

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425

RESISTANCE SPOT WELDING OF SUS316L AND SUS425 STAINLESS STEELS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-218-145

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425

RESISTANCE SPOT WELDING OF SUS316L AND SUS425 STAINLESS STEELS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-218-145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESISTANCE SPOT WELDING OF SUS316L AND SUS425 STAINLESS STEELS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMUTL-2019-EN-D-218-145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 316L กับ SUS 425
นักศึกษา	นายธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว
รหัสประจำตัว	56601380
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดเป็นการเชื่อมที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โดยในการผลิตชิ้นส่วนท่อไอเสียรถยนต์มีความจำเป็นต้องเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS 316L กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS 425 เข้าด้วยกันด้วยเหตุผลในเรื่องลักษณะการใช้งาน และราคา แต่การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดกันอาจเกิดความบกพร่องในรอยเชื่อมเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ชิ้นส่วนดังกล่าวเกิดปัญหา เช่น ความแข็งแรงของชิ้นส่วนลดลง เกิดการแตกร้าว และเกิดเสียงดังจากการสั่นสะเทือน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดที่เหมาะสม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อม และเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกล โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค การเปลี่ยนแปลง และการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 316L กับ SUS 425

ในการทดลองได้ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ปัจจัยการเชื่อมที่ทำการศึกษาคือ แร่งกด เวลาเชื่อม กระแสเชื่อม เวลา கடค่าง และรูปทรงของหัวอิเล็กโทรด โดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ค่าพิกัด 50 kVA หลังจากทำการเชื่อมได้ทำการตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมจากโครงสร้างมหภาค ได้แก่ ระยะเวลาซีมลิ๊ก ระยะเวลาคดลิ๊ก และขนาดของรอยเชื่อม พบว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อม คือ ใช้แรงกด 3.3 กิโลนิวตัน เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ และเวลา கடค่าง 50 ไซเคิล โดยใช้หัวอิเล็กโทรดเบน และล่างแบบโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของ 2 ปัจจัยหลักของการเชื่อมความต้านทาน คือ กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม ที่มีต่อโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน ค่าความแข็งแรง การเปลี่ยนแปลง และการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อม โดยใช้กระแสเชื่อมที่ 7.0, 8.5 และ 10.0 กิโลแอมแปร์ กับเวลาเชื่อมที่ 25, 38 และ 50 ไซเคิล และศึกษารอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ปริมาณธาตุในรอยเชื่อมด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุร่วมกับการใช้ Schaeffler diagram และ Pseudo binary diagram ซึ่งพบว่า ระยะเวลาซีมลิ๊ก ระยะเวลาคดลิ๊ก ขนาดของรอยเชื่อม และค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 พื้นที่โดยบริเวณเนื้อโลหะหลอมละลายมีความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มีอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุด พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณวัสดุพื้นมีความแข็งลดลงตามลำดับ โดยที่บริเวณเนื้อโลหะหลอมละลายปรากฏเป็นโครงสร้างแบบคอสมันนาร์ และประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์ มาร์เทนไซต์ และเฟอร์ไรท์ ซึ่งสอดคล้องกับการพยากรณ์โดยใช้ Schaeffler diagram และการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมจากการพยากรณ์โดยใช้ Pseudo binary diagram ได้ผลตรงกับผลการทดลอง โดยพบว่าเป็น F Mode ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรท์ และ Widmanstatten ออสเทนไนท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Resistance Spot Welding of SUS 316L and SUS 425 Stainless Steels
Student	Mr.Teerawut Khuenkaew
Student ID.	56601380
Degree	Doctor of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

Resistance spot welding is widely used in the automotive industry. In the fabrication of exhaust pipe, it is necessary to join SUS 316L austenitic stainless steel to SUS 425 ferritic stainless steel due to the specific function and cost effectiveness. However, because of different physical and mechanical properties of the base metals, resistance spot welding of dissimilar stainless steels usually causes various defects in the weldment leading to reduced joint strength, cracking and excessive noise due to vibration. This dissertation focuses on choosing the proper electrode tip, finding the optimal welding condition and clarifying the macro and microstructures, phase transformation and solidification of SUS 316L / SUS 425 weldment.

In this thesis, full factorial design was used as screening experiments. Five welding variables studied in this research were electrode force, welding time, weld current, hold time and electrode geometry. The spot welding was achieved using a 50 Hz, 50 kVA spot resistance welding machine. Quality of the weldment was considered in terms of penetration depth, nugget diameter and nugget area. Box-Behnken design was performed to find out the optimal welding condition. It was 3.3 kN of electrode force, 25 cycles of welding time, 10.0 kA of weld current, 50 cycles of hold time and R30 electrode geometry.

Moreover, this research investigated effects of two major resistance welding variables, weld current and welding time, on the macro and microstructures, tensile shear strength, hardness, phase transformation and solidification of SUS 316L / SUS 425 weldment. The weld current was varied between 7.0, 8.5, and 10.0 kA and the welding time was selected at 25, 38, and 50 cycles. The weldment characteristics were studied using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry together with Schaeffler and Pseudo-binary phase diagrams. The penetration depth, nugget

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

diameter, nugget area and tensile shear strength tended to increase with the increase of weld current and welding time. Among the fusion zone, heat affected zone and base metal, the fusion zone provided the highest hardness value while the lowest one belonged to the base metal. The microstructure of fusion zone consisted of columnar grains of austenite, martensite and ferrite resembling to the Schaeffler phase diagram. The solidification mode of fusion zone predicted by the Pseudo-binary diagram was the F mode with ferrite and Widmanstatten austenite corresponding to the experimental results.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้ และช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อบรมสั่งสอนให้คำแนะนำมาโดยตลอด และขอขอบคุณครอบครัวที่ให้อำนาจใจ รวมทั้งเพื่อนทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอบใจกับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่มีส่วนสร้างพื้นฐานการศึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	5
2.2 ลักษณะของหัวอิเล็กทรอนิกส์ และการใช้งาน.....	8
2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม และการใช้งาน.....	9
2.4 การวิเคราะห์ และตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	12
2.5 การทดสอบค่าความแข็ง.....	16
2.6 การทดสอบแรงดึงเฉือน.....	17
2.7 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล.....	19
2.8 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	32
3.1 การเตรียมองค์ประกอบในการเชื่อมชิ้นงาน และการทดสอบชิ้นงาน.....	32
3.2 การทดลองเพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กทรอนิกส์.....	36
3.3 การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย.....	37
3.4 การทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อยืนยันผลด้านคุณภาพ.....	40
3.5 การศึกษาพฤติกรรมกรรมการหลอมละลายของโลหะ และคุณสมบัติทางกล.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VI จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.1 ผลการทดลองเพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กทรอนิกส์ทรอด.....	42
4.2 ผลการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย.....	50
4.3 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างผลตอบสนอง.....	62
4.4 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม.....	66
4.5 การยืนยันผลการทดลอง.....	68
4.6 ผลการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะ และคุณสมบัติทางกล.....	70
4.7 การอภิปรายผลการวิจัย.....	116
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	124
5.1 สรุปผลวิจัย.....	124
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	126
เอกสารอ้างอิง.....	128
ภาคผนวก ก สำเนาเกียรติบัตรผลงานตีพิมพ์ และบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ฉบับที่ 1.....	137
ภาคผนวก ข สำเนาเกียรติบัตรผลงานตีพิมพ์ และบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ฉบับที่ 2.....	157
ภาคผนวก ค สำเนาเกียรติบัตรผลงานตีพิมพ์ และบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ฉบับที่ 3.....	163
ภาคผนวก ง ขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	171
ภาคผนวก จ ขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	173
ภาคผนวก ฉ การกำหนดปัจจัยการกัดผิวโลหะด้วยไอออนมิลลิง.....	175
ภาคผนวก ช ข้อเสนอแนะสำหรับการเลือกใช้หัวอิเล็กทรอนิกส์ทรอดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	177
ภาคผนวก ซ ประวัติผู้เขียน.....	179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับท่อไอเสียรถยนต์.....	11
2.2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	18
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของหัวอิเล็กโทรด (wt%).....	32
3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม (wt%) SUS316L และ SUS425.....	33
3.3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และ SUS425.....	33
3.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และ SUS425.....	33
3.5 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ดี.....	34
3.6 ปัจจัย และระดับของปัจจัยตามการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ.....	36
3.7 ลำดับขั้นการทดลองตามการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ.....	36
3.8 ปัจจัย ระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	38
3.9 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	38
3.10 ปัจจัย และระดับปัจจัยในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลอมละลายของโลหะ.....	41
4.1 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ.....	42
4.2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการชิมลิก1 (t1).....	44
4.3 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการชิมลิก2 (t2).....	45
4.4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการกดลิก1 (h1).....	46
4.5 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการกดลิก2 (h2).....	46
4.6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di).....	47
4.7 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหัศจรรย์ของเหล็กคาร์บอนกลางเกรด SPC440.....	50
4.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	51
4.9 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบระยะการชิมลิก1 (t1) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	53
4.10 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบระยะการชิมลิก1 (t1) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	54
4.11 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบระยะการชิมลิก2 (t2) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	55
4.12 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบระยะการชิมลิก2 (t2) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	57
4.13 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบขนาดรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	58
4.14 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบขนาดรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	59
4.15 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	60
4.16 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	61
4.17 การวิเคราะห์ Response Optimization.....	66
4.18 ผลการทดลองเพื่อการยืนยันผล.....	68
4.19 ผลการทดลองเพื่อการยืนยันผลจากเครื่องเชื่อมเครื่องหมายการค้า และรุ่นการผลิตเดียวกัน.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.20 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองการปรับเปลี่ยนปัจจัย กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม.....	72
4.21 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล.....	86
4.22 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล.....	89
4.23 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล.....	92
4.24 ค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อม.....	95
4.25 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากEDS (wt%).....	108
4.26 ค่าสูงสุด – ต่ำสุดของปริมาณธาตุโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และซิลิกอน ในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS (wt%).....	109
4.27 ปริมาณธาตุโครเมียมผสม ปริมาณธาตุนิกเกิลผสม และอัตราส่วนของปริมาณธาตุโครเมียม ผสมต่อปริมาณธาตุนิกเกิลผสม ในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ ปริมาณธาตุจาก EDS.....	110
4.28 ค่าความหนาแน่นของกระแสเชื่อม ต่อ พื้นที่จุดสัมผัสของหัวอิเล็กโทรด.....	119
4.29 ค่าความร้อนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	119
4.30 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหัศจรรย์เชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด SUS439MTL.....	122
4.31 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหัศจรรย์เชื่อมของเหล็กชุบสังกะสีเกรด SP791Q.....	122

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด	6
2.2 วัฏจักรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด	6
2.3 ความต้านทานในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	8
2.4 ลักษณะของหัวอิเล็กโทรด	8
2.5 ระบบท่อไอเสียรถยนต์.....	10
2.6 จุดวัดค่าด้านคุณภาพของรอยเชื่อม	12
2.7 แผนภาพ Schaeffler diagram.....	14
2.8 แผนภาพ Pseudo binary Fe Cr Ni 70%Fe	14
2.9 รูปแบบเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก	15
2.10 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส	16
2.11 การทดสอบแรงดึงเฉือน และการจับชิ้นงานทดสอบ.....	18
2.12 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	18
2.13 ลักษณะการขาดจากการทดสอบแรงดึงเฉือน	19
2.14 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป.....	20
2.15 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง.....	21
2.16 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ $k = 3$	23
2.17 พื้นผิวตอบแบบสามมิติ.....	24
3.1 ลักษณะองค์ประกอบของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม	35
4.1 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคจากการทดลอง	42
4.2 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะเวลาการซึมลึก1 (t_1)	44
4.3 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะเวลาการซึมลึก2 (t_2)	44
4.4 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะเวลาการกัดลึก1 (h_1)	45
4.5 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะเวลาการกัดลึก2 (h_2)	46
4.6 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาขนาดของรอยเชื่อม (d_i)	47
4.7 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาการซึมลึก1, 2 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด	48
4.8 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาการกัดลึก1, 2 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด	49
4.9 ความสัมพันธ์ของขนาดของรอยเชื่อม กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด.....	49
4.10 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างแรงกด และเวลาเชื่อม.....	63
4.11 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างแรงกด และกระแสเชื่อม	63
4.12 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างแรงกด และเวลากัดค้าง	64
4.13 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างเวลาเชื่อม และกระแสเชื่อม	64
4.14 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างเวลาเชื่อม และเวลากัดค้าง	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา XE ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างกระแสเชื่อม และเวลา கடค่าง	65
4.16 กราฟแสดง Optimization plot	67
4.17 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม	70
4.18 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมคงที่ 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ50 ไชเคิล	70
4.19 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมคงที่ 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ50 ไชเคิล	71
4.20 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมคงที่ 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ50 ไชเคิล	72
4.21 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล	73
4.22 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล	73
4.23 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล	73
4.24 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล	73
4.25 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล	74
4.26 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล	74
4.27 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล	74
4.28 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล	74
4.29 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล	75
4.30 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระยะการซึมลึก1 (t_1)	75
4.31 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระยะการซึมลึก2 (t_2)	76
4.32 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระยะการกัดลึก1 (h_1)	76
4.33 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระยะการกัดลึก2 (h_2)	77
4.34 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองขนาดของรอยเชื่อม (d_i)....	77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะการซึมลึก1 (t1) กับ ระยะการกดลึก1 (h1).....	78
4.36 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะการซึมลึก2 (t2) กับ ระยะการกดลึก2 (h2).....	78
4.37 กราฟรูปกล่อง (Box Plot) ของระยะการซึมลึก1 (t1) และระยะการซึมลึก2 (t2).....	79
4.38 กราฟรูปกล่อง (Box Plot) ของระยะการกดลึก1 (h1) และระยะการกดลึก2 (h2).....	80
4.39 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ50 ไชเคิล.....	81
4.40 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ50 ไชเคิล.....	81
4.41 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ50 ไชเคิล.....	82
4.42 ลักษณะการกระจายของน้ำโลหะเหลวที่เกิดจากการกระแสเชื่อม/เวลาเชื่อม (a) 8.5 กิโลแอมแปร์/50 ไชเคิล (b) 10.0 กิโลแอมแปร์/38 ไชเคิล (c) 10.0 กิโลแอมแปร์/50 ไชเคิล.....	82
4.43 ลักษณะการแยกออกจากกันของรอยเชื่อมที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเฉือน.....	83
4.44 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ระยะการซึมลึก1 (t1) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน (b) ระยะการซึมลึก2 (t2) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน.....	84
4.45 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ระยะการกดลึก1 (h1) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน (b) ระยะการกดลึก2 (h2) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน.....	85
4.46 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อมกับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน.....	86
4.47 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล.....	88
4.48 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล.....	88
4.49 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล.....	89
4.50 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล.....	91
4.51 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล.....	91
4.52 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล.....	92
4.53 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา XII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล.....	94
4.55 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล.....	95
4.56 รูปภาพพื้นที่โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ทำการศึกษา	96
4.57 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และ SUS425.....	97
4.58 จุดตัดบนแผนภาพ Schaeffler diagram ของวัสดุพื้น และบริเวณพื้นที่โลหะ หลอมละลาย.....	97
4.59 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล.....	98
4.60 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล.....	99
4.61 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล.....	100
4.62 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล.....	101
4.63 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล.....	102
4.64 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล.....	103
4.65 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล.....	104
4.66 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล.....	105
4.67 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล.....	106
4.68 พื้นที่การเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งของรอยเชื่อมโดยแผนภาพ Pseudo binary Fe-Cr-Ni.....	112
4.69 ภาพถ่าย SEM ของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมละลายจากการคงที่เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล และกระแสเชื่อม (a) 7.0 กิโลแอมแปร์ (b) 8.5 กิโลแอมแปร์ (c) 10.0 กิโลแอมแปร์	114
4.70 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมละลายจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล (a) กำลังขยาย 100 เท่า (b) กำลังขยาย 200 เท่า.....	115
4.71 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมตามชนิดของวัสดุพื้น	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา XIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

การเชื่อมโลหะเป็นกระบวนการประสานโลหะเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อน กระบวนการเชื่อมโลหะมีบทบาทสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เนื่องจากเป็นกระบวนการต่อโลหะที่รวดเร็ว และมีความต่อเนื่อง [1] กระบวนการเชื่อมมีหลากหลายชนิด สำหรับในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ กระบวนการเชื่อมที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ได้แก่ กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) และกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) ซึ่งทั้งสองวิธีการเชื่อมโลหะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จะใช้กระบวนการใดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนรถยนต์นั้น ๆ โดยทั่วไปข้อกำหนด และกระบวนการเชื่อมจะถูกระบุในแบบงานชิ้นส่วนรถยนต์ที่กำหนดโดยผู้ออกแบบรถยนต์แต่ละยี่ห้อ [2], [3] กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม จะมีข้อได้เปรียบในแง่มีความรวดเร็วในการเชื่อมมากกว่า ผลกระทบทางความร้อนมีน้อยกว่า และที่สำคัญมีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ยุ่งยาก กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเป็นการเชื่อมที่กระทำเป็นจุด ๆ โดยไม่ต้องการความต่อเนื่องของแนวเชื่อม [1], [4], [5] การเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้รับความร้อนจากความต้านทานทางไฟฟ้า โดยมีหัวอิเล็กโทรดขั้วบวก และขั้วลบเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าผ่านชิ้นงานสองชิ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมละลายเป็นพื้นที่เล็ก ๆ จากนั้นใช้แรงกดอัดให้ผิวงานนั้นเชื่อมติดกัน [6], [7] วัสดุพื้นโดยทั่วไปจะเป็นโลหะแผ่นบางชนิดเดียวกัน เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม การเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี และการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นต้น [8], [9]

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับความร้อนจากเครื่องยนต์ และสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง เช่น ชิ้นส่วนท่อไอเสียรถยนต์มีความจำเป็นต้องใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุพื้นฐาน [2], [10] การผลิตท่อไอเสียรถยนต์นิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 2 ประเภท คือ เกรดเฟอร์ริติก และเกรดออสเทนนิติก เพราะมีความแข็งแรง น้ำหนักเบา มีความสวยงาม และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง [11], [12] การออกแบบท่อไอเสียรถยนต์จะเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมตามลักษณะการใช้งาน เช่น ท่อรวมรับไอเสียเสดเดอร์ (Exhaust manifold) หม้อกรองไอเสีย (Catalytic converter) ท่อไอเสียท่อนหน้า (Front pipe) ท่อไอเสียท่อนกลาง (Center pipe) ท่อไอเสียท่อนปลาย (Tail pipe) และหม้อพัก (Muffler) โดยมากจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก [13] ส่วนท่อลมแบบยืดหยุ่น (Flexible tube) ท่อไอเสียสองชั้น (Air gap pipe) ท่อไอเสียชั้นใน (Inner tube) และฝาครอบท่อไอเสีย (Cover insulator) นิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก [13] ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องประสานเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เลือกใช้ การเชื่อมความ

ด้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด เป็นกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีความยากกว่ากระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเดียวกัน โดยที่กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเดียวกัน เป็นการประสานโลหะให้ติดกันโดยรอยเชื่อมจะมีการเปลี่ยนเฟสของโลหะเป็นลักษณะเดียวกันเนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติทางไฟฟ้า มีค่าเท่ากันเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมที่เหมาะสม จะเกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะจากแผ่นงานหนึ่งไปสู่อีกแผ่นงานหนึ่งอย่างสมบูรณ์ ส่วนกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด ความร้อนจากการเชื่อมจะหลอมละลายเนื้อโลหะให้ติดกันโดยรอยเชื่อมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รอยเชื่อมเกิดเป็นเฟสไม่สมบูรณ์ และเกิดจุดบกพร่องในรอยเชื่อมเนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน [9], [14]–[16] ส่งผลให้ชิ้นส่วนของรถยนต์เกิดปัญหา เช่น เกิดเสียงดัง เกิดการลั่นสะเทือน และความแข็งแรงของชิ้นส่วนลดลง

ปัจจุบันมีการศึกษาผลกระทบด้านความร้อนจากการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างมากมาย แต่เป็นการศึกษากระบวนการเชื่อมอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด หรือเป็นกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกกับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิม [15] เนื่องจากมีวิธีการตรวจสอบคุณภาพที่ยุ่งยาก รวมทั้งการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมกระทำได้ยาก [17], [18] โดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด มีการปรับแต่งปัจจัยสำหรับการเชื่อมหลายค่า ผู้ปฏิบัติงานจะปรับแต่งค่าปัจจัยตามประสบการณ์ การลองผิดลองถูกหรือปรับแต่งตามข้อกำหนดที่ได้รับมาจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อม ซึ่งค่าที่ระบุมานั้นเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นคุณภาพของรอยเชื่อมที่ออกมาจึงไม่ดีเท่าที่ควร [2] การกำหนดปัจจัยการเชื่อม เช่น แรงกดของหัวอิเล็กโทรด (Force) เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (Squeeze time) กระแสเชื่อม (Weld current) เวลาเชื่อม (Welding time) เวลาอดค้าง (Hold time) ที่ไม่เหมาะสมหรือเกิดจากผู้ปฏิบัติงานเลือกใช้รูปร่างหัวอิเล็กโทรด (Electrode geometric) ผิดประเภท ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอที่จะหลอมเนื้อโลหะให้ละลายได้ หรือ ทำให้เกิดความร้อนที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดความบกพร่อง (Defect) ขึ้นในรอยเชื่อม [19] ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาพฤติกรรมหลอมละลายเนื้อโลหะ คุณสมบัติทางกล การเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งของรอยเชื่อม จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด จากการเลือกรูปร่างหัวอิเล็กโทรดที่เหมาะสม และการปรับแต่งค่าปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตท่อไอเสียรถยนต์

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425
2. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ได้แก่ ระยะเวลาการซึมลึก ขนาดของรอยเชื่อม และพื้นที่ของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425

4. เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค การเปลี่ยนแปลงเฟส และการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร

2. ศึกษาเฉพาะการใช้หัวอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกขนาด 13 มิลลิเมตร รูปทรง 3 แบบ คือ แบบแบน แบบโค้งรัศมี 16 มิลลิเมตร และแบบโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตร

3. ศึกษาคุณลักษณะทางกลเฉพาะค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน และค่าความแข็งของรอยเชื่อม

4. ค่าปัจจัยการเชื่อมที่ทำการทดลอง คือ แรงกดใช้ระหว่าง 2.0 ถึง 4.0 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อมใช้ระหว่าง 7.0 ถึง 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อมใช้ระหว่าง 25 ถึง 50 ไซเคิล และเวลากดค้างใช้ระหว่าง 0 ถึง 50 ไซเคิล

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาตัวแปรในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม และพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะ ได้แก่ แรงกดของหัวอิเล็กโทรด (Force: F) เวลากดขึ้นงานสองชั้นให้ติดกัน (Squeeze time: Ts) กระแสเชื่อม (Weld current: I) เวลาเชื่อม (Welding time: Tw) เวลากดค้าง (Hold time: Th) รูปทรงหัวอิเล็กโทรด (Electrode geometric)

3. การทดลองใช้หัวอิเล็กโทรดรูปทรงต่างกันในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของรอยเชื่อม

4. การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

5. การทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อยืนยันผลด้านคุณภาพ

6. การศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะ และคุณสมบัติทางกลที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยการเชื่อม 2 ปัจจัย ได้แก่ กระแสเชื่อม (I) และเวลาเชื่อม (Tw)

7. สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของรอยเชื่อม
2. กำหนดจุดเหมาะสมของปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของรอยเชื่อม
3. ทราบพฤติกรรมการหลอมละลาย การเปลี่ยนโครงสร้างเฟสของเนื้อโลหะในรอยเชื่อมจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425
4. สามารถนำข้อมูลจากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้จากการค้นคว้าจากงานวิจัย และเอกสารต่าง ๆ ทั้งใน และต่างประเทศสำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีทฤษฎีเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยแบ่งเป็น 8 ส่วนประกอบด้วย

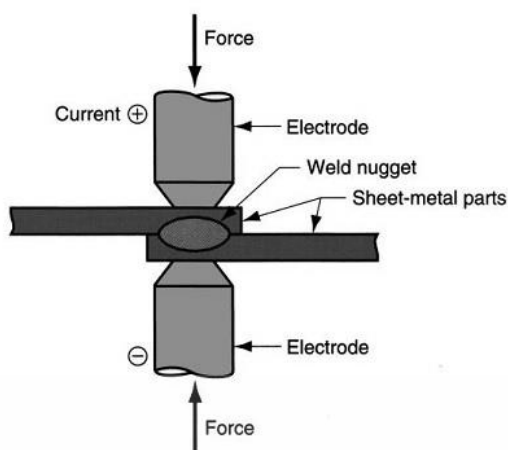
1. หลักการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
2. ลักษณะของหัวอิเล็กโทรด และการใช้งาน
3. เหล็กกล้าไร้สนิม และการใช้งาน
4. การวิเคราะห์ และตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา
5. การทดสอบความแข็ง
6. การทดสอบแบบดึงเฉือน
7. การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล
8. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

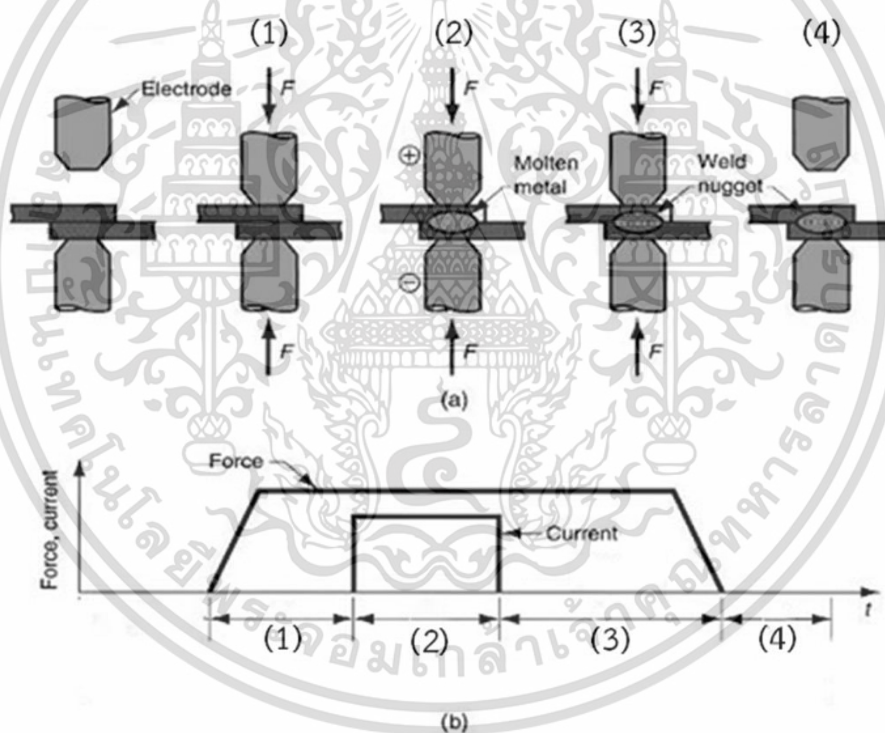
หลักการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเป็นกระบวนการเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความต้านทานการไหลของกระแสเชื่อม ณ บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานสองชิ้น เมื่อเกิดกระแสเชื่อมเข้มข้นจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น โดยวงจรทางไฟฟ้าจะทำให้ความต่างศักย์มีค่าต่ำ และกระแสเชื่อมจะมีค่าสูงในช่วงพัลส์ช่วงสั้น ๆ เพื่อที่จะทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะเชื่อม เมื่อกระแสเชื่อมเกิดการไหล แรงกดจากหัวอิเล็กโทรดจะคงกดนิ่งจนบริเวณที่หลอมละลายเย็นตัว และแข็งตัวจากการระบายความร้อนด้วยน้ำด้วยอัตราการเย็นตัวที่สูงระดับ 1,000 ถึง 10,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที [20] และจะปล่อยแรงกดออกเมื่อแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างสั้น การหลอมละลายของเนื้อโลหะแล้วเกิดรอยเชื่อมที่เป็นเนื้อเดียวกัน เรียกว่า Weld nugget [1], [21] วัฏจักรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด มีลำดับขั้นตอน 4 ขั้นตอนตามรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

1. ช่วงเวลาการกด (Squeeze time) เป็นช่วงเวลาที่หัวอิเล็กโทรดมาสัมผัสกับชิ้นงานมีแรงกดเป็นแรงกระทำที่เพียงพอที่จะยึดหัวอิเล็กโทรดไว้กับชิ้นงานก่อนที่จะทำการเชื่อม
2. ช่วงเวลาเชื่อม (Welding time) เป็นช่วงเวลาที่เริ่มปล่อยกระแสเชื่อมไปในชิ้นงานผ่านหัวอิเล็กโทรดซึ่งผลจากความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงาน 2 ชิ้นจะเกิดความร้อนแล้วโลหะบริเวณที่ถูกกดจะหลอมละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด [1]



รูปที่ 2.2 วัฏจักรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [21]

3. ช่วงเวลาดค้าง (Hold time) เป็นช่วงเวลาที่ทำให้อรอยเชื่อมเกิดการเย็นตัวภายใต้แรงกดคงที่ เพื่อให้รอยเชื่อมมีเวลาในการแข็งตัวมากพอที่จะเกิดการก่อตัวอย่างสมบูรณ์ และสร้างความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อม
4. ช่วงเวลาปิด (Off time) เป็นช่วงเวลาที่เสร็จสิ้นการเชื่อมซึ่งหัวอิเล็กโทรดจะเคลื่อนที่จากกันไปยังตำแหน่งพร้อมเชื่อมเพื่อรอการเชื่อมครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดจะเกิดค่าความต้านทานทั้งหมด 7 จุด แสดงตามรูปที่ 2.3 ดังนี้

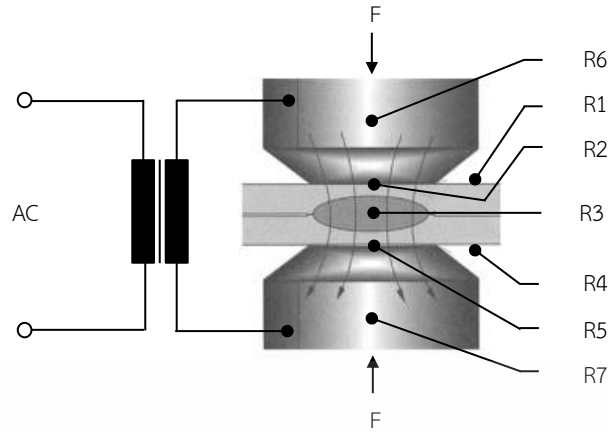
1. ค่าความต้านทาน R_1 คือ ความต้านทานของพื้นผิวชั้นทดสอบด้านบน
 2. ค่าความต้านทาน R_2 คือ ความต้านทานระหว่างพื้นผิวของหัวอิเล็กโทรดด้านบน และพื้นผิวของชั้นทดสอบด้านบน
 3. ค่าความต้านทาน R_3 คือ ความต้านทานระหว่างพื้นผิวของชั้นทดสอบด้านบน และพื้นผิวของชั้นทดสอบด้านล่าง
 4. ค่าความต้านทาน R_4 คือ ความต้านทานของพื้นผิวชั้นทดสอบด้านล่าง
 5. ค่าความต้านทาน R_5 คือ ความต้านทานระหว่างพื้นผิวของชั้นทดสอบด้านล่าง และพื้นผิวของหัวอิเล็กโทรดด้านล่าง
 6. ค่าความต้านทาน R_6 คือ ความต้านทานของหัวอิเล็กโทรดด้านบน
 7. ค่าความต้านทาน R_7 คือ ความต้านทานของหัวอิเล็กโทรดด้านล่าง
- ดังนั้นผลรวมค่าความต้านทาน (R_T) ของการเชื่อมต้านทานแบบจุดสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 2.1

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (2.1)$$

เมื่อค่าความต้านทานประกอบด้วยสองส่วน คือ ความต้านทานของวัสดุ (R_1, R_4, R_6, R_7) และความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับหัวอิเล็กโทรด (R_2, R_5) ความต้านทานของวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน (R_1, R_4) และหัวอิเล็กโทรด (R_6, R_7) ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำการเชื่อม ขณะเดียวกันค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสถานะของปลายหัวอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมเกิดขึ้นจากค่าความต้านทาน R_3 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนสูงสุดในรอยต่อ ค่าความร้อนที่มีค่าสูงนี้ขึ้นอยู่กับสถานะพื้นผิวของของโลหะที่ใช้เชื่อม แรงกด กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม [22] ข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบจุดที่เห็นได้เด่นชัด คือ ความเร็วในการเชื่อมมีค่าสูง และมีความเหมาะสมสำหรับการผลิตแบบอัตโนมัติ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสายการผลิตแบบอัตโนมัติร่วมกับเครื่องจักรต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีทำให้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการหาช่างฝีมือในการปฏิบัติการได้อย่างดีเยี่ยม ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสเชื่อม ความต้านทาน และเวลาเป็นไปตามสมการที่ 2.2 [8], [21], [23]

$$H = (I^2 \times R_T) \times t \quad (2.2)$$

เมื่อ H คือค่าความร้อนที่ได้ (หน่วย : Joules) I คือ ค่ากระแสเชื่อม (หน่วย: Amperes) R_T คือ ผลรวมค่าความต้านทาน (หน่วย: Ohms) และ t คือ เวลาเชื่อม (หน่วย: Seconds) การเพิ่มกระแสเชื่อม และ/หรือ เพิ่มเวลาเชื่อม จะทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีความร้อนเพิ่มขึ้น

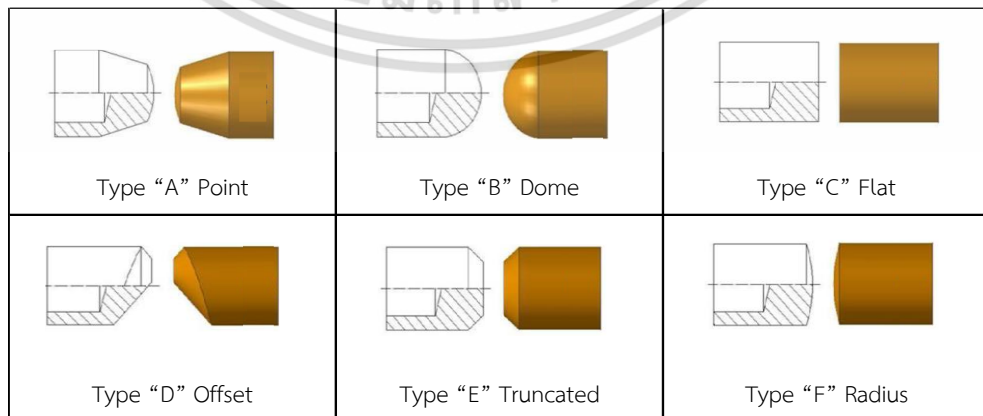


รูปที่ 2.3 ความต้านทานในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [23]

2.2 ลักษณะของหัวอิเล็กโทรด และการใช้งาน

หัวอิเล็กโทรดเป็นชิ้นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานเชื่อมโดยตรง โดยทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านกระแสเชื่อมไปยังบริเวณที่มีแรงกดกระทำเพื่อให้เกิดความต้านทาน ความร้อน การหลอมละลาย และเป็นทางลำเลียงน้ำเพื่อระบายความร้อนในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม วัสดุทองแดงเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการทำหัวอิเล็กโทรด การแบ่งกลุ่มของหัวอิเล็กโทรดจากสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดสามารถแบ่งประเภทของหัวอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่ม A เป็นวัสดุกลุ่มทองแดงผสม และแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็น 5 กลุ่มย่อยตามเลขอักษรโรมันโดยกลุ่มย่อยแรกจะมีความบริสุทธิ์ของทองแดงมากที่สุดและรองลงไปตามลำดับ กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่เป็นวัสดุทนความร้อนสูงโดยจะทำจากโลหะผงอัดขึ้นรูป เช่น ทองแดงผสมไททาเนียม วัสดุในกลุ่มนี้จะออกแบบมาเพื่อทนต่อการสึกหรอและทนต่อแรงกดอัดที่อุณหภูมิสูง [21], [24]

ขนาดของหัวอิเล็กโทรดที่เป็นมาตรฐาน และเป็นที่ยอมรับใช้มี 2 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร โดยวัสดุที่นิยมนำมาทำเป็นหัวอิเล็กโทรด คือ CuCrZr ลักษณะของหัวอิเล็กโทรดหากจำแนกตามลักษณะการใช้งาน สามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภทตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของหัวอิเล็กโทรด [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type “A” Point หัวอิเล็กทรอนิกส์เกิดการขึ้นรูปด้านปลายโดยทำเทเปอร์ไว้กับงานที่กำหนดจุดเชื่อมที่ชัดเจน เชื่อมบนพื้นที่แคบ การตกแต่งยาก

Type “B” Dome หัวอิเล็กทรอนิกส์โค้งมน ใช้กับงานทั่วไปที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงแต่หากเป็น Dome flat ต้องการเชื่อมงานที่มีความแข็งแรงสูง การตกแต่งง่าย

Type “C” Flat หัวอิเล็กทรอนิกส์แบนทั้งหน้าสัมผัส ใช้กับงานที่ต้องการพื้นผิวที่ละเอียด (Flat surface) เชื่อมโบลท์หรือนัท การตกแต่งง่าย

Type “D” Offset หัวอิเล็กทรอนิกส์ออกแบบให้เยื้องจุดศูนย์กลางของแชงค์ (Shank) เพื่อหลบสิ่งกีดขวาง หลบมุมของชิ้นงานเชื่อมพื้นที่ที่แคบแบ่งเป็น Offset dome และ Offset flat การตกแต่งยาก

Type “E” Truncated หัวอิเล็กทรอนิกส์หัวตัด ใช้กับงานทั่วไป ที่ต้องการปรับปรุงพื้นผิวงานเชื่อมที่เรียบ องศาของหัวตัดมีผลต่อความร้อนในการเชื่อม การตกแต่งยาก

Type “F” Radius หัวอิเล็กทรอนิกส์ออกแบบให้บริเวณตรงปลายมีรัศมี ใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง งานที่มีความหนามาก งานพื้นผิวรูปทรงกลม เช่น การเชื่อมอะลูมิเนียม การเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง การเชื่อมงานลักษณะทรงกระบอก การตกแต่งยาก

2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม และการใช้งาน

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) หรือ ที่เรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า สแตนเลส หมายถึง เหล็กที่ผสมธาตุโครเมียมอย่างน้อยร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนักจึงทำให้เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนโดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างเป็นแผ่นฟิล์มของธาตุโครเมียมออกไซด์ที่บางมากๆ และติดแน่นที่ผิวเหล็กกล้าซึ่งจะปกป้องจากบรรยากาศภายนอก เหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโดยส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องคุณสมบัติของความทนทานต่อการกัดกร่อน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนกับสารอื่นอันเนื่องมาจากการใช้งานหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ลักษณะเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิม คือ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ผิวเงางาม ทนความร้อนได้ดี ขึ้นรูปได้ดี และเชื่อมได้ง่าย ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของเนื้อเหล็กได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade) ที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีธาตุโครเมียม (Chromium) เป็นส่วนผสมหลักคือ มีส่วนผสมประมาณ 13 ถึง 17% [26] และมีคาร์บอน (Carbon) กับนิกเกิล (Nickel) ในปริมาณต่ำ มีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับประเภทที่สอง การใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ ได้แก่ เครื่องครัว งาน ช้อน ชาม กระชား หม้อ ขึ้นส่วนเครื่องซักผ้า ขึ้นส่วนระบบท่อไอเสียรถยนต์ เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูลธาตุโครเมียมระดับกลาง เป็นการพัฒนาคุณสมบัติให้ทนต่อการกัดกร่อนในสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Corrosion resistant) และมีการพัฒนาปรับปรุงค่า Tensile stress และ Elongation เพื่อรักษาคุณสมบัติของวัสดุขณะขึ้นรูป (Formability) การพัฒนาดังกล่าวเพื่อใช้จะผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ที่เรียกว่า ท่อรวมไอเสีย (Exhaust manifold) [2] ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่รับไอเสียจากเครื่องยนต์โดยตรง รวมถึงเป็นชิ้นส่วนที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมจากการใช้งานโดยตรง

2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade) ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก ธาตุประกอบสำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ประกอบด้วย 3 ธาตุ คือ คาร์บอน (Carbon) โครเมียม (Chromium) ประมาณ 18 ถึง 25% และนิกเกิล (Nickel) ประมาณ 1 ถึง 20% [26] จะมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

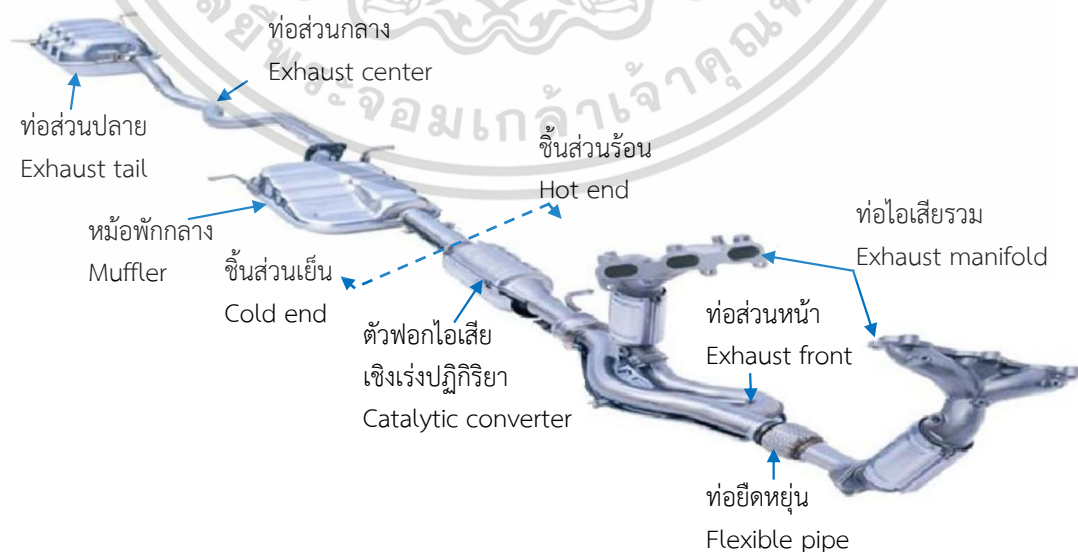
ก่อนดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น ๆ กลุ่มอุตสาหกรรมที่นิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมการผลิตยาและเวชภัณฑ์ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำตาล เป็นต้น

3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade) เป็นประเภทที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Chromium) ประมาณ 12 % [26] โมลิบดีนัม (Molybdenum) และคาร์บอน (Carbon) แต่ไม่มีนิกเกิล (Nickel) เป็นส่วนผสม ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จึงมีคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำแต่มีคุณสมบัติในส่วนของความแข็งแรง และทนทานเนื่องจากมีคาร์บอน (Carbon) เป็นตัวที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัตินี้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อเสีย คือ ยิ่งแข็งมากขึ้นก็เปราะ และแตกหักง่ายได้เช่นกัน เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีถูกใช้งานที่ต้องการความแข็งแรง เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด เป็นต้น

4. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีธาตุโครเมียมผสมประมาณ 18 ถึง 28% ธาตุ นิกเกิลประมาณ 4.5 ถึง 8% [26] และธาตุโมลิบดีนัมสูงกว่า 5% จะมีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูง และค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว ใช้งานมากในที่ที่มีคลอไรด์สูง

5. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทที่มีสูตรผสมง่าย ๆ คือ ธาตุโครเมียม (Chromium) ประมาณ 17% [26] มีธาตุ นิกเกิล ทองแดง และไนโอเบียม มีคุณสมบัติของการต้านทานการกัดกร่อน และความแข็งแรงทนทาน ได้ดี เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้จึงเหมาะสำหรับทำแกนปั๊ม หัววาล์ว

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ดีเยี่ยมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ส่วนมากนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มออสเทนนิติก และเฟอร์ริติก การนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้ในงานในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ส่วนใหญ่จะใช้ในระบบท่อไอเสีย โดยมีระดับอุณหภูมิการใช้งานเป็นหนึ่งในการใช้งานตามชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิดในระบบท่อไอเสียรถยนต์มีการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ตามอุณหภูมิที่ชิ้นงานได้รับ คือ ชิ้นส่วนร้อน และชิ้นส่วนเย็น [13], [27] แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบท่อไอเสียรถยนต์ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชั้นส่วนร้อน-อุณหภูมิสูง (Hot end) หมายถึง ส่วนที่ออกจากเครื่องยนต์สิ้นสุดที่ตัวฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ชั้นส่วนนี้จะทำงานเหนืออุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ประกอบด้วย ท่อไอเสียรวม (Exhaust manifold) ท่อส่วนหน้า (Exhaust front) ท่อยืดหยุ่น (Flexible pipe) ตัวฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic converter) ชั้นส่วนท่อลำเลียงไอเสียเหล่านี้ต้องต้านทานความคืบ (Creep resistance) ต้านทานการเกิดสเกล (Scaling) ที่อุณหภูมิสูง และความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดี รวมถึงต้องมีความต้านทานต่อความเค้นแรงดึง และต้องมีความต้านทานต่อความกว้างของความเค้นจากการสั่นสะเทือนได้ดี

2. ชั้นส่วนเย็น-อุณหภูมิต่ำ (Cold end) หมายถึง ส่วนของท่อไอเสียที่ต่อจากตัวฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจนถึงปลายท่อ เช่น หม้อพักกลาง (Muffler) และท่อส่วนปลาย (Exhaust tail) ชั้นส่วนเหล่านี้จะทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงต้องการคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนจากคลอไรด์ได้ดี ต้านทานการกัดกร่อนจากการควบแน่นได้ดี ขึ้นรูปได้ดีด้วยงานพับตัด มีความสามารถในการเชื่อมได้ดี สามารถทนความร้อนและต้านทานการกัดกร่อนได้ [24] สำหรับการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิดสำหรับท่อไอเสียรถยนต์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับท่อไอเสียรถยนต์

ชั้นส่วนของท่อไอเสียรถยนต์	การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม	
ชั้นส่วนร้อน	ท่อไอเสียรวม	AISI310S, AISI430J1L, AISI439 AISI441, AISI444 SUS425, SUS429, SUS430
	ท่อส่วนหน้า	AISI430J1L, AISI439, SUS425, SUS430, SUS439
	ท่อยืดหยุ่น	AISI304L, AISI316 SUS304, SUS316L
	ตัวฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา	AISI409, AISI430J1L, AISI439 SUS409, SUS425
	ท่อไอเสียชั้นใน	AISI304, AISI316 SUS304, SUS316L, SUS425
ชั้นส่วนเย็น	หม้อพักกลาง	AISI409L, AISI434, AISI439 SUS409, SUS425
	ท่อส่วนกลาง	AISI409, AISI436L, AISI439 SUS409, SUS425
	ท่อส่วนปลาย	AISI409, AISI436L, AISI439 SUS304, SUS316L, SUS409, SUS425

จะเห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก SUS425 จะถูกเลือกใช้กับชั้นส่วนท่อไอเสียรถยนต์เกือบทุกชั้นส่วนเนื่องจากการปรับปรุงส่วนประกอบทางเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เพื่อทนต่อการกัดกร่อน ณ ช่วงอุณหภูมิสูง และเพื่อตอบสนองลักษณะการใช้งานที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเออสตีล เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

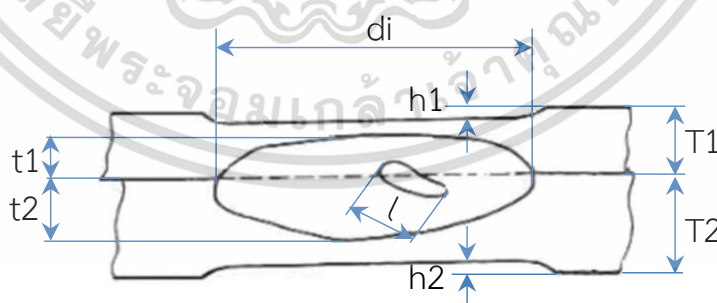
ไร้สนิมเพอร์ริติกอื่นๆ รวมทั้งมีข้อได้เปรียบเรื่องราคาที่ถูกกว่าเนื่องจากปริมาณธาตุโครเมียมมีน้อยกว่า สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS316L ถูกเลือกใช้ในส่วนท่อไอเสียรถยนต์ที่ต้องมีการเคลื่อนไหว และสัมผัสกับสภาพแวดล้อมจากการใช้งาน เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิดนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่ต่ำมีความทนทานต่อการกัดกร่อนรอบขอบเกรนได้ดี ใช้งานในสภาวะที่มีความกัดกร่อนสูง จึงถูกเลือกใช้เป็นท่อยึดหยุน ท่อส่วนปลาย รวมทั้งชิ้นส่วนที่อยู่ในท่อพักกลาง และท่อไอเสียชั้นใน

2.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การศึกษาโครงสร้างของโลหะจากภาพถ่าย สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. การศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทราย ผ่านการกัดกรด และถ่ายภาพที่กำลังขยายต่ำไม่เกิน 50 เท่า การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่าทำให้เห็นลักษณะภาพโดยรวมซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค บ่งบอกลักษณะของความสัมพันธ์ของรอยเชื่อม เป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพ (Quality control) และใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนวิศวกรรมต่าง ๆ ตัวอย่างการวิเคราะห์ และทดสอบโครงสร้างมหภาค เช่น การตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม เช่น T-joint Lap-joint ใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อม การแทรกตัวของวัสดุ รูพรุนในรอยเชื่อม การเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบแรงดึงมาทำการตัดแบ่งตรงบริเวณจุดเชื่อมเป็นสองส่วนเพื่อนำมาทำการตรวจสอบ ขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแสดงรายละเอียดตาม ภาคผนวก จ สำหรับการตรวจสอบคุณลักษณะทางคุณภาพของรอยเชื่อมได้แก่ ระยะการซึมลึก (Penetration: t_1 , t_2) ระยะการกดลึก (Indentation depth: h_1 , h_2) และขนาดของรอยเชื่อม (Nugget diameter: d_i) อ้างอิงมาตรฐานอ้างอิง JIS Z 3139 [28]



รูปที่ 2.6 จุดวัดค่าด้านคุณภาพของรอยเชื่อม [28]

จากรูปที่ 2.6 สามารถหาอัตราระยะการซึมลึกของจุดเชื่อม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดเชื่อมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราการระเหยการซึมลึกของจุดเชื่อมในแผ่นชิ้นงาน } T_1 = (t_1/T_1) \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\text{อัตราการระเหยการซึมลึกของจุดเชื่อมในแผ่นชิ้นงาน } T_2 = (t_2/T_2) \times 100\% \quad (2.4)$$

- เมื่อ d_i คือ ขนาดของรอยเชื่อม (Nugget diameter)
 T_1 และ T_2 คือ ค่าความหนาของแผ่นชิ้นงาน (Plate thickness)
 t_1 และ t_2 คือ ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม (Depth of penetration)
 h_1 และ h_2 คือ ระยะการกดลึกของรอยเชื่อม (Depth of indentation)
 l คือ ขนาดของหลุม และโพรง (Length of pit and blowhole)

การพิจารณาคุณลักษณะทางคุณภาพตามมาตรฐาน JIS Z 3139 คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมสำหรับคุณภาพระดับคลาส B ต้องมากกว่า $4\sqrt{t}$ หรือมีขนาดของรอยเชื่อมมากกว่า 5.0 มิลลิเมตร [29] เมื่อ t ความหนาของวัสดุที่บางสุดในการเชื่อม อัตราการซึมลึกต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 20% และต้องไม่มากกว่า 80% ของความหนาของวัสดุที่บางสุดในการเชื่อม หรือต้องมีระยะการซึมลึกระหว่าง 0.3 ถึง 1.2 มิลลิเมตร อัตราการกดลึกต้องไม่มากกว่า 30% ของความหนาของวัสดุที่บางสุดในการเชื่อม หรือมีค่าการกดลึกไม่มากกว่า 0.45 มิลลิเมตร หลุมหรือโพรงในรอยเชื่อมต้องมีค่าน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร

2. การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

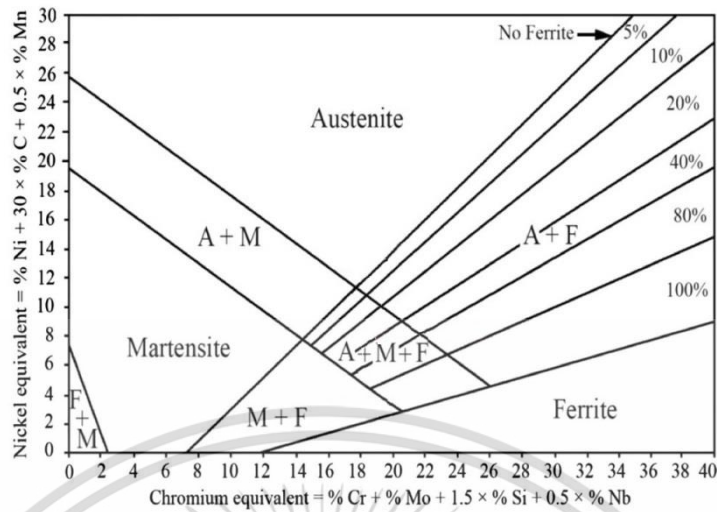
เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทราย ขัดละเอียดด้วยผ้าโพลีเอสเตอร์ และผงอะลูมินาผ่านการกัดกรดหรือกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออน แล้วถ่ายภาพที่ กำลังขยายสูง ทำให้เห็นถึงลักษณะชนิดของโครงสร้างภายในเนื้อโลหะซึ่งสามารถทำนายโครงสร้างทางโลหะวิทยาได้ชัดเจน และแม่นยำมากขึ้น ข้อควรระวังในการกัดกรดต้องเลือกชนิดของกรดและโลหะให้เหมาะสมกับประเภทของชิ้นงานทดสอบ และเวลาในการแช่กรดไม่ควรแช่นานเกินไป เพราะจะทำให้ผิวงานดำทึบ มองเห็นโครงสร้างได้ยาก แต่ก็ไม่ควรใช้เวลาน้อยเกินไป เพราะจะทำให้มองไม่เห็นโครงสร้าง โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 5-10 วินาที แล้วแต่ชนิดของโลหะ และกรดที่ใช้ ส่วนการกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออนต้องตั้งค่าปัจจัยของเครื่องกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออนให้เหมาะสม งานวิจัยนี้ได้แสดงรายละเอียดการตั้งค่าปัจจัยการของเครื่องกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออนตามภาคผนวก ฉ

วิธีการในการประมาณลักษณะโครงสร้างจุลภาคจะพิจารณาส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้แผนภาพ Schaeffler diagram ดังรูปที่ 2.7 แผนภูมินี้แสดงโครงสร้างที่ได้รับการยืนยันตัวจากอุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้อง เมื่อทราบปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDS) แล้วทำการหาปริมาณธาตุสมมูลของธาตุโครเมียม และธาตุนิกเกิล โดยจะคำนวณในสมการปริมาณธาตุโครเมียมสมมูล (Chromium equivalent) ตามสมการที่ 2.5 และสมการปริมาณธาตุนิกเกิลสมมูล (Nickel equivalent) ตามสมการที่ 2.6 ตามลำดับ [9], [30], [31]

$$\% \text{ Chromium equivalent} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5(\% \text{Si}) + 0.5(\% \text{Nb}) \quad (2.5)$$

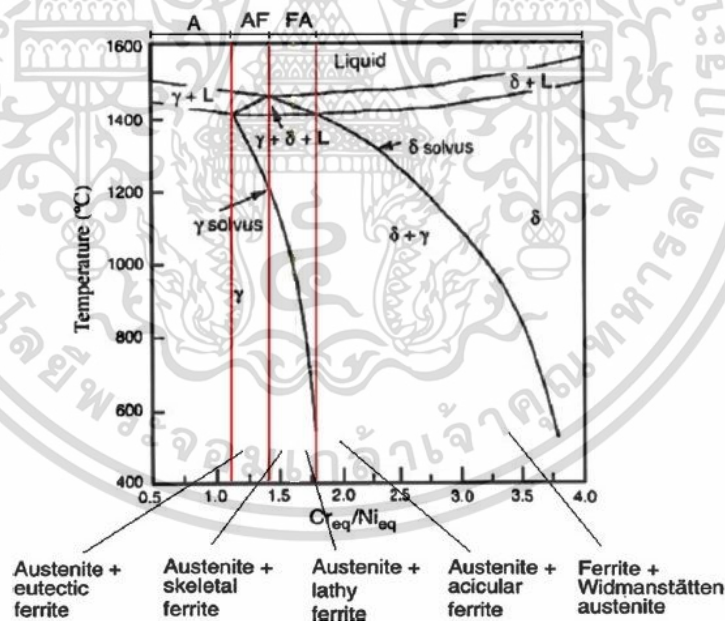
$$\% \text{ Nickel equivalent} = \% \text{Ni} + 30(\% \text{C}) + 0.5(\% \text{Mn}) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนภาพ Schaeffler diagram [30]

แผนภาพ Schaeffler diagram จะแสดงผลของธาตุผสมต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยกลุ่มธาตุที่ส่งเสริมโครงสร้างออสเทนไนท์จะแสดงในรูปของปริมาณธาตุที่เกิดสมมูล ส่วนกลุ่มที่ส่งเสริมโครงสร้างเฟอร์ไรท์จะแสดงในรูปของปริมาณธาตุโครเมียมสมมูล



รูปที่ 2.8 แผนภาพ Pseudo binary Fe Cr Ni 70%Fe [30]

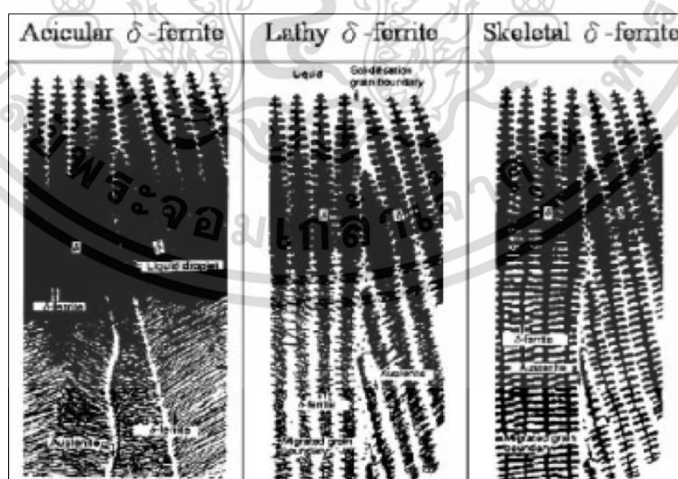
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ วิธีการในการพยากรณ์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมจะอธิบายด้วยแผนภาพการกลายเป็นของแข็ง (Solidification mode) โดยใช้แผนภาพ Pseudo binary diagram ซึ่งเป็นแผนภาพที่เหมาะสม และมีความสอดคล้องมากที่สุดในการอธิบายโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม [32] เนื่องจากรอยเชื่อมมีปริมาณธาตุของธาตุโครเมียม และธาตุไนเกิลเป็นส่วนผสมจากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด เมื่อผ่านกระบวนการเชื่อมนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางความร้อนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดจะเกิดเฟสเดลต้าเฟอร์ไรท์ และเฟสซิกมาในรอยเชื่อม [33] โดยเฟสเดลต้าเฟอร์ไรท์ที่ตกผลึกในโครงสร้างออสเทนไนท์เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง และแข็งตัวที่อุณหภูมิสูง [34], [35] สามารถอ้างอิงตามเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 2.8 โดยเฟสปฐมภูมิของการแข็งตัวอาจเป็นเฟสออสเทนไนท์หรือเฟสเดลต้าเฟอร์ไรท์ก็ได้ เมื่อเกิดการแข็งตัวขึ้นเป็นออสเทนไนท์ปฐมภูมิ เช่น ชนิด A และ AF โครงสร้างที่ตกผลึกสามารถเป็นได้ทั้งออสเทนไนท์ทั้งหมด (ชนิด A) หรือประกอบด้วยเฟอร์ไรท์จำนวนเล็กน้อย ยูเทคติกเฟอร์ไรท์เกิดขึ้นจากสภาพการแข็งตัวของออสเทนไนท์ปฐมภูมิ (ชนิด AF) เฟอร์ไรท์กระจายตัวไปตามขอบเกรนหรือขอบเกรนย่อย [36], [37]

Vermicular หรือ Skeletal ferrite เป็นรูปแบบเฟอร์ไรท์โดยส่วนใหญ่พบในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เป็นผลมาจากการถูกควบคุมการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวในสภาพของแข็งของเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์แล้วตามด้วยการแข็งตัวของเฟอร์ไรท์ปฐมภูมิ (ชนิด FA) เฟอร์ไรท์ชนิดนี้เกิดตามแกนของเดนไดรต์หรือ Skeletal ของโครงสร้างการแข็งตัวของเฟอร์ไรท์ปฐมภูมิ

Lathy หรือ Acicular ferrite เฟอร์ไรท์ชนิดนี้เกิดจากการแข็งตัวของเฟอร์ไรท์ปฐมภูมิด้วยเช่นเดียวกันแต่เป็นสมบัติที่อยู่ในรูปของแผ่นหรือเข็มซึ่งจะขยายการแข็งตัวตามเกรนย่อย เฟอร์ไรท์ในรูปนี้เป็นชนิดที่อยู่ในรอยเชื่อมที่มีเฟอร์ไรท์สูงหรือเฟอร์ไรท์ต่ำที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งมักจะสังเกตเห็นโครงสร้างแบบ Lathy และ Vermicular ผสมกัน

Ferrite กับ Widmanstätten austenite รอยเชื่อมที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น เฟสเฟอร์ไรท์จะมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสออสเทนไนท์ ซึ่งจะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์จนเกิดเดลต้าเฟอร์ไรท์ (ชนิด F) และมีออสเทนไนท์อยู่ในสภาพของแข็งเท่านั้น ผลที่เกิดขึ้นทำให้ออสเทนไนท์จะตกผลึกไปตามขอบเกรนระหว่างเฟสเฟอร์ไรท์ด้วยตัวเอง และนิวเคลียสของ Widmanstätten ซึ่งเหมือนกับการขยายตัวเข้าไปภายในเกรน เฟอร์ไรท์ในรูปนี้มีความสัมพันธ์แบบไม่ปกติในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่เป็นปกติในชนิดดูเพล็กซ์ [38]



รูปที่ 2.9 รูปแบบเฟอร์ไรท์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก [14]

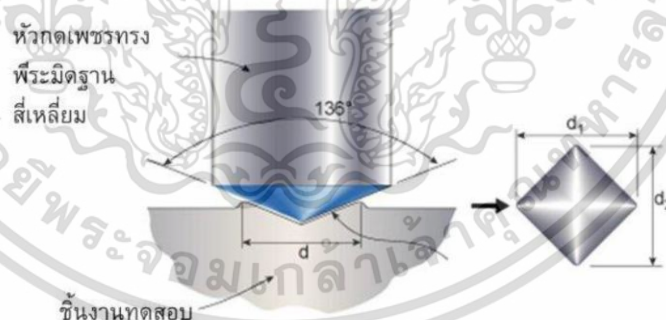
2.5 การทดสอบค่าความแข็ง

วัตถุประสงค์ในการทดสอบความแข็งเพื่อศึกษาวิศวกรรมด้านโลหะ และใช้ทดสอบกับงานในงานอุตสาหกรรมโลหะต่าง ๆ ตลอดจนคุณสมบัติทางกลของโลหะในด้านการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ที่มีค่าเหมือนกัน และต่างกันในการเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะด้วยการนำเอาไปอบชุบด้วยความร้อน เพื่อจะทราบว่าโลหะนั้นแข็งหรือไม่ โดยการใช้เครื่องทดสอบหาค่าความแข็ง และทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของโลหะในการทดสอบแรงดึง การต้านทานต่อการยึดตัวของโลหะ การต้านทานการสึกหรอ และความเหนียวของโลหะ เป็นต้น การทดสอบความแข็งมีวิธีที่นิยมดังนี้

1. การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำหนึ่งหน่วยต่อพื้นที่

2. การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell hardness test) เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำหนึ่งหน่วยต่อพื้นที่

3. การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test) เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีระมิดมุม 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส [39]

ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว วิธีนี้หัวกดเป็นหัวเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มอ่อนจนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ ไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดโดยจะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น ค่าความแข็งจะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น mm^2 โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วแทนค่าสูตรดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$HV = (1.854F) / d^2 \quad \text{หน่วย (kgf/mm}^2\text{)} \quad (2.7)$$

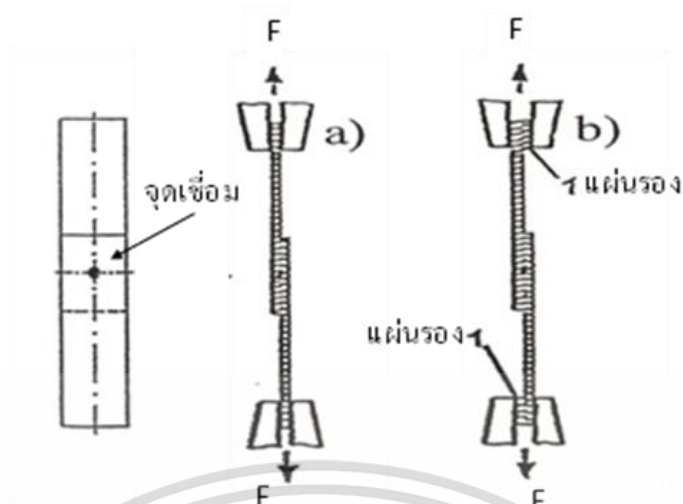
โดย F = แรงกด (kgf)

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm) = $(d_1 + d_2) / 2$

เนื่องจากรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กมากจึงต้องให้ผิวชิ้นทดสอบผิวเรียบปราศจากออกไซด์หรือผ่านการกัดกรดมาก่อนเพื่อที่จะได้เห็นโครงสร้างจุลภาค และสามารถเลือกกดบนโครงสร้างที่ต้องการได้ ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด (d) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10-35 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างรอยกดอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

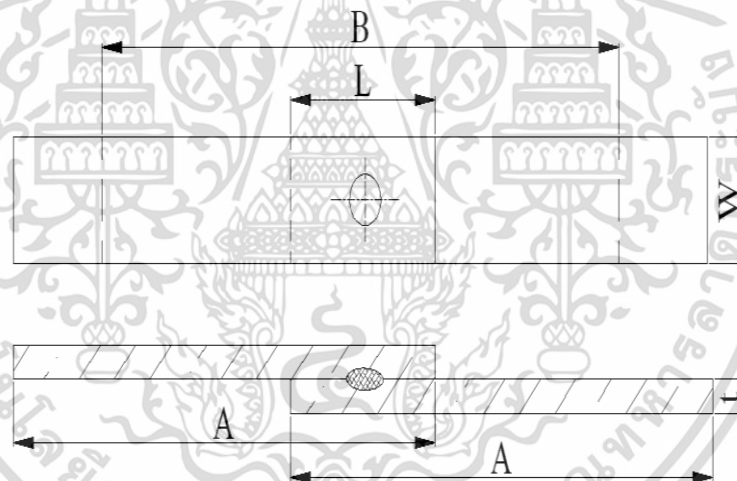
2.6 การทดสอบแรงดึงเฉือน

การทดสอบแรงดึงเฉือนมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อแรงดึงเป็นประโยชน์ในการออกแบบ และการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ในการทดสอบจะเป็นการใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอถึงขั้นงานให้ยึดออก และขาดในที่สุด วิธีการทดสอบมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้ การเตรียมชิ้นทดสอบ (Specimen) ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) เป็นต้น จากนั้นทำความสะอาดชิ้นทดสอบอาจใช้กระดาษทรายลูบชิ้นทดสอบเพื่อป้องกันการเลือนของชิ้นงานจากหัวจับขณะทำการดึง ทำการตรวจสอบความเรียบ ความตรงของชิ้นทดสอบโดยชิ้นงานทดสอบจะต้องไม่โก่งงอ ทำการวัด และบันทึกค่าขนาดมิติของชิ้นทดสอบแล้วทำการดึงด้วยเครื่องดึง (Tensile machine) ซึ่งเมื่อดึงเสร็จสิ้นทำการวาดกราฟ และคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ต้องการ [40] การทดสอบแรงดึงเฉือน และการจับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบต่อเกยสองชั้นแสดงดังรูปที่ 2.11 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนจะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบดังแสดงตามรูปที่ 2.12 และตารางที่ 2.2 โดยอ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 3136 [41] ส่วนวิธีการตรวจสอบรอยเชื่อมจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดอ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 3140 [42]



(a) ปลายชิ้นงานถูกจับโดยตรง (b) ปลายชิ้นงานถูกจับโดยแผ่นรอง

รูปที่ 2.11 การทดสอบแรงดึงเฉือน และการจับชิ้นงานทดสอบ [1]



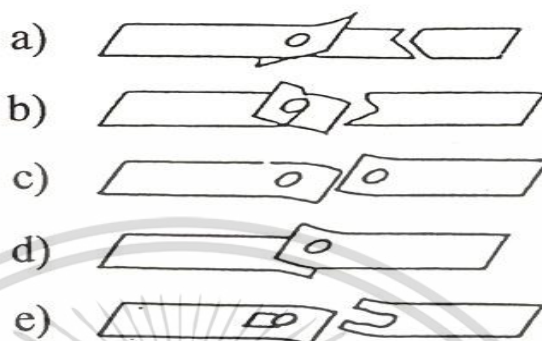
รูปที่ 2.12 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ [41]

ตารางที่ 2.2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มม.) [41]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการทดสอบแบบดึงเดือนจะให้ลักษณะของการฉีกขาดแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของจุดเชื่อม วัสดุที่ทำการทดสอบ ความหนาของแผ่นชิ้นงานทดสอบ ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม ขนาดของรอยเชื่อม ความกว้างของชิ้นงาน ระยะห่างของจุดเชื่อม และความยาวของระยะซ้อนเกย แสดงดังรูปที่ 2.13



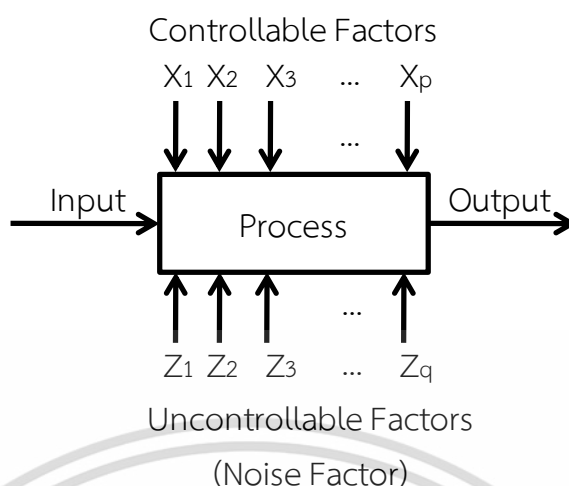
รูปที่ 2.13 ลักษณะการขาดจากการทดสอบแรงดึงเดือน [1]

จากรูปที่ 2.13 ลักษณะการขาดจากการทดสอบแรงดึงเดือนแบ่งได้ดังนี้ (a) แผ่นชิ้นงานทดสอบขาด (b) แผ่นชิ้นงานทดสอบฉีก (c) จุดเชื่อมขาดแบบตัดเดือนผิว (d) ชิ้นงานทดสอบขาดตรงจุดเชื่อมหลุดเป็นรู และ e) ชิ้นงานทดสอบขาดแบบเดือนเนื่องงานทดสอบ

2.7 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบการทดลอง (Design of experiments) เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการด้านสถิติเพื่อออกแบบการทดลองปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะที่สนใจเพื่อให้ทราบถึงระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยซึ่งปัจจัย (Factor) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ หมายถึง ปัจจัยที่กำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต เช่น ค่ากระแสเชื่อมในการเชื่อม ปัจจัยประเภทที่สองคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ หมายถึง ปัจจัยที่กำหนดค่าของปัจจัยนั้นไม่ได้ในการผลิต เช่น อุณหภูมิจากการเชื่อม ระบบการออกทดลองทั่วไปประกอบด้วย การใส่ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองลงไป ในกระบวนการทดลองนั้น ๆ และได้ผลผลิตออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลอง ได้แก่ วัตถุดิบ เครื่องจักร เป็นต้น ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองเป็นปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตที่ได้ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมให้ได้ในระดับที่เหมาะสม ดังนั้นการออกแบบการทดลองที่ดีต้องสามารถกำจัดหรือลดอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป [43]–[45]

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สามารถศึกษาผลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (Factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output (Response) ที่เกิดขึ้น

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อหาตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่สามารถควบคุมในทางปฏิบัติที่มีผลต่อตัวแปรตามหรือผลตอบสนองโดยลดความแปรปรวนของผลตอบสนองให้น้อยที่สุดในขณะที่ทำให้ผลตอบสนองอยู่ในเป้าหมายของการออกแบบมากที่สุดซึ่งการกำหนดตัวแปรอิสระ และระดับของตัวแปรอิสระต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมที่สุดอีกทั้งเพื่อเป็นการลดความแปรปรวนของตัวแปรปรวนหรือตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในทางปฏิบัติหรืออาจจะควบคุมตัวแปรนี้ได้ในขณะที่ทำการทดลอง [43] หลักการพื้นฐานมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบการทดลองทุกรูปแบบ หลักการพื้นฐานมี 3 หลักการคือ การสุ่ม (Randomization) การทำการทดลองซ้ำ (Replication) และการจัดกลุ่ม (Blocking)

การสุ่ม คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากัน เพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไปให้กับการระดับการศึกษาเท่า ๆ กัน

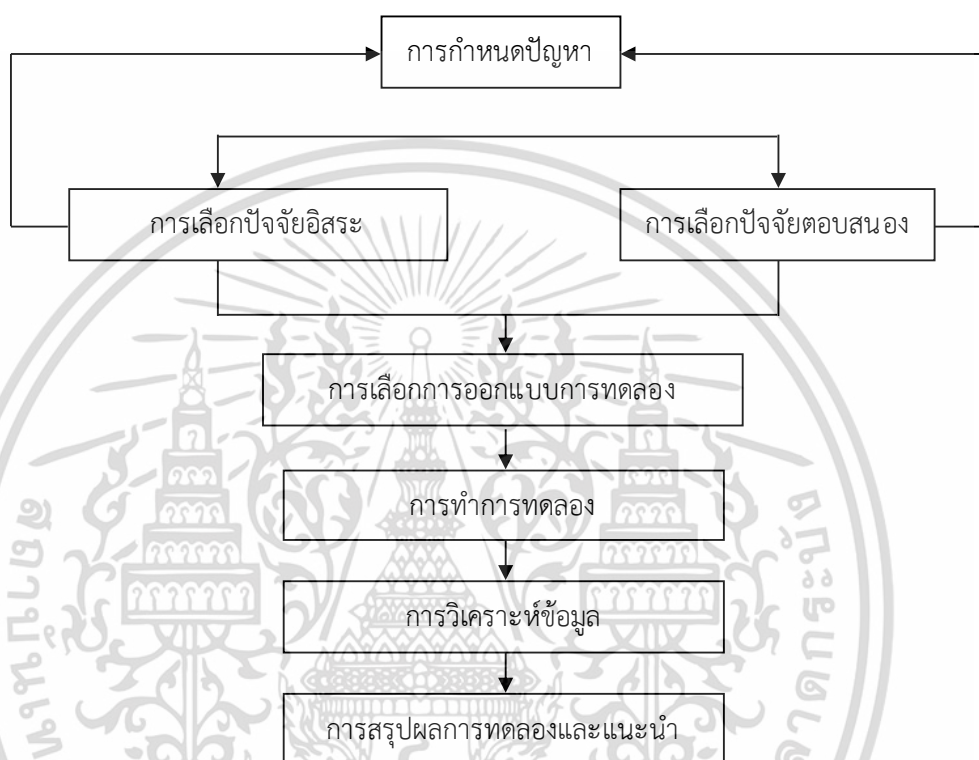
การทำการทดลองซ้ำ คือ การทดลองซ้ำในข้อมูลเพื่อกำจัดเอาปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป

การจัดกลุ่ม คือ การจัดกลุ่มสิ่งๆ ที่เหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อลดความแปรผันจากความแตกต่างของหน่วยตัวอย่าง

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อการออกแบบ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิตประกอบด้วยสามขั้นตอน คือ การบรรยายลักษณะรูปแบบ การควบคุม และการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ขั้นตอนแรกการบรรยายลักษณะรูปแบบการทดลองประกอบด้วยการวิเคราะห์ปัญหาโดยหาตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่มีต่อความแปรปรวนของผลตอบแนวทางการออกแบบการทดลองในขั้นตอนนี้ควรคำนึงถึง 6 ข้อตามรูปที่ 2.15 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกำหนดปัญหา
2. การกำหนดตัวแปร และระดับของปัจจัยมีแบบกำหนด แบบสุ่ม และแบบผสม
3. การเลือกการออกแบบการทดลอง
4. การทำการทดลอง
5. การวิเคราะห์ข้อมูล
6. การสรุปผลการทดลอง และเสนอแนะ



รูปที่ 2.15 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง [43]

ขั้นตอนที่สอง คือ การควบคุม ผลการทดลองที่ดีต้องมีกระบวนการออกแบบการทดลองที่มีการควบคุมให้ได้ผลการทดลองที่ได้รับความเชื่อถือ ขั้นตอนที่สาม คือ การหาผลที่ดีที่สุด การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสามารถหาได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบที่อยู่ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้หลักการของแผนภาพพื้นผิวผลตอบ (Response surface plot) และโครงร่างของผลตอบ (Contour plot) หรือใช้เทคนิคของการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบการทดลองที่ออกแบบขึ้นมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งการทดลองทุกครั้งต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ หรือ ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีต้องเกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้น้อยที่สุด ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง การตรวจหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง หรือการออกแบบการทดลองใหม่หรือถ้าการเพิ่มปัจจัยแล้ว ค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวนมีมากต้องทำการบล็อกเพื่อลดผลของปัจจัยรบกวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) คือ การวัดค่าความแตกต่างในรูปความแปรปรวนแล้วแยกย่อยออกมา นำค่าย่อยแต่ละค่ามาเปรียบเทียบกับค่าความแตกต่างแล้วดูว่าความแตกต่างใดมีค่ามากกว่าแสดงว่าปัจจัยหรือระดับของปัจจัยที่ทำให้ค่าความแตกต่างนั้นคุณสมบัติตัวประมาณค่าความแปรปรวนที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS) = SS/d.f. โดย MS หมายถึง ค่าเฉลี่ยกำลังสอง SS หมายถึง ค่าผลรวมกำลังสอง d.f. หมายถึง ชั้นความอิสระ

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นเครื่องมือใช้คำนวณทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์ทางสถิติ วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเฉพาะกลุ่มโดยใช้ความแปรปรวนในการคำนวณ ในการวิเคราะห์การคำนวณไม่ใช่ตัวแปรในการตัดสินใจแต่การตัดสินใจได้จากผลลัพธ์จากการวิเคราะห์

ตารางการหาค่าการทดสอบ F ในการทดสอบ F_0 ในการเปรียบเทียบ F การหาค่าความแปรปรวนสมมติให้ $\alpha = 0.05$ หากการหาค่า F_0 ได้น้อยกว่าปัจจัยจากตารางถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผลสามารถยอมรับสมมติฐานได้ หรือหากการหาค่า F_0 ได้มากกว่าปัจจัยจากตารางถือว่าปัจจัยนั้นมีผลสามารถยอมรับสมมติฐานได้ การเลือกแบบแผนการทดลอง

1. แผนการทดลองแบบสุ่ม (Complete randomized design) ใช้กับการทดลองปัจจัยเดียว และเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้โดยยึดหลักการแบบสุ่มได้ทำซ้ำโดยมีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้ กำหนดตัวแปรออกมาและปัจจัยที่ควบคุมได้ ทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete random) ในการวัดค่าวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

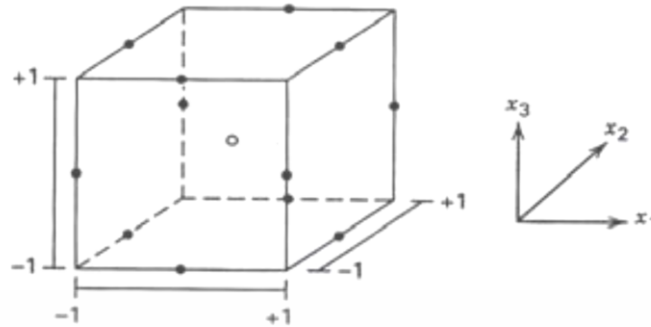
2. แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design experiment) ใช้กับการทดลอง 2 ปัจจัยคือ ปัจจัยหลัก (Main effect) คือ อิทธิพลจากปัจจัยที่สนใจโดยการเฉลี่ยออกจากปัจจัยอื่น ๆ ทั้งหมด และปัจจัยร่วม (Interaction effect) คือ อิทธิพลที่สนใจภายใต้การเปลี่ยนแปลงแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยทั่ว ๆ ไป มีรูปแบบคือ $A \times B \times C \times \dots$ แฟคทอเรียล เช่น $2 \times 3 \times 4$ แฟคทอเรียล และมีรูปแบบแผนการทดลองของแฟคทอเรียลที่สำคัญ เช่น 2^k ในการกำหนดระดับปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น เช่น 2^2 หรือ 2^4 เป็นการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับปัจจัยไว้ 3 ระดับใน k ปัจจัยเช่น 3^2 หรือ 3^4 เป็นต้น

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) เป็นการออกแบบสำหรับพิดพื้นผิวตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการประมวลผลที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วยเนื่องจากการออกแบบนี้เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ และไม่รวมจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปร

การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) วิธีการการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย x_1, x_2 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ $k = 3$ [43]–[45]

เมื่อ ε คือ สิ่งรบกวนหรือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการและมีผลกระทบต่อผลตอบของ y ค่าคาดหวังของผลตอบของ y สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (2.9)$$

ดังนั้น พื้นผิวผลตอบสำหรับระบบที่มีจำนวน 2 ปัจจัยสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.10)$$

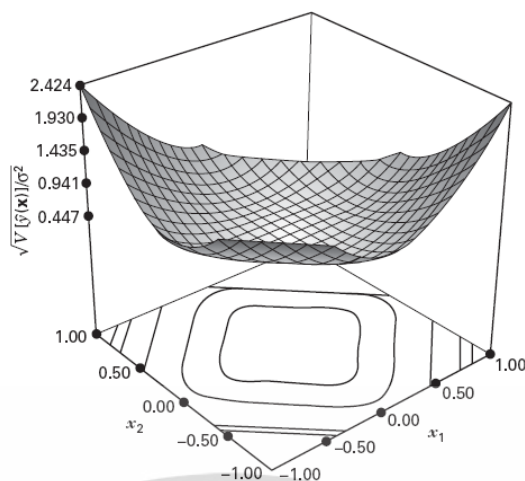
ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour plot) ของพื้นผิวผลตอบโดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระโดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ อาจจะเป็นแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2.11

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.11)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_1 + \sum_{i=1}^k \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 พื้นผิวตอบแบบสามมิติ [46]

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวผลตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุด การป็นด้วยทางชั้น การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบ

2.8 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายประเภท เช่น การศึกษาอิทธิพลของหัวอิเล็กโทรดที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด การศึกษาเพื่อหาค่าเหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด การศึกษากระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับโลหะกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม นอกกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มการเชื่อมโลหะต่างชนิด เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอธิบายได้ดังนี้

Li และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมของหัวอิเล็กโทรดชนิดหัวตัด (Type “E” truncated) ที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของตัวถังรถยนต์ โดยพิจารณาคุณสมบัติทางฟิสิกส์โดยใช้วิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไฟฟ้า การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การไหล และการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณจุดสัมผัส ซึ่งการทดลองจะศึกษามุมของหัวอิเล็กโทรดเป็น 4 มุม ได้แก่ มุม 15, 30, 45 และมุม 60 องศา ผลการทดลองพบว่า อิทธิพลของการใช้หัวอิเล็กโทรดที่มีมุมแตกต่างกันมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม และอายุการใช้งานของหัวอิเล็กโทรด การใช้มุมที่ต่ำจะเกิดความหนาแน่นของกระแสเชื่อมบริเวณขอบของหัวอิเล็กโทรด เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงซึ่งจะช่วยให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะที่ดี ทำให้เนื้อโลหะที่หลอมละลายเกิดการไหล หลากหลายรูปแบบซึ่งเป็นผลดีต่อคุณภาพของรอยเชื่อม อีกทั้งหัวอิเล็กโทรดมุมต่ำยังสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงความสามารถในการระบายความร้อน จากงานวิจัยนี้มุมหัวอิเล็กโทรด 30 องศา และ 45 องศา ทำให้คุณภาพของรอยเชื่อมดีที่สุด อายุการใช้งานยาวนาน และค่าใช้จ่ายในการผลิตมีค่าต่ำสุด

Mazur และคณะ [47] ได้ทำการศึกษา และเปรียบเทียบผลการทดลองจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่ใช้ Copper backing bar กักับการใช้หัวอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับขนาด 16 มิลลิเมตร แต่มีพื้นที่สัมผัสต่างกันสองขนาดได้แก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 10 มิลลิเมตร โดยวัดคุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กคาร์บอนต่ำ และเหล็ก high strength ที่ใช้ในการประกอบตัวถังรถยนต์ ผลการทดลองชี้ชัดว่า รอยเชื่อมที่เกิดจากหัวอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่สัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร มีคุณภาพรอยเชื่อมเทียบเท่ากับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบดั้งเดิมที่ใช้ Copper backing bar โดยให้กระแสเชื่อมในการเชื่อมที่สูงขึ้น คุณภาพพื้นผิวรอยเชื่อมดี และเมื่อนำไปใช้ในการผลิตสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตลง

Luo และคณะ [48] ทำการศึกษาผลกระทบด้านความร้อนที่มีอิทธิพลต่อการขนาดของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดโดยการคำนวณค่าความต้านทานพลศาสตร์ (Dynamic resistance) และศึกษาการเกิดขึ้นของผลกระทบด้านความร้อน กระบวนการเชื่อมใช้หัวอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่สัมผัสขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 2.0 ถึง 8.5 กิโลแอมแปร์ ใช้แรงกดหัวอิเล็กโทรดคงที่ 3.0 กิโลนิวตัน เวลาเชื่อม 12 ไชเคิล ผลการทดลองทำให้ทราบว่า การเกิดรอยเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดจะมีวิวัฒนาการ 3 ขั้นตอน คือ ช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial stage) ช่วงเวลาการเกิด (Growing stage) และช่วงเวลาหยุดนิ่ง (Stable stage) โดยกระแสเชื่อมในการเชื่อมจะมีผลต่อการเพิ่มขนาดของรอยเชื่อมซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของความต้านทานพลศาสตร์เป็นแบบเส้นตรงกล่าวคือ เมื่อใช้กระแสเชื่อมในการเชื่อมต่ำจะทำให้ค่าเฉลี่ยของความต้านทานพลศาสตร์มีค่าสูง และความสัมพันธ์แบบโพลีโนมินอลกับค่าความร้อนจากความต้านทานพลศาสตร์ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการประเมินดัชนีการเติบโตของรอยเชื่อมซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อความร้อน โดยเป็นตัวชี้วัดคุณลักษณะของการเกิดการก่อของรูปร่างรอยเชื่อม โดยความร้อนจากความต้านทานพลศาสตร์เมื่อมีค่าสูงขึ้นจะทำให้มีความโดดเด่นต่อความสัมพันธ์แบบโพลีโนมินอลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมและค่าความต้านทานแรงเฉือน การคำนวณค่าความร้อนจากความต้านทานพลศาสตร์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบไม่ทำลายได้อีกด้วย

Rawal และคณะ [49] ได้ศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิเกรด 304 โดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และวิธีการการออกแบบพื้นผิวผลตอบ ผลตอบของการศึกษานี้ ได้แก่ ค่าต้านทานแรงดึง และขนาดของรอยเชื่อม ผลการทดลองทำให้ทราบว่า การใช้แรงกด 0.49 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อม 5.97 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 45 ไชเคิล จะทำให้ค่าต้านทานแรงดึงสูงสุด 5.29 กิโลนิวตัน และขนาดของรอยเชื่อมมีค่า 4.47 มิลลิเมตร

Muhammad และคณะ [50] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กคาร์บอนต่ำความหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีทากุชิและวิธีการการออกแบบพื้นผิวผลตอบ ผลตอบของการศึกษานี้คือคุณลักษณะทางคุณภาพของรอยเชื่อมได้แก่ขนาดของรอยเชื่อม (Weld nugget size) และความกว้างของพื้นที่บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน (Width of HAZ) ผลการทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมประกอบด้วย กระแสเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 14 ไซเคิล เวลาทดค้าง 4 ไซเคิล ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลตอบสนองเทียบกับค่าการคำนวณจากการใช้วิธีทากูซิมิตาค่าผิดพลาด 0.34% สำหรับขนาดของรอยเชื่อม และค่าผิดพลาด 1.89% สำหรับความกว้างของพื้นที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

Hamidinejad และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กชุบสังกะสีความหนา 0.67 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ในการประกอบตัวถังรถยนต์ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorials design) และการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design) ปัจจัยการเชื่อมที่ทำการศึกษาคือ แรงกดของหัวอิเล็กโทรด กระแสเชื่อม เวลาเชื่อม และเวลาในการทดค้าง ซึ่งผลตอบคือ ค่าทนแรงดึงเฉือน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การใช้ปัจจัยการเชื่อม แรงกดของหัวอิเล็กโทรดมีค่า 201 กิโลกรัมฟอร์ซ กระแสเชื่อมมีค่า 11.3 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อมมีค่า 12 ไซเคิล และเวลาในการทดค้าง 12 ไซเคิล จะให้ค่าทนแรงดึงเฉือน 3,858.62 นิวตัน ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย 1.5%

Kianersi และคณะ [30] ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 316L ความหนา 1.0 มิลลิเมตร โดยพิจารณาขนาดของรอยเชื่อม ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน ค่าพลังงานรวมถึงลักษณะความเสียหายที่เกิดจากการทดสอบแรงดึง และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ปัจจัยการเชื่อม 2 ปัจจัยคือ กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมถูกปรับเปลี่ยนตามลำดับขั้นการทดลอง รอยเชื่อมจะผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลได้แก่ การทดสอบแรงดึงเฉือน การตรวจสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อม จากนั้นเลือกชิ้นงานเชื่อมที่ได้จากค่าปัจจัยที่ดีที่สุดในการเชื่อมคือ เวลาทด 20 ไซเคิล เวลาเชื่อม 4 ไซเคิล เวลาในการทดค้าง 30 ไซเคิล กระแสเชื่อม 8 กิโลแอมแปร์ แรงกด 4 กิโลนิวตัน ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในส่วนของการเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสในรอยเชื่อม จากผลการทดลองสรุปผลได้ว่า ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเมื่อใช้กระแสเชื่อม 4 กิโลแอมแปร์จะมีค่า 2,450 นิวตัน และเมื่อกระแสเชื่อม 8 กิโลแอมแปร์มีค่า 8,070 นิวตัน ผลการทดลองยังทำให้ทราบว่า การเพิ่มกระแสเชื่อมให้สูงขึ้นแต่คงที่เวลาเชื่อมเมื่อนำมาทดสอบแรงดึงเฉือนชิ้นงานที่ทดสอบจะฉีกออกจากกันโดยเริ่มจากวัสดุพื้นบริเวณรอบ ๆ พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ชิ้นงานจะขาดออกจากกันเป็นแบบ Pullout failure mode ลักษณะการฉีก และแยกออกจากกันลักษณะดังกล่าวเป็นที่ยอมรับเนื่องจากการฉีกขาดบริเวณวัสดุพื้น สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมพบโครงสร้างเกรนแบบคอลัมน์ที่ขนานไปกับทิศทางแรงกดของหัวอิเล็กโทรด โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมต่ำกว่า 4 กิโลแอมแปร์จะเห็นโครงสร้าง Skeletal และ Lathy delta ferrite เป็นโครงสร้างหลัก สำหรับใช้กระแสเชื่อมที่สูงจะเห็นโครงสร้าง Acicular delta ferrite, Skeletal และ Lathy delta ferrite การเพิ่มค่าความร้อนในการเชื่อมจะทำให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และจะเกิดโครงสร้าง Acicular delta ferrite ผลการประเมินธาตุที่ได้จากวิเคราะห์จากเครื่อง EDS ทำให้ทราบว่า การใช้กระแสเชื่อม 8 กิโลแอมแปร์จะทำให้เกิดการก่อตัวของเฟสเฟอร์ไรต์ โดยปริมาณธาตุโมลิบดีนัม และซิลิกอนถูกตรวจพบในปริมาณที่สูงเช่นกัน ผลการตรวจสอบความแข็งในรอยเชื่อมพบว่า ความแข็งในรอยเชื่อมมีค่าต่ำกว่าบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อน และวัสดุพื้นหากเปรียบเทียบค่าความแข็งกับการใช้กระแสเชื่อมจะเห็นว่า การใช้กระแสเชื่อมสูงจะทำให้ค่าความแข็งในรอยเชื่อมมีค่าลดลงเนื่องจากขนาดของเกรนของรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jagadeesha [52] ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน และลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 316L ความหนา 1.6 มิลลิเมตร การออกแบบทดลองแบบแพคทอเรียลเต็มรูป 3^2 ปัจจัยการเชื่อมที่ปรับเปลี่ยนคือ เวลาเชื่อม 7, 8, 9 ไชเคิล และกระแสเชื่อม 7, 8, 9 กิโลแอมแปร์ ส่วนปัจจัยการเชื่อมที่คงที่ได้แก่ เวลากด 10 ไชเคิล เวลาในการกดค้าง 10 ไชเคิล แรงกด 3.2 กิโลนิวตัน ผลการทดลองสรุปได้ว่า การเพิ่มกระแสเชื่อมระดับ 9 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อมระดับ 9 ไชเคิล จะทำให้ค่าความร้อนในกระบวนการเชื่อมมีค่าสูงขึ้นด้วย ทำให้เกิดขนาดของรอยเชื่อมที่สูงประมาณ 7.55 มิลลิเมตร ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงประมาณ 13.4 กิโลนิวตัน การขาดออกจากกันของชิ้นงานทดสอบเป็นแบบ Tearing type ถึงอย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสเชื่อมระดับ 7 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อมระดับ 7 ไชเคิล จะทำให้เกิดขนาดของรอยเชื่อมลดลงเหลือประมาณ 6.98 มิลลิเมตร ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนลดลง การขาดออกจากกันของชิ้นงานทดสอบเป็นแบบ Shearing type

Moshayedi และSattari-Far [53] ใช้โปรแกรม ANSYS ในการออกแบบ และเปรียบเทียบการทดลองของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ความหนา 1 มิลลิเมตร มีการกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้คงที่ ได้แก่ แรงกด 5.4 กิโลนิวตัน เวลาในการกดค้าง 30 ไชเคิล แล้วเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมระดับ 6 ถึง 10.5 กิโลแอมแปร์ เปลี่ยนแปลงเวลาเชื่อมระดับ 8 ถึง 26 ไชเคิล จากผลการทดลอง และการเปรียบเทียบระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม ANSYS สรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมในการเชื่อม อุณหภูมิบริเวณจุดสัมผัสจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อวัสดุแล้วเกิดการก่อตัวเป็นรอยเชื่อม หลังจากเกิดเป็นรอยเชื่อมแล้วอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว จากการทดลองพบว่าการใช้เวลาเชื่อมน้อยกว่า 26 ไชเคิล จะไม่ทำให้เกิดการแตกกระจายของเนื้อโลหะเหลว (Expulsion) เมื่อกระแสเชื่อมในการเชื่อมระดับ 6.0 กิโลแอมแปร์จะทำให้อัตราการเกิดรอยเชื่อมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เมื่อกระแสเชื่อมในการเชื่อมสูงถึงระดับ 8.5 กิโลแอมแปร์จะเกิดการแตกกระจายของเนื้อโลหะเหลวสำหรับความสัมพันธ์ของกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม ผู้วิจัยได้อธิบายไว้ว่า กระแสเชื่อมช่วยส่งเสริมให้เกิดการโตของรอยเชื่อม เวลาเชื่อมช่วยเพิ่มปริมาณความร้อนช่วงแรกของการเกิดการก่อตัวของรอยเชื่อมโดยแนะนำให้ใช้ กระแสเชื่อม 8.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 8 ไชเคิล เพื่อลดปัญหาการแตกกระจายของเนื้อโลหะเหลวอีกทั้งช่วยประหยัดเวลาในการผลิตรวมถึงเป็นการปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อมให้ดีขึ้น

Kocabekir และคณะ [54] ได้ศึกษาผลกระทบด้านความร้อนของการระบายความร้อนด้วยบรรยากาศ และด้วยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316L ความหนา 1 มิลลิเมตร ปัจจัยการเชื่อมกำหนดให้คงที่ ได้แก่ แรงกด 0.6 บาร์ เวลาในการกดค้าง 30 ไชเคิล กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์เปลี่ยนแปลงเวลาเชื่อมระดับ 10 ถึง 20 ไชเคิล จากผลการทดลองพบว่า ไม่ว่าจะรอยเชื่อมถูกระบายความร้อนด้วยวิธีไหนก็ตามเมื่อเวลาเชื่อมสูงขึ้นจะทำให้ความร้อนในการเชื่อมมีค่าสูงขึ้น และทำให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย การใช้เวลาเชื่อม 20 ไชเคิลส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงสุด การเพิ่มความร้อนในการเชื่อมจะทำให้ขนาดของเกรนบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อน และบริเวณโลหะหลอมละลายมีขนาดโตขึ้น การเกิดช่องว่างในรอยเชื่อมเป็นจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยจะเกิดจากการใช้แรงกดที่น้อยเกินไป หรือ การใช้ความร้อนในการเชื่อมที่สูงเกินไป การระบายความร้อนด้วยไนโตรเจนจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าการระบายความร้อนด้วยวิธีอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Feng และคณะ [55] ได้ทำการศึกษา และทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางคุณภาพ เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด H1000 (Nickel-free) เทียบกับ เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP590 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชุบสังกะสีเกรด GMW2 จากผลการทดลอง ทำให้ทราบว่า H1000 มีความสามารถในการเชื่อมต่อยกกว่าวัสดุอื่น และเกิดการแตกร้าว เกิดโพรงใน รอยเชื่อมซึ่งเป็นจุดบกพร่องในการเชื่อม โดยที่ H1000 ใช้ช่วงกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมแคบกว่า การเชื่อมด้วยวัสดุอื่น 50% เมื่อขนาดของรอยเชื่อมมีค่าเท่ากัน โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเป็น Columnar เกรนประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์ และVermiculate เฟอร์ไรท์ ค่าความแข็งบริเวณรอย เชื่อมมีค่าต่ำกว่าบริเวณวัสดุพื้น 20% ลักษณะการฉีกของรอยเชื่อมจากการทดสอบแรงดึงเฉือน H1000 มีการฉีกแบบ Interfacial fracture ส่วนวัสดุอื่นมีการฉีกแบบ Interfacial fracture และ เปลี่ยนเป็นการฉีกแบบ Button pullout fracture

Alizadeh-Sh และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนเฟสของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด 430 ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ปัจจัยการ เชื่อมกำหนดเป็นค่าคงที่คือ แรงกด 4 บาร์ เวลากด 30 ไซเคิล เวลาในการกดค้าง 20 ไซเคิล เวลา เชื่อม 12 ไซเคิล กระแสเชื่อมเปลี่ยนแปลงระดับ 7.0 ถึง 11.0 กิโลแอมแปร์ จากผลการทดลองทำให้ ทราบว่า บริเวณโลหะหลอมละลายมีโครงสร้างเป็นคอลลิมาร์เฟอร์ไรท์ และพบคาร์ไบด์ตกตะกอน ตามขอบของเกรน และพบมาร์เทนไซต์ในเกรน บริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนสามารถแบ่งชั้น เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นในสุดเรียกว่า HTHAZ โดยจะพบมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างเฟอร์ไรท์สูง เกรนมีขนาด ใหญ่ เนื่องจากพื้นที่นี้ได้รับความร้อนสูงสุด ชั้นกลางเรียกว่า MTHAZ เป็นบริเวณที่มีค่าความแข็ง สูงสุด เนื่องจากตรวจพบเฟอร์ไรท์ และมาร์เทนไซต์ ชั้นนอกสุดเรียกว่า LTHAZ เป็นพื้นที่ที่ตรวจพบ โครเมียมคาร์ไบด์ภายในเกรน ผลการทดสอบแรงดึงทำให้ทราบว่าทุกชิ้นงานทดสอบมีการฉีกของ ชิ้นงานทดสอบเป็นแบบ Double pullout failure โดยการฉีกขาดเกิดบนวัสดุพื้น ค่าความต้านทาน แรงดึงสูงขึ้นเมื่อขนาดของรอยเชื่อมสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มกระแสเชื่อมจะเป็นการเพิ่มขนาดของรอย เชื่อมให้สูงขึ้นตาม

Bina และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค และลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด 430 และเหล็กกล้าไร้ สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานพิกัดกำลัง 30 kVA โดยใช้หัวอิเล็กโทรดชนิดหัวตัดพื้นที่สัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร กระแสเชื่อม เปลี่ยนแปลงระดับ 2.5, 3.75, 5.0 กิโลแอมแปร์ คงที่แรงกด 4 กิโลนิวตัน เวลากด 6 วินาที เวลา เชื่อม 1.2 วินาที และเวลาในการกดค้าง 2.8 วินาที ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมในการ เชื่อมขนาดของรอยเชื่อมจะมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่รอยเชื่อมฝั่งของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมี ขนาดที่ใหญ่กว่าฝั่งของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีค่าความ ต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่า โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจะประกอบด้วยสามเฟส คือ ออสเทนไนท์ เฟอร์ไรท์ มาร์เทนไซต์ การเพิ่มกระแสเชื่อมจะทำให้ขนาดของเกรนทั้งพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ ความ ร้อน และบริเวณโลหะหลอมละลายมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น การทดลองพบว่ามีโพรงเป็นจุดบกพร่องในรอย เชื่อมซึ่งเกิดจากการใช้กระแสเชื่อมที่สูงเกินไป (5kA) ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ กระแสเชื่อมในการเชื่อมสูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนจะมีค่าลดลงเมื่อเกิดจุดบกพร่องใน รอยเชื่อมจากการใช้กระแสเชื่อมที่ 5 กิโลแอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อมจากการทดสอบ แรงดึงพบว่า ลักษณะการขาด Interfacial failure mode เกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 2.5 กิโล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมแปร์ ลักษณะการขาด Pullout failure mode เกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 3.75 ถึง 5.0 กิโลแอมแปร์ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 3.75 กิโลแอมแปร์

Aghajani และPouranvari [56] ทำการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ 420 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยใช้ Ni interlayer ความหนา 0.5 มิลลิเมตร เป็นวัสดุช่วยประสานเพื่อลดการก่อตัวของเฟสมาร์เทนไซต์จากธาตุคาร์บอน และโครเมียม ในบริเวณหลอมละลาย (Fusion zone) โดยคงที่ปัจจัยการเชื่อมคือ แรงกดระดับ 5.0 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อมระดับ 10 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 0.24 วินาที เวลาในการกดค้าง 0.20 วินาที ผลการทดลองสรุปได้ว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณหลอมละลายประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์กับคาร์ไบด์เกรนละเอียดซึ่งช่วยป้องกันการแพร่ของรอยแตกผ่านบริเวณดังกล่าว ลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อมเป็นแบบ Pullout failure mode ทั้งการทดสอบแบบ Tensile shear test และ Cross tension test การเปลี่ยนแปลงความหนาของ Ni interlayer มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของรอยเชื่อม

Subrammanian และคณะ [57] ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกล และการเปลี่ยนแปลงเฟสในรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 301 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด AISI 409M ความหนา 2.0 มิลลิเมตร โดยใช้ปัจจัยการเชื่อม แรงกด 4.0 กิโลนิวตัน เวลาเชื่อม 15 ไชเคิล เวลาในการกดค้าง 20 ไชเคิล กระแสเชื่อม 7 ถึง 14 กิโลแอมแปร์ ผลการทดลองสรุปได้ว่า ขนาดของรอยเชื่อมมีความสัมพันธ์กับกระแสเชื่อม กระแสเชื่อมที่สูงทำให้ระยะการกดลึกสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ และเฟสเฟอร์ไรท์ ค่าความแข็งของในบริเวณที่หลอมละลายมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับค่าความแข็งบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และพื้นที่บริเวณวัสดุพื้น

Mousavi Anijdan และคณะ [58] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีทากูชิ และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP600 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมเป็น 3 ระดับ ได้แก่ คือ แรงกด 3, 4, 5 กิโลกรัมฟอร์ซ เวลาในการกดค้าง 30, 35, 40 ไชเคิล เวลาเชื่อม 14, 15, 16 ไชเคิล กระแสเชื่อม 8, 10, 12 กิโลแอมแปร์ ผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม คือ แรงกด 5 กิโลกรัมฟอร์ซ เวลาในการกดค้าง 30, 35, 40 ไชเคิล เวลาเชื่อม 16 ไชเคิล กระแสเชื่อม 8 กิโลแอมแปร์ โดยโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมตรวจพบเฟสมาร์เทนไซต์ การฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเฉือนมีลักษณะ Pullout failure mode

Vignes และคณะ [18] ได้ศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316L และเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด 2205 ความหนา 2.0 มิลลิเมตรโดยใช้วิธีทากูชิ โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมเป็น 3 ระดับ ได้แก่ หัวอิเล็กโทรดพื้นที่สัมผัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 7, 8 มิลลิเมตร เวลาเชื่อม 7, 8, 9 ไชเคิล กระแสเชื่อม 7, 8, 9 กิโลแอมแปร์ ผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม คือ เวลาเชื่อม 9 ไชเคิล กระแสเชื่อม 9 กิโลแอมแปร์ และหัวอิเล็กโทรดพื้นที่สัมผัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือน 17.6 กิโลนิวตัน การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมพบว่า กระแสเชื่อมเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม เวลาเชื่อมและขนาดของพื้นที่สัมผัสของ

หัวอิเล็กโทรดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาตามลำดับ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมพบว่า บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะพบเฟสหลักเป็นเฟสเฟอร์ไรท์ (67%) ส่วนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกพบเฟสออสเทนไนท์เกรนหยาบเป็นหลัก โดยมีเฟสเฟอร์ไรท์ผสมอยู่บางส่วน (7%) บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทั้งสองฝั่งมีขนาดเกรนโดยเฉลี่ย 100 ไมโครเมตร ปริมาณของเฟอร์ไรท์โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมละลายตรวจพบเฟสผสมระหว่างเฟสออสเทนไนท์ และเดลต้าเฟอร์ไรท์

Alenius และคณะ [59] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก และเหล็กชุบสังกะสีความหนาแตกต่างกันตั้งแต่ 0.70 ถึง 1.95 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ การทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมพบว่า 72% ถึง 78% ชิ้นงานทดสอบ ขาดออกจากกันแบบ Plug failure mode และความแข็งแรงของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับความแข็งแรง และความหนาของวัสดุพื้น

Essoussi และคณะ [60] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI304 (ASS) และเหล็กเฟอร์ริติกเกรด AISI 1000 (FS) จากการทดลองพบว่า รอยเชื่อมที่ให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดไปหาลำดับคือ รอยเชื่อมของวัสดุแผ่น ASS และ ASS รอยเชื่อมของวัสดุแผ่น ASS และ FS รอยเชื่อมวัสดุแผ่น FS และ FS การทดลองยังพบว่า การทดสอบลักษณะความเสียหายของรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับขนาดของรอยเชื่อม และรูปร่างของรอยเชื่อม

Fu และYang [61] ได้ศึกษากระบวนการที่โลหะเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 โดยผ่านการชุบแข็งในห้องทดลองที่มีแก๊สอาร์กอนปกคลุมจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจพบประกอบด้วย น้ำโลหะเหลว เดลต้าเฟอร์ไรท์ และออสเทนไนท์ การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งเมื่อโลหะหลอมเป็นน้ำโลหะเหลว Lathy delta ferrite จะก่อตัวเป็นกลุ่มก้อน ล้อมรอบด้วยน้ำโลหะเหลว จนทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น Lathy delta ferrite กับ ออสเทนไนท์ ผ่านปฏิกิริยาเพอริติก (Peritectic reaction) การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งสิ้นสุดที่การกลายเป็นออสเทนไนท์เต็มรูป

Leone และKerr [62] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนสถานะจากเฟสเฟอร์ไรท์เป็นเฟสออสเทนไนท์ในเหล็กกล้าไร้สนิม ผลการทดลองทำให้ทราบลำดับการเปลี่ยนแปลง คือ การเป็นโลหะเหลว การเป็นโลหะเหลรรวมกับเดลต้าเฟอร์ไรท์ การเป็นโลหะเหลรรวมกับเดลต้าเฟอร์ไรท์ร่วมกับออสเทนไนท์ เดลต้าเฟอร์ไรท์ร่วมกับออสเทนไนท์ สุดท้ายจะกลายเป็นเดลต้าเฟอร์ไรท์ และออสเทนไนท์ การเปลี่ยนสถานะดังกล่าวเกิดจากกระบวนการแพร่ของธาตุนิเกิล และการลดลงของธาตุโครเมียม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากเฟสออสเทนไนท์เป็นเฟสเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมจะพบ Widmanstätten เกิดขึ้น

จากการศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่า การเลือกหัวอิเล็กโทรด และ ปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมนักวิจัยจะใช้เทคนิคในการเลือก 2 เทคนิค คือ

1. การเลือกหัวอิเล็กโทรด และปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมจากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น โปรแกรม ANSYS เพื่อทำการศึกษาหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกระแสเชื่อม รวมทั้งการแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เช่นงานวิจัยของ Li และคณะ [25] หรืองานวิจัยของ Moshayed และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sattari-Far [53] เป็นต้น หลังจากได้ค่าหรือปัจจัยการเชื่อมที่ดีจากการประมวลผลจากคอมพิวเตอร์แล้วจะทำการทดลองเชื่อมจริงเพื่อการยืนยันผลการทดลองอีกครั้ง

2. การเลือกหัวอิเล็กโทรด และปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมจากการทดลอง โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ประเภทคือ การทดลองแบบสมัยดั้งเดิมโดยการทดลองแบบลองผิดลองถูก เช่น งานวิจัยของ Zhang และคณะ [63] ซึ่งการทดลองแบบนี้จะมีจำนวนการทดลองที่มาก และเวลาที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างสูงรวมทั้งความน่าเชื่อถือของการทดลองต่ำ ส่วนการทดลองอีกหนึ่งประเภทคือ การออกแบบการทดลอง เป็นการทดลองที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันรวมทั้งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ด้วย เนื่องจากเป็นเทคนิคการออกแบบการทดลองโดยอาศัยตัวแบบทางคณิตศาสตร์จึงทำให้จำนวนการทดลองมีน้อย ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองรวมทั้งมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการทดลองแบบลองผิดลองถูก การออกแบบการทดลองเพื่อเลือกหัวอิเล็กโทรด และปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมมีหลากหลายวิธี เช่น การออกแบบแบบส่วนประสมกลาง การใช้วิธีทากูชิ หรือแม้แต่การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เช่นเดียวกับ Rawal และคณะ [49] เลือกใช้ในงานวิจัย เป็นต้น

สำหรับการศึกษาค่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยมากเป็นการศึกษาโครงสร้างมหภาค เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของขนาดรอยเชื่อมที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการเชื่อม ได้แก่ กระแสเชื่อม เวลาเชื่อม และแรงกดของหัวอิเล็กโทรด โดยวัดผลจากค่าความต้านทานแรงดึงเหนือสูงสุดของรอยเชื่อม เช่น งานวิจัยของ Jagadeesha [52] และวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก็เช่นกันที่ได้ทำการศึกษาค่าโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเชื่อมกับคุณภาพของรอยเชื่อม ส่วนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยเชื่อมมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนเฟส การกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อม เช่น งานวิจัยของ Alizadeh-Sh และคณะ [17] งานวิจัยของ Kianersi และคณะ [30] จะใช้หลักของการพยากรณ์การเปลี่ยนเฟสของรอยเชื่อมโดยการใช้แผนภาพ WRC-1992 และการพยากรณ์การกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมจาก Pseudo diagram ส่วนงานวิจัยของ Bina และคณะ [8] จะใช้หลักของการพยากรณ์การเปลี่ยนเฟสของรอยเชื่อมโดยการใช้แผนภาพ Shaeffler phase diagram เช่นเดียวกับการศึกษาค่าการเปลี่ยนเฟสในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แต่ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนของวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือ ก่อนที่จะมีการพยากรณ์การเปลี่ยนเฟสโดยการใช้แผนภาพ Shaeffler phase diagram และการพยากรณ์การกลายเป็นของแข็งโดยใช้ Pseudo diagram จะทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุพื้น และในพื้นที่ของรอยเชื่อมโดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ จึงทำให้ผลการทำนายการเชื่อมมีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมองค์ประกอบในการเชื่อมชิ้นงาน และการทดสอบชิ้นงาน

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดเครื่องหมายการค้า PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz Rate capacity 50 kVA ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำด้วยอัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิน้ำขาเข้าที่ 23 องศาเซลเซียส กัดชิ้นงานด้วยระบบลม เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดจะมีชุดควบคุมการเชื่อม PANASONIC รุ่น YF-021Z5 ชุดควบคุมนี้เป็นตัวกำหนดปัจจัยการเชื่อมต่าง ๆ ในรอบเวลาของการเชื่อม เช่น เวลากัดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (Squeeze time) กระแสเชื่อม (Weld current) เวลาเชื่อม (Welding time) และเวลาในการกดค้ำ (Hold time) เป็นต้น
2. หัวอิเล็กโทรดในการทดลองใช้หัวอิเล็กโทรดทำจากวัสดุทองแดงผสมโครเมียม และเซอร์โคเนียม (CuCrZr) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 13 มิลลิเมตร ความยาว 20 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีของหัวอิเล็กโทรดแสดงตามตารางที่ 3.1 รูปทรงของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมี 3 แบบ คือ แบบแบน แบบโค้งรัศมี 16 มิลลิเมตร และแบบโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของหัวอิเล็กโทรด (wt%) [64]

Composition	Wt%
Fe	<0.08 %
Si	<0.1 %
Cr	0.5% - 1.4%
Zr	0.02% - 0.2%
Cu	Balance

3. ชิ้นงานทดสอบ วัสดุพื้นใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 ขนาดความยาว 125 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 45 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร ส่วนประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และ SUS425 แสดงตามตารางที่ 3.2, 3.3, 3.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม (wt%) SUS316L และSUS425 [64]

Composition	Material	
	SUS316L	SUS425
C	0.030 Max	0.02 Max
Si	1.00 Max	0.8-1.4
Mn	2.00 Max	0.2-1.2
P	0.040 Max	0.040 Max
S	0.030 Max	0.010 Max
Cr	16.00 -18.00	13.00 - 16.00
Mo	2.00 - 3.00	0.40 -0.60
Ni	10.00 – 14.00	-

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และSUS425 [64]

Mechanical properties	Material	
	SUS316L	SUS425
Hardness test (HV)	218 Max	200 Max
Yield strength (N/mm ²)	205 Min	205 Min
Tensile strength (N/mm ²)	520 Min	410 Min
Elongation (%)	35 Min	25 Min

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และSUS425 [64]

Physical Properties	Material	
	SUS316L	SUS425
Specific heat (J/kg °C)	500	400
Density (kg/m ³)	8000	7720
Electrical resistivity (μΩ.m)	75	61
Thermal expansion (°C ⁻¹)	1.7 × 10 ⁻⁵	1.6 × 10 ⁻⁵
Thermal conductivity (W/m °C)	15	24.2
Magnetism	Non Magnetic	Ferro Magnetic

4. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เครื่องหมายการค้า METACUT รุ่น M-250 เพื่อตัดชิ้นงานก่อนทำการขัดด้วยกระดาษทราย

5. เครื่องขัดกระดาษทราย/ขัดเงา เครื่องหมายการค้า METKON รุ่น FORCIPOT 1S เพื่อขัดชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทราย และใช้ขัดชิ้นงานแบบละเอียดด้วยผงอะลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง เครื่องหมายการค้า KEYENCE DIGITAL MICROSCOPE รุ่น VHX-600 ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยกล้อง 3CCD ความละเอียด 2.11 ล้านพิกเซลอัตราสแกนเฟรม 54 เฟรมต่อวินาที

7. เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เครื่องหมายการค้า FUTURE TECH รุ่น FV-700 แสดงผลการอ่านค่าเป็นแบบตัวเลข

8. เครื่องทดสอบแรงดึง แรงกด (Universal testing machine) เครื่องหมายการค้า SHIMADZU รุ่น AG-100 ค่าพิกัดแรงดึงสูงสุด 100 kN.

9. เครื่องกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออน (Ion milling) เครื่องหมายการค้า HITACHI รุ่น IM4000

10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เครื่องหมายการค้า JEOL รุ่น JSM-6510LV และเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) เครื่องหมายการค้า OXFORD รุ่น X-Max IE350

3.1.2 การเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

การเชื่อมชิ้นงานจะทำการปรับตั้งปัจจัยการเชื่อม เช่น การกำหนดแรงกด การกำหนดปัจจัยการเชื่อม รวมทั้งการทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อลดความผิดพลาดจากการเชื่อมจากนั้นทำการเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่มตามการออกแบบการทดลองเพื่อลดความเอนเอียงของการทดลอง หลังจากนั้นชิ้นงานจะนำมาทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบพฤติกรรมกลการหลอมละลายของโลหะ ตามการออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้

3.1.3 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะตรวจสอบลักษณะทางกายภาพโดยการถ่ายภาพนิ่งเพื่อการตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมโดยลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ดีดังตารางที่ 3.5

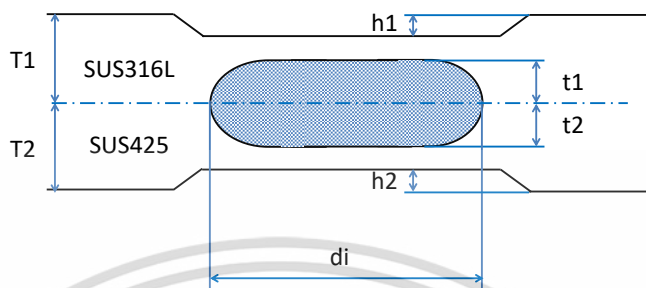
ตารางที่ 3.5 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ดี [23], [65]

ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม	ลักษณะที่ดี
1. สีของรอยเชื่อม	สีเหลืองออกน้ำตาล
	มีความเข้มของสีความสม่ำเสมอ
	มีเส้นรอบวงที่ชัดเจนไม่ขาดแหง
2. ผิวของรอยเชื่อม	มีความเรียบ ไม่เป็นผิวขรุขระ
	ไม่มีเศษโลหะจากการแตกของน้ำโลหะเหลว
	ไม่มีเศษจากหัวอิเล็กโทรด
	ไม่มีรู (โพรง) หรือรอยแตก

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจะนำชิ้นงานไปตัดด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ และอัดผงเรซินด้วยเครื่องไมโครเพรสเพื่อให้ง่ายต่อการขัด ทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ แล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาด ชิ้นงานที่ผ่านการล้างจะนำไปทำการกัดกรดไนโตร 25% (Nytry 25%) โดยใช้วิธีการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกับผิวชิ้นงานด้วยแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ของเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสดึง 12 โวลต์จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยการศึกษาจะทำการศึกษา 5 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 3.1 แล้วทำการบันทึกผลการทดสอบ สำหรับขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ง



รูปที่ 3.1 ลักษณะองค์ประกอบของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

3.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเป็นการศึกษาลักษณะเกรนบริเวณวัสดุพื้น (Base metal) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) และบริเวณโลหะหลอมละลาย (Fusion zone) ว่ามีความแตกต่างกันในลักษณะใดบ้าง การวิเคราะห์ผลจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังที่สูง ชิ้นงานถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 1,000 2,000 และ 4,000 ตามลำดับ จากนั้นทำการขัดด้วยผ้าโพลีสแตออร์ และผงอะลูมินาขนาด 1.0, 0.3, 0.05 ไมโครเมตรตามลำดับ ล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดแล้วเป่าให้แห้ง ก่อนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานต้องผ่านการกัดผิวชิ้นโลหะด้วยวิธีการกัดผิวด้วยด้วยสารเคมีหรือวิธีการกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออนมิลลิ่ง สำหรับขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก จ ส่วนการกำหนดค่าปัจจัยของการกัดผิวด้วยด้วยไอออนมิลลิ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ฉ ส่วนการศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะเป็นการพิจารณารอยเชื่อมจากการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยการเชื่อม กระแสเชื่อม (Weld current) และเวลาเชื่อม (Welding time) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อนในรอยเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมจะผ่านการขัดชิ้นงานเช่นเดียวกับการตรวจโครงสร้างจุลภาค และผ่านการกัดผิวชิ้นโลหะด้วยไอออนมิลลิ่ง แล้วนำตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำการวิเคราะห์ธาตุ (EDS)

3.1.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะมีการทดสอบความแข็ง และการทดสอบความสามารถต้านทานแรงดึงเฉือน การทดสอบความแข็งจะทำการทดสอบ 3 บริเวณคือ บริเวณวัสดุพื้น (Base metal) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) และบริเวณโลหะหลอมละลาย (Fusion zone) ด้วยระยะห่างของการกดที่เท่า ๆ กันคือ 0.5 มิลลิเมตร ตลอดแนวรอยเชื่อมทั้งฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก การทดสอบความสามารถต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง แรงกด (Universal testing machine) ตามหลักการออกแบวิธีการทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Method of Tension Shear Test for Spot Welded Joint)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JIS Z 3136 และเปรียบเทียบค่าต้านทานแรงดึงมาตรฐานจากวิธีการตรวจสอบรอยเชื่อมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Method of Inspection for Spot Weld) JIS Z 3140

3.2 การทดลองเพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กโทรด

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของรอยเชื่อม จากการใช้หัวอิเล็กโทรดรูปทรงที่แตกต่างกัน 3 ชนิดได้แก่ คือ แบบแบน แบบโค้งรัศมี 16 มิลลิเมตร และแบบโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตร สำหรับระดับปัจจัยในการเชื่อมกำหนดให้มีค่าคงที่ คือ แรงกด (F) เท่ากับ 3.0 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อม (I) เท่ากับ 8.8 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม (Tw) เท่ากับ 30 ไซเคิล

ตารางที่ 3.6 ปัจจัย และระดับของปัจจัยตามการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

ปัจจัย	ประเภทของหัวอิเล็กโทรด		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
1. หัวอิเล็กโทรดด้านบน (UT)	Flat	R16	R30
2. หัวอิเล็กโทรดด้านล่าง (LT)	Flat	R16	R30

ทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial experiment design) ปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเท่ากับ 9 การทดลอง และทำซ้ำ 3 ครั้งรวมการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 27 การทดลอง ปัจจัย และระดับของปัจจัยแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 ลำดับขั้นการทดลองตามการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลองตามการสุ่ม	หัวอิเล็กโทรดด้านบน (UT)	หัวอิเล็กโทรดด้านล่าง (LT)
1	22	UT R16	LT Flat
2	14	UT R16	LT R16
3	19	UT Flat	LT Flat
4	10	UT Flat	LT Flat
5	3	UT Flat	LT R30
6	7	UT R30	LT Flat
7	17	UT R30	LT R16
8	8	UT R30	LT R16
9	16	UT R30	LT Flat
10	11	UT Flat	LT R16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) ลำดับขั้นการทดลองตามการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลองตาม การสุ่ม	หัวอิเล็กทรอนิกส์ด้านบน (UT)	หัวอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่าง (LT)
11	26	UT R30	LT R16
12	1	UT Flat	LT Flat
13	23	UT R16	LT R16
14	25	UT R30	LT Flat
15	27	UT R30	LT R30
16	5	UT R16	LT R16
17	15	UT R16	LT R30
18	9	UT R30	LT R30
19	20	UT Flat	LT R16
20	21	UT Flat	LT R30
21	24	UT R16	LT R30
22	2	UT Flat	LT R16
23	12	UT Flat	LT R30
24	13	UT R16	LT Flat
25	4	UT R16	LT Flat
26	18	UT R30	LT R30
27	6	UT R16	LT R30

การออกแบบการทดลองจะใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 สุ่มลำดับขั้นการทดลอง เพื่อขจัดความลำเอียง (Bias) ที่อาจจะเกิดขึ้น หลังจากนั้นทดลองตามลำดับขั้นที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ เมื่อได้ผลทดลองในแต่ละการทดลอง นำผลทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เชิงสถิติโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ผลของการวิเคราะห์ข้อมูลจะทำให้สามารถเลือกใช้รูปทรงของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ลำดับขั้นการทดลองแสดงในตารางที่ 3.7

3.3 การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

การออกแบบทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบผู้วิจัย เลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) เนื่องจากสามารถทดลองบนค่าในระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใด ๆ นอกจากนี้ยังเป็นการออกแบบ 3 ระดับ สำหรับสร้างพื้นผิวตอบ และถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อก ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย ระดับของปัจจัย และสัญลักษณ์แสดงดังตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแสดงในตารางที่ 3.9 ผลตอบของการออกแบบการทดลองคือ คุณลักษณะของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425 ได้แก่ ระยะเวลาซึ่มลึก1 (t1) ระยะเวลาซึ่มลึก2 (t2) ระยะเวลาการกัดลึก1 (h1) ระยะเวลาการกัดลึก2 (h2) และขนาดของรอยเชื่อม (di)

ตารางที่ 3.8 ปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์ ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ปัจจัย/หน่วย		ระดับ			สัญลักษณ์
		ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)	
1. แรงกด (กิโลนิวตัน)	F	2	3	4	A
2. เวลาเชื่อม (ไฮเคิล)	Tw	25	38	50	B
3. กระแสเชื่อม (กิโลแอมแปร์)	I	7.0	8.5	10.0	C
4. เวลากัดค้าง (ไฮเคิล)	Th	0	38	50	D
5. รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน	Up ET	0	16	30	E
6. รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง	Low ET	0	16	30	F

ตารางที่ 3.9 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลองตามการสุ่ม	A (กิโลนิวตัน)	B (ไฮเคิล)	C (กิโลแอมแปร์)	D (ไฮเคิล)	E	F
1	6	2	38	10.0	25	16	30
2	24	4	25	8.5	0	16	16
3	31	2	38	7.0	25	16	30
4	14	2	38	10.0	25	16	0
5	3	2	38	7.0	25	16	0
6	28	3	25	10.0	25	0	16
7	17	3	50	10.0	25	30	16
8	26	4	50	8.5	50	16	16
9	33	4	38	8.5	0	30	16
10	34	2	50	8.5	0	16	16
11	35	3	38	10.0	0	16	30
12	27	3	38	8.5	25	16	16
13	23	3	38	7.0	0	16	30
14	4	3	50	10.0	25	0	16
15	20	3	25	10.0	25	30	16
16	21	2	38	8.5	50	30	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 (ต่อ) การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลองตามการสุ่ม	A (กิโลนิวตัน)	B (ไซเคิล)	C (กิโลแอมแปร์)	D (ไซเคิล)	E	F
17	5	3	38	10.0	50	16	0
18	2	3	50	8.5	25	0	0
19	8	4	38	8.5	50	30	16
20	7	3	25	7.0	25	30	16
21	25	3	38	10.0	50	16	30
22	9	3	50	7.0	25	0	16
23	16	2	25	8.5	0	16	16
24	29	3	25	8.5	25	0	30
25	19	3	50	8.5	25	30	0
26	22	3	25	8.5	25	30	0
27	13	3	38	10.0	0	16	0
28	18	3	38	7.0	0	16	0
29	10	3	38	7.0	50	16	0
30	1	3	38	8.5	25	16	16
31	12	3	50	7.0	25	30	16
32	32	4	50	8.5	0	16	16
33	15	3	25	8.5	25	30	30
34	30	2	38	8.5	50	0	16
35	11	2	38	8.5	0	0	16
36	6	3	25	7.0	25	0	16
37	24	3	38	7.0	50	16	30
38	31	3	38	8.5	25	16	16
39	14	4	38	7.0	25	16	0
40	3	3	38	8.5	25	16	16
41	28	3	25	8.5	25	0	0
42	17	4	38	10.0	25	16	0
43	26	4	38	8.5	50	0	16
44	33	2	50	8.5	50	16	16
45	34	3	38	8.5	25	16	16
46	35	2	25	8.5	50	16	16
47	27	3	50	8.5	25	30	30
48	23	4	38	7.0	25	16	30
49	4	4	25	8.5	50	16	16
50	20	4	38	8.5	0	0	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 (ต่อ) การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลองตามการสุ่ม	A (กิโลนิวตัน)	B (ไซเคิล)	C (กิโลแอมแปร์)	D (ไซเคิล)	E	F
51	21	3	38	8.5	25	16	16
52	5	4	38	10.0	25	16	30
53	2	3	50	8.5	25	0	30
54	8	2	38	8.5	0	30	16

3.4 การทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อยืนยันผลด้านคุณภาพ

เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยจากการปรับค่าให้เหมาะกับการใช้งานจริงแล้วนำไปเชื่อมทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนแปลงปัจจัยนำเข้าให้เป็นไปตามค่าที่เหมาะสม จากนั้นเชื่อมชิ้นงานทดลองเป็นจำนวน 3 ชิ้นทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม ได้แก่ ระยะเวลาเชื่อมตีก1 (t1) ระยะเวลาเชื่อมตีก2 (t2) ระยะเวลาการกดตีก1 (h1) ระยะเวลาการกดตีก2 (h2) และขนาดของรอยเชื่อม (di) รวมทั้งนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยไปทำการเชื่อมบนเครื่องเชื่อมที่เป็นเครื่องหมายการค้า และรุ่นการผลิตเดียวกัน ปัจจัยการเชื่อมที่ดีที่สุดยังใช้ทดลองเชื่อมกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS439 MTL ความหนา 1.5 มิลลิเมตร และเหล็กชุบสังกะสีเกรด SP791Q ความหนา 2.3 มิลลิเมตร

3.5 การศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะและคุณสมบัติทางกล

เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะโดยจะศึกษา ลักษณะทางกายภาพ (Appearance) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่แตกต่างกัน การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมสามารถอธิบายเป็นพื้นฐานของการทดสอบแบบไม่ทำลายได้อย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะทางโลหะวิทยาเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจะทำการตัด ชัด การกัดผิวโลหะด้วยสารเคมี โดยจะพิจารณาคุณลักษณะทางคุณภาพของรอยเชื่อมทั้ง 5 อย่างตามที่กล่าวไปข้างต้นโดยจะใช้กล้องจุลทรรศน์ที่ก้ำกัวยาวต่ำ 50 เท่า แต่ไม่เกิน 100 เท่า ส่วนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจะใช้วิธีการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมี และการใช้ไอออนมิลลิ่ง (Ion milling) ภาพที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีก้ำกัวยาวสูงสุด 200 เท่า ส่วนภาพที่มีก้ำกัวยาวมากกว่าจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อวัสดุเชื่อมจะเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS) โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจะพิจารณาความแตกต่างของลักษณะเกรนบริเวณวัสดุพื้น (Base metal) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) และบริเวณโลหะหลอมละลาย (Fusion zone) รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟส คุณสมบัติทางกลที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยการเชื่อมจะถูกพิจารณาค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทดลองในชื่อโครงการวิจัยนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นชอบที่จะใช้เอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดึงเฉือน และค่าความแข็งในบริเวณรอยเชื่อม ปัจจัยการเชื่อมที่นำมาศึกษาต่อเนื่องเป็นปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3 โดยคงที่ปัจจัยเวลาแรงกดระดับ 3.3 กิโลนิวตัน เวลากดค้างระดับ 50 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร แต่จะปรับเปลี่ยนกระแสเชื่อมตั้งแต่ระดับ 7.0, 8.5, 10.0 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อมตั้งแต่ระดับ 25, 38, 50 ไซเคิล ตามลำดับการทดลอง ระดับปัจจัยในการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ลำดับการทดลอง และระดับปัจจัยในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรม การหลอมละลายของโลหะ และคุณสมบัติทางกล

ลำดับการทดลอง	กระแสเชื่อม (กิโลแอมแปร์)	เวลาเชื่อม (ไซเคิล)
1	7.0	25
2	7.0	38
3	7.0	50
4	8.5	25
5	8.5	38
6	8.5	50
7	10.0	25
8	10.0	38
9	10.0	50

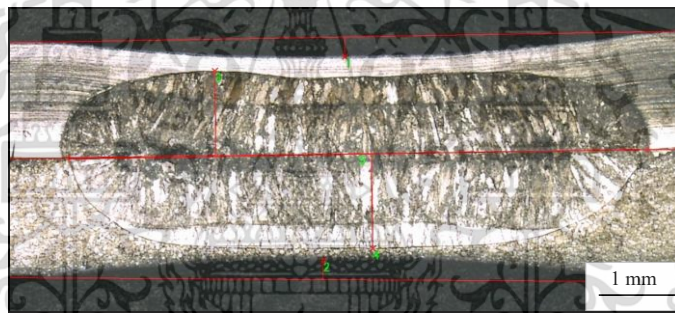
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองเพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กโทรด

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของรอยเชื่อมจากการใช้หัวอิเล็กโทรดรูปทรงที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แบบแบน แบบโค้งรัศมี 16 มิลลิเมตร และแบบโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตร จากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบตามตารางที่ 3.7 โดยการพิจารณาผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อม 5 องค์ประกอบ คือ ระยะการซึมลึก (Penetration: t1, t2) ระยะการกดลึก (Indentation depth: h1, h2) ขนาดของรอยเชื่อม (Nugget diameter: di) รูปภาพแสดงตัวอย่างการวัดค่าตามการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.1 และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคจากการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึมลึก1 (t1) มม.	ระยะการซึมลึก2 (t2) มม.	ระยะการกดลึก1 (h1) มม.	ระยะการกดลึก2 (h2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.
1	0.769	1.264	0.428	0.000	8.242
2	0.871	0.874	0.510	0.499	8.192
3	1.067	0.948	0.000	0.000	8.474
4	1.065	0.946	0.000	0.000	8.403
5	1.068	0.962	0.000	0.291	8.131
6	1.171	1.216	0.328	0.000	8.618
7	0.907	1.043	0.285	0.538	8.365
8	0.902	1.045	0.272	0.476	8.269
9	1.182	1.204	0.356	0.000	8.666
10	1.128	0.742	0.000	0.531	7.483
11	0.909	1.041	0.277	0.579	8.327

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

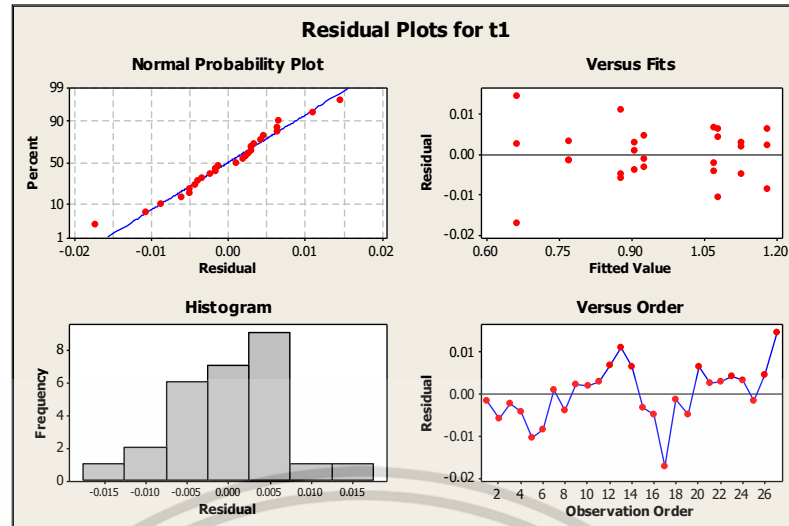
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูป

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึ่มลึก1 (t1) มม.	ระยะการซึ่มลึก2 (t2) มม.	ระยะการกดลึก1 (h1) มม.	ระยะการกดลึก2 (h2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.
12	1.076	0.962	0.000	0.000	8.493
13	0.888	0.872	0.435	0.504	8.142
14	1.186	1.212	0.348	0.000	8.618
15	0.923	1.095	0.330	0.381	8.196
16	0.872	0.887	0.497	0.509	8.169
17	0.646	1.076	0.484	0.238	6.831
18	0.925	1.103	0.344	0.340	8.198
19	1.121	0.754	0.000	0.397	7.476
20	1.085	0.977	0.000	0.332	8.107
21	0.666	1.081	0.595	0.405	6.859
22	1.129	0.762	0.000	0.464	7.481
23	1.083	0.951	0.000	0.380	8.122
24	0.774	1.261	0.456	0.000	8.243
25	0.769	1.262	0.478	0.000	8.241
26	0.931	1.087	0.330	0.350	8.201
27	0.678	1.092	0.523	0.288	6.853

เมื่อได้ค่าระยะการซึ่มลึก (Penetration: t1, t2) ระยะการกดลึก (Indentation depth: h1, h2) ขนาดของรอยเชื่อม (Nugget diameter: di) ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวน ทำการเปรียบเทียบค่า p - value กับค่าของ Alpha (α) โดยค่า p - value ของปัจจัยนั้น ๆ จะต้องมิต่ำน้อยกว่า 0.05 จึงจะได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญ

4.1.1 การพิจารณาระยะการซึ่มลึก (Penetration: t1, t2)

พิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ตามรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าการตรวจสอบข้อสมมติในการใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนผ่านค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนคงที่และเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือได้ จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ทำการเปรียบเทียบค่า p - value กับค่าของ Alpha (α) โดยค่า p - value ของปัจจัยนั้น ๆ จะต้องมิต่ำน้อยกว่า 0.05 จึงจะได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญ ผลจากการเปรียบเทียบรูปทรงหัวอิเล็คโตรดบน - ล่าง และอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างรูปทรงหัวอิเล็คโตรดบน - ล่าง มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อระยะการซึ่มลึก1 (t1) และระยะการซึ่มลึก2 (t2)

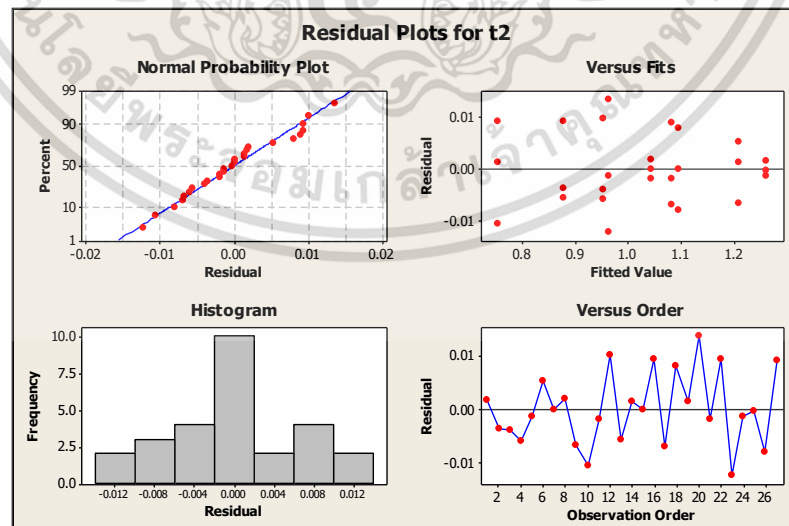


รูปที่ 4.2 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะเวลาการชิมลิค1 (t1)

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะเวลาการชิมลิค1 (t1)

Analysis of Variance for t1						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Upper tip	2	0.495805	0.495805	0.247902	775.16	<0.001
Lower tip	2	0.064534	0.064534	0.032267	491.38	<0.001
Upper tip*Lower tip	4	0.14897	0.14897	0.037242	567.14	<0.001
Error	18	0.001182	0.001182	0.000066		
Total	26	0.710491				

S = 0.00810350 R-Sq = 99.83% R-Sq(adj) = 99.76%



รูปที่ 4.3 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะเวลาการชิมลิค2 (t2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

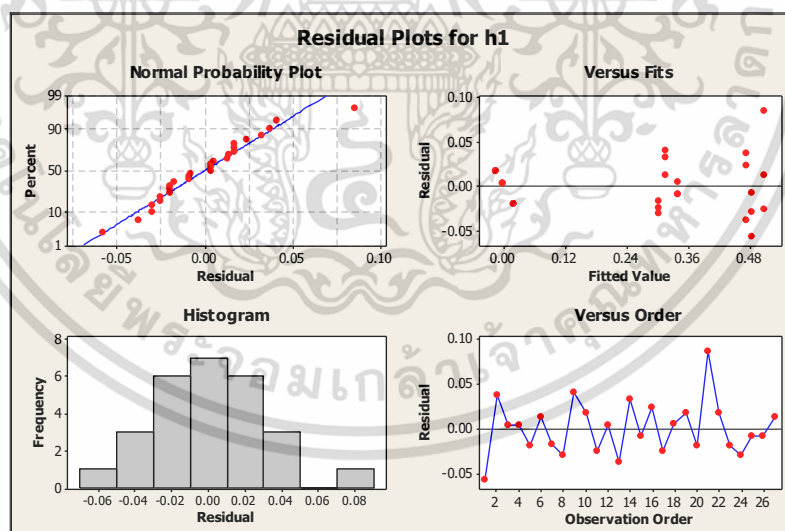
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการชิมลึก2 (t2)

Analysis of Variance for t2						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Upper tip	2	0.262375	0.262375	0.131187	2005.7	<0.001
Lower tip	2	0.288165	0.288165	0.144082	2202.84	<0.001
Upper tip*Lower tip	4	0.062564	0.062564	0.015641	239.13	<0.001
Error	18	0.001177	0.001177	0.000065		
Total	26	0.61428				

S = 0.00808748 R-Sq = 99.81% R-Sq(adj) = 99.72%

4.1.2 การพิจารณาระยะกดลึก (Indentation depth: h1, h2)

พิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ตามรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พบว่าการตรวจสอบข้อสมมติในการใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนผ่านค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนคงที่ และเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือได้ จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ทำการเปรียบเทียบค่า p-value กับค่าของ Alpha (α) ผลจากการเปรียบเทียบรูปทรงหัวอิลีคโตรดบน - ล่าง และอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างรูปทรงหัวอิลีคโตรดบน - ล่าง มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อระยะการกดลึก1 (h1) และรูปทรงหัวอิลีคโตรดล่างมีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อระยะการกดลึก2 (h2)



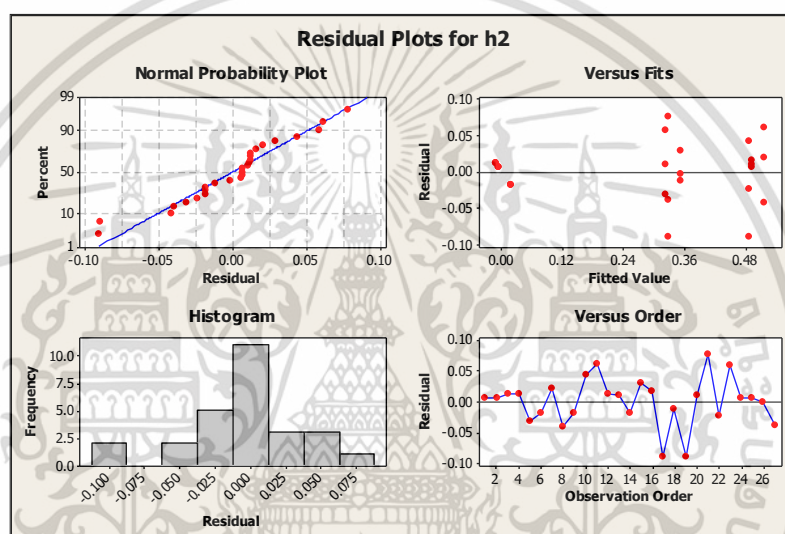
รูปที่ 4.4 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะการกดลึก1 (h1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการกดลึก1 (h1)

Analysis of Variance for h1						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Upper tip	2	1.11145	1.11145	0.55572	874.13	<0.001
Lower tip	2	0.00621	0.00621	0.00311	4.89	0.020
Upper tip*Lower tip	4	0.0114	0.0114	0.00285	4.48	0.011
Error	18	0.01144	0.01144	0.00064		
Total	26	1.1405				

S = 0.0252139 R-Sq = 99.00% R-Sq(adj) = 98.55%



รูปที่ 4.5 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาระยะการกดลึก2 (h2)

ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการกดลึก2 (h2)

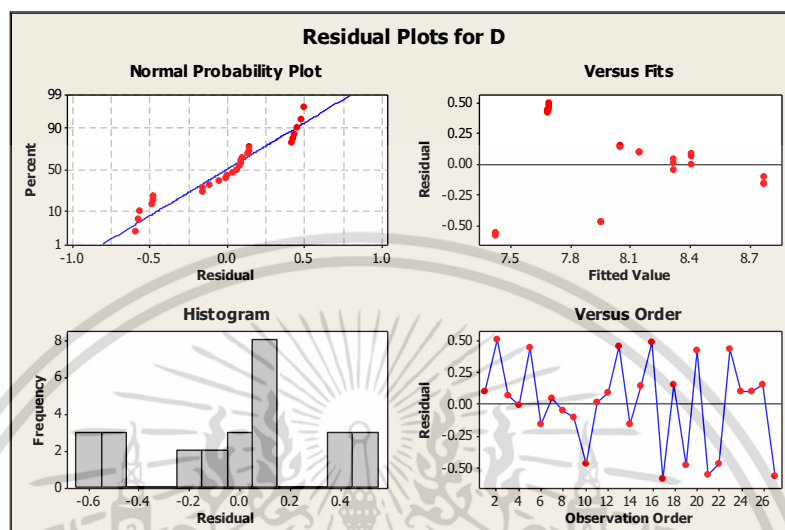
Analysis of Variance for h2						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Upper tip	2	0.00457	0.00457	0.00229	1.21	0.321
Lower tip	2	1.16589	1.16589	0.58295	308.79	<0.001
Upper tip*Lower tip	4	0.00551	0.00551	0.00138	0.73	0.583
Error	18	0.03398	0.03398	0.00189		
Total	26	1.20996				

S = 0.0434494 R-Sq = 97.19% R-Sq(adj) = 95.94%

4.1.3 การพิจารณาขนาดของรอยเชื่อม (Nugget diameter: di)

พิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ตามรูปที่ 4.6 พบว่าการตรวจสอบข้อสมมติในการใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนผ่านค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนคงที่และเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ จากตารางที่ 4.6 ทำการเปรียบเทียบค่า p-value กับค่าของ Alpha (α) ผลจากการเปรียบเทียบรูปทรงหัวอิลีคโตรดบน - ล่าง และอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างรูปทรงหัวอิลีคโตรดบน - ล่าง มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อขนาดของรอยเชื่อม (di)



รูปที่ 4.6 รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของการพิจารณาขนาดของรอยเชื่อม (di)

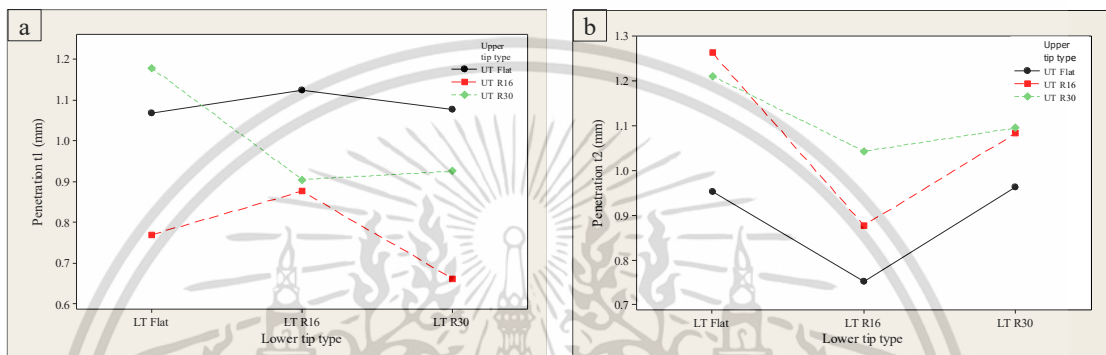
ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di)

Analysis of Variance for di						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Upper tip	2	1.81081	1.81081	0.90541	1279.89	<0.001
Lower tip	2	2.39999	2.39999	1.19999	1696.33	<0.001
Upper tip*Lower tip	4	3.072	3.072	0.768	1085.65	<0.001
Error	18	0.01273	0.01273	0.00071		
Total	26	7.29554				

S = 0.0265971 R-Sq = 99.83% R-Sq(adj) = 99.75%

การพิจารณาผลการทดลอง และอ้างอิงข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MINITAB Release 15 ทำให้ทราบว่าค่า R^2 ของผลตอบระยะการซึมลึก1 มีค่า 99.83% ระยะการซึมลึก2 มีค่า 99.81% ระยะการกตลิก1 มีค่า 99.00% ระยะการกตลิก2 มีค่า 97.19% และขนาดของรอยเชื่อม มีค่า 99.83% โดยค่า adjusted R^2 ของผลตอบระยะการซึมลึก1 มีค่า 99.76% ระยะการซึมลึก2 มีค่า 99.72% ระยะการกตลิก1 มีค่า 98.55% ระยะการกตลิก2 มีค่า 95.94% และขนาดของรอยเชื่อม มีค่า 99.75% จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด คุณลักษณะทางคุณภาพของรอยเชื่อมต้องผ่านตามมาตรฐานการเชื่อม JIS Z 3139 [23], [65], [66] 5 คุณลักษณะของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมความหนา 1.5 มิลลิเมตร เกรด SUS316L กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

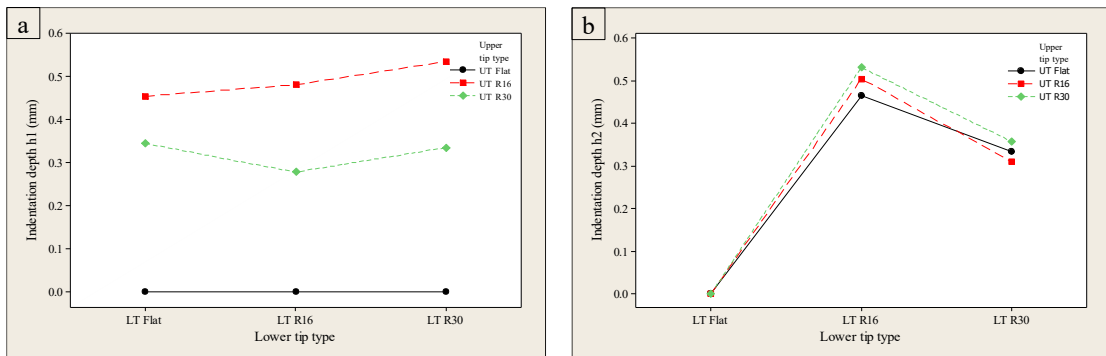
SUS425 ได้แก่ ระยะการซึมลึก1, 2 (t_1 , t_2) ระยะการกดลึก1, 2 (h_1 , h_2) และขนาดของรอยเชื่อม (d_i) โดยระยะการซึมลึกต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 20% และต้องไม่มากกว่า 80% ของความหนาของวัสดุที่บางสุดในการเชื่อม หรือมีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 1.2 มิลลิเมตร ระยะการกดลึกต้องไม่มากกว่า 30% ของความหนาของวัสดุที่บางสุดในการเชื่อมหรือมีค่าไม่มากกว่า 0.45 มิลลิเมตร ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมต้องมากกว่า $4\sqrt{t}$ หรือมีค่ามากกว่า 5.0 มิลลิเมตร เมื่อ t ความหนาของวัสดุที่บางสุดในการเชื่อม [42] ความสัมพันธ์ของคุณภาพรอยเชื่อมทั้ง 5 องค์ประกอบ กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรดแต่ละประเภทแสดงตามรูปที่ 4.7 (a), (b) แสดงความสัมพันธ์ของระยะการซึมลึก1 และ ระยะการซึมลึก2 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.7 (a) ความสัมพันธ์ของระยะการซึมลึก1 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด
(b) ความสัมพันธ์ของระยะการซึมลึก2 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด

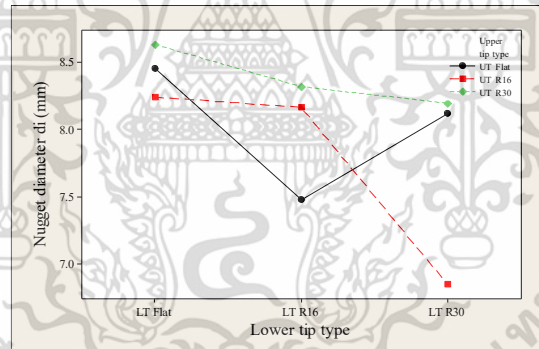
จากผลการทดลองค่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าสูงกว่า 0.3 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.7 (a) ค่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตรกับหัวอิเล็กโทรดกลางแบบแบน มีค่าระยะการซึมลึก 1.18 มิลลิเมตร ส่วนค่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมต่ำสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตร กับ หัวอิเล็กโทรดกลางขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร มีค่าระยะการซึมลึก 0.66 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.7 (b) ค่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตร กับ หัวอิเล็กโทรดกลางแบบแบน มีค่าระยะการซึมลึก 1.26 มิลลิเมตร ส่วนค่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมต่ำสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนแบบแบน กับ หัวอิเล็กโทรดกลางขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตร มีระยะการซึมลึก 0.75 มิลลิเมตร ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมฝั่ง SUS425 จะมีระยะการซึมลึกที่สูงกว่าฝั่ง SUS316L เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS425 มีความแข็งแรง (Tensile strength) การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) ค่าความแข็งของวัสดุ (Hardness) ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS316L [9], [65] ผลการทดลองยังพบว่าไม่ปรากฏระยะการกดลึกของรอยเชื่อมที่เกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรด และกลางแบบแบน ซึ่งโดยทั่วไปหัวอิเล็กโทรดแบบแบนจะใช้ในกรณีที่ชิ้นงานต้องการใช้ประโยชน์จากพื้นผิวชิ้น (Surface) งานหลังผ่านการเชื่อมแบบความต้านทานแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (a) ความสัมพันธ์ของระยะการกดลึก1 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด
(b) ความสัมพันธ์ของระยะการกดลึก2 กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.8 (a) และรูปที่ 4.8 (b) ระยะการกดลึกของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบน และล่างขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตร มีระยะการกดลึก 0.53 มิลลิเมตร เนื่องจากมุมสัมผัสของหัวอิเล็กโทรดขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตรมีค่าสูง และบริเวณพื้นที่สัมผัสซึ่งงานมีค่าต่ำสุดจากเหตุผลดังกล่าวทำให้กระบวนการเชื่อมมีการระบายความร้อนด้วยอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว ยิ่งไปกว่านั้นทุกการทดลองพบว่าเกิดการกระจายของน้ำโลหะเหลว (Expulsion) ส่วนระยะการกดลึกของรอยเชื่อมเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร กับ หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร มีระยะการกดลึกผ่านตามมาตรฐานการเชื่อม JIS Z 3139



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของขนาดของรอยเชื่อม กับ รูปทรงหัวอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการตรวจสอบขนาดของรอยเชื่อมโดยทุกผลการทดลองขนาดของรอยเชื่อมมีค่าสูงกว่า 5.0 มิลลิเมตร ขนาดของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร กับ หัวอิเล็กโทรดล่างแบบแบน มีขนาดของรอยเชื่อม 8.63 มิลลิเมตร และค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้หัวอิเล็กโทรดบนขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตร กับ หัวอิเล็กโทรดล่างขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร มีขนาดของรอยเชื่อม 6.85 มิลลิเมตร คุณสมบัติของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ลักษณะทางกายภาพ (Appearance) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้เบื้องต้นว่า รอยเชื่อมมีจุดบกพร่องหรือมีคุณภาพที่ดี การเชื่อมด้วยหัวอิเล็กโทรดบนหรือล่างขนาดรัศมี 16 มิลลิเมตร ทำให้เกิดร่องรอยของการแตกกระจายของน้ำโลหะ การเชื่อมด้วยการใช้หัวอิเล็กโทรดบนหรือล่างขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร ทำให้เกิดรอยไหม้ของเส้นรอบวงที่มีความต่อเนื่อง และการเชื่อมด้วยการใช้หัวอิเล็กโทรดบนหรือล่างแบบแบนจะเป็นการรักษาพื้นผิวของงานเชื่อมให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเรียบสม่ำเสมอ จากผลการทดลอง และผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MINITAB Release 15 คุณลักษณะทางคุณภาพของรอยเชื่อมจากการใช้หัวอิเล็กโทรดชนิดโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตรให้ผลการทดลองที่ดีกว่าชนิดอื่น ๆ และจากลักษณะการใช้งานกับการผลิตชิ้นท่อไอเสียของรถยนต์มีลักษณะที่เป็นงานโค้งมีรัศมี ดังนั้นจึงเลือกใช้รูปทรงของหัวอิเล็กโทรดชนิดโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตรในการทดลองลำดับต่อไป ผลการทดลองนี้นำไปใช้กับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นส่วนรถยนต์ซึ่งทำจากวัสดุเหล็กคาร์บอนกลางเกรด SPC440 ความหนา 1.6 มิลลิเมตร (แผ่นงานด้านบน) กับเหล็กคาร์บอนกลางเกรด SPC440 ความหนา 1.8 มิลลิเมตร (แผ่นงานด้านล่าง) จำนวน 3 ชิ้นงานทดสอบใช้หัวอิเล็กโทรดทั้งด้านบน และด้านล่างเป็นชนิดโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตร โดยกำหนดปัจจัยในการเชื่อม ได้แก่ แรงกด (F) เท่ากับ 3.0 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อม (I) เท่ากับ 8.8 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม (Tw) เท่ากับ 15 ไซเคิล ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมเป็นไปตามลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ดีในตารางที่ 3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อมโดยเฉลี่ยให้ระยะการซึมลึก 1 มีค่า 1.15 มิลลิเมตร ระยะการซึมลึก 2 มีค่า 1.31 มิลลิเมตร ระยะการกดลึก 1 มีค่า 0.16 มิลลิเมตร ระยะการกดลึก 2 มีค่า 0.18 มิลลิเมตร และขนาดของรอยเชื่อม 5.41 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของเหล็กคาร์บอนกลางเกรด SPC440

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึมลึก 1 (t1) มม.	ระยะการซึมลึก 2 (t2) มม.	ระยะการกดลึก 1 (h1) มม.	ระยะการกดลึก 2 (h2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.
1	1.15	1.24	0.18	0.19	5.41
2	1.15	1.42	0.15	0.18	5.32
3	1.14	1.26	0.15	0.16	5.51
เฉลี่ย	1.15	1.31	0.16	0.18	5.41

4.2 ผลการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ปัจจัยในการเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แรงกด (F) กระแสเชื่อม (I) เวลาเชื่อม (Tw) เวลา கட (Th) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) โดยการพิจารณาผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อม 4 องค์ประกอบ คือ ระยะการซึมลึก 1 และระยะการซึมลึก 2 (t1, t2) ขนาดของรอยเชื่อม (di) และพื้นที่ของรอยเชื่อม (area) จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) โดยมีการเชื่อมขึ้นทดสอบตามการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนตามตารางที่ 3.9 จำนวน 54 การทดลอง จากนั้นนำขึ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไปทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการ ทดลอง มาตรฐาน	ระยะเวลา ซีมลีก1 (t1) มม.	ระยะเวลา ซีมลีก2 (t2) มม.	ขนาดของรอย เชื่อม (di) มม.	พื้นที่ของรอย เชื่อม (area) ตร.มม.
1	0.802	0.924	7.370	12.081
2	0.816	0.826	6.362	9.868
3	0.843	0.854	7.423	11.979
4	0.833	0.915	7.650	12.716
5	0.835	0.975	7.261	12.439
6	0.919	0.746	7.001	11.062
7	1.009	0.809	7.985	13.807
8	0.844	0.934	7.525	12.701
9	0.957	0.946	7.600	13.686
10	0.826	0.821	7.176	11.237
11	0.849	0.936	6.876	11.590
12	0.803	0.828	6.682	10.327
13	0.881	0.848	7.718	12.703
14	0.894	0.678	7.395	11.094
15	1.105	0.934	7.834	15.081
16	1.056	0.945	7.619	14.386
17	0.923	0.981	7.769	14.014
18	0.935	0.631	6.416	9.521
19	0.964	0.961	7.691	14.010
20	0.923	0.806	7.268	11.925
21	0.951	0.929	7.566	13.465
22	0.964	0.801	7.212	12.060
23	0.891	0.840	7.070	11.595
24	1.100	0.736	7.718	13.447
25	0.968	1.148	8.470	16.362
26	0.913	1.115	8.411	16.175
27	0.887	0.972	7.670	13.517
28	0.891	0.981	6.397	11.223
29	0.813	1.062	6.420	11.283
30	0.827	0.698	6.682	10.691
31	0.967	0.860	6.977	12.030
32	0.841	0.924	7.712	12.943
33	1.026	0.902	7.864	14.364
34	0.998	0.843	6.432	11.114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ระยะการชิมลิก1 (t1) มม.	ระยะการชิมลิก2 (t2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.	พื้นที่ของรอยเชื่อม (area) ตร.มม.
35	0.902	0.845	6.401	10.527
36	0.920	0.726	6.218	9.653
37	0.819	0.810	7.720	12.006
38	0.826	0.695	6.893	9.988
39	0.756	1.035	6.042	10.133
40	0.724	0.702	7.012	9.562
41	0.867	0.608	6.272	8.784
42	0.844	1.016	7.871	13.890
43	0.924	0.608	6.382	9.273
44	0.875	1.022	7.068	12.636
45	0.829	0.698	6.857	9.970
46	0.892	0.842	6.985	11.467
47	0.968	0.947	8.183	14.883
48	0.852	0.827	6.972	11.101
49	0.824	0.864	6.793	10.855
50	0.901	0.705	6.211	9.421
51	0.824	0.691	6.976	10.076
52	0.882	1.023	7.869	14.212
53	1.011	0.854	8.368	14.860
54	0.938	0.868	7.487	12.821

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 จะต้องพิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เพื่อยืนยันการทดลองว่ามีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ ต้องมีการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) เพื่อแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองไม่แสดงสิ่งผิดปกติ ต้องมีการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) ข้อมูลต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ต้องมีการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน สรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือได้

4.2.1 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อระยะการชิมลิก1 (t1)

เมื่อทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ใช้ในการตรวจสอบแหล่งแปรผันของแบบจำลองในเทอมต่าง ๆ ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบของคุณภาพรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตรเลียเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพอร์ริติกเกรด SUS425 ผลการการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก1 (t1) แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก1 (t1) จากการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: t1 versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for t1				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.68926	0.598251	2.824	0.009
F	-0.11752	0.118408	-0.993	0.330
Tw	0.00046	0.009473	0.048	0.962
I	-0.01132	0.010226	-1.107	0.278
Th	-0.00963	0.00399	-2.413	0.023
Up ET	-0.02703	0.00665	-4.065	<0.001
Low ET	0.00454	0.005849	0.777	0.444
F*F	-0.01033	0.012312	-0.839	0.409
Tw*Tw	0.00013	0.000079	1.658	0.109
I*I	0.00006	0.000055	1.009	0.322
Th*Th	0.00006	0.00002	2.887	0.008
Up ET*Up ET	0.00055	0.000055	10.096	<0.001
Low ET*Low ET	0.0001	0.000055	1.892	0.070
F*Tw	0.00127	0.001117	1.137	0.266
F*I	0.00134	0.000931	1.442	0.161
F*Th	-0.00056	0.000395	-1.412	0.170
F*Up ET	0.00002	0.000931	0.018	0.986
F*Low ET	0.00131	0.000931	1.406	0.172
Tw*I	-0.00014	0.000074	-1.871	0.073
Tw*Th	0.00002	0.000045	0.385	0.703
Tw*Up ET	-0.00002	0.000053	-0.336	0.740
Tw*Low ET	-0.00018	0.000074	-2.418	0.023
I*Th	0.00009	0.000037	2.489	0.020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก1 (t1) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: t1 versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for t1				
Term	Coef	SE Coef	T	P
I*Up ET	0.00016	0.000062	2.641	0.014
I*Low ET	-0.00003	0.000044	-0.652	0.520
Th*Up ET	0.0000	0.000037	0.054	0.958
Th*Low ET	0.00003	0.000037	0.734	0.469
Up ET*Low ET	-0.00011	0.000062	-1.755	0.091
S = 0.0394847 PRESS = 0.179889				
R-Sq = 88.17% R-Sq(pred) = 47.52% R-Sq(adj) = 75.89%				

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการซึมลึก1 (t1) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Analysis of Variance for t1						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	27	0.302238	0.302238	0.011194	7.18	<0.001
Linear	6	0.035452	0.036757	0.006126	3.93	0.006
Square	6	0.213513	0.213513	0.035585	22.83	<0.001
Interaction	15	0.053274	0.053274	0.003552	2.28	0.032
Residual Error	26	0.040535	0.040535	0.001559		
Lack-of-Fit	21	0.03211	0.03211	0.001529	0.91	0.611
Pure Error	5	0.008425	0.008425	0.001685		
Total	53	0.342773				

จากตารางที่ 4.9 พบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลัก เวลาเชื่อม (Tw) กระแสเชื่อม (I) เวลาถัดค้ำ (Th) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) และอันตรกิริยาระหว่าง (Th * Th), (Up ET * Up ET), (Tw * Low ET), (I * Th), (I * Up ET) มีค่า p-value น้อยกว่าค่าของ $\alpha = 0.05$ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะการซึมลึก1 (t1) อย่างมีนัยสำคัญ การตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ที่ได้จากโปรแกรมว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 100 % หรือไม่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และเป็นแบบจำลองที่ตีรวมถึงสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก1 (t1) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนในตารางที่ 4.9 ค่า R² ของการทดลองมีค่า = 88.17% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ และ R² ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า = 75.89% การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองซึ่งหลังจากประมวลผลแล้วได้ค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.10 โปรแกรมจะคำนวณค่า p-value มาใช้สำหรับเปรียบเทียบกับค่า α ที่กำหนด สำหรับการทดลองนี้ผู้วิจัยได้กำหนดค่าของ $\alpha = 0.05$ ซึ่งจากตาราง 4.10 จะเห็นได้ว่าค่า p-value ของ Lack-of-Fit = 0.611 ซึ่งมีความเพียงพอของตัวแปรในสมการในการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายระยะการซึมลึก1 (t1) จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก1 (t1) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ตามตารางที่ 4.9 สามารถสร้างสมการทำนายระยะการซึมลึก1 (t1) ของรอยเชื่อม เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} \text{Penetration 1 (t1)} = & 1.68926 + 0.00046(\text{Tw}) - 0.01132(\text{I}) - 0.00963(\text{Th}) - 0.02703(\text{UpET}) \\ & + 0.00454(\text{Low ET}) + 0.00006(\text{Th})^2 + 0.00055(\text{UpET})^2 - \\ & 0.00018(\text{Tw} * \text{LowET}) + 0.00009(\text{I} * \text{Th}) + 0.00016(\text{I} * \text{UpET}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.2.2 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อระยะการซึมลึก2 (t2)

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ให้ผลการการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก2 (t2) แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก2 (t2) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: t2 versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for t2				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.12350	1.00371	3.112	0.004
F	-0.55063	0.19866	-2.772	0.010
Tw	-0.00074	0.01589	-0.046	0.963
I	-0.03245	0.01716	-1.891	0.070
Th	-0.00370	0.00669	-0.553	0.585
Up ET	-0.00607	0.01116	-0.544	0.591
Low ET	-0.02602	0.00981	-2.652	0.013
F*F	0.06678	0.02066	3.233	0.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก 2 (t2) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: t2 versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for t2				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Tw*Tw	0.00024	0.00013	1.847	0.076
I*I	0.00020	0.00009	2.132	0.043
Th*Th	0.00010	0.00003	2.93	0.007
Up ET*Up ET	-0.00003	0.00009	-0.283	0.779
Low ET*Low ET	0.00052	0.00009	5.648	<0.001
F*Tw	0.00007	0.00187	0.037	0.970
F*I	0.00139	0.00156	0.891	0.381
F*Th	-0.00078	0.00066	-1.177	0.250
F*Up ET	0.00391	0.00156	2.503	0.019
F*Low ET	-0.00074	0.00156	-0.475	0.639
Tw*I	-0.00021	0.00012	-1.719	0.098
Tw*Th	0.00007	0.00007	0.913	0.370
Tw*Up ET	-0.00005	0.00009	-0.532	0.599
Tw*Low ET	0.00007	0.00012	0.571	0.573
I*Th	-0.00001	0.00006	-0.219	0.829
I*Up ET	0.00010	0.0001	0.961	0.346
I*Low ET	0.00018	0.00007	2.423	0.023
Th*Up ET	0.00006	0.00006	1.019	0.317
Th*Low ET	-0.00004	0.00006	-0.72	0.478
Up ET*Low ET	-0.00042	0.0001	-4.083	<0.001
S = 0.0662454 PRESS = 0.541574				
R-Sq = 86.61% R-Sq(pred) = 36.46% R-Sq(adj) = 72.71%				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบระยะการซึมลึก2 (t2) จากการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

Analysis of Variance for t2						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	27	0.73829	0.73829	0.027344	6.23	<0.001
Linear	6	0.29867	0.07252	0.012087	2.75	0.033
Square	6	0.27226	0.27226	0.045376	10.34	<0.001
Interaction	15	0.16736	0.16736	0.011158	2.54	0.018
Residual Error	26	0.1141	0.1141	0.004388		
Lack-of-Fit	21	0.09969	0.09969	0.004747	1.65	0.305
Pure Error	5	0.01441	0.01441	0.002882		
Total	53	0.85239				

จากตารางที่ 4.11 พบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลัก แรงกด (F) กระแสเชื่อม (I) เวลาตัดค้ำ (Th) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) และอันตรกิริยาระหว่าง (F * F), (I * I), (Th * Th), (Low ET * Low ET), (F * Up ET), (I * Low ET), (Up ET * Low ET) มีค่า p-value น้อยกว่าค่าของ $\alpha = 0.05$ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะการซึมลึก2 (t2) อย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก2 (t2) จากการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนในตารางที่ 4.11 ค่า R^2 ของการทดลองมีค่า = 86.61% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ และ R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า = 72.71% การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองซึ่งหลังจากประมวลผลแล้ว ได้ค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.12 ค่า p-value ของ Lack-of-Fit = 0.305 ซึ่งมีความเพียงพอของตัวแปรในสมการในการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายระยะการซึมลึก2 (t2) จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบระยะการซึมลึก2 (t2) จากการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนตามตารางที่ 4.11 สามารถสร้างสมการทำนายระยะการซึมลึก2 (t2) ของรอยเชื่อม เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยดังสมการที่ 4.2

$$\begin{aligned} \text{Penetration 2 (t2)} = & 3.1235 - 0.55063(F) - 0.03245(I) - 0.00370(Th) - 0.00607(\text{UpET}) - \\ & 0.02602(\text{LowET}) + 0.06678 (F)^2 + 0.00020(I)^2 + 0.00010(Th)^2 + \\ & 0.00052(\text{LowET})^2 + 0.00391(F*\text{UpET}) + 0.00018 (I*\text{LowET}) - \\ & 0.00042(\text{UpET}*\text{LowET}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

4.2.3 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของรอยเชื่อม (di)

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ให้ผลการการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di) แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: di versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for di				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12.3727	3.98101	3.108	0.005
F	-2.7227	0.78794	-3.455	0.002
Tw	-0.146	0.06304	-2.317	0.029
I	-0.0149	0.06805	-0.219	0.828
Th	-0.0145	0.02655	-0.546	0.590
Up ET	0.0321	0.04425	0.726	0.474
Low ET	0.0555	0.03892	1.425	0.166
F*F	0.0108	0.08193	0.131	0.897
Tw*Tw	0.0016	0.00052	3.110	0.004
I*I	-0.0001	0.00036	-0.185	0.855
Th*Th	-0.0001	0.00013	-0.360	0.722
Up ET*Up ET	0.0007	0.00036	1.786	0.086
Low ET*Low ET	0.0021	0.00036	5.631	<0.001
F*Tw	0.0189	0.00743	2.547	0.017
F*I	0.0199	0.00619	3.216	0.003
F*Th	0.0013	0.00263	0.510	0.614
F*Up ET	0.0035	0.00619	0.572	0.572
F*Low ET	0.0087	0.00619	1.408	0.171
Tw*I	-0.0001	0.0005	-0.213	0.833
Tw*Th	-0.0003	0.0003	-0.863	0.396
Tw*Up ET	-0.0006	0.00035	-1.850	0.076
Tw*Low ET	0.0005	0.0005	1.031	0.312
I*Th	0.0003	0.00025	1.028	0.313
I*Up ET	0.0003	0.00041	0.818	0.421
I*Low ET	-0.0014	0.00029	-4.750	<0.001
Th*Up ET	0.0000	0.00025	0.028	0.978

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 (ต่อ) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: di versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for di				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Th*Low ET	0.0002	0.00025	0.767	0.450
Up ET*Low ET	-0.0024	0.00041	-5.695	<0.001
S = 0.262747 PRESS = 8.99743				
R-Sq = 91.26% R-Sq(pred) = 56.17% R-Sq(adj) = 82.18%				

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Analysis of Variance for di						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	27	18.7325	18.7325	0.6938	10.05	<0.001
Linear	6	9.6185	1.4431	0.24051	3.48	0.012
Square	6	3.4548	3.4548	0.57579	8.34	<0.001
Interaction	15	5.6593	5.6593	0.37729	5.47	<0.001
Residual Error	26	1.7949	1.7949	0.06904		
Lack-of-Fit	21	1.6945	1.6945	0.08069	4.02	0.064
Pure Error	5	0.1005	0.1005	0.02009		
Total	53	20.5275				

จากตารางที่ 4.13 พบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลัก แรงกด (F) เวลาเชื่อม (Tw) กระแสเชื่อม (I) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) และอันตรกิริยาระหว่าง (Tw * Tw), (Low ET * Low ET), (F * Tw), (F * I), (I * Low ET), (Up ET * Low ET) มีค่า p-value น้อยกว่าค่าของ $\alpha = 0.05$ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของรอยเชื่อม (di) อย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ในตารางที่ 4.13 ค่า R^2 ของการทดลองมีค่า = 91.26% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ และ R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า = 82.18% การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองซึ่งหลังจากประมวลผลแล้ว ได้ค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.14 ค่า p-value ของ Lack-of-Fit = 0.064 ซึ่งมีความเพียงพอของตัวแปรในสมการในการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายขนาดของรอยเชื่อม (di) จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบขนาดของรอยเชื่อม (di) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ตามตารางที่ 4.13 สามารถสร้างสมการทำนายขนาดของรอยเชื่อม (di) ของ

เอกสารนี้... เพื่อแนะนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยดังสมการที่ 4.3 โยชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Nugget Diameter (di)} = & 12.3727 - 2.7227(F) - 0.1460(\text{Tw}) - 0.0149(I) + 0.0321(\text{UpET}) + \\ & 0.0555(\text{LowET}) + 0.0016(\text{Tw})^2 + 0.0021(\text{LowET})^2 + \\ & 0.0189(F*\text{Tw}) + 0.0199(F*I) - 0.0014(I*\text{LowET}) - \\ & 0.0024(\text{UpET}*\text{LowET}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.2.4 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อพื้นที่รอยเชื่อม (area)

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: area versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for area				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	36.4043	10.5321	3.457	0.002
F	-8.7522	2.0846	-4.199	<0.001
Tw	-0.2320	0.1668	-1.391	0.176
I	-0.2226	0.1800	-1.236	0.227
Th	-0.1093	0.0702	-1.556	0.132
Up ET	-0.1626	0.1171	-1.389	0.177
Low ET	-0.0547	0.1030	-0.531	0.600
F*F	0.3204	0.2167	1.478	0.151
Tw*Tw	0.0049	0.0014	3.522	0.002
I*I	0.0010	0.0010	1.005	0.324
Th*Th	0.0008	0.0003	2.199	0.037
Up ET*Up ET	0.0045	0.0010	4.639	<0.001
Low ET*Low ET	0.0075	0.0010	7.743	<0.001
F*Tw	0.0411	0.0197	2.090	0.047
F*I	0.0541	0.0164	3.300	0.003
F*Th	-0.0063	0.0070	-0.900	0.376

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 (ต่อ) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Response Surface Regression: area versus F, Tw, I, Th, Up ET, Low ET Estimated				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for area				
Term	Coef	SE Coef	T	P
F*Up ET	0.0286	0.0164	1.748	0.092
F*Low ET	0.0199	0.0164	1.213	0.236
Tw*I	-0.0025	0.0013	-1.909	0.067
Tw*Th	0.0001	0.0008	0.152	0.881
Tw*Up ET	-0.0017	0.0009	-1.817	0.081
Tw*Low ET	0.0007	0.0013	-0.513	0.612
I*Th	0.0010	0.0007	1.530	0.138
I*Up ET	0.0025	0.0011	2.284	0.031
I*Low ET	-0.0015	0.0008	-1.978	0.059
Th*Up ET	0.0005	0.0007	0.738	0.467
Th*Low ET	0.0002	0.0007	0.316	0.755
Up ET*Low ET	-0.0074	0.0011	-6.761	<0.001
S = 0.695120 PRESS = 62.9095				
R-Sq = 93.09% R-Sq(pred) = 65.39% R-Sq(adj) = 85.91%				

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Analysis of Variance for di						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	27	169.186	169.1855	6.2661	12.97	<0.001
Linear	6	83.714	10.5262	1.7544	3.63	0.009
Square	6	44.085	44.0854	7.3476	15.21	<0.001
Interaction	15	41.386	41.3859	2.7591	5.71	<0.001
Residual Error	26	12.563	12.563	0.4832		
Lack-of-Fit	21	11.843	11.8427	0.5639	3.910	0.068
Pure Error	5	0.720	0.7202	0.1440		
Total	53	181.749				

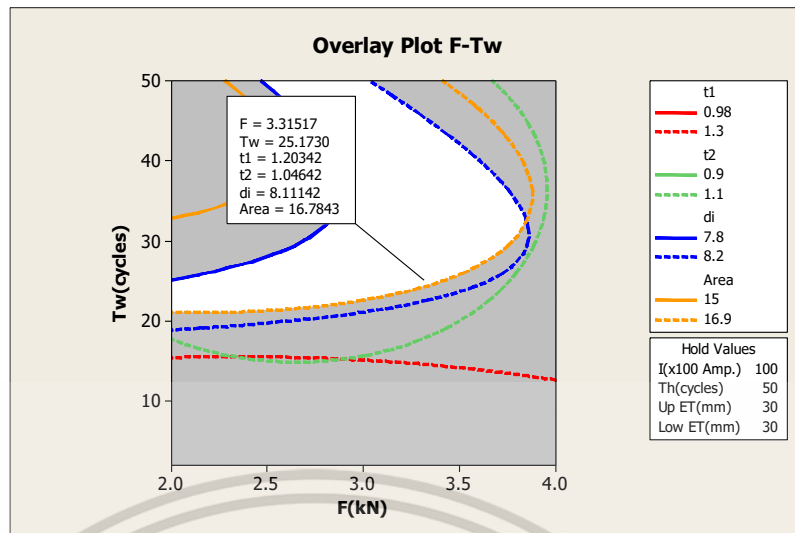
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.15 พบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลัก แรงกด (F) เวลาเชื่อม (Tw) กระแสเชื่อม (I) เวลาตัดค้ำง (Th) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) และอันตรกิริยาระหว่าง (Tw * Tw), (Th * Th), (Up ET * Up ET), (Low ET * Low ET), (F * Tw), (F * I), (I * Up ET), (Up ET * Low ET) มีค่า p-value น้อยกว่าค่าของ $\alpha = 0.05$ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพื้นที่รอยเชื่อม (area) อย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนในตารางที่ 4.15 ค่า R^2 ของการทดลองมีค่า = 93.09% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ และ R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า = 85.91% การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองซึ่งหลังจากประมวลผลแล้ว ได้ค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.16 ค่า p-value ของ Lack-of-Fit = 0.068 ซึ่งมีความเพียงพอของตัวแปรในสมการในการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบพื้นที่รอยเชื่อม (area) จากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนตามตารางที่ 4.15 สามารถสร้างสมการทำนายพื้นที่รอยเชื่อม (area) เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ดังสมการที่ 4.4

$$\begin{aligned} \text{Nugget area (area)} = & 36.4043 - 8.7522(F) - 0.2320(Tw) - 0.2226(I) - 0.1093(Th) - \\ & 0.1626(UpET) - 0.0547(LowET) + 0.0049(Tw)^2 + 0.0008(Th)^2 + \\ & 0.0045(UpET)^2 + 0.0075(LowET)^2 + 0.0411(F*Tw) + \\ & 0.0541(F*I) + 0.0025(I*UpET) - 0.0074(UpET*LowET) \end{aligned} \quad (4.4)$$

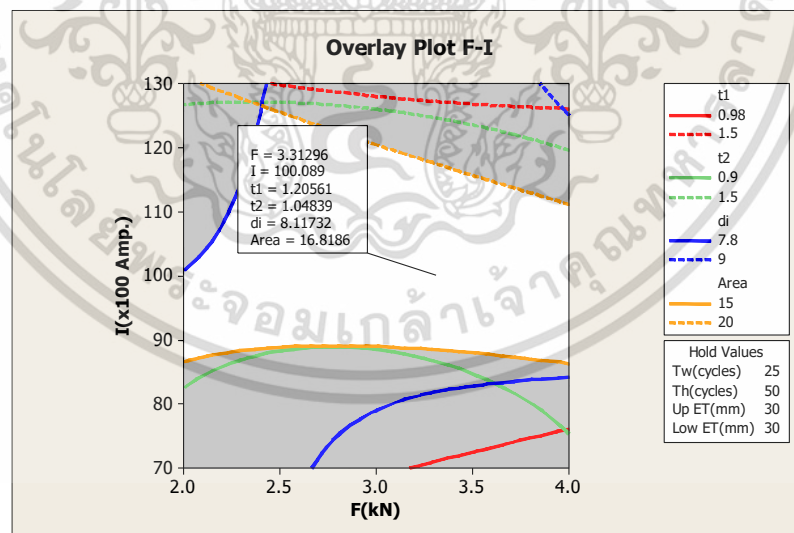
4.3 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงสร้างผลตอบสนอง (Overlay contour plot)

จากการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายคุณภาพของรอยเชื่อม ในขั้นตอนต่อไปจะใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงสร้างของผลตอบสนอง (Overlay contour plot) ซึ่งเป็นเทคนิคในการนำผลตอบสนองมารวมกันภายในขอบเขตของตัวแปรเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบ และออกแบบให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ โดยส่วนมากจะเน้นในส่วนที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ของทุก ๆ ตัวแปร โดยกำหนดขอบเขตของผลตอบสนองที่ต้องการของแต่ละผลตอบสนอง ซึ่งการกำหนดนั้นต้องให้ผลตอบสนองอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดเพื่อให้เกิดการทับกันของพื้นที่ตอบสนองที่ต้องการ ดังนั้นทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่ให้ผลที่เหมาะสมที่สุด สำหรับแต่ละผลตอบสนองโดยเมื่อให้กำหนดผลตอบสนองของทั้งหมดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันก็จะได้พื้นที่ที่แสดงส่วนที่ให้ผลตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงที่กำหนดของทั้งหมดของผลตอบสนอง



รูปที่ 4.10 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างแรงกด และเวลาเชื่อม

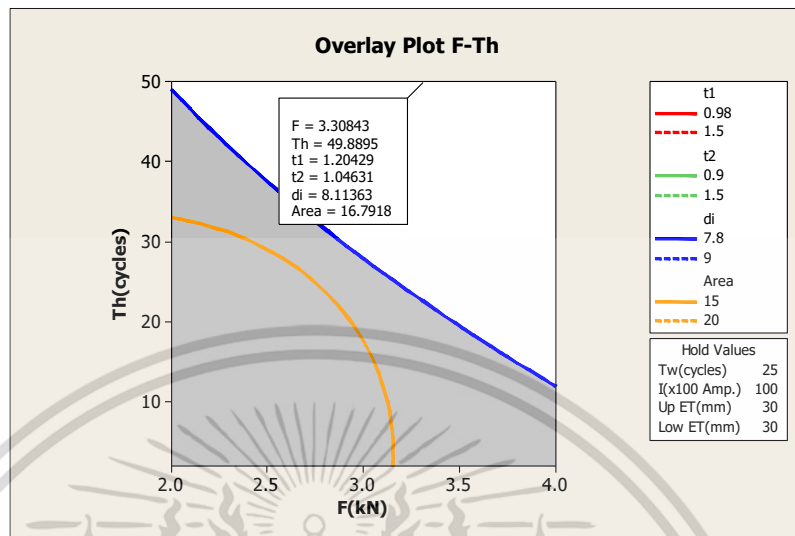
จากรูป 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงกด และเวลาเชื่อมโดยคงที่ปัจจัยกระแสเชื่อมที่ระดับ 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาตัดค่างระดับ 50 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร โดยพื้นที่สีขาวที่เกิดขึ้น เกิดจากการทับกันของพื้นที่ผลตอบสนองแต่ละผลตอบสนอง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นพื้นที่ที่เป็นไปได้ว่าจะเกิดจุดผลตอบสนองของแต่ละผลตอบสนองที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้แรงกดระดับ 2.0 กิโลนิวตัน เวลาเชื่อมช่วงระหว่าง 21 ไซเคิล ถึง 25 ไซเคิล หรือเมื่อใช้แรงกดระดับ 3.0 กิโลนิวตัน ใช้เวลาเชื่อมช่วงระหว่าง 23 ไซเคิล ถึง 50 ไซเคิล และเมื่อใช้แรงกดสูงสุดที่ระดับ 3.84 กิโลนิวตัน ใช้เวลาเชื่อมสูงสุด 30 ไซเคิล



รูปที่ 4.11 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างแรงกด และกระแสเชื่อม

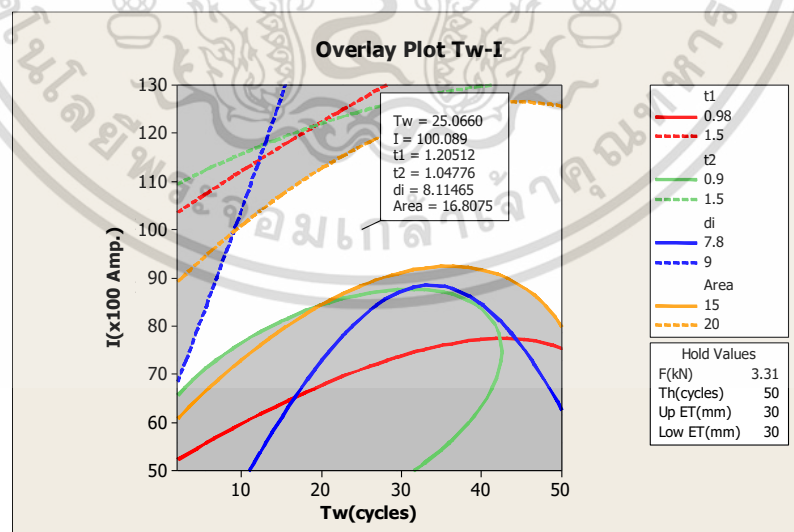
จากรูป 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงกด และกระแสเชื่อมโดยคงที่ปัจจัยเวลาเชื่อมที่ระดับ 25 ไซเคิล เวลาตัดค่างระดับ 50 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้แรงกดระดับ 2.0 กิโลนิวตัน ใช้กระแสเชื่อม ช่วงระหว่าง 8.7 ถึง 10.1 กิโลแอมแปร์ หรือเมื่อใช้แรงกดระดับ 3.0 กิโลนิวตัน ใช้กระแสเชื่อม ช่วงระหว่าง 8.7 ถึง 10.1 กิโลแอมแปร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.9 ถึง 12.0 กิโลแอมแปร์ และเมื่อใช้แรงกดสูงสุดที่ระดับ 4.0 กิโลนิวตัน ใช้กระแสเชื่อม ช่วงระหว่าง 8.6 ถึง 11.0 กิโลแอมแปร์



รูปที่ 4.12 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างแรงกด และเวลากดค้ำ

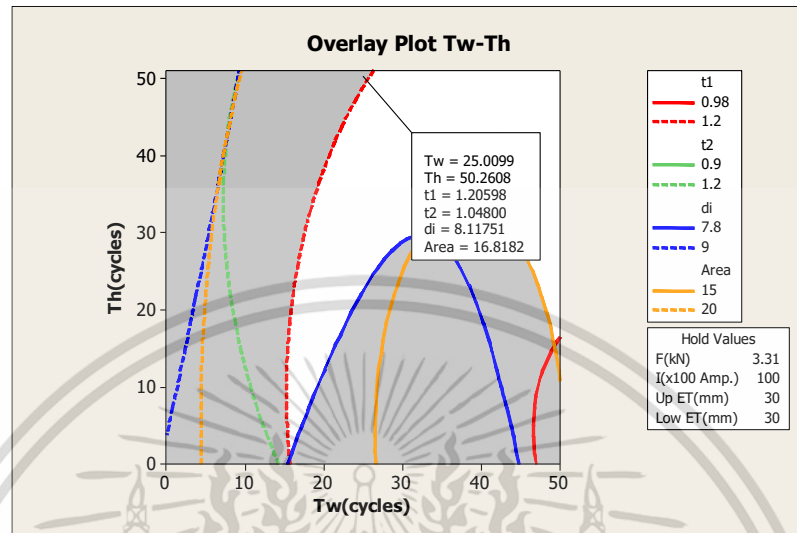
จากรูป 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงกด และเวลากดค้ำโดยคงที่ปัจจัยกระแสเชื่อมที่ระดับ 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม ระดับ 25 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้แรงกดระดับ 2.0 กิโลนิวตัน เวลากดค้ำ 48 ไซเคิล หรือเมื่อใช้แรงกดระดับ 3.0 กิโลนิวตัน ใช้เวลากดค้ำช่วงระหว่าง 27 ไซเคิล ถึง 50 ไซเคิล และเมื่อใช้แรงกดสูงสุดที่ระดับ 4.0 กิโลนิวตัน ใช้เวลากดค้ำช่วงระหว่าง 12 ไซเคิล ถึง 50 ไซเคิล



รูปที่ 4.13 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงร่างระหว่างเวลาเชื่อม และกระแสเชื่อม

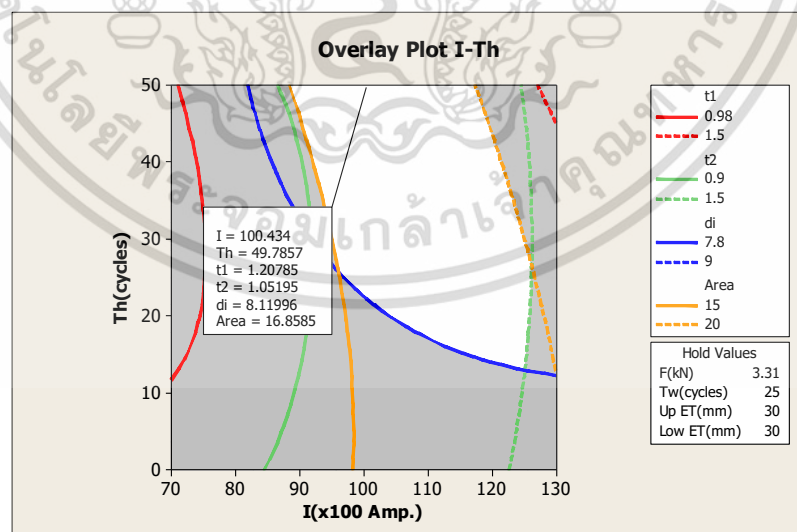
จากรูป 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเวลาเชื่อม และกระแสเชื่อมโดยคงที่ปัจจัยเวลาแรงกดระดับ 3.31 กิโลนิวตัน เวลากดค้ำระดับ 50 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้เวลาเชื่อม 3.0 ไซเคิล ใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ หรือเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล ใช้กระแสเชื่อมช่วงระหว่าง 8.6 ถึง 11.5 กิโลแอมแปร์ และเมื่อใช้เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ใช้กระแสเชื่อมช่วงระหว่าง 8.0 ถึง 12.5 กิโลแอมแปร์



รูปที่ 4.14 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงสร้างระหว่างเวลาเชื่อม และเวลากัดค้ำ

จากรูป 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเวลาเชื่อม และเวลากัดค้ำโดยคงที่ปัจจัยเวลาแรงกดระดับ 3.31 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อมระดับ 10.0 กิโลแอมแปร์ รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้เวลาเชื่อม 16 ไซเคิล ใช้เวลากัดค้ำระหว่าง 2 ถึง 20 ไซเคิล หรือเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล ใช้เวลากัดค้ำระหว่าง 23 ถึง 48 ไซเคิล และเมื่อใช้เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ใช้เวลากัดค้ำระหว่าง 16 ถึง 50 ไซเคิล



รูปที่ 4.15 กราฟซ้อนทับกันของเส้นโครงสร้างระหว่างกระแสเชื่อม และเวลากัดค้ำ

จากรูป 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสเชื่อม และเวลากัดค้ำโดยคงที่ปัจจัยเวลาแรงกดระดับ 3.31 กิโลนิวตัน เวลากัดค้ำระดับ 25 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้กระแสเชื่อม 8.6 ถึง 11.5 กิโลแอมแปร์ หรือเมื่อใช้กระแสเชื่อม 8.0 ถึง 12.5 กิโลแอมแปร์ และเมื่อใช้กระแสเชื่อม 8.0 ถึง 12.5 กิโลแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พื้นที่สีขาสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้กระแสเชื่อม 8.8 กิโลแอมแปร์ ใช้เวลาถัดค้ำง 50 ไซเคิล หรือใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ใช้เวลาถัดค้ำงระหว่าง 22 ถึง 50 ไซเคิล

4.4 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

จากสมการทำนายคุณภาพของรอยเชื่อมแต่ละปัจจัย ตามสมการที่ 4.1 ถึง 4.4 นำสมการไปหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ในขั้นตอนนี้จะต้องกำหนดขอบเขตผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูงสุด (Upper) รวมทั้งกำหนดค้ำน้ำหนักของผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) โดยค่าทั้งสองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.0 ในงานวิจัยนี้ให้ค้ำน้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1.0 เนื่องจากต้องการเน้นให้ผลตอบอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และเข้าใกล้เป้าหมายมากที่สุด ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมแสดงตารางที่ 4.17

การกำหนดเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุด (Maximum) ของแต่ละผลตอบของคุณภาพรอยเชื่อม ค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของระยะเวลาเชื่อมลิก1 (t1) และระยะเวลาเชื่อมลิก2 (t2) จะค้ำนวนจาก 20% ของความหนาของชิ้นงานทดสอบ ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าขอบเขตบน (Upper) ค้ำนวนจาก 25% ของความหนาของชิ้นงานทดสอบสำหรับค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของขนาดรอยเชื่อม (di) จะค้ำนวนจาก 3 เท่าของรากที่สองของความหนาของชิ้นงานทดสอบ ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าขอบเขตบน (Upper) ค้ำนวนจาก 4 เท่าของรากที่สองของความหนาของชิ้นงานทดสอบ และสำหรับค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของพื้นที่รอยเชื่อม (area) ใช้ข้อมูลจริงจากการทดลองเบื้องต้นที่ให้ค่าพื้นที่รอยเชื่อมต่ำสุด ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าขอบเขตบน (Upper) ค้ำนวนจากการระยะเวลาเชื่อมลิกที่ 50% ของความหนาของชิ้นงานทดสอบ

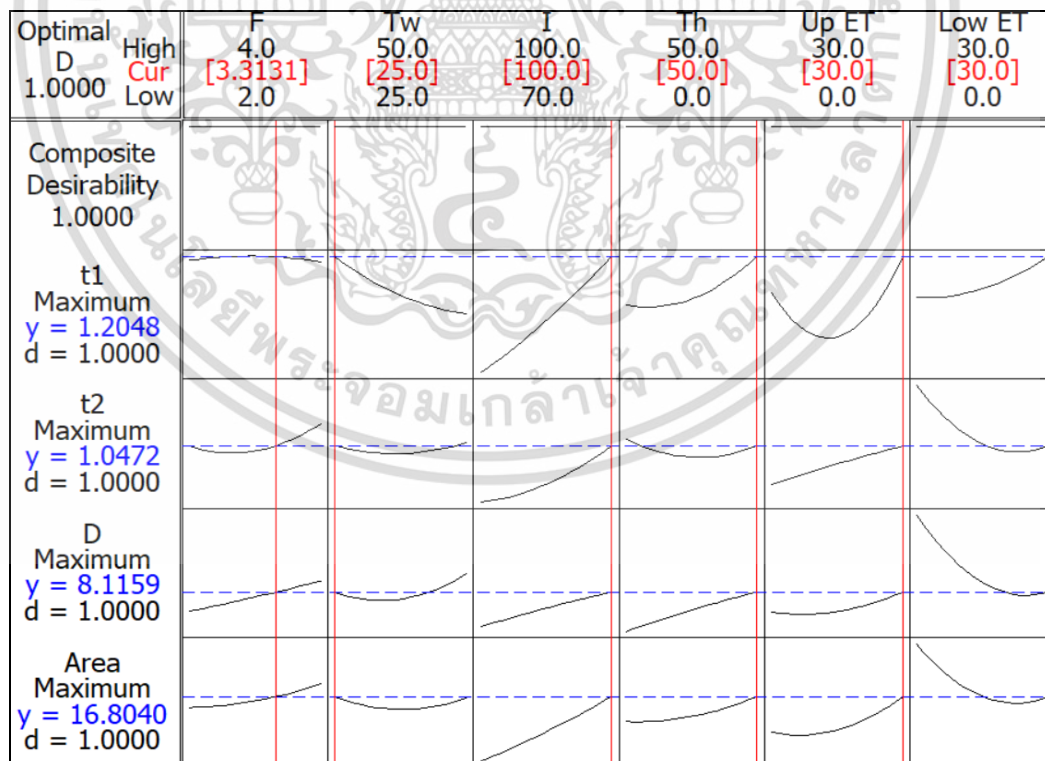
ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ Response Optimization

Response Optimization Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
t1	Maximum	0.30	0.375	0.375	1	1
t2	Maximum	0.30	0.375	0.375	1	1
di	Maximum	3.674	4.899	4.899	1	1
area	Maximum	8.784	10.435	10.435	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 (ต่อ) การวิเคราะห์ Response Optimization

Global Solution	
F	= 3.31313
Tw	= 25
I	= 100
Th	= 50
Up ET	= 30
Low ET	= 30
Predicted Responses	
t1	= 1.2048 , desirability = 1.000000
t2	= 1.0472 , desirability = 1.000000
di	= 8.1159 , desirability = 1.000000
Area	= 16.8040 , desirability = 1.000000
Composite Desirability = 1.000000	



รูปที่ 4.16 กราฟแสดง Optimization plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมวลด้วยโปรแกรม MINITAB Release 15 แสดงตามรูปที่ 4.16 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ดังนี้

1. แรงกด (F) ค่าที่เหมาะสม คือ แรงกด เท่ากับ 3.3 กิโลนิวตัน
2. เวลาเชื่อม (Tw) ค่าที่เหมาะสม คือ เวลาเชื่อม เท่ากับ 25 วินาที
3. กระแสเชื่อม (I) ค่าที่เหมาะสม คือ กระแสเชื่อม เท่ากับ 10.0 กิโลแอมแปร์
4. เวลาถดถ่วง (Th) ค่าที่เหมาะสม คือ เวลาถดถ่วง เท่ากับ 50 วินาที
5. รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) ค่าที่เหมาะสม คือ ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร
6. รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) ค่าที่เหมาะสม คือ ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร

โดยมีระยะการทำนายคุณภาพของรอยเชื่อม ดังนี้ ระยะการซึมลึก1 (t1) เท่ากับ 1.20 มิลลิเมตร ระยะการซึมลึก2 (t2) เท่ากับ 1.05 มิลลิเมตร ขนาดของรอยเชื่อม (di) เท่ากับ 8.12 มิลลิเมตร และ พื้นที่ของรอยเชื่อม (area) เท่ากับ 16.80 ตารางมิลลิเมตร มีค่าความพอใจเท่ากับ 1.0

4.5 การยืนยันผลการทดลอง

เป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยปรับตั้งค่าปัจจัยแรงกด (F) เท่ากับ 3.3 กิโลนิวตัน เวลาเชื่อม (Tw) เท่ากับ 25 วินาที กระแสเชื่อม (I) เท่ากับ 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาถดถ่วง (Th) เท่ากับ 50 วินาที รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง (UpET-LowET) ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร โดยทดลองทำซ้ำทั้งหมดเท่ากับ 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึมลึก1 (t1) มม.	ระยะการซึมลึก2 (t2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.	พื้นที่ของรอยเชื่อม (area) ตร.มม.
ค่าทำนาย	1.20	1.05	8.12	16.80
1	1.17	1.06	8.33	16.14
2	1.15	1.07	8.48	16.26
3	1.15	1.05	8.18	16.05
ค่าเฉลี่ย	1.16	1.06	8.33	16.15
% ความแตกต่าง	3.33%	0.95%	2.59%	3.87%

จากการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าค่าการปรับตั้งค่าระดับปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล และนำค่าระดับปัจจัยมาทำการเชื่อมชิ้นงานทดลองยืนยันผล ชิ้นงานทั้งหมด 3 ชิ้น ลักษณะรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.18 โดยค่าเฉลี่ยของระยะการซึมลึก1 (t1) เท่ากับ 1.16 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณระยะการซึมลึก1 ของรอยเชื่อมจากสมการที่ 4.1 ที่ค่าเท่ากับ 1.20 มิลลิเมตร ซึ่งหากเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อยืนยันผลกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความแตกต่างกับการคำนวณ 3.33% จากตารางที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าเฉลี่ยของระยะการซึมลึก2 (t2) เท่ากับ 1.06 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าระยะการซึมลึก2 เท่ากับ 1.05 มิลลิเมตร หากเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อยืนยันผลกับค่าที่คำนวณที่ได้จากสมการที่ 4.2 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความแตกต่างกับการคำนวณ 0.95% จากตารางที่ 4.18 โดยค่าเฉลี่ยขนาดของรอยเชื่อม (di) ที่วัดค่าได้เท่ากับ 8.33 มิลลิเมตร หากเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อยืนยันผลกับค่าที่คำนวณที่ได้จากสมการที่ 4.3 เท่ากับ 8.12 มิลลิเมตร ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความแตกต่างกับการคำนวณ 2.59% และพื้นที่ของรอยเชื่อม (area) ค่าเฉลี่ยวัดค่าจากผลการทดลองมีค่าเฉลี่ย 16.15 มิลลิเมตร หากเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อยืนยันผลกับค่าที่คำนวณที่ได้จากสมการที่ 4.4 เท่ากับ 16.8 ตารางมิลลิเมตร ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความแตกต่างกับการคำนวณ 3.87% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเพียงพอที่จะทำนายค่าคุณภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร เมื่อนำค่าปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมไปทำการเชื่อมบนเงื่อนไขปัจจัยการเชื่อมเดียวกันโดยเปลี่ยนเครื่องจักรในการเชื่อมที่เป็นเครื่องหมายการค้า และรุ่นการผลิตเดียวกัน การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมแสดงดังตารางที่ 4.19 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหการอยเชื่อมโดยเฉลี่ย ได้แก่ ระยะการซึมลึก1 มีค่า 1.15 มิลลิเมตร ระยะการซึมลึก2 มีค่า 1.03 มิลลิเมตร ขนาดของรอยเชื่อมมีค่า 8.00 มิลลิเมตร และพื้นที่ของรอยเชื่อมมีค่า 16.05 ตารางมิลลิเมตร หากเปรียบเทียบผลการทดลองของการเชื่อมตามตารางที่ 4.19 กับ ค่าที่คำนวณจากสมการที่ 4.1 ถึง สมการที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยจากข้อมูลผลการทดลองของระยะการซึมลึก1 (t1) มีความแตกต่าง 4.17% ระยะการซึมลึก2 (t2) มีความแตกต่าง 1.90% ขนาดของรอย (di) มีความแตกต่าง 1.48% และพื้นที่ของรอยเชื่อม (area) ความแตกต่าง 4.46% จากผลการทดลองจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างมีค่าน้อยกว่า 5% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าคุณภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมโดยปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดสามารถเชื่อมบนเครื่องเชื่อมที่เป็นเครื่องหมายการค้า และรุ่นการผลิตเดียวกันได้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองเพื่อการยืนยันผลจากเครื่องเชื่อมเครื่องหมายการค้า และรุ่นการผลิตเดียวกัน

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึมลึก1 (t1) มม.	ระยะการซึมลึก2 (t2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.	พื้นที่ของรอยเชื่อม (area) ตร.มม.
ค่าทำนาย	1.20	1.05	8.12	16.80
1	1.15	1.01	8.04	16.10
2	1.18	1.08	7.97	16.01
3	1.13	1.01	7.99	16.03
ค่าเฉลี่ย	1.15	1.03	8.00	16.05
% ความแตกต่าง	4.17%	1.90%	1.48%	4.46%

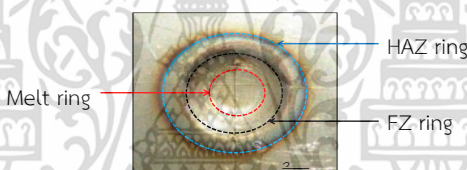
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะ และคุณสมบัติทางกล

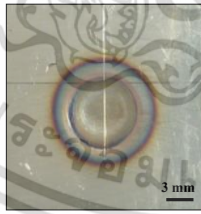
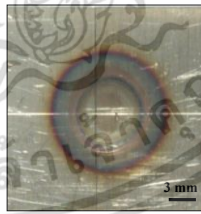
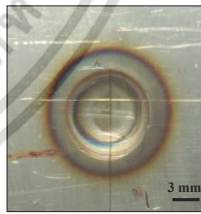
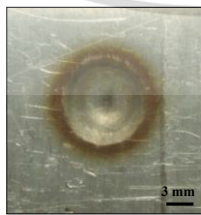
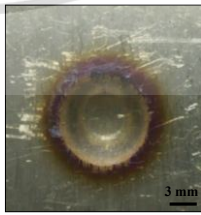
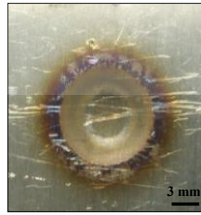
ผลการทดลองได้จากการออกแบบการทดลองตามตารางที่ 3.10 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะโดยจะศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Appearance) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่แตกต่างกัน

4.6.1 ลักษณะทางกายภาพ (Appearance)

ผลการทดลองที่แสดงลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมเกิดจากการใช้ปัจจัยการเชื่อมโดยคงที่ได้แก่ ปัจจัยแรงกดระดับ 3.3 กิโลนิวตัน เวลากดค้างระดับ 50 ไชเคิล และรูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร แต่จะปรับเปลี่ยนกระแสเชื่อม ตั้งแต่ระดับ 7.0, 8.5, 10.0 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อมตั้งแต่ระดับ 25, 38, 50 ไชเคิล ตามลำดับ รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม โดยวัสดุพื้นจะหลอมละลายเพิ่มขึ้นจากด้านในของวัสดุพื้น และยึดออกเป็นรูปวงแหวน 3 วงโดยปรากฏเป็นรอยเชื่อมโดยเรียงลำดับดังนี้ วงในสุดเป็นวงแหวนบ่อหลอมละลาย (Melt ring) วงแหวนกลางเป็นวงแหวนรอยเชื่อม (Fusion zone ring หรือ FZ ring) และวงแหวนนอกสุดเป็นวงแหวนบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม (Heat affected zone หรือ HAZ ring)



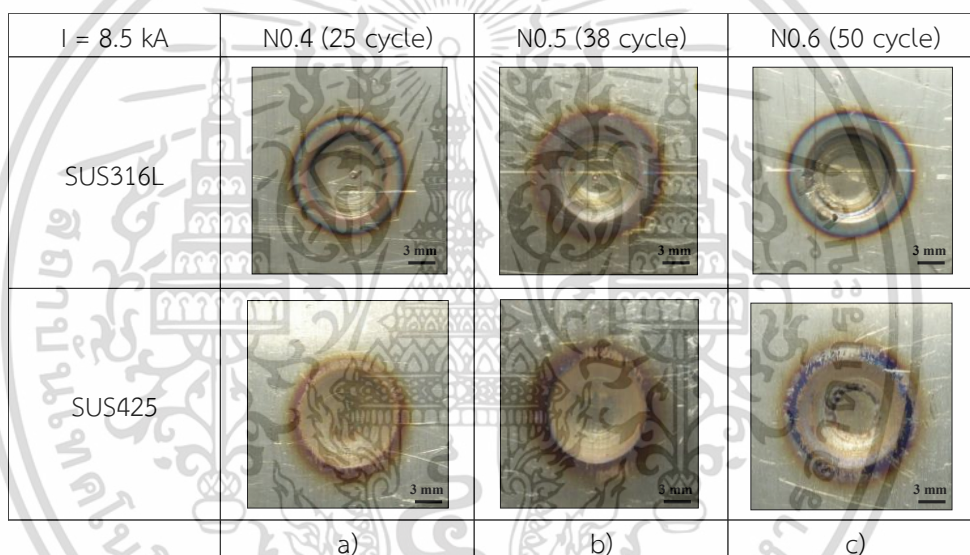
รูปที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม

	I = 7 kA	N0.1 (25 cycle)	N0.2 (38 cycle)	N0.3 (50 cycle)
SUS316L				
SUS425				
	a)	b)	c)	

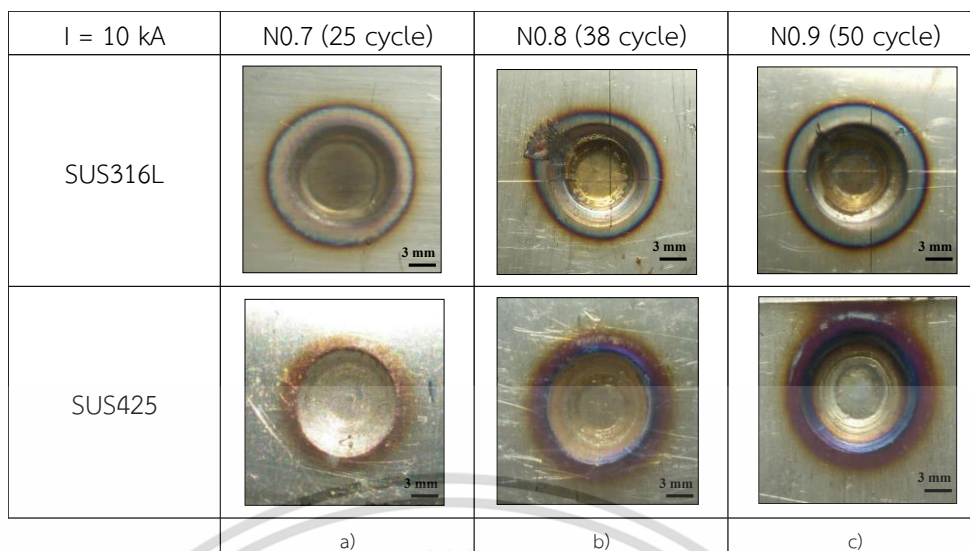
รูปที่ 4.18 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมคงที่ 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม (a) 25 ไชเคิล, (b) 38 ไชเคิล, (c) 50 ไชเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง รูปที่ 4.20 โดยทั่วไปลักษณะของรอยเชื่อมที่ดีจะต้องมีความเรียบ เป็นรูปวงแหวนหรือรูปไข่ ที่มองเห็นชัดเจน และไม่มีร่องรอยของการแตกกระจายของน้ำโลหะ ไม่มีเศษของหัวอิเล็กโทรดติดกับรอยเชื่อม ไม่มีรู ไม่ปรากฏรอยแตก [17], [63] กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดหากการใช้ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกันจะทำให้สีของรอยเชื่อมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [54] เมื่อปัจจัยการเชื่อมอยู่ในระดับที่สูงสีของรอยเชื่อมจะมีสีเหลืองเข้ม เนื่องจากเกิดพลังงานความร้อนสูงที่กระจายตัวภายในเนื้อวัสดุ จากผลการทดลองจะเห็นว่าความเข้มของสีจะมีค่าสูงขึ้นในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนทั้ง 3 วงก็มีขนาดที่เพิ่มขึ้นตามระดับปัจจัยการเชื่อมที่สูงขึ้น การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมสามารถอธิบายเป็นพื้นฐานของการทดสอบแบบไม่ทำลายได้อย่างมีนัยสำคัญ และสีของรอยเชื่อมสามารถบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานความร้อนที่กระจายตัวในรอยเชื่อม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนแต่ละวงสามารถประมาณการขนาดของรอยเชื่อมได้เช่นกัน



รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมคงที่ 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม (a) 25 ไซเคิล, (b) 38 ไซเคิล, (c) 50 ไซเคิล



รูปที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมคงที่ 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม (a) 25 ไซเคิล, (b) 38 ไซเคิล, (c) 50 ไซเคิล

4.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

รูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยปัจจัยการเชื่อมที่ต่างกัน โครงสร้างมหภาคจากปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกันจะปรากฏรูปร่างของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันโดยคุณภาพของรอยเชื่อมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้น ผลการทดลองได้จากการออกแบบการทดลองตามตารางที่ 3.10 เมื่อนำขึ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไปทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.20

ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการทดลองการปรับเปลี่ยนปัจจัยกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม

ลำดับการทดลอง	ระยะเวลาเชื่อมลึกลึก 1 (t1) มม.	ระยะเวลาเชื่อมลึกลึก 2 (t2) มม.	ระยะการกัดลึก 1 (h1) มม.	ระยะการกัดลึก 2 (h2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.
1	1.05	1.12	0.17	0.22	6.01
2	1.06	1.11	0.17	0.24	6.03
3	1.08	1.09	0.24	0.28	6.16
4	1.05	1.19	0.25	0.24	7.13
5	1.06	1.16	0.26	0.27	7.53
6	1.03	1.07	0.29	0.29	7.22
7	1.06	1.16	0.33	0.34	8.03
8	0.97	0.98	0.52	0.35	7.02
9	0.91	0.94	0.61	0.39	6.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล



รูปที่ 4.22 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล



รูปที่ 4.23 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล



รูปที่ 4.24 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล



รูปที่ 4.26 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล



รูปที่ 4.27 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล



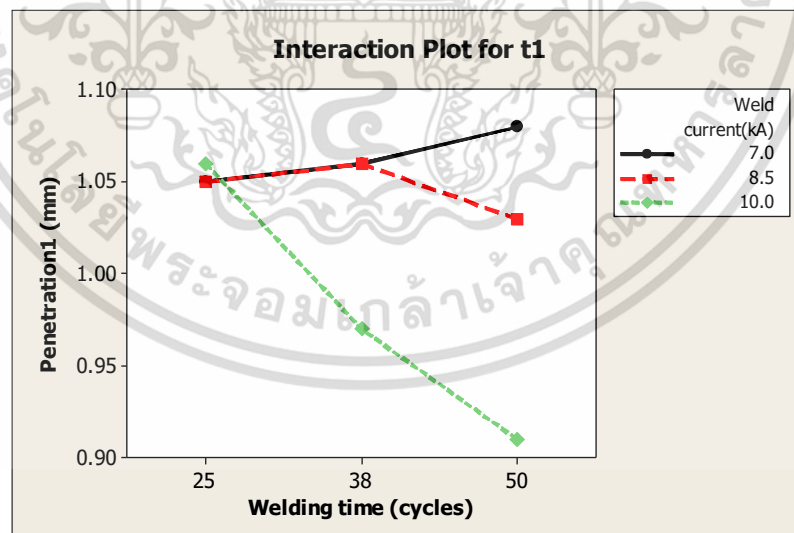
รูปที่ 4.28 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



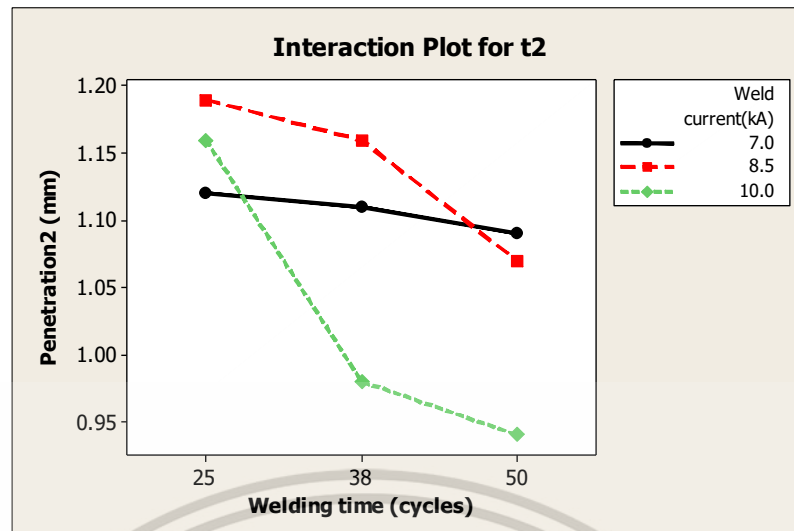
รูปที่ 4.29 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

การพิจารณาคุณลักษณะทางคุณภาพตามมาตรฐาน JIS Z 3139 ที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ ระยะการซึมลึกต้องมีค่าระหว่าง 0.3 - 1.2 มิลลิเมตร ระยะการกตลิกต้องมีค่าไม่เกิน 0.45 มิลลิเมตร และขนาดของรอยเชื่อมต้องมีค่ามากกว่า 5.0 มิลลิเมตร จากข้อมูลการทดลองพบว่า ระยะการซึมลึก1 (t_1) ระยะการซึมลึก2 (t_2) ระยะการกตลิก2 (h_2) และขนาดของรอยเชื่อม (d_i) ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ส่วนระยะการกตลิก1 (h_1) มี 2 ผลการทดลองที่มีค่าเกินค่ามาตรฐานที่เกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมจะเห็นได้ว่าขนาดของรอยเชื่อมมีความแตกต่างกัน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลง รูปแบบของอันตรกิริยาของกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมมีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม [9], [67] จึงพิจารณาอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองดังนี้



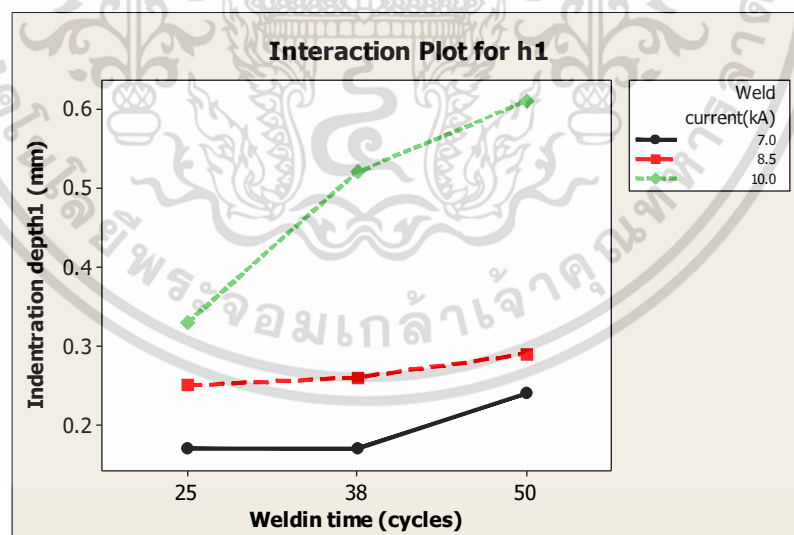
รูปที่ 4.30 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ระยะการซึมลึก1 (t_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



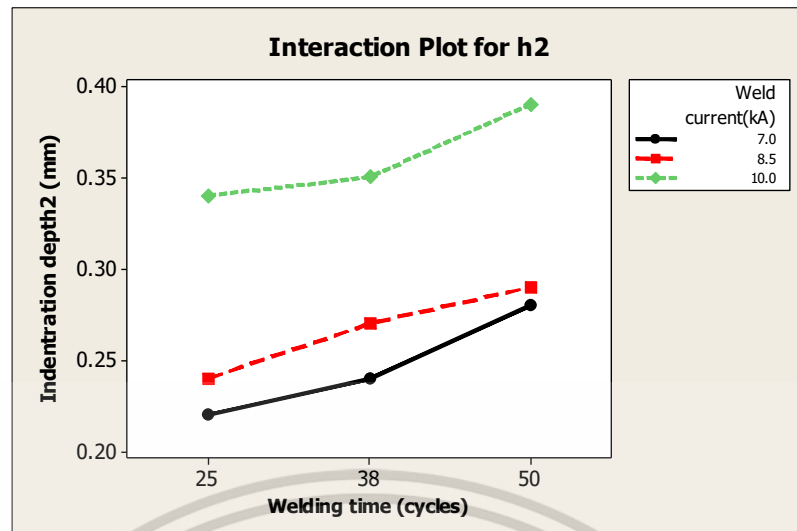
รูปที่ 4.31 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ระยะการซึมลึก 2 (t2)

รูปที่ 4.30 การพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ระยะการซึมลึก 1 (t1) จะเห็นได้ว่า การใช้กระแสเชื่อม 7.0 และ 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะการซึมลึก 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาเชื่อมที่สูงขึ้น ถึงอย่างไรก็ตามการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ระยะการซึมลึก 1 จะลดลง สำหรับการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ระยะการซึมลึก 1 มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาเชื่อมที่สูงขึ้น รูปที่ 4.31 จะเห็นว่า การใช้กระแสเชื่อมที่สูงขึ้นจะทำให้ ระยะการซึมลึก 2 มีค่าลดลงตามลำดับเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25, 38 และ 50 ไซเคิล



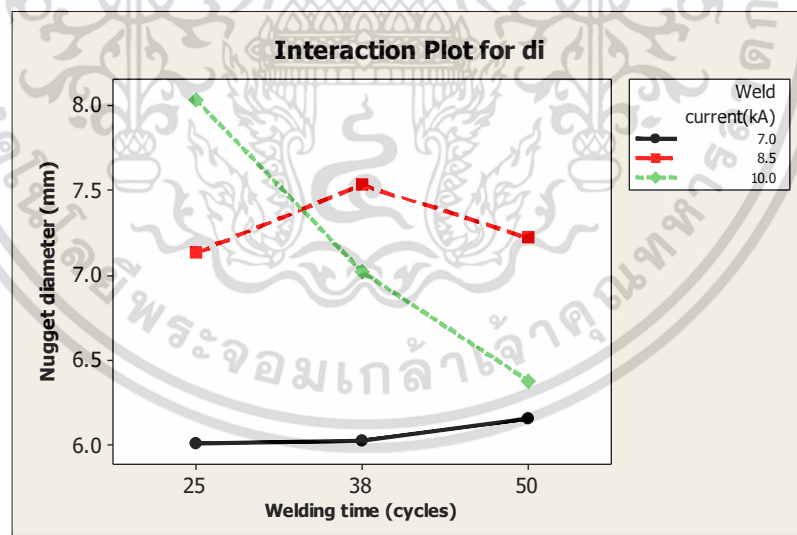
รูปที่ 4.32 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ระยะการกดลึก 1 (h1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ระยะการกดลึก2 (h2)

จากรูปที่ 4.32 การใช้กระแสเชื่อม 7.0 และ 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะการกดลึก1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25, 38 และ 50 ไซเคิล สำหรับการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ระยะการกดลึก1 จะมีค่าเกินมาตรฐานเมื่อใช้เวลาเชื่อม 38 และ 50 ไซเคิล จากรูปที่ 4.33 การใช้กระแสเชื่อมที่สูงขึ้นจะทำให้ ระยะการกดลึก2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25, 38 และ 50 ไซเคิล

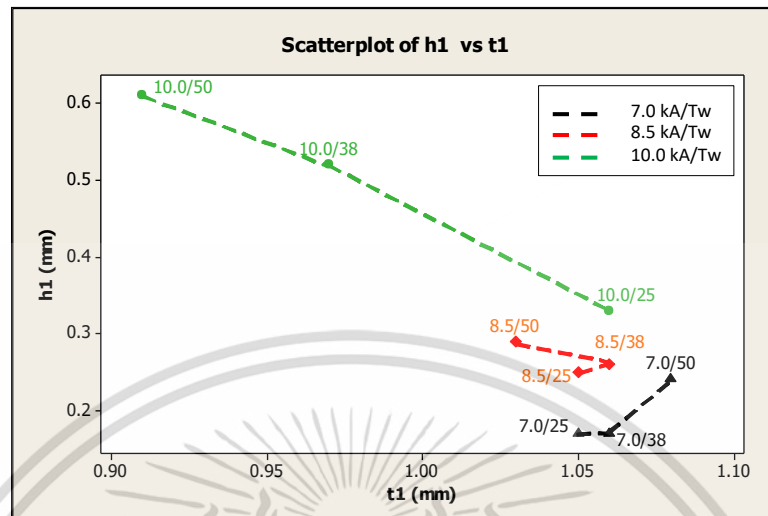


รูปที่ 4.34 อันตรกิริยาระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ขนาดของรอยเชื่อม (di)

จากรูปที่ 4.34 การใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ ขนาดของรอยเชื่อม (di) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาเชื่อมเพิ่มขึ้น การใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ขนาดของรอยเชื่อม (di) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25 และ 38 ไซเคิล และจะลดลงใช้เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล การใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ขนาดของรอยเชื่อม (di) จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล และจะลดลงใช้เวลาเชื่อม

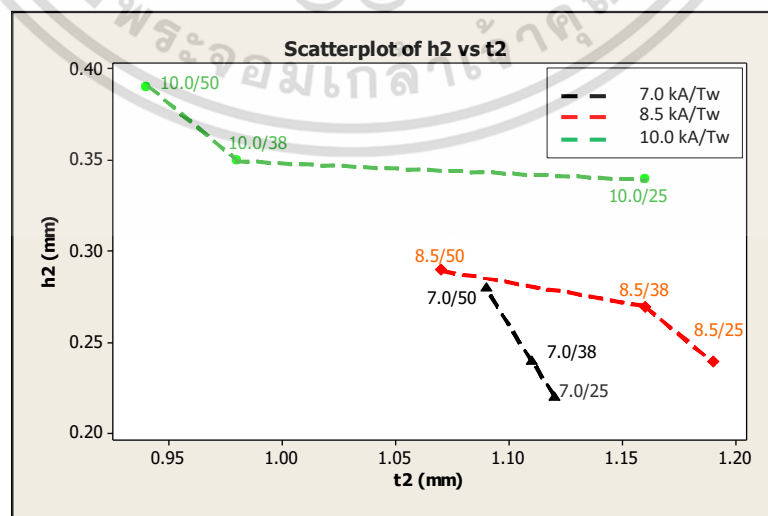
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38 ถึง 50 ไมโครวินาที การพิจารณาความสัมพันธ์ของระยะเวลาซึมลึก และระยะเวลาการกตลิกโดยแผนภาพการกระจาย (Scatter plot) แสดงดังรูปที่ 4.35 ถึง รูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาซึมลึก1 (t1) กับ ระยะเวลาการกตลิก1 (h1)

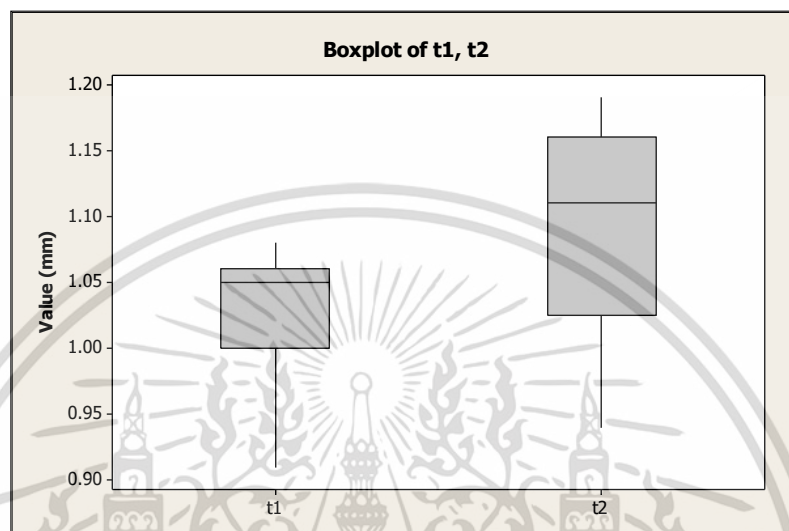
จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาซึมลึก1 (t1) กับ ระยะเวลาการกตลิก1(h1) จะเห็นว่าเมื่อใช้กระแสเชื่อมที่ระดับ 7.0 กิโลแอมแปร์ เมื่อเพิ่มเวลาเชื่อมให้สูงขึ้น ระยะเวลาซึมลึก1 (t1) แปรผันโดยตรงกับระยะเวลาการกตลิก1 (h1) นั่นคือ การเพิ่มกระแสเชื่อม และการเพิ่มเวลาเชื่อมให้สูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาซึมลึก1 (t1) และระยะเวลาการกตลิก1 (h1) มีค่าสูงขึ้น การใช้กระแสเชื่อมที่ระดับ 8.5 กิโลแอมแปร์ เมื่อเพิ่มเวลาเชื่อมเพิ่มจาก 25 ไมโครวินาที เป็น 38 ไมโครวินาที ระยะเวลาซึมลึก1 (t1) และระยะเวลาการกตลิก1 (h1) มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาเชื่อม 50 ไมโครวินาที ระยะเวลาซึมลึก1 (t1) ลดลง และระยะเวลาการกตลิก1 (h1) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ปัจจัยการเชื่อมดังกล่าวเกิดความร้อนในบริเวณรอยเชื่อมที่สูงเกินไป และเกิดการแตกกระจายของน้ำโลหะเหลว สำหรับการเชื่อมที่ระดับ 10.0 กิโลแอมแปร์ เมื่อเพิ่มเวลาเชื่อมให้สูงขึ้น จะทำให้ระยะเวลาซึมลึก1 (t1) และระยะเวลาการกตลิก1 (h1) มีค่าลดลง



รูปที่ 4.36 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาซึมลึก2 (t2) กับ ระยะเวลาการกตลิก2 (h2)

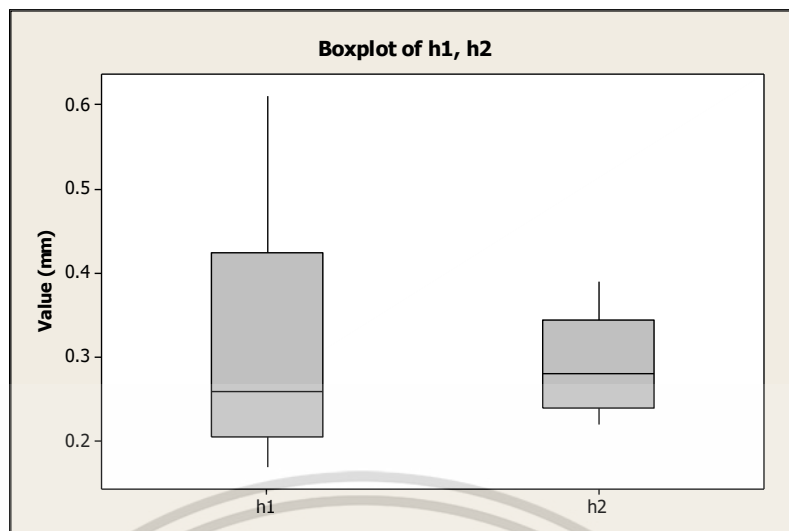
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการซึมลึก2 (t2) กับ ระยะการกดลึก2 (h2) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อม และเพิ่มเวลาเชื่อม ระยะการซึมลึก2 (t2) แปรผกผันกับระยะการกดลึก2 (h2) อย่างเห็นได้ชัด หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมให้สูงขึ้นจะทำให้ระยะการซึมลึก2 (t2) และระยะการกดลึก2 (h2) มีค่าลดลง



รูปที่ 4.37 กราฟรูปกล่อง (Box Plot) ของระยะการซึมลึก1 (t1) และระยะการซึมลึก2 (t2)

จากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ต่างกันของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่า 1.7×10^{-5} ต่อองศาเซลเซียส และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีค่า 1.6×10^{-5} ต่อองศาเซลเซียส การนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่า 15 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส การนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีค่า 24.2 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่า 7.5×10^{-7} ohm-m และค่าความต้านทานของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีค่า 6.1×10^{-7} ohm-m จากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ต่างกัน [68] ดังกล่าวจึงทำให้ค่าความร้อนจากการเชื่อมเกิดภายในของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L จะมีค่าต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ดังนั้นจึงทำให้ระยะการซึมลึก1 (t1) มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าระยะการซึมลึก2 (t2) แสดงดังรูปที่ 4.37 ส่วนขนาดของรอยเชื่อมฝังวัสดุ SUS316L มีขนาดใหญ่กว่ารอยเชื่อมฝังวัสดุ SUS425 เนื่องจากค่าความต้านทานของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 [9]

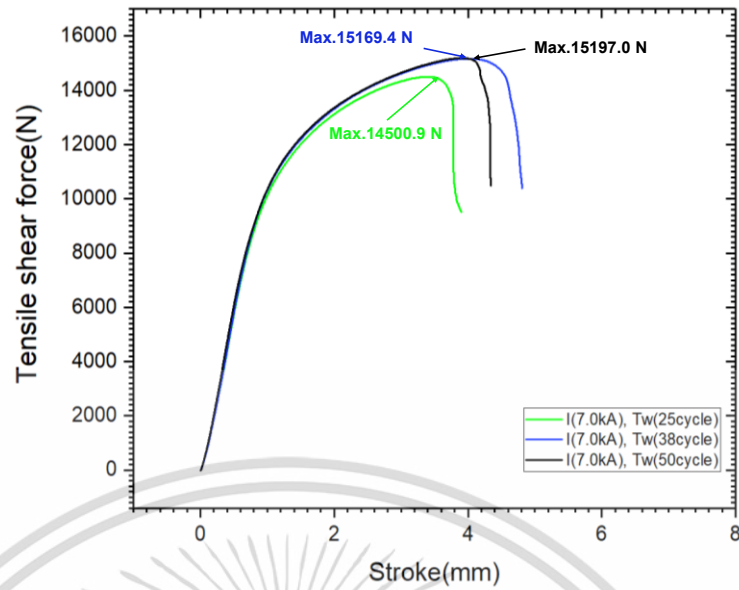


รูปที่ 4.38 กราฟรูปกล่อง (Box Plot) ของระยะการกดลึก1 (h1) และระยะการกดลึก2 (h2)

รูปที่ 4.38 จะเห็นว่าระยะการกดลึก1 (h1) ของรอยเชื่อมฝั่งด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L จะมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าระยะการกดลึก2 (h2) ของรอยเชื่อมฝั่งด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ได้แก่ ความแข็งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่า 195 HV และความแข็งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีค่า 167 HV ค่าต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่าไม่ต่ำกว่า 520 N/mm² และค่าต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีค่าไม่ต่ำกว่า 410 N/mm²

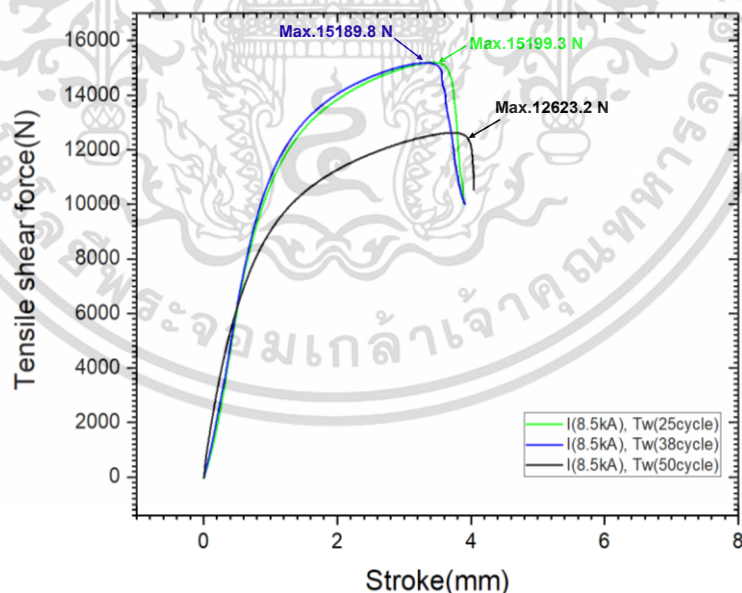
4.6.3 ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม (Tensile-shear force)

ในการประเมินค่าความสามารถการต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ประเมินด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงเฉือน ตัวอย่างชิ้นงานถูกจัดเตรียมตามมาตรฐาน JIS Z 3136 ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มาตรฐานค่าแรงดึงสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมความหนา 1.5 มิลลิเมตร อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 3140 ชิ้นงานเชื่อมต้องมีแรงดึงมากกว่า 7,650 นิวตัน



รูปที่ 4.39 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล 38 ไซเคิล และ 50 ไซเคิล

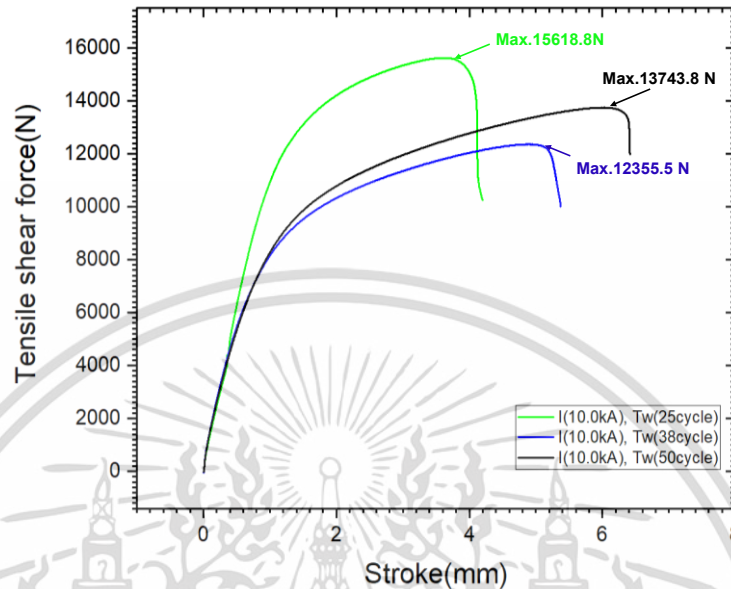
จากรูปที่ 4.39 แสดงกราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม คงที่ 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล 38 ไซเคิล และ 50 ไซเคิล จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่า 14,500.9 นิวตัน 15,169.4 นิวตัน และ 15,197.0 นิวตัน ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มเวลาเชื่อมจะทำให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.40 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล 38 ไซเคิล และ 50 ไซเคิล

จากรูปที่ 4.40 จะเห็นว่าค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยเวลาเชื่อม 25 และ 38 ไซเคิล มีค่าแรงดึงเฉือนใกล้เคียงกันคือ 15,199.3 นิวตัน และ 15,189.8 นิวตันตามลำดับ และค่าแรงดึงเฉือนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะลดลงเมื่อใช้เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ค่าแรงดึงเฉือนที่ได้จากการทดลองมีค่า 12,623.2 นิวตัน เนื่องจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ให้ค่าความร้อนในการเชื่อมที่สูงเกินไป [69] จึงเกิดการกระจายของน้ำโลหะเหลวระหว่างการเชื่อม (Expulsion)



รูปที่ 4.41 กราฟค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล 38 ไซเคิล และ 50 ไซเคิล

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เป็นชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนสูงที่สุดเท่ากับ 15,618.8 นิวตัน สำหรับการใช้เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เป็นชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนต่ำที่สุดเท่ากับ 12,355.5 นิวตัน และการใช้เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เป็นชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนเท่ากับ 13,743.8 นิวตัน จะเห็นได้ว่าการเชื่อมด้วยการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ค่าแรงดึงเฉือนจะมีค่าต่ำเมื่อใช้เวลาเชื่อมที่สูงขึ้น เนื่องเกิดการกระจายของน้ำโลหะเหลวระหว่างการเชื่อม (Expulsion) [53] ลักษณะการกระจายของน้ำโลหะเหลวแสดงตามรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ลักษณะการกระจายของน้ำโลหะเหลวที่เกิดจากการกระแสเชื่อม/เวลาเชื่อม
 (a) 8.5 กิโลแอมแปร์/50 ไซเคิล (b) 10.0 กิโลแอมแปร์/38 ไซเคิล
 (c) 10.0 กิโลแอมแปร์/50 ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสามารถด้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ของ กระแส เชื่อม และเวลาเชื่อม กล่าวคือ ค่าความร้อนที่เกิดกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่เหมาะสมทำให้เกิด การขยายขอบเขตของรอยเชื่อมซึ่งส่งผลให้ค่าความสามารถด้านทานแรงดึงเฉือนสูงขึ้น [70] โดย ค่าความร้อนในการเชื่อมเกิดจากอัตราปฏิกริยาต่อกันของ 3 ปัจจัยการเชื่อม นั่นคือ แรงกดของ หัวอิเล็กโทรด กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม [71] สำหรับงานวิจัยในหัวข้อนี้ได้กำหนดให้แรงกดของ หัวอิเล็กโทรดเป็นค่าคงที่ดังนั้น กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมจึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดแรงดึงเฉือน ที่เพิ่มขึ้น เมื่ออ้างอิงถึงสมการค่าความร้อนของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสมการที่ 2.2 จะเห็น ว่าค่ากระแสเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกว่าเวลาเชื่อม ปัจจัยกระแสเชื่อมเป็น ตัวนำให้เกิดความร้อนในรอยเชื่อม [72] เวลาเชื่อมเป็นปัจจัยที่ช่วยให้อุณหภูมิบริเวณจุดสัมผัสของ ชิ้นงาน และบริเวณหลอมละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นรอยเชื่อม การเพิ่มค่ากระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมมากเกินไปจะทำให้เกิดพฤติกรรมกระจายของน้ำโลหะเหลวระหว่างการเชื่อม [53] ซึ่งจะ ทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง [23], [73] ถึงแม้ว่าอย่างไรก็ตามทุกผลการทดลองค่าความสามารถ ด้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน

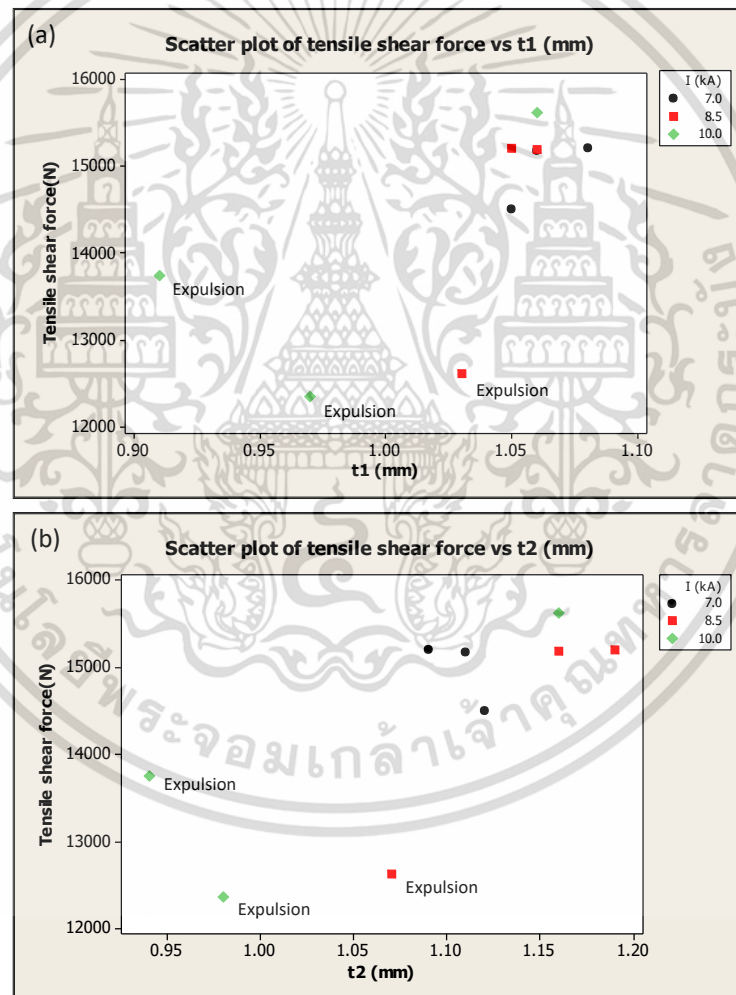


รูปที่ 4.43 ลักษณะการแยกออกจากกันของรอยเชื่อมที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเฉือน

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงเฉือน แสดงในรูปที่ 4.43 ลักษณะการแยกออกจากกันของรอย เชื่อมที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นแบบเฉือนเนื่องงานทดสอบ (Pullout failure mode) โดย เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันทั้งหมดทุกชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจะมีการฉีกจากแผ่นงานแผ่นใดแผ่นหนึ่ง [74], [75] ในงานวิจัยนี้ชิ้นงานทดสอบเริ่มจากฉีกจากแผ่นงานด้านเหล็กกล้าไร้สนิมฝั่งด้าน SUS425 โดยตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นเป็นบริเวณวัสดุพื้นติดกับบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เนื่องจากเป็นจุดที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด [76] จากนั้นจะแพร่ขยายออกไปยังวัสดุพื้นแล้วเนื้อ วัสดุพื้นจะขาดในที่สุด การแพร่รอยแตก/รอยแยกแบบกระทันหันเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอ ของการเกิดการรอยร้าว และความเค้นที่เกิดด้านตรงข้ามของแรงดึง [71] ตำแหน่งของการหลุดออก จากกันเกิดขึ้น ณ บริเวณวัสดุพื้นใกล้กับบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน จากผลการ ทดลองชี้ให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงบริเวณวัสดุพื้นต่ำกว่าบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณพื้นที่รอยเชื่อม การฉีกหรือหลุดออกจากกันของชิ้นงานบริเวณดังกล่าวสามารถรับประกัน ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ผลการทดสอบของทุกชิ้นงานค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนผ่านตาม มาตรฐาน JIS Z 3140 และเป็นที่น่าสังเกตว่าแผ่นงานด้านเหล็กกล้าไร้สนิมฝั่งด้าน SUS316L ไม่เกิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสียรูปหรือไม่ได้รับเสียหายจากการทดสอบเนื่องจากคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมฝั่งด้าน SUS425 [17] ตามแสดงในตารางที่ 3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยทั่วไปชิ้นงานทดสอบจะเกิดการขาดหรือการแยกออกจากกันของวัสดุสองชนิดมักจะเกิดขึ้นในพื้นที่หรือบริเวณที่มีความแข็งแรงน้อย

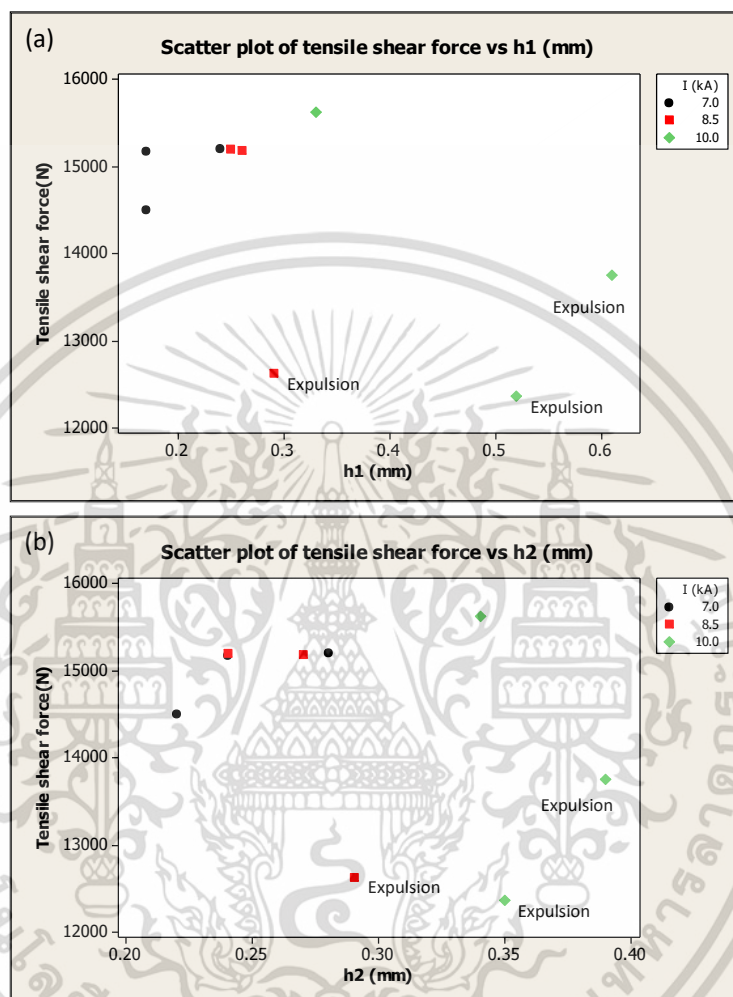
จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะทำให้ทราบว่ามี 3 ผลการทดลองเกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจาย (Expulsion) ระหว่างการเชื่อม ซึ่งเกิดจากการกำหนดปัจจัยการเชื่อม ได้แก่ กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทางคุณภาพกับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนโดยแผนภาพการกระจาย (Scatter plot) แสดงดังรูปที่ 4.44 ถึง รูปที่ 4.46



รูปที่ 4.44 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ระยะการเชื่อมตีก1 (t1) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน (b) ระยะการเชื่อมตีก2 (t2) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน

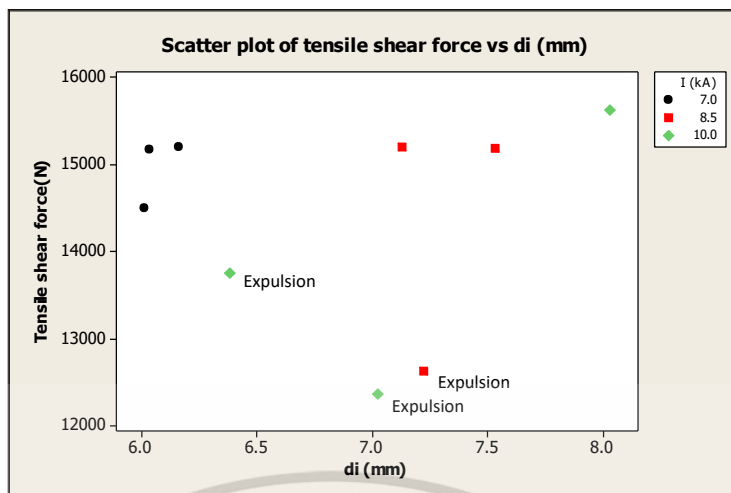
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการซึมลึก 1,2 (t_1, t_2) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนหากไม่พิจารณาผลการทดลองที่ทำให้เกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจาย จะเห็นว่า การกระจายตัวของผลการทดลองจะกระจายตัวด้านบนขวาของแผนภาพ อาจกล่าวได้ว่าเมื่อระยะการซึมลึก 1 (t_1) และระยะการซึมลึก 2 (t_2) มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้น



รูปที่ 4.45 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ระยะการกัดลึก 1 (h_1) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน (b) ระยะการกัดลึก 2 (h_2) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน

จากรูปที่ 4.45 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกัดลึก 1 (h_1) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนหากไม่พิจารณาผลการทดลองที่ทำให้เกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจายจะเห็นว่า การกระจายตัวของผลการทดลองจะกระจายตัวด้านบนซ้ายของแผนภาพ อาจกล่าวได้ว่าเมื่อระยะการกัดลึก 1 (h_1) มีค่าต่ำ จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามจากรูปที่ 4.45 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกัดลึก 2 (h_2) กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนหากไม่พิจารณาผลการทดลองที่ทำให้เกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจาย จะเห็นว่าเมื่อระยะการกัดลึก 2 (h_2) มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้น



รูปที่ 4.46 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อม กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน

จากรูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อม กับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมหากไม่พิจารณาผลการทดลองที่ทำให้เกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจาย จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนจะมีค่าสูงเมื่อชิ้นงานเชื่อมมีขนาดของรอยเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น [77], [78]

4.6.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อม (Microhardness)

ค่าความแข็งจะวัดค่าจากชิ้นงานเชื่อมบริเวณวัสดุพื้น บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณพื้นที่รอยเชื่อม โดยมีระยะห่างของแต่ละจุด 0.5 มิลลิเมตรมีทิศทางตัดตามแนวขวางบนรอยเชื่อมทั้งสองฝั่งโดยระยะศูนย์ คือ จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อม ข้อมูลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.21 ถึง ตารางที่ 4.23 และกราฟแสดงค่าความแข็งแสดงในรูปที่ 4.47 ถึง รูปที่ 4.55

ตารางที่ 4.21 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล (หน่วย HV)

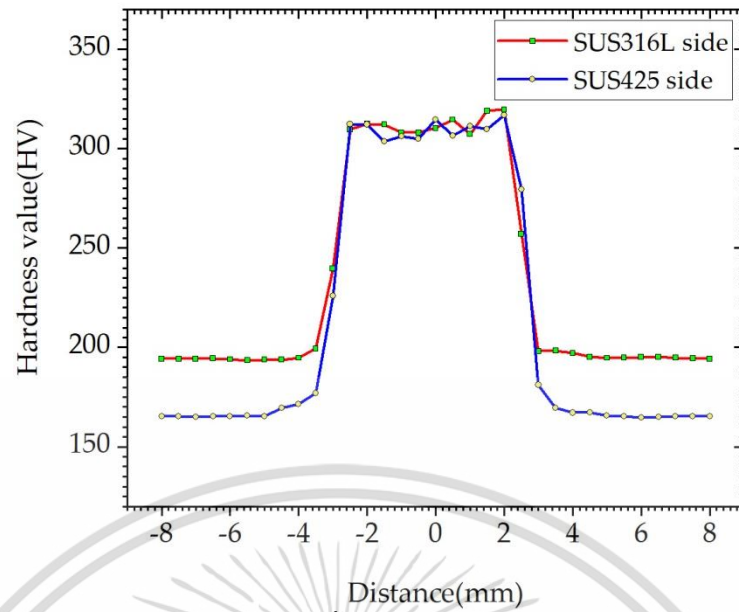
กระแสเชื่อม 7.0 กิโล แอมแปร์	เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล		
	ระยะการวัด	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
	-8.0	194.3	165.4	194.2	164.7	195.3	164.6
	-7.5	194.2	165.2	194.2	165.3	194.8	165.3
	-7.0	194.2	164.9	193.5	165.1	193.9	165.3
	-6.5	194.5	165.4	194.2	164.3	195.1	164.6
	-6.0	194.1	165.4	194.2	164.2	194.7	164.8
	-5.5	193.5	165.6	194.1	165.1	194.3	164.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

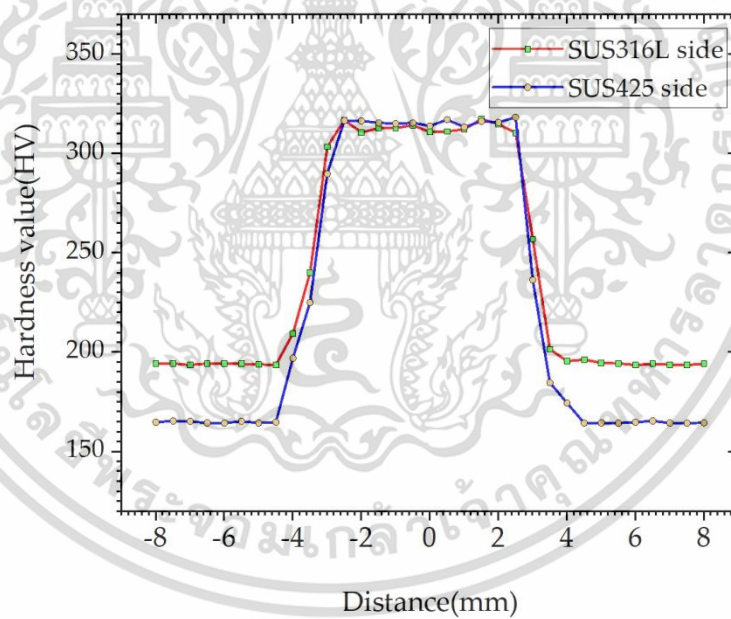
ตารางที่ 4.21 (ต่อ) ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล (หน่วย HV)

กระแสเชื่อม 7.0 กิโล แอมแปร์	เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
ระยะการวัด						
-5.0	193.8	165.3	193.8	164.3	195.8	163.0
-4.5	193.8	169.5	193.5	164.7	199.0	181.6
-4.0	194.7	171.4	209.3	196.9	206.3	186.0
-3.5	199.4	176.8	239.9	225.0	230.9	223.0
-3.0	239.8	225.9	303.3	289.7	294.4	273.3
-2.5	309.7	312.5	316.8	316.6	312.1	314.4
-2.0	312.5	312.2	310.6	316.4	320.6	321.7
-1.5	312.2	303.6	312.8	315.4	317.9	315.2
-1.0	308.1	306.3	312.8	315	321.3	319.2
-0.5	308.1	304.9	314.2	315.4	314.7	315.2
0.0	310.3	314.6	310.8	313.8	311.4	312.5
0.5	314.6	306.6	311.1	317.0	314.8	311.9
1.0	307.3	311.5	312.1	313.3	315.4	311.1
1.5	319.0	309.8	317.4	316.2	316.9	314.7
2.0	319.7	316.8	314.8	315.7	317.3	315.5
2.5	257.2	279.5	310.4	318.2	308.9	314.6
3.0	198.2	181.1	256.9	236.4	304.2	294.7
3.5	198.3	169.6	201.4	184.6	244.2	236.7
4.0	197.2	167.1	195.4	174.3	195.7	178.7
4.5	195.3	167.2	196.2	164.2	194.2	166.0
5.0	194.7	165.7	194.5	164.3	196.9	164.3
5.5	194.8	165.3	194.3	164.2	194.6	162.9
6.0	195.1	164.8	193.4	164.7	195.2	164.3
6.5	195.2	165.1	194.1	165.3	195.0	164.3
7.0	194.8	165.2	193.6	164.3	194.5	165.1
7.5	194.4	165.3	193.5	164.2	195.1	164.8
8.0	194.3	165.4	194.1	164.4	194.7	164.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

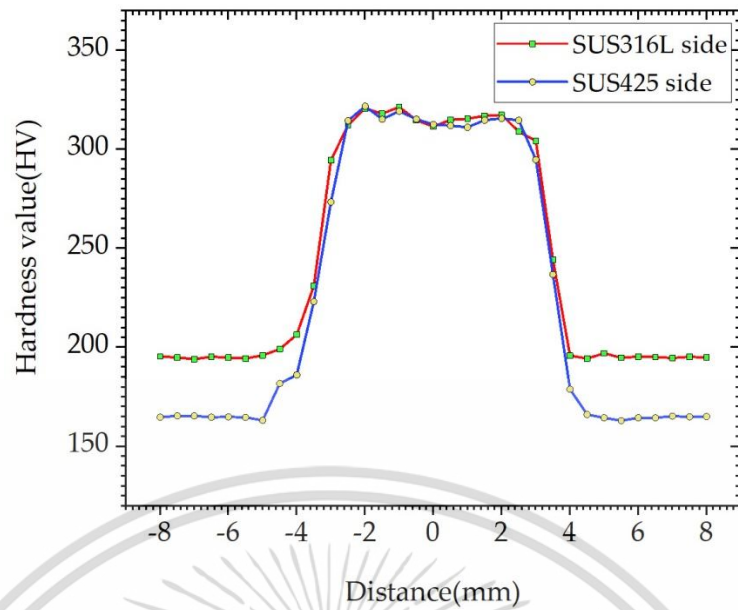


รูปที่ 4.47 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที



รูปที่ 4.48 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

ตารางที่ 4.22 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล 38 ไซเคิล และ 50 ไซเคิล (หน่วย HV)

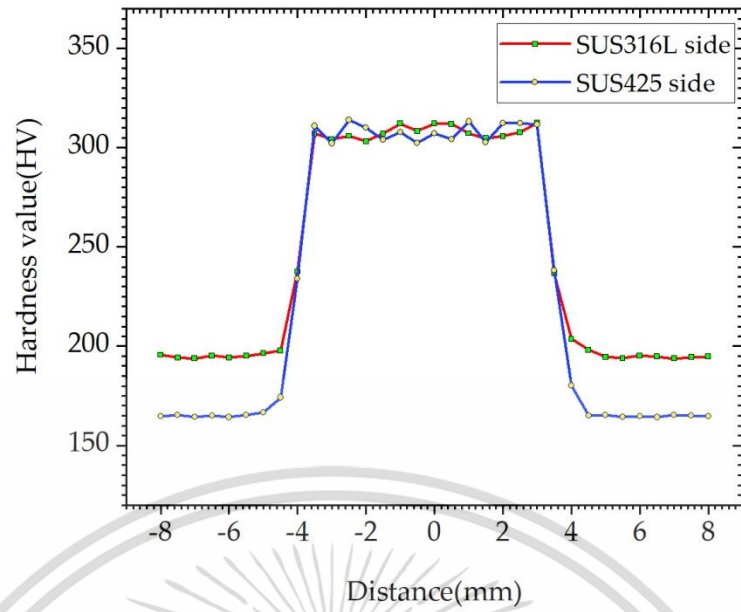
กระแสเชื่อม 8.5 กิโล แอมแปร์	เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล		เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล		เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
ระยะการวัด						
-8.0	195.6	164.8	195.2	166.4	195.4	164.9
-7.5	194.3	165.2	194.3	165.4	195.4	164.3
-7.0	193.8	164.3	195.0	164.9	196.4	164.2
-6.5	195.3	164.9	194.7	165.2	194.4	164.6
-6.0	194.3	164.2	194.8	164.8	194.9	165.0
-5.5	195.1	165.2	195.0	164.8	195.1	164.3
-5.0	196.3	166.6	194.3	164.3	197.9	166.4
-4.5	197.8	174.2	194.7	177.9	203.9	169.7
-4.0	237.6	234.1	240.4	222.6	261.3	177.9
-3.5	307.1	310.9	308.9	314.9	310.9	287.1
-3.0	304.2	302.2	308.8	314.8	313.0	298.8
-2.5	305.9	313.9	313.9	311.1	301.3	301.0
-2.0	303.3	310.2	319.1	324.6	303.0	307.6
-1.5	307.1	304.1	315.9	324.0	299.9	301.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

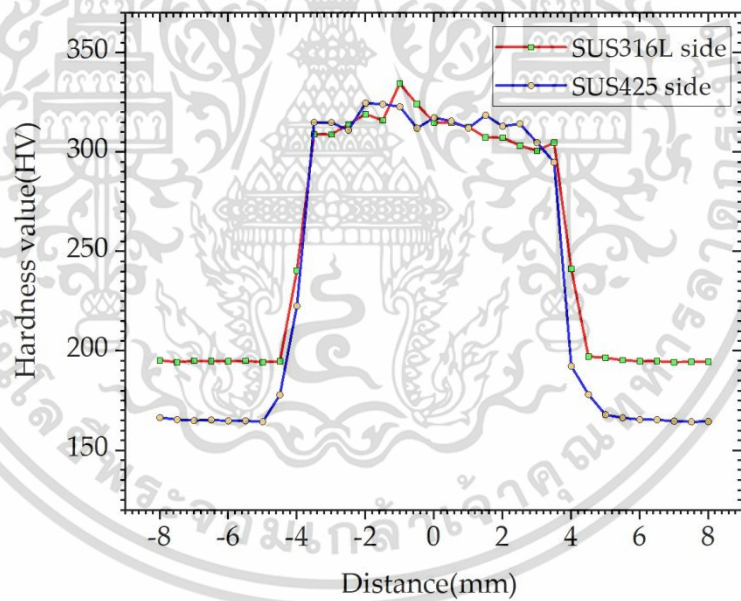
ตารางที่ 4.22 (ต่อ) ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์
เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล (หน่วย HV)

กระแสเชื่อม 8.5 กิโล แอมแปร์	เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
ระยะการวัด						
-1.0	312.1	307.8	334.5	322.8	312.2	304.5
-0.5	308.4	302.4	324.0	312.0	298.3	303.3
0.0	312.2	307.1	314.9	317.2	291.7	308.1
0.5	312.0	304.3	314.6	315.5	296.7	302.1
1.0	307.2	313.2	312.6	312.0	291.8	301.6
1.5	304.7	302.8	307.3	318.5	300.5	305.6
2.0	305.8	312.4	307.2	313.0	306.4	302.8
2.5	307.8	312.4	303.2	314.2	315.8	301.4
3.0	312.4	311.8	300.7	304.8	294.1	307.8
3.5	236.7	238.2	304.7	294.8	310.2	301.5
4.0	203.6	180.1	241.2	192.3	241.7	229.4
4.5	198.1	164.9	197.1	178.0	201.4	180.9
5.0	194.6	165.3	196.5	167.8	196.3	173.7
5.5	193.9	164.3	195.3	166.3	196.3	169.4
6.0	195.2	164.7	194.8	165.4	196.2	165.7
6.5	194.8	164.2	194.8	165.3	194.6	164.8
7.0	193.8	165.3	194.3	164.6	194.3	165.1
7.5	194.4	164.9	194.4	164.3	194.6	164.3
8.0	194.8	164.8	194.4	164.4	194.5	164.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

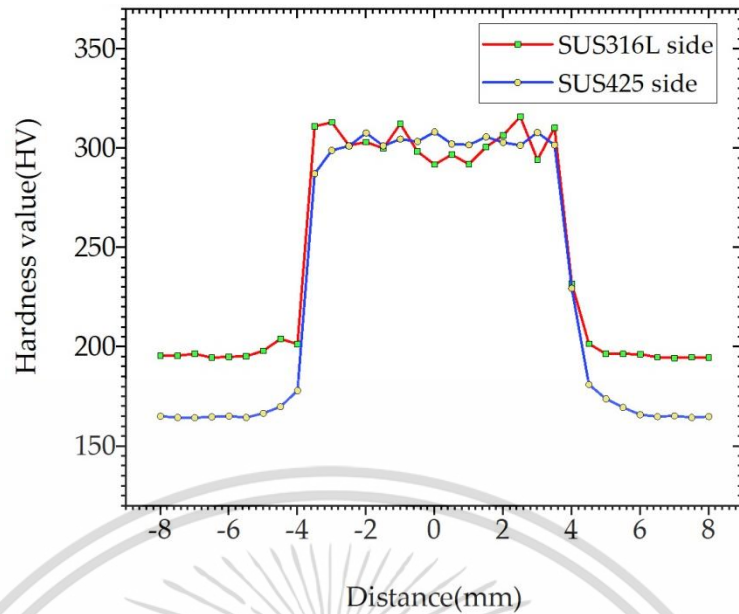


รูปที่ 4.50 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 วินาที



รูปที่ 4.51 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไมโครวินาที

ตารางที่ 4.23 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที 38 ไมโครวินาที และ 50 ไมโครวินาที (หน่วย HV)

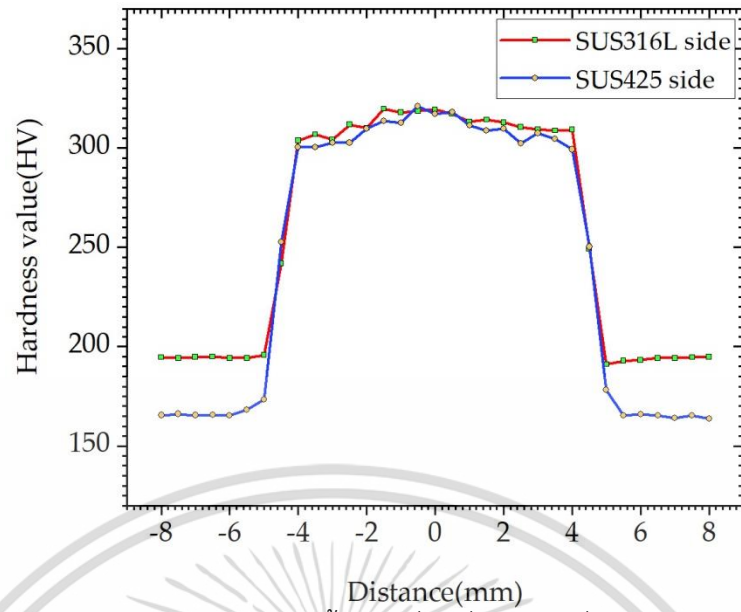
กระแสเชื่อม 10.0 กิโล แอมแปร์	เวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที		เวลาเชื่อม 38 ไมโครวินาที		เวลาเชื่อม 50 ไมโครวินาที	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
ระยะการวัด						
-8.0	194.7	165.5	194.8	164.2	195.1	164.7
-7.5	194.3	166.1	194.3	164.3	194.8	164.8
-7.0	194.8	165.5	194.1	164.2	194.3	164.7
-6.5	195.0	165.7	195.2	164.7	194.4	165.2
-6.0	194.3	165.4	194.3	165.2	195.1	164.6
-5.5	194.3	168.3	194.8	165.2	194.6	164.5
-5.0	195.7	173.4	194.3	194.8	194.9	164.8
-4.5	242.0	252.7	232.6	234.0	233.2	222.2
-4.0	303.8	300.5	292.7	298.0	294.1	290.5
-3.5	306.9	300.4	300.9	300.5	301.4	297.4
-3.0	304.2	302.8	300.4	300.7	300.7	289.6
-2.5	311.8	302.7	308.6	305.4	312.3	301.9
-2.0	310.1	309.8	309.1	302.0	303.6	302.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

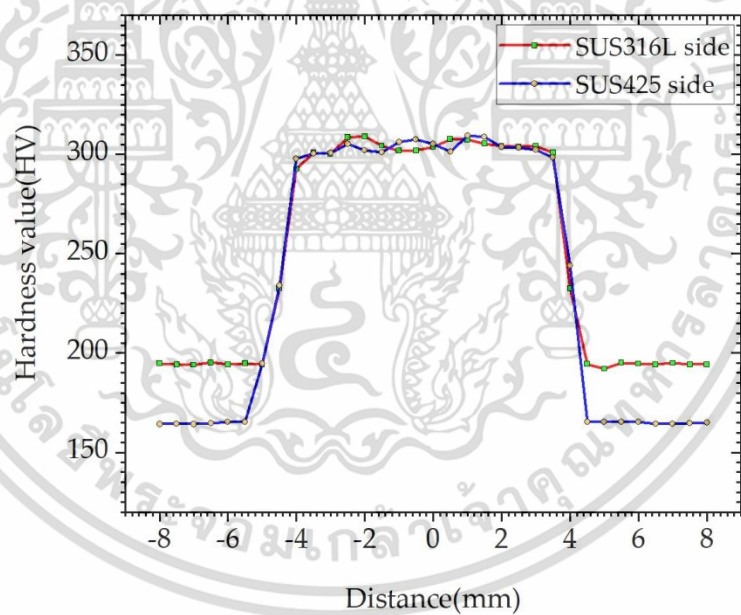
ตารางที่ 4.23 (ต่อ) ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล 38 ไชเคิล และ 50 ไชเคิล (หน่วย HV)

กระแสเชื่อม 10.0 กิโล แอมแปร์	เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 38 ไชเคิล		เวลาเชื่อม 50 ไชเคิล	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
ระยะการวัด						
-1.5	319.8	313.6	304.3	301.1	313.3	300.3
-1.0	318.0	312.7	301.9	306.1	301.7	302.3
-0.5	318.8	321.1	302.0	307.5	301.9	312.4
0.0	319.4	317.3	303.7	305.2	300.0	305.9
0.5	317.3	318.3	307.6	301.5	301.4	303.1
1.0	313.3	311.3	307.4	309.5	303.2	313.4
1.5	314.3	308.8	305.4	308.9	310.5	304.2
2.0	312.9	309.9	304.3	303.8	301.8	300.3
2.5	310.5	302.3	304.0	303.3	311.5	301.2
3.0	309.4	307.4	304.3	302.3	310.6	300.6
3.5	308.8	304.7	300.8	298.4	238.7	242.3
4.0	309.3	299.3	232.5	244.1	188.7	178.6
4.5	249.3	250.3	194.4	165.4	187.8	168.8
5.0	191.1	178.3	192.1	165.3	188.9	168.4
5.5	192.8	165.3	195.1	165.3	194.8	165.1
6.0	193.3	166.0	194.7	165.2	194.3	164.6
6.5	194.3	165.4	194.3	164.4	195.2	164.8
7.0	194.3	164.1	195.0	164.3	194.8	164.4
7.5	194.7	165.2	194.3	164.8	194.2	164.3
8.0	194.8	163.6	194.3	164.9	194.3	164.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

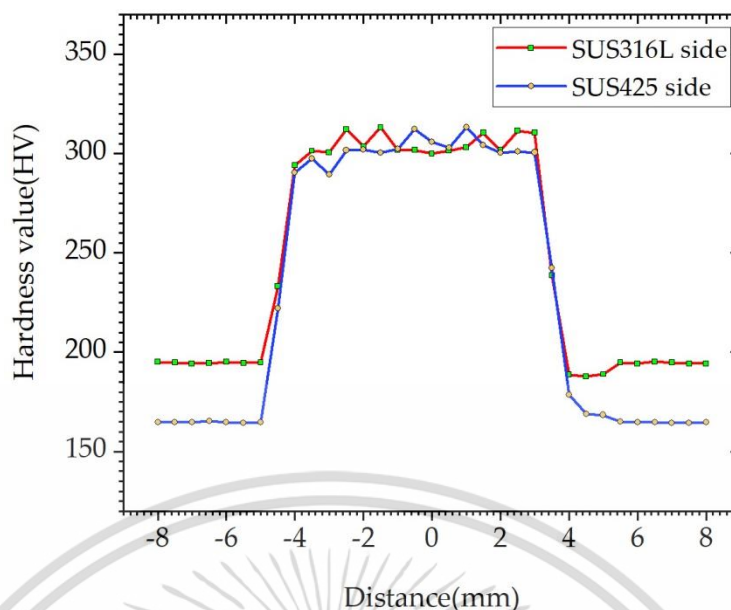


รูปที่ 4.53 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 วินาที



รูปที่ 4.54 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

ตารางที่ 4.24 ค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อม (หน่วย HV)

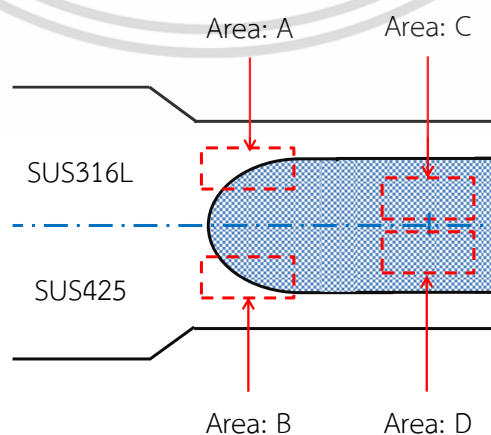
ปัจจัยการเชื่อม กระแสเชื่อม (kA) / เวลาเชื่อม (cycles)	ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณ วัสดุพื้น		ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณ พื้นที่ที่ได้รับความร้อน		ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณ โลหะหลอมละลาย	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
7.0 / 25	195.18	166.78	248.50	232.70	312.15	309.88
7.0 / 38	194.16	166.23	248.40	231.20	312.26	315.73
7.0 / 50	195.84	165.46	237.55	234.85	313.07	315.09
8.5 / 25	195.63	166.35	237.15	236.15	307.87	308.25
8.5 / 38	194.98	168.36	240.80	233.20	312.69	315.67
8.5 / 50	196.35	167.65	251.50	233.65	303.05	303.37
10.0 / 25	194.17	166.99	245.65	241.50	312.27	308.41
10.0 / 38	194.40	166.81	236.05	234.05	303.59	304.13
10.0 / 50	193.51	166.07	263.40	248.05	305.28	302.86

จากคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีความแข็งไม่เกิน 218 HV และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีความแข็งไม่เกิน 200 HV [64] มีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.24 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อนมีค่าสูงกว่าบริเวณวัสดุพื้นทั้งค่าความแข็งที่วัดจากฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L และฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด กล่าวคือ เมื่อกระบวนการเชื่อมหยุดปล่อยกระแสเชื่อมเนื้อโลหะที่หลอมละลายแล้วจะเกิดการเย็นตัวด้วยการระบายความร้อนโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำที่ไหลผ่านในหัวอิเล็กโทรด การเย็นตัวของโลหะที่หลอมละลายจะเริ่มจากจุดศูนย์กลางรอยเชื่อม ออกมายังขอบนอกสุดของรอยเชื่อม [32] จึงทำให้ขนาดของเกรนโตที่สุบบริเวณโลหะหลอมละลาย และมีขนาดเล็กลงในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ค่าความแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ ระดับค่าปัจจัย หรือ อาจกล่าวได้ว่า ค่าความแข็งในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งบริเวณวัสดุพื้นโดยมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม เนื่องจากทุกระดับปัจจัยในการทดลองนี้ให้ค่าความร้อนเพียงพอที่สามารถหลอมละลายเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดได้ [30] ดังนั้น การเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่สูงจะทำให้เกรนมีขนาดที่โตขึ้นเนื่องจากค่าความร้อนมีค่าสูงขึ้นในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ค่าความแข็งของบริเวณโลหะหลอมละลายจะมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อน และบริเวณวัสดุพื้นเนื่องจากการก่อตัวของโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ในบริเวณดังกล่าว [79] จากค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อมตารางที่ 4.24 จะเห็นค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ทั้งบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อน และบริเวณโลหะหลอมละลายเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุพื้น จะมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับรอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดผลึกของคาร์ไบด์ และมาร์เทนไซต์ [10], [17], [80]

4.6.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

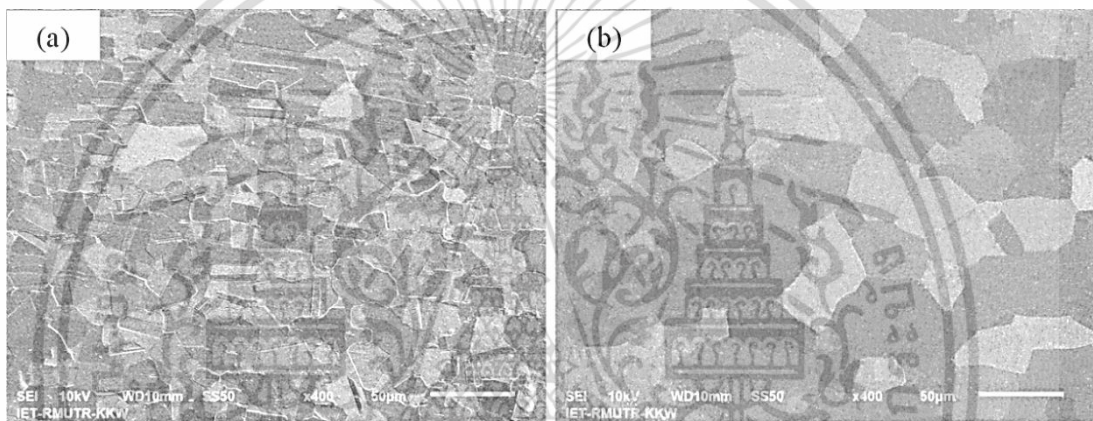
วัฏจักรการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในช่วงเวลาเชื่อม เป็นช่วงเวลาที่เกิดความร้อนโดยโลหะบริเวณที่ถูกกดจะหลอมละลาย ความร้อนมีค่าสูงสุดในบริเวณตรงกลางของรอยเชื่อม และจะลดลงจนไปถึงสิ้นสุดที่บริเวณขอบของวัสดุพื้น [72] บริเวณรอยเชื่อมจะถูกระบายความร้อนจากน้ำที่ไหลผ่านหัวอิเล็กโทรด และบริเวณรอบ ๆ หัวอิเล็กโทรดในช่วงเวลา கடค้าง เมื่อรอยเชื่อมเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์จะปรากฏขอบเขตอย่างชัดเจน บริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อนจะมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณวัสดุพื้น เนื่องจากได้รับความร้อนจากการเชื่อมที่แตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแสดงเป็นภาพถ่ายที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบ่งเป็น 3 ขอบเขต คือ บริเวณวัสดุพื้น บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Area: A, B) บริเวณโลหะหลอมละลาย (Area: C, D) ภาพแสดงพื้นที่การวิเคราะห์แสดงตามรูปที่ 4.56



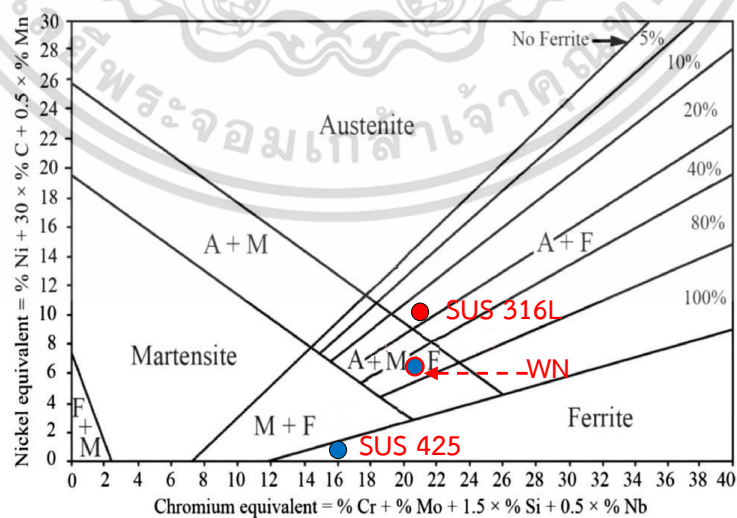
รูปที่ 4.56 รูปภาพพื้นที่โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ทำการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณวัสดุพื้น แสดงตามรูปที่ 4.57 โดยปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีได้จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDS) สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ตรวจพบโครเมียม เท่ากับ 18.21% และธาตุนิเกิล เท่ากับ 9.53% ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ตรวจพบโครเมียม เท่ากับ 14.02% และธาตุนิเกิล เท่ากับ 0.01% หากพิจารณาตามแผนภาพ Schaeffler diagram ตามรูปที่ 4.58 เมื่อคำนวณในสมการปริมาณธาตุโครเมียมสมมูล (Chromium equivalent) และสมการปริมาณธาตุนิเกิลสมมูล (Nickel equivalent) สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ตรวจพบปริมาณธาตุโครเมียมสมมูลเท่ากับ 20.84 และปริมาณธาตุนิเกิลสมมูลเท่ากับ 10.06 ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ตรวจพบปริมาณธาตุโครเมียมสมมูล เท่ากับ 16.41 และปริมาณธาตุนิเกิลสมมูลเท่ากับ 0.18 จากแผนภาพ Schaeffler diagram ตามรูปที่ 4.58 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L จะประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์ และเฟสเฟอร์ไรท์ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 จะเป็นเฟสเฟอร์ไรท์ซึ่งเกรนจะหยาบมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L



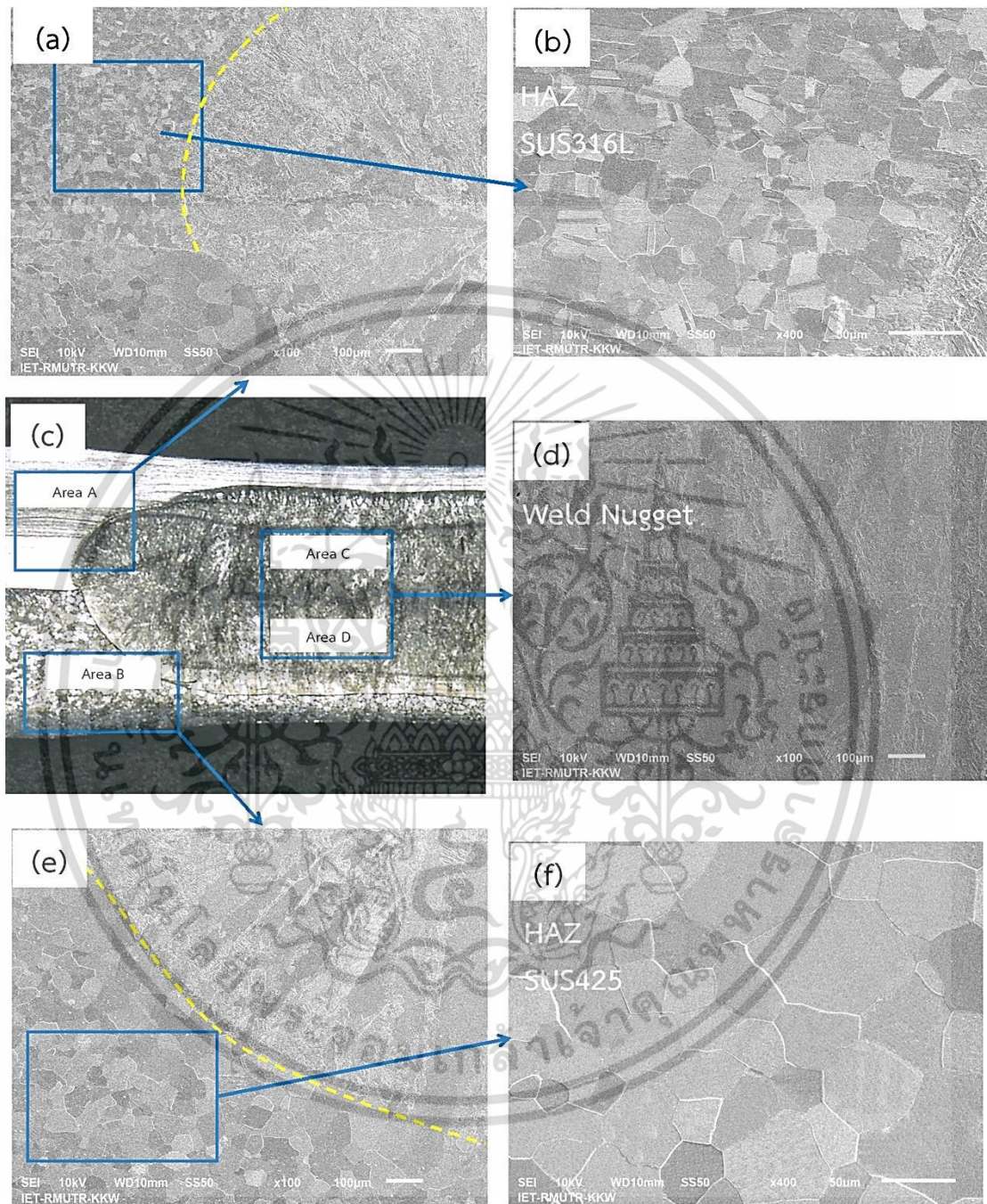
รูปที่ 4.57 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้น (a) โครงสร้างจุลภาควัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L (b) โครงสร้างจุลภาควัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425



รูปที่ 4.58 จุดตัดบนแผนภาพ Schaeffler diagram ของวัสดุพื้น และบริเวณพื้นที่โลหะหลอมละลาย (WN)

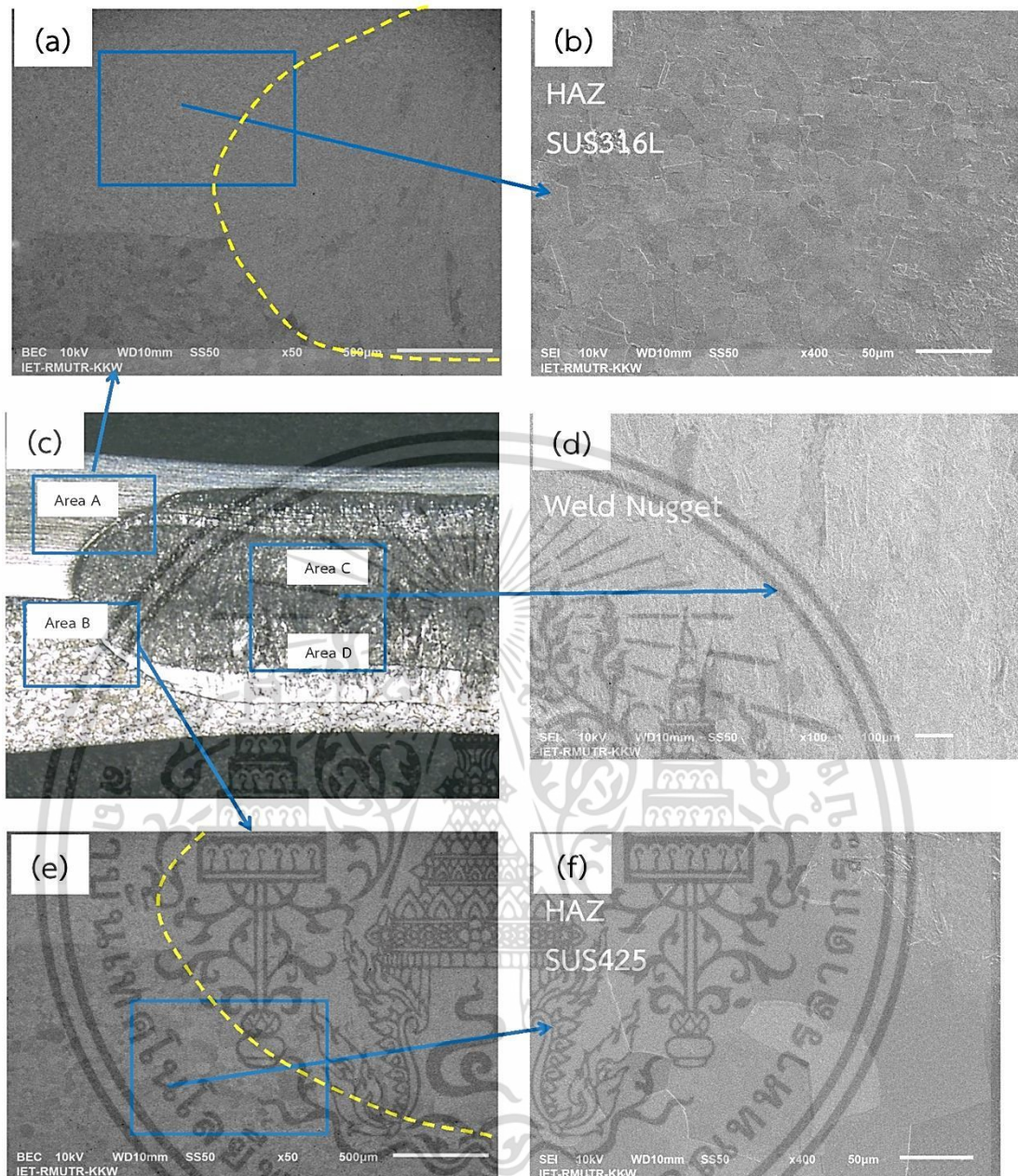
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อน และโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมละลายแสดงตามรูปที่ 4.59 ถึง รูปที่ 4.67



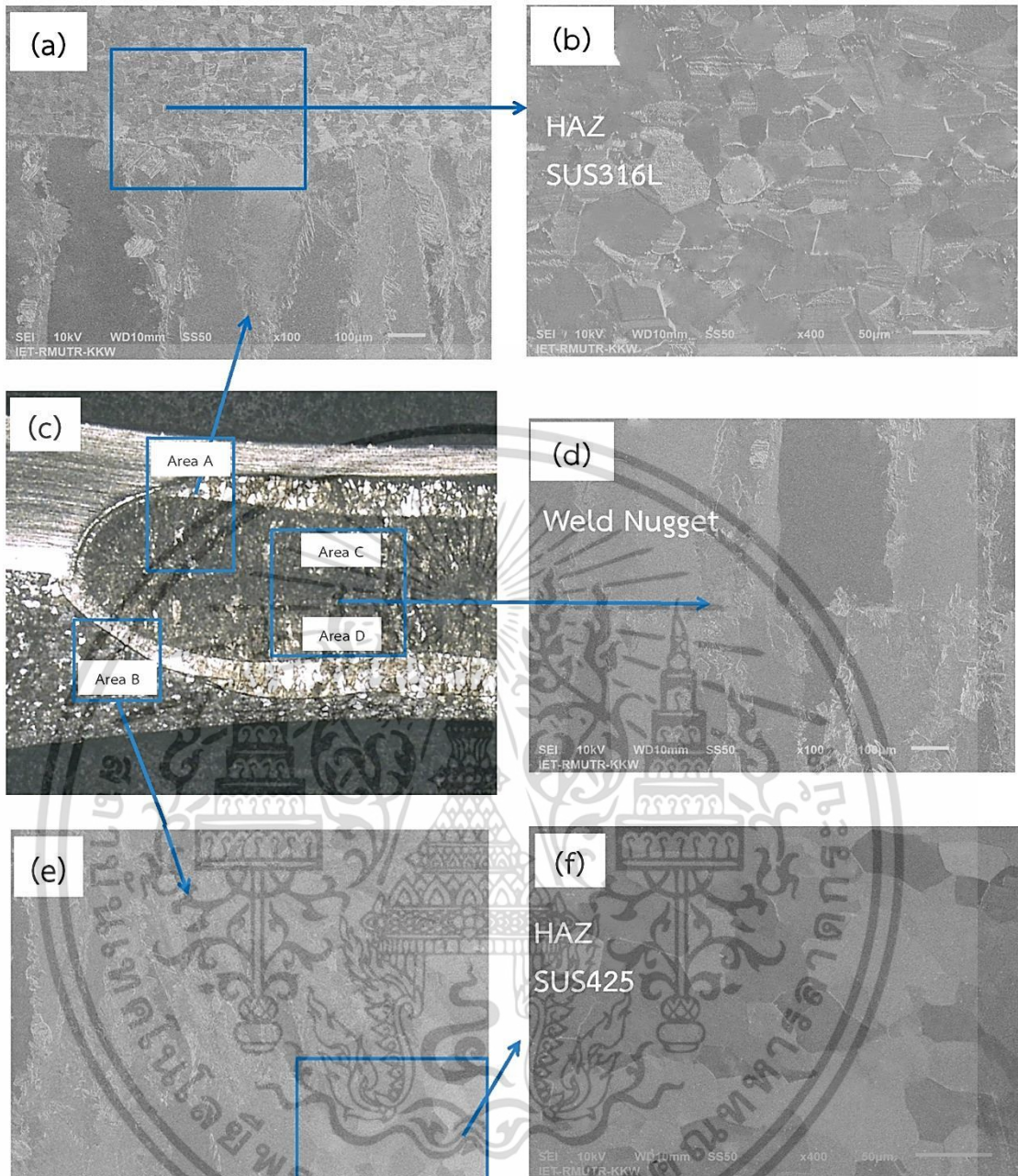
รูปที่ 4.59 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



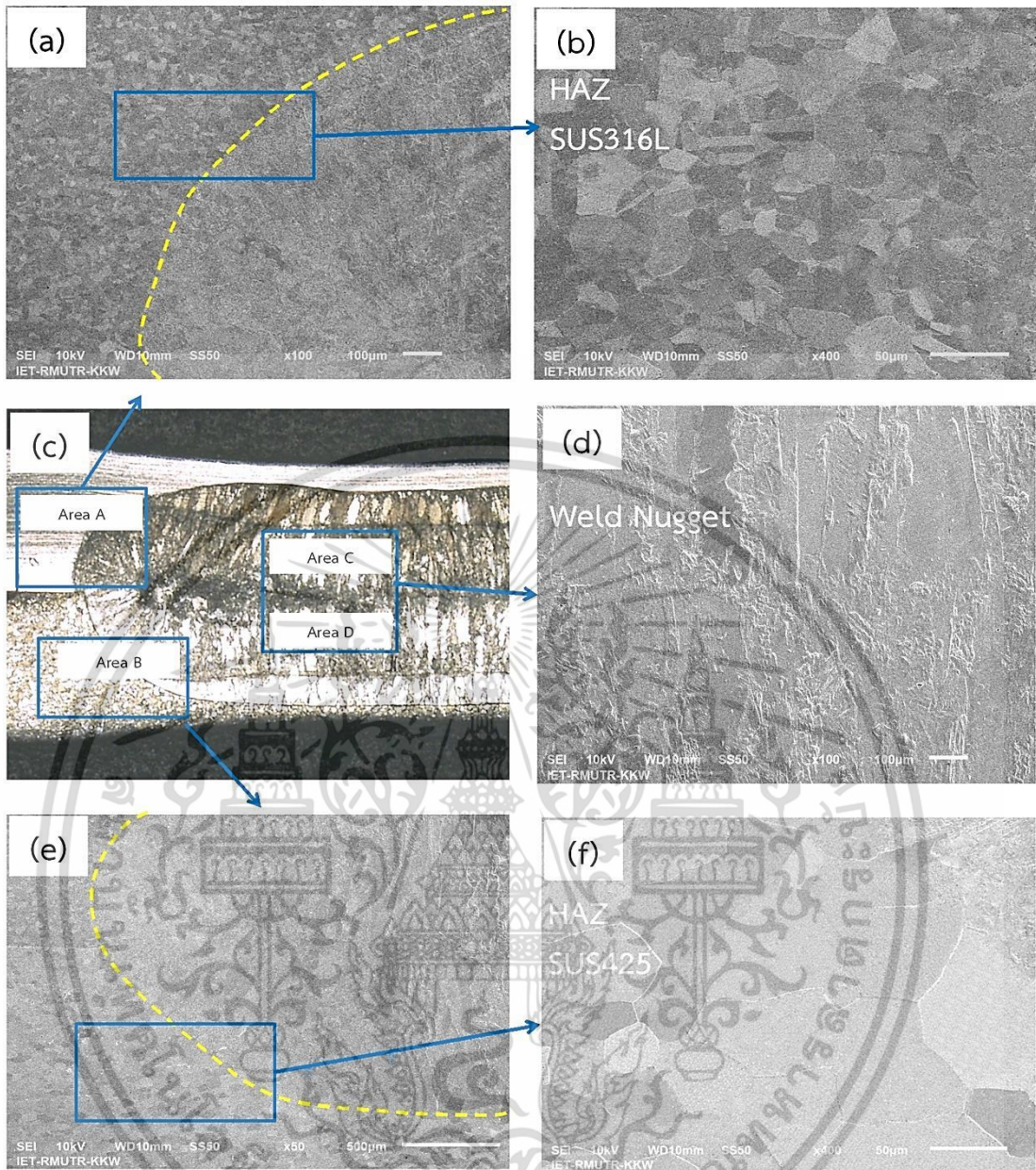
รูปที่ 4.60 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



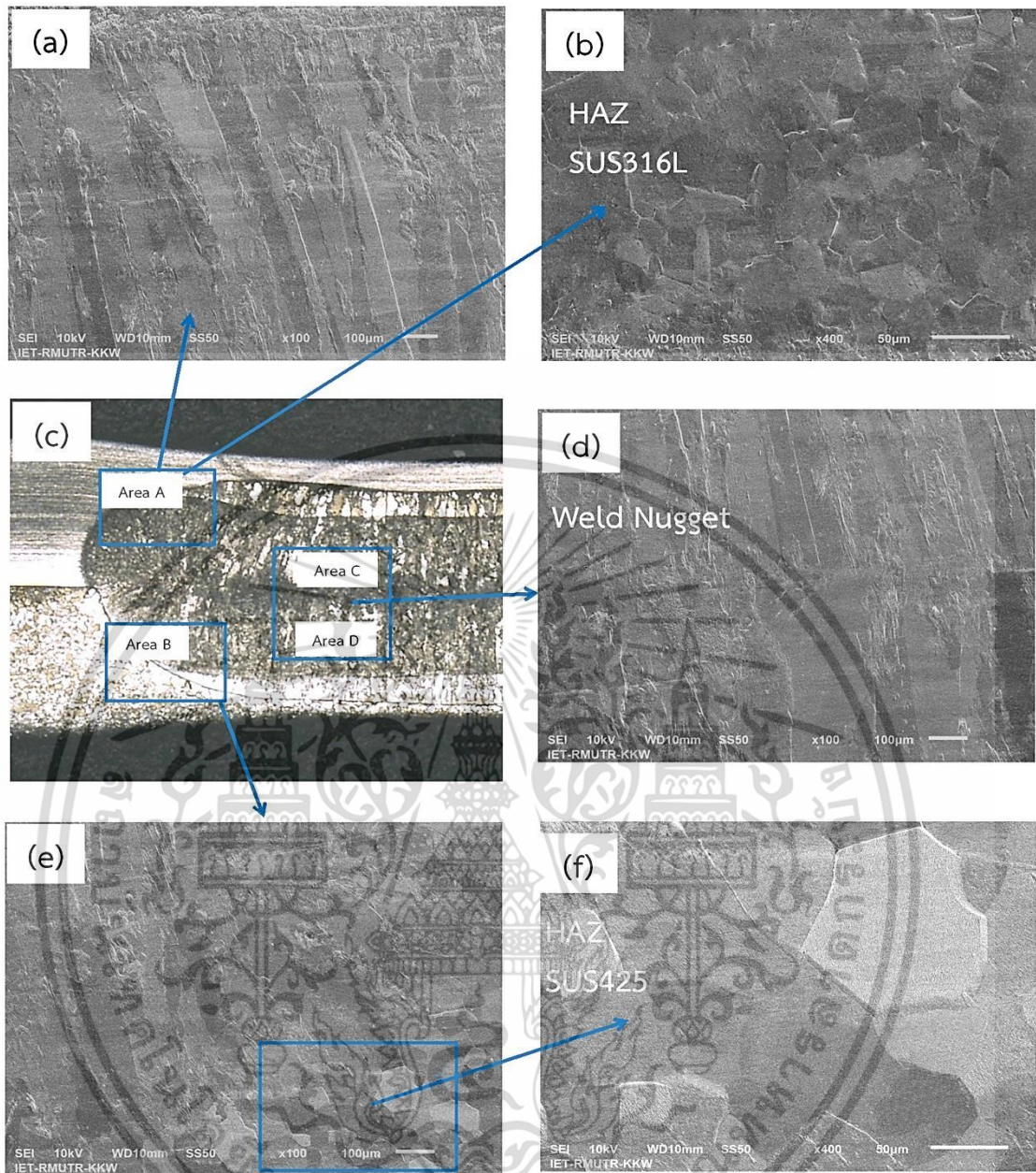
รูปที่ 4.61 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



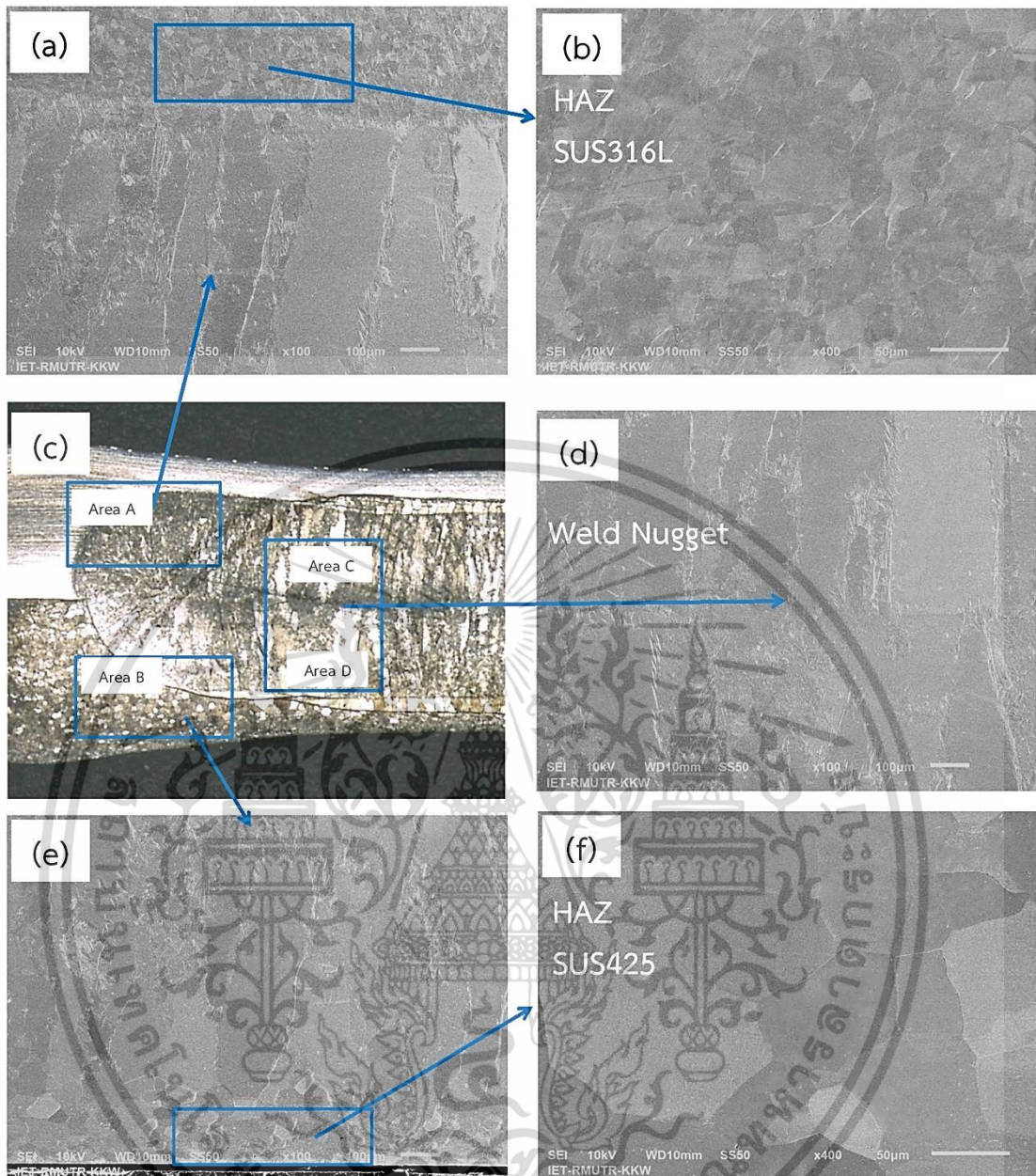
รูปที่ 4.62 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไชเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



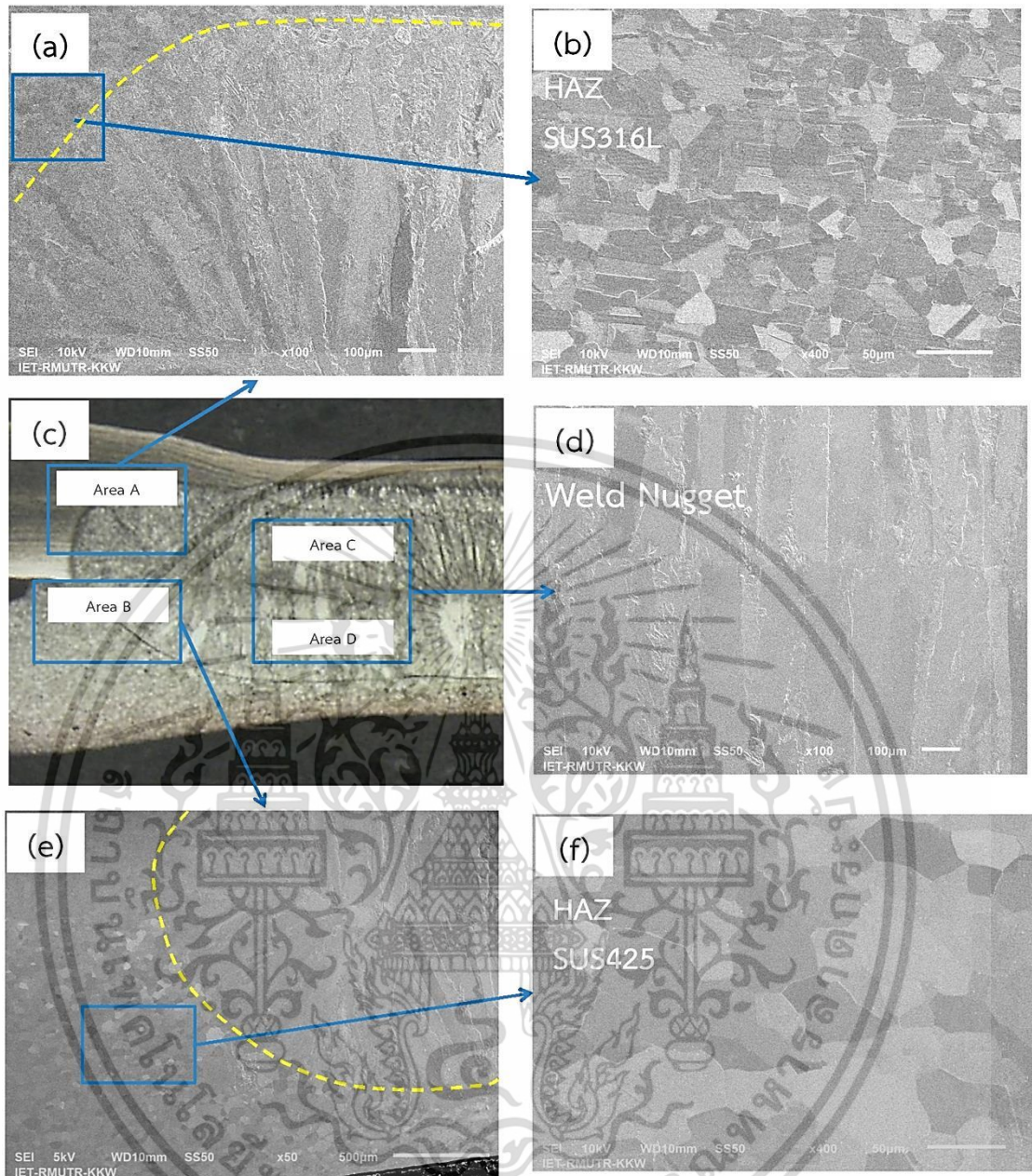
รูปที่ 4.63 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



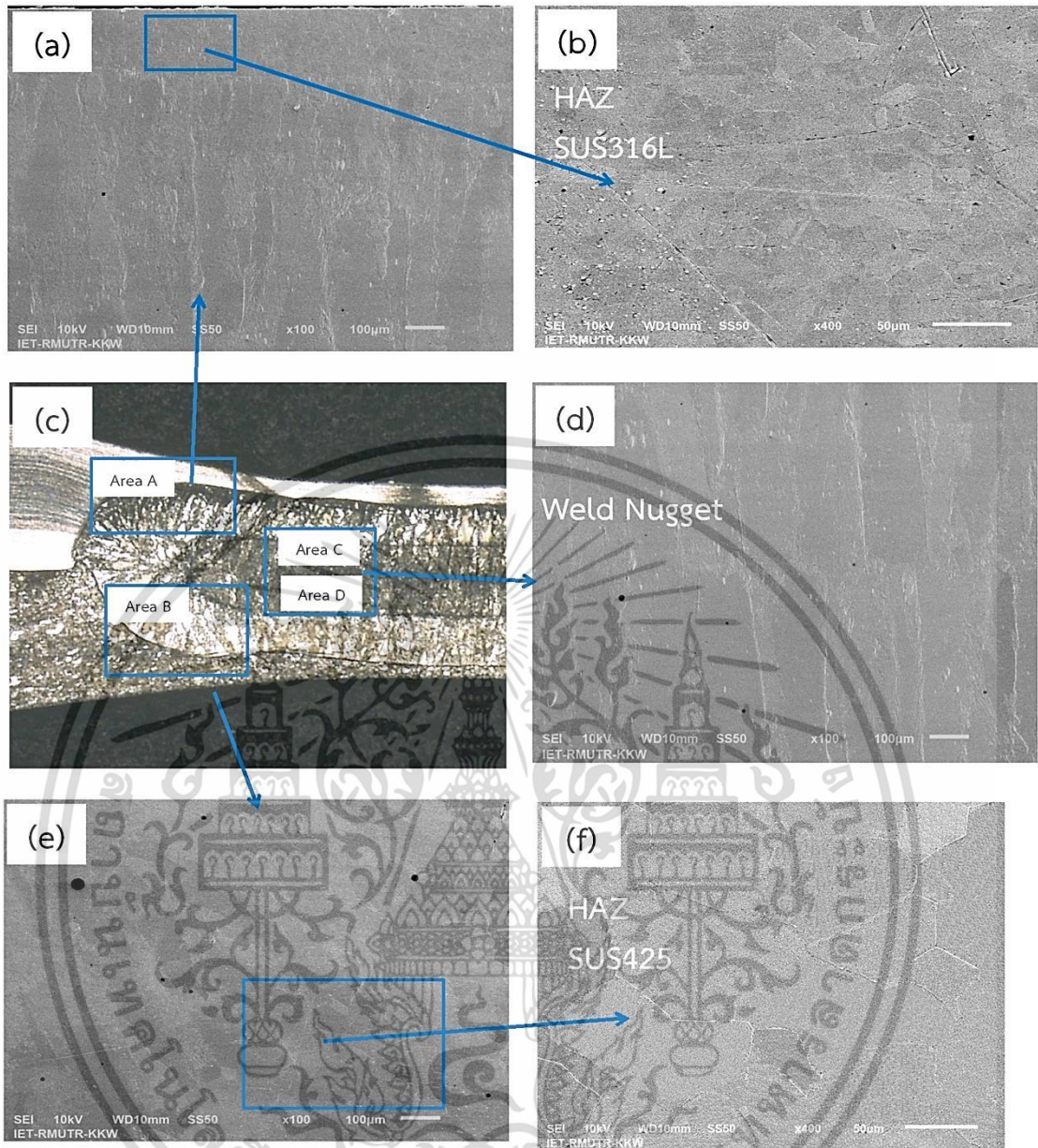
รูปที่ 4.64 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



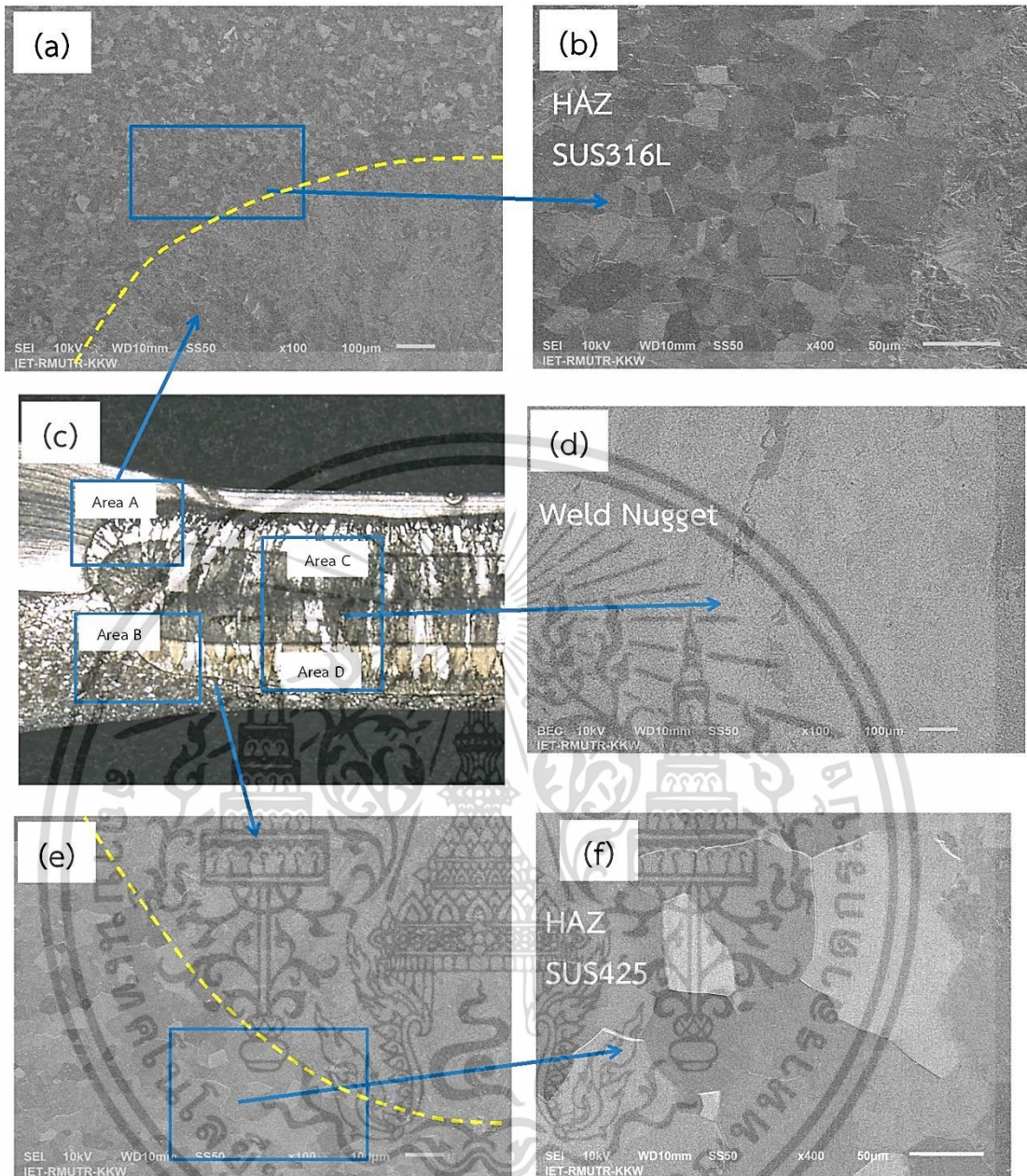
รูปที่ 4.65 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 มิลลิวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.66 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 วินาที

จากรูปที่ 4.59 ถึง รูปที่ 4.67 รูปย่อยที่ (a) และ (b) แสดงภาพบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L รูปย่อยที่ (c) แสดงภาพรอยเชื่อม และพื้นที่ในรอยเชื่อมที่ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค รูปย่อยที่ (d) แสดงภาพบริเวณโครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะหลอมละลาย รูปย่อยที่ (e) และ (f) แสดงภาพบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425

จากรูปที่ 4.59 ถึง รูปที่ 4.67 การพิจารณารูปย่อยที่ (a) และ (b) การพิจารณาบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L จากภาพแสดงให้เห็นว่าแต่ละระดับปัจจัยการเชื่อมให้รูปร่างที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม ดังนั้นขนาดของเกรนในรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจะมีแนวโน้มที่มีขนาดโตขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[81] การเพิ่มพลังงานความร้อนในการเชื่อมจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนตลอดไปจนถึงบริเวณโลหะหลอมละลายจะเกิดเกรนที่หยาบขึ้น จากการวิเคราะห์ปริมาณของส่วนประกอบทางเคมี ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDS) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ตรวจพบปริมาณธาตุโครเมียมเท่ากับ 18.85% และปริมาณธาตุไนเกิลเท่ากับ 13.34% เมื่อคำนวณปริมาณธาตุโครเมียมสมมูลและสมการปริมาณธาตุไนเกิลสมมูลจะเห็นได้ว่าในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีปริมาณธาตุโครเมียมสมมูลเท่ากับ 21.89 และมีปริมาณธาตุไนเกิลสมมูลเท่ากับ 13.34 จากแผนภาพ Schaeffler diagram ตามรูปที่ 4.58 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ยังคงเป็นเฟสผสมระหว่างเฟสออสเทนไนท์และเฟสเฟอร์ไรท์

จากรูปที่ 4.59 ถึง รูปที่ 4.67 การพิจารณารูปย่อยที่ (e) และ (f) แสดงภาพบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 จากภาพแสดงให้เห็นว่าเกิดเกรนเฟอร์ไรท์ขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมโดยจะมีขนาดใหญ่บริเวณด้านในสุด และจะมีขนาดเล็กลงในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และในบริเวณวัสดุพื้นตามลำดับ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 จะมีขนาดเกรนที่หยาบกว่าฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L เนื่องจากโครงสร้างเกรนของวัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L โดยเกรนที่หยาบกว่านี้จะเป็นจุดอ่อนที่ทำให้เกิดความเหนียว และความแข็งแรงลดลง [82] ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน จากการวิเคราะห์ปริมาณของส่วนประกอบทางเคมี ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDS) ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ตรวจพบปริมาณธาตุโครเมียมเท่ากับ 17.01% และปริมาณธาตุไนเกิลเท่ากับ 0.01% เมื่อคำนวณปริมาณธาตุโครเมียมสมมูล และสมการปริมาณธาตุไนเกิลสมมูล เหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีปริมาณธาตุโครเมียมสมมูลเท่ากับ 18.61 และปริมาณธาตุไนเกิลสมมูลเท่ากับ 0.62 จากแผนภาพ Schaeffler diagram ตามรูปที่ 4.58 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ยังคงเป็นเฟสเฟอร์ไรท์เช่นเดิม

จากรูปที่ 4.59 ถึง รูปที่ 4.67 การพิจารณารูปย่อยที่ (d) แสดงภาพบริเวณโครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะหลอมละลาย บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่โลหะหลอมเหลวอัตราการเย็นตัวต่ำสุดเมื่อเทียบกับบริเวณวัสดุพื้น และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน รวมทั้งมีการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวกัน โครงสร้างเกรนที่ปรากฏมีลักษณะคล้ายกันในทุกระดับปัจจัยการเชื่อม คือ โครงสร้างเกรนคอลัมน์ เกรนจะมีลักษณะยาวเจริญเติบโตในทิศทางตั้งฉากกับผนังของวัสดุพื้น (Epitaxial growth) [17] เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นความร้อนจะเพิ่มขึ้น และผลลัพท์นี้จะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมโตขึ้น ค่าความร้อนจะขยายตัวออกไปในเนื้อวัสดุ โลหะที่หลอมละลายจะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเฟสที่เกิดขึ้นภายในบริเวณพื้นที่โลหะหลอมละลาย จากผลการทดลองอธิบายได้ว่าค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างมีนัยสำคัญ [30] จากการตรวจปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุโดยวัดค่าจากบริเวณรอยเชื่อมตามรูปที่ 4.56 ข้อมูลแสดงดังตามตารางที่ 4.25 และค่าสูงสุด – ต่ำสุดของปริมาณธาตุโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และซิลิกอน ในบริเวณโลหะหลอมละลายแสดงดังตามตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.25 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS (wt%)

ปัจจัย การเชื่อม	ปริมาณ Cr ในพื้นที่				ปริมาณ Ni ในพื้นที่				ปริมาณ Mo ในพื้นที่				ปริมาณ Si ในพื้นที่				ปริมาณ Fe ในพื้นที่				ปริมาณธาตุอื่น ๆ ในพื้นที่			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
I=7.0 kA Tw=25 cycles	18.69	19.95	18.16	16.43	7.75	7.06	7.64	6.96	0.85	1.15	0.14	1.37	1.03	0.75	0.96	1.38	69.63	68.61	72.68	71.01	2.05	2.48	0.42	2.85
I=7.0 kA Tw=38 cycles	16.83	19.34	16.55	17.90	7.36	7.34	7.53	7.25	0.79	1.19	0.69	0.63	0.80	0.69	0.76	0.90	72.11	69.7	70.64	69.78	2.11	1.74	3.83	3.54
I=7.0 kA Tw=50 cycles	19.41	18.61	16.16	16.64	7.03	7.56	7.09	6.83	1.08	0.76	0.73	0.74	1.08	1.35	0.70	0.79	70.4	71.43	72	72.79	1.00	0.29	3.32	2.21
I=8.5 kA Tw=25 cycles	19.68	19.93	18.65	17.47	7.42	7.08	7.66	8.16	0.62	0.38	1.11	1.00	0.56	0.55	0.67	0.91	71.58	70.49	71.91	71.48	0.14	1.57	0.00	0.98
I=8.5 kA Tw=38 cycles	20.17	19.57	18.78	17.99	6.92	7.21	7.21	7.95	0.41	0.32	0.96	0.84	0.90	0.75	1.18	0.68	68.99	70.81	68.63	72.25	2.61	1.34	3.24	0.29
I=8.5 kA Tw=50 cycles	18.35	20.22	18.65	18.85	7.19	6.98	6.87	7.56	0.99	0.86	0.40	0.74	1.47	1.12	1.13	1.23	71.44	68.45	72.86	71.07	0.56	2.37	0.09	0.55
I=10.0 kA Tw=25 cycles	19.65	17.63	20.69	19.27	6.65	6.48	5.83	6.85	0.89	0.25	0.27	1.27	0.70	0.61	0.61	0.90	70.03	70.85	71.99	68.66	2.08	4.18	0.61	3.05
I=10.0 kA Tw=38 cycles	19.52	19.27	18.47	20.00	5.87	6.56	6.63	5.58	0.84	0.93	0.29	0.48	0.96	1.26	0.87	1.10	71.09	71.67	70.25	70.15	1.72	0.31	3.49	2.69
I=10.0 kA Tw=50 cycles	20.54	18.69	19.52	19.07	5.71	6.96	6.44	7.19	0.80	1.23	0.68	1.21	1.11	0.76	1.09	1.18	68.86	70.9	69.06	70.3	2.98	1.46	3.21	1.05

ตารางที่ 4.26 ค่าสูงสุด – ต่ำสุดของปริมาณธาตุโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และซิลิกอน ในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS (wt%)

ปริมาณธาตุ (wt%)	พื้นที่ A		พื้นที่ B		พื้นที่ C		พื้นที่ D	
	ค่าสูงสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าต่ำสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าสูงสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าต่ำสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าสูงสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าต่ำสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าสูงสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)	ค่าต่ำสุด กระแสเชื่อม (kA) / เวลา เชื่อม (cycles)
โครเมียม	20.54 10.0 / 50	16.83 7.0 / 38	20.22 8.5 / 50	17.63 10.0 / 25	20.69 10.0 / 25	16.16 7.0 / 50	20.00 10.0 / 38	16.43 7.0 / 25
นิกเกิล	7.75 7.0 / 25	5.71 10.0 / 50	7.56 7.0 / 50	6.48 10.0 / 25	7.66 8.5 / 25	5.83 10.0 / 25	8.16 8.5 / 25	5.58 10.0 / 38
โมลิบดีนัม	1.08 7.0 / 50	0.41 8.5 / 38	1.23 10.0 / 25	0.25 10.0 / 25	1.11 8.5 / 25	0.14 7.0 / 25	1.37 7.0 / 25	0.48 10.0 / 38
ซิลิกอน	1.47 8.5 / 50	0.56 8.5 / 25	1.35 7.0 / 50	0.55 8.5 / 25	1.18 8.5 / 38	0.61 10.0 / 25	1.38 7.0 / 25	0.68 8.5 / 38

ตารางที่ 4.27 ปริมาณธาตุโครเมียมสะสม, ปริมาณธาตุนิเกิลสะสม และอัตราส่วนของปริมาณธาตุโครเมียมสะสมต่อปริมาณธาตุนิเกิลสะสม ในบริเวณโลหะหลอมละลาย จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS

ปัจจัย การเชื่อม	พื้นที่ A			พื้นที่ B			พื้นที่ C			พื้นที่ D		
	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}
I=7.0 kA Tw=25 cycles	21.20	8.46	2.51	21.78	8.43	2.58	19.74	7.64	2.58	20.13	8.06	2.50
I=7.0 kA Tw=38 cycles	19.00	8.08	2.35	21.63	7.98	2.71	18.47	9.25	2.00	19.99	8.69	2.30
I=7.0 kA Tw=50 cycles	22.27	7.03	3.17	21.44	7.56	2.84	18.06	8.06	2.24	18.57	7.73	2.40
I=8.5 kA Tw=25 cycles	21.17	7.42	2.85	21.30	7.43	2.87	20.77	7.66	2.71	19.96	8.53	2.34
I=8.5 kA Tw=38 cycles	21.93	8.05	2.73	21.02	7.43	2.83	21.59	8.55	2.53	19.86	7.95	2.50
I=8.5 kA Tw=50 cycles	21.67	7.19	3.01	22.90	7.82	2.93	20.75	6.87	3.02	21.45	7.56	2.84
I=10.0 kA Tw=25 cycles	21.68	7.46	2.91	18.80	7.83	2.40	21.89	5.93	3.69	21.98	8.05	2.73
I=10.0 kA Tw=38 cycles	21.93	6.40	3.43	22.13	6.57	3.37	20.17	8.15	2.47	22.29	6.71	3.32
I=10.0 kA Tw=50 cycles	23.19	6.85	3.38	21.06	7.59	2.78	21.91	7.75	2.83	22.11	7.64	2.90

จากตารางที่ 4.26 เมื่อพิจารณาปริมาณธาตุโครเมียมจะเห็นได้ว่า บริเวณพื้นที่ A (พื้นที่รอยเชื่อมฝั่ง SUS316L ด้านบนมุมซ้าย) จากปริมาณธาตุโครเมียมในวัสดุพื้นมีค่า 18.21% แต่หลังจากได้รับความร้อนจากการเชื่อม ปริมาณธาตุโครเมียมในรอยเชื่อมดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้กระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมที่สูงขึ้น ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล มีค่า 20.54% ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล มีค่า 16.83% บริเวณพื้นที่ B (พื้นที่รอยเชื่อมฝั่ง SUS425 ด้านล่างมุมซ้าย) จากปริมาณธาตุโครเมียมในวัสดุพื้นมีค่า 14.02% เมื่อผ่านการเชื่อมปริมาณของธาตุโครเมียมมีค่าสูงขึ้น ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล มีค่า 20.22% ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 17.63% บริเวณพื้นที่ C (จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมฝั่ง SUS316L) ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 20.69% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล มีค่า 16.16% ส่วนบริเวณพื้นที่ D (จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมฝั่ง SUS425) ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล มีค่า 20.00% ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 16.43%

ปริมาณธาตุนิเกิลบริเวณพื้นที่ A ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิลมีค่า 7.75% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล มีค่า 5.71% จะเห็นได้ว่า ปริมาณธาตุนิเกิลในรอยเชื่อมมีค่าต่ำลงเมื่อใช้กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมที่สูงขึ้น บริเวณพื้นที่ B ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิลมีค่า 7.56% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 6.48% บริเวณพื้นที่ C ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิลมีค่า 7.66% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 5.83% บริเวณพื้นที่ D ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิลมีค่า 8.16% ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล มีค่า 5.58%

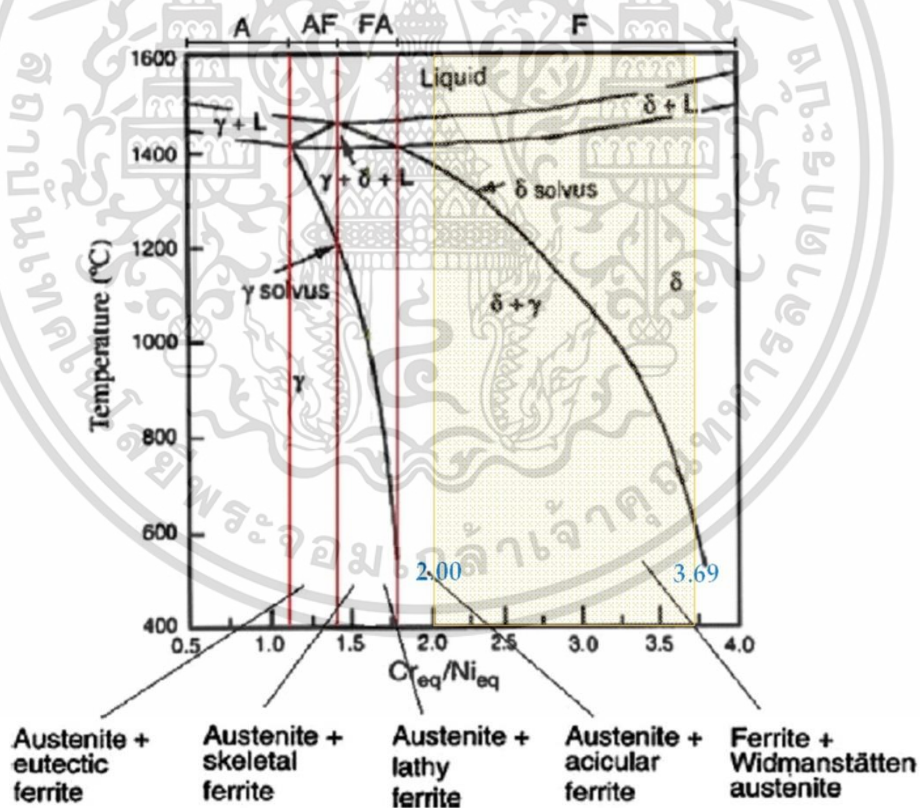
ปริมาณธาตุโมลิบดีนัม บริเวณพื้นที่ A ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิลมีค่า 1.08% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล มีค่า 0.41% บริเวณพื้นที่ B ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิลมีค่า 1.23% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 0.25% บริเวณพื้นที่ C ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิลมีค่า 1.11% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 0.14% บริเวณพื้นที่ D ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิลมีค่า 1.37% ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล มีค่า 0.48%

ปริมาณธาตุซิลิกอนบริเวณพื้นที่ A ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิลมีค่า 1.47% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 0.56% บริเวณพื้นที่ B ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิลมีค่า 1.35% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 0.55% บริเวณพื้นที่ C ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิลมีค่า 1.18% ค่าต่ำสุดเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล มีค่า 0.61% บริเวณพื้นที่ D ค่าสูงสุดที่ตรวจพบเกิดจากการใช้กระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิลมีค่า 1.38% ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบจากการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล มีค่า 0.68%

การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อมมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม หรืออาจกล่าวว่าการให้ค่าพลังงานความร้อนที่สูงในกระบวนการเชื่อมจะทำให้เกิดการแพร่ของส่วนผสมทางเคมีในบริเวณน้ำโลหะหลอมละลายแล้วมีการตกค้างในรอยเชื่อมในขั้นตอนการกลายเป็นของแข็ง ผลการทดลองพบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุโครเมียม และธาตุนิเกิลจะมีค่าสูงขึ้นในรอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ส่วนในรอยเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุโครเมียมจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยแต่จะเห็นความชัดเจนของปริมาณธาตุนิเกิลโดยมีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากการกลายเป็นของแข็งของวัสดุที่พยายามรักษาความสมดุลของการเกิดเฟสในระบบ [83], [84] ของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์ของธาตุโมลิบดีนัม และธาตุซิลิกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้น จากการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์ของธาตุโมลิบดีนัม และธาตุซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณเฟสเฟอร์ไรท์ในรอยเชื่อมมีค่าที่สูงเช่นกัน [30]

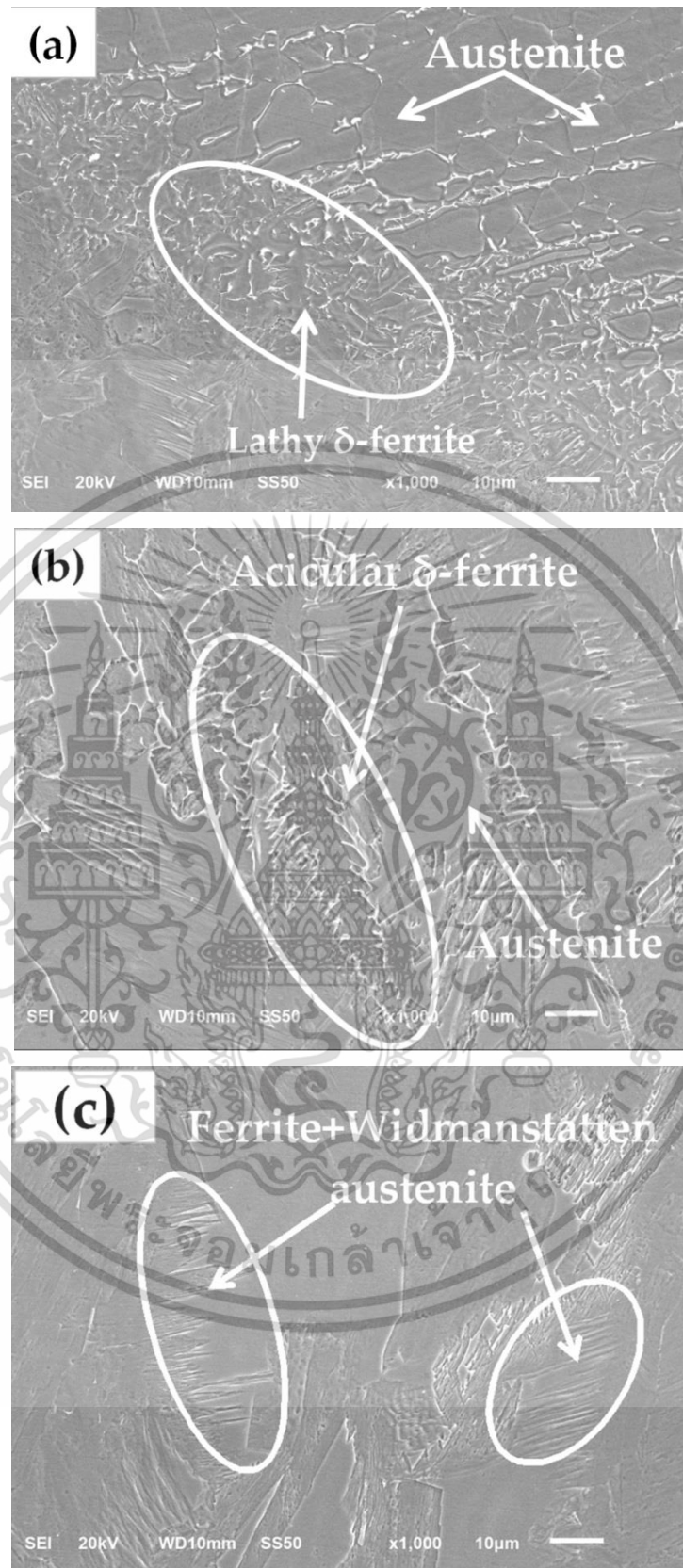


รูปที่ 4.68 พื้นที่การเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งรอยเชื่อมโดยแผนภาพ Pseudo binary Fe-Cr-Ni

การกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดจะใช้แผนภาพ Pseudo binary ตามรูปที่ 4.68 โดยพิจารณาอัตราส่วนปริมาณธาตุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

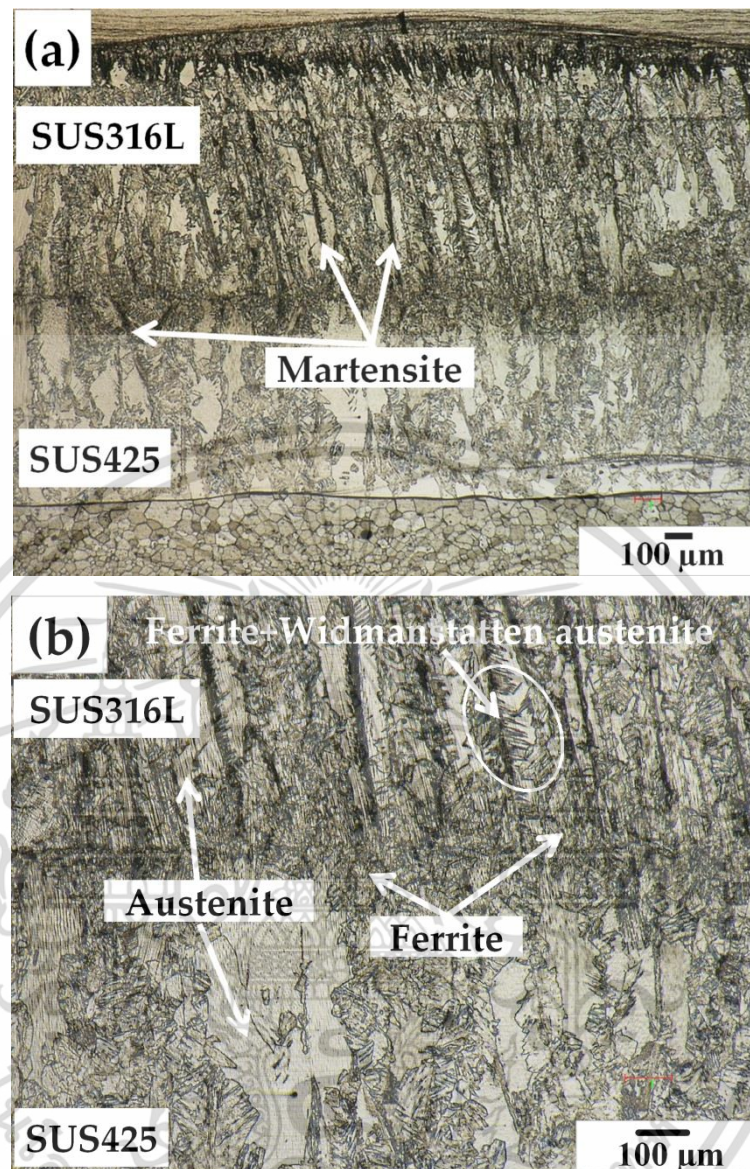
โครเมียมผสมต่อปริมาณธาตุนิเกิลผสมในบริเวณโลหะหลอมละลาย [85] เมื่ออัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1.25 การกลายเป็นของแข็งชนิด A (A Mode) อัตราส่วนมีค่าช่วงระหว่าง 1.25 ถึง 1.48 การกลายเป็นของแข็งชนิด AF (AF Mode) อัตราส่วนมีค่าช่วงระหว่าง 1.48 ถึง 1.95 การกลายเป็นของแข็งชนิด FA (FA Mode) และเมื่ออัตราส่วนมีค่ามากกว่า 1.95 การกลายเป็นของแข็งชนิด F (F Mode) [61], [86], [76] จากการคำนวณปริมาณธาตุโครเมียมผสม และปริมาณธาตุนิเกิลผสมตามตารางที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณธาตุโครเมียมผสมต่อปริมาณธาตุนิเกิลผสมของบริเวณพื้นที่ A ของการเชื่อมทุกระดับปัจจัยมีค่าระหว่าง 2.35 ถึง 3.43 บริเวณพื้นที่ B มีค่าระหว่าง 2.40 ถึง 3.37 บริเวณพื้นที่ C มีค่าระหว่าง 2.00 ถึง 3.69 บริเวณพื้นที่ D มีค่าระหว่าง 2.30 ถึง 3.32 หรือ อาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณธาตุโครเมียมผสมต่อปริมาณธาตุนิเกิลผสมในบริเวณโลหะหลอมละลายมีค่าระหว่าง 2.00 ถึง 3.69 ตามพื้นที่แร่เงา ผลการทดลองทุกผลการทดลองพบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีอัตราส่วนปริมาณธาตุโครเมียมผสมต่อปริมาณธาตุนิเกิลผสมมีค่ามากกว่า 1.95 ดังนั้นรอยเชื่อมมีการกลายเป็นของแข็งชนิด F การเปลี่ยนสถานะจะเริ่มจากการที่เนื้อโลหะหลอมละลาย (L) เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเปลี่ยนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ และโลหะเหลว (F+L) จากนั้นเปลี่ยนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (F) และในตอนท้ายของการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งรอยเชื่อมประกอบด้วยเฟสผสมระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟสออสเทนไนต์ (F+A) นอกจากนี้ยังมีเฟสมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีอัตราการการเย็นตัวที่สูง [54] จากรูปที่ 4.69 เป็นภาพถ่ายจาก SEM โดยแสดงการเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมบริเวณโลหะหลอมละลาย รูปที่ 4.69(a) เป็นภาพถ่ายจาก SEM บริเวณโลหะหลอมละลาย จากการใช้กระแสเชื่อมระดับ 7.0 กิโลแอมแปร์จะปรากฏ Lathy เดลต้าเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเนื่องจากมีการก่อตัวของธาตุโครเมียมและธาตุโมลิบดีนัม ที่ตกค้างในการหลอมละลายของออสเทนไนต์ [87] แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะการกลายเป็นของแข็งเริ่มมาจากชนิด FA เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมให้สูงขึ้นระดับ 8.5 กิโลแอมแปร์จะทำให้ค่าความร้อนในรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ Acicular เดลต้าเฟอร์ไรต์เริ่มก่อตัวขึ้น โดยเป็นการรวมตัวกันของ Skeletal เฟอร์ไรต์ และ Lathy เดลต้าเฟอร์ไรต์โครงสร้างของเกรนที่มีความหนาบางลักษณะคล้ายโครงกระดูก [30] ตามรูปที่ 4.69(b) และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมระดับระดับ 10.0 กิโลแอมแปร์ ทำให้ความร้อนในรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ปริมาณของเฟอร์ไรต์ในบริเวณโลหะหลอมละลายก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น หากพิจารณาอัตราส่วนระหว่างปริมาณธาตุโครเมียมผสมต่อปริมาณธาตุนิเกิลผสมตามตารางที่ 4.27 จะมีค่าสูงขึ้นซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kianersi และคณะ [30] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alizadeh-Sh และ Marashi [88] เมื่อนำไปพิจารณาร่วมกับแผนภาพ Pseudo binary ตามรูปที่ 4.68 จะเห็นว่าเฟสเฟอร์ไรต์เปลี่ยนแปลงเป็น Widmanstätten ออสเทนไนต์ตามรูปที่ 4.69(c) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leone และ Kerr [62] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vignesh [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.69 ภาพถ่าย SEM ของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมละลายจากการคงที่
เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล และกระแสวิงเชื่อม (a) 7.0 กิโลแอมแปร์ (b) 8.5 กิโลแอมแปร์
(c) 10.0 กิโลแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมละลายจากการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 วินาที (a) กำลังขยาย 100 เท่า (b) กำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 4.70 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณโลหะหลอมละลายโดยถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า และกำลังขยาย 200 เท่า ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชนิด อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะเกิดบริเวณตรงกลางของพื้นที่โลหะหลอมละลายไต่ระดับรองลงมาในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อน และบริเวณวัสดุพื้น การกลายเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากกระบวนการเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วจึงทำให้เฟส มาร์เทนไซต์เกิดขึ้นในรอยเชื่อมตามที่ปรากฏในรูปที่ 4.70 (a) ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมจะขยายตัวออกไปในเนื้อวัสดุทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองหลอมละลายรวมกันในบ่อหลอมละลาย โลหะที่หลอมละลายจะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเฟสที่เกิดขึ้นภายในบริเวณพื้นที่โลหะหลอมละลาย โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะหลอมละลายโครงสร้างที่พบมีลักษณะคล้ายกันในทุกระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยการเชื่อมโครงสร้างเกรนที่ปรากฏคือ โครงสร้างเกรนคอลลิมาร์ โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่ โลหะหลอมละลายประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์ เฟสเฟอร์ไรท์ และเฟสมาร์เทนไซต์ตามรูปที่ 4.70 (b)

4.7 การอภิปรายผลการวิจัย

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425 ทำให้ทราบว่า ปัจจัยในการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองทุกปัจจัย ได้แก่ แรงกด (F) กระแสเชื่อม (I) เวลาเชื่อม (Tw) เวลา กัดค้ำ (Th) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน (Up ET) รูปทรงหัวอิเล็กโทรดล่าง (Low ET) มีอิทธิพลต่อคุณภาพ ของรอยเชื่อมซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

แรงกด (F) ทำหน้าที่ช่วยให้อิเล็กโทรดบนเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสชิ้นงานเชื่อมในช่วงเวลาก่อน การปล่อยกระแสเชื่อม แรงกดยังทำหน้าที่กดเพื่อให้ผิวสัมผัสที่หลอมละลายติดกันแล้วหลอมรวมเป็น เนื้อเดียวกันช่วงเวลาการปล่อยกระแสเชื่อม และช่วยให้อิเล็กโทรดบนเคลื่อนที่ขึ้นในช่วงสุดท้าย ของวัฏจักรการเชื่อม การใช้แรงกดที่สูงทำให้หัวอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ขึ้น – ลงด้วยความรวดเร็วสูง การใช้แรงกดที่สูงยังทำให้พื้นที่การเชื่อม บริเวณพื้นที่สัมผัสขยายเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ของรอยเชื่อม ขนาดของรอยเชื่อม ระยะการซึมลึก และทำให้ระยะการกัดลึกมีค่าสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากการ ใช้แรงกดที่ต่ำทำให้หัวอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ขึ้น – ลงด้วยความเร็วต่ำ และแรงกดที่ต่ำยังทำให้เกิด จุดบกพร่องในรอยเชื่อม เช่น การเกิดรูหรือโพรงในรอยเชื่อม อีกทั้งยังทำให้ขนาดของรอยเชื่อม ระยะ การซึมลึกมีค่าต่ำ และระยะการกัดลึกมีค่าต่ำ [23]

กระแสเชื่อม (I) และเวลาเชื่อม (Tw) ทั้งสองปัจจัยเป็นปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับการเชื่อม ความต้านทานแบบจุด เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความร้อนบนผิวสัมผัสระหว่างแผ่นงานทั้งสอง แผ่น เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมจะทำให้ความร้อนสูงขึ้นจนโลหะหลอมละลาย มีหลาย งานวิจัยได้กล่าวถึงความสำคัญของกระแสเชื่อมว่าเป็นตัวทำให้เกิดความร้อนในรอยเชื่อม [72] เวลา เชื่อมเป็นปัจจัยที่ช่วยให้อุณหภูมิบริเวณจุดสัมผัสของชิ้นงาน และบริเวณหลอมละลายเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็วจนกลายเป็นรอยเชื่อม [32] การใช้กระแสเชื่อมที่สูงทำให้เกิดความร้อนในรอยเชื่อมที่สูง ดังนั้น เพื่อเป็นการรักษาอายุการใช้งานของหัวอิเล็กโทรดให้ยาวนานขึ้น อาจจะต้องลดเวลาเชื่อมลง [89] ปัญหาที่เกิดจากการใช้กระแสเชื่อมที่สูงอีกประการหนึ่งคือ การกระจายของน้ำโลหะเหลวระหว่างการ เชื่อมเนื่องจากการใช้กระแสเชื่อมที่สูงทำให้ความหนาแน่นของกระแสเชื่อมต่อพื้นที่ในบริเวณรอย เชื่อมมากเกินไป การกระจายของน้ำโลหะเหลวทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ ส่งผลให้ความแข็งแรง ของรอยเชื่อมลดลง นอกจากการใช้กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมให้ต่ำลง การลดการกระจายของน้ำ โลหะเหลวจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงกดของหัวอิเล็กโทร ดเนื่องจากการใช้แรงกดที่เหมาะสมจะเกิดพื้นที่ของรอยเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ค่าความต้านทาน ณ จุดสัมผัสมีค่าต่ำลง ดังนั้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมไหลผ่านได้ดีขึ้น อีกทั้งช่วยลดความร้อน ที่พื้นผิวระหว่างอิเล็กโทรด และแผ่นงานเชื่อม [69], [90] การลดการกระจายของน้ำโลหะเหลวจาก การเชื่อมโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการเชื่อมจริง (Pre-heat) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลด ปริมาณการเกิดกระจายของน้ำโลหะเหลวระหว่างการเชื่อมได้ [68] เนื่องจากการให้ความร้อนกับ ชิ้นงานก่อนการเชื่อมจริงจะช่วยทำให้พื้นผิวของชิ้นงานเกิดความร้อนที่เพียงพอจะหลอมละลายเนื้อ โลหะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างหัวอิเล็กโทรด และผิวแผ่นงานเชื่อม ช่วยในการอบอุ่นแผ่นงานเชื่อม เมื่อแผ่นงานเชื่อมได้รับความร้อนก่อนการเชื่อมจริงค่าความต้านทานไฟฟ้าในการเชื่อมจะมีค่าลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของกระแสเชื่อมต่อพื้นที่ในบริเวณรอยเชื่อม จึงมีค่าที่ไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดการกระจายของน้ำโลหะเหลวจากการเชื่อม [23], [90], [91]

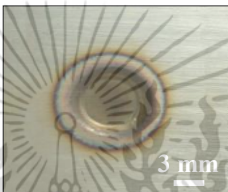
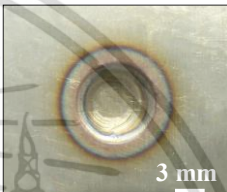
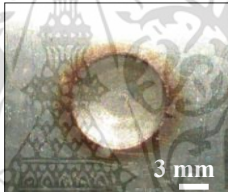

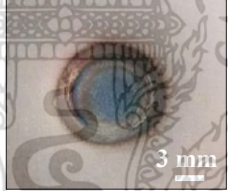
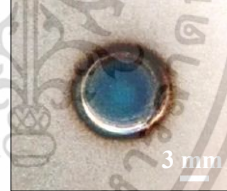
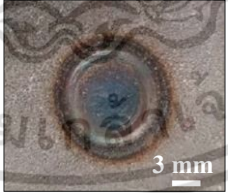
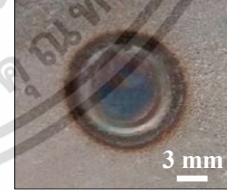

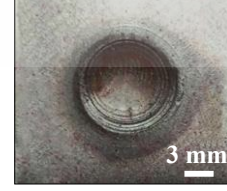
เวลากดค้ำ (Th) ทำให้เกิดการเกาะยึดของโลหะในรอยเชื่อม เพื่อให้รอยเชื่อมเกิดการเย็นตัวภายใต้แรงกดค้ำที่ เวลากดค้ำจะทำให้รอยเชื่อมมีเวลาในการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ และสร้างความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อม การใช้เวลากดค้ำที่ต่ำจะทำให้รอยเชื่อมเกิดการแข็งตัวไม่สมบูรณ์โดยจะเกิดจุดบกพร่องภายในรอยเชื่อม เช่น โพรง รู เกิดรอยแตกภายในรอยเชื่อม เกิดการกระจายตัวของน้ำโลหะ และหัวอิเล็กโทรดติดกับชิ้นงาน การใช้เวลากดค้ำที่สูง อาจทำให้เกิดการเสียรูป การบิดเบี้ยวของรอยเชื่อม หรืออาจจะเกิดรอยแตกของรอยเชื่อมขณะเย็นตัว และทำให้เวลาการผลิตชิ้นงานต่อรอบเวลา (Cycle time) มีเวลานานขึ้น [92]

รูปทรงหัวอิเล็กโทรด (Electrode geometric) หัวอิเล็กโทรดเป็นตัวนำกระแสเชื่อมไปสู่ชิ้นงานเชื่อม หัวอิเล็กโทรดต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าที่ดี มีความแข็งแรง และความแข็งเพียงพอที่จะต้านทานการเสียรูปที่เกิดจากการใช้งานซ้ำ ๆ ของแรงกด หัวอิเล็กโทรดถูกแบ่งเป็นประเภทตามการแบ่งกลุ่มของหัวอิเล็กโทรดจากสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด เมื่อหัวอิเล็กโทรดถูกใช้งานจะทำให้ผิวสัมผัสกับชิ้นงานของหัวอิเล็กโทรดมีพื้นที่มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของกระแสเชื่อมลดลง คุณภาพการเชื่อมลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยน หรือมีการตกแต่งหัวอิเล็กโทรดใหม่ตามระยะเวลาที่เหมาะสม [6] โดยทั่วไปเป็นการเปลี่ยนใหม่ตามจำนวนครั้งของการเชื่อม เช่น เปลี่ยนใหม่ทุก ๆ การเชื่อม 500 จุดเชื่อม เป็นต้น สำหรับจำนวนครั้งของการเชื่อมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่ทำมากที่สุดที่ยังทำให้คุณภาพของรอยเชื่อมดีโดยอ้างอิงผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และการทดสอบแบบทำลายของรอยเชื่อม กระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ของผู้วิจัยได้กำหนดมาตรฐานของการเปลี่ยนหัวอิเล็กโทรด โดยกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในส่วนขนาดของรอยเชื่อมไว้ว่า ต้องทำการยกระดับขนาดของรอยเชื่อมขึ้นอีกหนึ่งระดับจากข้อกำหนดของลูกค้า เช่น ลูกค้ากำหนดคุณภาพของรอยเชื่อมระดับคลาส C ขนาดรอยเชื่อมคือ $3\sqrt{t}$ การตรวจสอบขนาดของรอยเชื่อมต้องใช้มาตรฐานคลาส B ขนาดรอยเชื่อมคือ $4\sqrt{t}$ เป็นต้น การกำหนดจำนวนครั้งของการเปลี่ยนหัวอิเล็กโทรดมีค่า 80% ของจำนวนครั้งของการเชื่อมที่มากที่สุดที่ยังทำให้คุณภาพของรอยเชื่อมดี โดยต้องกำหนดจำนวนครั้งการเชื่อมก่อนการเปลี่ยนหัวอิเล็กโทรดใหม่ในเอกสาร Spot welding condition sheet การเลือกใช้รูปทรงหัวอิเล็กโทรดที่เหมาะสมกับลักษณะงานทำให้เกิดคุณภาพของงานเชื่อมที่ดี คำแนะนำสำหรับการเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแสดงในภาคผนวก ข

การรับประกันคุณภาพของรอยเชื่อมในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบแบบทำลาย ส่วนนี้เป็นการรับประกันคุณภาพของรอยเชื่อมของแผนกผลิต โดยต้องทำการทดสอบแบบทำลายของชิ้นงานเชื่อมอย่างน้อย 1 ชิ้นก่อนการผลิต วิธีที่นิยมใช้คือ การตีด้วยฆ้อนบริเวณชิ้นงานที่ถูกเชื่อม (Hammering test) หรือการตอกสั้วหรือลิ้มเข้าไปในตะเข็บระหว่างจุดเชื่อมสองจุด (Chisel test) สั้วหรือลิ้มจะทำให้เกิดการฉีกขาดของวัสดุที่ใช้เชื่อมบริเวณรอบๆ เพื่อทดสอบว่าชิ้นงานเชื่อมมีความแข็งแรงหรือไม่ ส่วนที่ 2 คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม ส่วนนี้เป็นการรับประกันคุณภาพของจุดเชื่อมของแผนกตรวจสอบคุณภาพ หรือแผนกรับประกันคุณภาพ โดยต้องทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคอย่างน้อย 1 ชิ้นต่อสัปดาห์ หรือ 1 ชิ้นต่อเดือน ทั้งนี้แล้วแต่ข้อกำหนดจากลูกค้า การตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมสิ่งแรกที่ต้องทำการตรวจสอบคือ

ลักษณะทางกายภาพ (Apperance) โดยคุณลักษณะของสีของรอยเชื่อมงานวิจัยนี้ทำการเชื่อมชิ้นงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425 รอยเชื่อมจะต้องมีลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ดีในตารางที่ 3.5 สำหรับการเชื่อมกับวัสดุอื่นอาจมีสีของรอยเชื่อมแตกต่างกันไปบ้างซึ่งขึ้นอยู่กับสีของวัสดุพื้นที่ทำการเชื่อม ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมตามชนิดของวัสดุพื้นแสดงในรูปที่ 4.71 เส้นรอบวงของรอยเชื่อมปรากฏเป็นรูปวงแหวน 3 วง มองเห็นชัดเจนไม่ขาดแหง บ่อหลอมละลายมีความเรียบ ไม่มีร่องรอยการแตกกระจายของน้ำโลหะ และไม่ปรากฏจุดบกพร่องใด ๆ ของรอยเชื่อม การพิจารณา ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมสามารถอธิบายเป็นพื้นฐานของการทดสอบแบบไม่ทำลายของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้อย่างมีนัยสำคัญ การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยทั่วไปลักษณะทางกายภาพจึงเป็นหัวข้อแรกสุดของการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม [3]

วัสดุ	ลักษณะของสีของรอยเชื่อม	
SUS316L		
SUS425		
SUS439MT		
SPC440		
SP791Q		

รูปที่ 4.71 ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมตามชนิดของวัสดุพื้น

งานวิจัยนี้ยังมีข้อสังเกตเกี่ยวกับการแตกกระจายของน้ำโลหะที่มีผลต่อคุณภาพ ความแข็งแรง และความแข็งแรงของรอยเชื่อม จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การแตกกระจายของน้ำโลหะเกิดขึ้นได้ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี คือ ความหนาแน่นของกระแสเชื่อมที่สูง และค่าความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมที่สูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ การแตกกระจายของน้ำโลหะเกิดขึ้นจากค่าความหนาแน่นของกระแสเชื่อมที่สูง หากอ้างอิงการออกแบบการทดลองเพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กโทรด ในงานวิจัยนี้มีการคงที่ปัจจัย แรงกด (F) เท่ากับ 3.0 กิโลนิวตัน กระแสเชื่อม (I) เท่ากับ 8.8 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อม (Tw) เท่ากับ 30 ไซเคิล แต่มีการปรับเปลี่ยนรูปทรงของหัวอิเล็กโทรด 3 รูปแบบ การแตกกระจายของน้ำโลหะเกิดขึ้นเฉพาะกับการใช้หัวอิเล็กโทรดชนิดโค้งรัศมี 16 มิลลิเมตร เนื่องจากมีความหนาแน่นของกระแสเชื่อมที่สูงตามการคำนวณในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ค่าความหนาแน่นของกระแสเชื่อม ต่อ พื้นที่จุดสัมผัสของหัวอิเล็กโทรด

รูปทรงหัวอิเล็กโทรด	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวอิเล็กโทรด ณ จุดสัมผัส (มม.)	พื้นที่จุดสัมผัส (มม. ²)	ความหนาแน่นของกระแสเชื่อม ต่อ พื้นที่จุดสัมผัส (แอมแปร์ ต่อ มม. ²)			
			I= 7.0 kA	I= 8.5 kA	I= 8.8 kA	I= 10.0 kA
Flat	13	132.73	52.74	64.04	66.30	75.34
R30	8.5	56.75	123.36	149.79	155.08	176.23
R16	6.2	30.19	231.86	281.54	291.48	331.23

เมื่อใช้รูปทรงหัวอิเล็กโทรดชนิดโค้งรัศมี 16 มิลลิเมตร กระแสเชื่อม 8.8 kA จะทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสเชื่อม ต่อ พื้นที่มีค่า 291.48 แอมแปร์ ต่อ มม.²

ค่าความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมที่เกิดจากการใช้ระดับของปัจจัยที่ต่างกันกล่าวคือ ค่าความร้อนที่ต่างกันทำให้คุณภาพของรอยเชื่อมต่างกัน ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่ากระแสเชื่อม และแรงดันไฟฟ้าด้วย Welding monitor tester เพื่อนำมาคำนวณหาความร้อนในการเชื่อมในสมการที่ 2.2 ตามการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายของโลหะ และคุณสมบัติทางกลหัวข้อที่ 4.6 ผลการคำนวณโดยไม่คิดค่าการสูญเสียความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 ค่าความร้อนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

กระแสเชื่อม (กิโลแอมแปร์)	เวลาเชื่อม (วินาที)	ความต้านทานรวม โดยเฉลี่ย (โอห์ม)	ค่าความร้อน (จูล)
7.0	0.50	3.20×10^{-4}	7,840
7.0	0.76	3.15×10^{-4}	11,731
7.0	1.00	3.37×10^{-4}	16,513
8.5	0.50	2.82×10^{-4}	10,187
8.5	0.76	2.86×10^{-4}	15,704
8.5	1.00	2.74×10^{-4}	19,797
10.0	0.50	2.69×10^{-4}	13,450
10.0	0.76	2.70×10^{-4}	20,520
10.0	1.00	2.71×10^{-4}	27,100

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ค่าความร้อนในระดับ 7,840 ถึง 15,704 จูล ทำให้คุณลักษณะทางคุณภาพของรอยเชื่อม ได้แก่ ระยะการซึมลึก ระยะการการกดลึก ขนาดของรอยเชื่อมมีค่าสูงขึ้น สำหรับการใช้กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล และกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ค่าความร้อนในการเชื่อมจะมีค่ามากกว่า 19,797 จูล เกิดการแตกกระจายของน้ำโลหะทำให้ระยะการซึมลึก และขนาดของรอยเชื่อมมีค่าลดลง แต่ระยะการการกดลึกจะมีค่าสูงขึ้น การทดสอบคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมในงานวิจัยนี้จะทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน และค่าความแข็งของรอยเชื่อม จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า หากไม่พิจารณารอยเชื่อมที่เกิดการแตกกระจายของน้ำโลหะ ขนาดของรอยเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน ดังนั้นการใช้ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกัน แต่ทำให้ขนาดของรอยเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีค่าใกล้เคียงกัน [80] วิธีการทดสอบแรงดึงเฉือนจะอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3136 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมสำหรับแผ่นงานทดสอบความหนาไม่เกิน 5 มิลลิเมตรให้ทำตามมาตรฐาน JIS Z 3140 สำหรับแผ่นงานทดสอบความหนาเกิน 5 มิลลิเมตร ให้ใช้วิธีการคำนวณจากสมการ 4.1 [93]

$$\text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน (kN)} = [(\pi \times d_i^2) / 4] \times T_s \quad (4.1)$$

เมื่อ d_i คือ ขนาดของรอยเชื่อม T_s คือ ค่า Tensile strength ของวัสดุ (N/mm^2)

วัฏจักรการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเมื่อความร้อนเกิดขึ้นในบริเวณจุดเชื่อมจนถึงจุดหลอมละลายของโลหะ ทำให้แผ่นงานทั้งสองละลายเป็นโลหะเหลวแล้วถูกระบายความร้อนด้วยอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วจนเกิดเป็นรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ในโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจะปรากฏโครงสร้าง 3 ส่วน คือ บริเวณวัสดุพื้น บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน และบริเวณโลหะหลอมละลาย ความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้เกรนในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมทำให้ทราบว่าเกรนบริเวณวัสดุพื้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาด และโครงสร้างจุลภาค บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาด แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนบริเวณวัสดุฝั่งด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนบริเวณวัสดุฝั่งด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ และเฟอร์ไรท์เช่นเดิม บริเวณโลหะหลอมละลายมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาด และโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด บริเวณโลหะหลอมละลายจึงประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนท์ เฟอร์ไรท์ และมาร์เทนไซต์ การทดสอบคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอีกวิธีหนึ่งในงานวิจัยนี้คือ ค่าความแข็งของรอยเชื่อม ความแข็งของรอยเชื่อมในแต่ละบริเวณจะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากความร้อนที่กระจายตัวในบริเวณรอยเชื่อมมีความแตกต่างกัน เมื่อมีการระบายความร้อนจากน้ำที่ไหลผ่านหัวอิเล็กโทรดทำให้บริเวณโลหะที่หลอมละลายมีอัตราการเย็นตัวที่สูงทำให้ค่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว ในทางตรงกันข้ามค่าความร้อนกระจายตัวในบริเวณวัสดุพื้นน้อยจึงทำให้มีค่าความแข็งต่ำสุดเป็นบริเวณดังกล่าวเช่นกัน หากพิจารณาค่าความแข็งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณวัสดุพื้น เนื่องจากบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีแรงกดของหัวอิเล็กโทรดมากกระทำในช่วงเวลาเชื่อม (Welding time) ทำให้ในบริเวณดังกล่าวมีค่าความร้อนสูงกว่าบริเวณวัสดุพื้น อีกทั้งช่วงเวลาการระบายความร้อนด้วยน้ำก็ยังมีแรงกดที่เกิดขึ้นจากช่วงเวลาค้ำ (Hold time) [23], [80] สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณวัสดุพื้นคือ ขนาดของเกรน การเกิดผลึกของคาร์ไบด์ [80] ความแข็งมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเห็นได้จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้การขาดออกจากกันของรอยเชื่อมในการทดสอบแรงดึงเฉือนทุกผลการทดลอง บริเวณที่ขาดออกจากกันเป็นบริเวณวัสดุพื้นฝั่งด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 ใกล้กับบริเวณพื้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน

การเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเกิดจากการแพร่ของส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิดที่ใช้ในการเชื่อมโลหะหลอมละลายแล้วมีการตกค้างในรอยเชื่อมของขั้นตอนการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อม [88] การตรวจปริมาณส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อมจากเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (EDS) ตามพื้นที่โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ระบุในรูปที่ 4.56 ค่าที่ได้จะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณธาตุที่เกิดสมมูล และปริมาณธาตุโครเมียมสมมูล การตรวจสอบโครงสร้างเฟสของรอยเชื่อมจะใช้จุดตัดบนแผนภาพ Schaeffler diagram เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สำหรับการกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อมจะพิจารณาอัตราส่วนของปริมาณธาตุโครเมียมสมมูลต่อปริมาณธาตุที่เกิดสมมูลในบริเวณพื้นที่โลหะหลอมละลายแล้วใช้แผนภาพ Pseudo binary Fe-Cr-Ni เพื่อตรวจสอบการกลายเป็นของแข็ง การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีในบริเวณโลหะที่หลอมละลายมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนในการเชื่อม การใช้กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมสูงขึ้นทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น ธาตุที่ส่งเสริมให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ ได้แก่ ธาตุเกิด คาร์บอน และไนโตรเจน ส่วนธาตุที่ส่งเสริมให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์ได้แก่ ธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัม [30] อีกทั้งอัตราการเย็นตัวที่สูงในรอยเชื่อมจะช่วยให้โครงสร้างเฟสเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นได้รวดเร็ว [94], [95] และทำให้ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ [96]

สำหรับปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425 ได้แก่ แรงกดเท่ากับ 3.3 กิโลนิวตัน เวลาเชื่อมเท่ากับ 25 ไซเคิล กระแสเชื่อมเท่ากับ 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาค้ำเท่ากับ 50 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดบน-ล่างขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยนำไปเชื่อมกับโลหะชนิดอื่น โดยผู้วิจัยได้นำค่าที่เหมาะสมของปัจจัยไปใช้กับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงาน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรกเป็นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS439 MTL ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ต่อแบบเกย 2 แผ่น จำนวน 3 ชิ้นงานทดสอบ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแสดงดังตารางที่ 4.30 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีค่าเฉลี่ยของคุณภาพรอยเชื่อม ได้แก่ ระยะการซึมลึก1 มีค่า 1.01 มิลลิเมตร ระยะการซึมลึก2 มีค่า 1.02 มิลลิเมตร ระยะการกดลึก1 มีค่า 0.31 มิลลิเมตร ระยะการกดลึก2 มีค่า 0.30 มิลลิเมตร และขนาดของรอยเชื่อมมีค่า 8.18 มิลลิเมตร หากเปรียบเทียบผลการทดลองของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS439 MTL ตามตารางที่ 4.30 กับมาตรฐาน JIS Z 3139 ทุกผลการทดลองผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม
เฟอร์ริติกเกรด SUS439 MTL

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึ่มลึก1(t1) มม.	ระยะการซึ่มลึก2(t2) มม.	ระยะการกตลึก1(h1) มม.	ระยะการกตลึก2(h2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.
ค่ามาตรฐานตาม JIS Z 3139	0.30-1.20 มม.	0.30-1.20 มม.	< 0.45 มม.	< 0.45 มม.	> 5.0 มม.
1	0.98	0.98	0.29	0.31	8.14
2	1.02	1.04	0.31	0.29	8.17
3	1.04	1.05	0.32	0.30	8.24
ค่าเฉลี่ย	1.01	1.02	0.31	0.30	8.18
การประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

การเชื่อมชิ้นงานประเภทที่ 2 เป็นการเชื่อมเหล็กชุบสังกะสีเกรด SP791Q ความหนา 2.3 มิลลิเมตร ต่อแบบเกย 2 แผ่น จำนวน 3 ชิ้นงานทดสอบการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมแสดงดังตารางที่ 4.31 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อมโดยเฉลี่ยให้ค่าระยะการซึ่มลึก1 มีค่า 1.52 มิลลิเมตร ระยะการซึ่มลึก2 มีค่า 1.42 มิลลิเมตร ระยะการกตลึก1 มีค่า 0.35 มิลลิเมตร ระยะการกตลึก2 มีค่า 0.35 มิลลิเมตร และขนาดของรอยเชื่อมมีค่า 7.55 มิลลิเมตร จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานทำให้ทราบว่าคุณภาพของรอยเชื่อมผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน JIS Z 3139

ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของเหล็กชุบสังกะสีเกรด SP791Q

ลำดับการทดลอง	ระยะการซึ่มลึก1 (t1) มม.	ระยะการซึ่มลึก2 (t2) มม.	ระยะการกตลึก1 (h1) มม.	ระยะการกตลึก2 (h2) มม.	ขนาดของรอยเชื่อม (di) มม.
ค่ามาตรฐานตาม JIS Z 3139	0.46 - 1.84 มม.	0.46 - 1.84 มม.	< 0.69 มม.	< 0.69 มม.	> 6.06 มม.
1	1.56	1.46	0.35	0.30	7.65
2	1.51	1.43	0.32	0.38	7.47
3	1.48	1.38	0.37	0.38	7.52
เฉลี่ย	1.52	1.42	0.35	0.35	7.55
การประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

จากข้อมูลการทดลองตารางที่ 4.30 และ 4.31 ทำให้ทราบว่า ปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมสามารถนำไปใช้กับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพอร์ริติกเกรด SUS439 MTL ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ต่อแบบเกย 2 แผ่น และสามารถนำไปใช้กับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กชุบสังกะสีเกรด SP791Q ความหนา 2.3 มิลลิเมตร ต่อแบบเกย 2 แผ่นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยศึกษาปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพ และมีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ได้แก่ ระยะเวลาซึมลึก ระยะเวลากรดลึก ขนาดของรอยเชื่อม และพื้นที่ของรอยเชื่อม เพื่อเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 โดยทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial experiment design) รวมถึงการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมโดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเพื่อนำไปสร้างสมการทำนายคุณลักษณะของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425 ได้แก่ ระยะเวลาซึมลึก1 (t1) ระยะเวลาซึมลึก2 (t2) ขนาดของรอยเชื่อม (di) และพื้นที่ของรอยเชื่อม (area) โดยพิจารณาจากความพึงพอใจของผลตอบ การศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลาย โลหะ และคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ธาตุจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDS)

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อม

การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองเชิงสถิติจากการเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดรูปทรงที่แตกต่างกัน ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพ และมีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ สามารถเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดแบบโค้งรัศมี 30 มิลลิเมตรทั้งด้านบน และด้านล่าง สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425

5.1.2 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 ได้แก่

1. แรงกด (F) ค่าที่เหมาะสม คือ แรงกด เท่ากับ 3.3 กิโลนิวตัน
2. เวลาเชื่อม (Tw) ค่าที่เหมาะสม คือ เวลาเชื่อม เท่ากับ 25 ไชเคิล
3. กระแสเชื่อม (I) ค่าที่เหมาะสม คือ กระแสเชื่อม เท่ากับ 10.0 กิโลแอมแปร์
4. เวลากรดค้าง (Th) ค่าที่เหมาะสม คือ เวลากรดค้าง เท่ากับ 50 ไชเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 3 ชิ้นงานทดลอง เพื่อตรวจสอบผลตอบที่ออกมาได้ตามค่าเป้าหมายหรือไม่ จากผลการทดลองพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองยืนยันผล ระยะเวลาเชื่อมลิก1 (t1) มีค่าเฉลี่ย 1.16 มิลลิเมตร ระยะเวลาเชื่อมลิก2 (t2) มีค่าเฉลี่ย 1.06 มิลลิเมตร ขนาดของรอยเชื่อม (di) มีค่าเฉลี่ย 8.33 มิลลิเมตร และพื้นที่ของรอยเชื่อม (area) มีค่าเฉลี่ย 16.15 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับผลตอบที่ได้จากสมการทำนาย จึงสรุปได้ว่า ผลการทดลองที่ได้เป็นค่าที่เหมาะสมของการตั้งค่าปัจจัยในการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425

5.1.3 คุณลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม

การพิจารณาลักษณะทางกายภาพเป็นพื้นฐานการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมเบื้องต้น ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมปรากฏวงแหวน 3 วง โดยเรียงลำดับดังนี้ วงในสุดเป็นวงแหวนบ่อหลอมละลาย (Melt ring) วงแหวนกลางเป็นวงแหวนรอยเชื่อม (Fusion zone ring) และวงแหวนนอกสุดเป็นวงแหวนบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม (HAZ ring) สิววงแหวนในรอยเชื่อมสามารถบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานความร้อนที่กระจายตัวในรอยเชื่อม โดยความเข้มของสีวงแหวนจะมีค่าสูงขึ้นในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนทั้ง 3 วงมีขนาดที่เพิ่มขึ้นตามระดับปัจจัยการเชื่อมที่สูงขึ้น การใช้ปัจจัยกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมแตกต่างกันจะทำให้สีของรอยเชื่อมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.4 โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกันจะปรากฏรูปร่างของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันโดยคุณลักษณะด้านคุณภาพ ได้แก่ ระยะเวลาเชื่อมลิก ระยะเวลาคดลิก ขนาดของรอยเชื่อม จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้น การกำหนดปัจจัยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ทำให้เกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจาย (Expulsion) ในกระบวนการเชื่อมส่งผลให้ระยะเวลาเชื่อมลิกลดลง ขนาดของรอยเชื่อมลดลง และระยะเวลาคดลิกเพิ่มขึ้น

5.1.5 คุณลักษณะทางกลของรอยเชื่อม

การศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายโลหะและคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม จากการกำหนดปัจจัยแรงกดระดับ 3.3 กิโลนิวตัน เวลาคดค่างระดับ 50 ไซเคิล รูปทรงหัวอิเล็กโทรดด้านบนและด้านล่าง ขนาดรัศมี 30 มิลลิเมตร ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยกระแสเชื่อมตั้งแต่ระดับ 7.0, 8.5, 10.0 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อมตั้งแต่ระดับ 25, 38, 50 ไซเคิล สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.5.1 ค่าความสามารถการต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม (Tensile-shear force)

ค่าความร้อนที่เกิดกระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมที่เหมาะสมทำให้เกิดการขยายขอบเขตของรอยเชื่อมซึ่งส่งผลให้ค่าความสามารถการต้านทานแรงดึงเฉือนสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการเกิดน้ำโลหะเหลวแตกกระจาย ในกระบวนการเชื่อมส่งผลให้ค่าความสามารถการต้านทานแรงดึงเฉือนลดลงเนื่องจากการสูญเสียเนื้อโลหะในรอยเชื่อม รอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เป็นชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนสูงที่สุดเท่ากับ 15,618.8 นิวตัน รอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยการใช้กระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เป็นชิ้นงานทดสอบที่ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดึงเฉือนต่ำที่สุดเท่ากับ 12,355 นิวตัน ลักษณะการแยกออกจากกันของรอยเชื่อมที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นแบบเฉือนเนื่องงานทดสอบ (Pullout failure mode) โดยเกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันทั้งหมดทุกชิ้นงานทดสอบ ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุพื้น

5.1.5.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อม (Microhardness)

ค่าความแข็งวัดค่าจากชิ้นงานเชื่อมบริเวณวัสดุพื้น บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและบริเวณพื้นที่รอยเชื่อม ค่าความแข็งของบริเวณวัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่าเฉลี่ย 195 HV ค่าความแข็งของบริเวณวัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีค่าเฉลี่ย 167 HV สำหรับค่าความแข็งบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ ระดับค่าปัจจัย หรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าความแข็งในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งบริเวณวัสดุพื้น ค่าเฉลี่ยของความแข็งของบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L มีค่าระหว่าง 236 ถึง 263 HV ค่าความแข็งของบริเวณพื้นที่ที่ได้รับความร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 มีระหว่าง 231 ถึง 248 HV ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่โลหะหลอมละลายมีระหว่าง 302 ถึง 315 HV

5.1.6 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบ่งเป็น 3 ขอบเขต คือ บริเวณวัสดุพื้นโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L ประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์ และเฟสเฟอร์ไรท์ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS425 เป็นเฟสเฟอร์ไรท์ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง SUS316L และ SUS425 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสแต่ขนาดของเกรนจะมีขนาดโตกว่าขนาดเกรนบริเวณวัสดุพื้น บริเวณโลหะหลอมละลายโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนเฟสซึ่งประกอบด้วยเฟสออสเทนไนท์ เฟสเฟอร์ไรท์ และเฟสมาร์เทนไซต์

5.1.7 การกลายเป็นของแข็งของรอยเชื่อม

โครงสร้างเกรนที่ปรากฏในบริเวณโลหะหลอมละลายเป็นโครงสร้างแบบคอลัมน์นาร์ เกรนจะมีลักษณะยาว เจริญเติบโตในทิศทางตั้งฉากกับผนังของวัสดุพื้น การกลายเป็นของแข็งเป็นชนิด F (F Mode) ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ และ Widmanstätten ออสเทนไนท์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาการวิจัยการเชื่อมชิ้นงานวัสดุต่างชนิดด้วยเครื่องเชื่อมความดันแบบจุดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้วิจัยเสนอแนะดังนี้

1. การทดลองการเชื่อมชิ้นงานแบบต่อเกลียวด้วยเครื่องเชื่อมความดันแบบจุดโดยใช้หัวอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกขนาด 13 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานจริงในการผลิตชิ้นส่วนท่อไอเสียรถยนต์ ดังนั้นปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความดันแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SUS316L กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด SUS425 สามารถประยุกต์ใช้กับการใช้หัวอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกขนาดอื่น ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. รูปทรง และวัสดุที่ใช้ทำหัวอิเล็กโทรดมีผลต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นการเลือกใช้ต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน และต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการใช้หัวอิเล็กโทรด เช่น การเลือกรูปทรงหัวอิเล็กโทรดที่เป็นรูปทรงมาตรฐานเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ การตกแต่งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Dressing electrode tip)

3. การทดลองเชื่อมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดอื่น ๆ ที่สามารถควบคุมได้ให้ทำการควบคุมเป็นค่าคงที่ เช่น อุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ระบายความร้อน การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า การทำความสะอาดชิ้นงานเชื่อมก่อนการเชื่อม เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โยชิน จันทร์ทอง. "การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับ แรงดึง
เฉือนสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1"
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [2] ชีรุฒิ เชื้อนแก้ว. "การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมสำหรับ
เหล็กกล้าไร้สนิม JFE429 โดยหุ่นยนต์งานเชื่อมอัตโนมัติ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง. 2555.
- [3] Mohammed A. **The automotive body manufacturing systems and process.**
southern gate, Chichester : John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- [4] Aslanlar S. "The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical
resistance spot welding of sheets used in automotive industry" **Materials &
Design**, vol. 27, no. 2, Jan 2006. pp. 125–131.
- [5] Pouranvari M., Marashi SPH., Mousavizadeh S.M. "Failure mode transition and
mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of
DP600 and low carbon steels" **Science and Technology of Welding and
Joining**, vol. 15, no. 7, Oct 2010. pp. 625–631.
- [6] Annette O. **AWS welding handbook welding processes part2.** 9th ED. USA. :
American Welding Society. 2007.
- [7] Pouranvari M., Marashi SPH. "Failure mode transition in AHSS resistance spot
welds. Part I. Controlling factors" **Materials Science and Engineering: A**,
vol. 528, no. 29, Nov. 2011. pp. 8337–8343.
- [8] Bina M.H., Jamali M., Shamanian M., Sabet H. "Investigation on the resistance
spot-welded austenitic/ferritic stainless steel" **The International Journal of
Advanced Manufacturing Technology**, vol. 75, no. 9–12, Dec 2014. pp.
1371–1379.
- [9] Bina M.H., Jamali M., Shamanian M., Sabet H. "Effect of Welding Time in the
Resistance Spot Welded Dissimilar Stainless Steels" **Transactions of the
Indian Institute of Metals**, vol. 68, no. 2, Apr 2015. pp. 247–255.
- [10] Pouranvari M., Marashi SPH., Alizadehsh M. "Welding Metallurgy of Dissimilar AISI
430/DQSK Steels Resistance Spot Welds" **Welding journal**, vol. 6, no. 94,
Jun. 2015. pp. 203s–210s.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Cui Y., Lundin C.D. "Austenite-preferential corrosion attack in 316 austenitic stainless steel weld metals" **Materials & Design**, vol. 28, no. 1, Dec 2007. pp. 324–328.
- [12] Özyürek D. "An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel" **Materials & Design**, vol. 29, no. 3, Dec 2008. pp. 597–603.
- [13] สมาร์ททูล. 2015. **สแตนเลสในอุตสาหกรรมยานยนต์ไทย**. [Online]. Available : <http://www.siamstainless.com>.
- [14] Hsieh C-C., Lin D-Y., Chen M-C., Wu W. "Microstructure, recrystallization, and mechanical property evolutions in the heat-affected and fusion zones of the dissimilar stainless steels" **Materials Transactions**, vol. 48, no. 11, Sep 2007. pp. 2898–2902.
- [15] Pouraliakbar H., Hamed M., Kokabi A.H., Nazari A. "Designing of CK45 carbon steel and AISI 304 stainless steel dissimilar welds" **Materials Research**, vol. 17, no. 1, Oct 2013. pp. 106–114.
- [16] Fukumoto S., Fujiwara K., Toji S., Yamamoto A. "Small-scale resistance spot welding of austenitic stainless steels" **Materials Science and Engineering: A**, vol. 492, no. 1–2, Sep 2008. pp. 243–249.
- [17] Alizadeh-Sh M., Marashi SPH., Pouranvari M. "Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties" **Materials & Design**, vol. 56, Apr 2014. pp. 258–263.
- [18] Vignesh K., Elaya Perumal A., Velmurugan P. "Optimization of resistance spot welding process parameters and microstructural examination for dissimilar welding of AISI 316L austenitic stainless steel and 2205 duplex stainless steel" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 93, no. 1–4, Oct 2017. pp. 455–465.
- [19] ENTRON Controls. 2018. **Resistance welding basics**. [Online]. Available : <https://www.entron.mx/images/downloads/700081C.pdf>
- [20] Chuko W.L., Gould J.E. "Development of appropriate resistance spot welding practice for transformation-hardened steels" **Welding journal**, vol. 81, no. 1, Feb 2002. pp. 2S-7S.
- [21] ศักดิ์ชัย จันทศรี, ไพบุลย์ แยมเนียน, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. "การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD" โครงการวิจัยงบประมาณประจำปี2555 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2555.

- [22] Luo Y., Rui W., Xie X., Zhu Y. "Study on the nugget growth in single-phase AC resistance spot welding based on the calculation of dynamic resistance" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 229, Mar 2016. pp. 492–500.
- [23] Zhang H., Senkara J. **Resistance Welding Fundamentals and Applications**. 2nd ED. USA. : Taylor & Francis Group, Inc. 2001.
- [24] Millerweld. 2012. **Hand book for resistance spot welding**. [Online]. Available : <https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/resistance.pdf>
- [25] Li Y., Wei Z., Li Y., Shen Q., Lin Z. "Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding" **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 65, Oct 2013. pp. 400–408.
- [26] รัฐนาฏ ประยูรมหิศร. "การออกแบบการทดลองสำหรับตัวแปรของการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 410" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2553.
- [27] Thyssenkrupp. 2015. เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับระบบท่อไอเสียรถยนต์. [Online]. Available : <http://www.siamstainless.com>
- [28] Japanese Standard Association. **Japanese Industrial Standard 1978, Method of Macro Test for Section of Spot Welded Joint JIS Z3139**. Tokyo, Japan: Inc. 1978.
- [29] Chao YJ. "Failure mode of spot welds: interfacial versus pullout" **Science and Technology of Welding & Joining**, vol. 8, no. 2, Apr 2003. pp. 133–137.
- [30] Kianersi D., Mostafaei A., Amadeh AA. "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations" **Materials & Design**, vol. 61, Sep 2014. pp. 251–263.
- [31] Wegrzyn T. "Delta ferrite in stainless steel weld metals" **Welding International**, vol. 6, no. 9, Jan 1992. pp. 690–694.
- [32] Lippold JC. **Welding metallurgy and weldability**. USA. : John Wiley & Sons, Inc. 2015.
- [33] Saranya K., Vitoon U. "Investigation of Hot Deformation Behavior of Duplex Stainless Steel Grade 2507" **Metallurgical and Materials Transactions A**, no. 48, Jan 2017. pp. 95–108.
- [34] Nowacki J., Łukojć A. "Structure and properties of the heat-affected zone of duplex steels welded joints" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 164–165, May 2005. pp. 1074–1081.

- [35] Hwang SW., Ji LH., Lee EG., Park KT. "Tensile deformation of a duplex Fe–20Mn–9Al–0.6C steel having the reduced specific weight" **Materials Science and Engineering: A**, vol. 528, no. 15, Jun 2011. pp. 5196–5203.
- [36] Fu JW., Yang YS., Guo JJ. "Formation of a blocky ferrite in Fe–Cr–Ni alloy during directional solidification" **Journal of Crystal Growth**, vol. 311, no. 14, Jul 2009. pp. 3661–3666.
- [37] Shankar V., Gill TPS., Mannan SL., Sundaresan S. "Solidification cracking in austenitic stainless steel welds" **Sadhana**, vol. 28, no. 3–4, Jun 2003. pp. 359–382.
- [38] เชาวลิติ ราชแก้ว. "ศึกษาผลกระทบทางกระบวนการความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด UNS S31803 โดยผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน" วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [39] สมนึก วัฒนศรีกุล. **การทดสอบวัสดุ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : กรีนเวิลด์ มีเดีย (ประเทศไทย). 2549.
- [40] ทวีศักดิ์ อัครางกูร. **วัสดุวิศวกรรม**. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2542.
- [41] Japanese Standard Association. **Japanese Industrial Standard 1978, Method of Tension Shear Test for Spot Welded Joint JIS Z3136**. Tokyo, Japan: Inc. 1978.
- [42] Japanese Standard Association. **Japanese Industrial Standard 1978, Method of Inspection for Spot Weld JIS Z 3140**. Tokyo, Japan: Inc. 1978.
- [43] ชาญณรงค์ สายแก้ว. **สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม**. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2553.
- [44] ประไพศรี สุทัศน์ ณ ออยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป. 2551.
- [45] ปารามศ ชูติมา. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองทางวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [46] Montgomery DC. **Design and analysis of experiments**. 8th ED. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [47] Mazur W., Kyriakopoulos A., Bott N., West D. "Use of modified electrode caps for surface quality welds in resistance spot welding" **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 22, Apr 2016. pp. 60–73.
- [48] Luo Y., Wan R., Yang Z., Xie X. "Study on the thermo-effect of nugget growing in single-phase AC resistance spot welding based on the calculation of dynamic resistance" **Measurement**, vol. 78, Jan 2016. pp. 18–28.

- [49] Rawal MR., Varane V., Kolhapure RR. "Process Parameter Optimization for Resistance Spot Welding using Response Surface Methodology" **International Journal of Trend in Scientific Research and Development**, vol. 3, no. 3, Apr 2019. pp. 1078–1082.
- [50] Muhammad N., Manurung YHP., Hafidzi M., Abas SK., Tham G., Haruman E. "Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM" **Journal of Mechanical Science and Technology**, vol. 26, no. 8, Aug 2012. pp. 2365–2370.
- [51] Hamidinejad SM., Kolahan F., Kokabi AP. "The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing" **Materials & Design**, vol. 34, Feb 2012. pp. 759–767.
- [52] Jagadeesha T. "Experimental studies in weld nugget strength of resistance spot-welded 316L austenitic stainless steel sheet" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 93, no. 1–4, Oct 2017. pp. 505–513.
- [53] Moshayedi H., Sattari-Far I. "Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steel" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 212, no. 2, Feb 2012. pp. 347–354.
- [54] Kocabekir B., Kaçar R., Gündüz S., Hayat F. "An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 195, no. 1–3, Jan 2008. pp. 327–335.
- [55] Feng QB., Li YB., Carlson BE., Lai XM. "Study of resistance spot weldability of a new stainless steel" **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 24, no. 2, Feb 2019. pp. 101–111.
- [56] Aghajani H., Pournvari M. "A pathway to produce strong and tough martensitic stainless steels resistance spot welds" **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 24, no. 3, Apr 2019. pp. 185–192.
- [57] Subrammanian A., Jabaraj DB., Jayaprakash J., Bupesh Raja VK. "Mechanical Properties and Phase Transformations in Resistance Spot Welded Dissimilar Joints of AISI409M/AISI301 Steel" **Indian Journal of Science and Technology**, vol. 9, no. 41, Nov. 2016. pp. 1-8.
- [58] Mousavi Anijdan SH., Sabzi M., Ghobeiti-Hasab M., Roshan-Ghiyas A. "Optimization of spot welding process parameters in dissimilar joint of dual phase steel DP600 and AISI 304 stainless steel to achieve the highest level of shear-tensile strength" **Materials Science and Engineering: A**, vol. 726, May 2018. pp. 120–125.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] Alenius M., Pohjanne P., Somervuori M., Hanninen H. "Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels" **Welding journal**, vol. 85, Apr 2006. pp. 305-313.
- [60] Essoussi H., Elmouhri S., Eттаqi S., Essadiqi E. "Microstructure and mechanical performance of resistance spot welding of AISI 304 stainless steel and AISI 1000 series steel" **Procedia Manufacturing**, vol. 32, May 2019. pp. 872–876.
- [61] Fu JW., Yang YS. "Origin of the lathy ferrite in AISI 304 stainless steel during directional solidification" **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 580, Dec 2013. pp. 191–194.
- [62] Leone GL., Kerr HW. "The Ferrite to Austenite Transformation in Stainless Steels" **Welding journal**, no. 61, Jan 1982. pp. 13s–22s.
- [63] Zhang W, Sun D., Han L., Li Y. "Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel" **Materials & Design**, vol. 85, Nov 2015. pp. 461–470.
- [64] JFE Steel Corporation. 2017. **JFE STAINLESS STEELS**. [Online]. Available : <http://www.jfe-steel.co.jp/en>.
- [65] Khuenkaew T., Kanlayasiri K. "Selection of electrode tips for the resistance spot welding of dissimilar stainless steels" **MATEC Web of Conferences**, vol. 192, Aug 2018. pp. 01007.
- [66] Khuenkaew T., Kanlayasiri K. "Optimizing the resistance spot-welding process for dissimilar stainless steels" **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 361, May 2018. pp. 012005.
- [67] Shawon MRA., Gulshan F., Kurny ASW. "Effect of Welding Current on the Structure and Properties of Resistance Spot Welded Dissimilar (Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel) Metal Joints" **Journal of The Institution of Engineers (India): Series D**, vol. 96, no. 1, Apr 2015. pp. 29–36.
- [68] Moteshakker A., Danaee I. "Microstructure and Corrosion Resistance of Dissimilar Weld-Joints between Duplex Stainless Steel 2205 and Austenitic Stainless Steel 316L" **Journal of Materials Science & Technology**, vol. 32, no. 3, Mar 2016. pp. 282–290.
- [69] Fan Q., Xu G., Gu X. "Expulsion characterization of stainless steel resistance spot welding based on dynamic resistance signal" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 236, Oct. 2016. pp. 235–240.
- [70] Vural M., Akkuş A., Eryürek B. "Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 176, no. 1–3, Jun 2006. pp. 127–132.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [71] Hayat F. "The effects of the welding current on heat input, nugget geometry, and the mechanical and fractural properties of resistance spot welding on Mg/Al dissimilar materials" **Materials & Design**, vol. 32, no. 4, Apr 2011. pp. 2476–2484.
- [72] Mumin T., Hakan A., Ali B. "Effect of Weld Current on the Microstructure and Mechanical Properties of a Resistance Spot-Welded TWIP Steel Sheet" **Metals**, vol. 7, no. 12, Nov 2017. pp. 519.
- [73] Yuan X., Li C., Chen J., Li X., Liang X., Pan X. "Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels" **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 239, Jan. 2017. pp. 31–41.
- [74] Sun X., Stephens EV., Khaleel MA. "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions" **Welding journal**, vol. 86, Jan 2007. pp. 18s–25s.
- [75] Pouranvari M., Asgari HR., Mosavizadch SM., Marashi SPH., Goodarzi M. "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds" **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 12, no. 3, Apr 2007. pp. 217–225.
- [76] Pouranvari M., Mousavizadeh SM., Marashi SPH., Goodarzi M., Ghorbani M. "Influence of fusion zone size and failure mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI 1008 low carbon steel and DP600 advanced high strength steel" **Materials & Design**, vol. 32, no. 3, Mar 2011. pp. 1390–1398.
- [77] Pouranvari M., "Analysis of Fracture Mode of Galvanized Low Carbon Steel Resistance Spot Welds" **International Journal of multidisciplinary sciences and engineering**, vol. 2, no. 6, Sep 2011. pp. 36-40.
- [78] Pouranvari M., Ranjbarnoodeh E. "Resistance Spot Welding Characteristic of Ferrite-Martensite DP600 Dual Phase Advanced High Strength Steel-Part III: Mechanical Properties" **World Applied Sciences Journal**, vol.15, no.11, Jan 2011. pp. 1521-1526.
- [79] Dupont JN., Kusko CS. "Technical Note: Martensite Formation in Austenitic/Ferritic Dissimilar Alloy Welds" **Welding journal**, vol. 86, Feb 2007. pp. 51s–54s.
- [80] Yürük A., Kahraman N. "Weld zone characterization of stainless steel joined through electric resistance spot welding" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 92, no. 5–8, Sep 2017. pp. 2975–2986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [81] Song T., Jiang X., Shao Z., Mo D., Zhu D., Zhu M. "The Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Joints of 316L Stainless Steel and the 4J29 Kovar Alloy Using Nickel as an Interlayer" **Metals**, vol. 6, no. 11, Nov 2016. pp. 263.
- [82] Charde N., Rajkumar R. "Investigating spot weld growth on 304 Austenitic stainless steel (2mm) sheets" **Journal of Engineering Science and Technology**, vol. 8, no. 1, Feb 2013. pp. 69–76.
- [83] สุทิน คูหาเรื่องรอง. **แผนภาพเฟส**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2558.
- [84] Durand-Charre M. **The microstructure of steel and irons**. Germany : Springer-Verlag Burlin Heideleberg New York, Inc. 2004.
- [85] Hasanbaşıoğlu A., Kaçar R. "Resistance spot weldability of dissimilar materials (AISI 316L–DIN EN 10130-99 steels)" **Materials & Design**, vol. 28, no. 6, Jan 2007. pp. 1794–1800.
- [86] Rajasekhar K., Harendranath CS., Raman R., Kulkarni SD. "Microstructural evolution during solidification of austenitic stainless steel weld metals: A color metallographic and electron microprobe analysis study" **Materials Characterization**, vol. 38, no. 2, Feb 1997. pp. 53–65.
- [87] Mohammed GR., Ishak M., Aqida SN., Abdulhadi HA. "Effects of Heat Input on Microstructure, Corrosion and Mechanical Characteristics of Welded Austenitic and Duplex Stainless Steels: A Review" **Metals**, vol. 7, no. 2, Feb 2017. pp. 39.
- [88] Alizadeh-Sh M., Marashi SPH. " Resistance spot welding of dissimilar austenitic/duplex stainless steels: Microstructural evolution and failure mode analysis " **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 28, no. 5–8, Aug 2017. pp. 186–196.
- [89] Siam part product. 2018. **Spot welding level2 for technicians**. [Online]. Available:<http://www.siampart.com/content/file/tips/0915161473907419.pdf>.
- [90] Wu K.C., "Resistance spot welding of high contact resistance surfaces for weldbonding" **Welding journal**, vol. 54, no. 12, Dec 1975. pp. 436s–443s.
- [91] Resistance Welding Manufacturers Association. 2019. **How to resistance weld**. [Online]. Available:<https://www.howtoresistanceweld.info/search.html?t%5B%5D=213&q=preheat&t%5B%5D=0&Search=>.
- [92] Production engineering. 2016. **Resistance welding applications and controls**. [Online]. Available: <http://www.resistanceweldsupplies.com>.
- [93] Nippon steel and Sumitomo metal. 2016. **welding of superDyma**. [Online]. Available: http://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/U027en.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [94] Mourad A.-H. I., Khourshid A., Sharef T. " Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties " **Materials Science and Engineering: A**, vol. 549, Jul 2012. pp. 105–113.
- [95] Pouranvari M., Alizadeh-Sh M., Marashi S.P.H. " Welding metallurgy of stainless steels during resistance spot welding Part I: fusion zone " **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 20, no. 6, Oct 2015. pp.502–511.
- [96] Tan H., Wang Z., Jiang Y., Yang Y., Deng B., Song H., Li J. " Influence of welding thermal cycles on microstructure and pitting corrosion resistance of 2304 duplex stainless steels " **Corrosion Science**, vol. 55, Feb 2012. pp.368–377.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
สำเนาเกียรติบัตรผลงานตีพิมพ์ และบทความ
ที่ได้รับการตีพิมพ์ฉบับที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



metals

IMPACT
FACTOR
2.259

CERTIFICATE of PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:

Resistance Spot Welding of SUS316L Austenitic/SUS425 Ferritic Stainless Steels: Weldment Characteristics, Mechanical Properties, Phase Transformation and Solidification

Authored by:

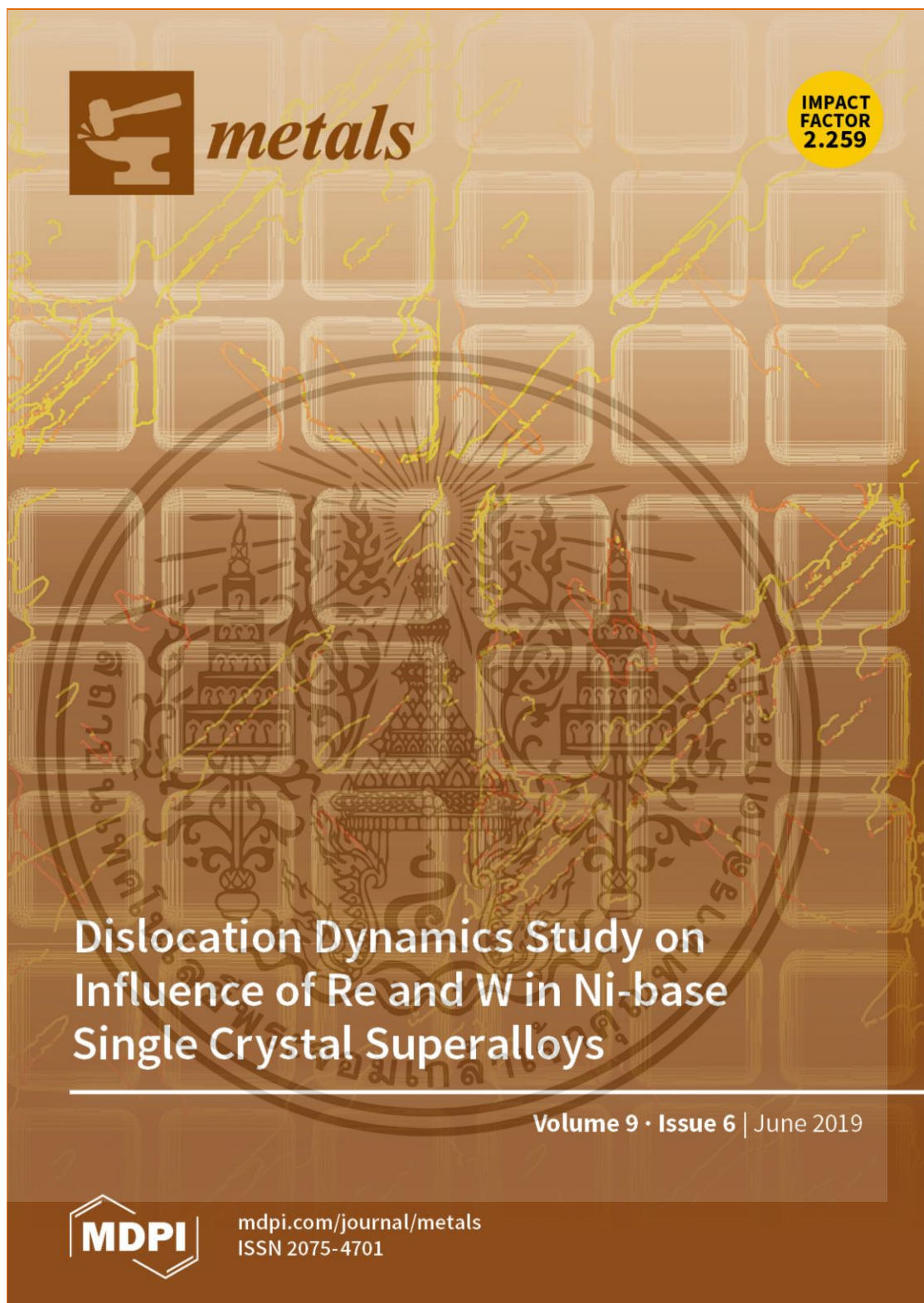
Teerawut Khuenkaew; Kannachai Kanlayasiri

Published in:

Metals 2019, Volume 9, Issue 6, 710



Academic Open Access Publishing
since 1996



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Resistance Spot Welding of SUS316L Austenitic/SUS425 Ferritic Stainless Steels: Weldment Characteristics, Mechanical Properties, Phase Transformation and Solidification

Teerawut Khuenkaew  and Kannachai Kanlayasiri *

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; tankhun_k@hotmail.com

* Correspondence: kkkannac@kmitl.ac.th; Tel.: +66-232-98-339

Received: 9 May 2019; Accepted: 30 May 2019; Published: 24 June 2019



Abstract: This research examines the weldment characteristics and mechanical properties of lap joints of SUS316L/SUS425 stainless steels using resistance spot welding under variable weld currents and welding times. The weld current was varied between 7.0, 8.5, and 10.0 kA, and the welding time between 25, 38, and 50 cycles. The weldment quality characteristics under study were the depth of fusions, indentation depths, and nugget diameter, and the mechanical properties included the tensile shear force (TSF) and micro Vickers hardness. Phase transformation and solidification were characterized using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry, together with Schaeffler and pseudo-binary predictive phase diagrams. The results revealed that the weldment quality was positively correlated with weld current and welding time, as were the TSF and micro hardness. The optimal welding condition was achieved under a 10.0 kA weld current and 25-cycle welding time. Under the optimal condition, the fusion zone exhibited compression-direction columnar grains consisting of austenite, ferrite, and martensite and the solidification was of ferrite plus Widmanstätten austenite.

Keywords: resistance spot welding; dissimilar stainless steels; phase transformation; solidification mode; weld quality characteristics

1. Introduction

Resistance spot welding (RSW) is commonly used in the automotive, aviation, and manufacturing sectors because of its simplicity, automatability, ease of maintenance, and cost-effectiveness [1–3]. Specifically, in the automotive industry, dissimilar ferritic and austenitic stainless steel grades are widely utilized in exhaust pipes due to their attractive appearance, weldability, and corrosion-resistance [4]. More specifically, sections of the exhaust subjected to lower temperatures are made of ferritic stainless steel, while those exposed to high temperatures are made of austenitic stainless steel. Applying RSW to dissimilar stainless steel grades renders the weld nugget prone to cracking due to high heat input, and the likelihood is multiplied if unsuited electrode caps are used, causing accumulative residual stress [4,5]. In the automotive sector, solidification cracking normally develops in the welding of stainless steels with different metallurgical, physical, and mechanical properties [6], leading to excessive noise, vibration, and compromised strength [7].

Liu et al. [8] investigated the RSW microstructure and mechanical performance of austenite stainless CRHS301LN and reported martensite transformation at interfacial fractures. Specifically, martensite induced weldment fatigue and subsequent fractures. Moshayedi and Sattari-Far [9] investigated the effect of weld current and welding time on the RSW quality of AISI304 stainless steel,

and reported that weld current and welding time were positively correlated with nugget size, with the weld current playing a more dominant role. In addition, the magnitude of residual stress in the inner nugget was greater than that in the outer one, and the residual stress was inversely correlated with the weld current and welding time. Jagadeesha [10] studied the effect of weld current and welding time on the ultimate tensile shear strength of RSW of AISI316L of 1.6 mm in thickness; and reported two failure modes: tearing for larger weld nuggets and shearing for smaller ones. Kianersi et al. [5] optimized the RSW parameters of AISI316L stainless steel in terms of nugget size, mechanical properties, and phase transformation. Alizadeh-Sh et al. [11] documented the relationship between the RSW thermal cycle of AISI430 stainless steel and the microstructure, mechanical properties, and phase transformation of weldments. Vignesh et al. [12] proposed the optimal RSW welding parameters for AISI316L/2205 duplex stainless steels and reported the presence of ferrite in the heat affected zone of both materials. Bina et al. [13] reported that an elevated weld current for RSW of AISI430/AISI304 stainless steels increased the weld nugget dimension and weldment strength. The weldment however suffered from the pullout failure mode. Essoussi et al. [14] reported mechanical performance for austenite AISI 304 (ASS) and ferrite AISI 1000 steel grade (FS), and the three patterns of weldment of RSW (ASS/ASS, ASS/FS, FS/FS) which were found to have the highest tensile shear strength were ASS/ASS, ASS/FS and FS/FS respectively, and the failure mode depended on the nugget size and morphology. Alenius et al. [15] studied the mechanical properties of RSW dissimilar joints for austenite stainless/galvanized steels, and reported that the presence of full martensite in the weld nugget the strength of spot weld joints depends on the strength and thickness of the base material. Sun et al. [16] investigated the effects of the fusion zone size on the failure modes, static strength and energy absorption for RSW of DP800/TRIP800 under a lap shear loading condition. The study showed that fusion zone size is the most critical factor in weld quality.

Despite numerous publications on the effect of heat input on the RSW of dissimilar stainless steels, research on the microstructure and solidification of RSW weldment, particularly in the fusion zone, is limited. This fact could be attributed to measurement challenges inherent in the RSW of two stainless steels with diverse physical and mechanical properties, in addition to the rapid cooling rates of the RSW technology.

Thus, this research investigates the weldment quality and mechanical properties of lap joints of dissimilar SUS316L and SUS425 stainless steels using RSW under variable weld currents and welding times. The weldment quality characteristics included the depth of fusions, indentation depths, and nugget diameter and the mechanical properties under study were TSF and micro hardness. The weldment characteristics were determined by optical microscopy, TSF by a universal testing machine, and the micro hardness by a Vickers hardness tester. In addition, the microstructure analysis of weldments was carried out to characterize phase transformation and solidification.

2. Materials and Methods

2.1. Materials and Welding Process

The base metals were SUS316L and SUS425 stainless steel sheets of 1.5 mm thickness. Tables 1–3 respectively tabulate the chemical composition, mechanical and physical properties of the base metals. The base metals were individually cut into plates of 125 mm × 40 mm (L×W) in dimension and lap jointed according to the JIS Z3139 standard. The weld configuration was SUS316L on top of a SUS425 specimen and spot-welded using a 50 kVA AC, 50 Hz RSW machine, with a pair of CrCuZr alloy electrode caps with a 13 mm outer diameter and 30 mm radius. In the experiment, the weld current was varied between 7.0, 8.5, and 10.0 kA and the welding time varied between 25, 38, and 50 cycles (1 cycle = 0.02 s). Meanwhile, the electrode force, squeeze time, holding time, and weld atmosphere remained constant (Table 4).

Table 1. Chemical composition of base metals (wt %).

Material	Element								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
SUS316L	0.02	0.25	0.75	0.01	0.0003	17.07	10.46	1.64	Balance
SUS425	0.01	0.83	0.09	0.01	0.003	13.48	0.06	0.02	Balance

Table 2. Mechanical properties of base metals.

Material	Hardness (HV)	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS316L	218(max)	205(min)	520(min)	35(min)
SUS425	200(max)	205(min)	410(min)	25(min)

Table 3. Physical properties of base metals.

Material	Specific Heat (J/kg °C)	Density (kg/m ³)	Electrical Resistivity (μΩ·m)	Thermal Expansion (°C ⁻¹)	Thermal Conductivity (W/m °C)
SUS316L	500	8000	75	1.7×10^{-5}	15
SUS425	460	7720	61	1.6×10^{-5}	24.2

Table 4. Constant welding parameters.

Electrode Force (kN)	Squeeze Time (cycles/s)	Holding Time (cycles/s)	Weld Atmosphere
3.3	45/0.9	50/1.0	ambient

2.2. Metallographic Assessment

After spot welding, the lap joint was cross-sectioned in a transverse direction. The sectioned specimen was prepared in accordance with the ASTM E407-99 standard. The five quality metrics of weldment were measured by optical microscopy (OM, Keyence VHX-600, Wanaque, NJ, USA) and the schematic is shown in Figure 1. The microstructures of the weld nuggets were respectively characterized by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM, Jeol JSM-6510LV, Tokyo, Japan). Energy dispersive X-ray spectrometry (EDS, Oxford X-Max IE350, High Wycombe, UK) was utilized to investigate the chemical composition. The micro hardness profile of weldment (i.e., the base metals, heat affected zone, and fusion zone) was determined using a Vickers hardness tester (Future tech FV-700, Kanagawa, Japan) with a load of 50 g for 10 s. The TSFs of lap joints were assessed by a universal testing machine (SHIMADZU Ag-100, Kyoto, Japan) with a travel speed of 10 mm min⁻¹.

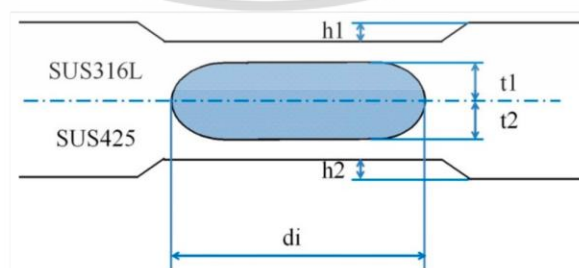


Figure 1. Cross-sectional schematic of SUS316L/SUS425 weldment in a transverse direction, where t_1 and t_2 are the depth of fusion, h_1 and h_2 the indentation depth, and d_i is the nugget diameter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Results and Discussion

3.1. Weldment Appearance

Figure 2 illustrates the visual appearance of the SUS316L/SUS425 resistance spot welded joint, consisting of three rings: the melt ring, fusion zone (FZ) ring, and heat affected zone (HAZ) ring.

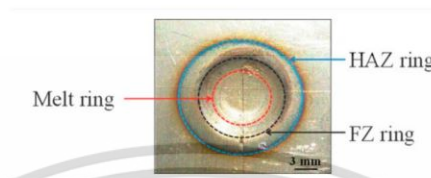


Figure 2. Appearance of the SUS316L/SUS425 resistance spot welded joint.

Figure 3a–c respectively illustrates the visual appearances of SUS316L/SUS425 lap joints under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given 25, 38, and 50-cycle welding times. Ideally, the appearance of a spot weld should be relatively smooth, round or oval, and free from expulsion, electrode deposit pits and cracking [17]. The color of the lap joints varied, depending on weld current and time [18]. Specifically, with elevated weld current and time, the welding appearance exhibited a canary yellow color due to excessive thermal energy. In the figure, the joint appearance was generally enhanced with the increase of weld current and time, except the 8.5 kA/50-cycle, 10.0 kA/38-cycle, and 10.0 kA/50-cycle conditions, where expulsion and electrode deposit pits were observed on the SUS316L side which was attributable to the high heat input. In addition, the diameters of the three rings (the melt, HAZ, and FZ rings) were positively correlated with the weld current and time.

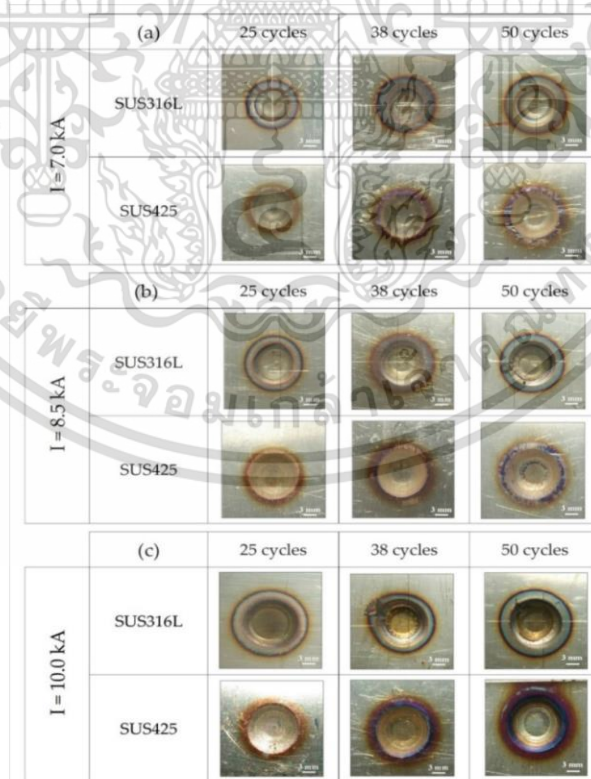


Figure 3. Visual appearances of SUS316L/SUS425 lap joints under 25-, 38-, 50-cycle welding times: (a) 7.0; (b) 8.5; (c) 10.0 kA weld currents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2. Weldment Quality Metrics

Figure 4 illustrates the macrostructure of SUS316L/SUS425 RSW joints under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given 25, 38, and 50-cycle welding times. The weldment quality was assessed by five quality metrics: depth of fusion (t_1 , t_2), indentation depth (h_1 , h_2), and nugget diameter (d_i). Each test was repeated three times and the average value was reported. As per JIS Z3140, the lap-joint depth of fusion and indentation depth should be 20%–80% (0.3–1.2 mm) and less than 30% (<0.45 mm) of the thickness of the thinner material, respectively, and the nugget diameter should be larger than 5.2 mm. In the figure, the weldment quality generally improved with increases in the weld current and time, except under 8.5 kA/50-cycle (Figure 4f), 10.0 kA/38-cycle (Figure 4h), and 10.0 kA/50-cycle conditions (Figure 4i).

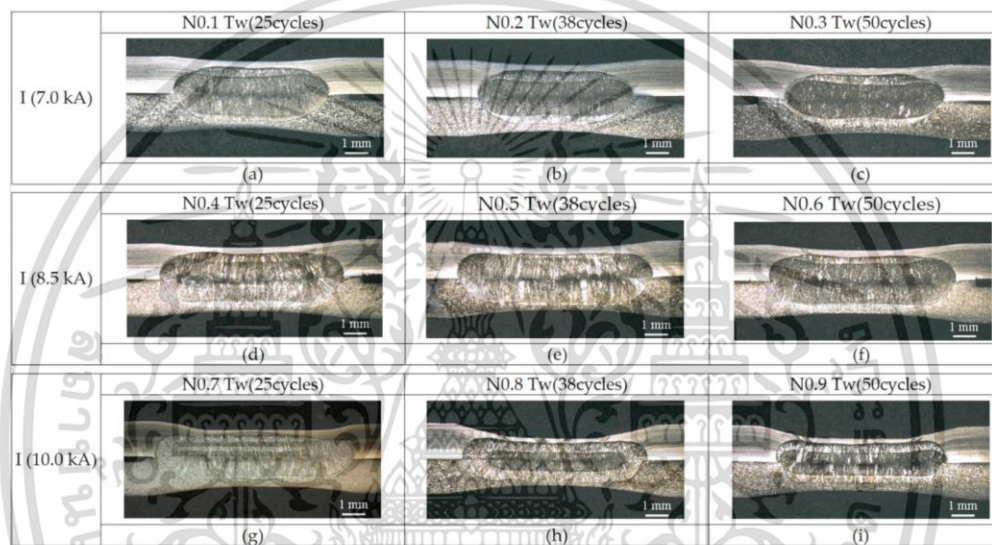


Figure 4. Macrostructure of RSW joints under welding parameters: weld current(kA)/welding time(cycles) (a) 7.0/25; (b) 7.0/38; (c) 7.0/50; (d) 8.5/25; (e) 8.5/38; (f) 8.5/50; (g) 10.0/25; (h) 10.0/38; (i) 10.0/50.

Table 5 illustrates the experimental results on the depth of fusions (t_1 , t_2), indentation depths (h_1 , h_2), and nugget diameter (d_i) of SUS316L/SUS425 weldments. Figure 5a–e respectively illustrate the contour plots of the effect of the weld current and welding time. The optimal operating condition for each quality metric could be selected from the contour plot. However, the optimal operating condition for each quality metric was not similar. The multi-objective optimization for all quality metrics is shown in Section 3.5 of this paper. It should be noted that, in comparison, the SUS425 depth of fusion was deeper due to lower hardness, tensile strength, and elongation [18] and for h_1 and h_2 , the heat input induced an expansion in the workpiece dimension, whereby the magnitude depended on the type of metal [14]. Specifically, the SUS316L thermal expansion was greater than that of SUS425, while the thermal conductivity was lower, resulting in greater t_2 and h_2 on the SUS425 side. In this current research, the occurrence of weldment expulsion was observed, which was attributable to excessive thermal energy. The expulsion increased the indentation depth and decreased the depth of fusion. For the nugget size, by comparison, the weld current played a more decisive role in the nugget diameter. In addition, the electrical resistivities of base metals influenced the weldment quality, whereby greater electrical resistivity required a greater thermal input. Specifically, the electrical resistivity of SUS316L at 20 °C (75 $\mu\Omega\cdot\text{m}$) is greater than SUS425 (61 $\mu\Omega\cdot\text{m}$).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5. Macrostructure of five quality metrics.

Welding Parameters Weld Current (kA)/ Welding Time (cycles)	Average Values of Weldment Quality Metrics (mm)				
	Depth of Fusion 1 (t1)	Depth of Fusion 2 (t2)	Indentation Depth 1 (h1)	Indentation Depth 2 (h2)	Nugget Diameter (di)
7.0/25	1.05	1.12	0.17	0.22	6.01
7.0/38	1.06	1.11	0.17	0.24	6.03
7.0/50	1.08	1.09	0.24	0.28	6.16
8.5/25	1.05	1.19	0.25	0.24	7.13
8.5/38	1.06	1.16	0.26	0.27	7.53
8.5/50	1.03	1.07	0.29	0.29	7.22
10.0/25	1.06	1.16	0.33	0.34	8.03
10.0/38	0.97	0.98	0.52	0.35	7.02
10.0/50	0.91	0.94	0.61	0.39	6.38

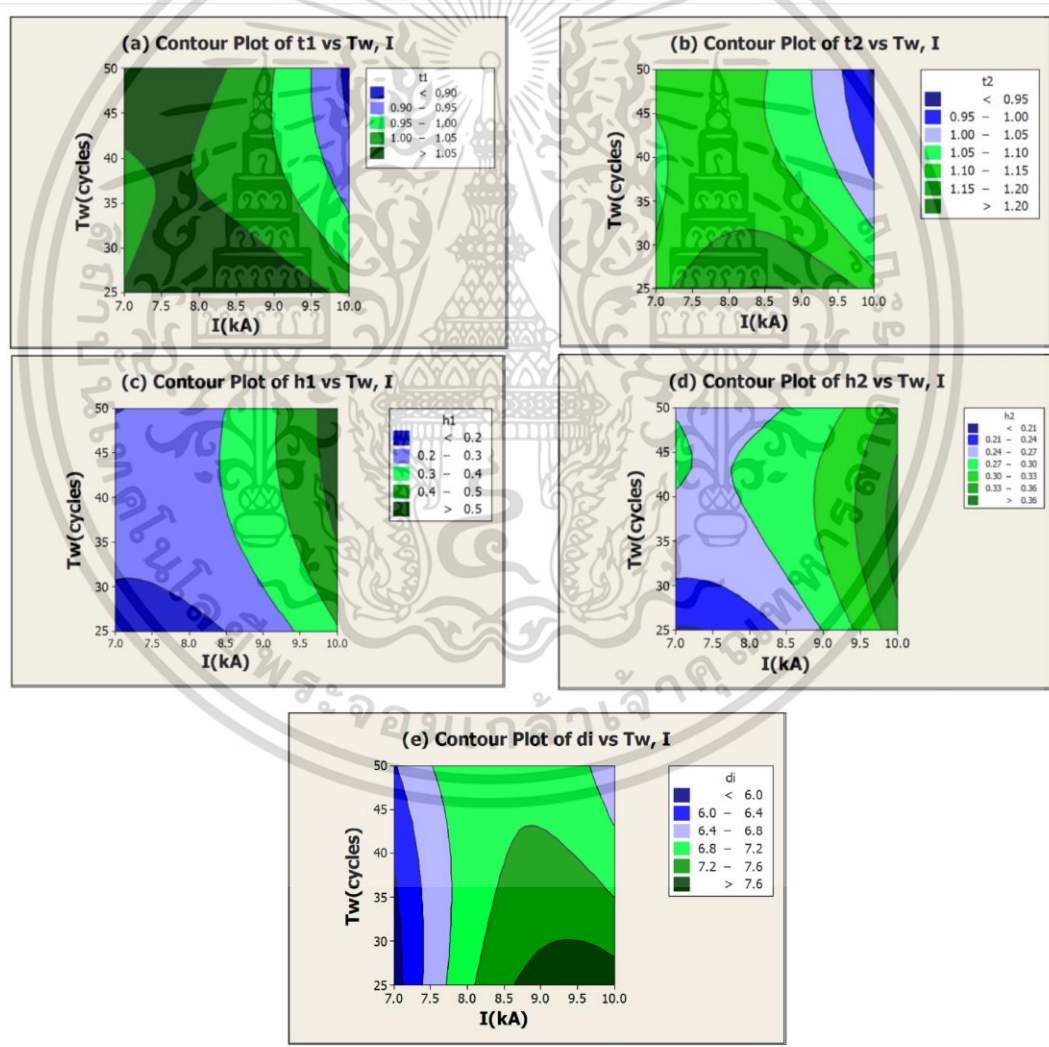


Figure 5. Effect of weld current and welding time on weldment quality metrics: (a) t1; (b) t2; (c) h1; (d) h2; (e) di.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3. Tensile Shear Force

Test specimens were prepared according to JIS Z3139, and, according to JIS Z3140, the tensile shear force for a metal sheet of 1.5 mm thickness should be greater than 7650 N. Figure 6a–c respectively illustrate the average value of the tensile shear force of lap joints at 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given 25, 38, and 50-cycle welding times. In Figure 6a, under 7.0 kA weld current, TSF increased with the increase in welding time. In other words, the TSF and welding time, given a 7.0 kA weld current, were positively correlated. In Figure 6b, at 8.5 kA, the TSFs were almost identical (15,200 N) for 25- and 38-cycle welding times but decreased under an elevated welding time (50 cycles). In Figure 6c, under a 10.0 kA weld current, the maximum TSF (15,618.8 N) was achieved at a 25-cycle welding time and decreased with the increase in the welding time. In essence, TSF is governed by the weld current and welding time. Specifically, elevated heat input increased the nugget size and TSF [13,19]. However, excessive heat input induced expulsion, thereby decreasing nugget size and nugget strength [20]. In this current research, TSF associated with all experimental conditions satisfied the JIS Z3140 threshold (>7650 N). Meanwhile, the optimal TSF (15,618.8 N) was achieved under a 10.0 kA weld current and 25-cycle welding time.

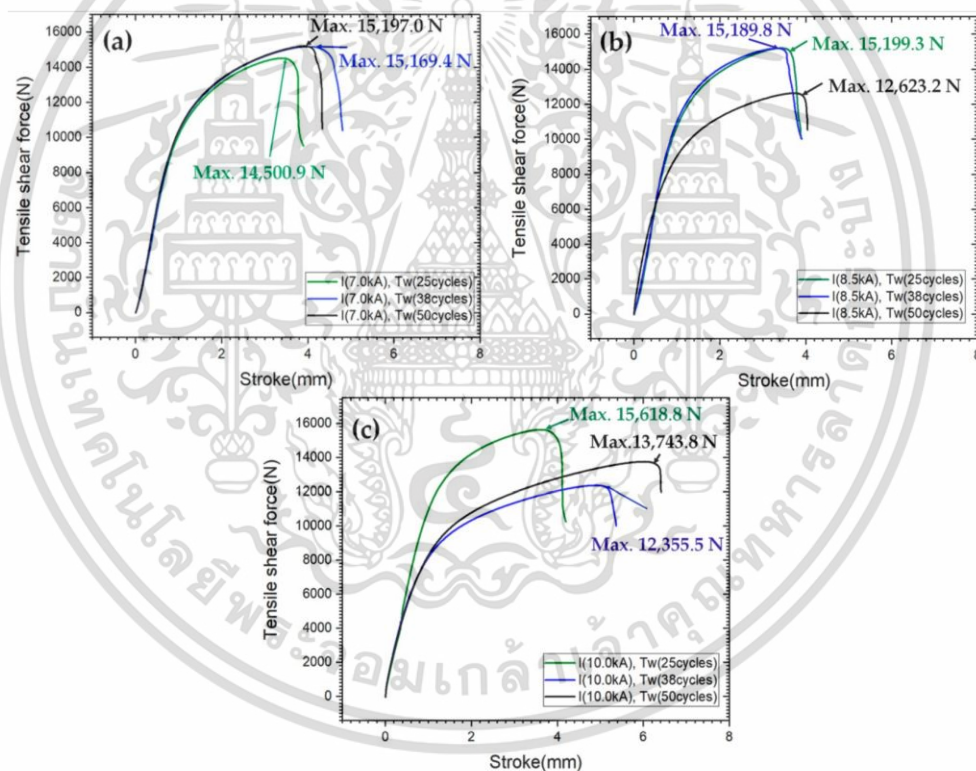


Figure 6. Tensile shear force of lap joints under 25, 38, and 50-cycle welding times given weld currents of: (a) 7.0; (b) 8.5; (c) 10.0 kA.

Figure 7 illustrates the surface fracture of the pullout failure mode. The fracture failure occurred in all experimental conditions and was initiated from the HAZ on the SUS425 side. The fracture was attributable to the counteraction between stress and tensile force [21] and the low hardness of SUS425. In contrast, no fracture developed on the SUS316L side due to high tensile strength [13].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figure 7. Tensile surface fracture of the pullout failure mode.

3.4. Weldment Micro Hardness

The micro Vickers hardness measurements were carried out on the base materials (BM), HAZ and FZ of welded specimens. Figures 8–10 respectively illustrate the micro hardness profiles of welded specimens under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given 25, 38, and 50-cycle welding times. The overall results showed that, by comparison, the micro hardness of SUS425 and its BM and HAZ were lower due to the full ferrite phase. The micro hardnesses of the FZ of SUS316L and SUS425 were almost identical. In general, the micro hardnesses of the HAZ and FZ increased with weld current and welding time. Specifically, the micro hardnesses of SUS316L and SUS425 were 194.4 HV and 165.0 HV, and the corresponding micro hardnesses of HAZ were 236–263 HV and 231–248 HV. The micro hardnesses of FZ for all experimental conditions were 300–320 HV, which was attributable to the presence of martensite.

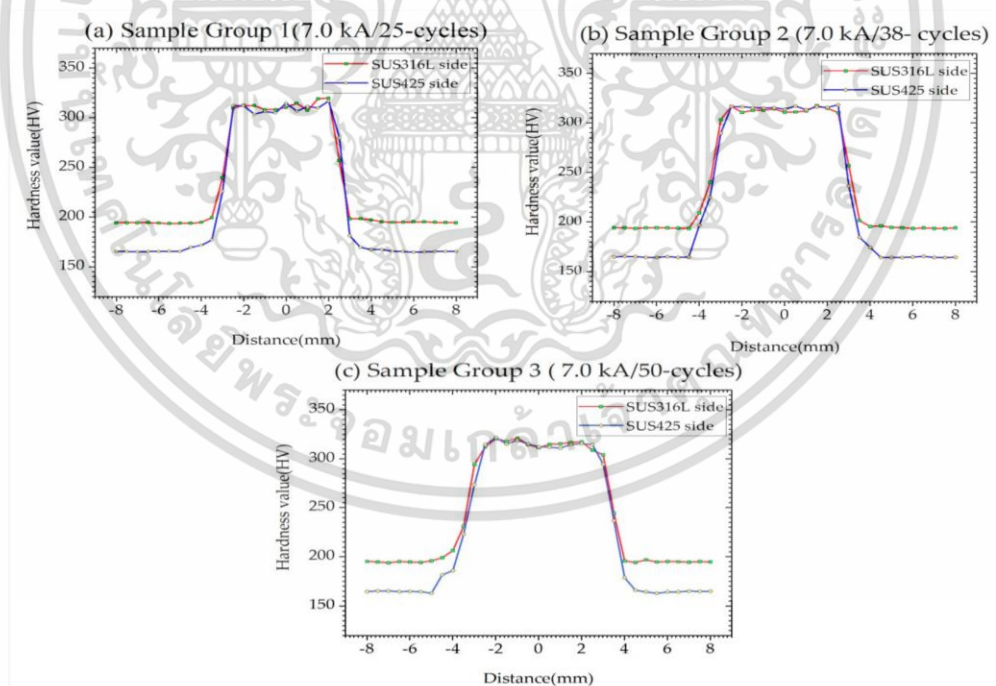


Figure 8. Micro hardness profiles of welded specimens given a 7.0 kA weld current: (a) 25; (b) 38; (c) 50-cycle welding times.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

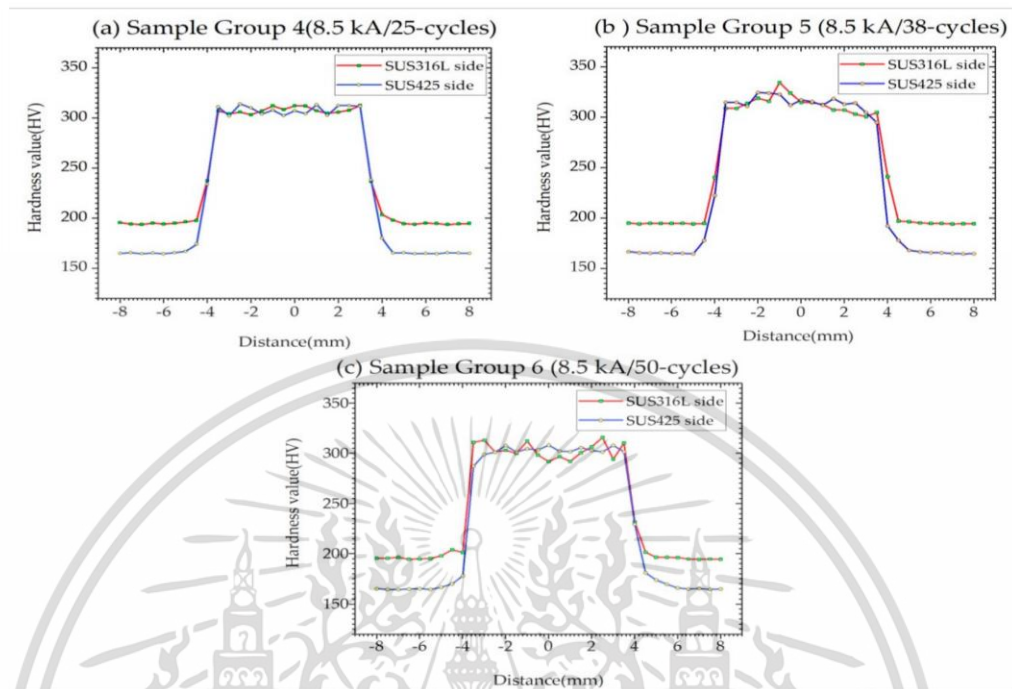


Figure 9. Micro hardness profiles of welded specimens given an 8.5 kA weld current: (a) 25; (b) 38; (c) 50-cycle welding times.

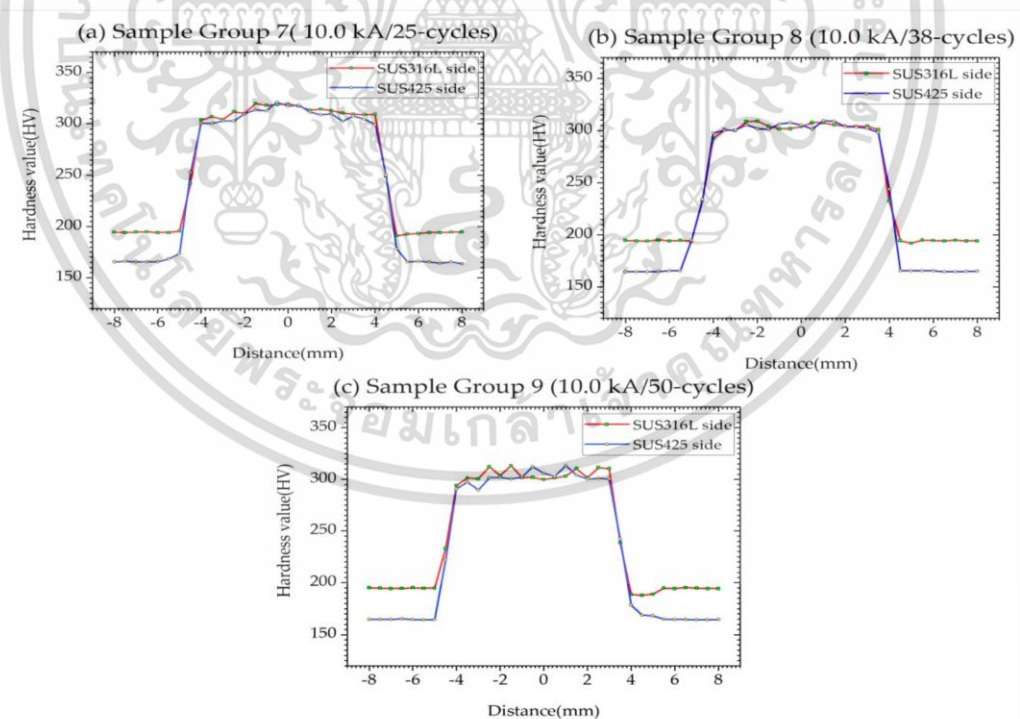


Figure 10. Micro hardness profiles of welded specimens given a 10.0 kA weld current: (a) 25; (b) 38; (c) 50-cycle welding times.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5. Optimization of Welding Parameters

In optimization, this research took into consideration the weldment quality (i.e., five quality metrics) with minimal expulsion and tensile shear force. In spot welding, expulsion normally occurred in the event of high heat input, leading to the loss of molten metal [22]. Moreover, expulsion increased the indentation depth while reducing the depth of fusion, nugget diameter and tensile shear force. Generally, tensile shear force increased with an increase in the weld current and welding time. Based on the weldment quality metrics and TSF, the optimal welding condition is shown in Table 6, and is consistent with previous work of the authors [23]. In the microstructure analysis, the weld current was varied between 7.0, 8.5, and 10.0 kA while the welding time remained constant at 25 cycles.

Table 6. Optimal welding condition.

Electrode Force (kN)	Weld Current (kA)	Welding Time (cycles/s)	Squeeze Time (cycles/s)	Holding Time (cycles/s)	Weld Atmosphere
3.3	10.0	25/0.5	45/0.9	50/1.0	ambient

3.6. The Weldment Microstructure

Figure 11 illustrates the schematic of the area-specific microstructure analysis, consisting of areas A (sections of SUS316L and nugget), B (sections of SUS425 and nugget), and C (weld nugget). Specifically, area A represents the BM (SUS316L) and HAZ; area B the BM (SUS425) and HAZ; and area C the FZ. The microstructure analysis was carried out using OM and SEM; and the chemical composition was carried out using EDS.

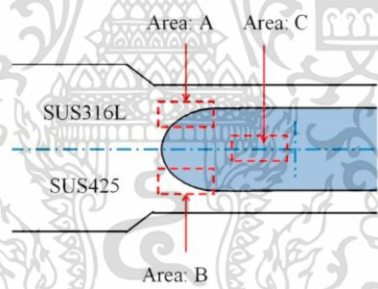


Figure 11. Schematic of area-specific microstructure analysis.

Figure 12a,b respectively illustrates the microstructure of SUS316L austenitic and SUS425 ferritic stainless steels. The chromium equivalent (Cr_{eq}) and nickel equivalent (Ni_{eq}) were then determined using EDS. The EDS chemical composition was superimposed on the Schaeffler phase diagram (Figure 13). The Cr_{eq} and Ni_{eq} of SUS 316L were 20.84 and 10.06, and those of SUS425 were 16.48 and 0.37, respectively. The microstructure of SUS316L was austenitic and ferritic, while that of SUS425 was fully ferritic. The grain of SUS316L was less coarse than SUS425.

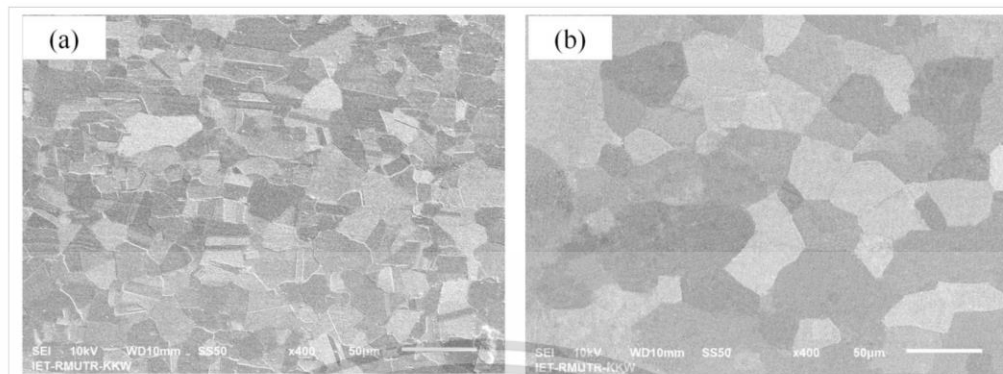


Figure 12. SEM images of the base metals: (a) SUS316L; (b) SUS425.

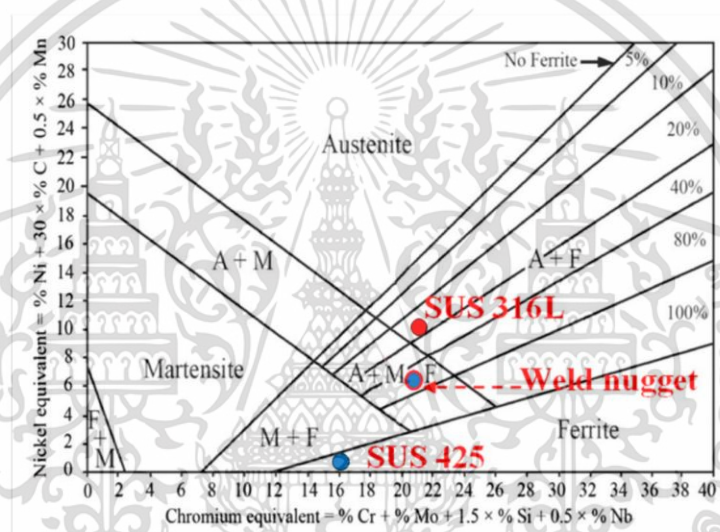


Figure 13. Schaeffler phase diagram.

Figures 14–16 respectively illustrate the cross-sectional microstructure under 7.0, 8.5 and 10.0 kA weld currents, given a 25-cycle welding time. Specifically, Figure 14a,b, Figure 15a,b and Figure 16a,b, respectively depict area A (SUS316L and HAZ) of the welded specimens under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given a 25-cycle welding time. The results indicated that SUS316L stainless steel exhibited no phase transformation during RSW, giving rise to larger weld nuggets and HAZ. Figures 14c, 15c and 16c, respectively depict areas A, B, and C under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents. Figure 14d, Figure 15d, and Figure 16d respectively show area C (weld nugget or FZ) of welded specimens under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given a 25-cycle welding time. The FZ were identical for all experimental conditions, exhibiting compression-direction columnar grains [9,24] containing austenite, ferrite and martensite. The volume fractions of austenite, ferrite and martensite were positively correlated with the weld current and welding time, contributing to the variation in the weld nugget microstructure. Figure 14e–f, Figure 15e–f, and Figure 16e–f, respectively depict area B (SUS425 and HAZ) of welded specimens under 7.0, 8.5, and 10.0 kA weld currents, given a 25-cycle welding time. The heat input induced no phase transformation rather ferritic grain growth was exhibited (i.e., coarser grains). The coarser grains of SUS425 HAZ weakened its toughness and strength [25]. Superimposed on the Schaeffler phase diagram, the Cr_{eq} and Ni_{eq} of SUS316L were 23.36 and 12.79 and those of SUS425 were 19.16 and 0.71, respectively. The microstructure of SUS316L was austenitic and ferritic, while that of SUS425 was ferritic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

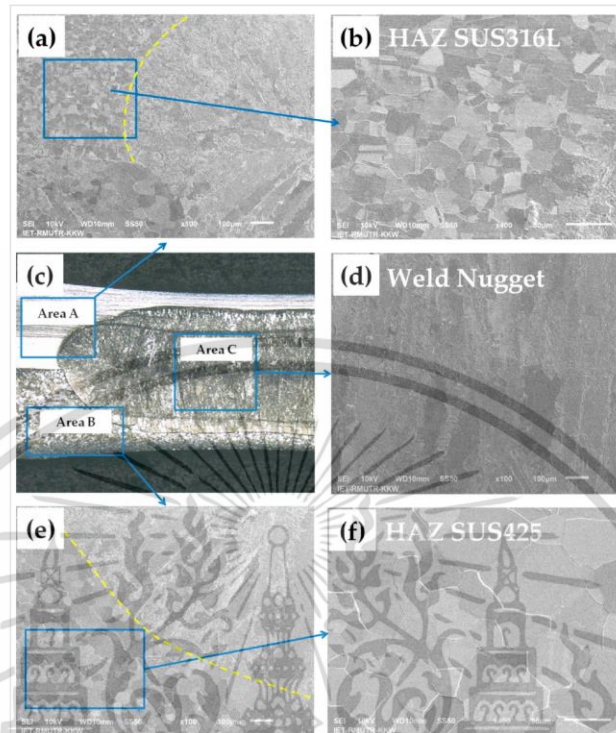


Figure 14. Cross-sectional microstructure of weldment under a 7.0 kA weld current and 25-cycle welding time.

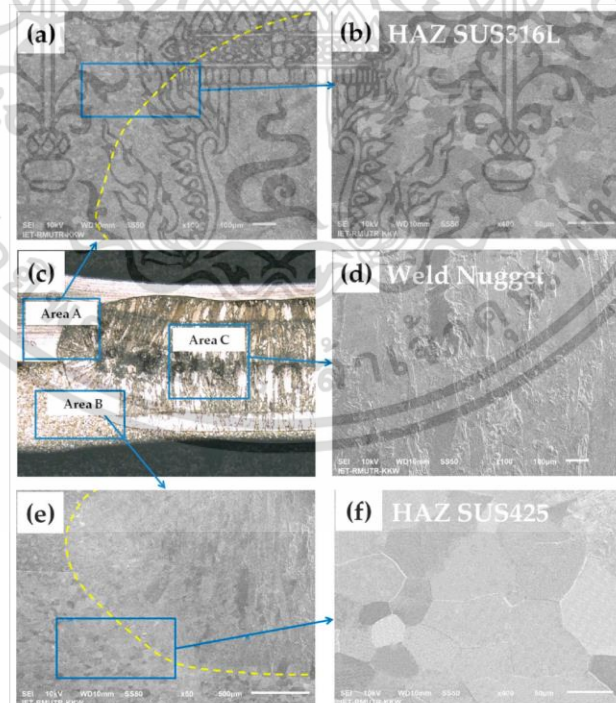


Figure 15. Cross-sectional microstructure of weldment under an 8.5 kA weld current and 25-cycle welding time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

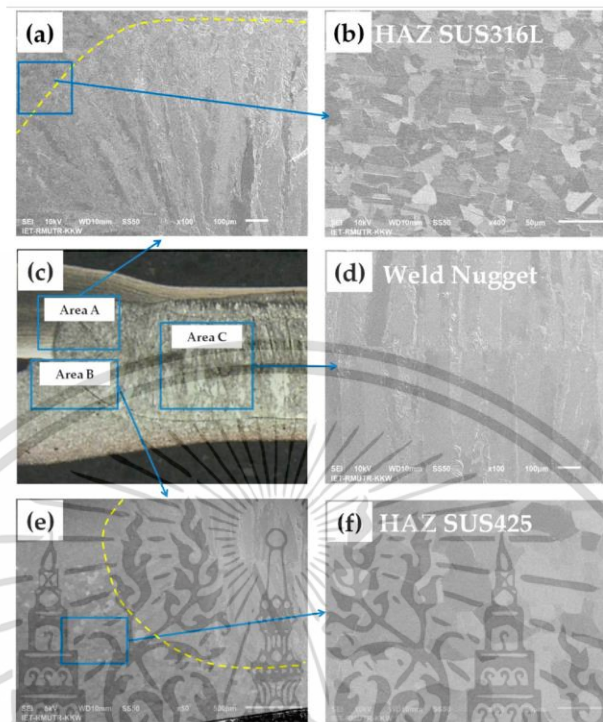


Figure 16. Cross-sectional microstructure of weldment under a 10.0 kA weld current and 25-cycle welding time.

Table 7 tabulates the EDS chemical composition of welded specimens under variable weld currents, given a 25-cycle welding time. The chemical composition of weldments was positively correlated with the weld current and welding time. Specifically, elevated weld currents caused Cr content the SUS425 side to increase and Ni content the SUS316L side to decrease. In addition, the heat input resulted in the presence of Ni in the FZ on the SUS425 side, and Ni continued to increase as the weld current increased from 7.0 kA to 8.5 kA but declined under 10.0 kA weld current. However, Mo decreased with the increase of weld current (7.0 kA to 8.5 kA) and then inclined under a 10.0 kA weld current while Si decreased with an increase in the weld current.

Table 7. EDS chemical composition of welded specimens (i.e., fusion zone) given a 25-cycle welding time (wt.%).

Material	Weld Current (kA)	Element					
		Cr	Ni	Mo	Si	Fe	Other
SUS316L	7.0	18.16	7.64	0.14	0.96	72.68	0.42
	8.5	18.65	7.66	0.32	0.67	72.01	0.69
	10.0	20.69	5.83	0.27	0.61	71.99	0.61
SUS425	7.0	16.43	6.96	1.37	1.38	71.01	2.85
	8.5	17.47	8.16	1.00	0.91	71.48	1.00
	10.0	19.27	6.85	1.27	0.90	68.66	3.05

The microstructure of FZ of SUS316L/SUS425 RSW could be predicted using the Schaeffler phase diagram (Figure 13), and the results are tabulated in Table 8, in which Cr_{eq} and Ni_{eq} were 19.74–21.98 and 5.93–8.53, respectively, indicating the presence of austenite plus martensite plus ferrite. The austenite plus martensite plus ferrite phase improved yield strength and hardness while decreasing elongation [25]. Figure 17a,b respectively depict the 100x and 200x OM images of the FZ of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUS316L/SUS425 RSW at the optimal welding condition (10.0 kA/25-cycle). The microstructure of FZ coincided with the prediction of the Schaeffler phase diagram (Figure 13).

Table 8. Cr and Ni equivalents and ratios of area C (the FZ of SUS316L and SUS425).

Weld Current (kA)	Cr _{eq}		Ni _{eq}		Cr _{eq} /Ni _{eq}	
	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425	SUS316L	SUS425
7.0	19.74	20.13	7.64	8.06	2.58	2.50
8.5	20.06	19.96	7.86	8.53	2.55	2.34
10.0	21.89	21.98	5.93	8.05	3.69	2.73

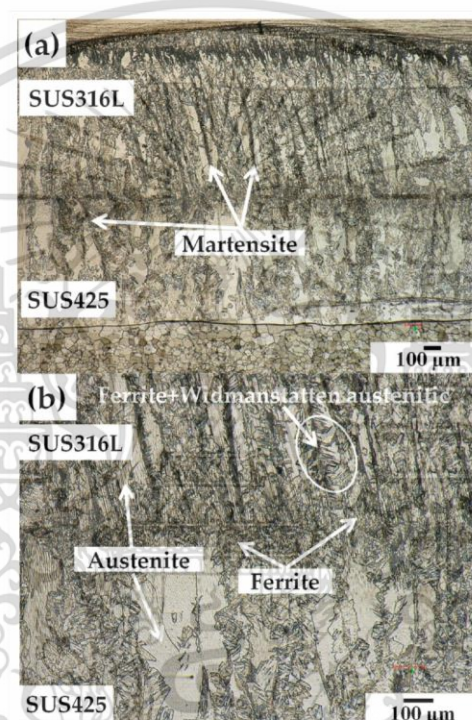


Figure 17. OM images of the fusion zone of SUS316L/SUS425 RSW: (a) 100x; (b) 200x.

In Figure 18, the FeCrNi pseudo-binary diagram at 70% Fe [5] was utilized to predict the solidification mode of the FZ of SUS316L/SUS425 RSW. The Cr_{eq}/Ni_{eq} ratios of FZ of SUS316L/SUS425 RSW were 2.34–3.69 (Table 8), which were sufficient to induce solidification by delta ferrite (δ -ferrite), followed by transformation into ferrite and austenite and some martensite, especially during rapid cooling. In Figure 18, solidification initiated in the ferrite austenite (FA) mode, resulting in the segregation of gamma from ferrite and alpha from austenite [26] and causing the solidification to finish in the ferrite (F) mode.

Figure 19a–c respectively illustrates the SEM images of the solidification mode of SUS316L/SUS425 RSW under 7.0, 8.5, 10.0 kA weld currents, given a 25-cycle welding time. In Figure 19a under a 7.0 kA weld current, the solidification was in the FA mode, consisting of austenite plus lathy δ -ferrite in the FZ. In Figure 19b, under an 8.5 kA weld current, the solidification was of austenite plus acicular with δ -ferrite. In Figure 19c, given the optimal welding condition of 10.0 kA/25-cycle, the solidification was of F mode with ferrite plus Widmanstätten austenite. Under the optimal welding condition, Cr and Mo were highly diffused in ferrite, resulting in a substantial volume fraction of δ -ferrite in the FZ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

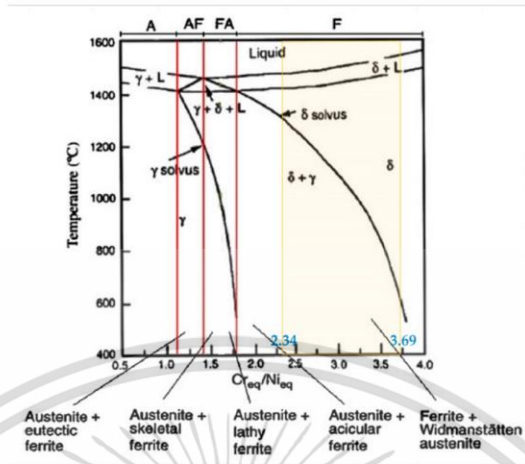


Figure 18. Pseudo-binary FeCrNi diagram at 70% Fe.

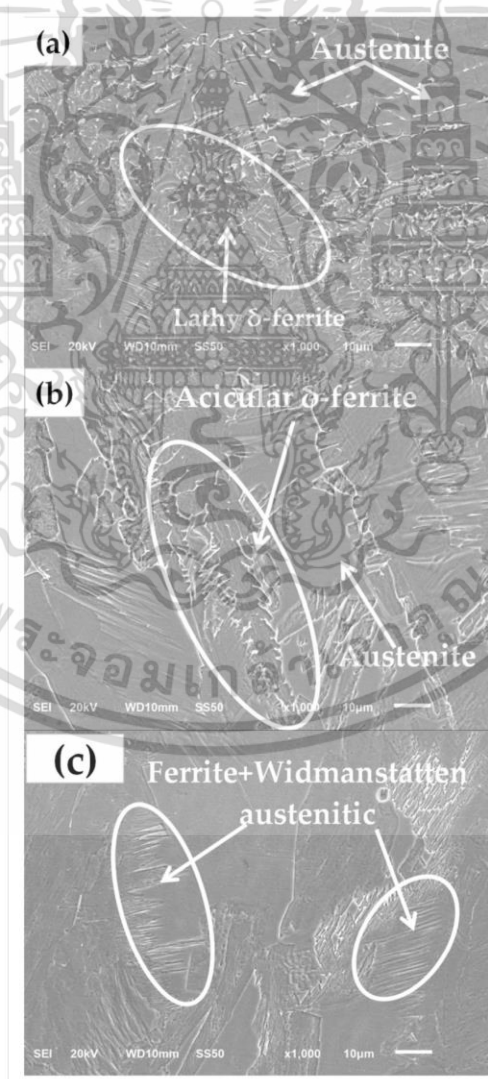


Figure 19. SEM images of the solidification mode of SUS316L/SUS425 RSW, given 25-cycle welding time, under (a) 7.0 kA; (b) 8.5 kA; (c) 10.0 kA weld currents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Conclusions

This research investigated the RSW weldment quality and mechanical properties of SUS316L/SUS425 lap joints under variable weld currents (7.0, 8.5, and 10.0 kA) and welding times (25, 38, and 50 cycles). The weldment quality characteristics included the depth of fusions, indentation depths, and nugget diameter, and the mechanical properties under study were the TSF and micro Vickers hardness. Furthermore, the microstructure analysis of the weldments was performed to characterize phase transformation and solidification. Phase transformation was predicted using SEM and EDS alongside a Schaeffler phase diagram and Fe Cr Ni diagram with 70% Fe. The results showed that, with elevated weld current and time, the welding appearance exhibited a canary yellow color due to excessive thermal energy. In addition, the diameters of the melt, HAZ, and FZ rings were positively correlated with the weld current and time. The weldment quality generally improved with an increase in weld current and time, except under 8.5 kA/50-cycle, 10.0 kA/38-cycle, and 10.0 kA/50-cycle conditions. The optimal weldment quality was realized under a 10.0 kA weld current and 25-cycle welding time. TSF was subject to the weld current and welding time, whereby an elevated heat input increased the nugget size and TSF. However, excessive heat input induced expulsion and nugget strength. In this current research, the optimal TSF was achieved under 10.0 kA/25-cycle condition. Fracture failure nevertheless occurred in all experimental conditions and was initiated from the HAZ on SUS425 side. Under the optimal welding condition, the micro hardness of SUS425 and its HAZ were lower due to the full ferrite phase, while that of FZ of SUS316L and SUS425 were almost identical. The micro hardnesses of HAZ and FZ increased with the weld current and welding time. Moreover, the FZ exhibited compression-direction columnar grains, containing austenite, ferrite and martensite. In addition, the volume fractions of austenite, ferrite and martensite were positively correlated with weld current and welding time. The finding also revealed that the solidification was in the ferrite mode with ferrite plus Widmanstätten austenite under the optimal condition. This could be attributed to the high diffusion of Cr and Mo in ferrite, giving rise to a substantial δ -ferrite volume fraction in the fusion zone.

Author Contributions: Conceptualization, K.K.; Data curation, T.K.; Formal analysis, K.K. and T.K.; Investigation, T.K.; Methodology, K.K. and T.K.; Supervision, K.K.; Validation, K.K.; Writing—original draft, T.K.; Writing—review & editing, K.K.

Funding: This research and the APC were funded by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Wei, P.S.; Wu, T.H. Workpiece property effects on nugget microstructure determined by heat transfer and solidification rate during resistance spot welding. *Int. J. Therm. Sci.* **2014**, *86*, 421–429. [[CrossRef](#)]
2. Kim, J.H.; Cho, Y.; Jang, Y.H. Estimation of the weldability of single-sided resistance spot welding. *J. Manuf. Syst.* **2013**, *32*, 505–512. [[CrossRef](#)]
3. Eisazadeh, H.; Hamed, M.; Halvae, A. New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method. *Mater. Des.* **2010**, *31*, 149–157. [[CrossRef](#)]
4. Kocabekir, B.; Kaçar, R.; Gündüz, S.; Hayat, F. An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.* **2008**, *195*, 327–335. [[CrossRef](#)]
5. Kianersi, D.; Mostafaei, A.; Amadeh, A.A. Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations. *Mater. Des.* **2014**, *61*, 251–263. [[CrossRef](#)]
6. Hsieh, C.-C.; Lin, D.-Y.; Chen, M.-C.; Wu, W. Microstructure, Recrystallization, and Mechanical Property Evolutions in the Heat-Affected and Fusion Zones of the Dissimilar Stainless Steels. *Mater. Trans.* **2007**, *48*, 2898–2902. [[CrossRef](#)]

7. Min, D.; Liu, S.; Hong, H.; Tao, P.; Zhang, P. Strength and infrared assessment of spot-welded sheets on ferrite steel. *Mater. Des. 1980-2015* **2013**, *52*, 353–358. [CrossRef]
8. Liu, W.; Wang, R.; Han, J.; Xu, X.; Li, Q. Microstructure and mechanical performance of resistance spot-welded cold-rolled high strength austenitic stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.* **2010**, *210*, 1956–1961. [CrossRef]
9. Moshayedi, H.; Sattari-Far, I. Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses. *J. Mater. Process. Technol.* **2014**, *214*, 2545–2552. [CrossRef]
10. Jagadeesha, T. Experimental studies in weld nugget strength of resistance spot-welded 316L austenitic stainless steel sheet. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2017**, *93*, 505–513. [CrossRef]
11. Alizadeh-Sh, M.; Marashi, S.P.H.; Pouranvari, M. Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties. *Mater. Des. 1980-2015* **2014**, *56*, 258–263. [CrossRef]
12. Vignesh, K.; Elaya Perumal, A.; Velmurugan, P. Optimization of resistance spot welding process parameters and microstructural examination for dissimilar welding of AISI 316L austenitic stainless steel and 2205 duplex stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2017**, *93*, 455–465. [CrossRef]
13. Bina, M.H.; Jamali, M.; Shamanian, M.; Sabet, H. Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2014**, *75*, 1371–1379. [CrossRef]
14. Essoussi, H.; Elmouhri, S.; Ettaqi, S.; Essadiqi, E. Microstructure and mechanical performance of resistance spot welding of AISI 304 stainless steel and AISI 1000 series steel. *Procedia Manuf.* **2019**, *32*, 872–876. [CrossRef]
15. Alenius, M.; Pohjanne, P.; Somervuori, M.; Hanninen, H. Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels. *Weld. J.* **2006**, *85*, 305–313.
16. Sun, X.; Stephens, E.V.; Khaleel, M.A. Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions. *Eng. Fail. Anal.* **2008**, *15*, 356–367. [CrossRef]
17. Zhang, H.; Senkara, J. *Resistance Welding Fundamentals and Applications*, 2nd ed.; Taylor & Francis Group: Abingdon, UK, 2011.
18. Khuenkaew, T.; Kanlayasiri, K. Selection of electrode tips for the resistance spot welding of dissimilar stainless steels. *MATEC Web Conf.* **2018**, *192*, 01007. [CrossRef]
19. Tutar, M.; Aydin, H.; Bayram, A. Effect of weld current on the microstructure and mechanical properties of a resistance spot-welded TWIP steel sheet. *Metals* **2017**, *7*, 519. [CrossRef]
20. Moshayedi, H.; Sattari-Far, I. Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels. *J. Mater. Process. Technol.* **2012**, *212*, 347–354. [CrossRef]
21. Hayat, F. The effects of the welding current on heat input, nugget geometry, and the mechanical and fractural properties of resistance spot welding on Mg/Al dissimilar materials. *Mater. Des.* **2011**, *32*, 2476–2484. [CrossRef]
22. Yuan, X.; Li, C.; Chen, J.; Li, X.; Liang, X.; Pan, X. Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels. *J. Mater. Process. Technol.* **2017**, *239*, 31–41. [CrossRef]
23. Khuenkaew, T.; Kanlayasiri, K. Optimizing the resistance spot-welding process for dissimilar stainless steels. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *361*, 012005. [CrossRef]
24. Li, Y.; Wei, Z.; Li, Y.; Shen, Q.; Lin, Z. Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2013**, *65*, 400–408. [CrossRef]
25. Charde, N.; Rajkumar, R. Investigating spot weld growth on 304 austenitic stainless steel (2 mm) sheets. *J. Eng. Sci. Technol.* **2013**, *8*, 69–76.
26. Mohammed, G.R.; Ishak, M.; Aqida, S.N.; Abdulhadi, H.A. Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: A review. *Metals* **2017**, *7*, 39. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CERTIFICATE

— OF —

PRESENTATION

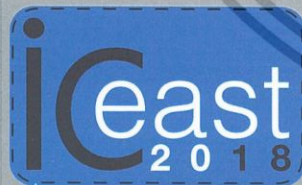
This certificate is awarded to

Teerawut Khuenkaew, and Kannachai Kanlayasiri

Paper Title

Selection of electrode tips for the resistance spot welding of dissimilar stainless steels

for her/his attendance and delivery of a presentation at the 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2018) held at Swissôtel Resort Phuket Patong Beach, Phuket, Thailand during July 4-7, 2018.



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Komsan Maleesee'.

Assoc. Prof. Komsan Maleesee

ICEAST 2018 General Chair
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Selection of electrode tips for the resistance spot welding of dissimilar stainless steels

Teerawut Khuenkaew and Kannachai Kanlayasiri *

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. This research sought to resolve the issue of electrode tip selection used in the resistance spot welding for two different stainless steel grades under otherwise identical welding parameters: SUS316 and SUS425. The study used a full fractional design in order to perform the analysis of the variables involved, while the quality of the weld was assessed by considering the indentation depth, penetration, and nugget diameter. The results of the study described the nugget diameter and penetration for all welds with the various different electrode tips which met the specified requirements of the customers. A single type of upper R30 and lower R30 electrodes achieved acceptable indentation depth. Ideally, good weld quality would demand a large nugget diameter, shallow indentation, and good penetration, all contribution to an acceptable overall appearance. Both R30 electrode tips are able to achieve the desired quality requirements in the spot welding process.

1 Introduction

Within the automotive and manufacturing sectors, Resistance spot welding (RSW) is a common approach when joining sheet metal. The creation of joint exhaust pipe parts has made significant use of both ferritic and austenitic stainless steel grades because they have an attractive appearance, can be readily welded, and resist corrosion [1]. When RSW techniques are applied to the dissimilar stainless steel grades 316 and 425, problems can arise when the nuggets are formed because the high temperatures in the molten metal along with high current density distribution can lead to cracking [2]. The outcome can lead to problems for the vehicle parts in the form of excessive noise and vibration, as well as compromised strength. This particular spot welding problem has its influence upon the nugget formation in RSW. In addition, the geometric qualities of the electrode tip are also able to influence the way in which weld nugget formation occurs. This also has a critical effect upon current conduction [3].

The electrode geometry has already been studied for resistance spot welding parameters in terms of nugget growth. Y. Li et al. presented the effect of the cone angle of truncated electrodes in terms of heat and mass transfer in RSW. The result recommended electrode cone angles of 30° and 45° in vehicle body production [2]. W. Zhang et al. reported that a planar circular tip diameter of 10 mm and spherical tip diameter of 70 mm were the optimal tip electrodes morphology for dissimilar RSW of galvanised high strength steel and aluminium alloy, respectively [4]. Y. Luo et al. studied the calculation of dynamic resistance of nugget growing in RSW. The nugget growth in RSW can be divided into three stages,

which were the initial stage, growing stage, and stable stage [5]. T. Khuenkaew and K. Kanlayasiri investigated the use of the Box-Behnken experiment design method with 6 factors for quality characteristics, which are penetration, nugget diameter and nugget area, on the RSW of dissimilar stainless steel grade 316 and grade 425 [6].

The objective of this paper was to determine the electrode tip for weldment quality characteristics, which are penetration (t_1 , t_2), indentation depth (h_1 , h_2) and nugget diameter (d_i) on the RSW of dissimilar stainless steel grade 316 and grade 425. The variables used in this study relating to the upper electrode tip shape (UT) and lower electrode tip shape (LT) were flatness and radius, which consider the appearance and macrostructure of weld nuggets in the spot welding process. The full factorial design method and ANOVA were used to investigate the RSW parameter factors on the nugget geometry of RSW.

2 Materials and Methodologies

The base materials used were austenitic stainless steel 316 (SUS316) and ferritic stainless steel 425 (SUS425) sheets. Both materials were divided into plates of 45 × 45 × 1.5 mm. Spot welding was performed using a 50 kVA AC device, 50 Hz RSW machine. The spot welding parameters were applied for experimentation as shown in Table 1. The 13 mm outer diameter of the electrode tips made from CrCuZr alloy was applied. The spots were taken for appearance analysis. The characteristics of the weld nuggets were measured for all samples of metallographic cross-sections of the weld zone, as shown in Fig. 1 (a). The metallographic samples were ground

* Corresponding author: kannachai.ka@kmitl.ac.th

and polished, and were then electrolytically etched by 30% nitric acid solution at 6 V for 10 - 15s at room temperature. The macrostructures of all samples were assessed using an optical microscope (OM), as shown in Fig. 1 (b). The full factorial experiment design was used as the experiment technique (27 runs).

Table 1. Resistance spot welding parameters used in the study.

Spot welding parameters	Value
Electrode force (kN)	3.0
Welding time (cycle)	30
Welding current (amperes)	8,800

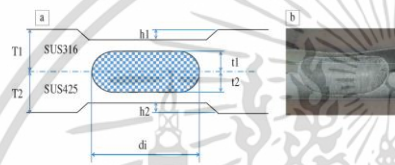


Fig. 1. (a) Schematic illustration of the weld zone
(b) Cross-sectional macrostructure of the weld joint from the electrode UT R30, LT flat

3 Results and Discussion

3.1 The appearance of the weldment

The appearance of the weldment of SUS316 and SUS425 using the flat type on the upper electrode and a different electrode tip type on the lower electrode is shown. Fig. 2 (a) and Fig. 3 (a) present the appearance with similar results; the results appeared to splash at the edge around the periphery of the contact surface. Fig. 2 (b) and (c) show that the splash of the weld joint appeared in a circular shape. Obviously for each examination, the indentation depth has not occurred. In Fig. 3 (b) and (c) the indentation depth is shown. The indentation depth of LT R16 is higher than LT R30. It can be interpreted that the indentation depth increases with a smaller contact area and higher cone angle of the electrode tip.

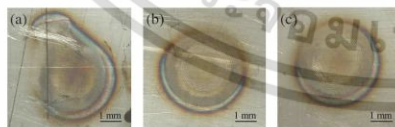


Fig. 2 Appearances of the welded joints of SUS316 and SUS425 by all of UT flat and LT different electrode shapes on SUS316 side (a) UT flat - LT flat, (b) UT flat - LT R16, (c) UT flat - LT R30

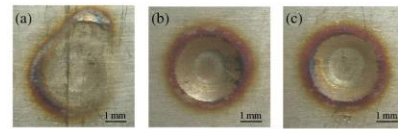


Fig. 3 Appearances of the welded joints of SUS316 and SUS425 by all of UT flat and LT different electrode shapes on SUS425 side (a) UT flat - LT flat, (b) UT flat - LT R16, (c) UT flat - LT R30

The appearance of the weldment of SUS316 and SUS425 using R16 type on the upper electrode and different electrode tip types on the lower electrode is shown. Fig. 4 (a-c) shows the appearance of severe expulsion on the SUS316 surface of the welded joint which occurred during welding. This is because of the high current density in a small contact surface, which may generate excessive heat in the small area. The expulsion reaches to the formation of diffused indentation depth. Fig. 5 (a-c) shows the value of indentation depth for LT R16 is the highest, with LT R30, flat, respectively. The expulsion was shown only for the LT R16 type, and clearly UT R16 and LT R16 induced expulsion.

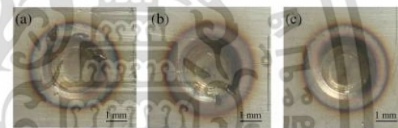


Fig. 4 Appearances of the welded joints of SUS316 and SUS425 by all of UT R16 and LT different electrode shapes on SUS316 side (a) UT R16 - LT flat, (b) UT R16 - LT R16, (c) UT R16 - LT R30

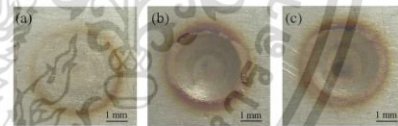


Fig. 5 Appearances of the welded joints of SUS316 and SUS425 by all of UT R16 and LT different electrode shapes on SUS425 side (a) UT R16 - LT flat, (b) UT R16 - LT R16, (c) UT R16 - LT R30

The appearance of the weldment of SUS316 and SUS425 using the R30 type on the upper electrode and different electrode tip types on the lower electrode is shown. Fig. 6 (a-c) and Fig. 7 (a-c) clearly show the appearance of the weld nugget. When the electrode tips at each side of the joint are the same, the force delivered is symmetrical, as is the distribution of the current density. This allows the weld nuggets to develop symmetrically within the welded sheets, as Fig 6 (c) and Fig. 7 (c) show. However, during the heating and cooling cycles the heat distribution is asymmetrical.

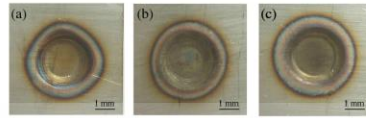


Fig. 6 Appearances of the welded joints of SUS316 and SUS425 by all of UT R30 and LT different electrode shapes on SUS316 side (a) UT R30 – LT flat, (b) UT R30 – LT R 16, (c) UT R30 – LT R 30

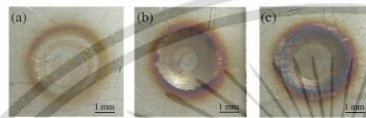


Fig. 7 Appearances of the welded joints of SUS316 and SUS425 by all of UT R30 and LT different electrode shapes on SUS425 side (a) UT R30 – LT flat, (b) UT R30 – LT R 16, (c) UT R30 – LT R 30

In this study, good symmetry was developed in the penetration when using the same electrode tips for each side of the joint, as shown in Fig. 8: R16 (UL R16 – LT R16) and R30 (UL R30 – LT R30).

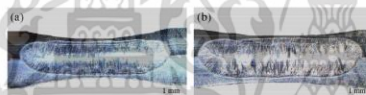


Fig. 8. Cross-sectional macrostructure of the weld joint from symmetry of the electrode tip geometry (a) UT R16 – UT R16, (b) UT R30 – LT R 30

Comparisons of the appearances were made for the two different types. When the same R30 electrode tip is used on both sides, the overall appearance is improved due to good indentation depth, increased nugget diameter, and lower expulsion. The parts for vehicle exhaust pipes are predominantly welded on their curved surfaces, and therefore the radius type of electrode geometry would be the best choice for spot welding in these circumstances.

3.2 Weldment quality characteristics

MINITAB statistical software was used to create and analyse the experiment data. The significance for the welding quality (t1, t2, h1, h2, di) was evaluated using the p-value. In this case the p-value was smaller than the confidence level of 0.05, indicating the statistical significance of the model. The R² values of this analysis were 99.83%, 99.81%, 99.00%, 97.19% and 99.83%, respectively, while the adjusted R² values of the model were 99.76%, 99.72%, 98.55%, 95.94% and 99.75%, respectively. These values were relatively moderate to high.

3.2.1 Penetration

The effects of different electrode tips on the penetration of the spot welded joints were illustrated in Fig. 9 (a) and

(b). Penetration should be kept greater than 20% (>0.3 mm) of the thinnest thickness of the material. Fig. 9 (a) shows the penetration 1. The penetration 1 of all results was higher than 0.3 mm. The maximum and minimum values of penetration 1 used UT R30 – LT flat (1.18 mm), UT R16 – LT R30 (0.66 mm), respectively. Fig. 9 (b) shows the penetration 2. The maximum and minimum values of penetration 2 used UT R16 – LT flat (1.26 mm), UT flat – LT R16 (0.75 mm), respectively. The penetration of the SUS425 side was higher than that of the SUS316 side because of the difference in the mechanical and physical properties.

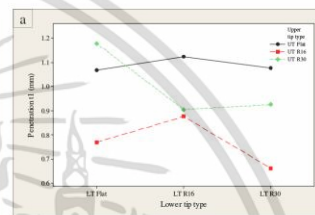


Fig. 9a. Interaction plot for penetration t1

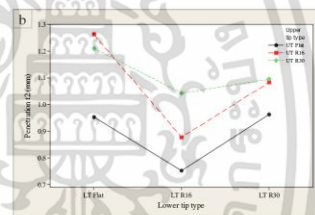


Fig. 9b. Interaction plot for penetration t2

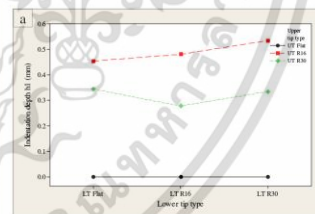


Fig. 10a. Interaction plot for indentation depth h1

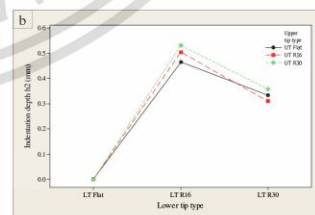


Fig. 10b. Interaction plot for indentation depth h2

3.2.2 Indentation depth

In the general designs, the indentation depth was less than 30% (<0.45 mm) of the thickness of the sheet. Fig. 10 (a) and (b) shows the indentation depth of the spot welded joints. For both the UT and LT of flat electrode tips there was no indentation depth. The electrode flat shape was used to improve the weld surface quality, conversely the indentation depth of UT R16 and LT R30 electrode tips reached the maximum value (0.53 mm) in all experiments because the cone electrode R16 offers a higher angle and smaller contact surface, which could not improve the cooling ability of the electrode. Obviously for each examination, the expulsion occurs. The indentation depth of UT 30 and LT R30 achieved the target (0.33 mm).

3.2.3 Nugget diameter

The nugget diameter was larger than $4\sqrt{t}$ (> 5.0 mm), in which t represents the thinnest part of the thickness of the sheet. Fig. 11 shows the nugget diameter of the spot welded joints.

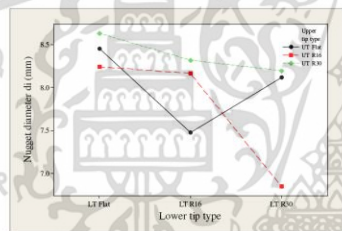


Fig. 11. Interaction plot for nugget diameter

The nugget diameter of all results was larger than 5.0 mm. The maximum and minimum values of nugget diameter used UT R30 – LT flat (8.63 mm), UT R16 – LT R30 (6.85 mm), respectively. The customer requirements demanded good weldment quality through criteria such as good penetration, a large nugget diameter, shallow indentation depth, lower expulsion, adequate strength and a good overall weld appearance. The RSW process used electrode tips of differing geometry, while the welding involved the same materials with the same thickness, under identical welding parameters. Therefore, the main influence upon differences in nugget formation would be electrode geometry. The current density determines the contact surface between the workpiece and the electrodes, and the use of flat type electrodes to increase the contact surface can serve to increase the nugget shape. Concentric electrodes present one concern because of a lack of homogeneity in the distribution of the current density when flat type electrodes are used. This results in the greatest current densities being found at the edges of the contact surface. The outcome is that when weld nuggets are formed using a larger contact surface electrode on the face side, whether UT flat or R30, the nugget edges will protrude from the electrode at the smaller contact surface [7]. Expulsion occurs when the

upper or lower electrode is of the R16 type, because of the increased current density within a small contact area, since this can create excessively high temperatures. The expulsion leads to the creation of diffuse indentation [8].

4. Conclusions

In this study, electrode tips used in the RSW process were selected for use with varying stainless steel grades in order to vary the quality of the nuggets formed. Furthermore, the morphology of the electrode has to be chosen on the basis of the task to be performed. In this case, the welding of vehicle exhaust pipe parts must be carried out on a curved surface, and therefore the radius electrode geometry should be selected for the spot welding process. In such circumstances, R30 can be used for both the upper and lower electrode tip geometry in order to achieve suitable weldment quality in the RSW process.

Acknowledgements

The researchers are grateful to Yokoyama Kogyo Thailand Co., Ltd for providing access to the RSW machine. The authors would also like to express their thanks to the Faculty of Engineering of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang who offered support in covering the costs incurred in conducting this research.

References

1. D. Kianersi, A. Mostafaei, A. Ali Amadeh, *Mater. Des.* **61** 251-263 (2014).
2. Y. Li, Z. Wei W, Y. Li, Q. Shen, Z. Lin, *Int. J. Heat Mass Tranf.* **65** 400-408 (2013).
3. D.Min, L.Shi-sheng, H. Hong, P. Tao, Z. Pei-Lei, *Mater. Des.* **52** 353-358 (2013).
4. W. Zhang, D. Sun, L. Han, Y. Li, *Mater. Des.* **85** 461-470 (2015).
5. Y. Luo, R. Wan, Z. Yang, X. Xie, *Measument.* **87** 18-28 (2016).
6. T. Khuenkaew, K. Kanlayasiri, *ICMM, International Conference on Mechatronics and Manufacturing (2018)*.
7. W. Marzur, A. Kyriakopoulos, N. Bott, D. West, J. *Manuf. Process.* **22** 60-73 (2016).
8. H. Zhang, X. Qiu, Y. Bai, F. Xing, H. Yu, Y. shi, *Mater. Des.* **63** 151-158 (2014).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CERTIFICATE OF ATTENDANCE

Paper Title: Optimizing the resistance spot-welding process for dissimilar stainless steels(M25)

This certificate is to certify

**Teerawut Khuenkaew, Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Thailand**

**has attended and delivered an oral presentation on 2018 9th
International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM
2018) held in Phuket, Thailand during Jan 27-29, 2018.**

Conference Committee of ICMM 2018



Optimizing the resistance spot-welding process for dissimilar stainless steels

T Khuenkaew and K Kanlayasiri

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Email: tankhun_k@hotmail.com

Abstract. The objective of this study was to identify the ideal welding circumstances to conduct resistance spot-welding in the case of 316 austenite and 425 ferrite stainless steels, which offer the challenge of being dissimilar. The study examines a number of welding variables, including weld current, weld time, hold time, electrode force, and the upper and lower electrode types. Initially, a 2^{5-1} fractional factorial design was used for the screening of variables involved in the process. After this stage, the Box-Behnken design was employed for analysis of those variables and in order to specify the multiple response optimizations applicable to the size of nuggets through examination of the desirability function. The experiment was run using a resistance spot-welding machine at 50 kVA, 50 Hz. The quality of welded specimens was determined by their penetration, nugget diameter and nugget area. The optimal welding conditions were found to be 3.3 kN of electrode force, 25 cycles of weld time, 10,000 amperes of weld current, 50 cycles of hold time, and both R30 types of up-low electrodes. The optimal welding conditions provided nugget sizes of quality which were able to pass the specifications of the customer.

1. Introduction

The use of RSW (Resistance Spot Welding) has become commonplace in many industries where sheet metal must be joined. The technique is found in the manufacturing, automotive, and medical sectors due to its simplicity and relatively low cost [1-5]. RSW of stainless steel is an efficient joining process for the assembly of vehicle exhaust parts. Ferritic and austenitic stainless steel grades have been widely used in joint exhaust pipe parts due to its high corrosion resistance, decorative appearance, and excellence welding ability. RSW can be very complex when it involves stainless steel, since a number of factors must interact, most notably the thermal, electrical, mechanical, and metallurgical elements. The pieces of metal which are to be welded together are first placed in between the up-low electrodes prior to pressurization and the introduction of the electric current. Weld strength and quality is directly linked to the size and shape of the weld nuggets, whereby the nuggets of quality size can be produced simply by following the guidance offered with regard to suitable measurements in the manual produced by the Welder Manufacturers' Association. It is thus vital to choose suitable welding parameters for the welding process in order to achieve the optimal nugget size. However, the chosen welding parameters are not assured of being optimal [6].

Process optimization in RSW has already been studied for resistance spot-welding parameters in terms of nugget size. Muhammad, N et al. presented the use of a multi-objective center composite design and the Taguchi approach tested a design method which put forward the response surface

method for characteristics with multiple qualities, which in this case would be the weld nugget radius or the HAZ width [7]. On the other hand, some research has shown multi-response optimizations (more than 2 responses). Ruggiero, A et al. investigated the use of the Box-Behnken experiment design method with 3 factors for 5 responses to a laser-welding process. It was necessary to perform this step to establish the main parameters for the process which can affect the weld bead profile for joints which have been welded [8]. Ragavendran, M et al. reported on the investigation of optimized weld parameters on the weldments of a hybrid laser TIG welded 316LN stainless steel sheet using a center composite design method with 4 factors for 3 responses [9].

The objective of this paper was to determine the optimal welding conditions for quality characteristics, which are penetration, nugget diameter and nugget area, on the RSW of dissimilar stainless steel grade 316 and grade 425. The variables used in this study relating to the welding conditions were weld current, weld time, electrode force, hold time, and upper and lower electrode types. 2^{6-1} fractional factorial design method and ANOVA were used to screen the RSW parameter factors on the nugget shape of RSW. Then, the Box-Behnken experiment design method for optimization of the experiment using RSM (Response Surface Methodology) and a desirability function were employed as multiple-response optimization tools. The tensile shear load and microstructure of the weld sample, which was welded using the optimal conditions, was evaluated.

2. Experimental procedure

2.1. Materials and Methodologies

The workpiece material used in this study had a thickness of 1.5 mm. The base materials used were austenitic stainless steel 316 (SUS316L) and ferritic stainless steel 425 (SUS425) sheets. Both materials were cut into plates of 125 x 45 x 1.5 mm in size, which were lap joined according to JIS Z3139 standard and spot welded using a 50 kVA, 50 Hz RSW machine [10]. Six welding factors were selected for experimentation. The weld nugget attributes of all the samples were measured to analyze their metallographic cross-sections in the area to be welded, as Figure 1 indicates.



Figure 1. (a) Schematic depiction of the welding area; (b) Macrostructure of cross section weld sample.

2.2. Fractional factorial and optimized experiment design

Fractional factorials are widely used in screening experimentation, so in this study the design was of a general 2^{6-1} fractional factorial type with an additional 3-center point. Table 1 presents the various levels and factors applied. This experiment was created to identify the key welding factor among those in the response surface study. The data were then subjected to ANOVA analysis using a confidence level of 95%. RSM is a combination of a number of multiple regression methods and experimental designs. It can be applied to analyze the various factors which can stimulate the response [11]. The Box-Behnken design was used to optimize the main factors which can influence the development of the weld quality via the fractional factorial design.

Table 1. Experimental design factors and levels.

Factors	Symbol	2 ⁶⁻¹ fractional factorial		Box Behnken.		
		Low level (-1)	Up level (+1)	Low level (-1)	Middle level (0)	Up level (+1)
Force(kN)	f	2	4	2	3	4
Welding current(Amperes)	I	7,000	10,000	7,000	8,500	10,000
Welding Time(Cycle)	Tw	25	50	25	38	50
Holding time(Cycle)	Th	0	50	0	25	50
Upper Electrode	Up ET	0	30	0	16	30
Lower Electrode	Low ET	0	30	0	16	30

Applying MINITAB statistics software, the experiment data were assessed using RSM in order to optimize the various response variables. The analysis makes it necessary to find a possible approximation for the true relationship linking the response surface and the independent variable. It is common to apply a second order model when analyzing response surfaces.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

in which β_0 denotes the constant, β_i , β_{ii} and β_{ij} are the respective coefficients of the linear, quadratic, and interaction variables; y denotes the response, or dependent variable; x_i and x_j denote the independent variables, while the error term ε represents the influence of the parameters which are not included. The coefficient of determination R^2 indicated the fitting quality for the equation of the polynomial model.

The software can be used to measure the importance of each individual response and give a suitable weighting. The basic method is to begin by changing each of the responses given by y_i to become a desirability function d_i which falls somewhere within the range of 0 - 1, in which a greater value for d_i shows the greater desirability of the response value y_i . In the case when $d_i = 1$, this indicates a response which is wholly desirable [12]. In this study, the evaluation of each of the individual desirability responses, d_i was achieved through using the target for the responses y_i at the maximum value equation. Equation (2) reveals the overall objective function in conditions, where the changing degree of importance is given to the different response.

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad (2)$$

in which n represents the responses.

3. Results and discussion

3.1. 2⁶⁻¹ Fractional factorial experiment results

The significance of each of the factors was assessed using normal distribution based on the standardized effect with a confidence level of 95%. The normal probability plot of standardize effect for each response observed that the main effect are the most important factors affecting the welding quality (t1, t2, di, Area). The R^2 values of the model were 99.64%, 99.95%, 99.99%, and 100%, respectively. The adjusted R^2 values of the model were 93.89%, 99.08%, 99.85%, and 99.99%, respectively. All of the factors were selected for optimization of the experiment.

3.2. Optimized experiment results

MINITAB statistical software was used to create and analyze the experiment data. The data from the experiments were subjected to multiple regression analysis applying a polynomial model of the second order. The significance for each regression coefficient was evaluated using the p-value. In this case the p-value was smaller than the confidence level of 0.05, indicating the statistical significance of the model. The R^2 values of this analysis were 88.17%, 86.61%, 91.26% and 93.09%, respectively, while the adjusted R^2 values of the model were 75.89%, 72.71%, 82.18% and 85.91%, respectively. These values were relatively moderate to high. For each of the responses, the data fit well to the model developed. The following second-order polynomial equation was used to explain t_1 , t_2 , d_i , Area removal efficiency, with the final reduced mathematical model in terms of both code and uncode factors determined by MINITAB software. The uncode mathematical model is shown below as Equations 3-6. The equations in terms of uncode factors can be given as:

$$\text{Penetration 1 (t1)} = 1.68926 + 0.00046(\text{Tw}) - 0.01132(\text{I}) - 0.00963(\text{Th}) - 0.02703(\text{UpET}) + 0.00454(\text{LowET}) + 0.00006(\text{Th})^2 + 0.00055(\text{UpET})^2 - 0.00018(\text{Tw} * \text{LowET}) + 0.00009(\text{I} * \text{Th}) + 0.00016(\text{I} * \text{UpET}) \quad (3)$$

$$\text{Penetration 2 (t2)} = 3.1235 - 0.55063(\text{f}) - 0.032450(\text{I}) - 0.00607(\text{UpET}) - 0.02602(\text{LowET}) + 0.06678(\text{f})^2 + 0.00020(\text{I})^2 + 0.00010(\text{Th})^2 + 0.00052(\text{LowET})^2 + 0.00391(\text{f} * \text{UpET}) + 0.00018(\text{I} * \text{LowET}) - 0.00042(\text{UpET} * \text{LowET}) \quad (4)$$

$$\text{Nugget Diameter (di)} = 12.3727 - 2.7227(\text{f}) - 0.1460(\text{Tw}) - 0.0149(\text{I}) + 0.0321(\text{UpET}) + 0.0555(\text{LowET}) + 0.0016(\text{Tw})^2 + 0.0021(\text{LowET})^2 + 0.0189(\text{f} * \text{Tw}) + 0.0199(\text{f} * \text{I}) - 0.0014(\text{I} * \text{LowET}) - 0.0024(\text{UpET} * \text{LowET}) \quad (5)$$

$$\text{Nugget Area (Area)} = 34.4043 - 8.7522(\text{f}) - 0.2320(\text{Tw}) - 0.2226(\text{I}) - 0.1093(\text{Tw}) - 0.1626(\text{UpET}) - 0.0547(\text{LowET}) + 0.0049(\text{Tw})^2 + 0.0008(\text{Th})^2 + 0.0045(\text{UpET})^2 + 0.0075(\text{LowET})^2 + 0.0411(\text{f} * \text{Tw}) + 0.0541(\text{f} * \text{I}) + 0.0025(\text{I} * \text{UpET}) - 0.0074(\text{UpET} * \text{LowET}) \quad (6)$$

The optimization criteria employed in this study is shown in Table 2. The optimized graphics were carried out by response optimization plot and overlay response contour plot. The optimal values for RSW parameters were 3.3 kN of electrode force, 25 cycles of weld time, 10,000 amperes of weld current, 50 cycles of hold time and both R30 types of up-low electrodes. Response optimization results are for achieving 1.20 mm of penetration 1 (t_1), 1.05 mm of penetration 2 (t_2), 8.12 mm nugget diameter (d_i) and 16.80 mm² nugget area (Area). Optimization desirability was evaluated to be 1, showing that the parameters were all within acceptable working bounds.

Table 2. Optimization criteria used in study.

Condition	Goal	Lower	Target	Weight	Importance
Penetration1(t_1)	Maximum	0.30	0.375	1	1
Penetration2(t_2)	Maximum	0.30	0.375	1	1
Nugget diameter(d_i)	Maximum	3.674	4.899	1	1
Nugget Area(Area)	Maximum	8.787	10.435	1	1

3.3. Test for confirmation

The experiment required for confirmation involved testing using a particular mix of factors which had already been assessed earlier. The calculation results of the object parameters based on the optimum design parameters set are listed in Table 3. The percentage error for penetration 1, penetration 2, nugget diameter, and nugget area were 3.33%, 0.95%, 2.59% and 3.87%, respectively. The small percentage error demonstrates the efficiency of the optimization method.

In order to estimate the weldability of RSW, tensile strength was measured by the tensile shear load test. The specimens were prepared according to JIS Z3136 [13]. The tensile shear load for material sheet thickness was 1.5 mm, as recommended by the automotive industry. JIS Z3140 is greater than

7.65 kN [14]. The results indicated that most combinations were satisfactory with the criterion, assuring the reliability of the RSW of stainless steel. The tensile shear load values for specimens 1, 2, 3 were 14.76kN, 14.81kN and 14.51kN, respectively, meaning they achieved the JIS Z3140 standard.

Table3. Comparison of predicted and validation test results.

Response	Predicted	Desirability	Experimental				Error (%)
			No.1	No.2	No.3	Average	
Penetration(t1)	1.20	1	1.17	1.15	1.15	1.16	3.33%
Penetration(t2)	1.05	1	1.06	1.07	1.05	1.06	0.95%
Nugget diameter(di)	8.12	1	8.33	8.48	8.18	8.33	2.59%
Nugget area(Area)	16.80	1	16.14	16.26	16.05	16.15	3.87%

The cross section microstructure of welded specimens joined at optimal welding parameters was investigated by optical microscopic analysis. The type of microstructure of RSW for stainless steel considers two distinct regions, base metal and HAZ (Heat Affect Zone), as shown in Figure 2. Figures 2a, 2b, 2c, and 2d show the microstructure of weld nuggets and HAZ. The grains sizes are greater than the base metal and elongate parallel to the electrode force direction. Figures 2e and 2f illustrate the fusion zone region and also as the ferritic microstructure with various morphologies.

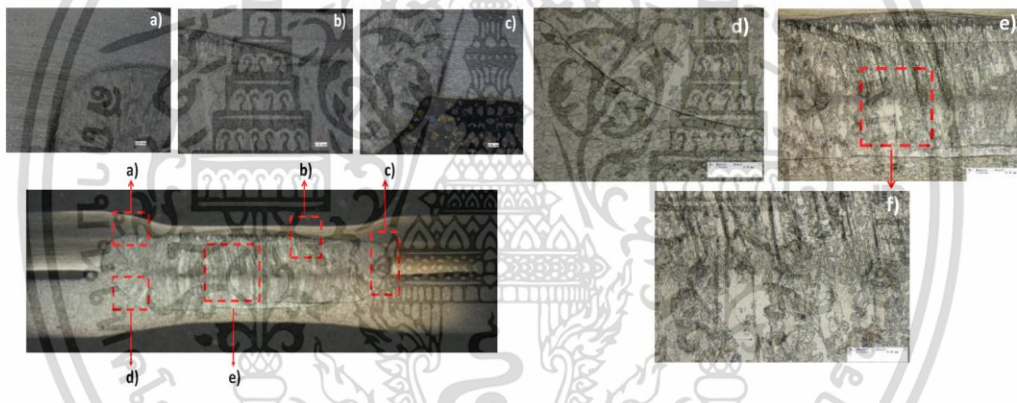


Figure2. Microstructure of cross section weldment sample (optimal welding parameters).

4. Conclusions

In the present paper, multi-response optimizations of RSW process parameters for dissimilar stainless steel grade 316 and grade 425 were successfully implemented to influence the quality of nugget size. Six variables were employed as in experiment. The 2^{6-1} fractional factorial design technique was applied in screening the parameter factors for RSW related to the nugget shape. Afterwards, the study used the Box-Behnken design for the investigation, while optimization was sought through the use of the desirability function. The optimal values of RSW parameters were 3.3 kN of electrode force, 25 cycles of weld time, 10,000 amperes of weld current, 50 cycles of hold time and both R30 types of up-low electrodes. Under optimal conditions, the tensile shear load of specimens achieved the JIS Z3140 standard.

References

- [1] P.S. Wei and T.H. Wu 2014 Workpiece property effects on nugget microstructure determined by heat transfer and solidification rate during resistance spot welding *International Journal of Thermal Sciences* Vol 86 pp 421–429.
- [2] Jae Hyung Kim, Yongjoon Cho and Yong Hoon Jang 2013 Estimation of the weldability of single-sided resistance spot welding *Journal of Manufacturing Systems* Vol 32 pp505– 512.
- [3] Norasiah Muhammad, and Yupiter HP Manurung 2012 Design Parameters Selection and Optimization of Weld Zone Development in Resistance SpotWelding *World Academy of Science, Engineering and Technology* Vol 06 pp1184-1189.
- [4] Yong Bing Li, Ze Yu Wei, Ya Ting Li, Qi Shen and Zhong Qin Lin 2013 Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol 65 pp400–408.
- [5] Hamid Eisazadeh, Mohsen Hamedei and Ayob Halvae 2010 New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method *Materials and Design* Vol 31 pp149–157.
- [6] Norasiah Muhammad, Yupiter HP Manurung, Mohammad Hafidzi, Sunhaji Kiyai Abas, Ghalib Tham and M. Ridzwan Abd. Rahim 2012 A Quality Improvement Approach for Resistance Spot Welding using Multi-objective Taguchi Method and Response Surface Methodology *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology* Vol 02 pp17-22.
- [7] Norasiah Muhammad, Yupiter HP Manurung, Mohammad Hafidzi, Sunhaji Kiyai Abas, Ghalib Tham and Esa Haruman 2012 Optimization and modelling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol 26 pp2365-2370.
- [8] A. Ruggiero, L. Tricarico, A.G. Olabi and K.Y. Benyounis 2011 Weld-bead profile and costs optimisation of the CO₂ dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI316 *Optics & Laser Technology* Vol 43 pp82-90.
- [9] M. Ragavendran, N. Chandrasekhar, R. Ravikumar, Rajesh Saxena, M. Vasudevan and A.K. Bhaduri 2017 Optimization of hybrid laser – TIG welding of 316LN steel using response surface methodology (RSM) *Optics and Lasers in Engineering* Vol 94 pp27-36.
- [10] Japanese Standard Association 1995 Method of Macro test for section of spot weld joint *Japanese Industrial Standard JIS Z3139* pp658-661.
- [11] Praveen Sharma, Lakhvinder Singh and Neeraj Dilbaghi 2009 Optimization of process variables for decolourization of Disperse Yellow 211 by *Bacillus subtilis* using Box–Behnken design *Journal of Hazardous Materials* Vol 164 pp1024- 1029.
- [12] Kannachai Kanlayasiri and Prajak Jattakul 2013 Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDMed K460 tool steel *Precision Engineering* Vol 37 pp556– 561.
- [13] Japanese Standard Association 1995 Method of tension test for spot-weld joint *Japanese Industrial Standard JIS Z3136* pp637-639.
- [14] Japanese Standard Association 1989 Method of Inspection for spot welds *Japanese Industrial Standard JIS Z3140* pp814-821.

Acknowledgements

The researchers are grateful to Yokoyama Kogyo Thailand Co., Ltd for providing access to the RSW machine. The authors would also like to express their thanks to the Faculty of Engineering of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang who offered support in covering the costs incurred in conducting this research.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

1. ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ โดยตัดผ่านรอยเชื่อมที่ต้องการศึกษา
2. นำชิ้นงานไปอัดผงเรซินด้วยเครื่องไมโครเพรส
3. ชัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ
4. ชัดด้วยผ้าโพลีสเตออร์ และผงอะลูมินาขนาด 1.0 ไมโครเมตร
5. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาด แล้วเป่าชิ้นงานให้แห้ง
6. ผสมสารละลาย Nytry 25%
7. วางชิ้นงานในภาชนะรองรับที่มีสารละลาย Nytry 25% โดยให้ระดับสารละลายท่วมผิวหน้าของชิ้นงาน 2 ถึง 3 มิลลิเมตร
8. เปิดเครื่องแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยนำสายไฟขั้วลบจุ่มลงในสารละลาย สายไฟขั้วบวกสัมผัสที่ขอบชิ้นงานทดสอบ 90 วินาที โดยแบ่งสัมผัสชิ้นงานขอบด้านบนสุด ตามแนวยาวของชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน ด้านละ 45 วินาที เพื่อให้เห็นรูปร่างของโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน
9. เมื่อเห็นรูปร่างโครงสร้างมหภาค ให้หยุดการปล่อยแรงดันไฟฟ้า นำชิ้นงานออกจากภาชนะแล้วเป่าชิ้นงานให้แห้ง
10. การถ่ายรูปรูปร่างโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
11. ตรวจสอบรูปร่างโครงสร้างมหภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมีเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1. ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ โดยตัดผ่านรอยเชื่อมที่ต้องการศึกษา
2. นำชิ้นงานไปอัดผงเรซินด้วยเครื่องไมโครเพรส
3. ชัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1,000, 2,000 และ 4,000 ตามลำดับ
4. ชัดด้วยผ้าโพลีสเตอ์และผงอะลูมินาขนาด 1.0, 0.3, 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ
5. ขั้นตอนในการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมี (Etching) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สารเคมีที่ใช้ในการกัดผิวโลหะคือ สารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไนตริก (Nitric) 10 มิลลิลิตร, กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) 15 มิลลิลิตร, อะซิติก (Acetic) 10 มิลลิลิตร และใช้กลีเซอริน (Glycerin solution) 2 หยด โดยใช้งานก่อนสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม
6. ใช้คีมจับสำลิจุ่มสารละลายแล้วแช่บริเวณชิ้นงานทดสอบ การแช่ต้องแช่เป็นทิศทางเดียวกันตลอด ใช้เวลาแช่ 10 วินาที (ประมาณ 5 รอบ)
7. ขั้นตอนในการกัดผิวโลหะด้วยสารเคมี (Etching) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก สารเคมีที่ใช้ในการกัดผิวโลหะคือ สารละลาย Gard โดยผสมกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) 10 มิลลิลิตร, เฟอร์ริคคลอริก (Ferric chloric) 5 กรัม และกรดไนตริก (Nitric) 2 มิลลิลิตร
8. ใช้คีมจับสำลิจุ่มสารละลาย Grad แล้วแช่บริเวณชิ้นงานทดสอบ การแช่ต้องแช่เป็นทิศทางเดียวกันตลอด ใช้เวลาแช่ 10 วินาที (ประมาณ 5 รอบ)
9. นำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างสารเคมีตกค้าง แล้วฉีดแอลกอฮอล์ไล่คราบน้ำกลั่นที่ผิวหน้าชิ้นงานแล้วใช้เครื่องเป่าลมร้อน เป่าให้แอลกอฮอล์ระเหยออกจากชิ้นงาน
10. การถ่ายรูปรูปร่างโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
11. ตรวจสอบรูปร่างโครงสร้างจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดปัจจัยการกัดผิวโลหะด้วยไอออนมิลลิ่ง HITACHI รุ่น IM4000

Ion beam irradiation angle	$60^{\circ} - 70^{\circ}$
Eccentricity	= 0 mm.
Stage control	= F3
Acceleration voltage	= 5 kV
Discharge voltage	= 1.5 kV
Gas flow	= $0.10 \text{ cm}^3 / \text{min}$
Milling time	= 2 Hrs.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ข้อแนะนำสำหรับการเลือกใช้หัวอิเล็กทรอนิกส์
ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะสำหรับการเลือกใช้หัวอิเล็กโทรดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

1. ตรวจสอบประเภทของวัสดุพื้นในการเชื่อม
2. ตรวจสอบความหนาของวัสดุพื้นในการเชื่อมหากเป็นการเชื่อมด้วยวัสดุพื้นที่มีความหนาต่างกัน ให้อ้างอิงความหนาของวัสดุที่มีความหนาน้อยที่สุด
3. เลือกปัจจัยการเชื่อมจากคู่มือการเชื่อมจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อม จากตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.2
4. ทำการทดลองเชื่อมและตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมโดยอ้างอิงมาตรฐานสากลหรือมาตรฐานของลูกค้า
5. ทดลองเชื่อมซ้ำเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมของคุณภาพรอยเชื่อม

ตารางที่ ข.1 ปัจจัยการเชื่อมตามการออกแบบรอยเชื่อมของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

Weld condition	Value of condition									
Thickness(mm)	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0	2.3	3.2
Pressure(kN)	0.75	0.90	1.00	1.25	1.50	1.75	2.40	3.00	3.70	5.00
Welding time(cycle)	10	11	13	15	20	23	30	36	44	60
Weld current (kA)	4.5	5.0	5.5	6.5	7.2	7.7	9.1	10.3	11.3	12.9
Electrode end diameter(mm)	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.3	7.0	7.8	9.0

ตารางที่ ข.2 ปัจจัยการเชื่อมตามการออกแบบรอยเชื่อมของวัสดุเหล็กทั่วไป

Weld condition	Value of condition								
Thickness (mm)	0.6	0.75	0.8	1.0	1.27	1.52	1.9	2.4	2.8
Pressure (kN)	0.98	1.17	1.47	1.76	2.15	2.74	6.17	7.93	9.80
Welding time (cycle)	10	10	12	12	13	15	28	34	39
Weld current (kA)	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	19.5	24.0	28.0
Electrode end diameter (mm)	4.0	4.5	4.8	5.0	5.5	6.3	7.0	7.5	7.8

ตารางที่ ข.3 ตารางการเปรียบเทียบ Electrode end diameter กับ ค่าความโค้งรัศมีของหัวอิเล็กโทรด

ค่าความโค้งรัศมีของหัวอิเล็กโทรด	R 6.5	R 8.0	R 9.5	R 16	R 30	R 40
Electrode end diameter	3.9	4.3	4.7	6.2	8.5	9.8

หมายเหตุ :

- งานวิจัยนี้อ้างอิงระดับความเข้มงวดของคุณภาพรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดอ้างอิงมาตรฐานสากลของ JIS Z 3136, JIS Z 3139, JIS Z 3140

- ตารางที่ ข.1 และ ตารางที่ ข.2 อ้างอิงจากคู่มือ PANASONIC Single Phase AC Resistance Welding Machine

- ตารางที่ ข.3 จากการเปรียบเทียบ Electrode end diameter กับ ค่าความโค้งรัศมีของหัวอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ซ
ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	22 ธันวาคม 2520 ที่เชียงราย
ที่อยู่	25 หมู่บ้านทุ่งอ่าง หมู่ 6 ตำบลสถาน อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย
ประวัติการศึกษา	2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2559 รัฐประศาสนศาสตรบัณฑิต วิชาเอกการบริหารทรัพยากรมนุษย์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2545-2546 บริษัท ชันฟู๊ด อินเทอร์เน็ตในชั้นแนล จำกัด ตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุง พ.ศ. 2547-2554 บริษัท วาย เอส ภัณฑ์ จำกัด ตำแหน่งวิศวกรอาวุโส แผนก Exhaust Technical พ.ศ. 2555-2558 บริษัท โยโกยาม่า โกเกียว (ไทยแลนด์) จำกัด ตำแหน่งผู้จัดการแผนกวิศวกรรม พ.ศ. 2559-2561 บริษัท โยโกยาม่า โกเกียว (ไทยแลนด์) จำกัด ตำแหน่งผู้จัดการทั่วไปฝ่ายผลิต พ.ศ. 2562-ปัจจุบัน บริษัท โยโกยาม่า โกเกียว (ไทยแลนด์) จำกัด ตำแหน่งผู้จัดการทั่วไปฝ่าย New Model
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	

Teerawut Khuenkaew and Kannachai Kanlayasiri. “Resistance spot welding of SUS316L austenitic/SUS425 ferritic stainless steels: Weldment characteristics, mechanical properties, phase transformation and solidification” Metals 2019, Volume 9, Issue 6, 710.

Teerawut Khuenkaew and Kannachai Kanlayasiri. “Selection of electrode tips for the resistance spot welding of dissimilar stainless steels” 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2018) ; 4-7 July 2018, Swissôtel Resort Phuket, Patong Beach Phuket, Thailand.

T Khuenkaew and K Kanlayasiri. “Optimizing the resistance spot-welding process for dissimilar stainless steels” 2018 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018) ; 27-29 January 2018, Sea Sun Sand Resort & Spa, Patong Beach Phuket, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้