คุณภาพและประสิทธิภาพของรอยเชื่อมได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่ใส่เข้าไปในงานเชื่อม โดยความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า เวลาที่ใช้ในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรด

### 2.2.1 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

กระแสไฟฟ้าถือเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมากที่สุด โดยปกติถ้ากระแสไฟฟ้าต่ำจะส่งผลให้เกิดความร้อนในปริมาณน้อย ขนาดของรอยเชื่อมเล็ก ทำให้โลหะทั้งสองเชื่อมติดกันอย่างไม่สมบูรณ์ การเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้านั้นจะช่วยในการเพิ่มความร้อนที่เกิดขึ้น โดยเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ขนาดของรอยเชื่อมและแรงเฉือนดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าหากใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานระเบิดและโลหะทั้งสองเยื้องออกจากกันได้ ส่งผลให้ความแข็งแรงของบริเวณที่เชื่อมต่อกันลดลง [6]

### 2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม

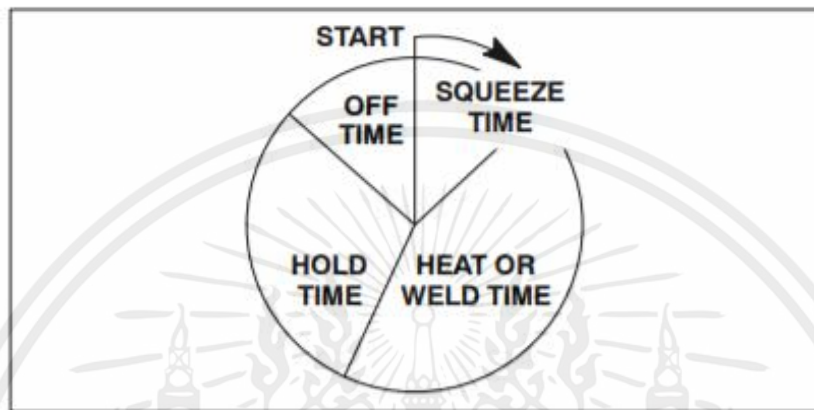
มีรายงานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ในลักษณะของกราฟเส้นตรงระหว่างเวลาที่ใช้ในการเชื่อมกับความร้อนที่เกิดขึ้น และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม ทำให้การเพิ่มเวลาในการเชื่อมนั้นจะส่งผลให้ปริมาณความร้อนมากขึ้น รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมไปถึงการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนดึง [14] เวลาที่ใช้ในการเชื่อมส่งผลกระทบต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าแต่ส่งผลน้อยกว่า ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมควรดูปริมาณของกระแสไฟฟ้าควบคู่กันไปด้วย เพราะว่าหากใช้เวลาในการเชื่อมมากเกินไปควบคู่กับกระแสไฟฟ้าปริมาณมากอาจจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการระเบิดและเยื้องออกจนเสียความแข็งแรงไป [6] ทำให้โลหะที่นำมาเชื่อมนั้นเกิดการละลายและทำให้เกิดโพรงอากาศภายในที่ตัวของชิ้นงานได้ [15] โดยเวลาที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดนั้นถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 ประเภท เรียงลำดับกันเป็นวงจรถัดนี้

2.2.2.1 เวลากด (Squeeze Time) คือ เวลาที่ใช้ในการกดอิเล็กโทรดลงกับชิ้นงานเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลมาสู่ชิ้นงานจนเกิดการเชื่อม

2.2.2.2 เวลาเชื่อม (Heat or Weld Time) คือ เวลาที่กระแสไฟฟ้าถูกปล่อยลงไปที่ชิ้นงานจนเกิดการเชื่อมขึ้น

2.2.2.3 เวลาอดค้าง (Hold Time) คือ เวลาที่ใช้ในการกดอิเล็กโทรดค้างไว้หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานเสร็จสิ้น

2.2.2.4 เวลาเย็นตัว (Cool Time) คือ เวลาหลังจากการนำอิเล็กโทรดออกจากชิ้นงานหลังจากทำการเชื่อมเสร็จ และเลื่อนไปยังจุดที่ต้องการเชื่อมถัดไปบนวัสดุ



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรเวลาของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [15]

โดยปกติแล้วการเชื่อมความต้านทานแบบจุดนั้นจะใช้เวลาในการเชื่อมที่สั้น เพราะโดยปกติแล้วการเชื่อมนั้นมักจะเกิดขึ้นในเครื่องเชื่อมแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ในเบื้องต้นนั้นได้มีการกล่าวถึงสมการการเกิดความร้อนจากกระแสไฟฟ้าไปแล้ว ต่อมาจึงได้ทำการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเชื่อมมาเชื่อมโยงกับสมการข้างต้น ทำให้สมการการเกิดความร้อนเปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ 2.2 [15]

$$Q = I^2RtK \quad (2.2)$$

โดยที่	Q	คือ ความร้อนที่ถูกป้อนเข้าไป (จูล)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	R	คือ ความต้านทาน (โอห์ม)
	t	คือ เวลา (วินาที)
	K	คือ ความร้อนที่สูญเสียไป (จูล)

### 2.2.3 แรงกดของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อม

แรงกดของอิเล็กโทรดมีอิทธิพลต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยมีอิทธิพลต่อความต้านทานผิวสัมผัสและพื้นที่ที่โลหะทั้งสองนั้นสัมผัสกัน โดยปกติแล้วการเพิ่มแรงกดของอิเล็กโทรดนั้นจะช่วยเพิ่มผิวสัมผัสของโลหะทั้งสองขึ้น แต่จะส่งผลให้ความต้านทานของผิวสัมผัสนั้นลดลง ถึงแม้ว่าการเพิ่มแรงกดของอิเล็กโทรดนั้นจะสามารถช่วยอุดช่องว่างและการเยื้องออกของชิ้นงานได้ แต่ถ้าหากเพิ่มแรงกดมากเกินไปก็จะส่งผลให้เกิดการเยื้องของแผ่นชิ้นงานทั้งสองมากกว่าเดิม แผ่นโลหะแยกออกจากกัน หรือทำให้ชิ้นงานนั้นเบี้ยว ในทางกลับกันหากแรงกดของอิเล็กโทรดน้อยเกินไปจะส่งผลให้ความต้านทานของผิวสัมผัสสูงจนเกิดความร้อนที่มากเกินไปจนอาจเกิดการระเบิดของชิ้นงาน เกิดรอยที่ผิวของชิ้นงาน และคุณภาพของรอยต่อไม่ดี

มีงานวิจัยว่าการเพิ่มแรงกดของอิเล็กโทรดนั้นจะลดความแข็งแรงของแรงเฉือนดึงที่เกิดขึ้น มีสาเหตุมาจากการที่ขนาดของรอยเชื่อมเล็กลง โดยเกิดขึ้นจากการที่แผ่นโลหะชิ้นบนนั้นแยกออกและความหนาแน่นของพลังงานในจุดที่มีการเชื่อมลดลง จึงมีความจำเป็นอย่างมากในการใช้แรงกดของอิเล็กโทรดให้เหมาะสมพอที่จะให้กระแสไฟฟ้าผ่านไหลผ่านได้ [6]

## 2.3 อิเล็กโทรดของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ทองแดงเป็นโลหะพื้นฐานในตัวหนีบอิเล็กโทรดและหัวอิเล็กโทรด (Electrode Tips) โดยจุดประสงค์ของการใช้อิเล็กโทรดคือเพื่อนำกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมส่งไปยังชิ้นงาน เป็นจุดศูนย์กลางของแรงกดสู่รอยเชื่อม และเพื่อนำความร้อนออกจากผิวของชิ้นงาน หัวของอิเล็กโทรดนั้นทำจากโลหะผสมทองแดงและวัสดุอื่นๆ โดย The Resistance Welders Manufacturing Association (RWMA) นั้นได้ทำการแบ่งหัวของอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

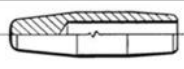
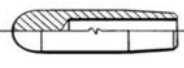
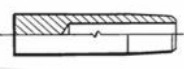
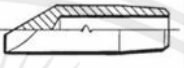

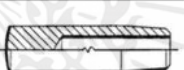
### 2.3.1 กลุ่ม A - ทองแดงผสม (Copper Based Alloy)

กลุ่ม A ทำมาจากโลหะทองแดงผสม สามารถจำแนกแยกย่อยออกมาได้อีกโดยใช้เลขโรมันเป็นตัวแบ่งแยกตั้งแต่ I-V โดยตัวเลขนั้นเรียงลำดับตามความบริสุทธิ์ของทองแดง ซึ่งอิเล็กโทรดกลุ่ม A คลาส I นั้นจะมีองค์ประกอบใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด ไล่ไปจนถึงกลุ่ม A คลาส V ที่มีองค์ประกอบของทองแดงบริสุทธิ์น้อยที่สุด โดยเมื่อตัวเลขของคลาสสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงและอุณหภูมิการหลอมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าจะลดลง

### 2.3.2 กลุ่ม B - ของโลหะที่ทนความร้อนได้สูง (Refractory Metal Tips)

กลุ่ม B มีส่วนประกอบของทองแดง ทั้งสแตนเลส และวัสดุอื่นๆผสมรวมกัน ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อดำเนินการสีกกร่อนและรับแรงอัดที่อุณหภูมิสูง กลุ่ม B สามารถจำแนกย่อยออกมาได้อีก โดยแบ่งตามตัวเลขตั้งแต่ 10-14 โดยกลุ่ม B คลาส 10 นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าของทองแดงอยู่ที่ 40% ค่าการนำไฟฟ้านั้นจะลดลงเรื่อยๆ

ตามตัวเลขของคลาสที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปโอเล็กโทรดในกลุ่ม B นั้นจะไม่นิยมในการนำไปใช้กับการเชื่อมความดันแบบจุด [15]

Type A	Pointed	
Type B	Dome	
Type C	Flat	
Type D	Offset	
Type E	Truncated	
Type F	Radius	

รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของโอเล็กโทรด [15]

ลักษณะของหัวโอเล็กโทรดหากแบ่งจำแนกตามประเภทการใช้งานจะแบ่งได้ทั้งหมด 6 ประเภท แสดงด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษรตั้งแต่ A-F ดังนี้

1. Type A – Pointed หรือ หัวโอเล็กโทรดปลายแคบ เหมาะสำหรับงานที่กำหนดจุดเชื่อมชัดเจนเชื่อมบนพื้นที่แคบหรือมีการตกแต่งยาก
2. Type B – Dome หรือ หัวโอเล็กโทรดปลายโค้งมน ลักษณะนี้ถูกนิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากการออกแบบที่รองรับปัญหาการจัดแนวที่ไม่ตรง เนื่องจากสามารถสัมผัสกับรีคิมได้ในระหว่างการเชื่อม ใช้ได้กับงานทั่วไปที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูง
3. Type C – Flat หรือ หัวโอเล็กโทรดแบบแบน ถูกใช้กับงานที่ต้องการพื้นผิวที่ละเอียด เช่น การเชื่อมส่วนของเครื่องสำอาง และการปรับสมดุลความร้อน ทำให้ช่วยลดการเอียงของรอยเชื่อม โดยจะเกิดการกระจายแรงและกระแสไฟฟ้าออกไปบนพื้นที่ผิวขนาดใหญ่
4. Type D – Offset คือ หัวโอเล็กโทรดที่ถูกออกแบบให้เอียงจุดศูนย์กลางของแชนก์ (Shank) เพื่อหลบสิ่งกีดขวาง และออกแบบเพื่อเชื่อมเฉพาะจุดในจุดที่แน่นอนได้ที่เป็นหน้าแปลนขนาดเล็กหรือในมุมแคบ
5. Type E – Truncated หรือ หัวโอเล็กโทรดหัวตัด ใช้กับงานที่ต้องการปรับปรุงพื้นผิวงานเชื่อมที่เรียบ โดยองศาของหัวตัดมีผลต่อความร้อนในการเชื่อม

6. Type F – Radius คือ หัวอิเล็กโทรดหน้ารัศมีกว้าง มักใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียม หัวอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดจุดสัมผัสที่ดีในการเชื่อมผ่านอลูมิเนียม และยังคงมีพื้นที่ผิวเพียงพอในการควบคุมรอยเชื่อมระหว่างการเชื่อม ใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง ความหนามาก งานที่มีพื้นผิวรูปทรงกลม

## 2.4 อลูมิเนียมอัลลอย

อลูมิเนียมอัลลอยเป็นโลหะผสมที่มีความหนาแน่นต่ำประมาณหนึ่งในสามของเหล็กกล้า มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ง่ายต่อการรีไซเคิล ทนต่อการชนได้ดี ขึ้นรูปได้ดี และต้านทานการกัดกร่อน มีการคาดการณ์ว่าอลูมิเนียมอัลลอยจะถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอนาคตเพื่อทดแทนเหล็กบางส่วนที่เป็นวัสดุก่อสร้างหลักในรถยนต์ โดยตัวของอลูมิเนียมอัลลอยนั้นได้ถูกใช้สำหรับโครงสร้างตัวถัง ส่วนปิดคลุม และแชสซีของตัวรถยนต์ [3], [16] นอกจากนี้ยังสามารถเสริมความแข็งแรงได้ด้วยการขึ้นรูปแบบเย็นหรืออบชุบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูง [4]

ข้อดีหลักอย่างหนึ่งของอลูมิเนียมอัลลอย คือ เป็นวัสดุที่มีความพร้อมใช้งานในรูปแบบกึ่งสำเร็จรูปที่หลากหลาย เช่น การหล่อขึ้นรูป การอัดขึ้นรูป และแผ่น ซึ่งทั้งหมดนี้เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก (Mass Production) และเป็นทางเลือกสำหรับนวัตกรรมใหม่ (Innovative Solution) ทำให้ความสะดวกและการมีส่วนร่วมที่ครบวงจรนี้ส่งผลให้มีความต้องการสูงสำหรับการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง คุณภาพดี และต้นทุนที่คุ้มค่า [16]

ทุกวันนี้อลูมิเนียมในโครงสร้างรถยนต์และอุปกรณ์เสริมนั้นทำให้สามารถผลิตรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา มีความปลอดภัยมากขึ้น และมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในแง่ของอัตราเร่ง การควบคุมรถยนต์ และระยะเบรก ในทางกลับกัน ยานพาหนะที่เบากว่าเหล่านี้ช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) และระดับมลพิษทั่วไปเนื่องจากการที่มีน้ำหนักเบา อลูมิเนียมอัลลอยมีหลากหลายชนิดมากมายเมื่อเทียบกับโลหะผสมชนิดอื่นที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยอลูมิเนียมอัลลอยถูกจำแนกตามระบบการกำหนดมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับจากหน่วยงานมาตรฐานสากลหรือโดยหน่วยงานมาตรฐานของแต่ละประเทศ โดยระบบการกำหนดโลหะผสมอลูมิเนียมของสมาคมอลูมิเนียมได้รับการยอมรับจากสถาบันมาตรฐานแห่งชาติอเมริกัน (ANSI) ให้เป็นมาตรฐานระดับประเทศในสหรัฐอเมริกาและรวมอยู่ในมาตรฐาน ANSI H35.1. และ H35.2.8 นอกจากนี้ยังมีข้อตกลงในระดับสากลที่ยอมรับว่าระบบการกำหนดโลหะผสมของสมาคมอลูมิเนียม นั้นเป็นมาตรฐานสากล เป็นที่ยอมรับโดยประเทศผู้ผลิตอลูมิเนียมเกือบทั่วโลก

นอกจากนี้ทางสมาคมอลูมิเนียมยังได้จัดตั้งระบบการกำหนดตัวเลขสีหลักสำหรับอลูมิเนียมอัลลอยที่ได้รับการอนุมัติจากสมาคมวิศวกรยานยนต์ แม้ว่าระบบการกำหนดอลูมิเนียมอัลลอยนี้จะไม่ได้รับการให้สัตยาบันในระดับสากล ดังนั้น CEN (European Committee for Standardization) จึงได้จัดตั้งระบบการ

กำหนดตัวเลขห้าหลักสำหรับการหล่อโลหะผสม ซึ่งมีความแตกต่างหลายประการจากระบบสี่หลักของสมาคมอลูมิเนียม [5]

ตารางที่ 2.1 ระบบการกำหนดสมาคมอลูมิเนียมสำหรับอลูมิเนียมอัลลอยสำหรับการตัด (4 หลัก) [5]

เกรดของอลูมิเนียมอัลลอย	องค์ประกอบของโลหะผสม
1xxx	อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.00% หรือมากกว่า)
2xxx	โลหะผสม Al-Cu
3xxx	โลหะผสม Al-Mn
4xxx	โลหะผสม Al-Si
5xxx	โลหะผสม Al-Mg
6xxx	โลหะผสม Al-Mg-Si
7xxx	โลหะผสม Al-Zn
8xxx	โลหะผสม Al + องค์ประกอบอื่นๆ
9xxx	ไม่มีการใช้งานชุดนี้

ตารางที่ 2.2 ระบบการกำหนดสมาคมอลูมิเนียมสำหรับอลูมิเนียมอัลลอยสำหรับการหล่อ (4 หลัก) [5]

เกรดของอลูมิเนียมอัลลอย	องค์ประกอบของโลหะผสม
1xx.x	อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.00% หรือมากกว่า)
2xx.x	โลหะผสม Al-Cu
3xx.x	Al-Si + Cu และ/หรือ Mg
4xx.x	Al-Si
5xx.x	Al-Mg
7xx.x	Al-Zn
8xx.x	Al-Sn
9xx.x	Al + องค์ประกอบอื่นๆ
6xx.x	ไม่มีการใช้งานชุดนี้

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (RSW) ของอลูมิเนียมอัลลอยนั้นมีปัญหาบางอย่าง เนื่องจากอลูมิเนียมอัลลอยมีความต้านทานวัสดุ (Bulk Resistance) การนำความร้อนและการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าเหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้จำเป็นต้องมีการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าเหล็ก 2-3 เท่าในการเชื่อมอลูมิเนียมอัลลอย นอกจากนี้ยังมีการปรากฏให้เห็นของชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของอลูมิเนียมอัลลอย ทำให้เกิดความต้านทานการสัมผัสสูงและเกิดความร้อนขึ้น สิ่งเหล่านี้นำไปสู่การเสื่อมสภาพของปลายอิเล็กโทรดอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอยมีความอ่อนไหวต่อเงื่อนไขของกระบวนการที่ผิดปกติ เช่น แนวแกนไม่ตรง มุมไม่ตรงแนว และความพอดีตัวที่แย่กว่าของเหล็กกล้า ดังนั้น ความสนใจที่เพิ่มขึ้นใน RSW ที่มีปริมาณสูงของอลูมิเนียมอัลลอย จึงมาพร้อมกับความท้าทายในการทำความเข้าใจและปรับปรุงกระบวนการโครงสร้าง คุณสมบัติ และความสัมพันธ์ด้านประสิทธิภาพให้ดีขึ้น [17]

ผลงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 6,300-9,800 แอมแปร์ ซึ่งเปลี่ยนระดับด้วยค่า 1,000 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 5-25 ไซเคิล และแรงกดหัวอิเล็กโทรดอยู่ในช่วง 1658-3621 นิวตัน ด้วยหัวอิเล็กโทรด Cu-Cr เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร และมีการใช้แผ่นโลหะครอบ (Cover Plate) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นประกบบริเวณรอยเชื่อมทั้งด้านบนและด้านล่างของอลูมิเนียมอัลลอย เพื่อลดการใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงในระหว่างการเชื่อม เนื่องจากคุณสมบัตินำไฟฟ้าของอลูมิเนียมอัลลอยซึ่งโดยปกติแล้วจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมสูงมาก แต่อาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของหัวอิเล็กโทรดให้มีค่าลดลง ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ความแข็งแรงในด้านความสามารถรับแรงดึงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น และยังเพิ่มขนาดพื้นที่หลอมละลายของโลหะ (Nugget) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของแรงกดของหัวอิเล็กโทรดจะส่งผลให้ความแข็งแรงและขนาดพื้นที่หลอมละลายของโลหะ (Nugget) มีค่าลดลง การวัดค่าความแข็งแรงบริเวณพื้นที่หลอมละลายของโลหะ (Nugget) จะมีค่าน้อยกว่าโลหะพื้น (Base Metal) โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด นอกจากนี้ยังพบว่าหากขนาดพื้นที่หลอมละลายของโลหะ (Nugget) มีค่ามากกว่า 5.81 มิลลิเมตร ลักษณะการแตกหักของรอยเชื่อมจะเปลี่ยนจาก Interfacial Failure Mode เป็น Pullout Failure Mode [19]

## 2.5 เหล็กกล้า

เหล็กกล้านั้นถือว่าเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์มาอย่างช้านาน เหล็กกล้านั้นมีข้อดีคือมีช่วงของความต้านทานแรงดึงที่จุดครากที่กว้างและยังมี modulus ของสภาพยืดหยุ่นที่สูง ต้นทุนต่ำ มีอายุการใช้งานที่นาน ทนต่อการกัดกร่อนด้วยการเคลือบสังกะสี เชื่อมง่าย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดูดซับพลังงานจากการชนได้ดี และยังสามารถนำไปประยุกต์ปรับเปลี่ยนได้หลากหลายมาก

แต่เหล็กกล้านั้นก็ยังคงมีข้อเสียบางประการคือ เหล็กกล้าที่หนักกว่าวัสดุอื่นๆ และสีกร่อนได้ง่ายมากหากไม่เคลือบผิว แต่ก็ได้มีการผลิตเหล็กกล้ากำลังสูง (High Strength Steel) ในรูปแบบใหม่ที่มีน้ำหนักเบาลงกว่าเดิม ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงให้มีการใช้เชื้อเพลิงที่น้อยลง มีความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดียิ่งขึ้น ทำให้ต้องมีการเอาใจใส่เพิ่มเติมในการให้ความสำคัญกับการออกแบบ การประดิษฐ์ และเทคนิคการประกอบโดยบริษัทยานยนต์สำหรับเหล็กชนิดใหม่นี้ เนื่องจากการใช้เหล็กไม่เพียงแต่ใช้กับตัวรถเท่านั้น แต่ยังรวมถึงเครื่องยนต์ แชสซี ล้อ และชิ้นส่วนและส่วนประกอบอื่นๆ อีกจำนวนมาก เหล็กกล้าในอุตสาหกรรมยานยนต์นั้นสามารถจำแนกได้หลายวิธี โดยวิธีการแยกประเภททั่วไปนั้นจะรวมไปถึงเหล็กกล้ากำลังต่ำ (Low Strength Steel) เหล็กกล้ากำลังสูง (High Strength Steel: HSS) และเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงขั้นสูง (Advanced High Strength Steel: AHSS) และเหล็กประเภทอื่นๆ ได้แก่ เหล็กขึ้นรูปร้อน เหล็กที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน และเหล็กที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานเฉพาะ

วิธีการจำแนกประเภทอื่นนั้นจะขึ้นอยู่กับความกว้างของความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก เนื่องจากเกรดเหล็กทั้งหมดมีความหนาแน่นและโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากัน โดยเหล็กกล้าที่มีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากต่ำกว่า 210 MPa นั้นถือว่าเป็นเหล็กกล้าธรรมดา โดยเหล็กกล้ากำลังสูงนั้นจะมีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากตั้งแต่ 210 – 550 MPa และมีค่าความแข็งแรงทางแรงดึงตั้งแต่ 270-700 MPa ส่วนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Ultra/Advanced High Strength Steels: UHSS or AHSS) นั้นจะมีค่าความแข็งแรงทางแรงดึงมากกว่า 550 MPa และมีค่าความแข็งแรงทางแรงดึงมากกว่า 700 MPa

การจำแนกประเภทที่สามขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลหรือพารามิเตอร์การขึ้นรูปของเหล็กชนิดต่างๆ เช่น ค่าการยืดตัวทั้งหมด (Elongation) เลขชี้กำลังงานชุบแข็ง (Work Hardening Exponent: ค่า  $n$ ) หรือ อัตราส่วนการขยายตัวของรู ( $\lambda$ ) [18]

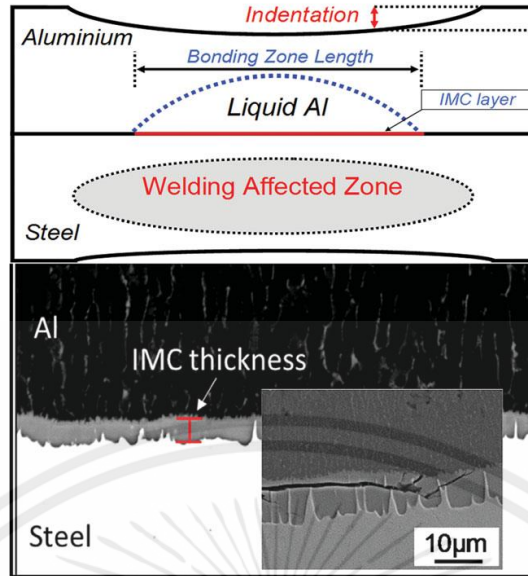
## 2.6 การเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียมอัลลอย

ปัจจุบันมีความพยายามมากมายในการศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันด้วยวิธีการเชื่อมหลายรูปแบบ เพื่อเป็นการผสมผสานข้อดีของวัสดุชนิดนั้นๆ และปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานหรือความต้องการทางอุตสาหกรรมทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ ต้นทุน สิ่งแวดล้อม ความแข็งแรง การต้านทานการกัดกร่อน โดยพบว่าในอุตสาหกรรมรถยนต์มีความต้องการลดน้ำหนักของตัวถังเพิ่มมากขึ้นเพื่อลดการปล่อยมลพิษโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการขนส่ง เนื่องจากอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่สูงเพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะที่มีน้ำหนักมาก โดยในปีค.ศ. 2009 สหภาพยุโรปได้มีการออกระเบียบว่าด้วยการส่งเสริมการพัฒนาพาหนะที่มีน้ำหนักเบาในอุตสาหกรรมรถยนต์ขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของวัสดุน้ำหนักเบาเพื่อนำมาใช้ร่วมกับวัสดุเดิมคือเป็นเหล็กกล้าที่ถูกใช้งานเป็นหลักในการสร้างยานพาหนะโดยเฉพาะรถยนต์ โดยวัสดุที่มีความ

เป็นไปได้คือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง แมกนีเซียมอัลลอย วัสดุคอมโพสิต และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อลูมิเนียมอัลลอยที่มีจุดเด่นในหลายๆด้าน ดังนั้นจึงสามารถพบเห็นโครงสร้างที่มีการผสมผสานระหว่างวัสดุ ชนิดเดิมคือเหล็กกล้าและวัสดุแบบใหม่ที่มีน้ำหนักเบาเช่นอลูมิเนียมได้ แต่อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติของวัสดุ ทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันในหลายๆด้าน ทั้งจุดหลอมเหลว คุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติทางไฟฟ้า ทำให้ในระหว่างกระบวนการเชื่อมมีโอกาสเกิดจุดบกพร่องและสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเปราะสูงซึ่งจะ ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ลดลงได้ รวมทั้งโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่จะมีความแตกต่างจาก รอยเชื่อมจากวัสดุชนิดเดียวกัน

### 2.6.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้าที่ถูกเชื่อมจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด จะพบบริเวณของการหลอมละลาย (Bonding Zone) ในฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอยเนื่องจากการหลอมละลายจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม, สารประกอบเชิงโลหะ บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิดซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะและโลหะเหลวที่ได้รับผลจากความร้อนในการเชื่อมโดยบริเวณนี้เป็นจุดอ่อนของรอยเชื่อม นอกจากนี้ยังพบระยะกด (Depth of Electrode Indentation) ทั้ง 2 ฝั่งของวัสดุเนื่องจากความเครียดที่เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นร่วมกับแรงกดหัวอิเล็กโทรด และลักษณะของหัวอิเล็กโทรด โดยการหลอมละลายในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่าง อลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้าจะเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.1 ในฝั่งของเหล็กกล้าเนื่องจาก ความต้านทานไฟฟ้าของเหล็กกล้ามีค่าสูงกว่า จากนั้นความร้อนจะถูกส่งไปยังบริเวณด้านอลูมิเนียมอัลลอย กระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวของอลูมิเนียมอัลลอยขึ้นเนื่องจากจุดหลอมเหลวที่ต่ำและการนำ ความร้อนสูง ส่วนการเกิดพื้นที่หลอมละลายฝั่งเหล็กกล้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกไป โดย บริเวณรอยเชื่อมฝั่งอลูมิเนียมอัลลอยจะถูกหลอมเป็นของเหลว และฝั่งเหล็กกล้าโดยมากจะเป็นของแข็ง ซึ่ง กระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกลไกของการเล่นประสาน นอกเหนือจากนี้การเปียก (Wetting) ของ เหล็กกล้าด้วยน้ำโลหะเหลวของอลูมิเนียมอัลลอยยังส่งผลถึงการเกิดรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อม อีกทั้งชั้น ออกไซด์บนพื้นผิวของอลูมิเนียมอัลลอยสามารถส่งผลถึงความสามารถในการเปียก (Wettability) เช่นกัน โดย ที่ความร้อนและแรงกดที่ทำระหว่างกระบวนการสามารถช่วยสลายตัวชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของอลูมิเนียมอัลลอยซึ่งจะทำให้การเปียก (Wetting) ของเหล็กกล้ามีมากยิ่งขึ้น [2]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า [2]

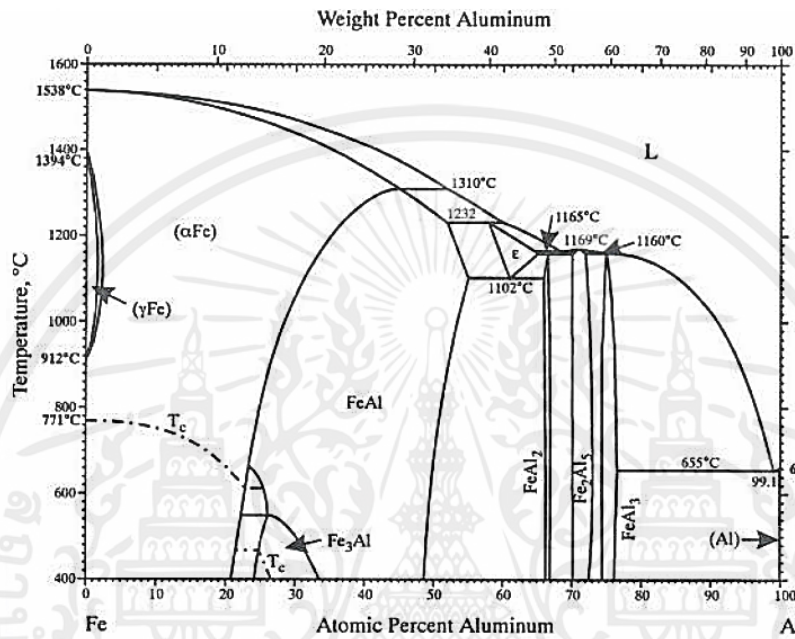
## 2.6.2 สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น

การเกิดสารประกอบเชิงโลหะสามารถพบเห็นได้ในกระบวนการเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า โดยเมื่อพิจารณาจากแผนภูมิเฟสระหว่างธาตุเหล็กและอลูมิเนียมจะพบว่าธาตุอลูมิเนียมมีความสามารถในการละลายในเหล็กสูงสุดที่ 20% อะตอมอลูมิเนียม แต่ในขณะที่ธาตุเหล็กไม่สามารถละลายในอลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องได้ ความแตกต่างระหว่างสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการเชื่อมและส่วนผสมทางเคมีซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5

สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก (Aluminium-Rich Phase) เช่น  $FeAl_2$ ,  $FeAl_3$ ,  $Fe_2Al_5$  และสารประกอบเชิงโลหะที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น  $Fe_3Al$ ,  $FeAl$  (Iron-Rich Phase) โดยที่สารประกอบเชิงโลหะที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลักจะมีความเปราะและความแข็งมากกว่า

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาความพยายามในการตรวจสอบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้าเนื่องจากการหลีกเลี่ยงสารประกอบเชิงโลหะที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลักในกระบวนการพัฒนาวัสดุเนื่องจากคุณสมบัติที่เปราะ พบว่าสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  จะพบการเกิดเป็นหลักในฝั่งของเหล็กกล้าที่ช่วงอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส และยังมีโอกาสพบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  ที่บริเวณระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  และอลูมิเนียมอัลลอยในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้การทำกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง จะพบการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  เพียงชนิดเดียว

เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าววัสดุทั้งสองชนิดอยู่ในสถานะของแข็งทำให้การแพร่ของอะตอมอลูมิเนียมเข้าสู่วัสดุเหล็กกล้าได้ดีกว่า แต่หากทำการกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่อุณหภูมิมากกว่า 700 องศาเซลเซียส จะพบการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  แทนที่เนื่องจากอลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวแต่เหล็กอยู่ในสถานะของแข็ง การแพร่ของอะตอมเหล็กเข้าสู่วัสดุอลูมิเนียมสามารถทำได้ดีกว่า [19]



รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม [19]

	Phase	Al [at%]	HV
	Fe (solid solution)	0-45	-
	Fe ( $\gamma$ )	0-1.3	-
Iron-rich IMCs	$Fe_3Al$ ( $\beta_1$ )	23-34	250-350
	$FeAl$ ( $\beta_2$ )	23-55	400-520
Aluminium-rich IMCs	$Fe_2Al_3$ ( $\epsilon$ )	58-65	-
	$FeAl_2$ ( $\zeta$ )	66-66.9	1000-1050
	$Fe_2Al_5$ ( $\eta$ )	70-73	1000-1100
	$FeAl_3$ ( $\theta$ )	74.5-76.5	820-980
	Al (solid solution)	99.998-100	-

รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของเฟสในระบบ Fe-Al [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย A6061 และเหล็กกล้าคาร์บอน Q235 ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 8,000-14,000 แอมแปร์ ซึ่งเปลี่ยนระดับด้วยค่า 1,000 แอมแปร์ พบว่าเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของรอยเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการหลอมละลายจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่เกดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะขึ้น บริเวณรอยต่อของวัสดุทั้ง 2 ชนิด โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางของรอยเชื่อมและมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากกลางรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม โดยสารประกอบเชิงโลหะบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมมีความร้อนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและเย็นตัวช้า ในขณะที่บริเวณรอบนอกของรอยเชื่อมมีปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนที่ได้รับมีค่าน้อยกว่า จึงทำให้ปริมาณสารประกอบเชิงโลหะที่ขอบของรอยเชื่อมมีความหนาที่น้อยกว่า และจากการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุที่บริเวณสารประกอบเชิงโลหะ พบว่าสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  เกิดบริเวณฝั่งที่ติดกับเหล็กกล้า และสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  เกิดบริเวณฝั่งที่ติดกับอลูมิเนียมอัลลอยซึ่งสามารถพบได้ในแผนภูมิเฟสระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม [20]

การศึกษาความแข็งแรงของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ความหนา 1.25 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 10,000-13,500 แอมแปร์ ซึ่งเปลี่ยนระดับด้วยค่า 500 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 50 ไมโครวินาที และแรงกดหัวอิเล็กโทรด 2970 นิวตัน ด้วยหัวอิเล็กโทรด Type E – Truncated พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 11,500 แอมแปร์ขึ้นไป สามารถเปลี่ยนลักษณะการแตกหักจาก interfacial failure mode เป็น Pullout Failure Mode ซึ่งจะเกิดการแตกหักเริ่มต้นที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของอลูมิเนียมอัลลอยโดยมีแนวการแตกคือความหนาของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงของลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำจะทำให้เกิดบริเวณหลอมละลายของรอยเชื่อม (Nugget) น้อย ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงลดลง นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิด โดยที่บริเวณกลางรอยเชื่อมจะมีความค่าความแข็งแรงสูงสุด [7]

การศึกษาความแข็งแรงของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย A6008 ที่ความหนา 1.25 มิลลิเมตร กับเหล็กกล้าคาร์บอนความแข็งแรงสูง H220YD ที่ความหนา 1.00 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 4,000-11,000 แอมแปร์ และระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 50-300 มิลลิวินาที และแรงกดหัวอิเล็กโทรด 2970 นิวตัน ด้วยหัวอิเล็กโทรดแบบ The Hemispherical Tip เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมพบพื้นที่ที่มีการ

หลอมละลายของโลหะอยู่ในฝัองอลูมิเนียมอัลลอย และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) อยู่ในฝั่งของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าหรือระยะเวลาในการเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณพื้นที่หลอมละลายของอลูมิเนียมอัลลอยและระยะการกดลึก (The Indentation Depth) มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ได้มีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุและเฟสในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  เกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่ติดกับเหล็กกล้า และสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_4Al_{13}$  หรือ  $FeAl_3$  เกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่ติดกับอลูมิเนียมอัลลอย เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าการเชื่อมที่ระดับ 9,000 แอมแปร์ และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 250 มิลลิวินาทีจะทำให้ได้ความแข็งแรงเชื่อมในด้านการต้านทานการรับแรงดึงเฉือนสูงที่สุดที่ 3309 นิวตัน นอกจากนี้การศึกษาเพิ่มเติมยังพบว่าลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้นมีจุดเริ่มต้นจากบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $Fe_2Al_5$  ไปสู่บริเวณพื้นที่หลอมละลายของอลูมิเนียมอัลลอย ซึ่งแสดงถึงความอ่อนแออย่างมากของชั้นสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $Fe_2Al_5$  เนื่องจากมีความแข็งแรงและเปราะสูงกว่า  $FeAl_3$  [1], [21]

การศึกษาความแข็งแรงของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ความหนา 1.00 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 6,000-12,000 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 0.2 วินาที และแรงกดหัวอิเล็กโทรด 2,000 นิวตัน และมีการใช้แผ่นโลหะครอบ (Cover Plate) ประกอบเข้ากับฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางของรอยเชื่อมและมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากกลางรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุและเฟสในชั้นสารประกอบเชิงโลหะพบสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  เกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่ติดกับเหล็กกล้า และสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  เกิดขึ้นบริเวณฝั่งที่ติดกับอลูมิเนียมอัลลอย นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าจะทำให้ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะหนาเพิ่มขึ้น [22]

การศึกษาความแข็งแรงของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 2 แบบระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (SPCC) หรือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่ความหนา 1.00 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 6,000-12,000 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 0.2 วินาที และแรงกดหัวอิเล็กโทรด 1,715 นิวตัน และมีการใช้แผ่นโลหะครอบ (Cover Plate) ประกอบเข้ากับฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย ผลการทดลองพบความแตกต่างของลักษณะทางกายและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดในการเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (SPCC) หรือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่ในการเชื่อมแบบเดียวกันแม้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมต่างกันจะมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยที่การเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (SPCC) จะมีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่น้อยกว่า แต่ในด้านของการ

กระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดจะมีลักษณะคล้ายกันในการเชื่อมทั้ง 2 แบบโดยที่ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางของรอยเชื่อมและมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากกลางรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นและรอยเชื่อมทั้ง 2 แบบจะมีการแตกหักของรอยเชื่อมเมื่อทดสอบการรับแรงดึงเป็นแบบ Interfacial Failure Mode แต่การเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (SPCC) จะมีความแข็งแรงมากกว่าในกรณีที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเท่ากันแม้ว่าชั้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะมีความหนาที่น้อยกว่า [22]

การศึกษาลักษณะการแตกหักของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6022 ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตรและเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นมีความหนา 2.0 มิลลิเมตร ด้วยหัวอิเล็กโทรด Cu-Cr เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และรัศมีความโค้ง 25 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดเงื่อนไขแบบแรกมีปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 13,000-15,000 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 200 มิลลิวินาที และแบบที่สองมีปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ 13,000 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 400-800 มิลลิวินาที ผลการวิจัยพบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะส่งผลต่อความแข็งแรงและลักษณะการแตกหักของรอยเชื่อมเมื่อทำการทดสอบด้วยแรงดึงเฉือน โดยความแข็งแรงรอยเชื่อมจะมีค่าสูงเมื่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาน้อยกว่า 3 ไมโครเมตร ซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะการแตกหักแบบ Pullout Failure Mode นอกจากนี้การเพิ่มขนาดของพื้นที่หลอมละลายของอลูมิเนียมอัลลอยหรือเหล็กกล้าจะช่วยให้สามารถรับแรงดึงเฉือนได้มากขึ้น แต่หากไม่มีการควบคุมชั้นสารประกอบเชิงโลหะให้มีความหนาน้อยกว่า 3 ไมโครเมตรจะทำให้เกิดลักษณะการแตกหักแบบ Interfacial Failure Mode นอกเหนือจากการใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่สูงจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่หลอมละลายของอลูมิเนียมอัลลอย (Nugget) โดยที่ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [23]

การศึกษารอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6022 ที่มีความหนา 0.82 มิลลิเมตรและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 1008 ที่มีความหนา 0.76 มิลลิเมตรโดยมีการกำหนดเงื่อนไขปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมอยู่ในช่วง 11,250-14,250 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 25-40 ไมโครวินาที และแรงกดหัวอิเล็กโทรดอยู่ในช่วง 1,500-2,400 นิวตัน ด้วยหัวอิเล็กโทรด Type C-Flat เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังกำหนดเวลากด (Squeeze Time) และเวลากดค้าง (Hold Time) เป็นระยะเวลา 99 ไมโครวินาที ผลการทดลองพบว่าเกิดการบิดเบี้ยวอย่างชัดเจนที่บริเวณรอยเชื่อม (Distortion) บริเวณฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย ความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตัวแปรที่ศึกษาในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขของตัวแปรในการเชื่อมที่ทำให้ความแข็งแรงรอยเชื่อมสูงที่สุดคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 14,250 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 40 ไมโครวินาที และแรงกดหัวอิเล็กโทรดมีค่า 2400 นิวตัน ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงเฉือนมีค่าเท่ากับ 3210 นิวตัน และขนาดพื้นที่หลอม

ละลาย (Nugget) มีค่าเท่ากับ 9.75 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แรงกดหัวอิเล็กโทรดเพิ่มจาก 1500 เป็น 2400 นิวตัน จะทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะลดลงจาก 4.2 เป็น 2 ไมโครเมตร ซึ่งมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น [24]

## 2.7 การทดสอบแรงดึงเฉือน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงดึงเฉือนเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อแรงดึง ระหว่างการทดสอบจะให้แรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเพื่อดึงชิ้นงานให้ยืดออกและขาดในที่สุด นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจะสามารถบอกได้ถึงกลไกการล้มเหลวและคุณภาพของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุด ในส่วนของวิธีการทดสอบมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้ การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards), มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) และ AWS (American Welding Society) เป็นต้น

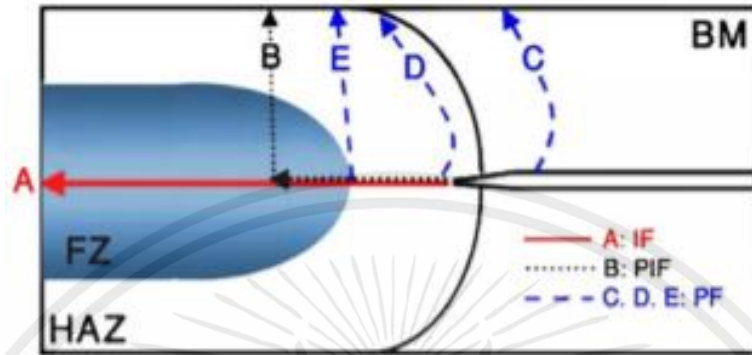
ก่อนทำการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการตัดตามมาตรฐานจะต้องถูกทำความสะอาดก่อน สามารถใช้กระดาษทรายลูบบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบเพื่อป้องกันการเลื่อนระหว่างชิ้นงานและหัวจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบขณะทำการดึง ชิ้นงานทดสอบจะต้องถูกตรวจสอบความเรียบและความตรงเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีการโก่งงอ วัดและบันทึกค่าขนาดของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นทำการดึงด้วยเครื่องดึง (Tensile Machine) โดยให้แรงดึงกับชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงที่คงที่ จะเกิดการยืดตัวของวัสดุขึ้นและวัสดุจะออกแรงกระทำเป็นแรงต้านการดึงเป็นผลให้สามารถวัดแรงออกมาได้จากตัววัดแรง แรงที่วัดจะมีหน่วยเป็นกิโลกรัมหรือนิวตัน ซึ่งเมื่อทำการดึงเสร็จสิ้นก็ได้ทำการวาดกราฟและคำนวณค่าต่างๆ ที่อยากทราบ โดยที่ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบดังแสดงตามรูปที่ 2.12 และตารางที่ 2.2 โดยอ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 3136 [25]

ตารางที่ 2.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ [25]

ความหนาของชิ้นงาน (t)	ความกว้าง (W)	ระยะต่อเกย (L)	ความยาว (A)	ระยะแคล้มจับ (B)
$0.3 < t < 0.8$	20	20	75	75
$0.8 < t < 1.3$	30	30	100	90
$1.3 < t < 2.5$	40	40	125	100
$2.5 < t < 5.0$	50	50	150	110

## 2.8 ลักษณะการแตกหักในการทดสอบแรงดึงเฉือน

ลักษณะการแตกหักนั้นมีอยู่ 3 แบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ แบบ Interfacial (IF), Partial Interfacial (PIF), และ Pullout Failure (PF) ตามที่แสดงดังรูปภาพด้านล่าง



รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงเส้นทางการแตกหักหลักระหว่างการทดสอบแรงดึงเฉือน [6]

1. Interfacial (IF) การแตกหักนั้นจะแพร่กระจายผ่าน Fusion Zone: FZ (เส้นทาง A) โดยแยกแผ่นชิ้นงานทั้งสองออกจากกัน โดยการแตกหักแบบนี้จะมาพร้อมกับการเสียรูปแบบถาวรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการแตกหักแบบนี้ไม่น่าพึงพอใจนัก เนื่องจากมีความหมายว่าชิ้นงานมีความสามารถในการดูดซับพลังงานต่ำ

2. Partial Interfacial (PIF) การแตกหักครั้งแรกจะแพร่กระจายไปตามผิวของชิ้นงาน จากนั้นจึงเปลี่ยนเส้นการแตกหักไปทางตั้งฉากกับเส้นกึ่งกลางไปยังทิศทางความหนา (เส้นทาง B)

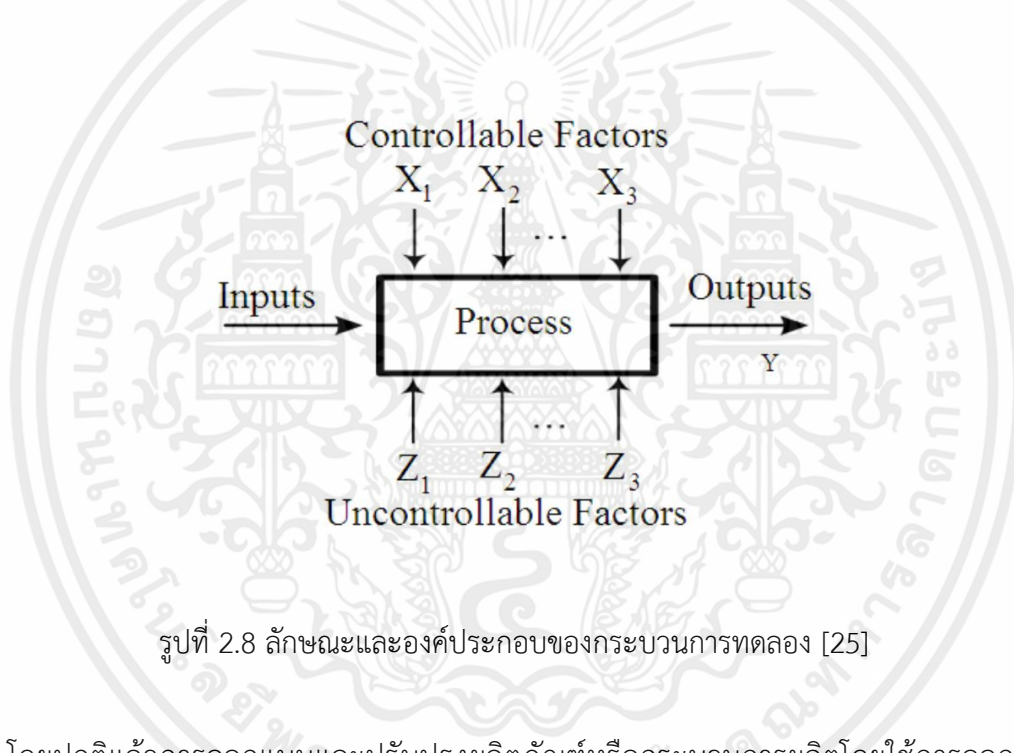
3. Pullout Failure (PF) การแตกหักแบบนี้เกี่ยวข้องกับการนำชิ้นงานแผ่นหนึ่งออกจากรอยเชื่อม ทำให้การแตกหักนั้นอาจเกิดขึ้นใน BM (เส้นทาง C), HAZ (เส้นทาง D) หรือ HAZ/FZ (เส้นทาง E) โดย PF นั้นเป็นรูปแบบการแตกหักที่มีต้องการมากที่สุด เพราะมันเกี่ยวข้องกับการเสียรูปแบบถาวรที่มากขึ้น มีการดูดซับพลังงานที่สูงขึ้นและรับน้ำหนักสูงขึ้น [6]

## 2.9 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

มอนโกเมอรี่กล่าวว่าการออกแบบการทดลองเชิงสถิติหมายถึงกระบวนการวางแผนการทดลองที่มีจุดประสงค์ให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติที่จะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ โดยการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อผลลัพธ์มีเป้าหมายเพื่อค้นหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งปัจจัยจะแบ่งได้ออกเป็น ปัจจัยที่ควบคุมได้ เช่น ค่ากระแสไฟฟ้า, แรงกดของอิเล็กโทรดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น อุณหภูมิจากการเชื่อมโดยการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการทดลองทั่วไปจะมีส่วนประกอบคือทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการทดลองนั้นๆ ได้แก่ วัตถุดิบ เครื่องเชื่อม เป็นต้น และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ซึ่งมีผลต่อผลลัพธ์ของระบบ ดังในรูปที่ 5 ซึ่งโดยปกติแล้วการออกแบบการทดลองที่ดีจะมุ่งเน้นให้กำจัดหรือลดอิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้การออกแบบการทดลองที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ออกมาได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจำเป็นที่จะใช้แบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาเป็นตัวแทนและอธิบายค่าความสัมพันธ์และอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยพร้อมกัน ในช่วงเวลาทดลองเดียวกันที่มีผลต่อผลลัพธ์ของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าการศึกษาแต่ละปัจจัย ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงเป็นการวางรูปแบบการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัยอย่างมีเป้าหมายเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงต่อผลลัพธ์ของระบบ [26]



รูปที่ 2.8 ลักษณะและองค์ประกอบของกระบวนการทดลอง [25]

โดยปกติแล้วการออกแบบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อค้นหาตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่สามารถควบคุมในเชิงปฏิบัติ ซึ่งส่งผลต่อตัวแปรตามหรือผลลัพธ์โดยลดความผันแปรของผลลัพธ์ให้น้อยที่สุด ในทางตรงกันข้ามทำให้ผลลัพธ์อยู่ในเป้าหมายหรือความต้องการของการออกแบบมากที่สุด โดยที่การกำหนดตัวแปรอิสระและระดับตัวแปรอิสระต้องอยู่ในระดับเหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นการลดความแปรปรวนของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการ (Noise) ได้ในเชิงปฏิบัติ ในส่วนของหลักพื้นฐานที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบการทดลองทุกรูปแบบ มี 3 หลักการดังนี้คือ การสุ่ม (Randomization) การทำการทดลองซ้ำ (Replication) และการจัดกลุ่ม (Blocking) [25]

1. การสุ่ม คือ การกำหนดโอกาสความเป็นไปของลำดับการทดลองแต่ละตัวให้เท่ากัน เพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไปให้กับระดับการศึกษาทุกระดับอย่างใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและจะส่งผลให้ลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้

2. การทำการทดลองซ้ำ คือ การทดลองซ้ำอีกเป็นจำนวนที่กำหนด เพื่อลดหรือกำจัดเอาปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกจากกระบวนการ และยังสามารถสังเกตความคลาดเคลื่อนเพื่อนำไปประเมินปัจจัยที่อาจจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการ

3. การจัดกลุ่ม คือ การจัดกลุ่มสิ่งๆ ที่เหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อลดความผันแปรจากความแตกต่างของปัจจัยหรือหน่วยตัวอย่าง

### 2.9.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อการออกแบบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ [27], [28]

1. การทำความเข้าใจและกำหนดปัญหาที่ต้องการศึกษา โดยปกติแล้วการระบุและมองปัญหาที่มีอยู่ในเชิงการออกแบบการทดลองอาจจะเป็นเรื่องที่ซับซ้อน แต่เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทบทวนแนวความคิดทั้งหมดต่อปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยจะต้องระบุให้มีความชัดเจน เพื่อสามารถเข้าใจปัญหาสาเหตุและวิธีการแก้ไขอย่างถูกต้อง

2. กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษา การทดลองจะต้องระบุปัจจัยที่จะศึกษาและระดับของปัจจัยเหล่านั้น โดยในขั้นตอนนี้จะต้องมีความเข้าใจในกระบวนการและความรู้ทางด้านทฤษฎีมาเกี่ยวข้อง ที่สำคัญคือการระบุปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของกระบวนการทั้งหมด กำหนดตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา เป็นการกำหนดตัวชี้วัดที่เป็นผลลัพธ์ของกระบวนการออกมาในเชิงคุณลักษณะที่สามารถวัดได้

3. การเลือกแบบการทดลอง หลังจากทีระบุปัญหาและกำหนดระดับของปัจจัยกำหนดตัวแปรตอบสนองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อมาคือการกำหนดรูปแบบของการทดลอง ทั้งในส่วนของลำดับของการทดลอง จำนวนในการทำซ้ำ พิจารณาว่าการจัดกลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องใช้ในการทดลองหรือไม่ รวมถึงข้อจำกัดลำดับการทดลองต่างๆ

4. การดำเนินการทดลอง เมื่อดำเนินการทดลองจะต้องมีการติดตามผลลัพธ์ของกระบวนการอย่างสม่ำเสมอเพื่อยืนยันว่าการทดลองเป็นไปตามที่วางแผนไว้ เนื่องจากการเกิดความผิดพลาดในการทดลองอาจจะทำให้กระบวนการทั้งหมดใช้การไม่ได้

5. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ การใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ผลของข้อมูลออกมาให้อยู่ในรูปแบบข้อสรุปตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง สามารถใช้ซอฟต์แวร์ต่างๆ วิธีในการดูกราฟ เป็นสิ่งสำคัญในการช่วยวิเคราะห์ข้อมูล

6. การสรุปผลการทดลอง หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแล้ว การสรุปผลการทดลองจะช่วยตอบปัญหาที่ได้กำหนดขึ้น เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ ระดับของปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมเพื่อได้ผลลัพธ์ของระบบที่ต้องการ

### 2.9.2 คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลอง จะต้องทราบคำศัพท์พื้นฐานเพื่อเข้าใจหลักการและกระบวนการออกแบบการทดลองได้ดังต่อไปนี้

(1) ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ที่ต้องการควบคุมให้ได้ตามความต้องการหรือตามที่กำหนด

(2) ปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรนำเข้า (Input) ที่ใช้ในกระบวนการหรือระบบที่ต้องการทดลอง ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor)

(3) ระดับปัจจัย (Level) คือ จำนวนค่าของแต่ละปัจจัยหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงในการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยนั้นๆ

(4) วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลอง ซึ่งจำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้จะเท่ากับผลยกกำลังระดับปัจจัยด้วยจำนวนปัจจัยหลักที่ศึกษา

(5) จำนวนครั้งทดลอง (Runs or Experiment Run) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดในแผนการทดลองที่กำหนด เพื่อให้ได้บทสรุปของการทดลองออกมา ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของวิธีปฏิบัติกับจำนวนการทดลองที่ทำซ้ำ [29]

### 2.9.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design Experiment) จะใช้ค้นหาอิทธิพลปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ปัจจัยคือ ปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยนั้นที่ส่งผลต่อตัวแปร ตอบสนองด้วยตัวของปัจจัยหลักนั่นเอง และปัจจัยร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงเมื่อปัจจัยอื่นที่มีผลร่วมมีการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปแล้ว มีรูปแบบคือ  $A \times B \times C \times \dots$  แฟคทอเรียล เช่น  $2 \times 3 \times 4$  แฟคทอเรียล และมีรูปแบบแผนการทดลองของแฟคทอเรียลที่สำคัญ เช่น  $2^k$  ในการกำหนดระดับ ปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น เช่น  $2^2$  หรือ  $2^4$  เป็นการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับปัจจัยไว้ 3 ระดับใน  $k$  ปัจจัย เช่น  $3^2$  หรือ  $3^4$  เป็นต้นรูปแบบของการออกแบบการทดลองมีหลายหลายชนิด โดยแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกันของวิธีการและการนำไปใช้งาน ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่ต้องการ [25], [28], [30]

1. General Full Factorial Design คือการทดลองที่ง่ายที่สุดเพราะสามารถกำหนดระดับของปัจจัยเป็นทีละระดับก็ได้ แต่หากกำหนดระดับของปัจจัยมากเกินไปก็จะส่งผลให้จำนวนครั้งในการทดลองมีจำนวนมากตามไปด้วยนอกจากนี้ยังใช้ได้ทั้งกรณีที่มีตัวแปรเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

2. Factorial Design คือการทดลองที่ทุกปัจจัยมีแค่ 2 ระดับเท่านั้น โดยปกติแล้วมักกำหนดเป็น High กับ Low เพื่อลดจำนวนการทดลองลงมาจากกรณีของ General Full Factorial Design โดยที่ที่มีความนิยมนำไปใช้กับกรณีตัวแปรเป็นค่าต่อเนื่องและมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เนื่องจากว่าการคำนวณจะสมมติให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองในทุก ๆ ปัจจัยเป็นแบบเส้นตรงทั้งหมด

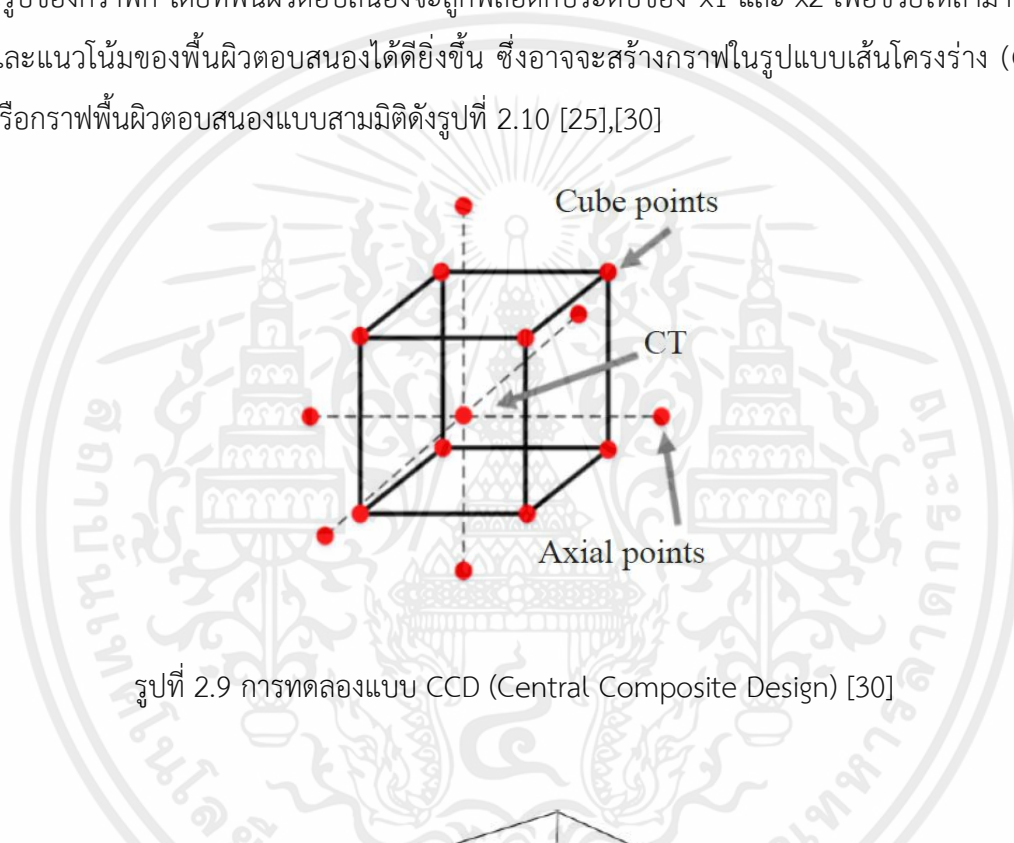
3. A Single Replicate of  $2^k$  Factorial Design คือการทดลองที่ทุกปัจจัยมีเพียง 2 ระดับและในแต่ละชุดการทดลองจะทำซ้ำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

4.  $2^{k-p}$  Fractional Factorial Design คือการทดลองที่ทุกปัจจัยมีแค่ 2 ระดับ แต่ไม่ได้ทำการทดลองจะทำการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามจำนวนครั้งการทดลองที่ลดลงอาจมีผลกระทบต่อวิเคราะห์ผลการทดลอง ยิ่งไปกว่านั้นการลดจำนวนครั้งการทดลองลดลงมากเกินไป ความน่าเชื่อถือของการทดลองจะลดลงไปด้วย และนอกจากนี้บางการทดลองไม่สามารถประมาณค่าความผันแปรจากการทดลองจะส่งผลให้การวิเคราะห์ (ANOVA) ไม่สามารถกระทำได้ ทำให้การสรุปผลการทดลองมีความยากมากขึ้น นั่นหมายความว่า การเลือกแบบการทดลองจำเป็นต้องพิจารณาทั้งความสามารถในการทดลองและข้อมูลที่จะได้รับควบคู่กันไปด้วย นอกจากแบบการทดลองที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วยังมีตัวแบบการทดลองแบบอื่นๆ อีกหลายรูปแบบ เช่น 2 Factorial Design with Center Point หรือ Plackett-Burman ที่ใช้ในกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับในกรณีที่ Uncontrollable Factor ส่งผลมากจึงจำเป็นต้องใช้หลักการ Blocking นอกเหนือจากนี้ในการออกแบบเพื่อช่วยเรื่องความแม่นยำในการทดลองเช่น Randomized Complete Block, Design Latin Square Design หรือ Graeco-Latin Square Design

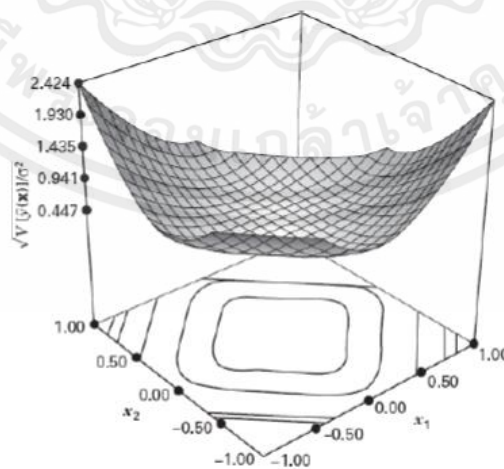
5. การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และที่สำคัญคือมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่น ผลตอบสนอง  $y$  เป็นฟังก์ชันของปัจจัย  $x_1, x_2$  ซึ่งวิธีการนี้จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบว่าบริเวณการค่าระดับปัจจัยที่ศึกษาในปัจจุบันเป็นบริเวณที่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดหรือไม่ โดยใช้การทดลองแบบทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง (Center Points) ถ้าพบว่าบริเวณปัจจุบันไม่สามารถให้ค่าที่ดีที่สุด จึงทำการหาบริเวณใหม่โดยใช้วิธีการ Steepest Ascent เพื่อหาเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ซึ่งจะให้ค่าตอบสนองที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด และขั้นตอนที่สองเป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง

(Response Surface Experiment) เมื่อพบว่าบริเวณที่ทดสอบมีความเป็นไปได้ว่าสามารถให้ค่าที่ดีที่สุดจากการทำวิธีการ Steepest Ascent

การทดลองพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design) และการทดลองแบบ BBD (Box-Behnken Design) ซึ่งการทดลองแบบ CCD จะประกอบไปด้วยการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ การทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง (Cube Points and CT) และการทดลองนอกบริเวณของการทดลองแฟกทอเรียล (Axial Points) ดังรูปที่ 2.9 และผลลัพธ์โดยส่วนใหญ่จะแสดงในรูปของกราฟิก โดยที่พื้นผิวตอบสนองจะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อช่วยให้สามารถสังเกตรูปร่างและแนวโน้มของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะสร้างกราฟในรูปแบบเส้นโครงร่าง (Contour Plot) หรือกราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติดังรูปที่ 2.10 [25],[30]



รูปที่ 2.9 การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design) [30]



รูปที่ 2.10 กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 การตรวจสอบโครงสร้างวัสดุ

โครงสร้างของวัสดุเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางกล โดยที่โครงสร้างของโลหะอาจแยกได้เป็น 2 ระดับคือ ระดับมหภาค (Macroscopic) และระดับจุลภาค (Microscopic) โครงสร้างระดับมหภาคนั้นจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ โครงสร้างจุลภาคของโลหะส่วนใหญ่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายที่สูง เพื่อขยายภาพให้มีขนาดใหญ่และชัดเจนขึ้น การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะมีหลายวิธี เช่น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [31]

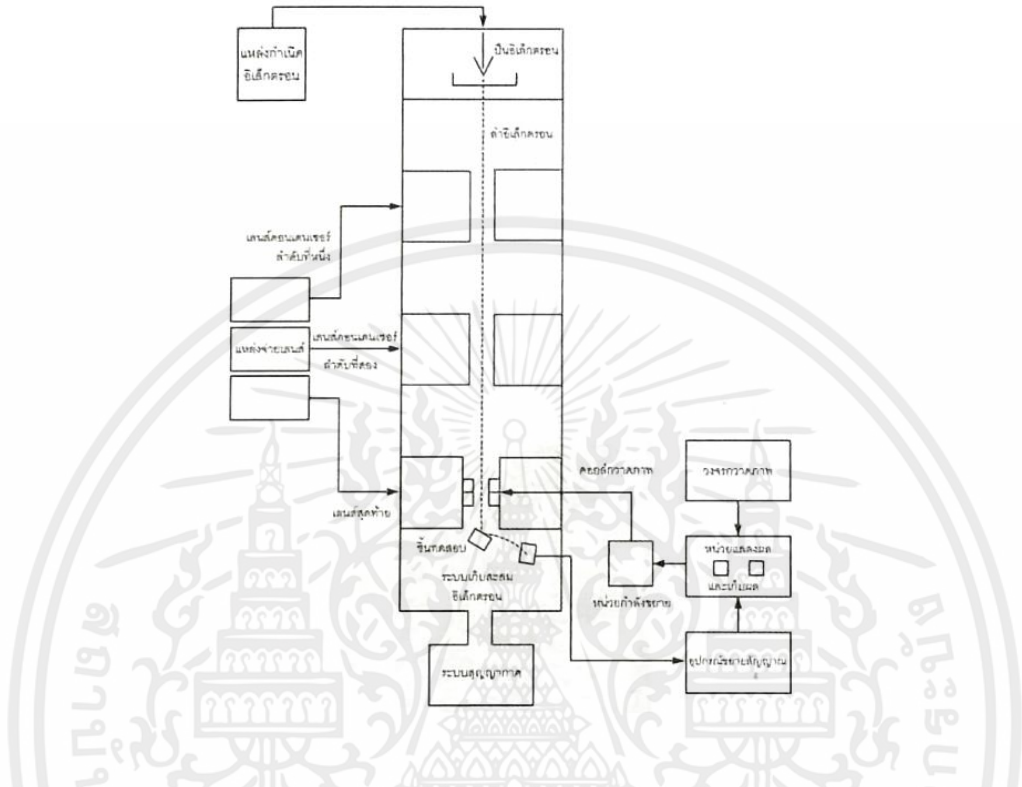
### 2.10.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) หรือมักเรียกสั้นๆ ว่า OM เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสง โดยสามารถตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคได้เฉพาะที่ผิวโดยอาศัยการสะท้อนแสงสำหรับวัสดุที่บ่งแสง เช่น โลหะทุกประเภท ความดำของภาพที่แตกต่างกันเกิดจากความแตกต่างกันของความสามารถในการสะท้อนแสงที่ในบริเวณต่างๆ ขั้นตอนการตรวจสอบเริ่มต้นจากการเตรียมผิวของโลหะ ด้วยขัดพื้นผิวชิ้นงานให้เรียบจนสะท้อนแสงได้เหมือนกระจก โดยการขัดด้วยกระดาษทรายและผงขัดละเอียดที่มีขนาดเล็กมาก หลังจากนั้นกัดพื้นผิว (Etching) ด้วยสารละลายที่เหมาะสมจะทำให้เราสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากและการจัดเรียงทิศทางมีความแตกต่างกัน ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจึงมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้พื้นผิวจะถูกกัดไม่เท่ากัน นอกจากนี้การเกิดร่องขนาดเล็กบริเวณขอบเกรนเพราะว่าบริเวณนั้นจะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นจึงถูกสารเคมีกัดออกไปได้ง่ายซึ่งจะทำให้มุมสะท้อนแสงแตกต่างจากส่วนอื่นออกไปจึงทำให้ภาพที่ได้จะมีเส้นสีดำอยู่ในพื้นผิวของวัสดุ นั่นคือบริเวณขอบเกรน [31]

### 2.10.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope)

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope) หรือมักเรียกสั้นๆ ว่า SEM เป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ใช้การกวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุแล้วนำสัญญาณที่ได้ เช่น สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิและสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมาสร้างเป็นสัญญาณภาพ เทคนิค SEM สามารถดูวัตถุที่มีความชัดลึกได้มากกว่า และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้นมาก จึงส่งผลให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้สูงถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบได้ ทำ

ให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น EDS (Energy Dispersive Spectrometry) และ WDS (Wavelength Dispersive Spectrometry) เพื่อตรวจสอบข้อมูลทางเคมี



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM [31]

ส่วนประกอบของเครื่อง SEM แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือ “ปืนอิเล็กตรอน” (Electron Gun) คือส่วนบนสุด โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ (ท่อทรงกระบอก) โดยมีภาวะเป็นสุญญากาศภายในและมีสภาพด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 กิโลวัตต์ สำหรับเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า 2 ชุดหรือมากกว่ามีหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ และแอเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างกันตามลักษณะการใช้งาน มีหน้าที่เพื่อควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากที่สุดในการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (Electron Optics) เพราะว่าเป็นเลนส์ที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์อันสุดท้ายซึ่งเป็นเลนส์วัตถุ ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดภาพทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยมคล้ายกับการกวาดภาพบนจอโทรทัศน์อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) จะให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่นำมาสร้างภาพ ส่วนอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสม

ทางเคมีสำหรับเอ็กซเรย์ (X-ray) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ เป็นสัญญาณที่ใช้ในเทคนิค EDS และ WDS เครื่อง SEM เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ความเสียหายของโลหะหรือวัสดุต่างๆ โดยจะช่วยให้สามารถสังเกตเห็นพื้นผิวเกรนของชิ้นงานโลหะตัวอย่างได้อย่างชัดเจนว่าเกิดจากการแตกหักในลักษณะใด [31]

### 2.10.3 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope)

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope) หรือเรียกสั้นๆว่า TEM เป็น การยิงอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานบางๆ แล้วตรวจจับสัญญาณบนจอรับภาพหรือแผ่นฟิล์ม โดยกล้องที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยายถึง 10,000 เท่า สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และการจัดเรียงตัวของอะตอมใน ซึ่งการใช้งานวัสดุชิ้นงานตัวอย่างต้องมีความบางที่มากเพียงพอ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างไปได้ นอกจากนี้ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกดูดซับ และบางส่วนจะเกิดการหักเหเปลี่ยนทิศทางกระจัดกระจายไปโดยเกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันในโครงสร้างผลึก และหลังจากที่ลำแสงอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานทดสอบจะถูกรวบรวมด้วยเลนส์วัตถุ ซึ่งจะทำให้ใหญ่ขึ้นและถ่ายลงบนจอรับภาพฟลูออเรสเซนต์ บริเวณภายในเนื้อโลหะที่อาจจะทำให้ลำแสงอิเล็กตรอนเกิดการหักเหมากจะสังเกตเห็นเป็นแนวมืดบนจอภาพ โครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่เป็นระเบียบ เช่น ดิสโลเคชันหรือตำหนิในเชิงเส้นจะปรากฏเป็นแนวมืดเป็นเส้นๆ บนจอรับภาพของเครื่อง TEM [31]

### 2.10.4 กล้องจุลทรรศน์แบบโพรบกวาด (Scanning Probe Microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แบบโพรบกวาด (Scanning Probe Microscopy) โดยมีชื่อย่อคือ SPM มีความแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเนื่องจากภาพที่ได้ไม่ได้เกิดจากการใช้ทั้งแสงและอิเล็กตรอน ภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องแบบนี้ถูกสร้างจากพื้นผิวในระดับอะตอม โดยสิ่งที่ SPM แตกต่างจากวิธีอื่นคือการตรวจสอบทำได้ในระดับนาโนเมตรหรือกำลังขยาย 10 เท่าซึ่งสูงกว่าวิธีการอื่น และยังสามารถสร้างภาพขยาย 3 มิติจากข้อมูลลักษณะพื้นผิวที่ได้ นอกจากนี้ SPM บางชนิดสามารถทำงานได้ในสภาวะต่างๆ เช่นสุญญากาศอากาศของเหลวจึงสามารถเลือกตรวจสอบวัสดุต่างๆ ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้

โพรบปลายแหลมขนาดเล็กนำไปใกล้ผิวชิ้นงานในระดับนาโนเมตร แล้วกวาดโพรบไปบนผิวของชิ้นงาน ระหว่างการกวาดจะมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงโดยตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ก่อให้เกิดผลทางไฟฟ้าหรือผลอย่างอื่นเพื่อที่จะนำไปแปลผลการเคลื่อนที่ นอกจากนี้การตรวจวัดซึ่งใช้วิธีทางไฟฟ้าโดยส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์สามารถสร้างเป็นพื้นผิว 3 มิติได้ [32]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและกระบวนการดำเนินงานวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
2. กระบวนการออกแบบการทดลอง
3. กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
4. กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยแรงดึงเฉือน
5. กระบวนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอย AA5052

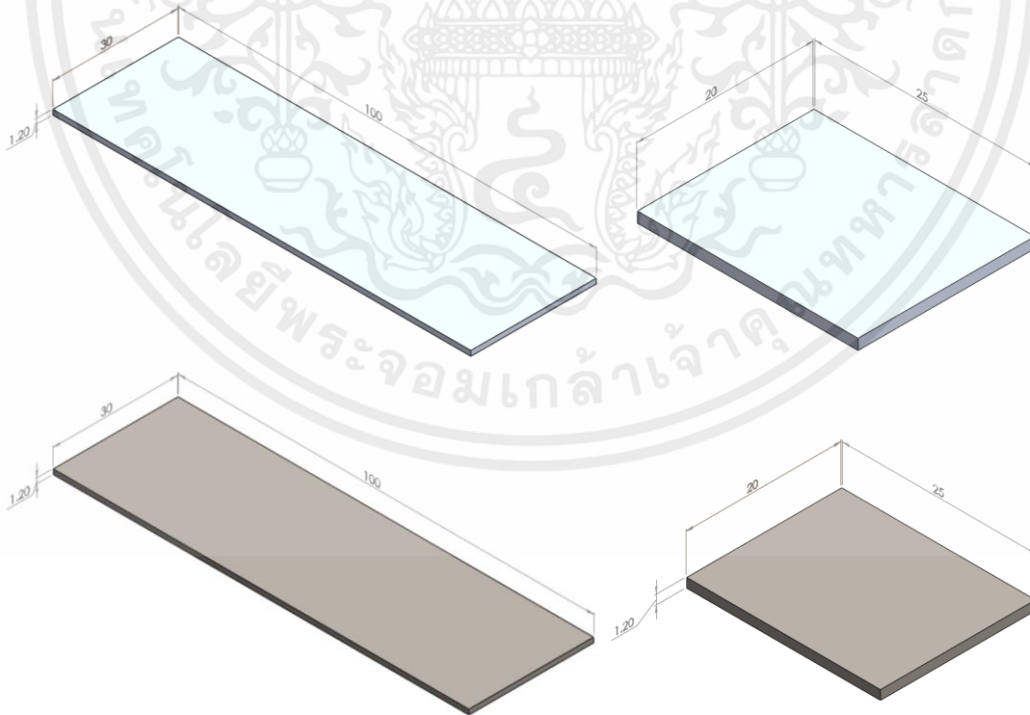
Chemical Element	Wt%
Aluminium (Al)	Balance
Manganese (Mn)	0.0 - 0.10
Iron (Fe)	0.0 - 0.40
Copper (Cu)	0.0 - 0.10
Magnesium (Mg)	2.20 - 2.80
Silicon (Si)	0.0 - 0.25
Zinc (Zn)	0.0 - 0.10
Chromium (Cr)	0.15 - 0.35
Others (Total)	0.0 - 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

Chemical Element	Wt%
Iron (Fe)	Balance
Carbon (C)	0.037
Manganese (Mn)	0.246
Phosphorus (P)	0.007
Silicon (Si)	0.007
Sulfur (S)	0.005

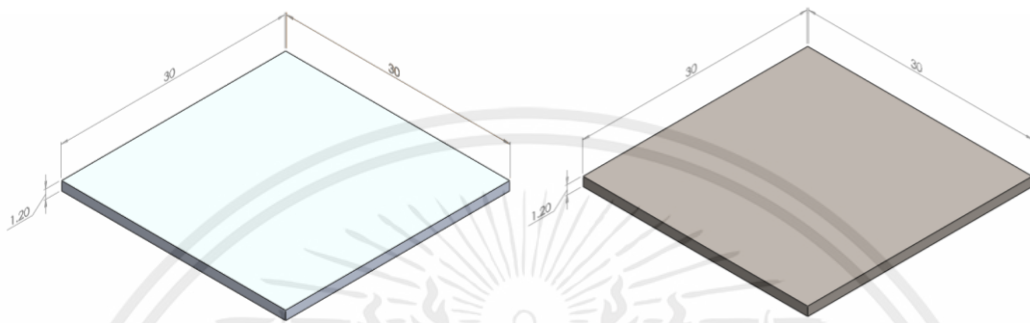
ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมจากวัสดุอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น กำหนดขนาดของชิ้นงานทดสอบเพื่อทดสอบแรงดึงเดือน มีความยาว 100 มิลลิเมตร ความกว้าง 30 มิลลิเมตร และความหนา 1.2 มิลลิเมตรตามมาตรฐานของ JIS Z 3136 ดังรูปที่ 2.1 และกำหนดขนาดของชิ้นงานทดสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคมีความยาว 25 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร และความหนา 1.2 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 (บน) เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผ่นรองรับ (Support) ใช้ระหว่างการทดสอบการดึงเพื่อป้องกันชิ้นงานดัดงอในช่วงของการทดสอบแรงดึงเฉือน จะถูกเตรียมจากวัสดุอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นให้อยู่ในขนาดที่กำหนดด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิก (Hydraulic) กำหนดขนาดความยาว 30 มิลลิเมตร ความกว้าง 30 มิลลิเมตร และความหนา 1.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขนาดของแผ่นรองรับอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 (ซ้าย) เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (ขวา)

3. อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) มีหน้าที่จับยึดชิ้นงานให้รอยต่อเกยของแผ่นชิ้นงานทดสอบอยู่ในตำแหน่งตามที่กำหนด ทำจากวัสดุ Mc Nylon ซึ่งนำมากัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัด (Milling Machine) ตามแบบในภาคผนวก ผข.1 และ 2 สำหรับการวางชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและเจาะรูสำหรับการกดของหัวอิเล็กโทรด จากนั้นทำการเจาะรูสำหรับยึดสกรูเพื่อติดตั้งแคลมป์จับยึดชิ้นงาน รุ่น GH-201B ลงบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding Machine) รุ่น PANASONIC YR-500CM2 และควบคุมด้วย Micro-Computer Controlled Timer รุ่น PANASONIC YF-0201Z5 ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า 50 กิโลกรัมโวลต์แอมแปร์ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่รองรับได้ 22500 แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 3.4 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด PANASONIC YR-500CM2 [33]

5. หัวอิเล็กโทรดชนิดทองแดงผสม Type “B” Dome ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 และ รัศมีความโค้งของหัวอิเล็กโทรด 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 หัวอิเล็กโทรดชนิดทองแดงผสม

6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test Machine) ยี่ห้อ SHIMADZU Autograph AG-X-100KN เพื่อการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ได้ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU Autograph AG-X-100KN

## 3.2 กระบวนการออกแบบการทดลอง

### 3.2.1 การทดลองเชิง Factorial Design เพื่อทดสอบความสามารถการรับแรงดึงเฉือน

ในกระบวนการดำเนินงานวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นได้นำกระบวนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ Factorial Design แบบ  $2^k$  Factorial Design มาใช้เพื่อศึกษาหาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดและระดับของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่เหมาะสมการรับแรงเฉือนดึง โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ตามลำดับ

1. การทำความเข้าใจและกำหนดปัญหาที่ต้องการศึกษา จากเดิมการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น มีความยากกว่าการเชื่อมระหว่างชิ้นงานโลหะชนิดเดียวกันอันเนื่องมาจากความแตกต่างของคุณสมบัติของอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า และยังมีปัญหาจากการเกิดสารประกอบเชิงโลหะขึ้นบริเวณนั้กเกิดซึ่งมีความเปราะที่สูง เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักของรอยเชื่อม ทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลง นอกจากนี้ทำให้เกิดการแตกหักในลักษณะ Interfacial Failure เป็นการบ่งบอกได้ว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่ต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการที่แก้ไขปัญหาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ เช่น การใช้แผ่นโลหะครอบ (Cover Plate) ในการเชื่อม, การใช้กระแสไฟที่สูง แต่ก็อาจจะส่งผลกระทบต่อรอยเชื่อมในด้านอื่นๆตามมา เช่น การเพิ่มเวลาในการผลิต หรือการเกิดรอยตำหนิ แต่ได้มีการศึกษาการเชื่อมความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานแบบจุดด้วยพัลส์คู่กับเหล็กกล้า ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ลดความเปราะ ของนักเกิดโดยวัดได้จากค่าความแข็ง (Hardness) และทำให้เกิดการแตกหักแบบ Pullout Failure Mode ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถใช้การเชื่อมพัลส์ที่สองเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อมความต้านทาน แบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยAA5052 และเหล็กกล้าได้ งานวิจัยชิ้นนี้จึงนี้ได้กำหนดประเด็นที่ต้องการ ศึกษานั้นคือ การศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอย เชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยAA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

2. กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษา ในการศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมพัลส์ที่สอง จำเป็นต้อง ควบคุมปัจจัยในการเชื่อมพัลส์ที่หนึ่งสำหรับการทดลองให้คงที่ ปกติแล้วปัจจัยที่จะถูกควบคุมในการเชื่อม ความต้านทานแบบจุดคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรด แต่อย่างไรก็ ตามในระหว่างการเชื่อมพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สองจะไม่สามารถปรับแรงกดของอิเล็กโทรดได้ ดังนั้นงานวิจัย ชิ้นนี้จึงได้กำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษาของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด คือปริมาณกระแสไฟฟ้าและ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับและ 1 จุดศูนย์กลาง (Center Point) แสดง ในตารางที่ 3.4 โดยที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมพัลส์ที่หนึ่งจะถูกกำหนดด้วยค่าคงที่คือ 10,000 แอมแปร์ และ 15 ไชเคิลดังตารางที่ 3.3

3. กำหนดตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา ในทางปฏิบัติแล้วรอยเชื่อมที่ติจะ ต้องให้ความแข็งแรงที่สูงเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการแตกหักจะไม่เกิดขึ้นในระดับการใช้งานที่ได้ออกแบบไว้ โดยที่ ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสามารถตรวจสอบได้จากการรับแรงดึงของชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ จึงได้กำหนดตัวแปรตอบสนองคือ การรับแรงดึงของรอยเชื่อมของระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยAA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

ตารางที่ 3.3 ค่าของปัจจัยคงที่ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่หนึ่ง

ปัจจัยที่คงที่						
เวลากดหัว อิเล็กโทรด (ไชเคิล)	แรงกดหัว อิเล็กโทรด (นิวตัน)	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า พัลส์ที่หนึ่ง (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อย กระแสไฟฟ้า พัลส์ที่หนึ่ง (ไชเคิล)	เวลากดค้าง ระหว่าง พัลส์ (ไชเคิล)	เวลา กดค้าง (ไชเคิล)	เวลา เย็นตัว (ไชเคิล)
50	3,300	10,000	15	50	50	0

ตารางที่ 3.4 ค่าระดับของปัจจัยที่ศึกษาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สอง

ระดับปัจจัย	ปัจจัยที่ศึกษา	
	ปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (ไมโคร)
ค่าเปรียบเทียบ	0	0
1	5,000	5
2	10,000	25
จุดศูนย์กลาง	7,500	15

4. การเลือกแบบการทดลอง กำหนดการทำซ้ำ 2 ครั้ง ในการเชื่อมชิ้นงานทดสอบเพื่อทดสอบแรงเฉือน ดึงสำหรับทุกชุดวิธีปฏิบัติ (Treatment) โดยมีการให้ความสำคัญกับการพิจารณาค่าความผันแปรของตัวแปร ตอบสนองที่วิเคราะห์ได้จากสมการ Regression ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 90% เพื่อแสดงถึงความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ที่ได้ ซึ่งสามารถสร้างตารางการทดลองแบบ Factorial Design เพื่อทดสอบความสามารถการรับแรงดึงเฉือนดังตารางที่ 3.5

นอกจากนี้ยังมีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอน รีดเย็นด้วยพัลส์ที่หนึ่งเท่านั้นเป็นจำนวนทั้งหมด 2 ครั้ง เพื่อเป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถการรับแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยพัลส์ที่หนึ่งเทียบกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยพัลส์ที่หนึ่งและสองหรือพัลส์คู่

5. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ มีการใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ผลของข้อมูลออกมาให้อยู่ในรูปแบบข้อสรุปตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab Version 18 ด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

6. การสรุปผลการทดลอง หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแล้ว การสรุปผลการทดลองให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ และหาระดับของปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์ของระบบที่ต้องการ

ตารางที่ 3.5 ตารางการทดลองแบบ Factorial Design เพื่อทดสอบความสามารถการรับแรงดึง

ลำดับการทดลอง	การทำซ้ำครั้งที่	พัลส์ที่หนึ่ง		พัลส์ที่สอง		ความสามารถการรับแรงดึงเฉือน (นิวตัน)
		ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแส (ไมโคร)	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแส (ไมโคร)	
1	1	15,000	15	5,000	5	
2				10,000	5	
3				5,000	25	
4				10,000	25	
5				7,500	15	
6	2			5,000	5	
7				10,000	5	
8				5,000	25	
9				10,000	25	
10				7,500	15	

### 3.2.2 การทดลองสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์คู่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีจำนวนการทดลองที่จะต้องดำเนินการทั้งหมด 5 ลำดับการทดลองโดยไม่มีการทำซ้ำดังตารางที่ 3.6 และนอกจากนี้ยังมีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นด้วยพัลส์ที่หนึ่งเท่านั้นเป็นจำนวนทั้งหมด 2 ครั้ง และมีการตั้งค่าปัจจัยที่คงที่ดังตารางที่ 3.3 เพื่อเป็นการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมเปรียบเทียบ

ตารางที่ 3.6 การทดลองสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

ลำดับการทดลอง	พัลส์ที่หนึ่ง		พัลส์ที่สอง	
	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแส (ไซเคิล)	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแส (ไซเคิล)
1	15,000	15	5,000	5
2			10,000	5
3			5,000	25
4			10,000	25
5			7,500	15

### 3.3 กระบวนการและขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ในหัวข้อนี้จะระบุถึงขั้นตอนและวิธีการสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงานทดสอบระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการศึกษาอิทธิพลการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สอง จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. ชิ้นงานเพื่อทดสอบความสามารถการรับแรงดึงเฉือน โดยจะประกอบด้วยชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 จำนวน 12 ชิ้น และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นจำนวน 12 ชิ้น ตามขนาดดังรูปที่ 3.1 (ซ้าย)
2. ชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยจะประกอบด้วยชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 จำนวน 6 ชิ้น และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นจำนวน 6 ชิ้น ตามขนาดดังรูปที่ 3.1 (ขวา)

#### 3.3.2 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดเพื่อทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

หลังจากเตรียมชิ้นงานทดสอบตามจำนวนและขนาดที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานทดสอบมาทำการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยมีขั้นตอนดังนี้

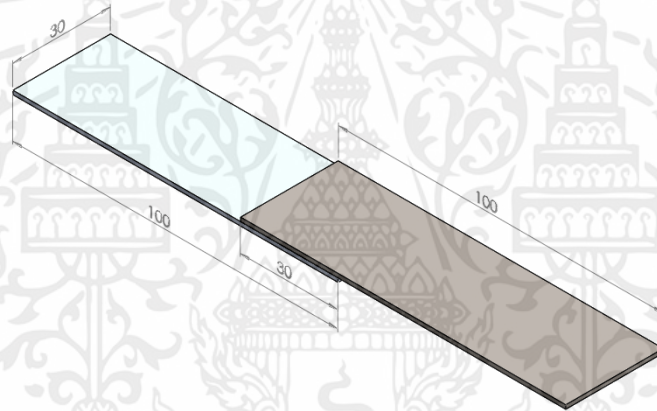
1. นำชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น มาจุ่มในสารละลายอะซิโตนและเช็ดพื้นผิวให้สะอาดด้วยผ้าแห้งเพื่อล้างน้ำมันและสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวของวัสดุ
2. ประกอบชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้นเข้าด้วยกันลงบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) โดยที่วางให้ระยะของรอยต่อเกยมีค่าเท่ากับ 30 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.7 โดยให้อลูมิเนียมอัลลอย AA5052 อยู่ด้านล่างและเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นอยู่ด้านบน

3. ตั้งค่าปัจจัยคงที่ที่ใช้เชื่อมตามตารางที่ 3.3 และตั้งค่าปัจจัยที่ใช้ศึกษาที่ใช้เชื่อมความต้านทานแบบจุดตามตารางที่ 3.4 โดยที่ลำดับการทดลองให้ดำเนินตามตารางที่ 3.5

4. ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) กับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดให้เหมาะสมโดยทำการสอดหัวอิเล็กโทรดให้ตรงกับรูบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และให้พื้นผิวของหัวอิเล็กโทรดด้านล่างสัมผัสแบบขนานกับแผ่นอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และทำการตรวจสอบให้แน่ใจว่าชิ้นงานมีความพร้อมสำหรับทำการเชื่อมความต้านทานจุด

5. หลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานออกจากเครื่องเชื่อมแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

6. ตรวจสอบชิ้นงานที่ถูกเชื่อมว่าการเชื่อมชิ้นงานติดหรือไม่ หรือมีตำหนิหรือไม่เพื่อป้องกันผลการทดลองที่อาจจะคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดนี้ได้



รูปที่ 3.7 การประกอบชิ้นงานเพื่อเชื่อมความต้านทานแบบจุด

### 3.3.3 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

หลังจากเตรียมชิ้นงานทดสอบตามจำนวนและขนาดที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานทดสอบมาทำการการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น มาจุ่มในสารละลายอะซิโตนและเช็ดพื้นผิวด้วยให้สะอาดด้วยผ้าแห้งเพื่อล้างน้ำมันและสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวของวัสดุ

2. ประกอบชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้นเข้าด้วยกันลงบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) โดยที่วางให้ประกบกันโดยให้อลูมิเนียมอัลลอย AA5052 อยู่ด้านล่างและเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นอยู่ด้านบน

3. ตั้งค่าปัจจัยคงที่ที่ใช้เชื่อมตามตารางที่ 3.3 และตั้งค่าปัจจัยที่ใช้ศึกษาที่ใช้เชื่อมความต้านทานแบบจุดตามตารางที่ 3.4 โดยที่ลำดับการทดลองให้ดำเนินตามตารางที่ 3.6

4. ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) กับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดให้เหมาะสมโดยทำการสอดหัวอิเล็กโทรดให้ตรงกับรูบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และให้พื้นผิวของหัวอิเล็กโทรดด้านล่างสัมผัสแบบขนานกับแผ่นอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และทำการตรวจสอบให้แน่ใจว่าชิ้นงานมีความพร้อมสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุด

5. หลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานออกจากเครื่องเชื่อมแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

6. ตรวจสอบชิ้นงานที่ถูกเชื่อมว่าการเชื่อมชิ้นงานติดหรือไม่ หรือมีตำหนิหรือไม่เพื่อป้องกันผลการทดลองที่อาจจะคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดนี้ได้

### 3.4 กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยแรงดึงเฉือน

หลังจากทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดตามข้อกำหนดในกระบวนการออกแบบการทดลองเสร็จสิ้นแล้ว สำหรับขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานทดสอบซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมแผ่นรองรับ (Support) ตามขนาดความยาว 30 มิลลิเมตร ความกว้าง 30 มิลลิเมตร และความหนา 1.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2

2. เชื่อมติดแผ่นรองรับ (Support) บนชิ้นงานที่ถูกเชื่อมบริเวณปลายชิ้นงานทั้ง 2 ด้านฝั่งเดียวกับชิ้นงานอีกชิ้นที่ถูกเชื่อมดังรูปที่ 3.8 ด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด

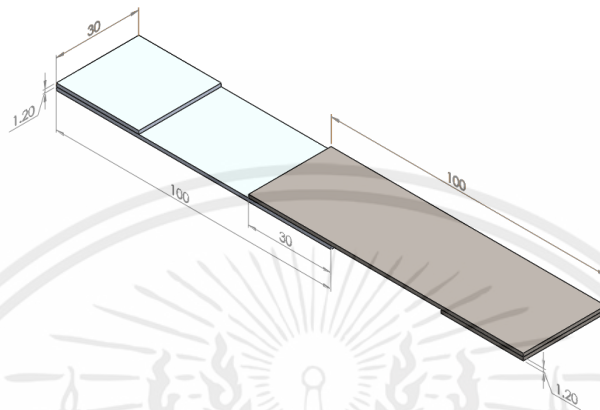
3. ทำการติดตั้งชิ้นงานทดสอบที่ติดแผ่นรองรับแล้วกับที่จับปลายชิ้นงานของเครื่องทดสอบแรงดึง-แรงกด (Universal Testing Machine) ตามคำแนะนำจากคู่มือของเครื่องทดสอบโดยเริ่มติดตั้งจากการจับชิ้นงานด้านบนก่อนจากนั้นทำการขันที่จับปลายชิ้นงานของแน้นพอสสมควร และทำการจับชิ้นงานด้านล่างในภายหลังโดยระมัดระวังไม่ให้ชิ้นงานเกิดการแกว่งขณะขันจับปลายชิ้นงานด้านบน

4. ทำการทดสอบความสามารถการรับแรงเฉือนดึงของรอยเชื่อมด้วยความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที เป็นไปตามทดลองแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136 : 1999

5. บันทึกค่าความต้านทานแรงเฉือนดึงของรอยเชื่อมลงในตาราง

6. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนดึงไปทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab version 18 ด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  เพื่อหาอิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สอง และปัจจัยที่ศึกษาต่อคุณสมบัติ

ทางกลในการรับแรงเค้นดึงของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์สองที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานดึงของรอยเชื่อมสูงสุด

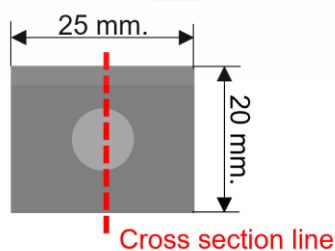


รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นงานการทดสอบแรงดึง

### 3.5 กระบวนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

หลังจากทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดตามข้อกำหนดในกระบวนการออกแบบการทดลองเสร็จสิ้นแล้ว สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ทำการเชื่อมโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์ที่หนึ่งและสอง จำนวน 5 ชิ้นและพัลส์ที่หนึ่งเพียงอย่างเดียว 1 ชิ้น มาทำการ Cross-Section ด้วยเครื่องตัด Cross-Section บริเวณตรงกลางรอยเชื่อมโดยให้ชิ้นงานมีขนาดความกว้าง 12.5 มิลลิเมตรความยาว 20 มิลลิเมตรและความหนา 2.4 มิลลิเมตรดังรูปที่



รูปที่ 3.9 ลักษณะการตัดขวาง Cross-Section ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการตัด Cross-Section มาขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold Mounting) โดยให้ชิ้นงานวางในแบบหล่อ แล้วผสมสาร Epoxy เข้าด้วยกันซึ่งสารชนิดนี้มีการหดตัวต่ำและระยะเวลาการเซตตัวที่นานแต่มีแรงยึดเกาะระหว่างชิ้นงานกับเรซินที่สูง จากนั้นทำการเทลงแบบหล่อแล้วให้ชิ้นงานเซตตัวเป็นระยะเวลา 3 วัน จึงทำการถอดชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนออกจากแบบหล่อซึ่งจะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนแบบเย็น

3. ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 400 800 1200 2000 5000 และ 7000 ตามลำดับสำหรับเปิดพื้นผิวชิ้นงาน โดยทำการหมุนชิ้นงาน 90 องศาจากมุมเดิมเมื่อทำการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทราย ระหว่างการขัดทำการตรวจสอบพื้นผิวที่ถูกขัดเป็นระยะ ด้วยการล้างชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยน้ำสะอาดและเป่าให้แห้งทันที แล้วทำใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ส่องเพื่อสังเกตรอยกระดาษทรายของเบอร์ก่อนหน้า หากไม่สามารถสังเกตเห็นให้ทำการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายที่ละเอียดขึ้น ทำขั้นตอนดังนี้ไปจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 7,000

4. จากนั้นนำไปขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน ระหว่างการขัดทำการตรวจสอบพื้นผิวที่ถูกขัดเป็นระยะเช่นกัน ด้วยการล้างชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยน้ำสะอาดและเป่าให้แห้งทันที แล้วทำใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ส่องเพื่อสังเกตรอยกระดาษทรายของเบอร์ 7,000 โดยขัดจนกว่าจะได้พื้นผิวที่ไม่เห็นรอยขัดของกระดาษทรายและรอยหลุมขนาดใหญ่จากผงอะลูมินา

5. กัดผิวหน้าชิ้นงาน (Etching) ด้วยการใช้อีออนมิลลิ่ง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของผิวของชิ้นงานด้วยอีออนพลังงาน เพื่อเปิดพื้นผิวในระดับอะตอม เป็นการเตรียมชิ้นงานให้มีความเรียบสูง

6. ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

7. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope) ที่บริเวณโลหะพื้นฐาน (Base Metal), บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zones HAZ) และบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ)

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการจากทดลองที่ได้ปฏิบัติทั้งหมดในงานวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น ซึ่งมีการวิเคราะห์อิทธิพลจากค่าความสามารถรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมประกอบกับการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน
2. ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน
3. ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม
4. ความเสียหายของรอยเชื่อม
5. ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม
6. ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม
7. การสึกหรอของหัวอิเล็กโทรดหลังผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
8. การอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

ในการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ซึ่งกำหนดปัจจัยที่ศึกษาคือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองตามกระบวนการออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design โดยมีการทำซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง โดยหลังจากชิ้นงานผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแล้ว นำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึงเฉือน ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม

ลำดับ การทดลอง	การ ทำซ้ำ ครั้งที่	พัลส์ที่หนึ่ง		พัลส์ที่สอง		ความสามารถ การรับ แรงดึงเดือน (นิวตัน)
		ปริมาณ กระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อยกระแส (ไซเคิล)	ปริมาณ กระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อยกระแส (ไซเคิล)	
1	1	15,000	15	5,000	5	1724.34
2				10,000	5	2280.73
3				5,000	25	2523.72
4				10,000	25	2415.28
5				7,500	15	2030.91
6	2			5,000	5	1827.46
7				10,000	5	1984.01
8				5,000	25	2651.28
9				10,000	25	2333.53
10				7,500	15	2187.14
เปรียบเทียบ	1	-	-	-	-	1939.34
เปรียบเทียบ	2	-	-	-	-	2315.71

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเดือน

##### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design

หลังจากได้ผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือน มีการนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab version 18 ด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  เพื่อวิเคราะห์ผลอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งจะนำมาสู่การหาข้อสรุปที่ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2, 4.3 และสมการที่ 4.1

พบว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สอง มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยมีปัจจัยที่ส่งผลคือ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าและอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังตารางที่ 4.2 แต่อย่างไรก็ตามมีหลักฐานไม่เพียงพอที่จะแสดงว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุด และนอกเหนือจากนี้ความโค้ง (Curvature) ไม่มีนัยสำคัญต่อโมเดลที่จะถูกสร้างขึ้นจากการทดลอง ดังนั้นทำ

การแก้ไขด้วยการทำสมการลดรูป (Reduce Model) ที่จุดศูนย์กลาง (Center Point) โดยการตัดข้อมูลในลำดับการทดลองดังกล่าวออก ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์และสร้างโมเดลสมการ Regression ใหม่ที่มีความแม่นยำที่มากขึ้นตารางที่ 4.4, 4.5 และสมการที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	746396	186599	12.78	0.008
Linear	2	565352	282676	19.36	0.004
2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Current	1	10278	10278	0.70	0.440
2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Time	1	555073	555073	38.01	0.002
2-Way Interactions	1	162202	162202	11.11	0.021
2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Current	1	162202	162202	11.11	0.021
*2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Time	1	162202	162202	11.11	0.021
Curvature	1	18842	18842	1.29	0.308
Error	5	73019	14604		
Total	9	819415			

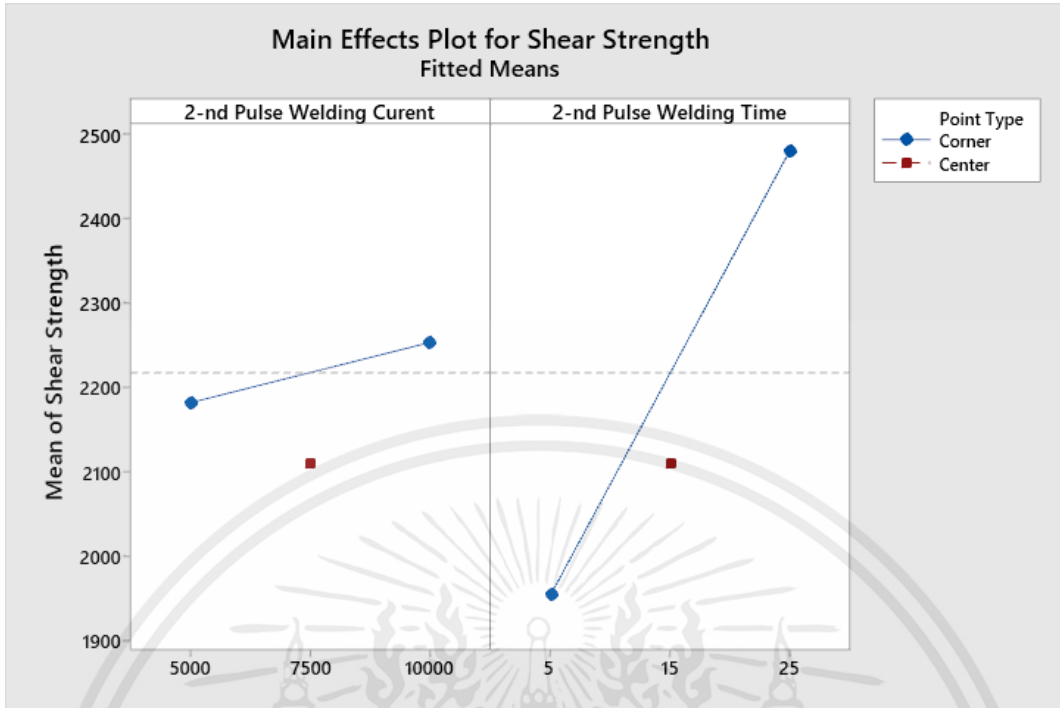
$$\begin{aligned} \text{Shear force} &= 1074 + 0.0998 \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Current} + 69.1 \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Time} \\ &\quad - 0.00570 \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Current} * \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Time} \\ &\quad - 108.5 \text{ Ct Pt} \end{aligned} \tag{4.1}$$

โดยที่ Shear force คือ ความสามารถการรับแรงดึงเฉือน (นิวตัน)  
 2<sup>nd</sup> Pulse Welding Current คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (แอมแปร์)  
 2<sup>nd</sup> Pulse Welding Time คือ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (ไซเคิล)  
 Ct Pt คือ ค่าตัวแปรความโค้ง

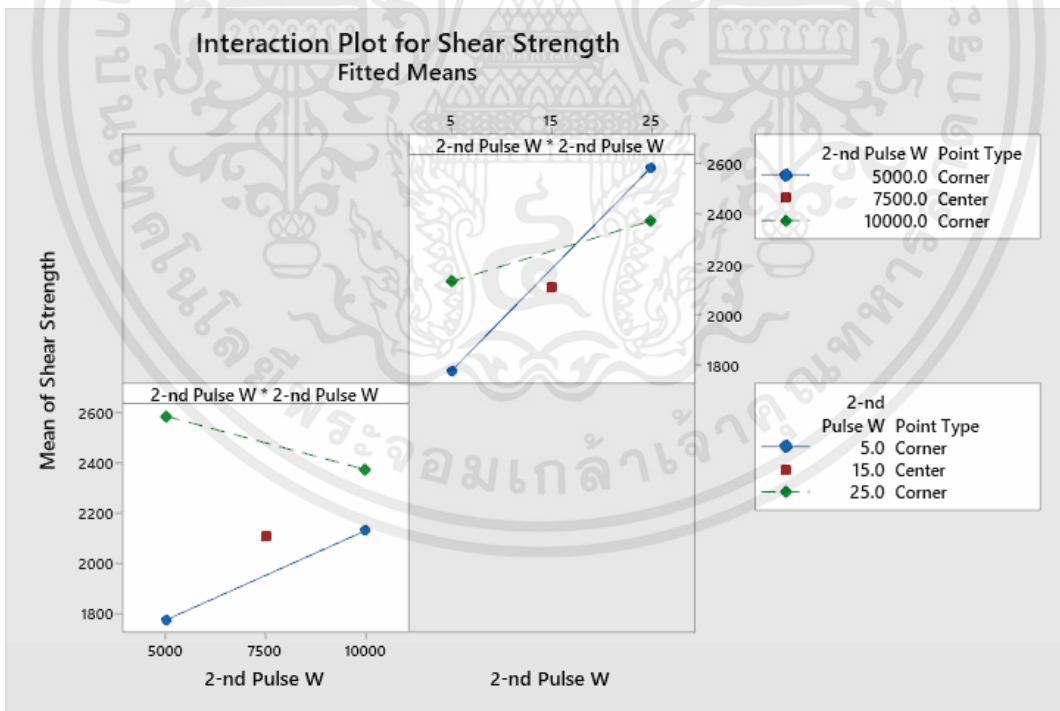
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression ที่วิเคราะห์ได้

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
120.847	91.09%	83.96%	64.36%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัย



รูปที่ 4.2 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA)  
 หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)

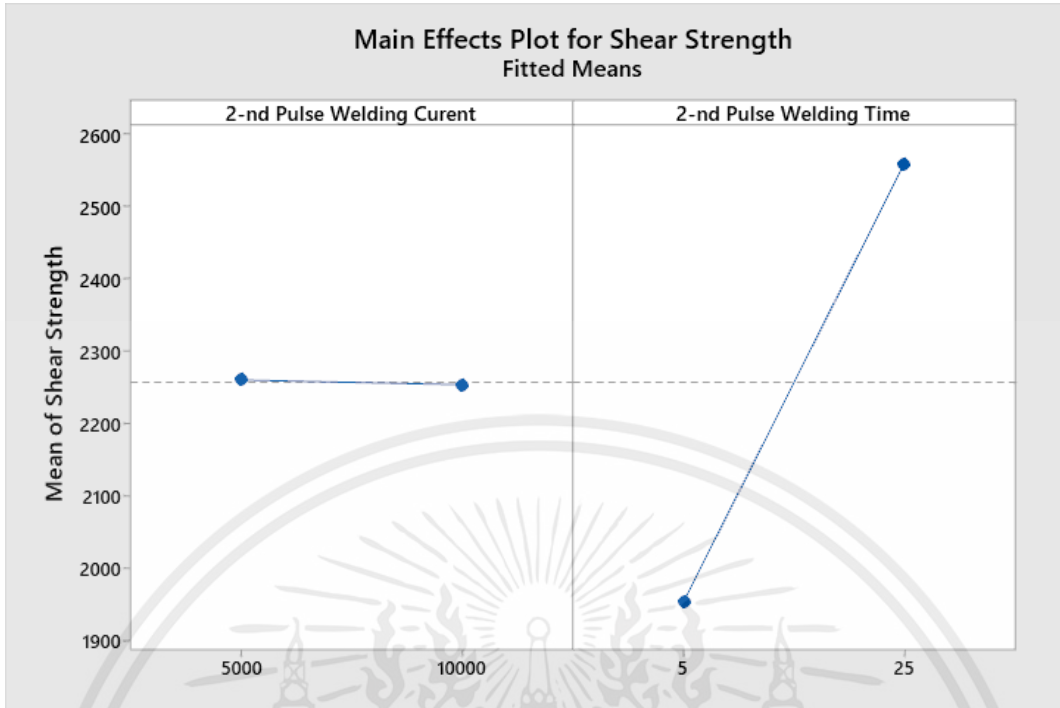
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	996070	332023	19.00	0.008
Linear	2	732416	366208	20.95	0.008
2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Current	1	87	87	0.00	0.947
2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Time	1	732328	732328	41.90	0.003
2-Way Interactions	1	263654	263654	15.09	0.018
2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Current	1	263654	263654	15.09	0.018
*2 <sup>nd</sup> Pulse Welding Time					
Error	4	69909	17477		
Total	7	1065979			

$$\begin{aligned} \text{Shear force} = & 996 + 0.1076 \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Current} \\ & + 84.7 \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Time} \\ & - 0.00726 \text{ 2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Current} * \text{2}^{\text{nd}} \text{ Pulse Welding Time} \end{aligned} \quad (4.2)$$

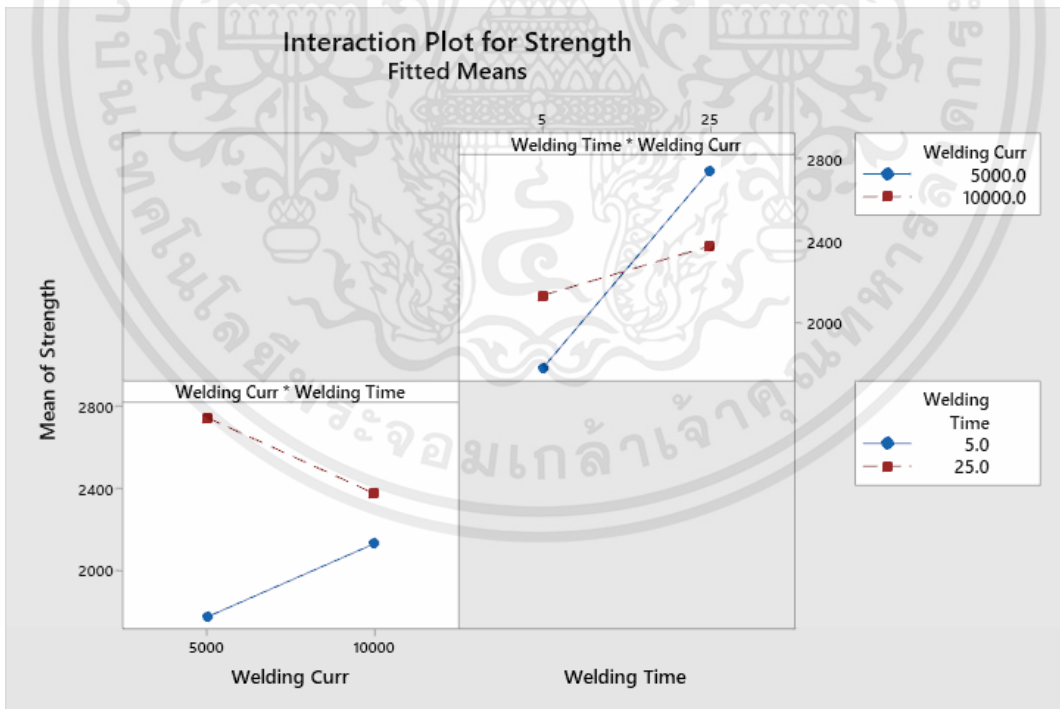
โดยที่ Shear force คือ ความสามารถการรับแรงดึงเฉือน (นิวตัน)  
 2<sup>nd</sup> Pulse Welding Current คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (แอมแปร์)  
 2<sup>nd</sup> Pulse Welding Time คือ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (ไซเคิล)

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression ที่วิเคราะห์ได้  
 หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
132.202	93.44%	88.52%	73.77%

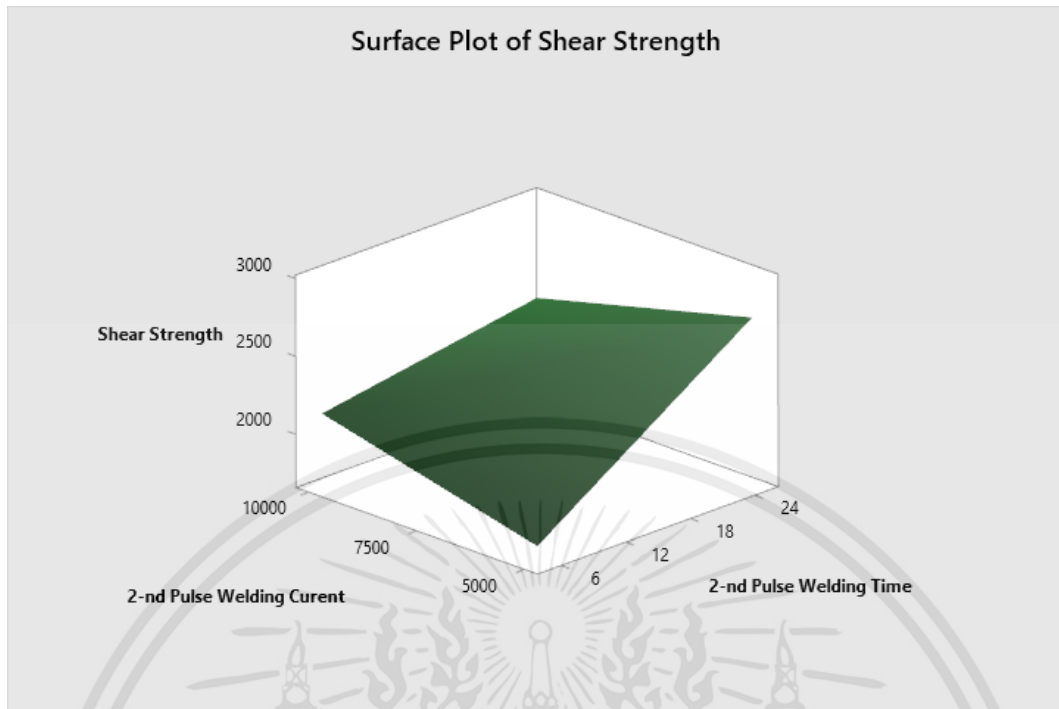


รูปที่ 4.3 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)



รูปที่ 4.4 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟ 3 มิติแสดงค่าของตัวแปรตอบสนองในรูปของกราฟพื้นผิว

จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองอีกครั้งด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  เช่นเดิม ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.4, 4.5 และสมการที่ 4.2 พบว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สอง มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยมีปัจจัยที่ส่งผลคือ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าและอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 เหมือนดังเดิม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากกราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยและกราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ แต่ในส่วนของการสมการ Regression ในหน่วยการคำนวณแบบ Uncoded จะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เมื่อพิจารณาจากค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่วิเคราะห์ได้จากสมการ Regression พบว่ามีค่าสูงกว่า 90% ซึ่งถือว่าค่อนข้างมีความผันแปรที่อยู่ในระดับต่ำ แสดงว่าผลการวิเคราะห์จากการทดลองนี้ค่อนข้างมีความน่าเชื่อถือในระดับที่น่าพอใจ

นอกจากนี้หากพิจารณารูปที่ 4.3 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) เห็นได้ว่าระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีผลต่อความแข็งแรงเป็นอย่างมาก โดยมีแนวโน้มแปรผันตรงกับความแข็งแรงของรอยเชื่อมและหากพิจารณารูปที่ 4.4 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) เห็นได้ว่าเส้นกราฟมีการตัดกันแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งปริมาณ

กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5,000 แอมแปร์ จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า 10,000 แอมแปร์ เมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 5 ไซเคิล แต่จะมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 25 ไซเคิล ความผันแปรนี้คืออิทธิพลร่วมที่มีผลต่อความสามารถรับแรงดึงเดือนรอยเชื่อม

อีกทั้งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 กราฟ 3 มิติแสดงค่าของตัวแปรตอบสนองในรูปของกราฟพื้นผิว จะเห็นได้ว่าความสามารถรับแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5,000 แอมแปร์ และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 25 ไซเคิล และมีค่าต่ำสุดเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5,000 แอมแปร์ และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5 ไซเคิล

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 จะพบว่ามีความเป็นไปได้ว่าความสามารถรับแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5,000 แอมแปร์ และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 25 ไซเคิล ไม่ได้เป็นค่าตอบสนองที่ดีที่สุด เนื่องจากพบแนวโน้มที่ค่าตอบสนองสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 25 ไซเคิล และหากพิจารณาจากหลักการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบว่าบริเวณการค่าระดับปัจจัยที่ศึกษาในปัจจุบันเป็นบริเวณที่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดหรือไม่ และขั้นตอนที่สองเป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Experiment) ซึ่งขั้นตอนแรกมีการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design แบบมีจุดศูนย์กลาง (Center Points) ถ้าพบว่าบริเวณปัจจุบันไม่สามารถให้ค่าที่ดีที่สุด จึงทำการหาบริเวณใหม่โดยใช้วิธีการ Steepest Ascent เพื่อหาเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ซึ่งจะให้ค่าตอบสนองที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด โดยที่มีความสอดคล้องกับการออกแบบการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ด้วยเหตุนี้คณะผู้จัดทำจึงได้ทำการทดสอบโดยใช้วิธีการ Steepest Ascent เพิ่มเติมดังภาคผนวก ค. โดยไม่ได้นำผลลัพธ์มาใส่ในเนื้อหาหลัก

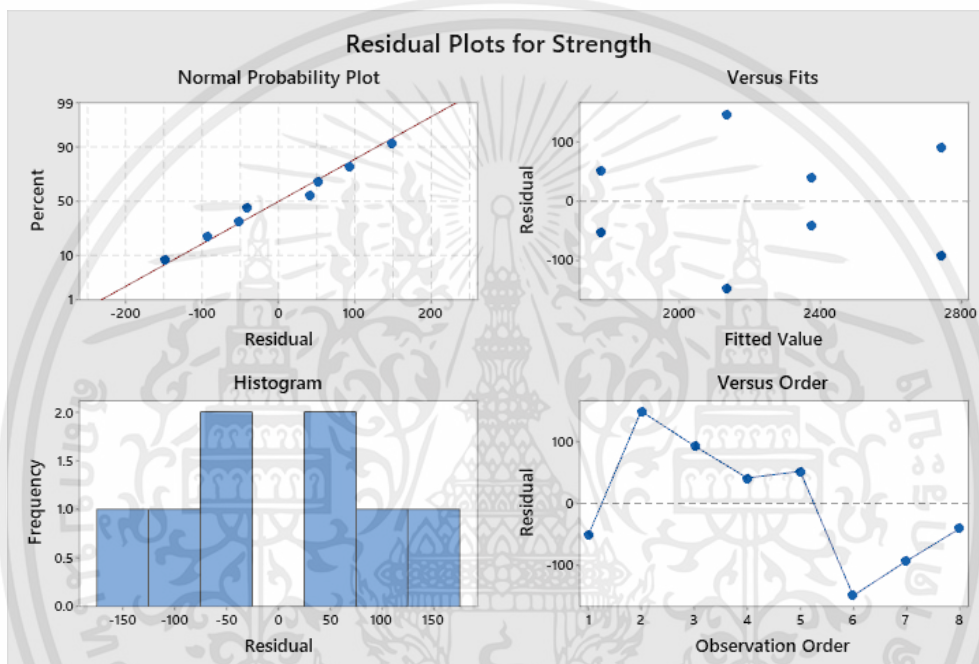
#### 4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง

นอกจากวิเคราะห์ข้อมูลเชิง Factorial Design ยังมีการพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) โดยมีการวิเคราะห์ความถูกต้องและความเป็นอิสระของข้อมูลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normal Distribution of Residuals) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงถึงค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independent of Residual) มีการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนค่อนข้างเป็นอิสระ แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าส่วนตกค้าง
3. การตรวจสอบความเสถียรของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) คือแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เปรียบเทียบกับ Fitted Value ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวลักษณะเป็น

แนวโน้มของค่าส่วนตกค้าง โดยภาพรวมค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงถึงข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

4. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Mean of Residuals) สร้างเป็นแผนภูมิแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับระดับของปัจจัยทุกตัวดังรูปที่ 4.6 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม การกระจายของค่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน














รูปที่ 4.6 Residual Plots ของค่าความสามารถรับแรงดึงเฉือนรอยเชื่อมตามการออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้













### 4.3 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงลักษณะกายภาพของรอยเชื่อมที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกัน

ลำดับ การ ทดลอง	การ ทำซ้ำ ครั้งที่	ปัจจัยที่ศึกษา		อลูมิเนียมอัลลอย AA5052	เหล็กกล้าคาร์บอน รีดเย็น
		ปริมาณกระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อยกระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (ไมโคร)		
1	0	5,000	5		
2		10,000	5		
3		5,000	25		
4		10,000	25		
5		7,500	15		
6		1	5,000	5	













เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงลักษณะกายภาพของรอยเชื่อมที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกัน (ต่อ)

ลำดับ การ ทดลอง	การ ทำซ้ำ ครั้งที่	ปัจจัยที่ศึกษา		อลูมิเนียมอัลลอย AA5052	เหล็กกล้าคาร์บอน รีดเย็น
		ปริมาณกระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อยกระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (ไซเคิล)		
7	1	10,000	5		
8		5,000	25		
9		10,000	25		
10		7,500	15		
เปรียบเทียบ	0	0	0		
เปรียบเทียบ	1	0	0		













เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงลักษณะความเสียหายทางกายภาพของรอยเชื่อม  
ที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกันหลังการทดสอบแรงดึงเฉือน

ลำดับ การ ทดลอง	การ ทำซ้ำ ครั้งที่	ปัจจัยที่ศึกษา		อลูมิเนียมอัลลอย AA5052	เหล็กกล้าคาร์บอน รีดเย็น
		ปริมาณ กระแสไฟฟ้าพัลส์ ที่สอง (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อยกระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (ไซเคิล)		
1		5,000	5		
2		10,000	5		
3	0	5,000	25		
4		10,000	25		
5		7,500	15		
6	1	5,000	5		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงลักษณะความเสียหายทางกายภาพของรอยเชื่อม  
ที่ค่าปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกันหลังการทดสอบแรงดึงเฉือน (ต่อ)

ลำดับ การ ทดลอง	การ ทำซ้ำ ครั้งที่	ปัจจัยที่ศึกษา		อลูมิเนียมอัลลอย AA5052	เหล็กกล้าคาร์บอน รีดเย็น
		ปริมาณ กระแสไฟฟ้าพัลส์ ที่สอง (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อยกระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (ไมโคร) วินาที		
7	1	10,000	5		
8		5,000	25		
9		10,000	25		
10		7,500	15		
เปรียบเทียบ	0	0	0		
เปรียบเทียบ	1	0	0		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ความเสียหายของรอยเชื่อม

##### 4.4.1 รูปแบบความเสียหายของรอยเชื่อม (Resistance Spot Welding Failure Modes)

หลังจากนำชิ้นงานทดสอบที่ได้มีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นมาทำการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ได้รูปภาพแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นของรอยเชื่อมทั้งหมดเป็นรูปแบบ Interfacial Failure Mode คือการแตกหักแพร่กระจายผ่าน Fusion Zone: FZ โดยแยกแผ่นชิ้นงานทั้งสองออกจากกัน การแตกหักรูปแบบนี้จะมาพร้อมกับการเสียรูปแบบถาวรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากชิ้นงานมีความสามารถในการดูดซับพลังงานต่ำ คือการขาดแยกของชิ้นงานที่บริเวณกึ่งกลางของนั้กเก็ทรอยเชื่อม นอกจากนี้การทดลองเกือบทั้งหมดพบการกระจายของน้ำโลหะเหลวระหว่างการเชื่อม (Expulsion) แสดงถึงการเกิดความร้อนในการเชื่อมปริมาณที่สูง จึงทำให้น้ำโลหะเหลวเกิดการกระจายตัวปริมาณมาก โดยมีสาเหตุเกิดขึ้นจากจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมอัลลอยที่ต่ำจึงทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะเป็นจำนวนมากระหว่างการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

##### 4.4.2 ระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อม

เมื่อนำกราฟจากภาคผนวก ก. ซึ่งแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานที่ถูกเชื่อมความต้านทานแบบจุดมาหาระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อม พิจารณาที่ค่า Displacement อยู่ในแกนแนวนอนของกราฟเปรียบเสมือนระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อม จะสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุด

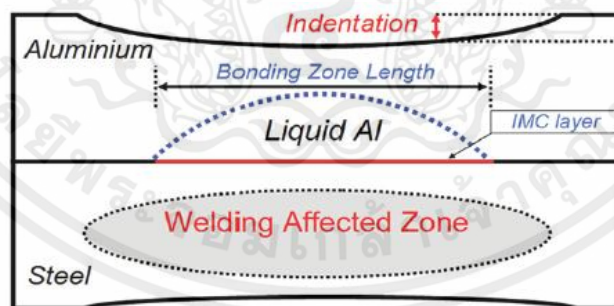
ลำดับการทดลอง	พัลส์ที่หนึ่ง		พัลส์ที่สอง		ระยะเวลาที่จุดแตกหักของรอยเชื่อม		
	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแส (ไมโครวินาที)	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อยกระแส (ไมโครวินาที)	การทำซ้ำ		เฉลี่ย (มิลลิเมตร)
					ครั้งที่ 1 (มิลลิเมตร)	ครั้งที่ 2 (มิลลิเมตร)	
1	15,000	15	5,000	5	0.35	0.375	0.3625
2			10,000	5	0.75	0.75	0.75
3			5,000	25	0.65	0.605	0.6275
4			10,000	25	0.75	0.6	0.675
5			7,500	15	0.42	0.43	0.425
เปรียบเทียบ			-	-	-	-	0.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่แล้วระยะยึดที่จุดแตกหักของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ลำดับการทดลองที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร และค่าต่ำสุดอยู่ที่ลำดับการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3625 มิลลิเมตร

#### 4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติวัสดุระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า ทั้งในด้านของสมบัติการนำไฟฟ้า ความร้อน ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ และจุดหลอมเหลวของวัสดุ จึงทำให้ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ได้มีความแตกต่างจากรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดในวัสดุชนิดเดียวกันซึ่งจะเห็นนักเก็ตของรอยเชื่อมทั้งสองฝั่งของวัสดุ แต่ในการศึกษานี้จะเห็นนักเก็ตในฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอยเพียงเท่านั้นกระบวนการนี้เกิดขึ้นจากความร้อนในการเชื่อมจะถูกสร้างขึ้นตามกฎของจูลในบริเวณฝั่งเห็นกล้าที่มาก เพราะวัสดุมีความต้านทานไฟฟ้าสูง จากนั้นความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังอลูมิเนียมอัลลอย เนื่องจากวัสดุมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง ทำให้ชิ้นงานฝั่งเหล็กกล้าเกิดการสูญเสียความร้อนซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดการละลายของเนื้อวัสดุเนื่องจากปริมาณความร้อนไม่เพียงพอ แต่ในทางกลับกันชิ้นงานฝั่งอลูมิเนียมอัลลอยที่นำความร้อนมาสู่เนื้อวัสดุเกิดการหลอมละลายขึ้นเนื่องจากมีปริมาณความร้อนเพียงพอและจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมอัลลอยที่ต่ำกว่าดังรูปที่ 4.7 และยังสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.8- 4.13 ซึ่งได้จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)



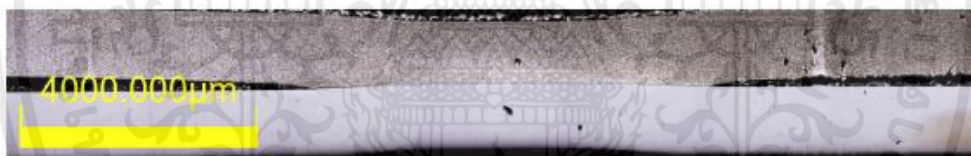
รูปที่ 4.7 ลักษณะรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดของอลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้า [2]



รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่1  
เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ  
ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไชเคิล ตามลำดับ



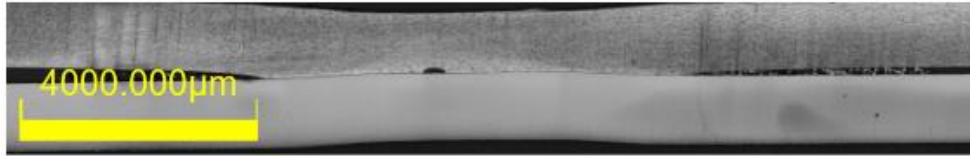
รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่2  
เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ  
ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไชเคิล ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่3  
เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ  
ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไชเคิล ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่4  
เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ  
ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไชเคิล ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองที่5  
เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 7,500 แอมแปร์ ตามลำดับ  
ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 15 ไซเคิล ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของลำดับการทดลองเปรียบเทียบ  
เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์  
และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไซเคิล

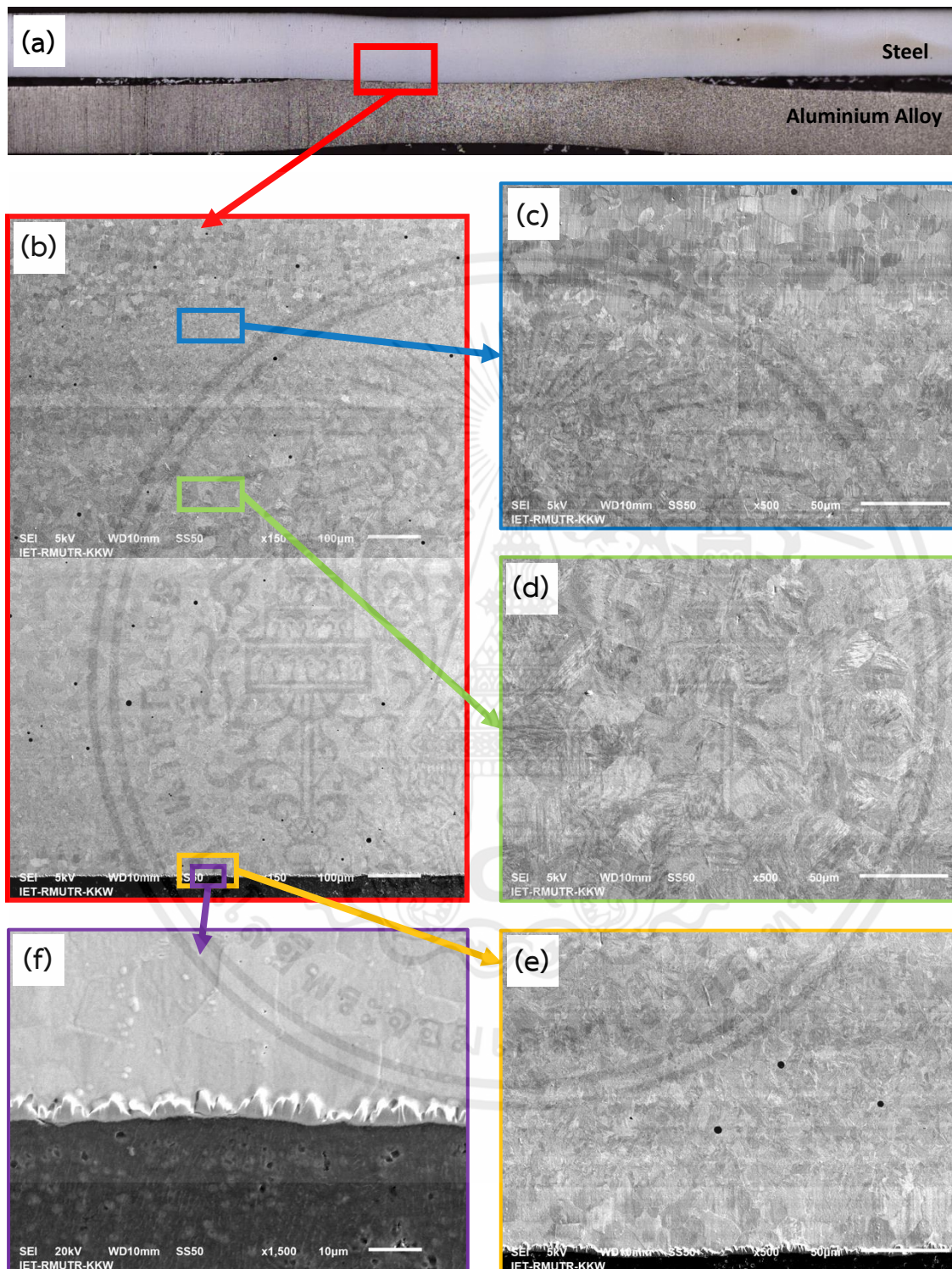
ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ลำดับ การ ทดลอง	พัลส์ที่หนึ่ง		พัลส์ที่สอง		ขนาด ของรอย เชื่อม (di) มม.	ระยะ การซึม ลึก1 (t1) มม.	ระยะ การกด ลึก1 (h1) มม.	ระยะ การกด ลึก2 (h2) มม.
	ปริมาณ กระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อย กระแส (ไซเคิล)	ปริมาณ กระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลา ปล่อย กระแส (ไซเคิล)				
1	15,000	15	5,000	5	3.119	0.330	0.168	0.182
2			10,000	5	4.383	0.481	0.189	0.124
3			5,000	25	4.177	0.505	0.195	0.098
4			10,000	25	4.394	0.365	0.204	0.136
5			7,500	15	4.648	0.408	0.185	0.117
เปรียบเทียบ			-	-	-	-	4.032	0.343

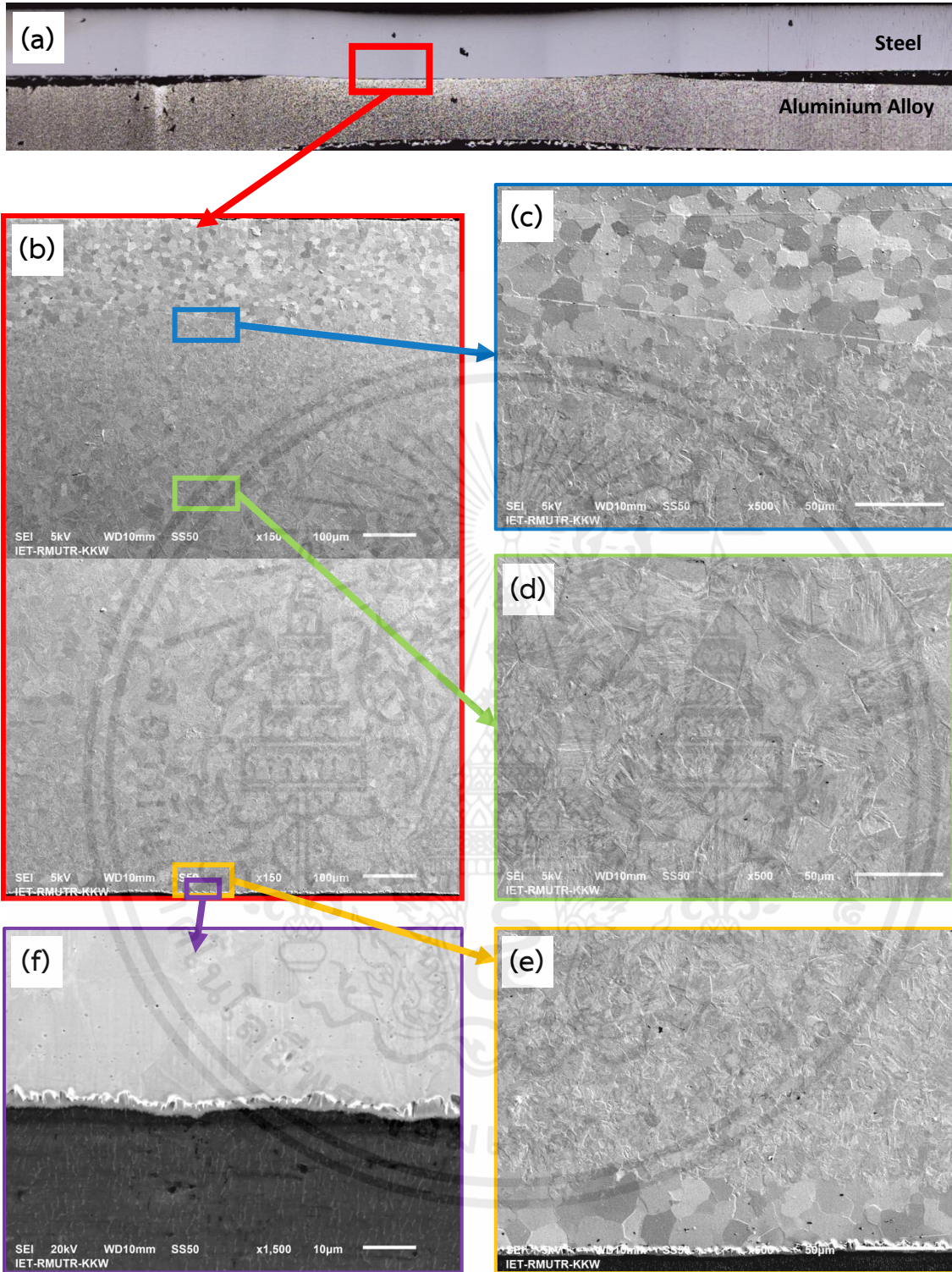
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของรอยเชื่อมและระยะการซึมลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ขนาดของรอยเชื่อม(di) มีค่ามากที่สุดที่ลำดับการทดลองที่5 มีค่าเท่ากับ 4.648 มิลลิเมตร และน้อยที่สุดที่ลำดับการทดลองที่1 มีค่าเท่ากับ 3.119 มิลลิเมตร ระยะการซึมลึก 1 (t1) มีค่ามากที่สุดที่ลำดับการทดลองที่3 มีค่าเท่ากับ 0.505 มิลลิเมตรและน้อยที่สุดที่ลำดับการทดลองที่1 มีค่าเท่ากับ 0.330 มิลลิเมตร ในด้านของระยะการกดลึก 1 (h1) ซึ่งอยู่ในด้านของอลูมิเนียมอัลลอย จะมีระยะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่มีค่าสูงสุดลำดับการทดลองที่4 มีค่าเท่ากับ 0.204 มิลลิเมตร และน้อยที่สุดที่ลำดับการทดลองที่1และเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ 0.168 มิลลิเมตร แต่ในทางกลับกันระยะการกดลึก 2 (h2) ซึ่งอยู่ในด้านของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นจะมีระยะลดลงเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่มีค่าสูงสุดลำดับการทดลองที่1 มีค่าเท่ากับ 0.182 มิลลิเมตร และน้อยที่สุดที่ลำดับการทดลองที่3 มีค่าเท่ากับ 0.098 มิลลิเมตร และระยะการซึมลึก 2 (t2) ไม่สามารถหาได้ เนื่องจากรอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นไม่พบการเกิดตัวของนิกเก็ท ซึ่งเป็นกลไกตามปกติของการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียมอัลลอย

#### 4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

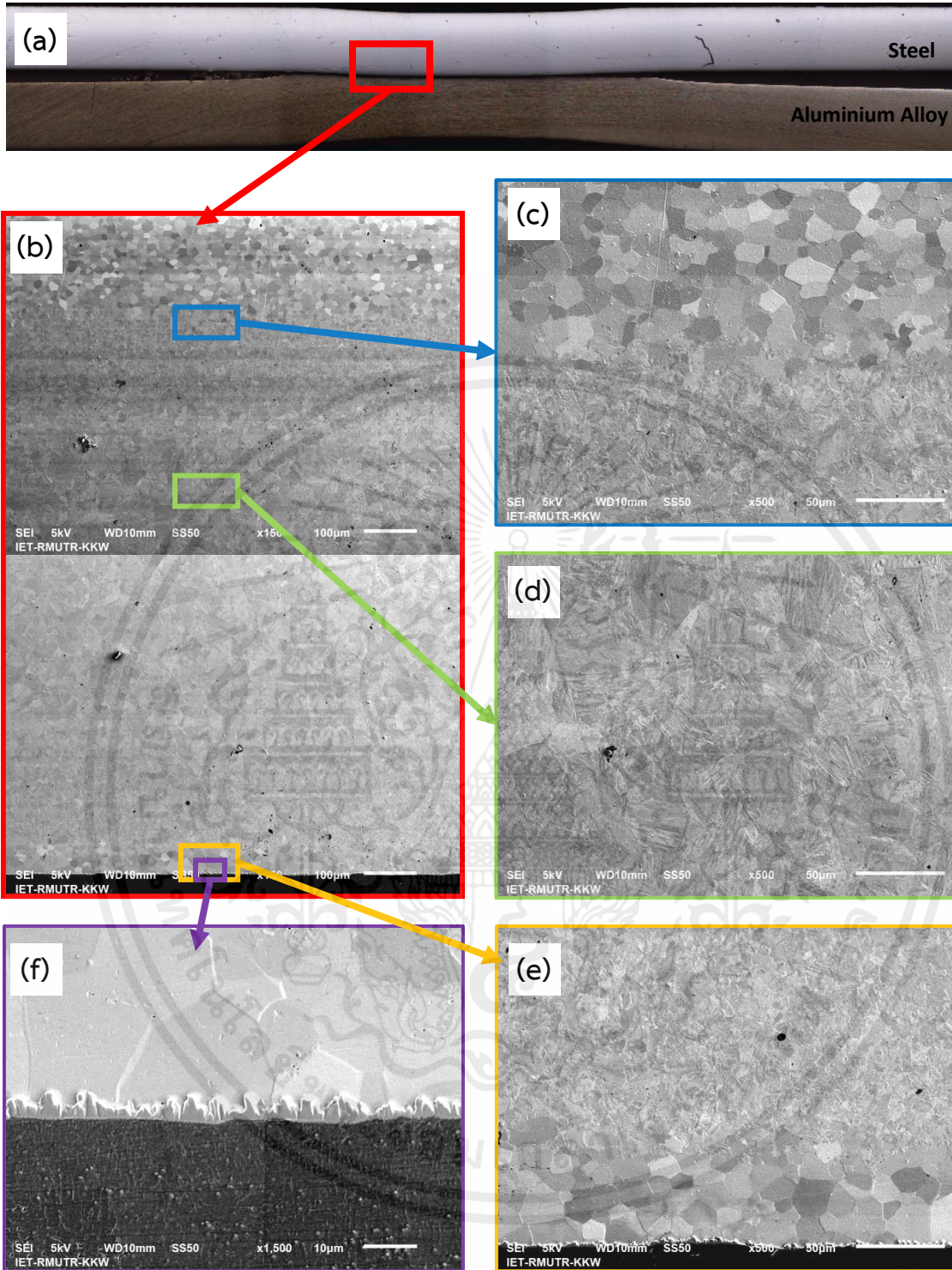


รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองที่ 1 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไมโครวินาที ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองที่ 3 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไมโครวินาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองเปรียบเทียบ  
เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์ และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

จากรูปที่ 4.14 คือโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองที่ 1 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไมโครวินาที ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4.14 (a) คือโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมซึ่งวัสดุในด้านบนคือเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นและด้านล่างคืออลูมิเนียมอัลลอย AA5052 รูปที่ 4.14 (b) คือโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น โดยรูปที่ 4.14 (c) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเตนไนต์บริเวณด้านบนของรูปและเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์บริเวณด้านล่างของรูปซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็ก รูปที่ 4.14 (d) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์โดยมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่า รูปที่ 4.14 (e) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนขนาดเล็กบริเวณด้านบนของรูปและเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเตนไนต์บริเวณด้านล่างของรูป และรูปที่ 4.14 (f) พบสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งมีลักษณะที่ปลายแหลมแบบเข็มชี้ไปในทิศของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และมีฐานเรียบบริเวณฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย

จากรูปที่ 4.15 คือโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองเปรียบเทียบ เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์ และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไมโครวินาที โดยที่รูปที่ 4.15 (a) คือโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมซึ่งวัสดุในด้านบนคือเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นและด้านล่างคืออลูมิเนียมอัลลอย AA5052 รูปที่ 4.15 (b) คือโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น รูปที่ 4.15 (c) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเตนไนต์บริเวณด้านบนของรูปและเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์บริเวณด้านล่างของรูปซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็ก รูปที่ 4.15 (d) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์โดยมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่า รูปที่ 4.15 (e) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนขนาดเล็กบริเวณด้านบนของรูปและเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเตนไนต์บริเวณด้านล่างของรูป และรูปที่ 4.15 (f) พบสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งมีลักษณะที่ปลายแหลมแบบเข็มชี้ไปในทิศของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และมีฐานเรียบบริเวณฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย

จากรูปที่ 4.16 คือโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ลำดับการทดลองที่ 1 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไมโครวินาที ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4.16 (a) คือโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมซึ่งวัสดุในด้านบนคือเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นและด้านล่างคืออลูมิเนียมอัลลอย AA5052 รูปที่ 4.16 (b) คือโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นซึ่งสามารถสังเกตเห็นให้ชัดเจนมากขึ้นตามแต่ละจุดในรูปที่ 4.16 (c), (d), (e), (f) โดยรูปที่ 4.16 (c) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเตนไนต์บริเวณด้านบนของรูปและเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์บริเวณด้านล่างของรูปซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็ก รูปที่ 4.16 (d) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์

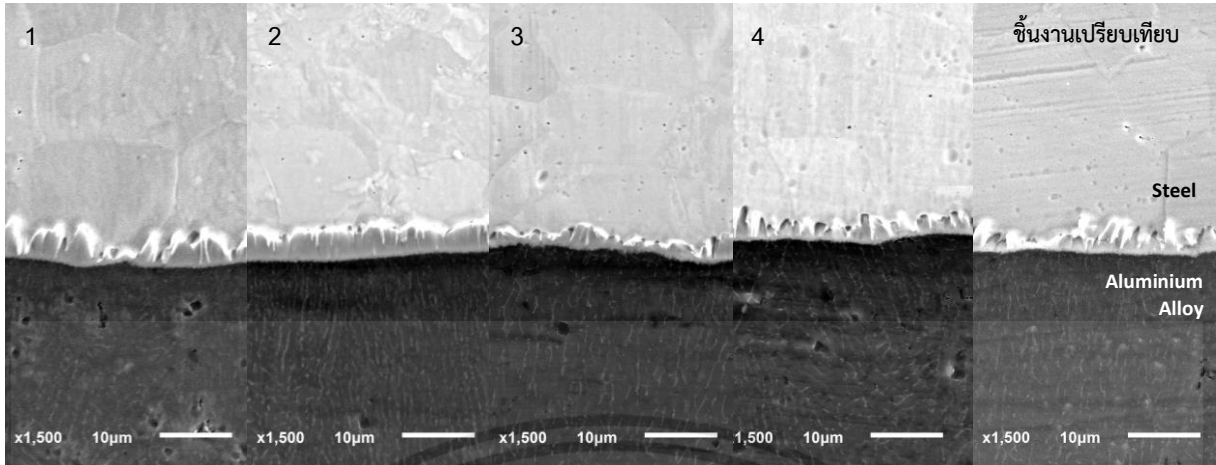
โดยมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่า รูปที่ 4.16 (e) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนขนาดเล็กบริเวณด้านบนของรูปและเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์บริเวณด้านล่างของรูป และรูปที่ 4.16 (f) พบสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งมีลักษณะที่ปลายแหลมแบบเข็มชี้ไปในทิศของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และมีฐานเรียบบริเวณฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.14-4.16 ในภาพรวมพบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยที่ด้านบนสุดของรูปที่ 4.14 – 4.16 (c) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์ซึ่งเป็นโครงสร้างของวัสดุในเริ่มแรกในด้านบนของรูปและด้านล่างของรูปเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็ก ต่อมาในรูปที่ 4.14 – 4.16 (d) ทั้งหมดเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ซึ่งมีขนาดเกรนที่ใหญ่ และรูปที่ 4.14 – 4.16 (e) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็กในด้านบนของรูปและด้านล่างของรูปเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์ ซึ่งการเกิดขึ้นของโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์สันนิษฐานว่าบริเวณเนื้อโลหะส่วนนี้ เป็นส่วนที่เกิดความร้อนขึ้นสอดคล้องกับรูปที่ 4.7 และหลังจากการเย็นตัวจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาเป็นมาร์เทนไซต์จากเดิมที่เป็นโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ ซึ่งความคล้ายกันของโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยยะสำคัญ

และสังเกตจากรูปที่ 4.14 – 4.16 (f) บริเวณรอยเชื่อมมีชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ชิ้นงาน 2 ชิ้นเกิดการยึดติดกัน โดยที่อลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นไม่ได้เกิดการหลอมละลายเป็นนิกเก็ทที่มีความต่อเนื่องซึ่งแตกต่างจากรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดของวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากชั้นของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยเชื่อม

#### 4.6.2 ความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

พิจารณาจากรูปที่ 4.14 – 4.16 (e) คือการเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาคฝั่งเหล็กกล้ารีดเย็นของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 1, 3 และชิ้นงานเปรียบเทียบ พบได้ว่าโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 1 และ 3 มีพื้นที่ที่น้อยกว่าชิ้นงานเปรียบเทียบในบริเวณด้านล่างที่ติดกับรอยเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการรับความร้อนที่มากขึ้นจากการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่สอง ทำให้เนื้อวัสดุโลหะมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนสูงขึ้น หลังจากเย็นลงจึงมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาเป็นมาร์เทนไซต์แทนที่ของโครงสร้างออสเทนไนต์เพิ่มมากขึ้น และจากรูปที่ 4.14 – 4.16 (d) บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ในลำดับการทดลองที่ 3 พบว่ามีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าชิ้นงานจากลำดับการทดลองอื่นเล็กน้อย เป็นผลมาจากการได้รับความร้อนในระหว่างการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่สองที่ใช้ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น

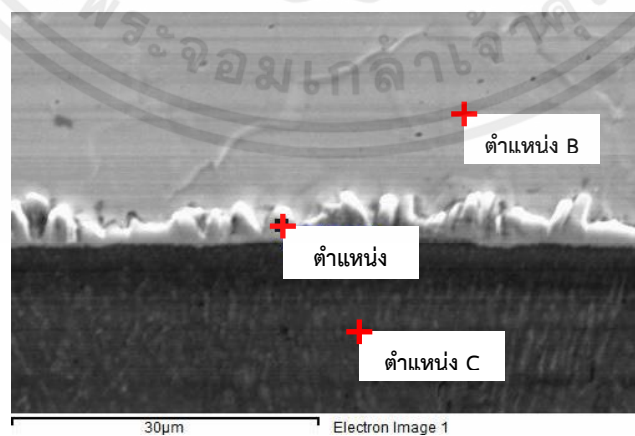


รูปที่ 4. 17 การเปรียบเทียบชั้นของสารประกอบบริเวณรอยเชื่อม

จากรูปที่ 4.17 สังเกตได้ว่าชั้นของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยเชื่อมในชิ้นงานจากลำดับการทดลองที่ 3 และ 4 มีความหนาของชั้นสารประกอบน้อยกว่าชิ้นงานจากลำดับการทดลองที่ 1, 2 และการเปรียบเทียบเล็กน้อย โดยชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 2 มีความหนาและความต่อเนื่องของสารประกอบเชิงโลหะมากที่สุด โดยปลายแหลมของสารประกอบเชิงโลหะมีความสูงในแนวระดับที่ใกล้เคียงกัน และชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 มีความหนาและความต่อเนื่องของสารประกอบเชิงโลหะน้อยที่สุด

#### 4.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อม

มีการนำชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 และชิ้นงานเปรียบเทียบทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อมเป็นจำนวน 3 ตำแหน่งดังรูปที่ 4.18 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งการตรวจสอบปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง A ของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS

ธาตุ	ตำแหน่ง A			
	ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3		ชิ้นงานเปรียบเทียบ	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al K	57.73	73.87	45.1	62.83
Fe K	42.27	26.13	54.57	36.73
Si	0	0	0.33	0.44

ตารางที่ 4.13 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง B ของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS

ธาตุ	ตำแหน่ง B			
	ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3		ชิ้นงานเปรียบเทียบ	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Fe K	99.67	99.58	99.62	99.46
Mn K	0.25	0.26	0.21	0.21
Mg K	0.07	0.17	0	0
Si K	0	0	0.14	0.28
S K	0	0	0.03	0.05

ตารางที่ 4.14 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง C ของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS

ธาตุ	ตำแหน่ง C			
	ชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3		ชิ้นงานเปรียบเทียบ	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al K	92.23	95.49	92.74	95.76
Mg K	2.13	2.45	2.06	2.37
Fe K	2.19	1.1	1.93	0.96
Ag L	3.2	0.83	3.01	0.78
Cr K	0.19	0.1	0.24	0.13
Mn K	0.05	0.02	0.02	0.01

จากตารางที่ 4.12 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง A พบว่าองค์ประกอบของธาตุมีความแตกต่างกันระหว่างชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 และชิ้นงานเปรียบเทียบ โดยชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 มีองค์ประกอบของธาตุอลูมิเนียมและเหล็ก 57.73% และ 42.27% โดยน้ำหนักตามลำดับ อีกทั้งไม่พบธาตุซิลิคอน ชิ้นงานเปรียบเทียบมีองค์ประกอบของธาตุอลูมิเนียมและเหล็ก 45.1% และ 54.57% โดยน้ำหนักตามลำดับ อีกทั้งพบธาตุซิลิคอน 0.33% โดยน้ำหนัก สังเกตได้ว่าในชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 จะมีปริมาณธาตุอลูมิเนียมสูงกว่าชิ้นงานเปรียบเทียบ แต่จะมีปริมาณธาตุเหล็กต่ำกว่าชิ้นงานเปรียบเทียบ และในขณะเดียวกันตำแหน่ง A คือตำแหน่งของรอยเชื่อมที่วัสดุเกิดการเชื่อมติดกันซึ่งมีลักษณะเป็นสารประกอบเชิงโลหะ ดังนั้นปริมาณองค์ประกอบของธาตุยังสามารถใช้หาชนิดของสารประกอบเชิงโลหะได้ โดยที่ชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 และชิ้นงานเปรียบเทียบพบชนิดสารประกอบเชิงโลหะที่สามารถวิเคราะห์ได้คือ  $FeAl_3$  และ  $FeAl_2$  ตามลำดับ ซึ่งพบได้ในแผนภูมิเฟสระหว่างธาตุเหล็กและอลูมิเนียม โดยที่ทั้ง 2 ชิ้นงานพบสารประกอบเชิงโลหะที่มีปริมาณธาตุอลูมิเนียมมากกว่าเหล็กเป็นสาเหตุมาจากการความสามารถในการละลายที่ต่ำกว่าและจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าของเหล็ก นอกจากนี้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ระบุถึงค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ของเฟสสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  และ  $FeAl_2$  มีค่าประมาณ 820-980 และ 1000-1050 ตามลำดับ [19]

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ประกอบกับผลการทดสอบแรงดึงเฉือนและระยะยืดก่อนการแตกหัก สังเกตได้ว่าชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 มีความสามารถรับแรงดึงสูงสุดซึ่งมีค่าความแข็งของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยเชื่อมที่ต่ำและระยะยืดก่อนการแตกหักที่สูง แต่ในทางกลับกันชิ้นงานเปรียบเทียบมีความสามารถรับแรงดึงต่ำกว่าและยังมีความแข็งของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยเชื่อมที่สูงและระยะยืดก่อนการแตกหักที่ต่ำ แสดงให้เห็นว่าชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ความสามารถรับแรงดึงเฉือนที่สูงของรอยเชื่อมลำดับการทดลองที่3 เป็นผลมาจากความเปราะของสารประกอบเชิงซ้อนที่น้อยกว่าเนื่องจากมีค่าความแข็งต่ำกว่า ทำให้สามารถดูดซับพลังงานได้สูงมากขึ้นและเกิดการเสียรูปแบบถาวรได้เพิ่มมากขึ้น

จากตารางที่ 4.13 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง B ซึ่งอยู่ในฝั่งของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น พบว่าองค์ประกอบของธาตุมีความแตกต่างกันระหว่างการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อมเล็กน้อย โดยชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 มีองค์ประกอบของธาตุเหล็กและแมงกานีส 99.67% และ 0.25% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าชิ้นงานเปรียบเทียบที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็กและแมงกานีส 99.62% และ 0.21% โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากนี้ชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 พบองค์ประกอบของธาตุแมงกานีสเพียงแต่ไม่พบในชิ้นงานเปรียบเทียบ ในทางกลับกันชิ้นงานเปรียบเทียบพบองค์ประกอบของธาตุซิลิคอนและกำมะถันซึ่งไม่พบในชิ้นงานลำดับการทดลองที่3

จากตารางที่ 4.14 ปริมาณธาตุที่ตำแหน่ง C ซึ่งอยู่ในฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอย พบว่าองค์ประกอบหลักคือธาตุอลูมิเนียม และองค์ประกอบของธาตุอื่นๆมีความแตกต่างกันระหว่างชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 และชิ้นงานเปรียบเทียบเล็กน้อย โดยชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 มีองค์ประกอบของธาตุอลูมิเนียมและโครเมียม 92.23% และ 0.19% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานเปรียบเทียบที่มีองค์ประกอบของธาตุอลูมิเนียมและโครเมียม 92.74% และ 0.24% โดยน้ำหนักตามลำดับ ในทางกลับกัน ชิ้นงานลำดับการทดลองที่3 มีองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม, เหล็ก, เงินและแมงกานีส 2.13%, 2.19%, 3.2% และ 0.05% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าชิ้นงานเปรียบเทียบที่มีองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม, เหล็ก, เงินและแมงกานีส 2.06%, 1.93%, 3.01% และ 0.02% โดยน้ำหนักตามลำดับ

#### 4.7 การสึกหรอของหัวอิเล็กโทรดหลังผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

จากรูปที่ 4.19 สังเกตได้ว่าหัวอิเล็กโทรดด้านที่สัมผัสกับเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นมีระดับการสึกหรอน้อยกว่าด้านที่สัมผัสกับอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 เมื่อถูกใช้งานเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง และยังพบเศษของวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยที่หลอมละลายระหว่างการเชื่อมติดบนหัวอิเล็กโทรด แต่ไม่พบในหัวอิเล็กโทรดด้านที่สัมผัสกับเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เนื่องจากอลูมิเนียมอัลลอยมีจุดหลอมเหลวที่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้เกิดการหลอมละลายได้ง่ายทำให้เกิดกระจายของวัสดุตัวบนหัวอิเล็กโทรดเล็กน้อยหลังจากเกิดการเย็นตัวลง



รูปที่ 4.19 หัวอิเล็กโทรดด้านสัมผัสกับเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (ซ้าย)  
ด้านสัมผัสกับอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 (ขวา)

#### 4.8 การอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด มีอิทธิพลของต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น โดยมีรายละเอียดดังนี้

ในด้านของการทดสอบแรงดึงเฉือน หลังจากที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลโดยด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าและอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมในด้านความสามารถการรับแรงดึงเฉือน และเมื่อพิจารณาจากกราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยจะพบว่าระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองส่งผลต่อความสามารถการรับแรงดึงเฉือนเป็นอย่างมาก โดยมีค่าแปรผันตรงระหว่างกันและความสามารถรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5,000 แอมแปร์ และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 25 ไซเคิล แล้วมีค่าต่ำสุดเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5,000 แอมแปร์ และระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ 5 ไซเคิล

ในด้านความเสียหายของรอยเชื่อมและระยะยึดที่จุดแตกหักพบว่า หลังจากการทดสอบแรงดึงเฉือน ทุกชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบ Interfacial Failure Mode คือการแตกหักเริ่มแพร่ผ่าน Fusion Zone: FZ แสดงให้เห็นว่าเกิดการเสียรูปแบบถาวรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อพิจารณาระยะยึดที่จุดแตกหักพบว่าระยะยึดที่จุดแตกหักของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง

ในด้านโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม พบว่าสามารถสังเกตเห็นนิกเกิ้ลในฝั่งของอลูมิเนียมอัลลอยเพียงฝั่งเดียว ซึ่งลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ได้มีความแตกต่างจากรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดในวัสดุชนิดเดียวกันซึ่งจะเห็นนิกเกิ้ลของรอยเชื่อมทั้งสองฝั่งของวัสดุ เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุ โดยที่พบว่าขนาดของรอยเชื่อม ( $d_i$ ) และระยะการซึมลึก 1 ( $t_1$ ) แปรผันตรงกับระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ระยะการกัดลึก 1 ( $h_1$ ) ซึ่งอยู่ในด้านของอลูมิเนียมอัลลอยจะมีระยะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันระยะการกัดลึก 2 ( $h_2$ ) ซึ่งอยู่ในด้านของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นจะมีระยะลดลงเมื่อระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น และระยะการซึมลึก 2 ( $t_2$ ) ไม่สามารถหาได้เนื่องจากรอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นไม่พบการเกิดตัวของนิกเกิ้ล

ในด้านโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยจะประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์, มาร์เทนไซต์ซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็ก, มาร์เทนไซต์ซึ่งมีขนาดเกรนที่ใหญ่, มาร์เทนไซต์ซึ่งมีขนาดเกรนที่เล็ก และออสเทนไนต์ ตามลำดับจาก

พื้นผิววัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นจนถึงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งโครงสร้างจุลภาคแบบออสเตนไนต์เป็นโครงสร้างของวัสดุในเริ่มแรก การเกิดขึ้นของโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์สันนิษฐานว่าบริเวณเนื้อโลหะส่วนนี้เป็นส่วนที่เกิดความร้อนและหลังจากการเย็นตัวจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาเป็นมาร์เทนไซต์จากเดิมที่เป็นโครงสร้างแบบออสเตนไนต์ ความคล้ายกันของโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ชั้นงาน 2 ชั้นเกิดการยึดติดกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากชั้นของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยเชื่อม และเมื่อใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อมระหว่างชั้นงานลำดับการทดลองที่ 3 และชั้นงานเปรียบเทียบ พบว่าองค์ประกอบธาตุที่ฝังอะลูมิเนียมอัลลอยพบธาตุอะลูมิเนียมเป็นหลักและมีธาตุอื่นเล็กน้อยคล้ายกันทั้ง 2 ชั้นงาน และองค์ประกอบธาตุที่ฝังเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นพบธาตุเหล็กเป็นหลักและมีธาตุอื่นเล็กน้อยคล้ายกันทั้ง 2 ชั้นงาน แต่ในส่วนขององค์ประกอบธาตุที่รอยเชื่อมซึ่งเป็นจุดที่พบสารประกอบเชิงโลหะพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อนำไปวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นพบว่าชั้นงานลำดับการทดลองที่ 3 ซึ่งผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบพัลส์ที่หนึ่งและสอง เกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  และชั้นงานเปรียบเทียบซึ่งผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบพัลส์ที่หนึ่งเท่านั้น เกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_2$  ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งที่สูงส่งผลให้มีคุณสมบัติที่เปราะ สอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงเฉือนซึ่งพบว่าเกิดการขาดแยกของรอยเชื่อมเกิดขึ้นเป็นรูป Interfacial failure mode ที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า  $FeAl_3$  มีค่าความแข็งน้อยกว่า จึงมีความเปราะของชั้นสารประกอบที่น้อยกว่า ทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้านการรับแรงดึงเฉือนจึงมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้สังเกตได้ว่าชั้นงานลำดับการทดลองที่ 3 มีองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชั้นงานเปรียบเทียบ เพราะว่าลำดับการทดลองที่ 3 เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไมโครวินาที ตามลำดับ ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับผลการตรวจสอบขนาดของรอยเชื่อม ( $d_i$ ) และระยะเวลาการซึมลึก 1 ( $t_1$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งปริมาณโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ที่มีมากขึ้น ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุทำให้การแพร่ของธาตุอะลูมิเนียมสู่วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นได้มากขึ้น ปริมาณองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียมในชั้นสารประกอบเชิงโลหะเมื่อเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสองจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 57.73% โดยน้ำหนัก จากเดิมที่มีค่า 45.1% โดยน้ำหนัก เมื่อเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งเท่านั้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียมส่งผลให้ชนิดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจึงเปลี่ยน  $FeAl_2$  เป็น  $FeAl_3$  หลังจากมีการเชื่อมกระแสพัลส์ที่สองเพิ่มเติม

และจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างธาตุเหล็กและอลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 4.15 มีการแสดงค่าพลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs Free Energy) ของแต่ละปฏิกิริยา ซึ่งการพิจารณาความเสถียรของเฟสที่ปรากฏในระบบหนึ่งภายใต้สภาวะความดันคงที่ จะสามารถพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs Free Energy) ของเฟสต่างๆทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและส่วนผสมของระบบ เฟสที่มีความเสถียรและปรากฏขึ้นในระบบคือเฟสที่มีค่าพลังงาน Gibbs free energy ต่อหนึ่งโมลน้อยที่สุด [34]

ตารางที่ 4.15 พลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs Free Energy) ของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างธาตุเหล็กและอลูมิเนียม [35]

ระบบ (System)	ปฏิกิริยา (Reaction)	พลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs Free Energy) (แคลอรี/โมล)	
		293-933 K	933-1500 K
Fe-Al	$\frac{1}{2} \text{Fe}_3\text{Al} + \text{Al} = \frac{3}{2} \text{FeAl}$	-10530-7.80T	-12040-5.11T
	$\text{FeAl} + \text{Al} = \text{FeAl}_2$	-7920+1.43T	-10420+4.11T
	$2 \text{FeAl}_2 + \text{Al} = \text{Fe}_2\text{Al}_5$	-9160+1.98T	-11600+4.68T
	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{Al} = 2\text{FeAl}_3$	-5040+0.96T	-7540+3.62T

เนื่องจากจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมอัลลอยซึ่งมีค่าเท่ากับ 660 เซลเซียสหรือ 933 เคลวิน และจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น 1,480 เซลเซียสหรือ 1,753 เคลวิน ประมาณการอุณหภูมิที่หลอมเหลวในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นคือ 1,343 เคลวิน เมื่อคำนวณหาผลรวมพลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs free energy) ของการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{FeAl}_3$  ซึ่งพบในชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 ที่เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานเสรีกิ๊บส์ในปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{FeAl}$ ,  $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  และ  $\text{FeAl}_3$  ที่อุณหภูมิ 1,343 เคลวิน ได้ผลลัพธ์คือ -31,856.1 แคลอรี/โมล และผลรวมพลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs free energy) ของการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{FeAl}_2$  ซึ่งพบในชิ้นงานเปรียบเทียบ ที่เชื่อมด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งเท่านั้น มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานเสรีกิ๊บส์ในปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{FeAl}$  และ  $\text{FeAl}_2$  ที่อุณหภูมิ 1,343 เคลวิน ได้ผลลัพธ์คือ -23,803 แคลอรี/โมล

จากผลการผลลัพธ์คำนวณ พบว่าพลังงานเสรีกิ๊บส์ (Gibbs free energy) การเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{FeAl}_3$  มีพลังงานต่ำกว่า  $\text{FeAl}_2$  แสดงถึงความสามารถในการเกิดมีมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณา

สมการปฏิกิริยาการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในตารางที่ 4.15 พบว่า กระบวนการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  ต้องมีสารประกอบเชิงโลหะตั้งต้นคือ  $Fe_2Al_5$  เช่นเดียวกันสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_2Al_5$  ต้องมีสารประกอบเชิงโลหะตั้งต้นคือ  $FeAl_2$  แสดงให้เห็นว่า การเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  จะต้องมีการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_2$  ก่อน เพื่อเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะก่อนหน้าปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  แต่พลังงานเสรีกิบบส์ (Gibbs free energy) ที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของ  $FeAl_3$  และ  $FeAl_2$  สามารถเกิดขึ้นได้เอง เนื่องจากจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้เราทราบว่า ปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous หรือ Irreversible Process) จะต้องทำให้เอนโทรปีของจักรวาลเพิ่มขึ้น ซึ่งและกระบวนการจะมีค่า  $\Delta S_{irrev}$  มากกว่าศูนย์ โดยที่ค่าเอนโทรปีจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีค่ามากที่สุดเมื่อการเปลี่ยนแปลงนั้นเข้าสู่จุดสมดุล จากสมการ 4.1 จะทราบได้ว่าค่า  $\Delta G$  น้อยกว่าศูนย์แสดงถึงระบบดำเนินการสู่จุดสมดุล ทำให้ค่า  $G$  จะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าน้อยที่สุดที่จุดสมดุล และแสดงให้เห็นว่า  $\Delta G < 0$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า  $\Delta G > 0$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้แต่จะเกิดขึ้นได้เองในทิศทางย้อนกลับ และ  $\Delta G = 0$  ระบบอยู่ในสมดุลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [34]

$$\Delta G + \Delta S_{irrev} = 0 \quad (4.1)$$

โดยที่  $\Delta G$  คือ พลังงานเสรีกิบบส์ (Gibbs free energy) (แคลอรี/โมล)  
 $\Delta S_{irrev}$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบระหว่างกระบวนการไม่คืนสภาพ (Entropy Change of System During an Irreversible Process) (แคลอรี/โมล)

เมื่อทราบว่าสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  และ  $FeAl_2$  สามารถเกิดขึ้นได้เอง โดยการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของ  $FeAl_3$  จะต้องอาศัยการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_2$  ก่อน โดยสาเหตุที่ไม่พบสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  ในชิ้นงานเปรียบเทียบที่เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งเท่านั้น เนื่องจากพลังงานความร้อนที่มีไม่มากเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงโลหะของ  $FeAl_3$  จึงพบเพียงแค่สารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_2$  เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่สองส่งผลให้ปริมาณความร้อนในกระบวนการเชื่อมเพิ่มขึ้นและยังทำให้เปลี่ยนแปลงชนิดสารประกอบเชิงโลหะจาก  $FeAl_2$  เป็น  $FeAl_3$  ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าส่งผลให้ความเปราะของชิ้นสารประกอบโลหะของรอยเชื่อมลดลง จึงทำให้สามารถรับแรงดึงเดือนได้สูงขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการผลสรุปของงานวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของพัลส์ที่สองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสรุปผล
2. ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การสรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลและแนวโน้มของตัวแปรกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สองที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น จากการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design จากการทดสอบความสามารถการรับแรงดึงเฉือน การตรวจสอบลักษณะความเสียหายของรอยเชื่อมและการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองเชิง Factorial Design เพื่อทดสอบความสามารถรับแรงดึงเฉือน

ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีอิทธิพลต่อความสามารถการรับแรงดึงเฉือน ซึ่งมีค่าแปรผันตรงระหว่างกัน โดยที่เงื่อนไขที่ทำให้ได้ความสามารถรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมโดยการรับแรงดึงเฉือนได้สูงที่สุดคือที่เงื่อนไขค่าระดับของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองอยู่ที่ 5,000 แอมแปร์ และ 25 ไซเคิล นอกเหนือจากนี้อิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสองที่กำหนดมีผลต่อความสามารถรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเช่นกัน

##### 5.1.2 การวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบความเสียหายของรอยเชื่อม

ลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมอยู่ในรูปแบบของ Interfacial failure mode ถึงแม้จะเป็นเงื่อนไขที่ได้ความแข็งแรงรอยเชื่อมโดยการรับแรงดึงเฉือนได้สูงที่สุด เนื่องจากการเชื่อมติดกันของชิ้นงานเป็นผลมาจากสารประกอบเชิงโลหะที่มีคุณสมบัติเปราะ ดังนั้นรอยเชื่อมที่ได้จึงความสามารถในการดูดซับพลังงานต่ำ จะเกิดการเสียรูปแบบถาวรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ชิ้นงานมีคือการขาดแยกของชิ้นงานที่

บริเวณกึ่งกลางของนักเก็ตรอยเชื่อม และในด้านของระยะยึดที่จุดแตกหักของรอยเชื่อมพบว่า การเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองส่งผลให้มีระยะยึดก่อนถึงจุดแตกหักที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในเงื่อนไขของการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองอยู่ที่ 5,000 แอมแปร์, 5 ไชเคิล และ 7,500 แอมแปร์, 15 ไชเคิล

### 5.1.3 การวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมพบว่า เห็นนักเก็ตหรือบริเวณพื้นที่โลหะหลอมละลายในฝั่งของวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย AA5052 เท่านั้นเนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติวัสดุที่ถูกเชื่อม เมื่อกำหนดค่าระดับของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองสูงขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของรอยเชื่อม ระยะซิมลิก 1 ระยะกตลิก 1 ซึ่งอยู่ในฝั่งของวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย AA5052 มีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม พบว่ารอยต่อที่ถูกเชื่อมติดกันเป็นผลมาจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิด ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะจะมีความหนาแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ความหนาของชั้นจะลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานจุดพัลส์ที่สองที่ 25 ไชเคิล เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในชั้นสารประกอบเชิงโลหะในชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 ซึ่งมีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สองด้วยเงื่อนไขระดับและระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองอยู่ที่ 5,000 แอมแปร์ และ 25 ไชเคิล ตามลำดับ และชิ้นงานเปรียบเทียบกับซึ่งมีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่หนึ่งเพียงอย่างเดียว พบองค์ประกอบธาตุมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อวิเคราะห์ชนิดสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นพบว่า เป็นสารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  ในชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 และ  $FeAl_2$  ในชิ้นงานเปรียบเทียบ ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะทั้งสองชนิดจะมีค่าความแข็งที่สูงส่งผลให้รอยเชื่อมขาดแยกเป็นรูปแบบ Interfacial Failure Mode เนื่องจากการเสียรูปแบบถาวรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่สารประกอบเชิงโลหะ  $FeAl_3$  ในชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นค่าระดับที่มีความสามารถรับแรงดึงเฉือนที่สูงสูงมีค่าความแข็งต่ำกว่า จึงทำให้รอยเชื่อมมีความเปราะน้อยและสามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงขึ้น

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเพิ่มระดับของปัจจัยและค่าระดับของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดพัลส์ที่สอง ในการออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design เพื่อหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการแตกหักแบบ Pullout Failure (PF) Mode และเพิ่มจำนวนการทำซ้ำเป็น 3 ครั้งเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวิเคราะห์

2. ควรมีการศึกษาต่อในด้านการอัตราการสึกหรอของหัวอิเล็กโทรด เนื่องจากในระดับภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีการผลิตเป็นจำนวนมาก อายุการใช้งานของหัวอิเล็กโทรดจะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตโดยตรง

3. ควรมีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope) และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อมด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS การในทุกวิธีปฏิบัติ เพื่อสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่สองที่ ค่าระดับของปัจจัยแตกต่างกันได้

4. ควรมีการยืนยันผลของการวิเคราะห์เฟสของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบของธาตุจาก Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ด้วยวิธี X-Ray Diffraction



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] W. H. Zhang, X. M. Qiu, D. Q. Sun, and L. J. Han, “Effects of resistance spot welding parameters on microstructures and mechanical properties of dissimilar material joints of galvanised high strength steel and aluminium alloy,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 2, pp. 153–161, Feb. 2011, doi: 10.1179/1362171810Y.0000000009.
- [2] M. Pouranvari, “Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities,” *Materials Science and Technology*, vol. 33, no. 15, pp. 1705–1712, Oct. 2017, doi: 10.1080/02670836.2017.1334310.
- [3] S. M. Manladan, I. Abdullahi, and M. F. Hamza, “A REVIEW ON THE APPLICATION OF RESISTANCE SPOT WELDING OF AUTOMOTIVE SHEETS,” vol. 10, p. 19, 2015.
- [4] I. N. Fridlyander, V. G. Sister, O. E. Grushko, V. V. Berstenev, L. M. Sheveleva, and L. A. Ivanova, “Aluminum Alloys: Promising Materials in the Automotive Industry,” *Aluminum Alloys*, p. 6.
- [5] J. C. Benedyk, “Aluminum alloys for lightweight automotive structures,” in *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Elsevier, 2010, pp. 79–113. doi: 10.1533/9781845697822.1.79.
- [6] S. M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh, and M. Fadzil, “A review on resistance spot welding of magnesium alloys,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 86, no. 5–8, pp. 1805–1825, Sep. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8258-9.
- [7] S. N. Mortazavi, P. Marashi, M. Pouranvari, and M. Masoumi, “Investigation on Joint Strength of Dissimilar Resistance Spot Welds of Aluminum Alloy and Low Carbon Steel,” *AMR*, vol. 264–265, pp. 384–389, Jun. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.384.
- [8] X. Wan, Y. Wang, and C. Fang, “Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel,” *ISIJ Int.*, vol. 54, no. 8, pp. 1883–1889, 2014, doi: 10.2355/isijinternational.54.1883.

- [9] A. Gullino, P. Matteis, and F. D’Aiuto, “Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications,” *Metals*, vol. 9, no. 3, p. 315, Mar. 2019, doi: 10.3390/met9030315.
- [10] I. A. Soomro and S. R. Pedapati, “Application of in situ post weld heat treatment using double pulse technology and its effect on microstructure and mechanical performance of resistance spot welded HSLA350 steel,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 105, no. 7–8, pp. 3249–3260, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04569-2.
- [11] P. Eftekharmilani, E. M. van der Aa, M. J. M. Hermans, and I. M. Richardson, “Microstructural characterisation of double pulse resistance spot welded advanced high strength steel,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 22, no. 7, pp. 545–554, Oct. 2017, doi: 10.1080/13621718.2016.1274848.
- [12] C. Summerville, P. Compston, and M. Doolan, “A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 305–312, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.142.
- [13] L. Liu, J. Feng, and Y. Zhou, “Resistance spot welding of magnesium alloys,” in *Welding and Joining of Magnesium Alloys*, Elsevier, 2010, pp. 351–367e. doi: 10.1533/9780857090423.2.351.
- [14] Y. R. Wang, Z. H. Mo, J. C. Feng, and Z. D. Zhang, “Effect of welding time on microstructure and tensile shear load in resistance spot welded joints of AZ31 Mg alloy,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 8, pp. 671–676, Nov. 2007, doi: 10.1179/174329307X238380.
- [15] “resistance.pdf.” Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://www.millerwelds.com/-/media/miller-lectric/files/pdf/resources/resistance.pdf>
- [16] J. Hirsch, “Recent development in aluminium for automotive applications,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 7, pp. 1995–2002, Jul. 2014, doi: 10.1016/S1003-6326(14)63305-7.
- [17] S. M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh, M. Fadzil, Z. Luo, and S. Ao, “A review on resistance spot welding of aluminum alloys,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 90, no. 1–4, pp. 605–634, Apr. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9225-9.

- [18] M. K. Singh, "Application of Steel in Automotive Industry," vol. 6, no. 7, p. 9, 2016.
- [19] S. A. M. Meco, "Joining of steel to aluminium alloys for advanced structural applications," p. 267.
- [20] L. Cui, R. Qiu, L. Hou, Z. Shen, and Q. Li, "Resistance Spot Welding between Steel and Aluminum Alloy," p. 5.
- [21] W. Zhang, D. Sun, L. Han, W. Gao, and X. Qiu, "Characterization of Intermetallic Compounds in Dissimilar Material Resistance Spot Welded Joint of High Strength Steel and Aluminum Alloy," *ISIJ Int.*, vol. 51, no. 11, pp. 1870–1877, 2011, doi: 10.2355/isijinternational.51.1870.
- [22] R. Qiu, H. Shi, K. Zhang, Y. Tu, C. Iwamoto, and S. Satonaka, "Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding," *Materials Characterization*, vol. 61, no. 7, pp. 684–688, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.matchar.2010.03.015.
- [23] N. Chen, H.-P. Wang, B. E. Carlson, D. R. Sigler, and M. Wang, "Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 243, pp. 347–354, May 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.015.
- [24] M. J. Zedan and Q. M. Doos, "New Method of Resistance Spot Welding for Dissimilar 1008 Low Carbon Steel-5052 Aluminum Alloy," *Procedia Structural Integrity*, vol. 9, pp. 37–46, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.06.008.
- [25] อธิรุฒิ เชื้ออนแก้ว. 2562. การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] Montgomery, Douglas C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [27] ประภาพรรณ พรหมทองและนายปฐมนิธิ ดำศรี. 2564. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

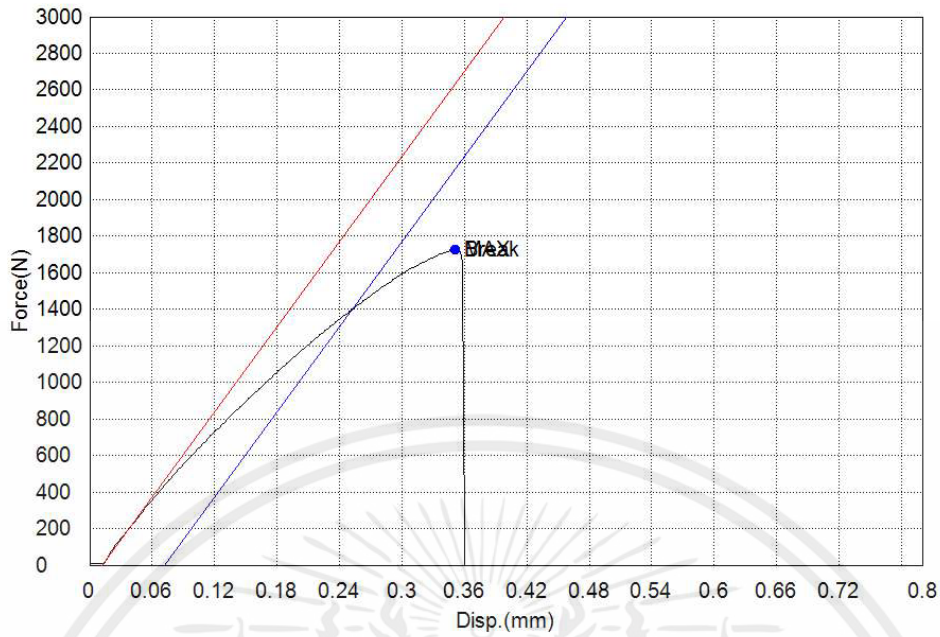
- [28] ธนกานต์ วิจิระประเสริฐ. 2557. การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางอุทกศาสตร์ศึกษา  
เฮลิคอปเตอร์กระดาศ. ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] กิตติมา เกื่อนวรรณมา. 2561. การออกแบบปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแบบหนา  
พิเศษบนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทาง  
วิศวกรรม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [30] ภูมิินทร์ รักษากิจ, ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ และ กุศล พิมาพันธุ์ศรี, “การลดปริมาณของเสียในกระบวนการ  
กลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนคร  
เหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 393-403,ก.ย.-ธ.ค. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.04.006>
- [31] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2015.
- [32] เซลลิสเตอร์, วิลเลียม ดี, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ ออยุธยา, กอบบุญ หล่อทองคำ,  
ธาดา หลือวราพันธ์, ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, และ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์. วัสดุศาสตร์และ  
วิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2548.
- [33] Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co.,Ltd. “Panasonic YR-500CM2” [Online].  
Available: <http://kyresource.tsmi.com.cn/files/201603/20160308141011775.pdf>
- [34] D. R. Gaskell, *Introduction to the thermodynamics of materials*, 4th ed. New York:  
Taylor & Francis, 2003.
- [35] E. G. Ivanov, “Thermodynamic analysis of phase transformations during aluminizing,”  
*Met Sci Heat Treat*, vol. 21, no. 6, pp. 449-452, Jun. 1979, doi: 10.1007/BF00780482.



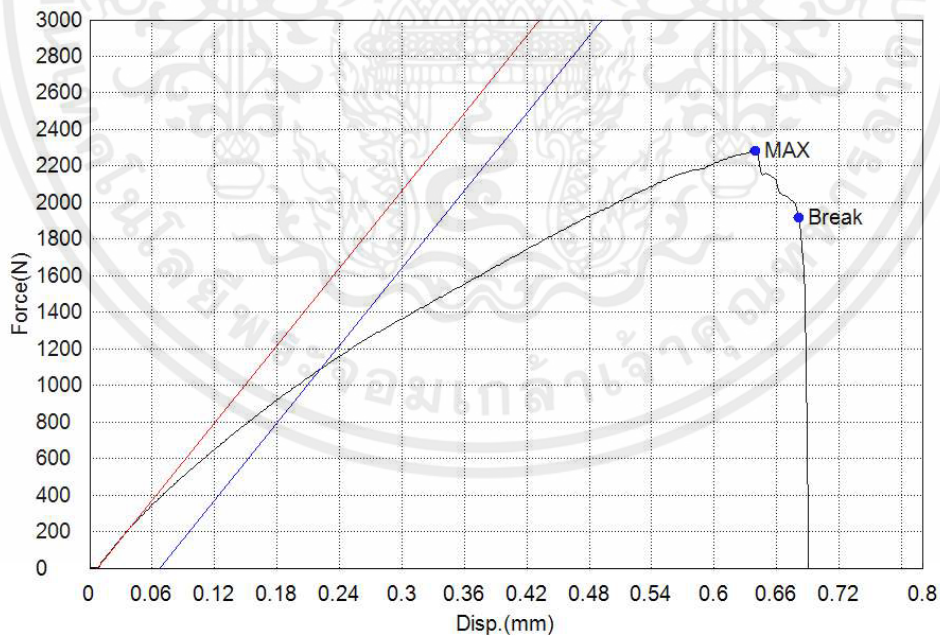
ภาคผนวก ก.

กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

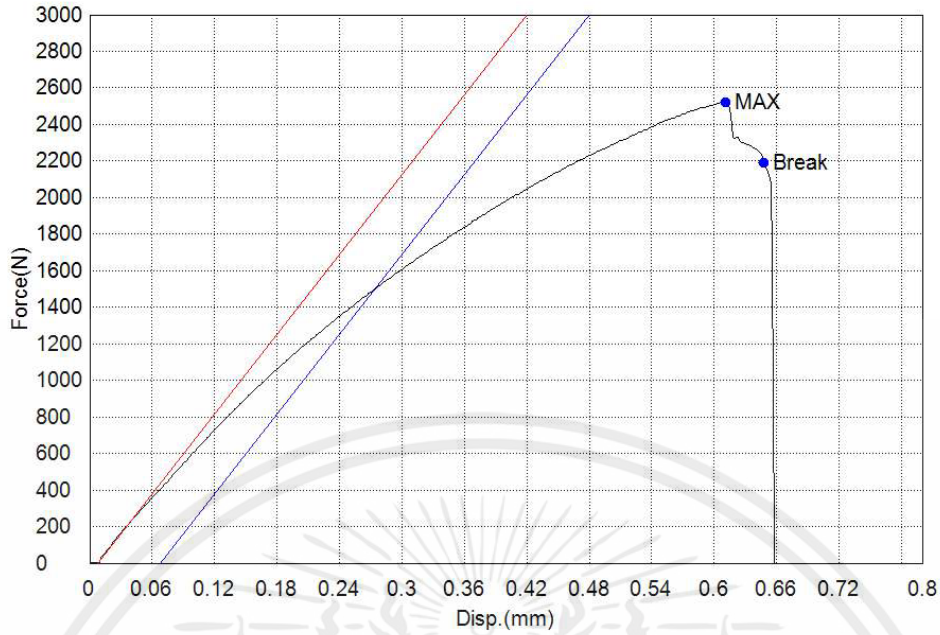


รูปที่ ผก. 1 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 1 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไมโครวินาที ตามลำดับ

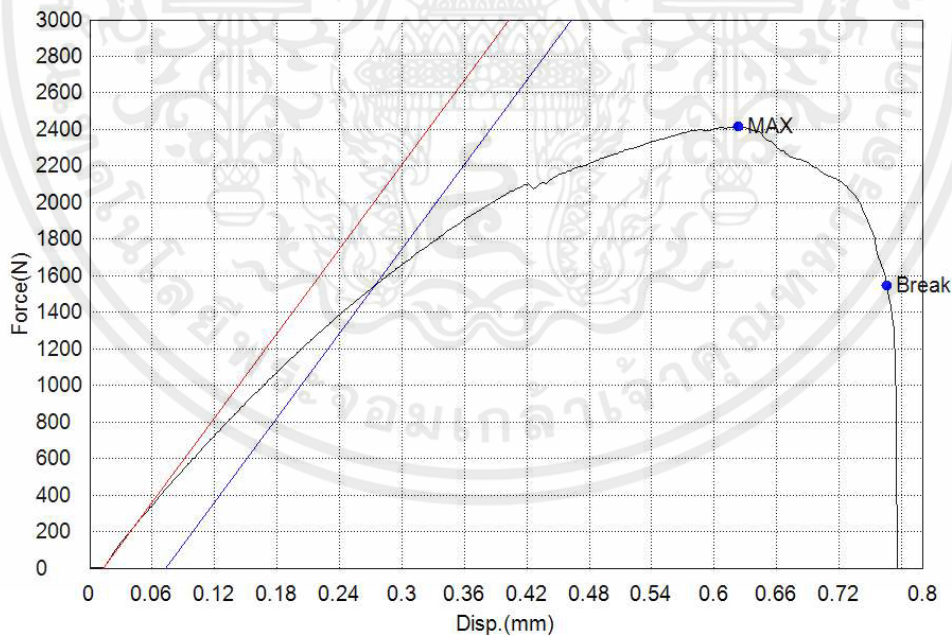


รูปที่ ผก. 2 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 2 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไมโครวินาที ตามลำดับ

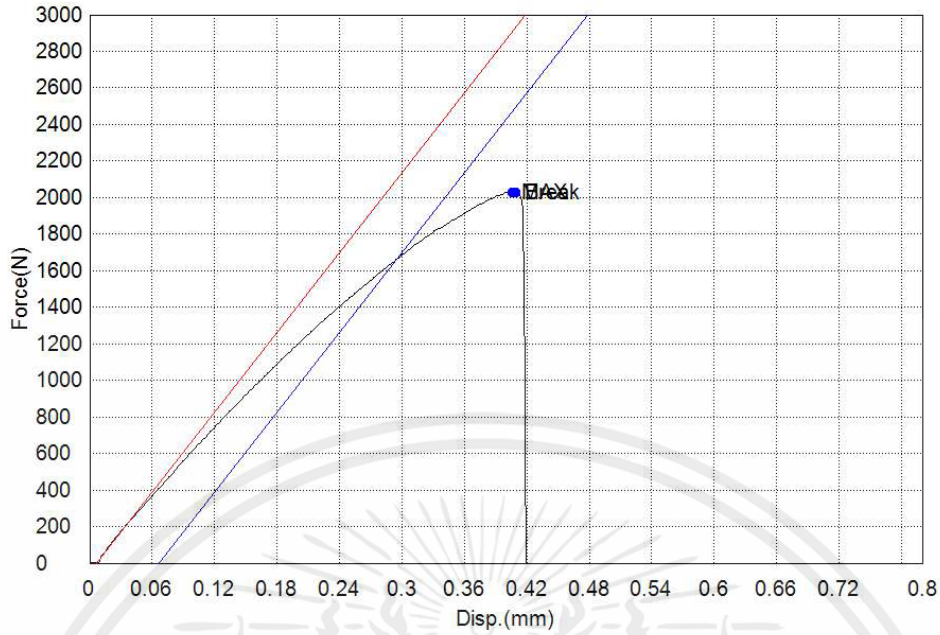
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



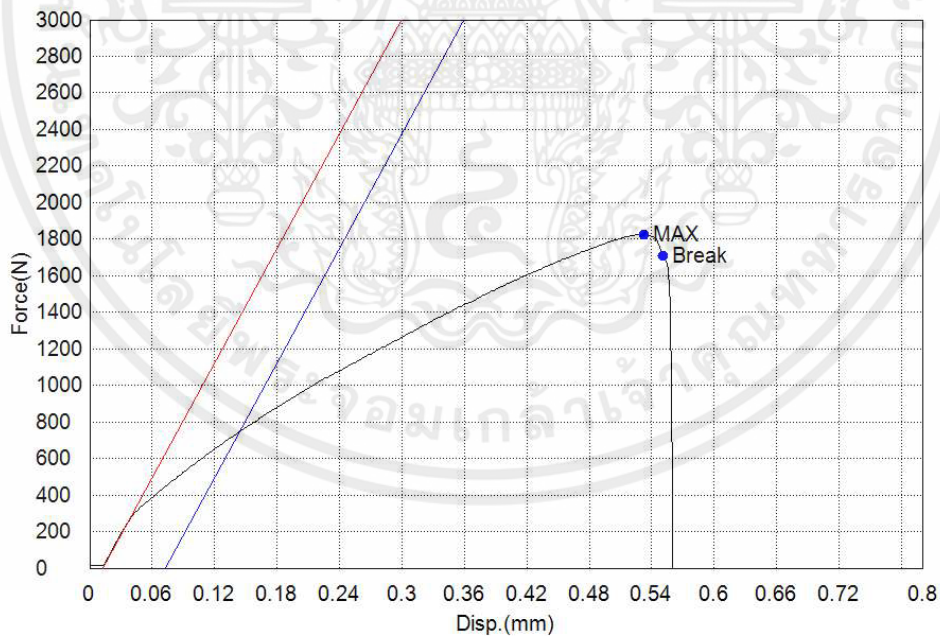
รูปที่ ผก. 3 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 3 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไซเคิล ตามลำดับ



รูปที่ ผก. 4 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 4 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไซเคิล ตามลำดับ

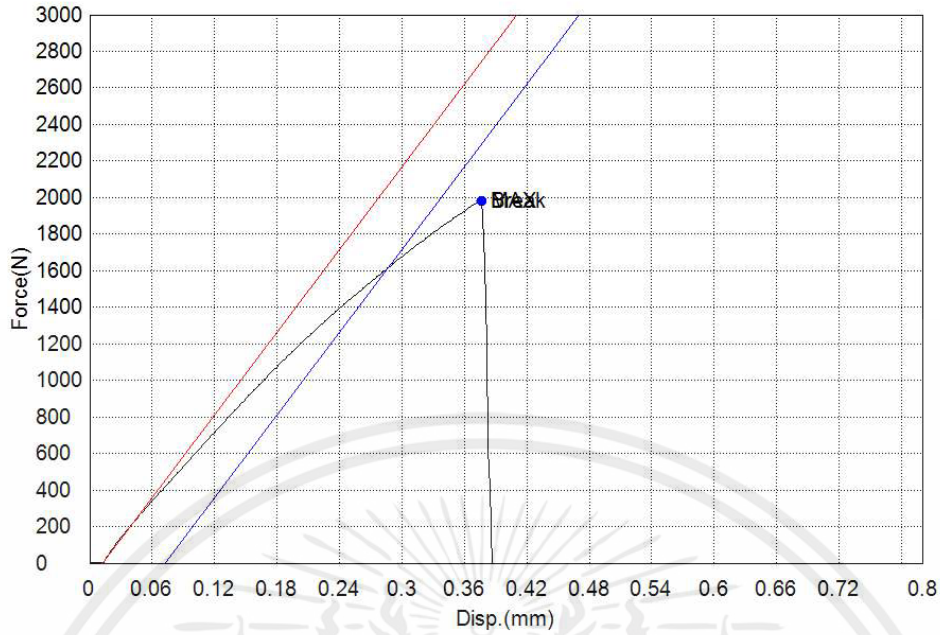


รูปที่ ผก. 5 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 5 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 7,500 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 15 ไมโครวินาที ตามลำดับ

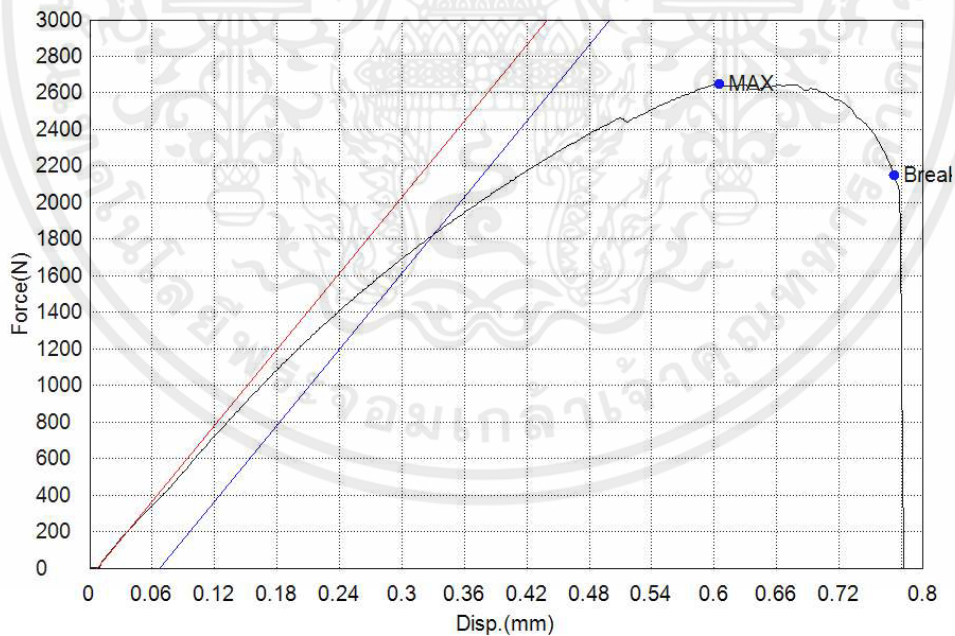


รูปที่ ผก. 6 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 6 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไมโครวินาที ตามลำดับ

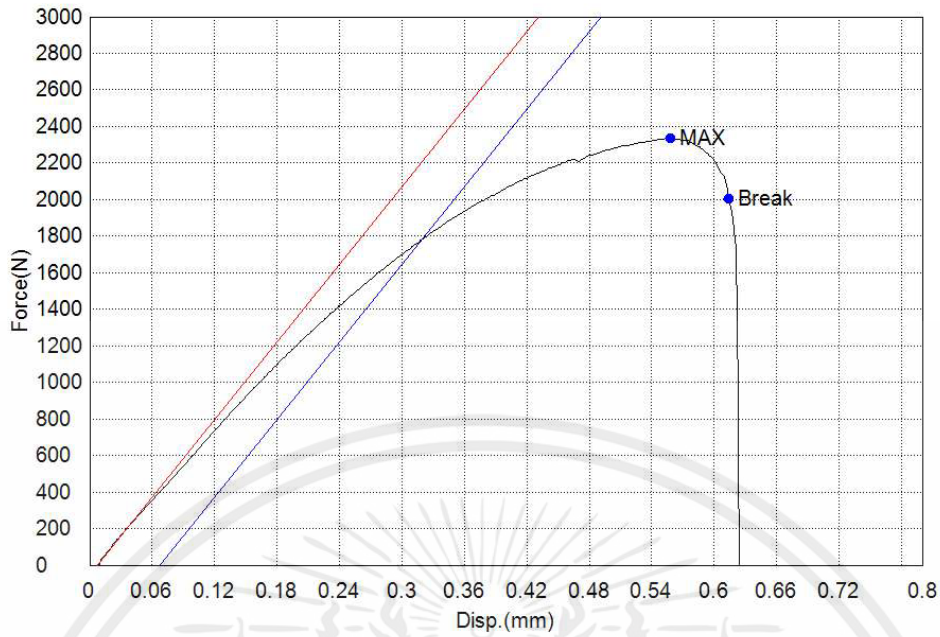
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



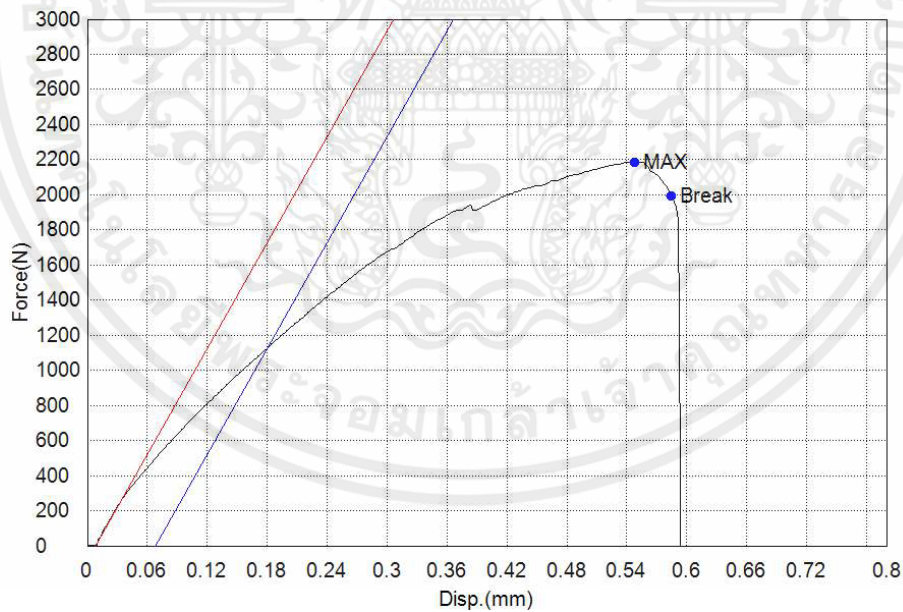
รูปที่ ผก. 7 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 7 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 5 ไมโครวินาที ตามลำดับ



รูปที่ ผก. 8 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 8 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 5,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไมโครวินาที ตามลำดับ

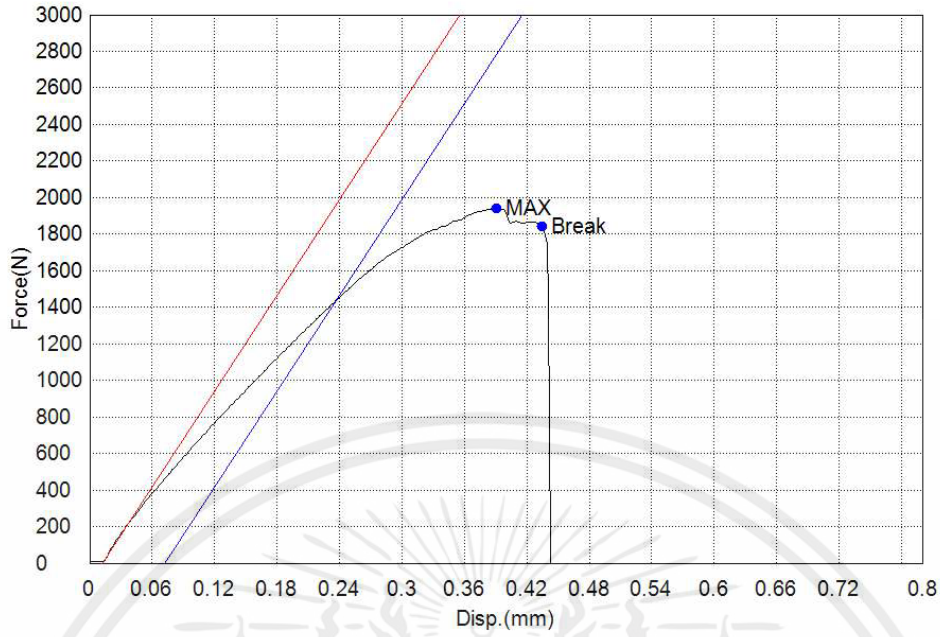


รูปที่ ผก. 9 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 9 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 10,000 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 25 ไมโครวินาที ตามลำดับ

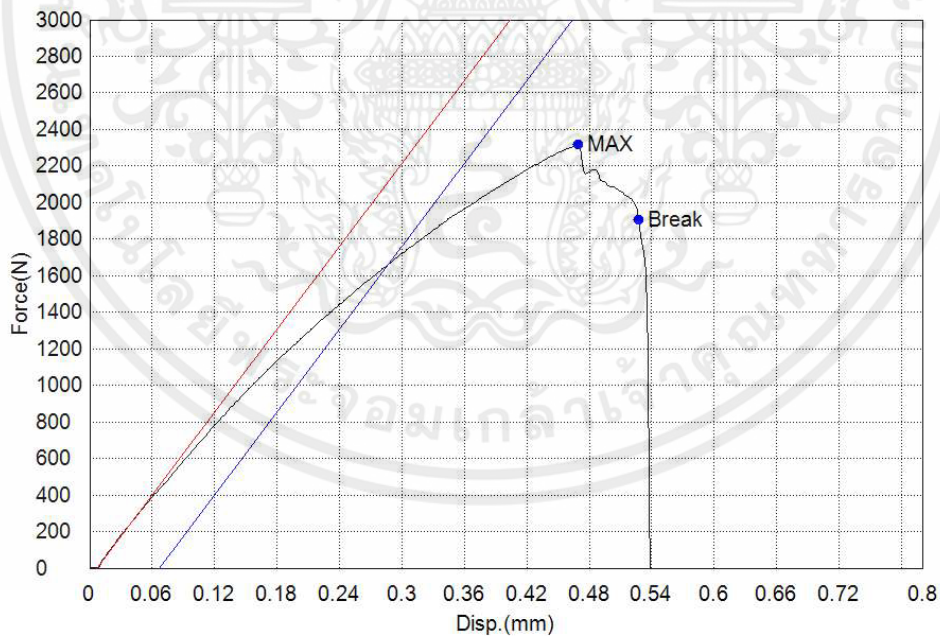


รูปที่ ผก. 10 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานลำดับการทดลองที่ 10 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 10,000 และ 7,500 แอมแปร์ ตามลำดับ ระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่งและสอง 15 และ 15 ไมโครวินาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก. 11 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเปรียบเทียบที่ 1  
 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์  
 และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไมโครวินาที



รูปที่ ผก. 12 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเปรียบเทียบที่ 2  
 เชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยกระแสพัลส์ที่หนึ่ง 10,000 แอมแปร์  
 และระยะเวลากระแสพัลส์ที่หนึ่ง 15 ไมโครวินาที

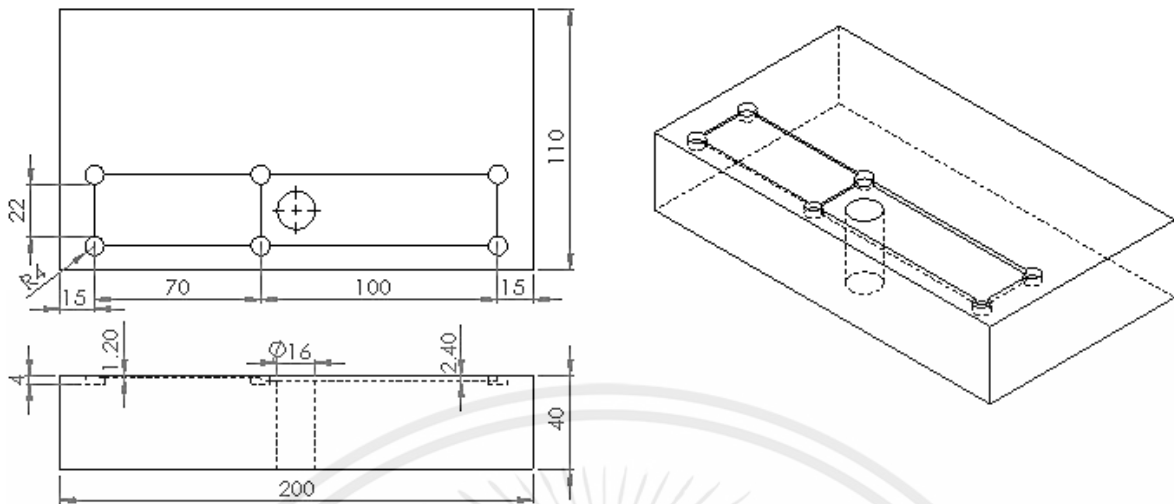
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



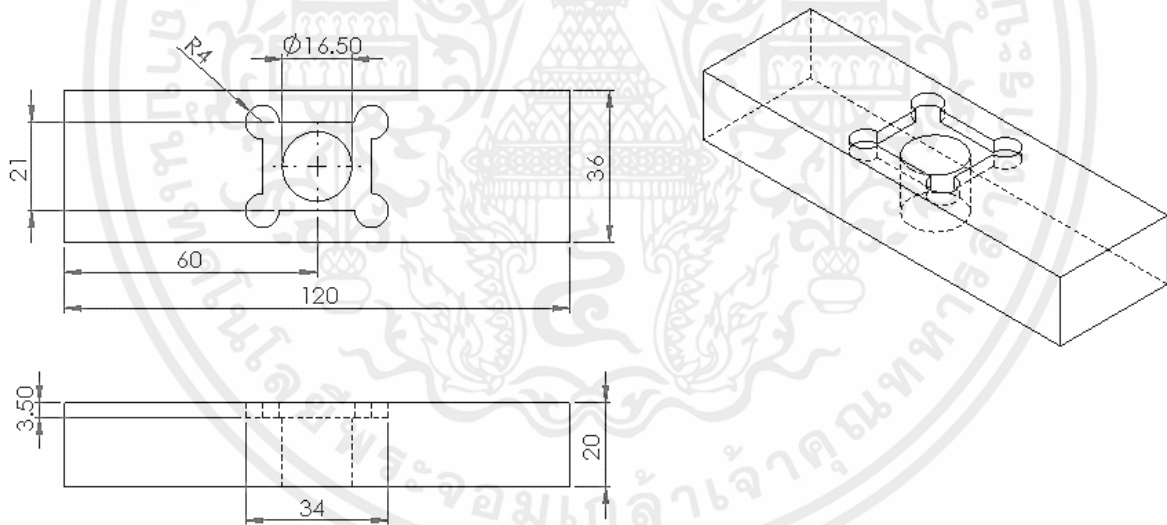
ภาคผนวก ข.

แบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข. 1 แบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)  
 สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชิ้นงานเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน



รูปที่ ผข. 2 แบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)  
 สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

การทดสอบโดยใช้วิธีการ Steepest Ascent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบการทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent จำเป็นต้องมีการกำหนด Step Size ในการกำหนดความถี่ในการค้นหาเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ซึ่งจะให้ค่าตอบสนองที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด ซึ่งจะต้องเลือกปัจจัยเดียวในการกำหนดเท่านั้น จากนั้นจึงทำการคำนวณจุดในการค้นหาของอีกปัจจัยหนึ่งตามมาที่หลังด้วยการหาค่าของความชันของสมการ Regression จากการทดลองแบบ Factorial Design โดยจุดเริ่มต้นของการออกแบบในขั้นตอน Steepest ascent จะเริ่มต้นบริเวณจุดศูนย์กลาง (Center Point) ของการทดลองแบบ Factorial Design เดิม

ในการศึกษานี้ได้กำหนด Step Size เป็นปัจจัยระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง มีค่าเท่ากับ 5 ไซเคิล ความชันของสมการ Regression ที่ 4.2 จากการทดลองแบบ Factorial Design หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) มีค่าเท่ากับ 787.17 คำนวนจากการนำสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองหารด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง และจุดเริ่มต้นของการคำนวณคือ ที่ค่าระดับปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7,500 แอมแปร์และ ระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 15 ไซเคิล เป็นลำดับการทดลองที่ 1 และจุดถัดไปของปัจจัยระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองในขั้นตอน Steepest Ascent คือ 20 ไซเคิล ซึ่งกำหนดให้ระยะห่างของระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองในจุดแรกและจุดถัดมาคือ 1 หน่วย ดังนั้นระยะห่างปัจจัยปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองจุดถัดไปของขั้นตอน Steepest Ascent มีค่าเท่ากับ 0.00127 หน่วยคำนวณได้จาก  $1/787.17$  ซึ่งระยะห่าง 1 หน่วยของปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่าเท่ากับ 2,500 แอมแปร์ ดังนั้นจุดถัดไปของปัจจัยปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองคือ 7,503.175 แอมแปร์ คำนวนได้จากผลคูณของระยะห่าง 1 หน่วยกับระยะห่างของขั้นตอน Steepest Ascent แต่อย่างไรก็ตามเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดสามารถปรับระดับของปัจจัยกระแสในแต่ละครั้งต้องมากกว่า 100 แอมแปร์ จึงทำให้ต้องใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองเท่ากับ 7,500 แอมแปร์ตลอดขั้นตอน Steepest ascent โดยกำหนดให้การศึกษาเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ซึ่งจะให้ค่าตอบสนองที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุดมีค่าระดับปัจจัยระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองสูงสุด 50 ไซเคิล เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยการเชื่อมชิ้นงานทดสอบเพื่อทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Steepest กำหนดค่าระดับปัจจัยตารางที่ ผค.1 โดยมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งค่าระดับของปัจจัยคงที่กำหนดดังตารางที่ 3.3

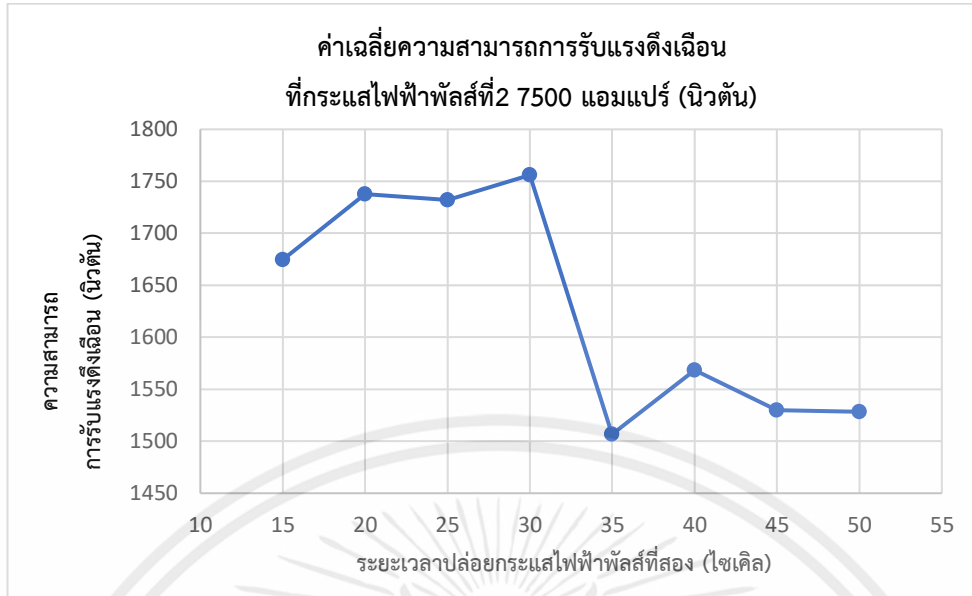
ตารางที่ ผค.1 การออกแบบการทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent

ลำดับ การ ทดลอง	พัลส์ที่หนึ่ง		พัลส์ที่สอง	
	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อย กระแส (ไซเคิล)	ปริมาณกระแส (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อย กระแส (ไซเคิล)
1	15,000	15	7,500	15
2				20
3				25
4				30
5				35
6				40
7				45
8				50

ตารางที่ ผค.2 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Steepest Ascent

ปริมาณ กระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (แอมแปร์)	ระยะเวลาปล่อย กระแสไฟฟ้า พัลส์ที่สอง (ไซเคิล)	ความสามารถ การรับแรงดึง เดือน ครั้งที่1 (นิวตัน)	ความสามารถ การรับแรงดึง เดือน ครั้งที่2 (นิวตัน)	ความสามารถ การรับแรงดึง เดือน ครั้งที่3 (นิวตัน)	ค่าเฉลี่ย ความสามารถ การรับแรงดึง เดือน (นิวตัน)
7,500	15	1,817.48	1,641.16	1,565.65	1,674.76
7,500	20	2,127.46	1,560.51	1,524.59	1,737.52
7,500	25	2,027.23	1,615.21	1,554.17	1,732.20
7,500	30	1,654.93	1,708.62	1,904.55	1,756.03
7,500	35	1,380.91	1,395	1,744.18	1,506.69
7,500	40	1,872.98	1,149.61	1,682.58	1,568.39
7,500	45	1,860.3	1,498.13	1,231.19	1,529.87
7,500	50	2,061.99	1,027.63	1,495.06	1,528.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค.1 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Steepest Ascent

ผลการทดสอบแรงดึงเดือนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในการออกแบบการทดลองขั้นตอน Steepest Ascent แสดงดังตารางที่ ผค.2 และสามารถนำไปแสดงผลเป็นกราฟดังรูปที่ ผค.1 และถูกนำไปพิจารณาวิเคราะห์โดยวิธีการ One-way Anova ด้วยโปรแกรม Minitab version 18 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าค่า P-Value ของตัวแปรระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง มีค่าเท่ากับ 0.915 ดังตารางที่ ผค.3 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ในช่วงที่ 15-50 ไซเคิล โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7,500 แอมแปร์ เป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อความสามารถการรับแรงดึงเดือน แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบในขั้นตอนนี้ไม่ได้ดำเนินการในช่วงเวลาเดียวกับการทดลองแบบ Factorial Design ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าอาจจะมีความผิดปกติภายในพื้นผิวของวัสดุทดลอง ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านมาเป็นเวลาหนึ่งทำให้ผลการทดลองเกิดความผันแปรขึ้น

ตารางที่ ผค.3 การวิเคราะห์ One-way Anova ของตัวแปรระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง จากผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Steepest Ascent

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Welding Time of 2-nd pulse	7	237816	33974	0.36	0.915
Error	16	1530968	95686		
Total	23	1768784			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้