

การเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก

RESISTANCE WELDING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL
PIPE AND FERRITIC STAINLESS STEEL BRACKET



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESISTANCE WELDING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL PIPE AND FERRITIC STAINLESS STEEL BRACKET



MR. THANAWAT SANTAWEE
MS. PUTTACHART THIAMTHONG
MS. PHEANGFA KLAMTHANYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก
RESISTANCE WELDING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL
PIPE AND FERRITIC STAINLESS STEEL BRACKET

นักศึกษา

นายธนวัฒน์ แสนทวี รหัสประจำตัว 63010428
นางสาวพุทธชาติ เทียมทอง รหัสประจำตัว 63010705
นางสาวเพียงฟ้า กล่ำธัญญา รหัสประจำตัว 63010714

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

K. Kanlayasiri
(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

ออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก

นักศึกษา

นายธนวัฒน์ แสันทวี

นางสาวพุทธชาติ เทียมทอง

นางสาวเพียงฟ้า กล้าธัญญา

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2566

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเชื่อมระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) และวิเคราะห์เงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความต้านทานแรงกดเชื่อมที่มากที่สุด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ซึ่งมีปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกด กระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ผลที่ได้พบว่าตัวแปรทุกตัวมีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงกดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\alpha = 0.1$ และผลจากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย คือ แรงกด 1,600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4,094 แอมแปร์ และเวลาดปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 11 cycles ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงกดเชื่อม 2,723 นิวตัน และยืนยันผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 2,600 นิวตัน ซึ่งอยู่ในช่วง 90% PI (Prediction Interval) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 2,006-3,440 นิวตัน อีกทั้งโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขที่ให้แรงกดเชื่อมสูงสุด เกิดการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ และจากการศึกษาความเสียหายของรอยเชื่อมที่ชิ้นงานหลังจากการทดสอบแรงกดเชื่อม พบว่ารอยความเสียหายของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงกดเชื่อมสูงสุด พบว่าเป็นการแตกหักแบบเหนียวเนื่องจากมีหลุม (Dimples) เป็นปริมาณมากบนผิวรอยแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Resistance Welding of Austenitic Stainless Steel Pipe and Ferritic Stainless Steel Bracket
Student	Mr. Thanawat Santawe Ms. Puttachart Thiamthong Ms. Pheangfa Klamthanya
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

In this study, the shear strength of the weld joint between austenitic stainless steel pipe and ferritic stainless steel sheet with an application of resistance spot welding process and analyzed the welding conditions that provide the greatest shear resistance. Using the experimental design method to analyze the factors influencing the shear strength, which has three factors in the experiment: pressure, electric current, and time to release the electric current. Including studying the macro and microstructure of weld joints. The results found that every variable had a significant influence on the shear compressive strength at $\alpha = 0.1$ and the results from the analysis of the most appropriate values of each factor were pressure 1,600 newtons, electric current 4,094 amperes, and the time to release the current is 11 cycles, which gives a shear compression force value of 2,723 newtons Furthermore, the microstructure of the weld observed through scanning electron microscopy with a high-resolution configuration revealed that under the conditions of the highest shear compression force, a fully bonded weld joint was achieved. However, upon studying the fracture characteristics of the specimens post shear compression force testing, it was found that the failure mode of the welded workpieces under the optimal conditions providing the highest shear compression force was a ductile fracture, predominantly characterized by the presence of dimples on the fractured surface.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกสามารถสำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.ภรณ์ชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ตลอดจนได้ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับความกรุณาที่มอบให้มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ นายกำธร สุขพิมาย และ นายสิทธิชัย บุญกิจ วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลือในการปฏิบัติงานและให้คำแนะนำเพื่อให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องตัดไฟเบอร์เลเซอร์ ในการใช้ตัดชิ้นงาน เพื่อให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านภายในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบความรู้และคำแนะนำเรื่องต่าง ๆ และขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมาที่มีส่วนช่วยให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

นายธนวัฒน์ แสนทวี

นางสาวพุทธชาติ เทียมทอง

นางสาวเพียงฟ้า กล้าธัญญา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเชื่อมความต้านทาน.....	4
2.1.1 แหล่งพลังงานในการเชื่อมความต้านทาน.....	5
2.2 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	5
2.2.1 พารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้านทาน.....	6
2.3 ลักษณะหัวอิเล็กโทรด.....	7
2.4 โลหะวิทยาของรอยเชื่อม.....	8
2.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	9
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	11
2.6.1 การออกแบบแฟคทอเรียล 2^k	12
2.6.2 จุดกึ่งกลาง.....	12
2.6.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.6.4 รูปแบบของการออกแบบส่วนประสมกลาง.....	13
2.6.5 ฟังก์ชันความพึงพอใจ.....	14
2.7 การวิบัติ.....	16
2.8 กล้องจุลทรรศน์.....	17
2.8.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	17
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	17
2.8.3 กล้องจุลทรรศน์สอบสวนสแกน.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.3 การทดสอบแรงกดเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุดที่ท่อสามารถรับแรงได้โดยท่อไม่ยุบตัว.....	24
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	26
3.5 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงานทดสอบ.....	27
3.6 การทดสอบแรงกดเฉือนของรอยเชื่อม.....	28
3.7 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	28
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	
4.1 การคัดกรองเพื่อเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญ.....	30
4.1.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงกดเฉือน ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	30
4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	31
4.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบการทดลอง.....	33
4.2 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด.....	34
4.3 การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	37
4.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.5 ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม	
หลังจากการทดสอบแรงกดเฉือน.....	40
4.6 การเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืด	
กับผลการทดลองในระดับโครงสร้างจุลภาค.....	41
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 การสรุปและอภิปรายผล.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
5.3 การนำไปประยุกต์ใช้ของงานวิจัย.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการวิจัย.....	3
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ SUS304 และ SUS439.....	20
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SUS304 และ SUS439.....	20
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ SUS304 และ SUS439.....	20
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดเฉือน.....	31
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	32
ตารางที่ 4.3 ผลจากการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด.....	34
ตารางที่ 4.4 การคาดการณ์การตอบสนองหลายตัวแปร (Multiple Response Prediction).....	36
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	37

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบในการเชื่อมความต้านทาน.....	4
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	5
รูปที่ 2.3 เครื่องเชื่อมจุดแบบแขนโยก.....	6
รูปที่ 2.4 รูปร่างมาตรฐานของหัวอิเล็กโทรด.....	7
รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของรอยเชื่อมหลอม.....	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวการแตกหักระหว่างผิวในการเชื่อมของเหล็กกล้า DP600.....	10
รูปที่ 2.7 การแตกร้าวตามทิศทางการความหนาของรอยเชื่อม.....	11
รูปที่ 2.8 แผนผังของกระบวนการ.....	11
รูปที่ 2.9 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$	13
รูปที่ 2.10 การออกแบบ CCC.....	13
รูปที่ 2.11 การออกแบบ CCI.....	14
รูปที่ 2.12 การออกแบบ CCF.....	14
รูปที่ 2.13 ลักษณะของรอยแตก (a) การแตกหักแบบเหนียวสูง (b) การแตกหักแบบเหนียวปานกลาง (c) การแตกหักแบบเปราะโดยปราศจากการเสียรูปอย่างถาวร.....	16
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานสำหรับการทำการเชื่อมความต้านทาน.....	21
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการเชื่อมความต้านทาน.....	21
รูปที่ 3.3 เครื่องตัดไฟเบอร์เลเซอร์.....	22
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกดเฉือน.....	22
รูปที่ 3.5 หัวอิเล็กโทรดที่ใช้สำหรับการรองรับท่อ.....	23
รูปที่ 3.6 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	23
รูปที่ 3.7 Universal Testing Machine.....	24
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยึดที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที.....	24
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยึดที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที.....	25
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยึดที่ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อนาที.....	25
รูปที่ 3.11 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE).....	26
รูปที่ 3.12 การออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Minitab.....	27
รูปที่ 3.13 ขอบเขตการเชื่อมชิ้นงานผ่านเวลด์โลบ (a) กระแสไฟฟ้าและแรงกดของหัวอิเล็กโทรด (b) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (c) แรงกดและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.14 การกัศผิวหน้าชิ้นงานด้วยโอออน	29
รูปที่ 4.1 กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effects).....	33
รูปที่ 4.2 Residual Plot เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบการทดลอง.....	34
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักกับค่าความต้านทานแรงกดเฉือน.....	36
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบ ส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	38
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบ ส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	39
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบ ส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 100 เท่า	39
รูปที่ 4.7 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงที่สุดที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก	40
รูปที่ 4.8 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก	40
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลทางการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่ให้แรงกดเฉือนสูงสุด (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยึด (b) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (c) ความเสียหายของรอยเชื่อม.....	41
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลทางการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่ให้แรงกดเฉือนต่ำสุด (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยึด (b) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (c) ความเสียหายของรอยเชื่อม.....	42

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษาของปริญญาานิพนธ์ เรื่องการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

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

1.1 ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมรถยนต์ในปัจจุบันมีแนวโน้มเติบโตขึ้น ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องการเพิ่มกำลังการผลิต เพื่อให้สอดคล้องต่อปริมาณความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น ท่อไอเสีย (Air Intake Pipe) เป็นอะไหล่ชิ้นส่วนหนึ่งของรถยนต์ ในปัจจุบันท่อนี้ใช้การเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อย (Metal inert gas welding : MIG) ซึ่งให้อัตราการผลิตต่ำ เพื่อให้ทันต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นจึงมีการเปลี่ยนมาใช้การเชื่อมความต้านทาน (Resistance Welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมอย่างหนึ่งที่อาศัยความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้า และแรงกดเพื่อให้ผิวชิ้นงานแนบชิดกันด้วยหัวอิเล็กโทรด (Electrode Tip) ที่จะเป็นตัวนำไฟฟ้า เพื่อเกิดเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีชิ้นงานเป็นส่วนหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding; RSW) เพราะสามารถให้อัตราการผลิตที่สูงและผลิตชิ้นงานได้เป็นจำนวนมาก มักพบในกระบวนการผลิตรถยนต์ เครื่องใช้หรือเฟอร์นิเจอร์ที่ผลิตจากโลหะแผ่น รวมทั้งการผลิตอื่น ๆ ที่ใช้โลหะแผ่น [1,2]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เป็นเหล็กที่ทนการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิมในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติจากธาตุผสมหลักอย่างโครเมียม และมีคุณสมบัติทางกลที่หลากหลาย จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง และมีการแบ่งชนิดตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ในเนื้อเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) นิยมใช้ทั่วไปเพราะมีราคาถูก มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic) เป็นชนิดที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดแม้จะมีราคาแพงกว่าชนิดอื่น เนื่องจากความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า รวมไปถึงความสามารถในการขึ้นรูปและการเชื่อมที่ดี [3]

ในการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกันนั้น อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่นำมาเชื่อมได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนของรอยเชื่อมสูงสุด โดยใช้วิธีการทางสถิติในการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนมากที่สุด รวมทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างของรอยเชื่อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือน
2. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือน
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาเฉพาะการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก SUS304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 8.15 มิลลิเมตร ความหนาผนังท่อ 1.0 มิลลิเมตร เชื่อมกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก SUS439 ความหนา 1.45 มิลลิเมตร
2. ศึกษาเฉพาะความต้านทานแรงกดเฉือนของรอยเชื่อมความต้านทาน และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม
3. ในการเชื่อมความต้านทาน จะใช้กระแสไฟฟ้าในช่วงระดับ 5000 แอมแปร์ ถึง 10000 แอมแปร์ ระยะเวลา 5-10 cycles และแรงกดของอิเล็กโทรดช่วง 1.0 กิโลนิวตัน ถึง 6.0 กิโลนิวตัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มกำลังการผลิตของการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมได้
2. ได้ทราบถึงเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดในขณะที่ท่อไม่เกิดการยุบตัว
3. สามารถประยุกต์การเชื่อมความต้านทานให้เชื่อมวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกได้
4. ได้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมความต้านทาน ที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และจะสิ้นสุดในเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 9 เดือน โดย มีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2566					พ.ศ. 2567			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเชื่อมความต้านทาน แรงกดที่ท่อสามารถรับได้ และวิธีการทางสถิติในการออกแบบการทดลองหรือ DOE	■								
2. ออกแบบการทดลองการเชื่อมความต้านทาน และออกแบบ Electrode Tip สำหรับใช้เชื่อมความต้านทาน		■	■						
3. ดำเนินการทดลองการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อกับตัวยึด				■					
4. ออกแบบและทำอุปกรณ์เพื่อใช้สำหรับทดสอบแรงกดเฉือน (Jig and Fixture)					■	■			
5. ทดสอบแรงกดเฉือน และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม							■	■	
6. สรุปผลการดำเนินการ และจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									■

บทที่ 2

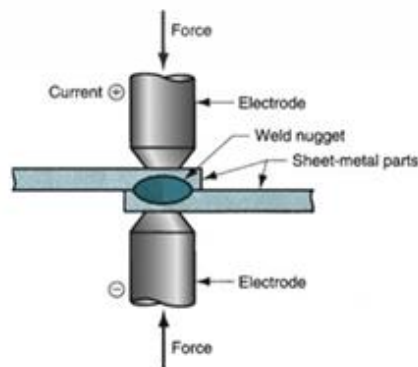
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎี และเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก โดยทำการศึกษาศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุด วิธีการออกแบบการทดลอง และการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. การเชื่อมความต้านทาน
2. การเชื่อมความต้านทานแบบจุด
3. ลักษณะของหัวอิเล็กโทรด
4. โลหะวิทยาของรอยเชื่อม
5. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม
6. การออกแบบการทดลอง
7. การวิบัติ
8. กล้องจุลทรรศน์

2.1 การเชื่อมความต้านทาน

การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding; RW) เป็นกลุ่มของกระบวนการเชื่อมหลอมที่ใช้ความร้อนและความดันร่วมกันเพื่อให้เกิดการรวมตัวกัน โดยที่ความร้อนเกิดจากความต้านทานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟที่จุดเชื่อมต่อที่จะเชื่อม ส่วนประกอบหลักในการเชื่อมด้วยความต้านทานแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด ส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ ชิ้นงานที่จะเชื่อม (โดยปกติจะเป็นชิ้นส่วนโลหะแผ่น) อิเล็กโทรด 2 อันที่อยู่ตรงข้ามกัน เพื่อกดชิ้นงานที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด และแหล่งจ่ายไฟ AC ที่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อทำการเชื่อมจะส่งผลให้เกิดบริเวณหลอมละลายระหว่างทั้งสองส่วน เรียกว่า รอยเชื่อม (Weld Nugget)



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบในการเชื่อมความต้านทาน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 แหล่งพลังงานในการเชื่อมความต้านทาน

พลังงานความร้อนที่ได้จะขึ้นอยู่กับกระแสของกระแส ความต้านทานของวงจร และระยะเวลาที่ใช้กระแสไฟฟ้า สิ่งนี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$H = I^2Rt \quad (2.1)$$

โดยที่ H = ความร้อนที่เกิดขึ้น (J)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

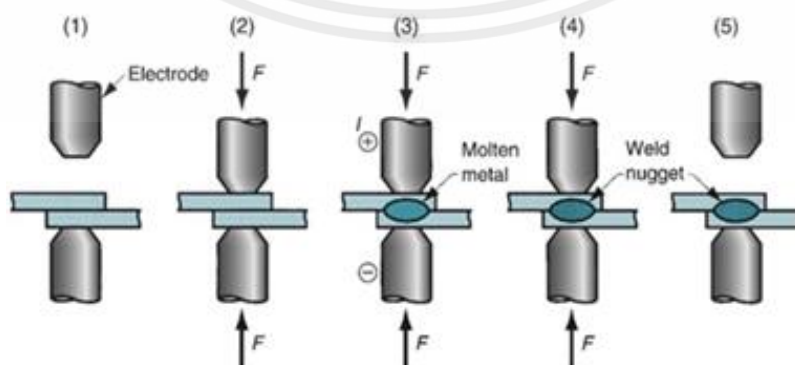
R = ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

t = เวลา (s)

กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความต้านทานจะสูงมาก (โดยทั่วไปคือ 5,000 ถึง 20,000 A) แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะค่อนข้างต่ำ (โดยปกติจะต่ำกว่า 10 V) และระยะเวลา t ของกระแสไฟฟ้าจะสั้นในกระบวนการส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 วินาที ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [4]

2.2 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด

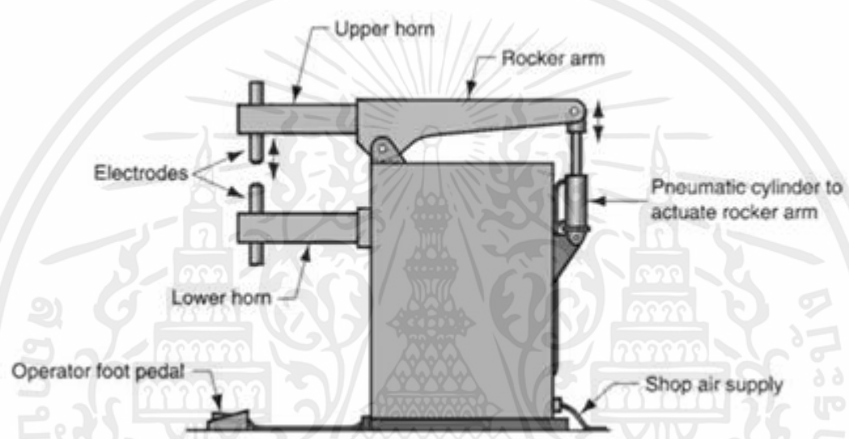
การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding; RSW) เป็นหนึ่งในวิธีการเชื่อมความต้านทาน ซึ่งจะหลอมรวมพื้นผิวของโลหะแบบรอยต่อเกย (Lap Joint) สามารถทำได้ที่ตำแหน่งเดียวโดยใช้อิเล็กโทรดที่ตรงกันข้ามกัน กระบวนการนี้ใช้ในการเชื่อมชิ้นส่วนโลหะแผ่นที่มีความหนา 3 มม. (0.125 นิ้ว) หรือน้อยกว่า โดยใช้ชุดการเชื่อมแบบจุด ขนาดและรูปร่างของจุดเชื่อมถูกกำหนดโดยปลายอิเล็กโทรด (Electrode Tip) รูปร่างอิเล็กโทรดที่พบบ่อยที่สุดคือทรงกลม โดยปกติแล้วรอยเชื่อมที่ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ถึง 10 มม. (0.2–0.4 นิ้ว) โดยมีโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนขยายออกไปเลयरอยเชื่อมเข้าไปในโลหะฐานเล็กน้อย หากทำการเชื่อมอย่างเหมาะสม ความแข็งแรงจะเทียบได้กับความแข็งแรงของโลหะ โดยรอบ ขั้นตอนในวงจรการเชื่อมแบบจุดแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [2]

วัสดุที่ใช้สำหรับอิเล็กโทรดของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ประกอบด้วยสองกลุ่มหลัก: (1) โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบหลัก และ (2) องค์กรประกอบของโลหะทนไฟ เช่น ส่วนผสมของทองแดงและทังสเทน เครื่องมือในการเชื่อมแบบจุดจะค่อยๆ เสื่อมสภาพเมื่อมีการใช้งาน เมื่อใดก็ตามที่ใช้งานได้จริง อิเล็กโทรดจะได้รับการออกแบบให้มีทางเดินภายในเพื่อให้มีการระบายความร้อนด้วยน้ำ

เนื่องจากการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม จึงมีเครื่องจักรและวิธีการต่าง ๆ มากมายสำหรับการเชื่อมแบบจุด เครื่องเชื่อมจุดแบบแขนโยก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีอิเล็กโทรดด้านล่างอยู่กับที่และอิเล็กโทรดด้านบนแบบเคลื่อนย้ายได้ซึ่งสามารถยกขึ้นและลดลงได้สำหรับการบรรทุกและการขนถ่ายงาน อิเล็กโทรดด้านบนติดตั้งอยู่บนแขนโยก ซึ่งการเคลื่อนไหวจะถูกควบคุมโดยแป้นเหยียบที่ควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน



รูปที่ 2.3 เครื่องเชื่อมจุดแบบแขนโยก [2]

2.2.1 พารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้าน

พารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้าน (Parameters in Resistance Welding) ประกอบด้วย กระแสเชื่อมเวลาในการเชื่อม และแรงเชื่อม โดยมีข้อมูลเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1. กระแสเชื่อม (Welding Current) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการเชื่อมด้วยความต้านทาน ขนาดของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามกระแสการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น แต่กระแสที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดการหลุดออกและการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด

2. เวลาในการเชื่อม (Welding Time) การสร้างความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาในการเชื่อม เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณการเชื่อมไปยังโลหะฐานและอิเล็กโทรด รวมถึงการสูญเสียความร้อนจากพื้นผิวอิสระไปยังบริเวณโดยรอบ กระแสการเชื่อมขั้นต่ำและเวลาในการเชื่อมขั้นต่ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อม เมื่อกระแสการเชื่อมสูงเพียงพอ ขนาดของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงขนาดใกล้เคียงกับพื้นที่สัมผัสปลายอิเล็กโทรด

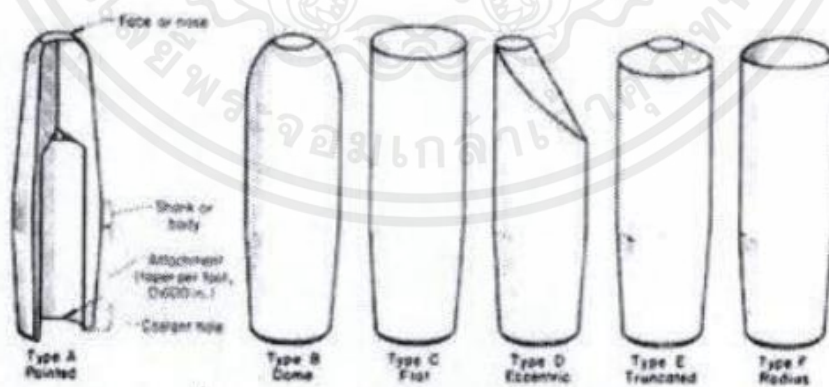
3. แรงเชื่อม (Welding Force) แรงเชื่อมมีอิทธิพลต่อกระบวนการเชื่อม โดยส่งผลต่อความต้านทานการสัมผัสที่ส่วนต่อประสานและบนพื้นที่สัมผัสเนื่องจากการเสีรูปร่างของวัสดุ ชิ้นงานจะต้องถูกบีบอัดด้วยแรงจำนวนหนึ่งที่บริเวณรอยเชื่อมเพื่อให้กระแสไหลผ่านได้ หากแรงเชื่อมสูง พื้นที่หน้าสัมผัสจะมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสต่ำ และความต้านทานหน้าสัมผัสต่ำ ซึ่งจะช่วยลดการเกิดความร้อนและขนาดของรอยเชื่อม [4]

2.3 ลักษณะของหัวอิเล็กโทรด

ทองแดง คือ โลหะที่นิยมนำมาทำเป็นหัวอิเล็กโทรด (Electrode Tip) การเชื่อมต้านทานแบบจุด จุดประสงค์หลักในการใช้หัวอิเล็กโทรด คือ เพื่อเป็นตัวนำกระแสการเชื่อมสู่ชิ้นงาน บริเวณจุดที่มีแรงกดกระทำ เพื่อนำความร้อนออกจากผิวหน้าชิ้นงาน และเพื่อรักษาคูณลักษณะของความร้อนและกระแสไฟฟ้าการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมขณะทำการเชื่อม ปลายหัวอิเล็กโทรดทำจากทองแดงผสมหรือวัสดุอื่น ๆ โดยสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association: RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายหัวอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper Based Alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I-V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด เมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งและอุณหภูมิการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง

2. กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory Metal) เป็นโลหะผงขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น ของผสมระหว่างทองแดงและไทเทเนียมที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการสึกกร่อนและความต้านทานการกัดกัดที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 เช่น กลุ่ม 10 หมายถึง ค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของทองแดง ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 รูปร่างมาตรฐานของหัวอิเล็กโทรด [5]

จากรูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของหัวอิเล็กโทรดมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน 6 รูปแบบ แสดงด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษรตั้งแต่ A ถึง F หัวอิเล็กโทรด A แบบจุด (Type A Pointed) ใช้สำหรับงานที่ต้องการความกว้างของขนาดนักเกตสูง หัวอิเล็กโทรด D แบบรูปร่างผิดปกติ (Eccentric Type) ใช้กับพื้นที่ แคบ ๆ หรือมุมอับ เป็นต้น

พิจารณาขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด พบว่าขนาดของนักเกตนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดของปลายหัวอิเล็กโทรด โดยปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนักเกตควรมีขนาดที่เล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางปลายหัวอิเล็กโทรดเล็กน้อย ถ้าขนาดปลายหัวอิเล็กโทรดมีค่าน้อยจะส่งผลให้นักเกตมีขนาดเล็กและไม่แข็งแรง แต่ถ้าขนาดปลายหัวอิเล็กโทรดนั้นมีขนาดใหญ่เกินไป ส่งผลให้นักเกตมีขนาดใหญ่ และทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนได้

2.4 โลหะวิทยาของรอยเชื่อม

โลหะวิทยาของรอยเชื่อม (Metallurgy of Welding) เป็นการศึกษาโครงสร้างวัสดุของรอยเชื่อมโดยรอยเชื่อมส่วนใหญ่เป็นรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมหลอม ดังที่แสดงในภาพตัดขวางของรูปที่ 2.5 (a) รอยต่อการเชื่อมหลอมทั่วไปที่มีการเติมโลหะตัวเติมประกอบด้วยหลายบริเวณ: (1) บริเวณหลอม (Fusion Zone) (2) ส่วนต่อประสานการเชื่อม (Weld Interface) (3) บริเวณกระทบร้อน (Heat-Affected Zone; HAZ) (4) บริเวณโลหะฐาน (Unaffected Base Metal Zone)

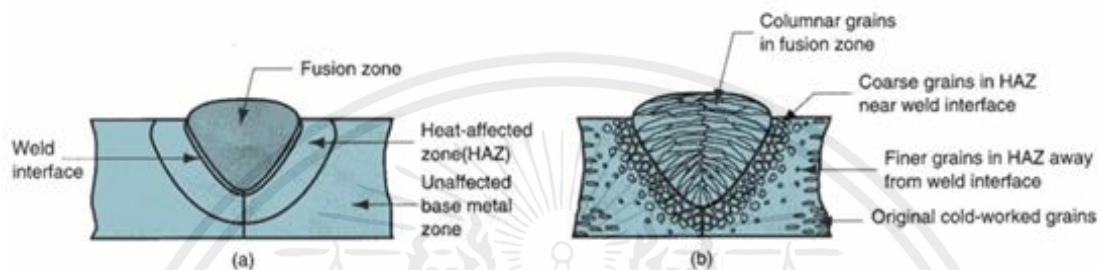
บริเวณหลอมประกอบด้วยไปส่วนผสมของโลหะตัวเติมและโลหะฐานที่หลอมละลายหมดแล้ว บริเวณนี้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน การผสมส่วนประกอบเหล่านี้ได้รับแรงกระตุ้นส่วนใหญ่โดยการพาความร้อนในบ่อเชื่อมหลอมเหลว โครงสร้างเกรนในบริเวณหลอมใกล้เคียงกับบริเวณกระทบร้อนมีแนวโน้มที่จะเลียนแบบการวางตัวตามแนวผลึกศาสตร์ของบริเวณกระทบร้อนโดยรอบ นอกจากนี้ในบริเวณหลอมมีการวางแนวที่ต้องการจะพัฒนาขึ้นโดยที่เกรนจะตั้งฉากอย่างคร่าวๆ กับขอบเขตของส่วนต่อประสานของการเชื่อม โครงสร้างที่ได้ในบริเวณหลอมที่แข็งตัวมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะเป็นเม็ดเรียงเป็นแนวหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5b โครงสร้างเกรนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการเชื่อม โลหะที่กำลังเชื่อม (เช่น โลหะที่เหมือนกันกับโลหะที่เชื่อมต่างกัน) ไม่ว่าจะใช้โลหะเติมหรือไม่ และอัตราการป้อนที่การเชื่อมเสร็จสมบูรณ์

บริเวณที่สองในรอยเชื่อม คือส่วนต่อประสานการเชื่อม ซึ่งเป็นขอบเขตแคบที่แยกบริเวณหลอมออกจากบริเวณกระทบร้อน ส่วนต่อประสานประกอบด้วยโลหะฐานบาง ๆ ที่ถูกละลายหรือละลายบางส่วนในระหว่างกระบวนการเชื่อม แต่จากนั้นก็แข็งตัวทันทีก่อนที่จะผสมกับโลหะในบริเวณหลอม ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีจึงเหมือนกับโลหะฐาน

บริเวณที่สามในการเชื่อมหลอมทั่วไป คือบริเวณกระทบร้อน (HAZ) โลหะในบริเวณนี้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว แต่ยังสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะแข็ง องค์ประกอบทางเคมีในบริเวณกระทบร้อนจะเหมือนกับโลหะฐาน แต่บริเวณนี้ได้รับความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิในการเชื่อม ดังนั้นคุณสมบัติและโครงสร้างของมันจึงมีการเปลี่ยนแปลง จำนวนความเสียหายทางโลหะวิทยาใน HAZ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
8
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าและอุณหภูมิสูงสุด ระยะทางจากบริเวณหลอม ระยะเวลาที่โลหะสัมผัสกับอุณหภูมิสูง อัตราการเย็นตัว และคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะ ผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลในบริเวณกระทบร้อนมักจะเป็นในเชิงลบ และในบริเวณรอยเชื่อมนี้มักเกิดความล้าเหลวในการเชื่อม

เมื่อระยะห่างจากบริเวณหลอมเพิ่มขึ้น ในที่สุดก็จะถึงบริเวณโลหะฐาน ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม โลหะฐานที่อยู่รอบ ๆ HAZ มีแนวโน้มที่จะอยู่ในสถานะของความเค้นตกค้างสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวในบริเวณหลอม



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของรอยเชื่อมหลอม [2]

2.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

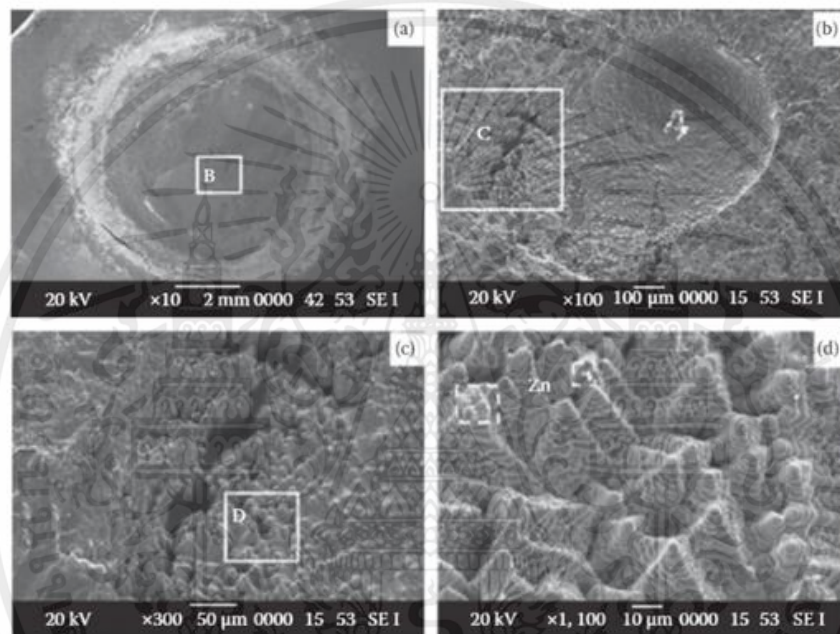
โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Microstructure of Weld) การหลอมละลายและการแข็งตัวเกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่นในช่วงเวลาสั้นๆ พารามิเตอร์การเชื่อม เช่น เวลาพักค้าง (Hold Time) อาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการไล่ระดับอุณหภูมิที่สูงในการเชื่อม อัตราการเย็นตัวที่สูงมาก และเวลาที่ผ่านไปในการเชื่อมสั้นมาก ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของการเชื่อมโดยทั่วไปจึงไม่ได้รับการปรับให้เหมาะสมเท่ากับโลหะฐาน

ในระหว่างการแข็งตัวของของเหลวขึ้นสุดท้าย โดยปกติจะอยู่ที่ตำแหน่งใกล้กับพื้นผิวเดิมของแผ่นโลหะ ปริมาตรที่ขาดดุลอาจทำให้เกิดรอยแตกหรือช่องว่างได้ง่าย โดยทั่วไปการขาดดุลปริมาตรของโลหะเหลวในระหว่างการแข็งตัวอาจเป็นผลมาจากแรงดันที่ไม่เพียงพอ ปริมาตรโลหะหลอมเหลวไม่เพียงพอและอัตราการเย็นตัวที่มากเกินไป แรงอิเล็กโทรดขนาดใหญ่สามารถชดเชยการหดตัวของปริมาตรของการเชื่อมในระหว่างการเย็นตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถระงับการก่อตัวของช่องว่างหรือรอยแตกได้ง่าย การให้ความร้อนที่ไม่เพียงพอ เช่น ที่เกิดจากการแอสการเชื่อมต่ำหรือเวลาในการเชื่อมสั้น อาจส่งผลให้มีโลหะหลอมเหลวในปริมาณเล็กน้อยและอัตราการเย็นตัวสูง ภายใต้แรงอิเล็กโทรดเพียงเล็กน้อย การหลอมละลายที่ไม่เพียงพออาจทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตกได้ง่าย

ตัวอย่างหนึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่พื้นผิวแตกหักของการเชื่อมเป็นการแตกหักแบบประสาน เผยให้เห็นช่องว่างการหดตัวระดับมหภาคพร้อมหลักฐานที่ชัดเจนของพื้นผิวที่แข็งตัวอย่างอิสระ พื้นผิวแตกหักตามพื้นผิวเดิมแสดงในรูปที่ 2.6a มีการหลอมรวมและการแตกหักของโลหะหลอมรวมในบริเวณรอยเชื่อม ส่วนกลางของรอยเชื่อมทำเครื่องหมายเป็นกล่อง B ซึ่งขยายใหญ่ขึ้นในรูปที่ 2.6b มีช่องว่างขนาดเส้นผ่าน

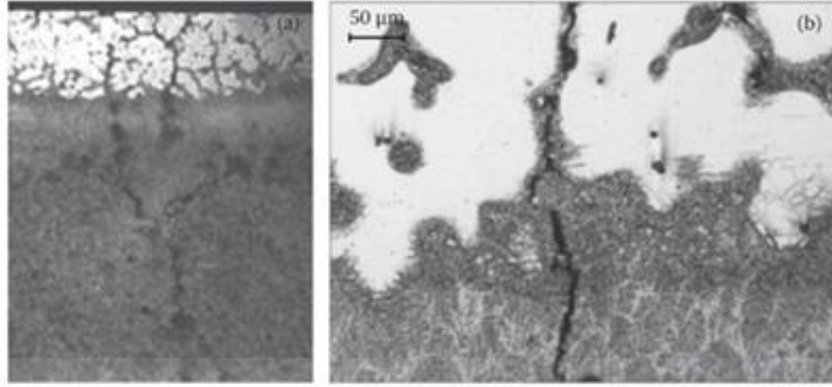
ศูนย์กลางประมาณ 600 μm เคนไดรต์ที่สังเกตได้บนพื้นผิวของช่องว่างขนาดใหญ่ใช้ของเหลวสุดท้ายในระหว่างการเย็นตัวและยังคงสภาพเดิม

ในรูปที่ 2.6c ซึ่งสอดคล้องกับกล่อง C ในรูปที่ 2.6b ใกล้กับขอบของช่องว่างอาจเป็นผลมาจากการรับน้ำหนักทางกลของรอยแตกที่สร้างขึ้นเนื่องจากการขาดดุลของปริมาตรระหว่างการแข็งตัวของรอยเชื่อม เมื่อมองใกล้ยิ่งขึ้นของโครงสร้างที่ทำเครื่องหมายโดยกล่อง D ในรูปจะแสดงในรูปที่ 2.6d มีลักษณะโครงสร้างการแข็งตัวแบบอิสระ กล่องสีขาวในภาพแสดงเคนไดรต์ที่อุดมด้วยสังกะสี นี่เป็นหลักฐานว่ารอยเชื่อมละลายไม่เพียงพอ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวการแตกหักระหว่างผิวในการเชื่อมของเหล็กกล้า DP600 [6]

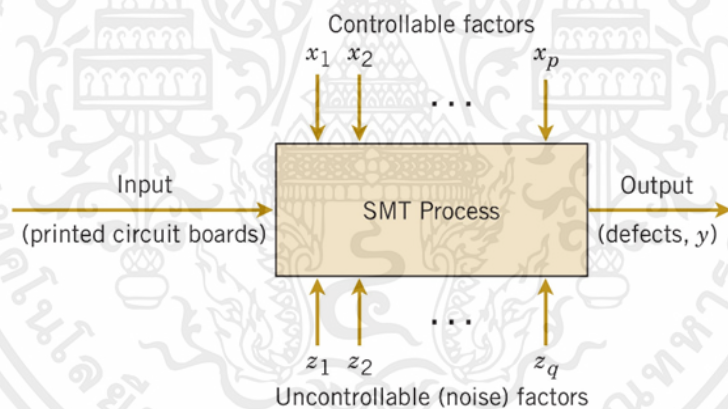
เมื่อการระบายความร้อนจากอิเล็กโทรดถูกขัดขวาง เช่น เมื่อพื้นที่สัมผัสของแผ่นอิเล็กโทรดจริงมีขนาดเล็กเนื่องจากการไม่ตรงแนวของอิเล็กโทรดหรือการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านแผ่นโลหะ ดังนั้นของเหลวส่วนสุดท้ายจะแข็งตัวรอบศูนย์กลางของรอยเชื่อมตามทิศทางความหนาเนื่องจากของเหลวดังกล่าวมีปริมาตรน้อยและการขาดดุลปริมาตรมักเกิดขึ้น รอยแตกและความพรุนจึงมักเกิดขึ้นรอบ ๆ ศูนย์กลางของรอยเชื่อมตามทิศทางของอิเล็กโทรด เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องเหล่านี้ที่อยู่ไกลจาก HAZ จึงมีผลกระทบเล็กน้อยต่อความแข็งแรงอย่างไรก็ตามรอยแตกดังกล่าวมักจะแพร่กระจายจากศูนย์กลางไปยังขอบของรอยเชื่อมในรูปแบบของการแตกแขนงออก ตัวอย่างของการแข็งตัวแตกร้าวนั้นตามทิศทางความหนาของรอยเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เมื่อเชื่อมแมกนีเซียมอัลลอยด์ AZ91D พบว่ามีรอยแตกเกิดขึ้นรอบจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อมแบบจุด



รูปที่ 2.7 การแตกร้าวตามทิศทางความหนาของรอยเชื่อม [6]

2.6 การออกแบบการทดลอง

การทดลองเป็นส่วนสำคัญของวิธีที่เราเรียนรู้เกี่ยวกับวิธีการทำงานของระบบและกระบวนการต่าง ๆ ความถูกต้องของข้อสรุปที่ได้จากการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับวิธีดำเนินการทดลองเป็นสำคัญ ดังนั้น การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) จึงมีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาที่จะกระตุ้นให้เกิดการทดลอง



รูปที่ 2.8 แผนผังของกระบวนการ [7]

การแสดงผลแผนผังของกระบวนการแสดงในรูปที่ 2.8 มีการระบุลักษณะกระบวนการเพื่อกำหนดปัจจัย (ทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้) ที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง เพื่อหาปัจจัยเหล่านี้ การทดลองสามารถออกแบบเพื่อประมาณขนาดและทิศทางของผลกระทบของปัจจัยได้ บางครั้งเราเรียกการทดลองดังกล่าวว่าการทดลองคัดกรอง (Screening Experiment) ข้อมูลจากการศึกษาลักษณะเฉพาะหรือการทดลองคัดกรองนี้สามารถช่วยระบุตัวแปรกระบวนการที่สำคัญตลอดจนทิศทางของการปรับเปลี่ยนปัจจัยเหล่านี้เพื่อลดจำนวนข้อบกพร่อง นอกจากนี้ยังช่วยในการกำหนดตัวแปรกระบวนการที่ควรได้รับการควบคุมอย่างระมัดระวังระหว่างการผลิต เพื่อป้องกันระดับข้อบกพร่องที่สูงและประสิทธิภาพของกระบวนการที่ไม่แน่นอน [7]

2.6.1 การออกแบบแฟคทอเรียล 2^k

การออกแบบแฟคทอเรียลมักใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการ ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาผลรวมของปัจจัยต่อการตอบสนอง อย่างไรก็ตาม กรณีพิเศษหลายกรณีของการออกแบบแฟคทอเรียลทั่วไปมีความสำคัญ เนื่องจากมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและเป็นพื้นฐานของการออกแบบอื่น ๆ ที่มีคุณค่าเชิงปฏิบัติเป็นอย่างมาก

กรณีพิเศษที่สำคัญที่สุดคือปัจจัย k ซึ่งแต่ละปัจจัยมีเพียงสองระดับเท่านั้น ระดับเหล่านี้อาจเป็นเชิงปริมาณ เช่น ค่าอุณหภูมิ ความดัน หรือเวลาสองค่า หรืออาจเป็นเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรสองเครื่อง ผู้ปฏิบัติงานสองคน ระดับ "สูง" และ "ต่ำ" ของปัจจัย หรือบางทีอาจมีและไม่มีปัจจัย การจำลองแบบที่สมบูรณ์ของการออกแบบดังกล่าวต้องใช้การสังเกต $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ และเรียกว่าการออกแบบแฟคทอเรียล

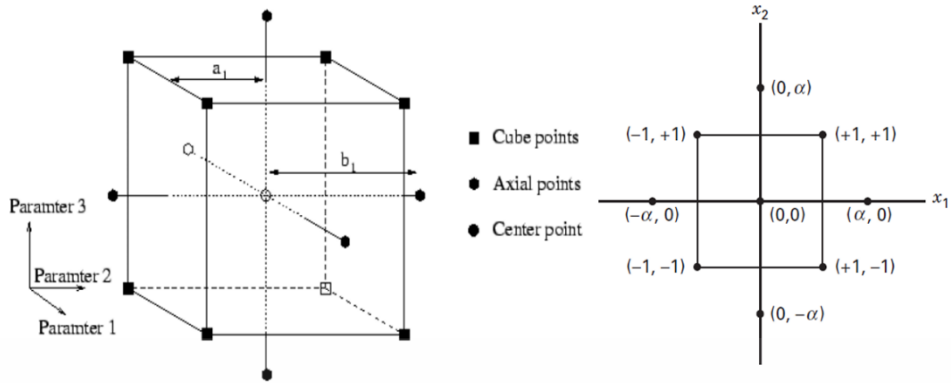
การออกแบบ 2^k มีประโยชน์อย่างยิ่งในช่วงแรกของงานทดลอง เมื่อมีหลายปัจจัยที่มีแนวโน้มที่จะได้รับการตรวจสอบ โดยให้จำนวนรันน้อยที่สุดซึ่งสามารถศึกษาปัจจัย k ได้ในการออกแบบแฟคทอเรียลที่สมบูรณ์ เนื่องจากแต่ละปัจจัยมีเพียงสองระดับ เราจึงต้องถือว่าการตอบสนองเป็นเส้นตรงโดยประมาณในช่วงของระดับปัจจัยที่เลือก [7]

2.6.2 จุดกึ่งกลาง

จุดกึ่งกลาง (Center Points) ข้อกังวลที่อาจเกิดขึ้นในการใช้การออกแบบแฟคทอเรียลสองระดับ คือ สมมติฐานของความเป็นเส้นตรงในผลกระทบของแฟคทอเรียล แน่นอนว่าความเป็นเชิงเส้นตรงสมบูรณ์แบบนั้นไม่จำเป็น และระบบ 2^k ก็ทำงานได้ค่อนข้างดี แม้ว่าสมมติฐานความเป็นเชิงเส้นตรงจะมีค่าเพียงประมาณเท่านั้น อย่างไรก็ตาม วิธีการจำลองจุดบางจุดในแฟคทอเรียล 2^k ช่วยป้องกันความโค้ง และช่วยให้สามารถประมาณค่าข้อผิดพลาดได้โดยอิสระ เหตุผลสำคัญประการหนึ่งสำหรับการเพิ่มการทำซ้ำที่ศูนย์การออกแบบคือจุดศูนย์กลางไม่ส่งผลกระทบต่อประมาณตามปกติในการออกแบบ 2^k เราถือว่าปัจจัย k นั้นเป็นเชิงปริมาณ [7]

2.6.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) อดิศักดิ์ ศรีโชค (2563) ได้กล่าวว่า การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design of Experiment: CCD เป็นการทดลองตั้งแต่ 3 ปัจจัยถึง 10 ปัจจัย ด้วยระดับการทดลอง 3-5 ระดับ (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1, 0, +1) กล่าวคือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่จะมีการปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial โดยจะเลือกเพียงบาง Runs หรือบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย Model ที่ได้จะยังคงมี Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากเกินไป

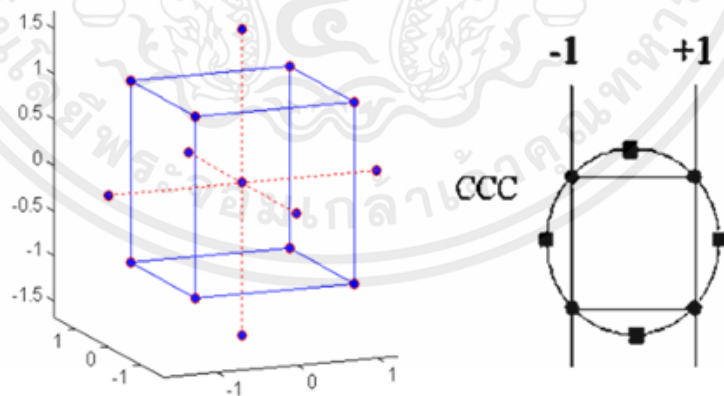


รูปที่ 2.9 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ [8]

2.6.4 รูปแบบของการออกแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ Central Composite Design สามารถออกแบบการทดลองได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

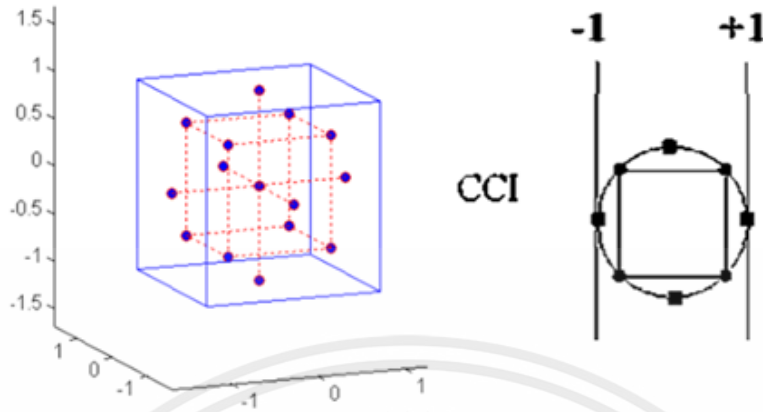
1. การออกแบบ Central Composite Design แบบ Circumscribed: CCC เป็นการออกแบบคอมพิวเตอร์กลางดั้งเดิมและทำการทดสอบที่ห้าระดับ จุดขอบ (จุดแบบแยกส่วนหรือแบบแยกส่วน) อยู่ที่ขีดจำกัดการออกแบบ จุดดาวอยู่ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยในการออกแบบ จุดดาวขยายช่วงนอกการตั้งค่าต่ำและสูงสำหรับทุกปัจจัย จุดกึ่งกลางทำให้การออกแบบเสถียรสมบูรณ์ รูปที่ 2.10 แสดงการออกแบบ CCC การกรอกแพททอเรียลหรือความละเอียดที่มีอยู่การออกแบบแพททอเรียลแบบเศษส่วนด้วยจุดของดาวและจุดศูนย์กลางออกแบบ



รูปที่ 2.10 การออกแบบ CCC [8]

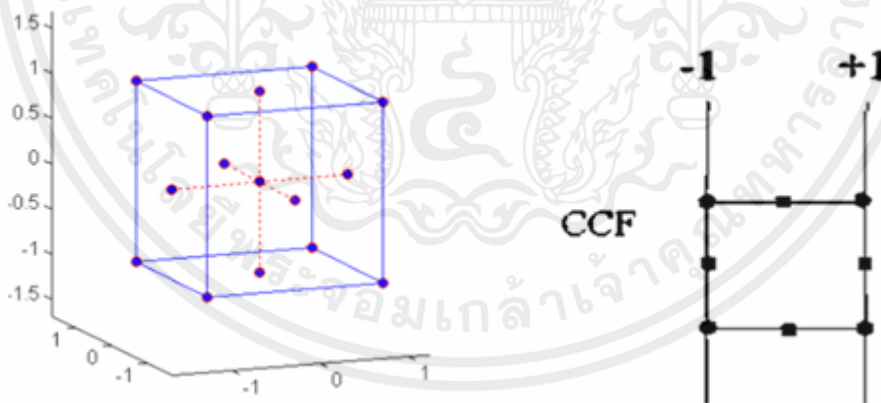
2. การออกแบบ Central Composite Design แบบ Inscribed: CCI ใน CCI จุดจะถูกกำหนดที่ข้อจำกัด การออกแบบมีขีดจำกัดและจุดขอบอยู่ในช่วงแสดงในรูปที่ 2.11 ในทางหนึ่ง การออกแบบ CCI เป็น

การออกแบบ CCC แบบลดขนาด นอกจากนี้นี้ยังให้ผลลัพธ์ในห้าระดับสำหรับแต่ละปัจจัย การออกแบบ CCI ใช้เฉพาะจุดภายในช่วงปัจจัยที่ระบุไว้ ดังนั้น พื้นที่การคาดการณ์จะถูกจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับ CCC



รูปที่ 2.11 การออกแบบ CCI [8]

3. การออกแบบ Central Composite Design แบบ Face Centered: CCF ในการออกแบบนี้จุดดาวอยู่ที่กึ่งกลางของแต่ละหน้าของพื้นที่แฟคทอเรียล ดังนั้น $\alpha = \pm 1$ และใช้เพียงสามระดับเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.12 การประกอบแฟกทอเรียลหรือการออกแบบความละเอียดที่มีอยู่กับจุดที่เหมาะสม สามารถสร้างการออกแบบนี้ได้ การออกแบบ CCF ให้การคาดการณ์ที่มีคุณภาพ ค่อนข้างสูงในทุกช่วงการออกแบบ แต่ความแม่นยำต่ำสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง



รูปที่ 2.12 การออกแบบ CCF [8]

2.6.5 ฟังก์ชันความพึงพอใจ

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการพิจารณาสถานะของผลตอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอิสระ โดยค่าความพึงพอใจในของผลตอบนั้น (Desirability; d) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 เมื่อค่า d เท่ากับศูนย์ หมายความว่า ผลตอบนั้นอยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ แต่ถ้า d มีค่าเพิ่มขึ้นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความพึงพอใจจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อค่า d เท่ากับหนึ่ง หมายความว่า ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบหาได้จากสมการต่าง ๆ ดังนี้

กรณีทีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว ถ้าต้องการผลตอบสูงสุด (Maximum) หาได้จากสมการ

$$d = \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r \\ 1 \end{pmatrix}$$

และต้องการผลตอบต่ำสุด (Minimum) หาได้จากสมการ

$$d = \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r \\ 1 \end{pmatrix}$$

- เมื่อ d คือ ความพึงพอใจของผลตอบ
 y คือ ค่าของผลตอบ
 T คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target)
 L คือ ค่าในระดับต่ำของผลตอบ
 U คือ ค่าในระดับสูงของผลตอบ
 r คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบ (Weight)

กรณีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ ค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบหาได้จากสมการ

$$d = \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$d = \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

- เมื่อ T คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target)
 r_1 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 1 (Weight 1)
 r_2 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 2 (Weight 2)

เมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบมีหลายค่า จะต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability ; D) จากสมการดังต่อไปนี้

$$D = (d_1 * d_2 * d_3 * \dots * d_m)^{1/m}$$

เมื่อ D คือ ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability)

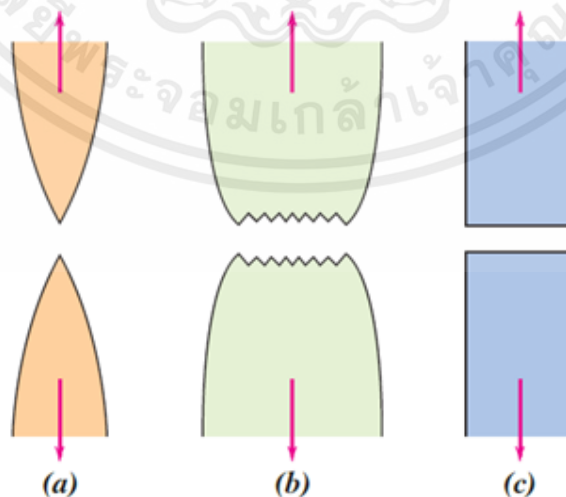
d คือ ความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ (Desirability)

m คือ จำนวนของผลตอบ

และเมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบมีเพียงค่าเดียว ค่าความพึงพอใจโดยรวมของ ผลตอบจะมีค่าเท่ากับค่าความพึงพอใจของผลตอบนั้น [9]

2.7 การวิบัติ

การวิบัติ (Failure) ของวัสดุทางวิศวกรรมสามารถเกิดได้ด้วยเหตุผลหลายประการ แม้จะทราบถึงสาเหตุของการวิบัติและพฤติกรรมของวัสดุ แต่การป้องกันการวิบัตินั้นเป็นเรื่องยาก โดยการแตกหักของโลหะเป็นหนึ่งในการวิบัติที่สามารถเกิดขึ้นได้และพบเห็นได้ทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) และการแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) การแตกหักแบบเหนียวมักเกิดกับวัสดุที่มีความเหนียวหรือความยืดหยุ่น ทนต่อความแตกหักได้สูง โดยวัสดุได้รับความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และเกิดการเสียรูปอย่างถาวรเป็นบริเวณกว้างออกไปจากรอยแตกอย่างช้า ๆ หลังเกิดการแตกหักสามารถสังเกตได้จากลักษณะของรอยแตกที่จะมีการฉีกขาดของผิววัสดุเกิดขึ้น ส่วนการแตกหักแบบเปราะจะตรงกันข้ามกับแบบเหนียว โดยมักจะเกิดกับวัสดุที่มีความแข็งสูงหรือในบางกรณีอย่างโลหะที่มีความเหนียวบางชนิด อาจเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ที่อุณหภูมิต่ำ จะเกิดการเสียรูปอย่างถาวรน้อยกว่าการแตกหักแบบเหนียว และลักษณะการแตกหักจะตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นที่กระทำ ทำให้ผิวของรอยแตกมีลักษณะแบนเรียบ



รูปที่ 2.13 ลักษณะของรอยแตก (a) การแตกหักแบบเหนียวสูง (b) การแตกหักแบบเหนียวปานกลาง

(c) การแตกหักแบบเปราะโดยปราศจากการเสียรูปอย่างถาวร [10]

2.8 กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เป็นเครื่องมือที่สำคัญเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยทางด้านรูปร่าง โครงสร้างและองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) และกล้องจุลทรรศน์สอบบวนสแกน (Scanning Probe Microscope) โดยในงานวิจัยนี้ จะศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [11]

2.8.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) เป็นวิธีหลักสำหรับนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ตั้งแต่ทศวรรษที่ 1880 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยนักโลหวิทยาในการตรวจสอบวัสดุที่เป็นโลหะ เทคนิคพื้นฐานที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ไม่ได้ใช้เพียงในการตรวจสอบโลหะเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้ตรวจสอบเซรามิกและโพลีเมอร์ได้ด้วย มีการพัฒนาเป็นกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope) ซึ่งใช้กล้องถ่ายภาพ CCD (Charge - Couple Device Camera) ไปจับภาพที่ต้องการและภาพจะถูกถ่ายทอดมาปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ให้มองเห็นโดยไม่ต้องใช้เลนส์ตา (Eye-Piece Lens) ได้มีการพัฒนาขึ้นอีกหลายประเภทเพื่อให้เหมาะสมกับตัวอย่างและ วัตถุประสงค์ที่จะศึกษา เช่น Bright Field Microscope, Dark Field Microscope, Phase Contrast Microscope เป็นต้น [11]

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องดูตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงมากประมาณ 50 อังสตรอม (Resolution = 50 angstrom) และให้กำลังขยายได้ถึง 50 ล้านเท่า โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่

1. Transmission Electron Microscope (TEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่าง ซึ่งต้องมีการเตรียมตัวอย่างให้บางเป็นพิเศษใช้ในการศึกษาโครงสร้างในระดับโมเลกุล

2. Scanning Electron Microscope (SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของวัตถุหรือตัวอย่าง ทำให้ได้ภาพ 3 มิติใช้ในการศึกษาโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของวัตถุ

2.8.3 กล้องจุลทรรศน์สอบบวนสแกน

กล้องจุลทรรศน์สอบบวนสแกน (Scanning Probe Microscope, SPM) เป็นกล้องที่ใช้ปลายแหลมที่มีระดับเล็กระดับอะตอมวัดแรงระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลหรือวัดเกี่ยวกับการลอดผ่านได้แบบควอนตัมของอิเล็กตรอน โดยปลายแหลมจะทำหน้าที่ลากสัมผัสผ่านพื้นผิวและทำหน้าที่ตรวจวัดคุณลักษณะของพื้นผิวที่สัมผัส ทำให้สามารถมองเห็นหรือศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยมีความละเอียดมากอยู่ในระดับ 0.1 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์ในกลุ่มนี้ปัจจุบันมีหลายแบบตามลักษณะของการนำมาใช้งานเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของโครงสร้างของตัวอย่าง แต่ที่ใช้กันทั่วไปในงานนาโนเทคโนโลยี ได้แก่

1. Scanning Tunneling Microscope (STM) เป็นกล้องที่ใช้หลักการวัดพื้นผิวจากกระบวนการลอดผ่านได้ (Tunneling) ของอิเล็กตรอนระหว่างพื้นผิว และปลายแหลมของกล้อง STM ซึ่งในระหว่างการสแกน สัญญาณไฟฟ้าที่ตรวจสอบได้จากพื้นผิวจะถูกส่ง และนำมาสร้างภาพ 3 มิติของพื้นผิว กล้องชนิดนี้ใช้สำหรับตรวจวัดลักษณะโครงสร้างพื้นฐานและความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าภายในโครงสร้างระดับนาโน

2. Atomic Force Microscope (AFM) เป็นกล้องที่ใช้แสงเลเซอร์ผ่านไปที่ปลายแหลม เมื่อปลายแหลมลากผ่านโครงสร้างระดับนาโนจะเกิดแรงเชิงสัมพันธ์ ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณและนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่มีลักษณะโครงสร้างระดับอะตอมที่สามารถเห็นได้บนจอภาพของมอนิเตอร์ กล้อง STM สามารถใช้ตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์ เซรามิก คอมโพสิต กระจก หรือแก้ว และโมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ [12]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินงานของงานวิจัยเรื่อง การเชื่อมความต้านทานท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. การทดสอบแรงกดเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุดที่ท่อสามารถรองรับแรงได้โดยที่ท่อไม่ยุบตัว
4. การออกแบบการทดลอง
5. การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงานทดสอบ
6. การทดสอบแรงกดเฉือนของรอยเชื่อม
7. การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองเรื่อง การเชื่อมความต้านทานท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จัดเป็นโลหะชนิดที่มีเหล็กเป็นส่วนผสมหลัก (Iron-based Alloy) โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Centered Cubic) โดยโครงสร้างผลึกนี้ส่งผลให้วัสดุมีความแกร่งและความเหนียวทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการขึ้นรูปเย็นได้ อีกทั้งความแข็งแรงของวัสดุชนิดนี้ยังไม่ลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย มีความสามารถในการต้านทานความกัดกร่อนที่ดี ไม่มีความสามารถในการดูดแม่เหล็กติด ซึ่งวัสดุชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นท่อไอทีในเครื่องยนต์ของรถยนต์ ส่วนแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมติดกันกับท่อใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก 439 โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC (Body Centered Cubic) ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการชุบแข็งได้ มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ และมีราคาที่ถูก โดยมีรายละเอียดซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ และคุณสมบัติทางกายภาพ [13] ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ SUS304 และ SUS439 [14]

Type of Steel	Element						
SUS304	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
	0.05	0.05	18.3	8.1	0.3	1.8	0.45
SUS439	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
	0.07	0.04	18.0	0.5	-	1	1

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SUS304 และ SUS439 [14]

Type of Steel	Hardness (HRB)	Yield 0.2 Proof Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS304	80 (สูงสุด)	230	540 (ต่ำสุด)	45
SUS439	89 (สูงสุด)	240	420 (ต่ำสุด)	23

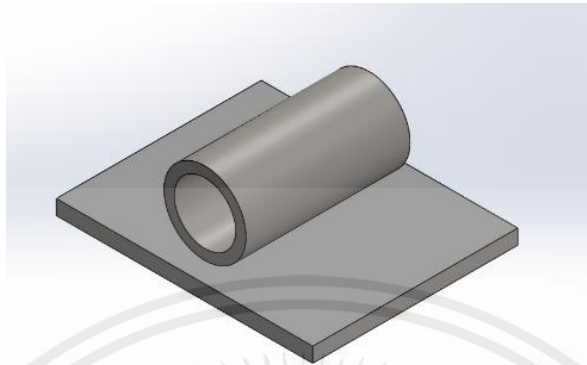
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ SUS304 และ SUS439 [14]

Type of steel	Specific Heat at 20°C (J/kg·°C)	Density at 20°C (g/cm ³)	Electric Resistivity (Ω·mm ² /m)	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /K)	Thermal Conductivity (W/m·K)
SUS304	500	7.9	0.73	16.5	17.5 at 20°C
SUS439	460	7.7	0.6	10.5	25 at 20°C

3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

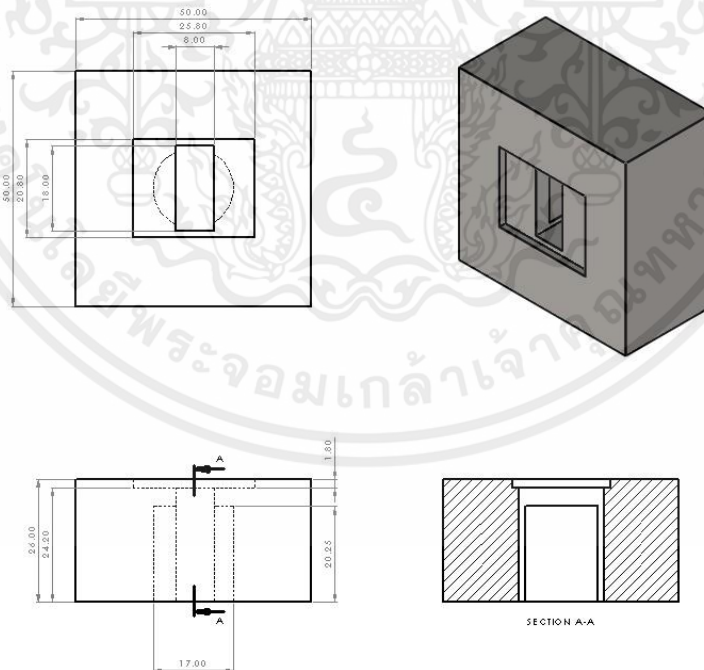
ในการเชื่อมความต้านทานท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก มีการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ชิ้นงานสำหรับการเชื่อมความต้านทาน (Workpiece) ใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8.1 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานสำหรับการเชื่อมความต้านทาน

2. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการเชื่อมความต้านทาน (Fixture for Resistance Welding) ใช้เพื่อทำการยึดตำแหน่งของชิ้นงานขณะทำการเชื่อมความต้านทาน



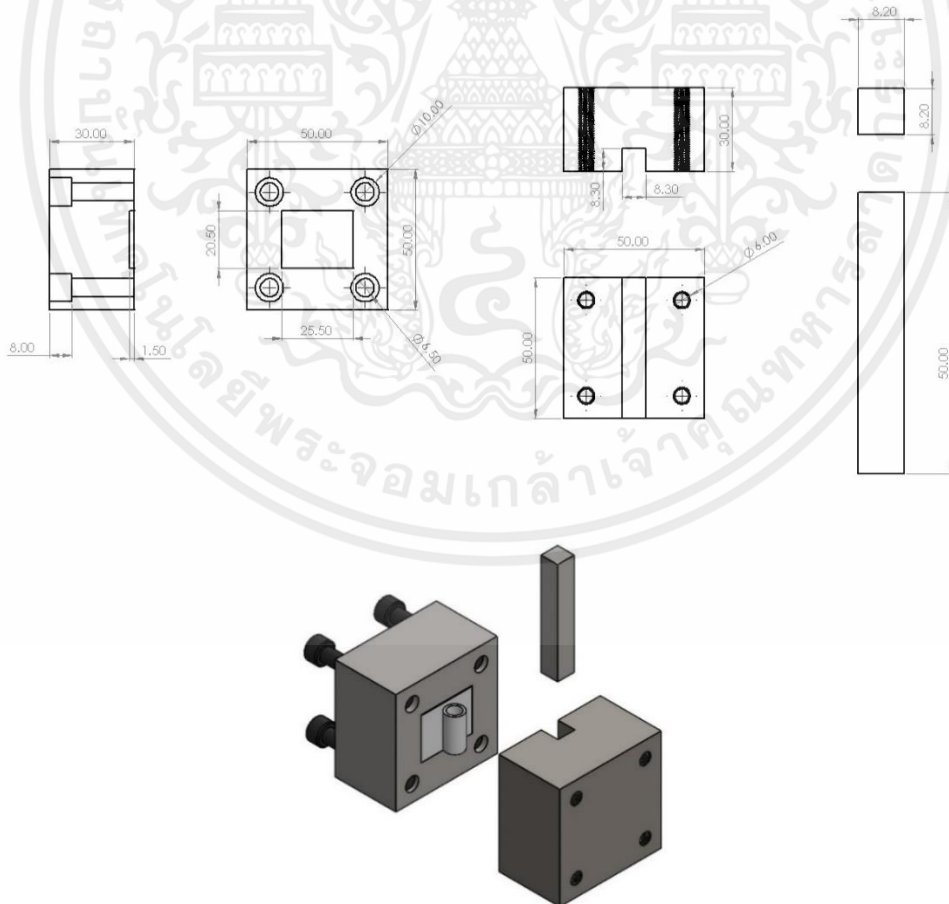
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการเชื่อมความต้านทาน

3. เครื่องตัดไฟเบอร์เลเซอร์ (Fiber Laser Cutting Machine) ยี่ห้อ XT laser รุ่น XTC-F1530H ใช้กำลังเลเซอร์ 1,000 W ความยาวคลื่น 1,070 nm ความถี่ 50 Hz สำหรับตัดแผ่นโลหะ



รูปที่ 3.3 เครื่องตัดไฟเบอร์เลเซอร์ [15]

4. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน (Fixture for Shear Force Test) ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานในขณะที่ทดสอบแรงกดเฉือน



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกดเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หัวอิเล็กโทรดที่ใช้สำหรับการเชื่อมความต้านทาน (Machined Electrode Tip) เป็นหัวอิเล็กโทรดชนิด F ที่ผ่านกระบวนการตัดแต่งเนื้อโลหะให้สามารถรองรับกับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติกได้อย่างพอดีเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทาน ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวอิเล็กโทรด 15.95 มิลลิเมตร และขนาดช่องรองรับท่อ 8.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 หัวอิเล็กโทรดที่ใช้สำหรับการรองรับท่อ

6. เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) ใช้รุ่น PANASONIC YR-500C ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ หัวกดอิเล็กโทรดทองแดง ด้านบนชนิด R ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.85 มิลลิเมตร และ หัวอิเล็กโทรด ด้านล่างชนิด F ที่ผ่านกระบวนการตัดแต่งเนื้อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.95 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด [16]

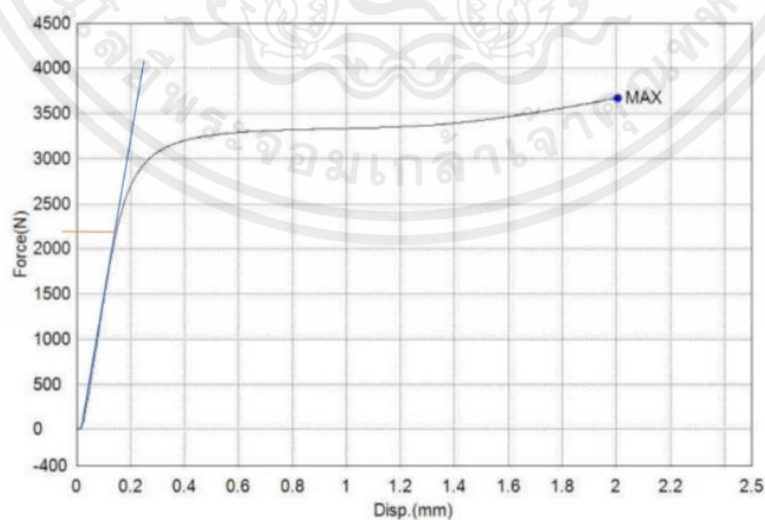
7. เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) ยี่ห้อ SHIMADZU Autograph AG-X-100KN ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดที่ท่อสามารถรับได้และใช้ทดสอบแรงกดเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด



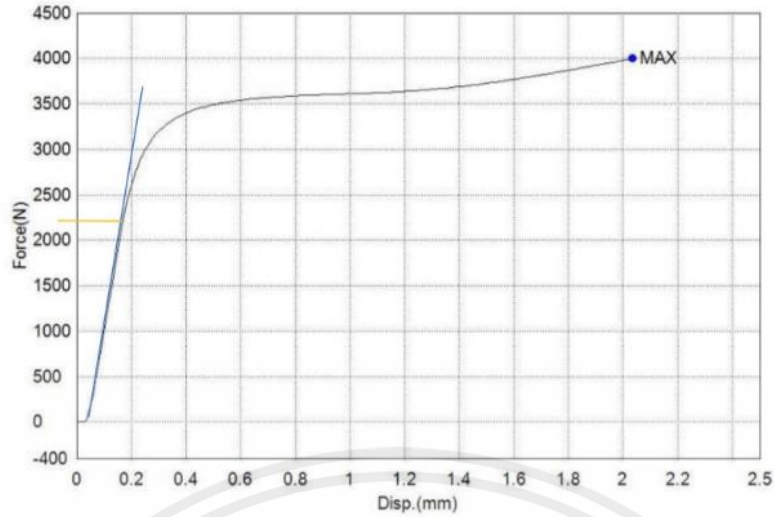
รูปที่ 3.7 Universal Testing Machine [16]

3.3 การทดสอบแรงกดเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุดที่ท่อสามารถรองรับแรงได้โดยที่ท่อไม่ยุบตัว

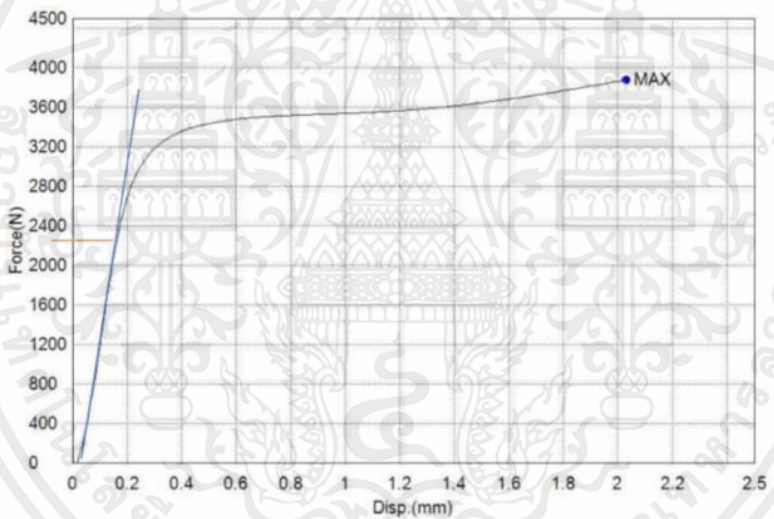
ในการทดสอบแรงกดของท่อ ใช้เครื่อง Universal Testing Machine กดลงบนชิ้นงานท่อกว้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 8 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร กดลงด้วยความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 10 มิลลิเมตร ต่อนาที 50 มิลลิเมตรต่อนาที และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืดดังนี้



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืดที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืดที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืดที่ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการทดสอบความเร็วทั้ง 6 ค่า ได้แก่ 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ได้นำกราฟที่ค่าความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที 50 มิลลิเมตรต่อนาที และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที มาพิจารณาความสัมพันธ์ทำให้สรุปได้ว่าที่จุดครากของทั้ง 3 ความสัมพันธ์มีความใกล้เคียงกันมากทำให้เห็นได้ว่าค่าของอัตราความเครียด (Strain Rate) ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของท่อและประมาณค่าแรงกดสูงสุดเป็น 2,250 N เพราะเป็นค่าที่ประมาณจากขีดจำกัดแบบสัดส่วน (Proportional Limit) ของกราฟด้านบน

3.4 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมความต้านทานที่อาศัยความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้าและขึ้นกับตัวแปรสำคัญอย่าง กระแสไฟฟ้า ความต้านทานกระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า จึงมีการออกแบบการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.11 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลและทำให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนของรอยเชื่อมสูงสุด โดยมีการเพิ่มจุด Center Points (CP) เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า Y กับ X มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงหรือไม่ ถ้าความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง เราก็ไม่ควรใช้การทดลองแบบ Factorial เพราะผลลัพธ์ที่ได้อาจทำให้เกิดความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนไปได้ และจุด CP สามารถเพิ่มอำนาจในการทดสอบ (Power of Test) ช่วยทำให้โอกาสในการตรวจจับความแตกต่างของปัจจัยได้ โดยที่ไม่ต้องเพิ่มจำนวนข้อมูล ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน

โดยศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกดระหว่างชิ้นงาน (F) กระแสไฟฟ้า (I) และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (t) โดยปัจจัยทั้งหมดออกแบบให้มี 2 ระดับ (2 Level) + Center Point และทดลองซ้ำ 4 ครั้ง (4 Replicates) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอในการหาค่าความผิดพลาด อันเนื่องมาจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) ค่าตัวแปรที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่

1. ค่าแรงกด (F) ใช้ค่าในช่วง 1,600-2,000 นิวตัน
2. ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ใช้ค่าในช่วง 3,800 – 4,200 แอมแปร์
3. ค่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (t) ใช้ค่าในช่วง 10-12 cycles

จากนั้น นำค่าของแต่ละปัจจัยไปใส่ในโปรแกรม Minitab เพื่อสร้างแบบการทดลอง ดังรูปที่ 3.12

Create Modeling Design

Response

Enter the name of your response variable:

What is your response goal?

Factors

Number of factors:

Enter your factor names and settings:

Name	Type	Low	High
F	Continuous	1600	2000
I	Continuous	3800	4200
t	Continuous	10	12

Replicates

Adding replicates allows you to detect smaller effect sizes.

Number of replicates:

Number of runs

Total number of center points in your design: 12

Total number of runs in your design: 44

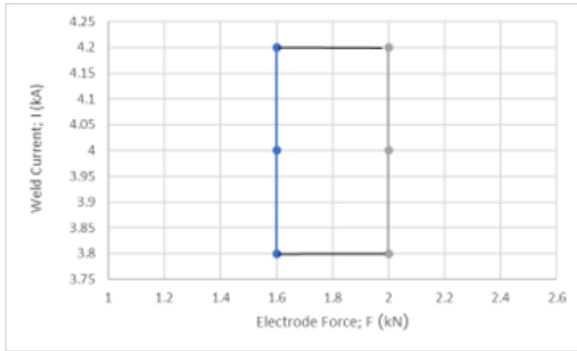
รูปที่ 3.12 การออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Minitab

3.5 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงานทดสอบ

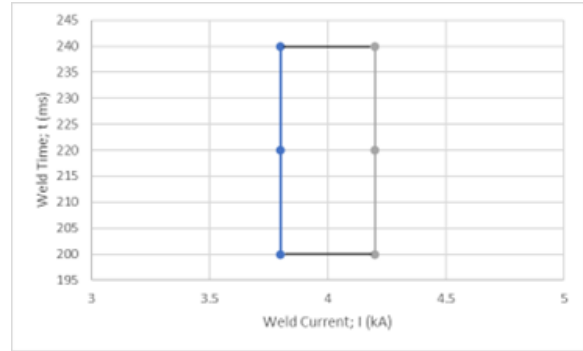
การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงานทดสอบ ทำการเชื่อมภายใต้เงื่อนไขของเวลด์โลบ (Weld Lobe) โดยเวลด์โลบเป็นกราฟที่สามารถใช้อธิบายช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมที่สร้างรอยเชื่อมที่สามารถยอมรับได้ โดยขอบล่างของกราฟคือช่วงที่รอยเชื่อมมีขนาดเล็กเกินไปจนไม่สามารถเชื่อมติดกันได้ และขอบบนเป็นช่วงที่เนื้อโลหะเกิดการหลอมมากเกินไปจนความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลงโดยจากการทดลองจะได้ช่วงขอบเขตของการเชื่อมที่สามารถยอมรับได้ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.8 kA - 4.2 kA
2. เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 200 ms - 240 ms
3. แรงกดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.6 kN - 2 kN

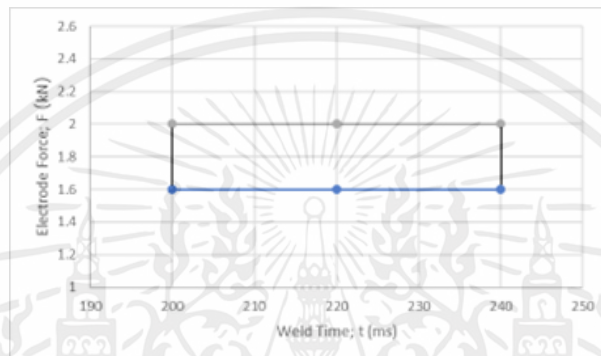
โดยกราฟของเวลด์โลบแสดงไว้ดังรูปต่อไปนี้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.13 ขอบเขตการเชื่อมของชิ้นงานผ่านเวลด์โอบ

- (a) กระแสไฟฟ้าและแรงกดของหัวอิเล็กโทรด
- (b) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า
- (c) แรงกดและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า

3.6 การทดสอบแรงกดเฉือนของรอยเชื่อม

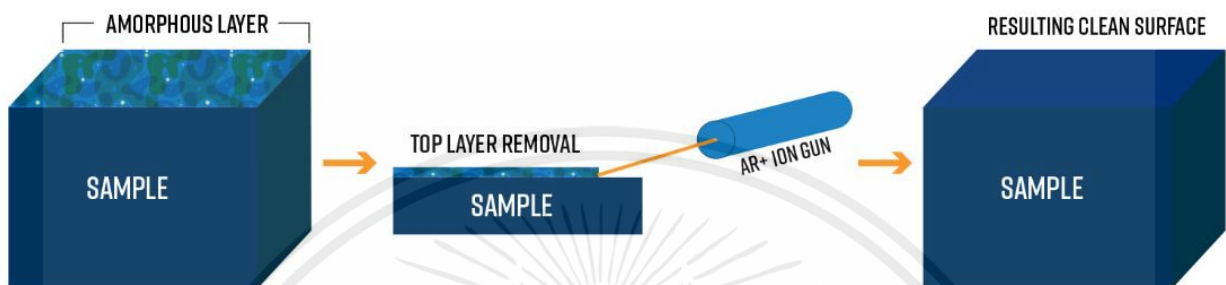
การทดสอบแรงกดเฉือนของรอยเชื่อมจะทำการทดสอบผ่านเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ผ่านลงด้วยแท่งเหล็กที่มาจากกรอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน กดผ่านช่องตรงกลางด้วยความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งท่อและแผ่นเหล็กเกิดการขาดออกจากกัน

3.7 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเรียบร้อยแล้วมาตัดตามแนวขวาง (Cross Section) ที่กึ่งกลางของรอยเชื่อม
2. นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดมาขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold Mounting) โดยใช้เรซินในการหล่อ
3. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 240 320 400 600 800 1000 1200 2400 และ 5000 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแนวการขัดตั้งฉากกับรอยแนวเดิมทุกครั้ง เมื่อเปลี่ยนเบอร์

กระดาษทราย

- นำชิ้นงานที่ได้จากการขัดกระดาษทราย มาขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 1 ไมครอน
- นำไปกัดผิวชิ้นงานด้วยไอออน (Ion Milling) เป็นเทคนิคในการเตรียมชิ้นงาน และเปิดเผยโครงสร้างและองค์ประกอบภายใน ให้พื้นผิวที่เรียบและสะอาดยิ่งขึ้น เพื่อนำไปตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.14 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน [17]

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผลของการเชื่อมความต้านระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ซึ่งมีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. การคัดกรองเพื่อเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญ
2. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด
3. การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง
4. โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
5. โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
6. ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมหลังจากการทดสอบแรงกดเฉือน
7. การเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยึดกับผลการทดลองในระดับ

โครงสร้างจุลภาค

4.1 การคัดกรองเพื่อเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

การคัดกรองเพื่อเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (Screening) เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้โปรแกรม Minitab มาวิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งนี้

4.1.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงกดเฉือนของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ในการทดลองการเชื่อมความต้านทานนี้ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกดระหว่างชิ้นงาน (F) กระแสไฟฟ้า (I) และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (t) โดยปัจจัยทั้งหมดออกแบบให้มี 2 ระดับ ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง และนำไปทดสอบค่าความต้านทานแรงกดเฉือน ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดเฉือน

ลำดับการทดลอง	แรงกด (นิวตัน)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ไซเคิล)	ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนของรอยเชื่อม (นิวตัน)			
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
1	1800	4000	11	2116.25	2470.08	2595.25	2100.60
2	1600	3800	12	2100.99	1745.18	1816.51	1685.21
3	2000	3800	12	1577.76	1545.43	2225.84	1263.25
4	2000	4200	12	1838.57	2290.44	2501.30	1725.59
5	2000	4200	10	1363.26	1879.36	1364.44	2077.68
6	1800	4000	11	1565.44	1808.79	1676.24	2193.94
7	1600	4200	10	2752.40	2291.41	2389.15	1848.11
8	1600	3800	10	1175.05	1877.09	1127.13	*
9	2000	3800	10	2063.04	1112.33	1559.77	1762.76
10	1800	4000	11	1886.37	1791.00	2389.05	2488.69
11	1600	4200	12	2098.80	2264.72	2607.27	2412.26

* หมายเหตุ ค่าความต้านทานของแรงกดเฉือนที่เงื่อนไข F=1600 N, I=3800 A และ t=10 cycles ในครั้งที่ 4 เกิดความผิดพลาดระหว่างการทดลอง จึงไม่นำค่านี้มาวิเคราะห์ผล

4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) จากโปรแกรม Minitab ในการคัดกรองเพื่อเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนมากที่สุด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 90% ($\alpha=0.1$) จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่า P-value ของกระแสไฟฟ้า (I) และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (t) มีค่าน้อยกว่า 0.1 และค่า P-value ของแรงกด (F) มีค่าเข้าใกล้ 0.1 จึงสรุปผลได้ว่าทั้ง 3 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงกดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณา Lack of Fit มีค่า P-value เท่ากับ 0.519 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.1 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับข้อมูล และ Curvature มีค่า P-value เท่ากับ 0.075 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1 หมายความว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงซึ่งกันและกัน จึงเลือกใช้ Central Composite Design ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับข้อมูลในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

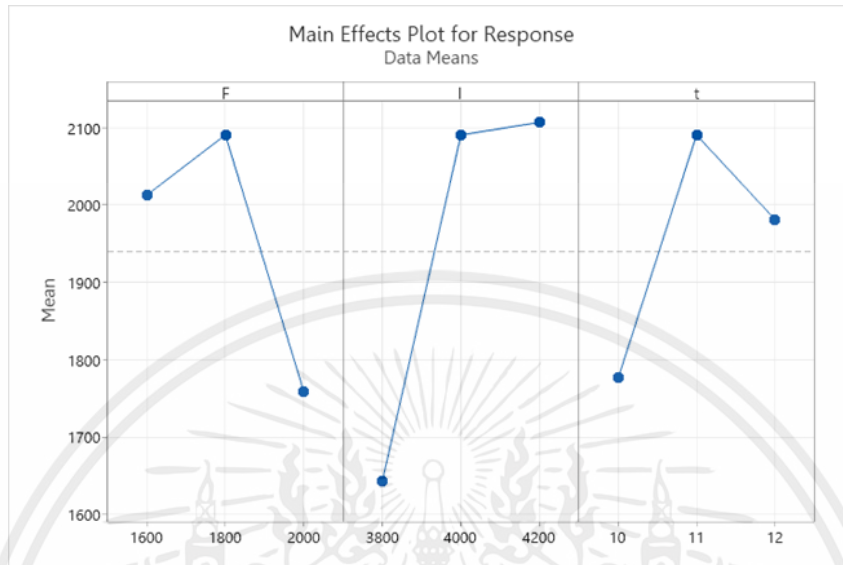
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	3701095	336463	2.64	0.017
Linear	3	2564301	854767	6.70	0.001
F	1	345375	345375	2.71	0.110
I	1	1775340	1775340	13.91	0.001
t	1	408359	408359	3.20	0.083
2-Way Interactions	3	442316	147439	1.16	0.342
F*I	1	442253	442253	3.47	0.072
F*t	1	472	472	0.00	0.952
I*t	1	677	677	0.01	0.942
3-Way Interactions	1	318356	318356	2.49	0.124
F*I*t	1	318356	318356	2.49	0.124
Curvature	1	434551	434551	3.41	0.075
Error	31	3956138	127617	-	-
Lack-of-Fit	23	2955694	128508	1.03	0.519
Total	42	7657233	-	-	-

โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (Independent Variable) หรือปัจจัยที่ใช้ในการเชื่อม และตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือค่าความต้านทานแรงกดเฉือน สามารถแสดงได้ตามสมการถดถอย (Regression Equation) ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นสมการที่สามารถใช้พยากรณ์หรือประมาณค่าความต้านทานแรงกดเฉือน

$$\text{Response} = -228296 + 123.9 F + 57.4 I + 18605 t - 0.0311 F*I - 10.22 F*t - 4.61 I*t + 0.00255 F*I*t + 225 CtPt \quad (4.1)$$

จากการวิเคราะห์กราฟของปัจจัยหลัก (Main Effects) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดเฉือนและปัจจัยในการเชื่อม พบว่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงกดเฉือนของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากกว่าปัจจัยอื่น นั่นหมายความว่ากระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนมากที่สุด ซึ่ง

สามารถตรวจสอบได้จากค่า P-value ที่ให้ค่าน้อยที่สุด โดยที่แรงกด 1800 N กระแสไฟฟ้า 4200 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 cycles จะให้ค่าเฉลี่ยของแรงกดเดือนสูงสุด ดังรูปที่ 4.1



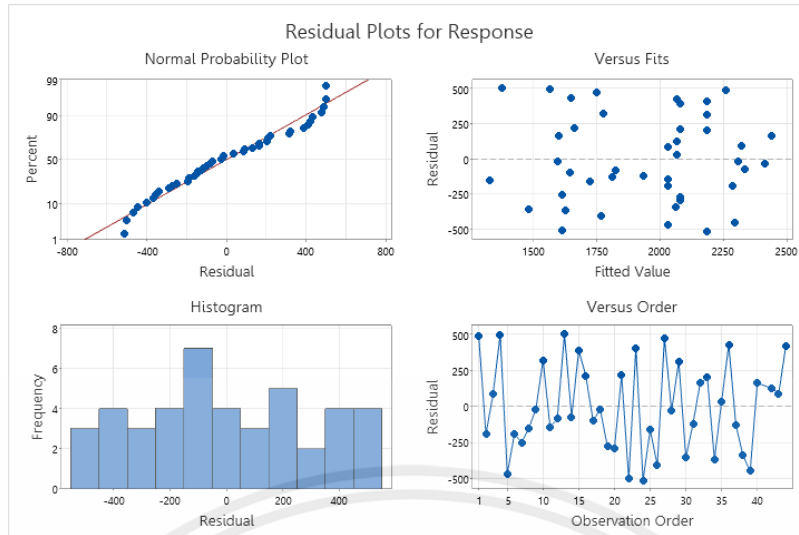
รูปที่ 4.1 กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effects)

4.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของชุดของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งได้ผลดังนี้

1. จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าการกระจายตัวแบบปกติ
2. จากกราฟ Versus Fits มีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม ดังนั้นความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่
3. จากกราฟ Versus Order ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระ มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังนั้นส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน

จากการวิเคราะห์กราฟข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าแบบการทดลองที่เลือกมาใช้ สามารถใช้อธิบายข้อมูลได้



รูปที่ 4.2 Residual Plot เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบการทดลอง

4.2 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด (Optimization) ที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุด (Maximize) ผลจากการวิเคราะห์ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด คือ แรงกดเท่ากับ 1,600 N กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4,094.95 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 11.0303 cycles ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนเท่ากับ 2,723 N และให้ช่วงการทำนาย (Prediction Interval) มีค่าอยู่ในช่วง 2,006-3,440 N

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองในการทำ CCD

ลำดับ	แรงกด (นิวตัน)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ไซเคิล)	ค่าความต้านทานแรงกดเฉือน (นิวตัน)
1	1800	4000	11	2116.25
2	1800	4200	11	2548.71
3	1800	4000	11	1565.44
4	2000	3800	10	2063.04
5	1800	4000	11	1886.37
6	2000	3800	10	1112.33
7	1800	4000	10	2381.20
8	1600	3800	12	2100.99

9	1800	4200	11	2157.48
10	1800	4000	10	1875.91
11	1800	3800	11	1891.65
12	2000	4200	12	1838.57
13	1600	3800	10	1175.05
14	1800	4000	11	2470.80
15	1800	4000	11	1808.79
16	1800	3800	11	2066.74
17	1600	4200	10	2752.40
18	2000	3800	12	1577.76
19	1600	4200	12	2098.8
20	1600	3800	10	1877.09
21	2000	3800	12	1545.43
22	2000	4000	11	2604.04
23	2000	4200	10	1363.26
24	1800	4000	11	1791
25	2000	4200	10	1879.36
26	1800	4000	11	2595.25
27	1800	4000	11	2389.05
28	1600	4200	12	2264.72
29	2000	4000	11	2531.51
30	1800	4000	12	2571.90
31	2000	4200	12	2290.44
32	1600	4000	11	2902.97
33	1800	4000	12	2179.23
34	1600	4000	11	2763.34
35	1600	4200	10	2291.41
36	1600	3800	12	1745.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การคาดการณ์การตอบสนองหลายตัวแปร (Multiple Response Prediction)

Variable	Setting
F	1600
I	4094.95
t	11.0303

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากในตารางที่ 4.4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการถดถอยที่ไม่ถูกแปลง (Regression Equation in Uncoded Units) เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญหรือตัวแปรต้น กับผลของค่าความต้านทานแรงกดเฉือนหรือตัวแปรตามที่ได้ ดังนี้

$$\text{Response} = -163504 - 13.0 F + 72.3 I + 5635 t + 0.00519 F*F - 0.00817 I*I - 241 t*t - 0.00224 F*I + 0.225 F*t - 0.167 I*t \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักกับค่าความต้านทานแรงกดเฉือน

จากสมการที่ 4.2 สามารถอธิบายถึงแนวโน้มของแต่ละปัจจัย รวมไปถึงอิทธิพลของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถ้าหากค่าแรงกดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง โดยจากสมการที่ 2.1 สามารถบอกได้ว่าเมื่อค่าความต้านไฟฟ้า (R) ลดลงจะทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้น (H) ลดลงตามมาด้วย ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนลดลง ตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ที่มีค่าแปรผันตรงต่อค่าความร้อนที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.1 ดังนั้น เมื่อเพิ่มค่าของกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้จะทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นตามด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระแสไฟฟ้าที่เป็นตัวแปรยกกำลังสอง ทำให้สามารถเพิ่มค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าเวลาที่ใช้ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า

ความชันของกราฟในส่วนของกระแสไฟฟ้าจะมากกว่าความชันของกราฟในส่วนของเวลา ซึ่งค่าความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือน โดยเป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย ในส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัยก็เช่นกัน

4.3 การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

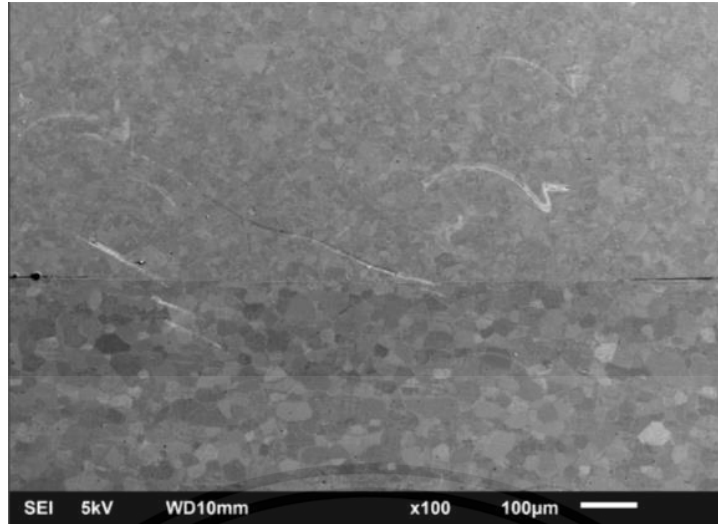
การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง (Confirming) จากการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง โดยใช้แรงกดเท่ากับ 1,600 N กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4,094.95 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 11.0303 cycles นำมาทำการทดลอง 10 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.5 ซึ่งค่าทั้งหมดอยู่ในช่วงการทำนาย (Prediction Interval) ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองที่	ความต้านทานแรงกดเฉือน (นิวตัน)
1	2509
2	2653
3	2776
4	2252
5	2713
6	2752
7	2790
8	2862
9	2348
10	2363
ค่าเฉลี่ย	2602

4.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก SUS304 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก SUS439 จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ารอยเชื่อมของชิ้นงานเกิดการยึดติดกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งพบได้ว่าที่เงื่อนไขที่ให้ค่าแรงค่าแรงกดเฉือนสูงสุด เนื้อสัมผัสรอยเชื่อมระหว่างท่อและแผ่นเหล็กจะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นโดยแสดงดังรูปที่ 4.4



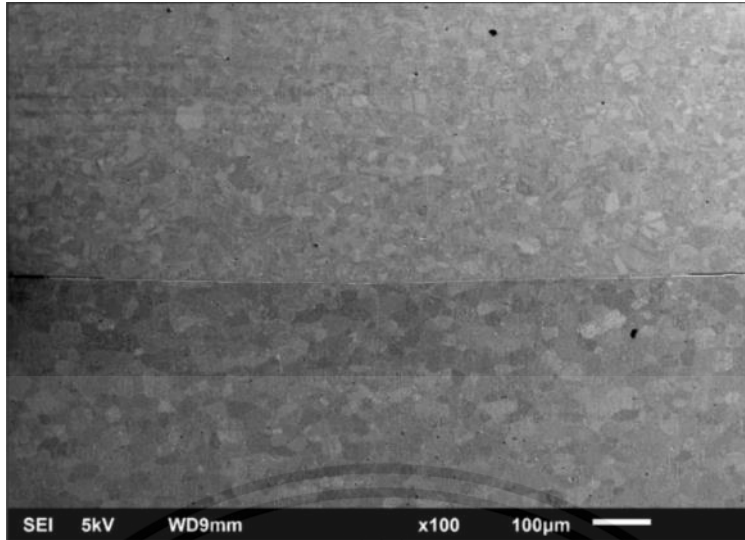
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดที่กำลังขยาย 100 เท่า

ลักษณะของเกรนมีขนาดเล็กลงตามแนวขอบของรอยเชื่อมและบีบเข้าหากันมากขึ้นตามเงื่อนไขที่ให้ค่าแรงกดเฉือนสูงสุด แต่รอยเชื่อมจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดจากเงื่อนไขของการทดลอง ทั้งหมดไม่สามารถเกิดเป็นนั๊กเก็ต (Nugget) ได้ เนื่องจากเงื่อนไขในการทดลองของการเชื่อมความต้านทานในงานวิจัยนี้ ถูกจำกัดในเรื่องของกระแสไฟฟ้าซึ่งต้องไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเชื่อมความต้านทานระหว่างท่อและเหล็กแผ่น เป็นการเชื่อมที่ชิ้นงานเกิดผิวสัมผัสเป็นพื้นที่หน้าตัดที่มีปริมาณน้อยมาก ทำให้เกิดค่าความต้านทานของกระแสไฟฟ้ามักขึ้น จึงไม่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมจนทำให้เกิดเป็นนั๊กเก็ตได้

ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยชิ้นงานที่มีเงื่อนไขดังนี้

1. เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุด ใช้แรงกด 1,600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4,000 แอมแปร์ และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 cycles
2. เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับปานกลาง ใช้แรงกด 1,800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4,000 แอมแปร์ และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 cycles
3. เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุด ใช้แรงกด 2,000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4,200 แอมแปร์ และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 cycles

โดยเงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับปานกลางจะเกิดการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 4.5 ว่ารอยเชื่อมที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นมีขนาดความยาวน้อยกว่าเงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุด



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 100 เท่า

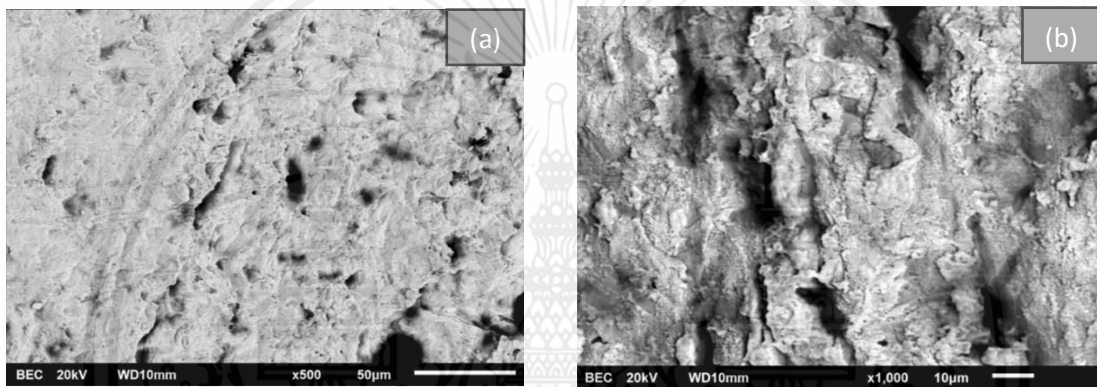
และหากพิจารณาที่รูป 4.6 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนต่ำสุดจะพบว่าเกิดเส้นรอยแบ่งแยกของวัสดุทั้งสองชนิดที่ชัดเจนกว่าสองเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้นและรอยเชื่อมมีขนาดที่แคบที่สุด



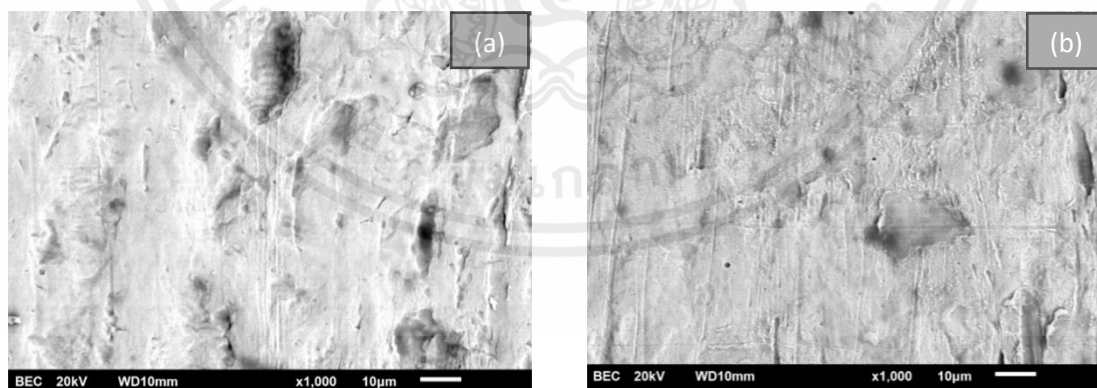
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 100 เท่า

4.5 ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมหลังจากการทดสอบแรงกดเฉือน

จากการทดสอบแรงกดเฉือนโดยใช้แรงอัดกดชิ้นงานผ่านอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เพื่อทดสอบแรงเฉือนจนชิ้นงานขาดออกจากกัน จะมียุคความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อมจากท่อและแผ่นเหล็ก จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้แรงกดเฉือนสูงสุด มีลักษณะการแตกหักเป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) เนื่องจากพบหลุม (Dimples) เป็นจำนวนมากโดยแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปแบบถาวรก่อนที่จะเกิดการแตกหัก หากเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ให้ค่าแรงกดเฉือนต่ำสุดที่แสดงดังรูปที่ 4.8 จะพบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) เนื่องจากมีหลุมเกิดขึ้นน้อยมาก บริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานมีความเรียบกว่าเงื่อนไขที่ให้ค่าแรงกดเฉือนสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด



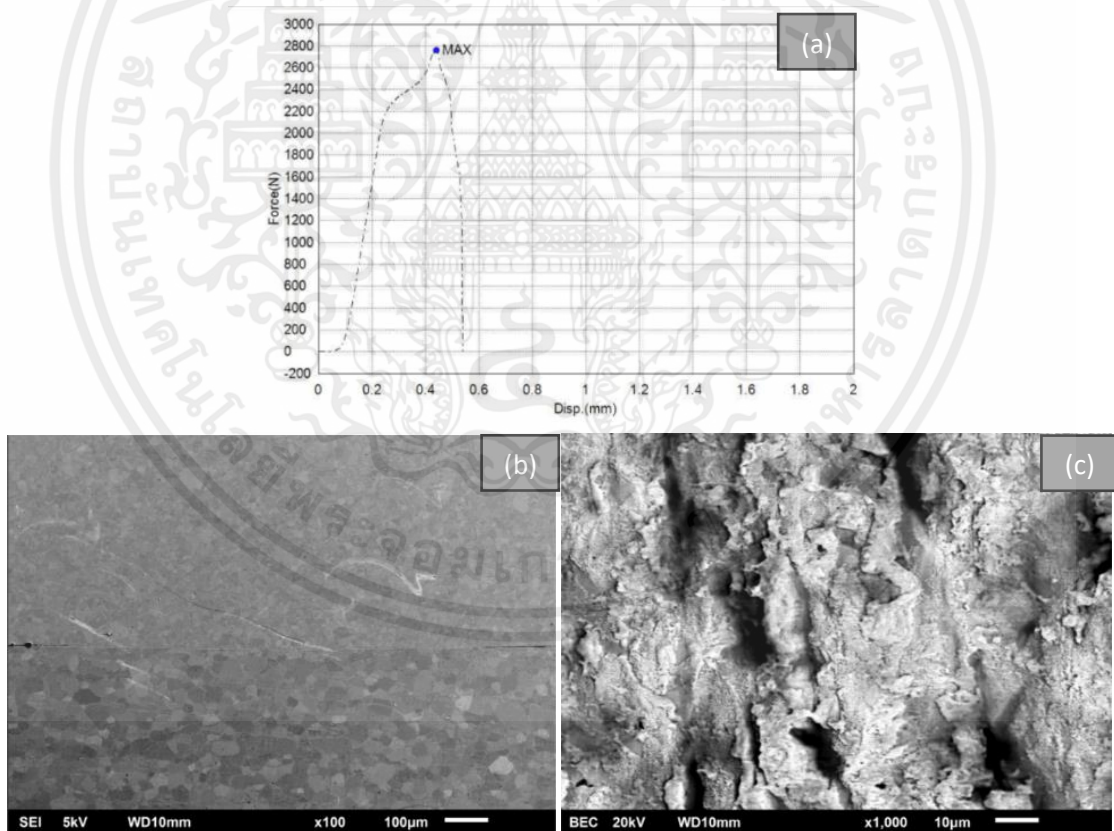
รูปที่ 4.7 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงที่สุดที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



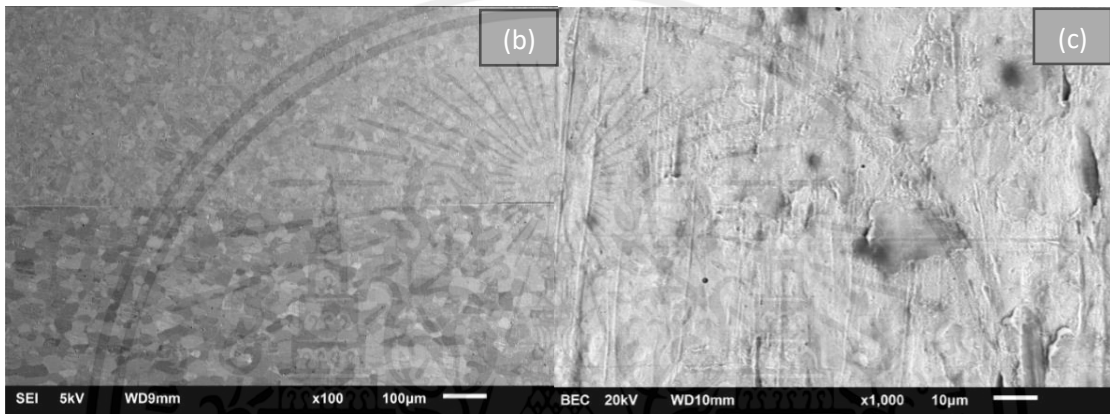
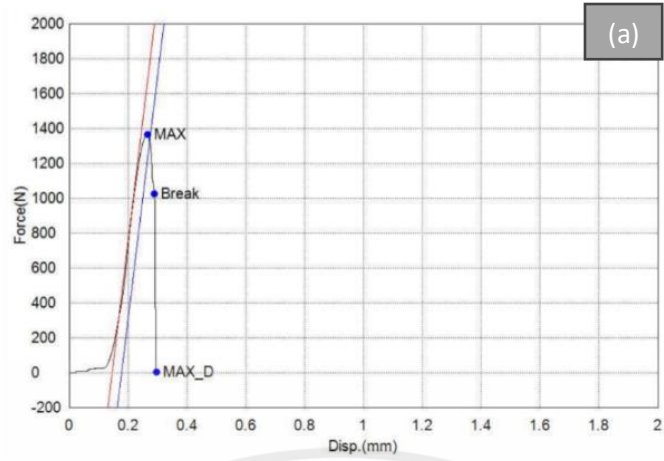
รูปที่ 4.8 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก

4.6 การเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืดกับผลการทดลองในระดับโครงสร้างจุลภาค

เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืดในเงื่อนไขที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดพบว่าจากกราฟมีค่าระยะยืดประมาณ 0.55 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.9 (a) เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.9 (b) พบว่าที่รอยต่อเกิดการหลอมรวมกันระหว่างท่อและแผ่นเหล็กอย่างสมบูรณ์โดยรูปที่ 4.9 (c) แสดงความเสียหายของรอยเชื่อมสามารถอธิบายได้ว่าการแตกหักมีลักษณะเป็นการแตกหักแบบเหนียวสังเกตได้จากหลุม (Dimples) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน หากเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดจากรูปที่ 4.10 (a) พบว่าระยะยืดจากกราฟลดลงเหลือประมาณ 0.3 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.10 (b) แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่เกิดการแบ่งแยกของวัสดุระหว่างท่อและแผ่นเหล็กได้อย่างชัดเจน อีกทั้งความเสียหายของรอยเชื่อมมีหลุมที่น้อยมากและตื้นกว่าเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุด โดยลักษณะดังกล่าวนี้เป็นลักษณะของการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งจะทำให้วัสดุเกิดความเสียหายได้เร็วกว่าการแตกหักแบบเหนียว โดยลักษณะความเสียหายของเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 (c)



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลทางการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่แรงกดเฉือนสูงสุด
(a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืด (b) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม
(c) ความเสียหายของรอยเชื่อม



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลทางการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่ให้แรงกดเฉือนต่ำสุด

(a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยืด (b) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

(c) ความเสียหายของรอยเชื่อม

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปและอภิปรายผลของงานวิจัย เรื่องการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก SUS304 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก SUS439 ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การสรุปและอภิปรายผล
2. ข้อเสนอแนะ
3. การนำไปประยุกต์ใช้ของงานวิจัย

5.1 การสรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก SUS304 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก SUS439 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือน พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือน อีกทั้งยังศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ผ่านค่าที่เหมาะสมของปัจจัย พบว่าทั้งแรงกด (F) กระแสไฟฟ้า (I) และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (t) มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.1 จากการวิเคราะห์เงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดเฉือนพบว่าจะได้ค่าความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดอยู่ในช่วง 2,006 ถึง 3,440 นิวตัน ที่ค่าแรงกด 1,600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4,100 แอมแปร์ และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 11 cycles จากนั้นนำเงื่อนไขดังกล่าวนี้ไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกิดการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์และมีขนาดความยาวของรอยเชื่อมตามแนวหน้าตัดของชิ้นงานมากกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ แต่ยังไม่เกิดเป็นนิกเก็ต (Nugget) และการศึกษาความเสียหายของท่อและแผ่นเหล็กผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผ่านค่าที่เหมาะสมของปัจจัย พบว่าการแตกหักที่เกิดขึ้นเป็นการแตกหักแบบเหนียวเนื่องจากพบหลุม (Dimples) ในชิ้นงานเป็นจำนวนมากซึ่งหลุมที่เกิดขึ้นเป็นส่วนที่บ่งบอกว่าวัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) โดยหากนำไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงกดที่ต่ำที่สุดจะพบได้ว่ามีหลุมที่เกิดขึ้นน้อยมากและหน้าความเสียหายของชิ้นงานมีรูปร่างค่อนข้างเรียบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างวัสดุสองชนิดที่ต่างกันควรมีโลหะเติม (Filler Metal) ที่มีคุณสมบัติการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุอยู่ระหว่างวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมทั้งสองชนิดเพื่อช่วยให้เกิดการเชื่อมติดกันของวัสดุสองชนิดที่ต่างกันได้ดีขึ้น

2. การตัดแต่งเนื้อวัสดุของหัวอิเล็กทรอนิกส์เพื่อรองรับท่อควรตัดแต่งเนื้อวัสดุให้แนบสนิทกับตัวท่อเพื่อให้ผลเกิดการเชื่อมที่ดีขึ้น

5.3 การนำไปประยุกต์ใช้ของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ในเรื่องการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างวัสดุสองชนิดที่ต่างกัน หรือนำไปต่อยอดกับวัสดุที่มีความต่างกันทางด้านรูปทรงของชิ้นงานได้

2. งานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในเรื่องของการศึกษาความเสียหายของวัสดุในระดับโครงสร้างจุลภาค และพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

3. งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาต่อในเรื่องของการศึกษาการผลิตได้จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแทนการเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อย



เอกสารอ้างอิง

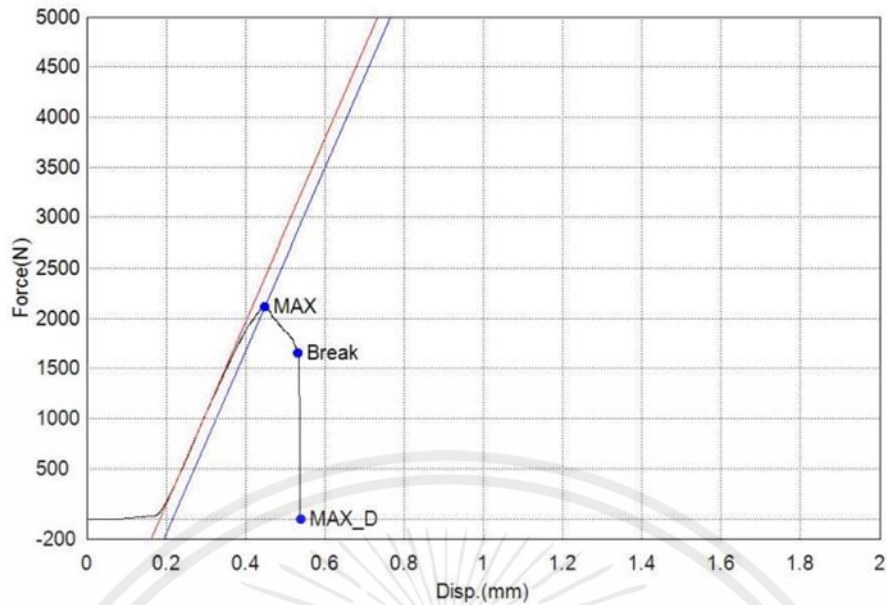
- [1] P. Podrzaj, I. Polajnar, J. Diaci and Z. Kariz. Overview of resistance spot welding control. Maney on behalf of the Institute, vol. 000, 2008. pp. 1
- [2] Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing. John Wiley & Sons Inc. 2010.
- [3] สรวินท์ ปุคคะภาค. (2559). เอกสารประกอบการสอนวัสดุวิศวกรรม. คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี.
- [4] Ravid Software Metal. Parameters in Resistance Welding. [Online]. Available: <http://www.ravida.net/parameters.html/> [Accessed: November 20 2023].
- [5] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และ สมชาย วนไทยสงค์. (2554). การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุดอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี. ใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9. (หน้า 4). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [6] Hongyan Zhang and Jacek Senkara. Resistance Welding Fundamentals and Applications. Taylor & Francis. 2006.
- [7] Douglas C. Montgomery and George C. Runger. Applied Statistics and Probability for Engineers. John Wiley & Sons Inc. 2013.
- [8] ถนัดกิจ ศรีโชค. 2563. วิธีพื้นผิวตอบสนองร่วมกับวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบตัดแปลงเพื่อหาค่าการใช้พลังงานที่ดีที่สุดในการเตรียมดินของรถแทรกเตอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [9] อภินันท์ แต่ตระกูล. 2553. การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิก: กรณีศึกษาชิ้นส่วนเครื่องปั้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [10] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- [11] Yang Leng. Materials Characterization Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods Second Edition. Wiley-VCH
- [12] ปราโมทย์ วณิชยธนาคม. (2557). การพัฒนาของกล้องจุลทรรศน์. วารสารนเรศวรพะเยา, 7(3), 193-195.
- [13] Michael McGuire. Stainless Steel for Design Engineering. ASM International. 2008.
- [14] Stainless Steel: Tables of Technical Properties. (2007). The European Stainless Steel Development Association, 7(2), 4-19.

- [15] XTLaser. The introduction of XTC-F1530H fiber laser cutting machine. [Online]. Available: <https://www.xtlaser.com/the-introduction-of-xtc-f1530h-fiber-laser-cutting-machine/> [Accessed: April 5 2023].
- [16] ประภาพรรณ พรหมทอง และ ปุรณพันธ์ คำศรี. 2563. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] Nano Science Instruments. Ion Milling. [Online]. Available: <https://www.nanoscience.com/techniques/ion-milling/> [Accessed: February 16 2023].

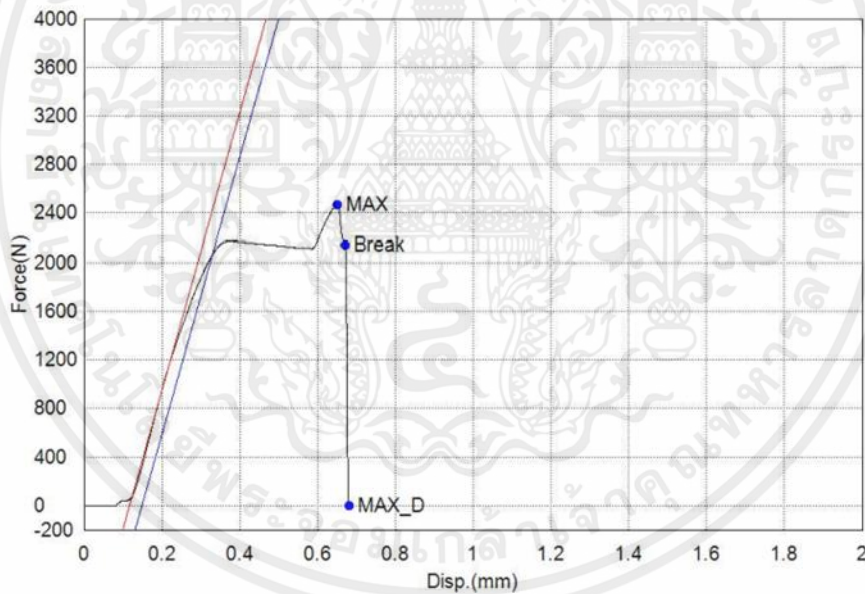




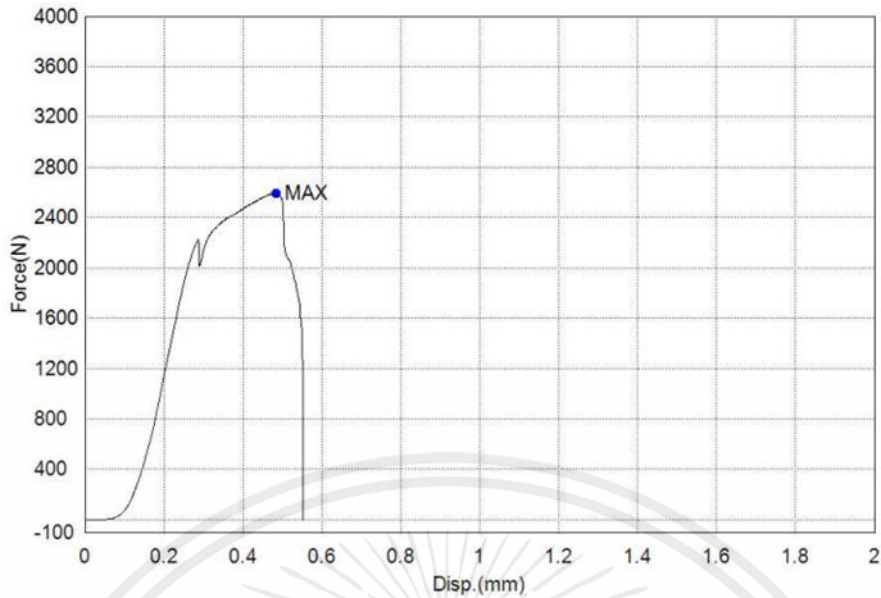
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



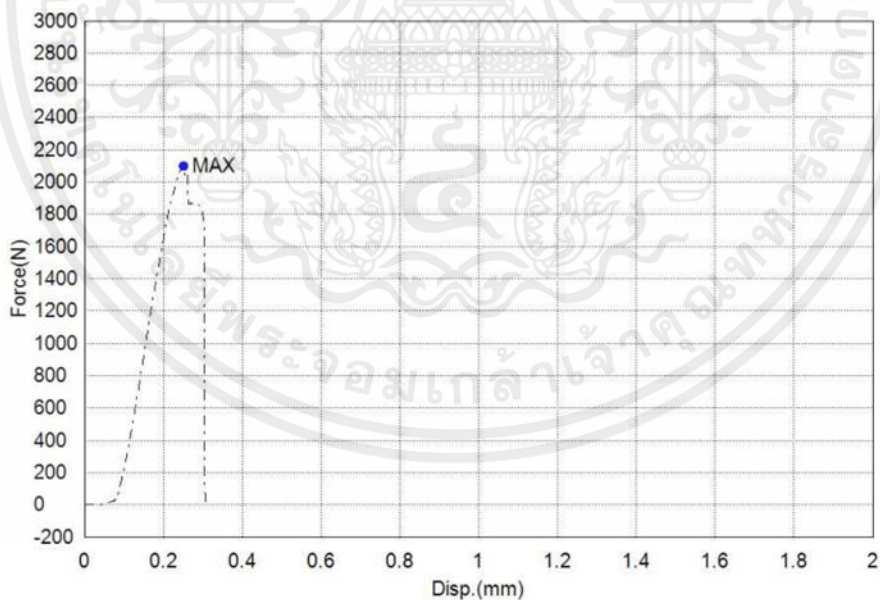
รูปที่ 1 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เงานโซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



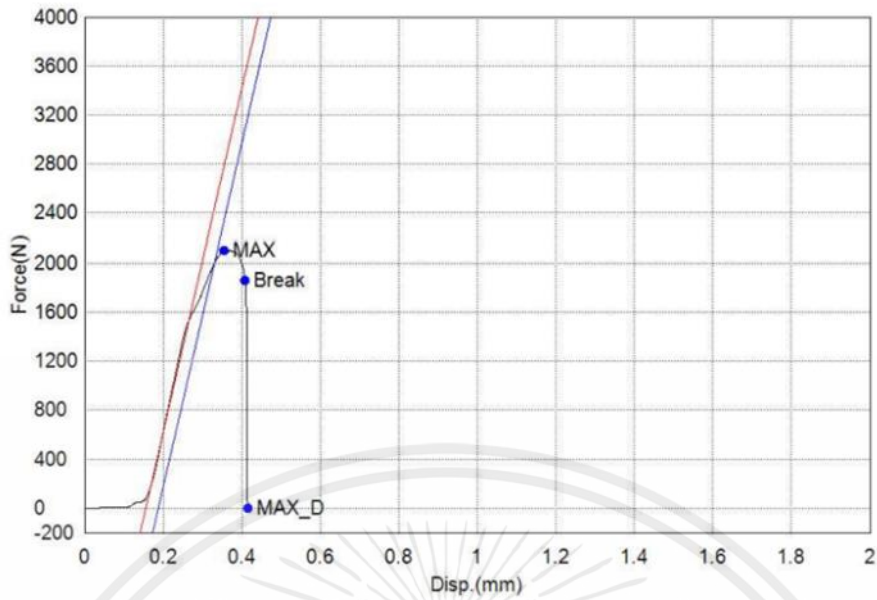
รูปที่ 2 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เงานโซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



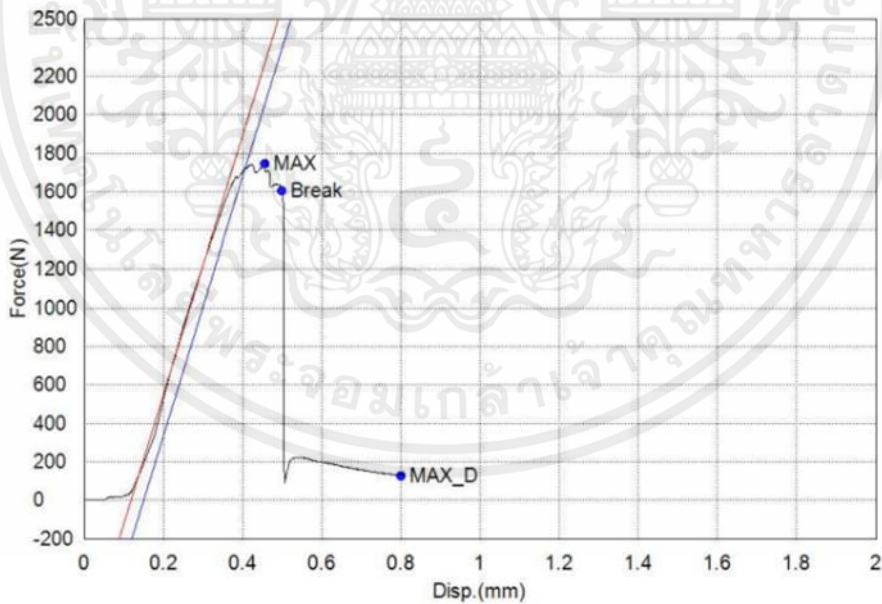
รูปที่ 3 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เงานโซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



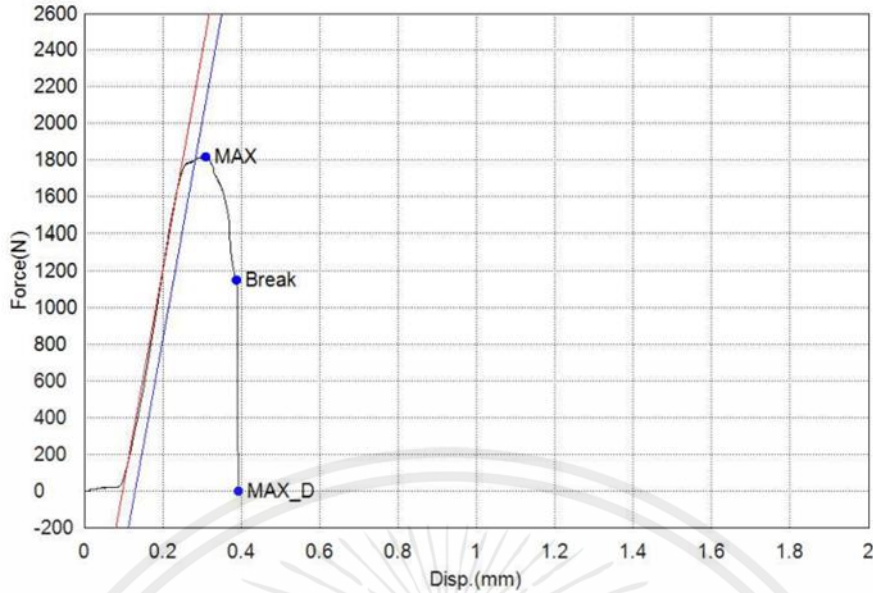
รูปที่ 4 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เงานโซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



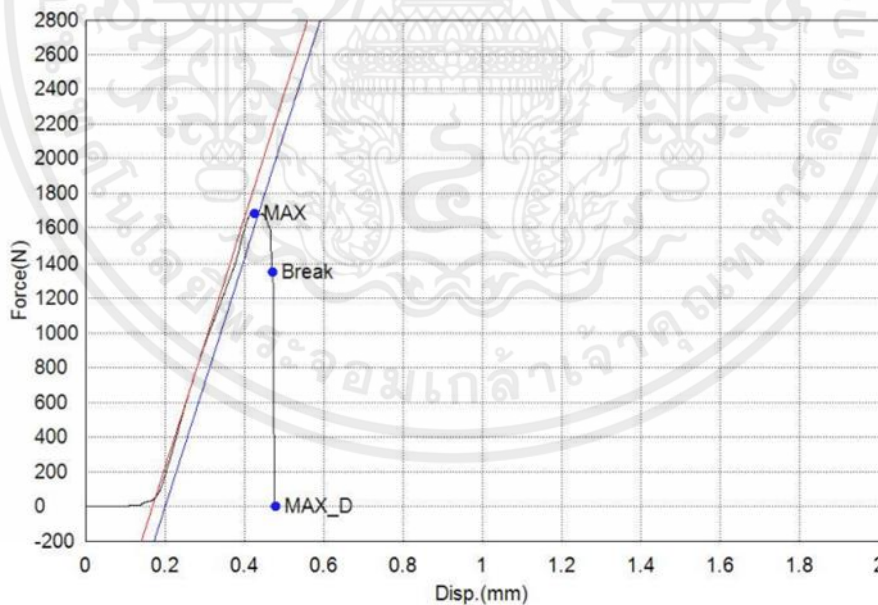
รูปที่ 5 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เ็นอนโซแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



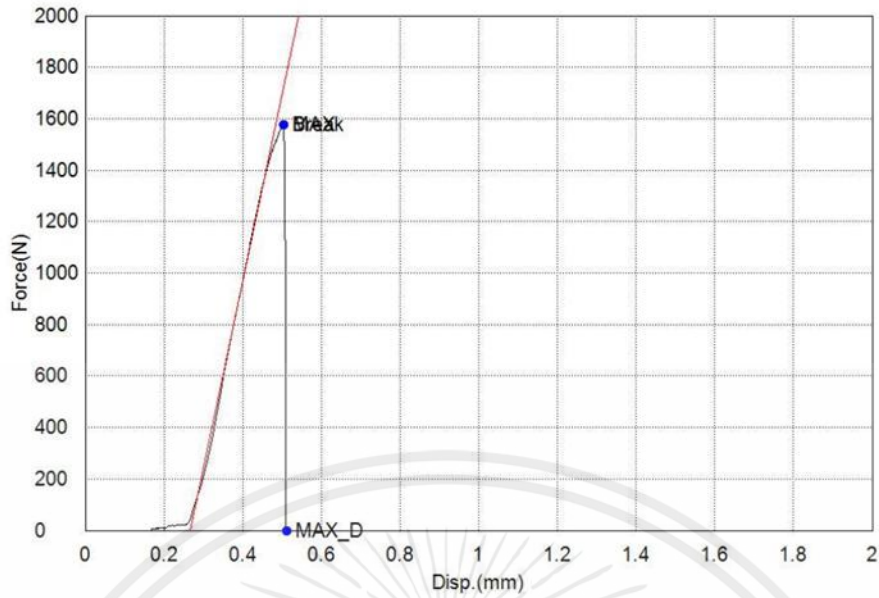
รูปที่ 6 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เ็นอนโซแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



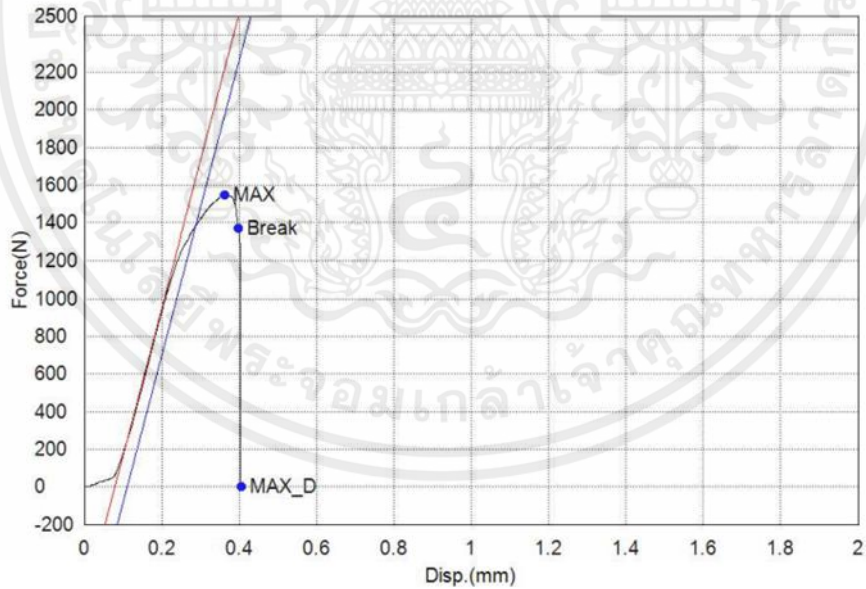
รูปที่ 7 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เสีนโซ่แรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



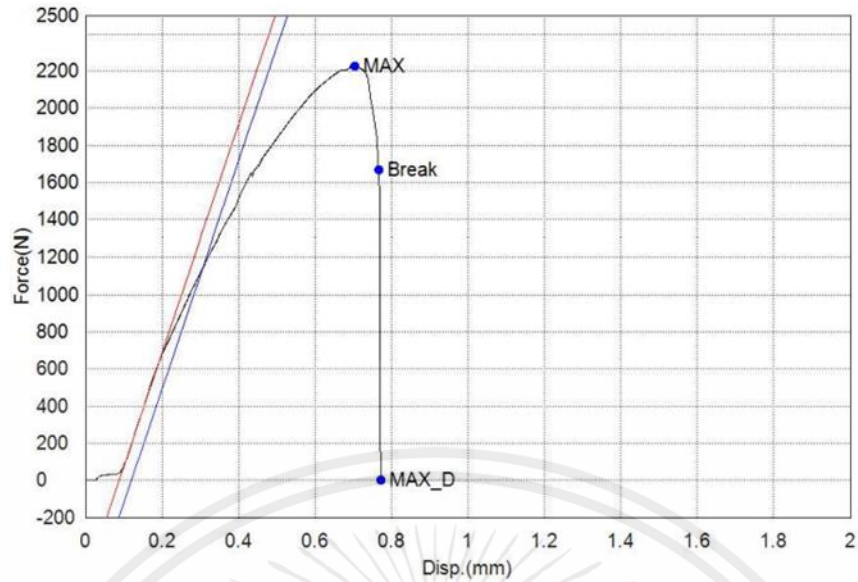
รูปที่ 8 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เสีนโซ่แรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



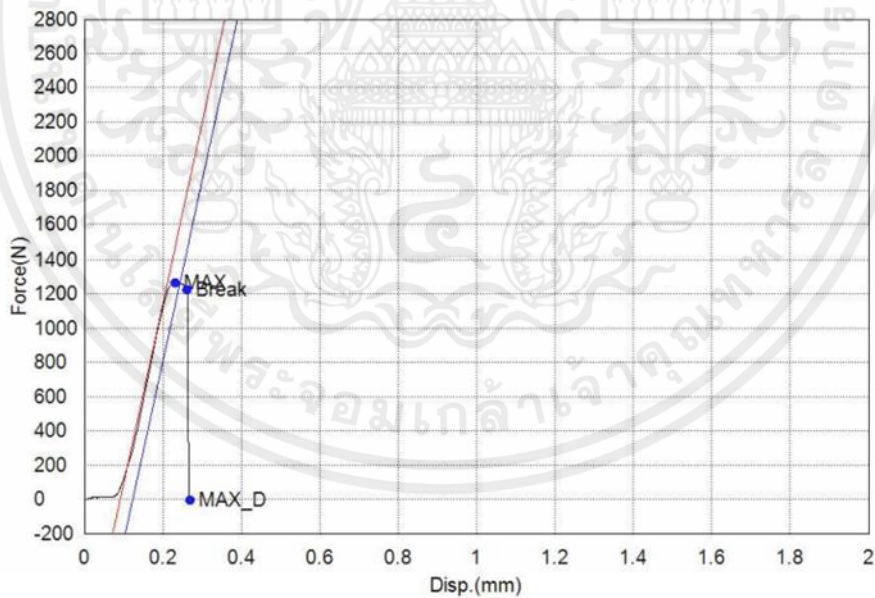
รูปที่ 9 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



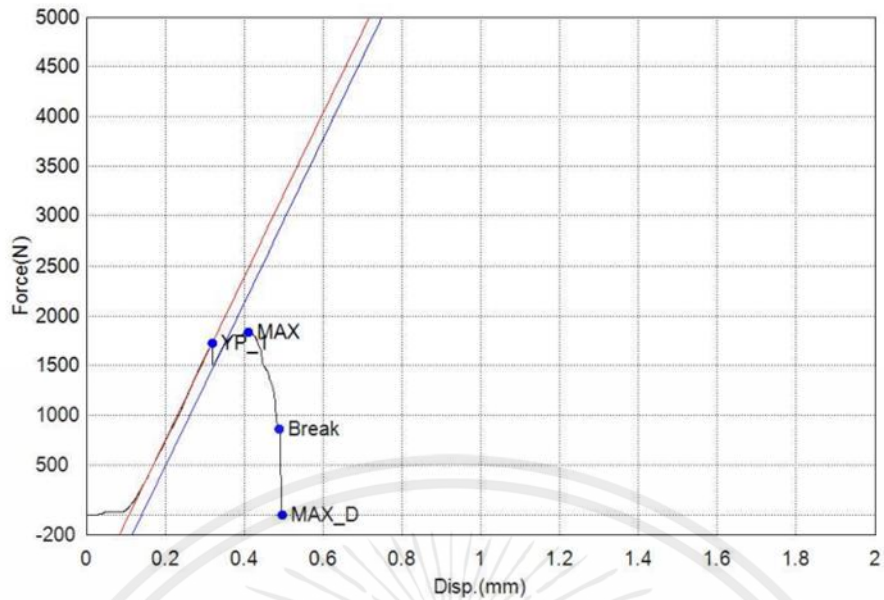
รูปที่ 10 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



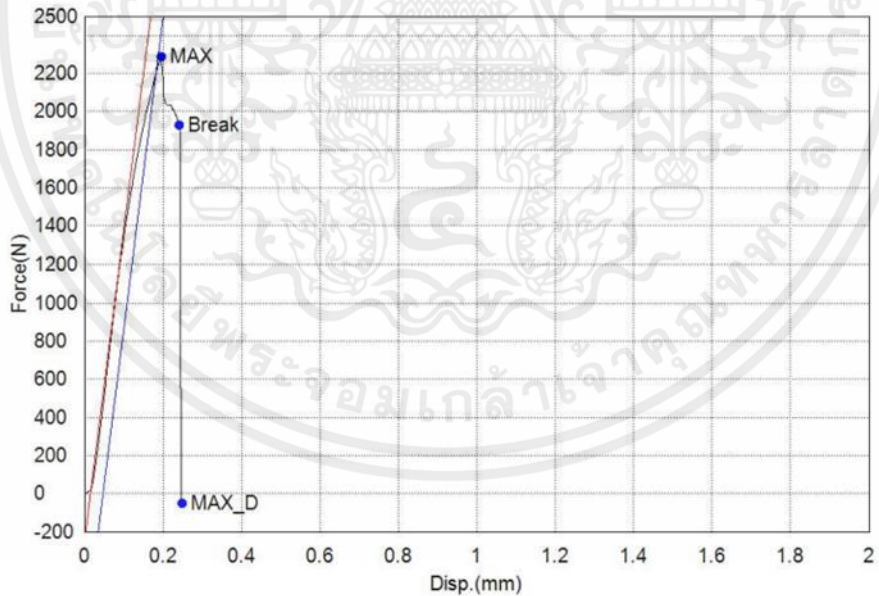
รูปที่ 11 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เองโซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



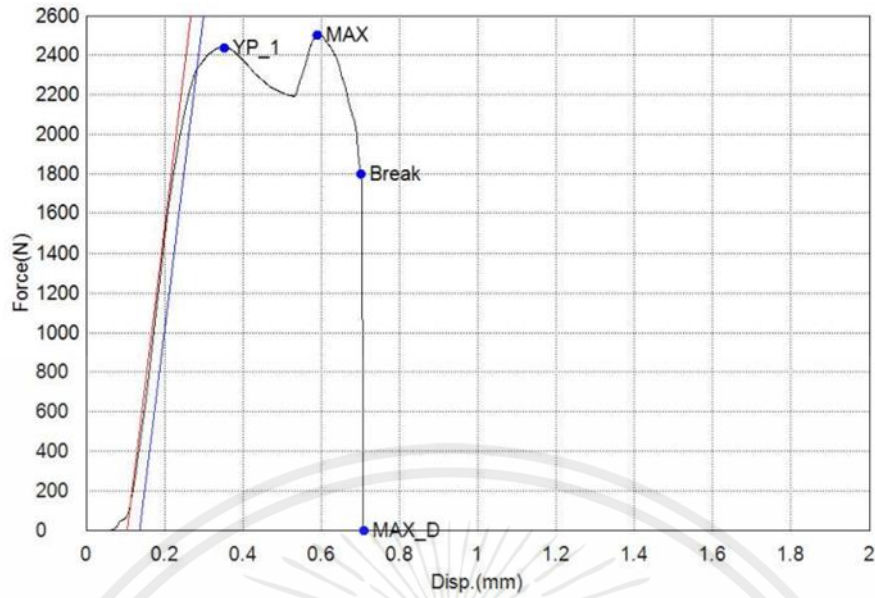
รูปที่ 12 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เองโซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



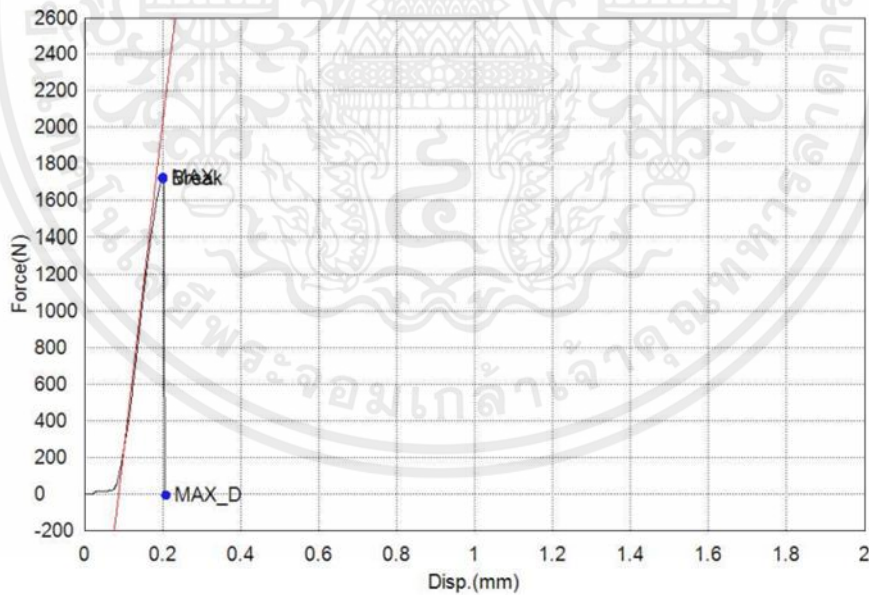
รูปที่ 13 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เ็นอนไซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



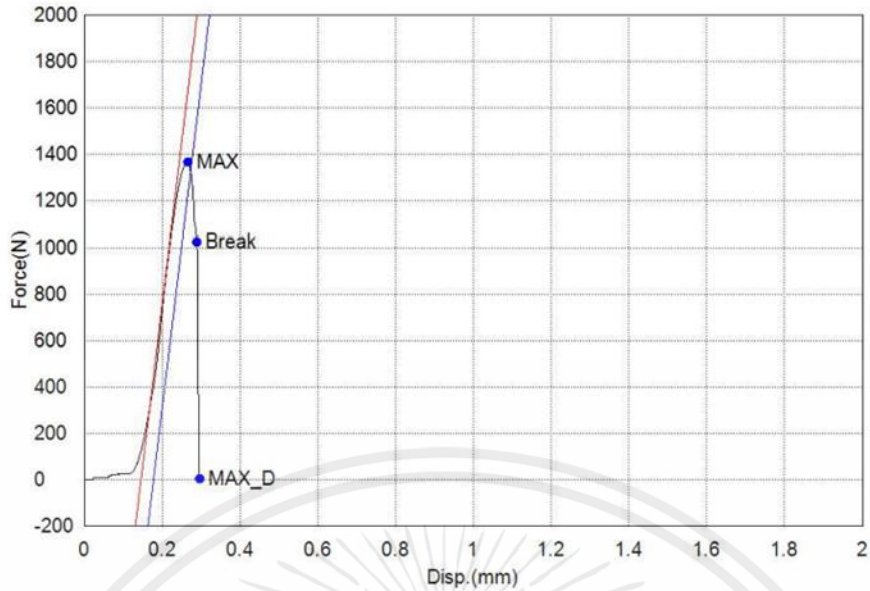
รูปที่ 14 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เ็นอนไซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



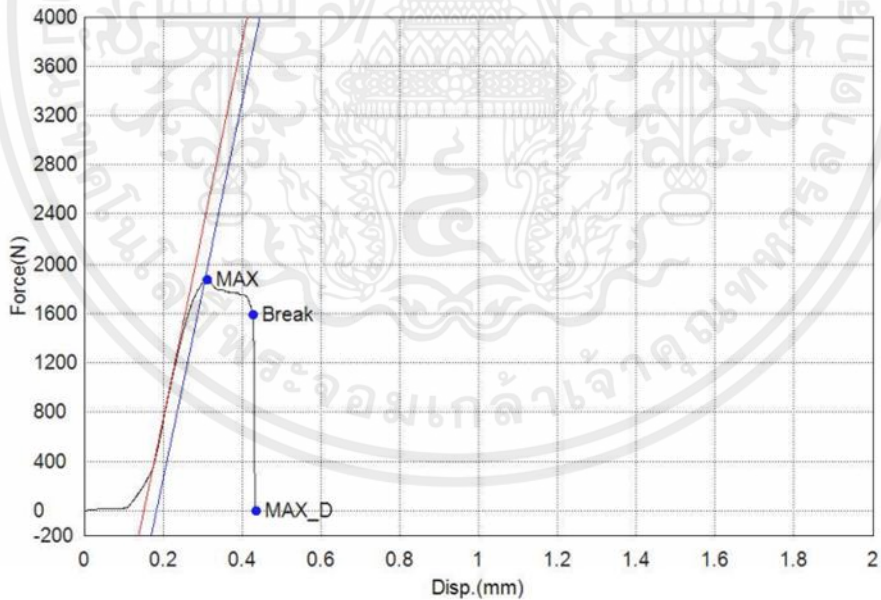
รูปที่ 15 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไซเคิล ครั้งที่ 3



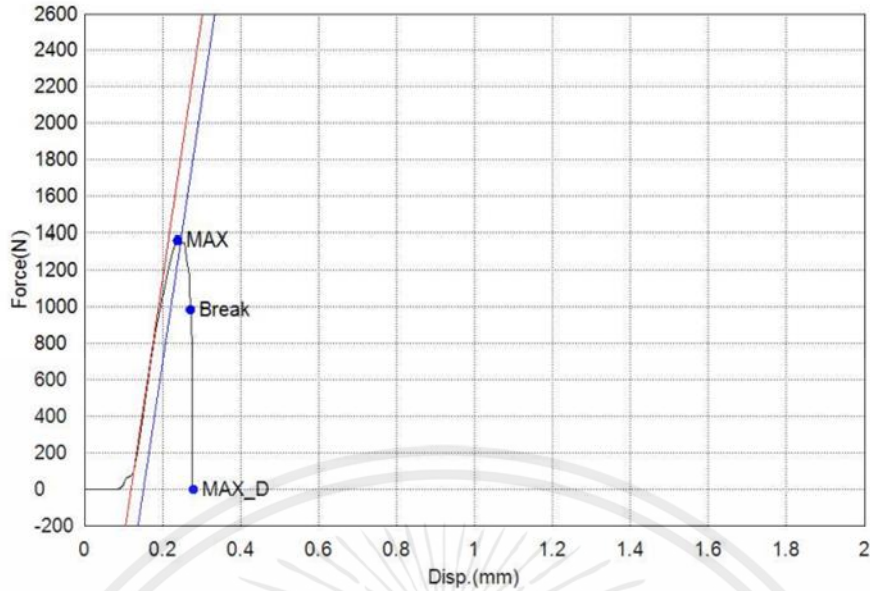
รูปที่ 16 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไซเคิล ครั้งที่ 4



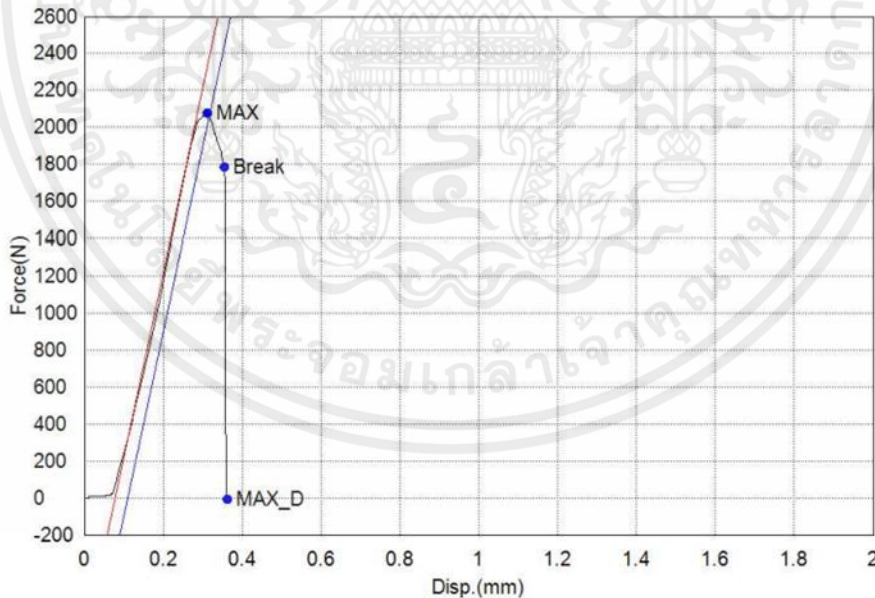
รูปที่ 17 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เร้อยโซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



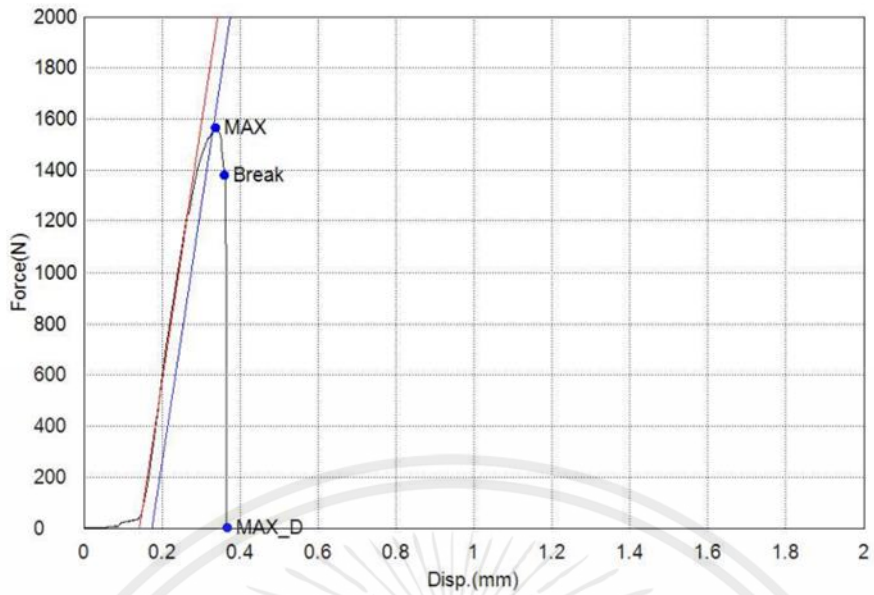
รูปที่ 18 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เร้อยโซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



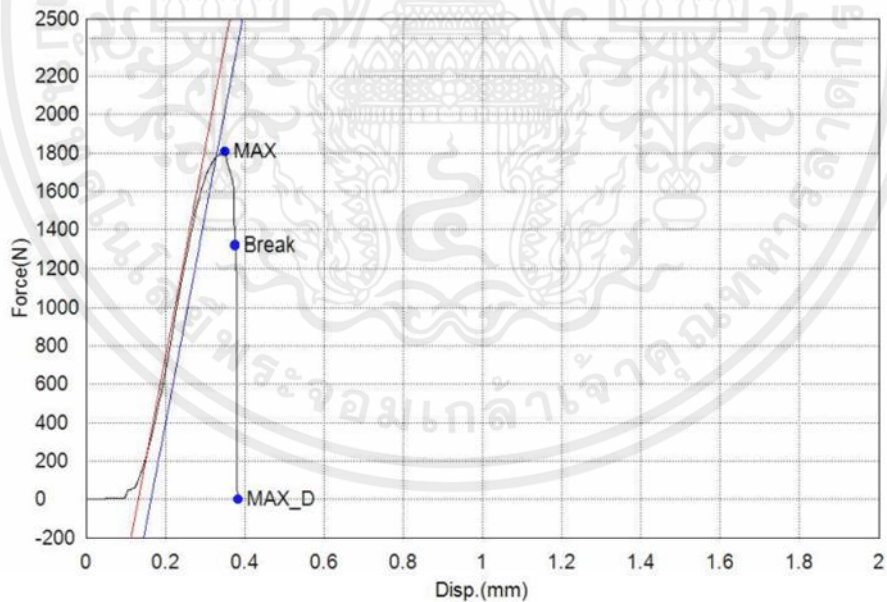
รูปที่ 19 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน แรงดัน 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



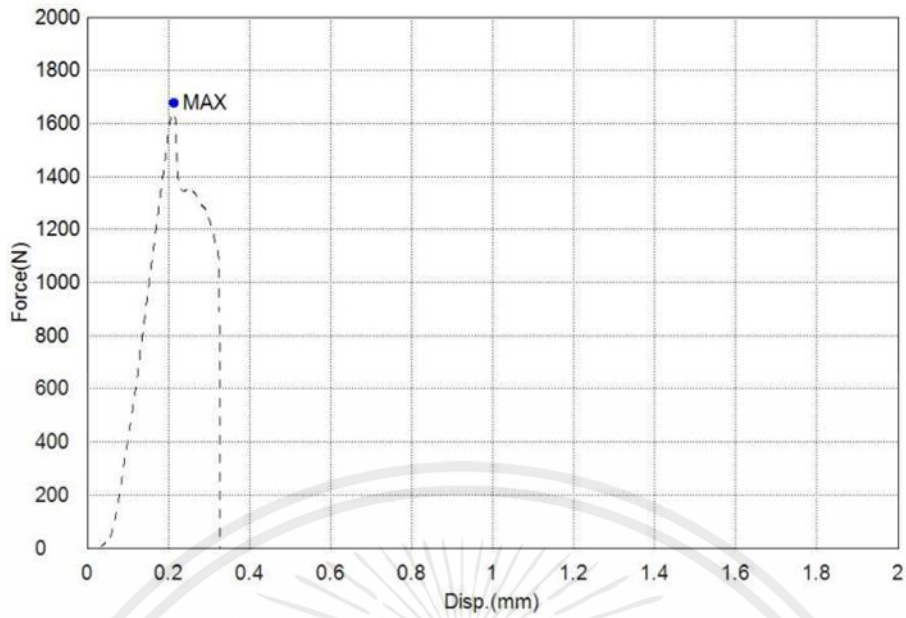
รูปที่ 20 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน แรงดัน 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



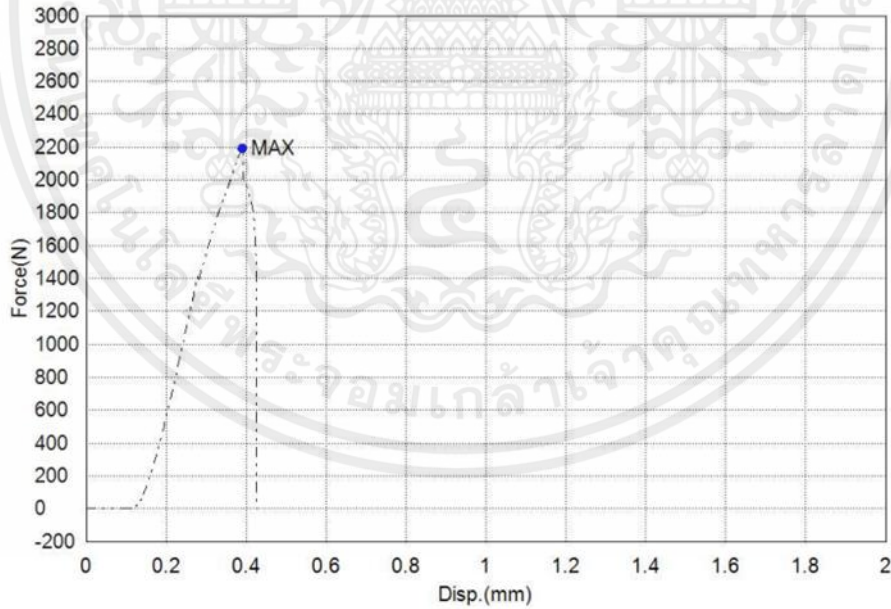
รูปที่ 21 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



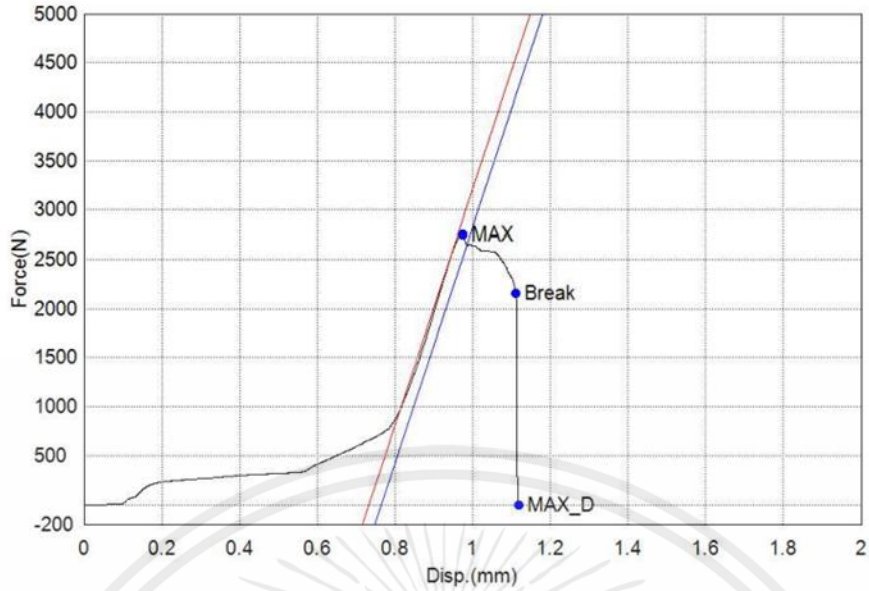
รูปที่ 22 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



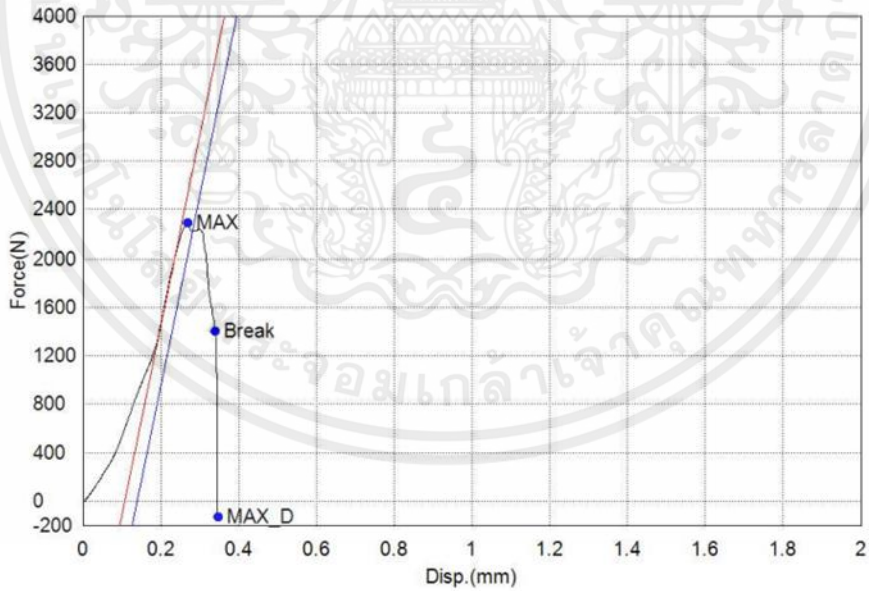
รูปที่ 23 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



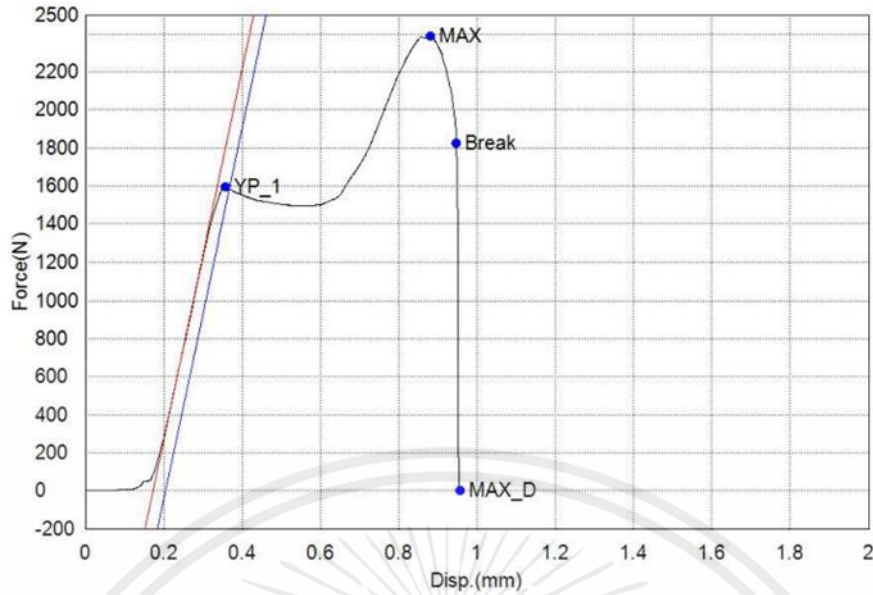
รูปที่ 24 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



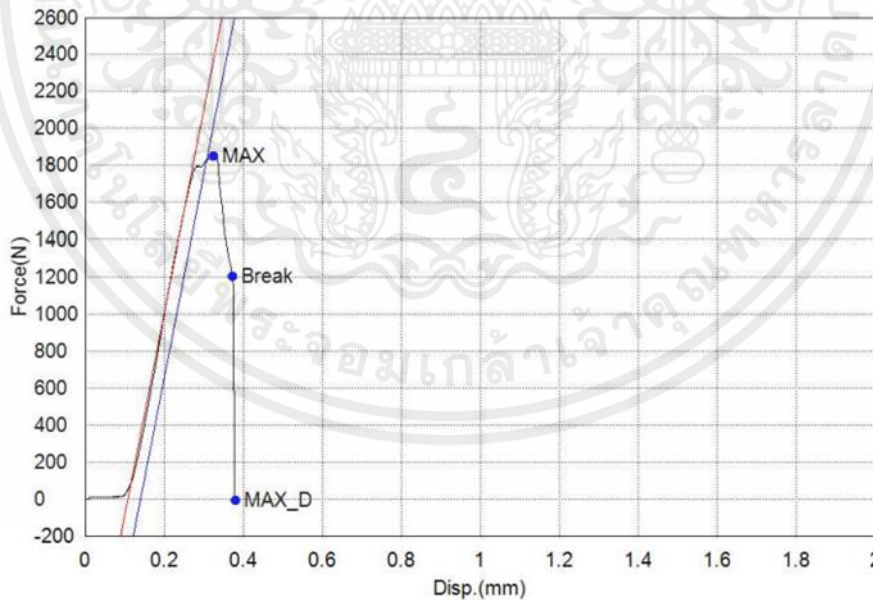
รูปที่ 25 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน แรงดัน 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



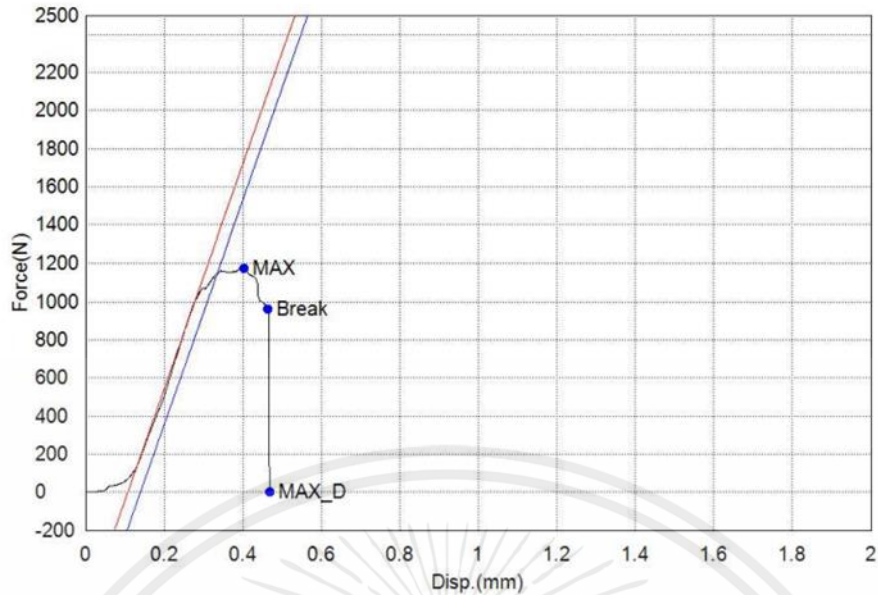
รูปที่ 26 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน แรงดัน 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



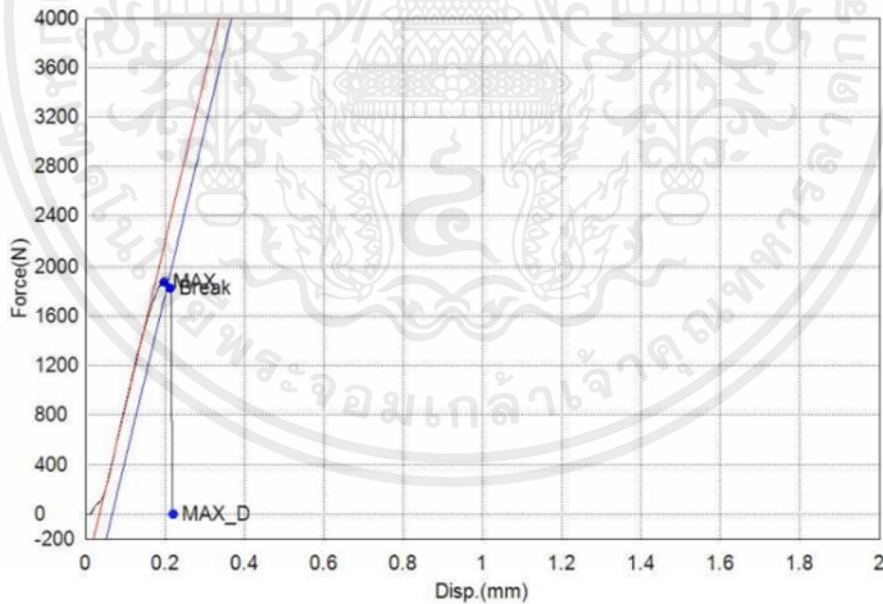
รูปที่ 27 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไซแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



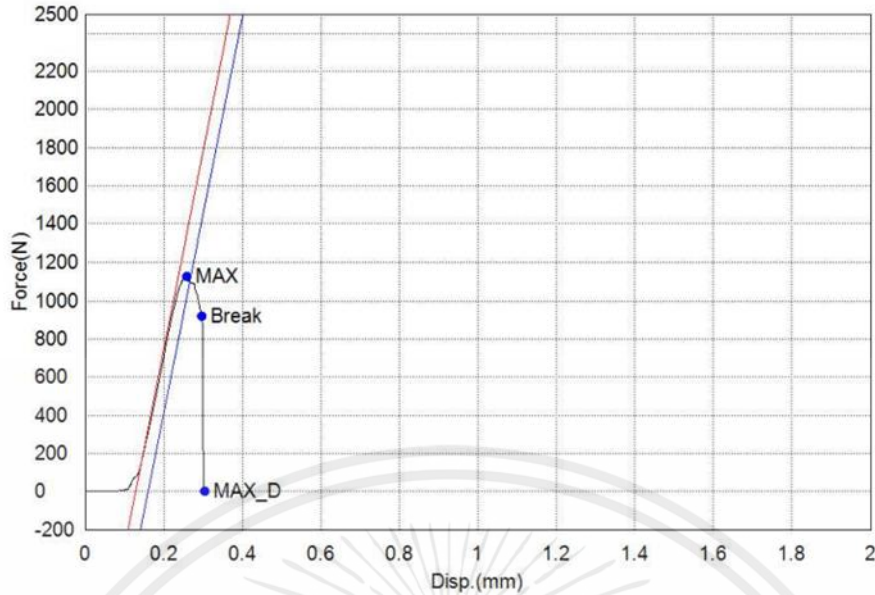
รูปที่ 28 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไซแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



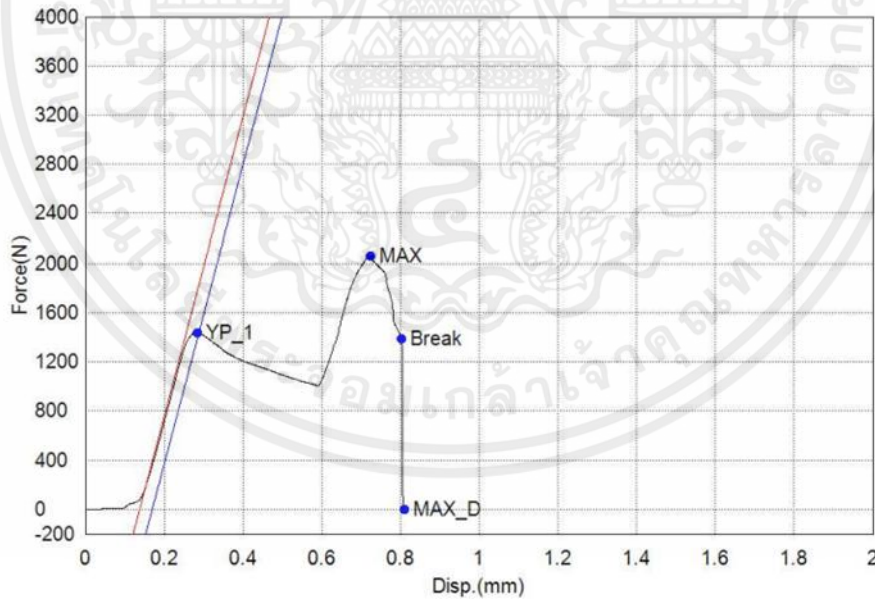
รูปที่ 29 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



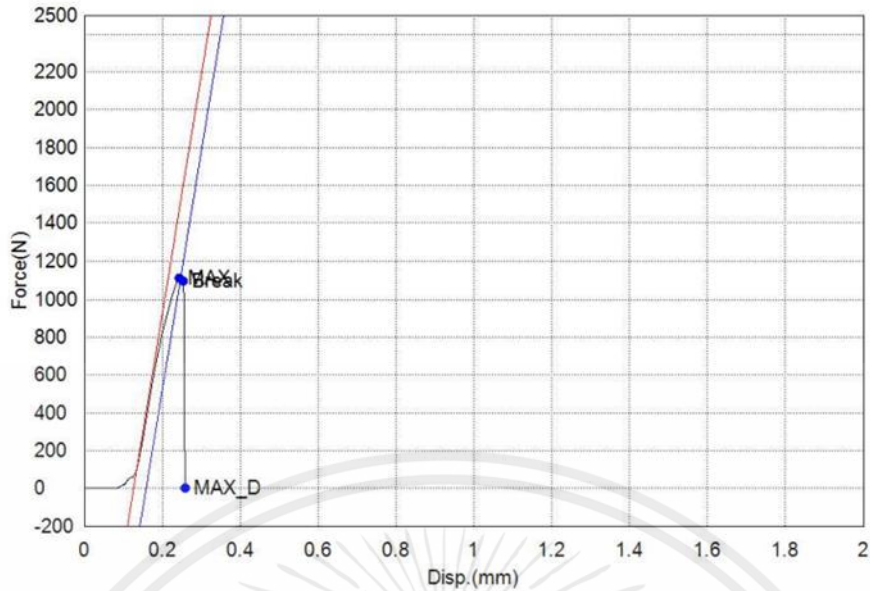
รูปที่ 30 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



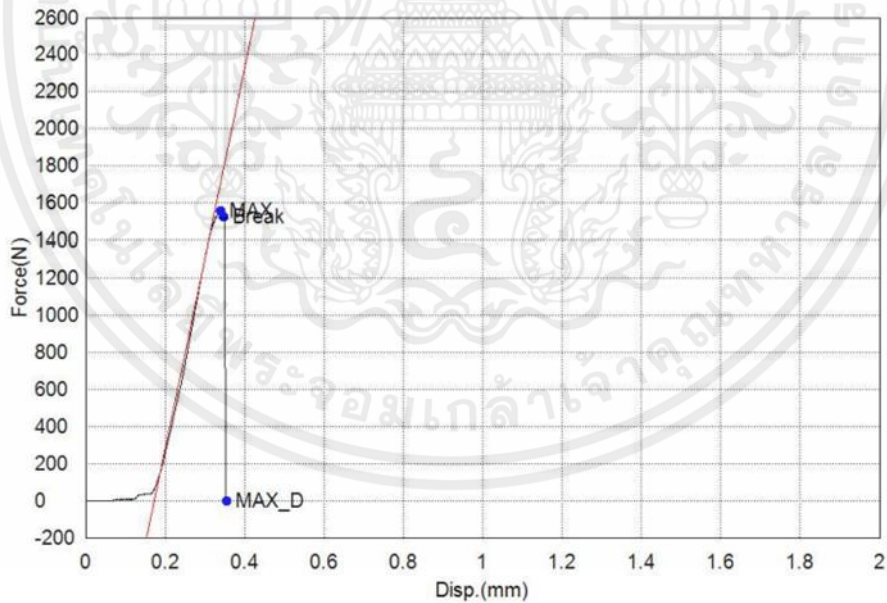
รูปที่ 31 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เลื่อนไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



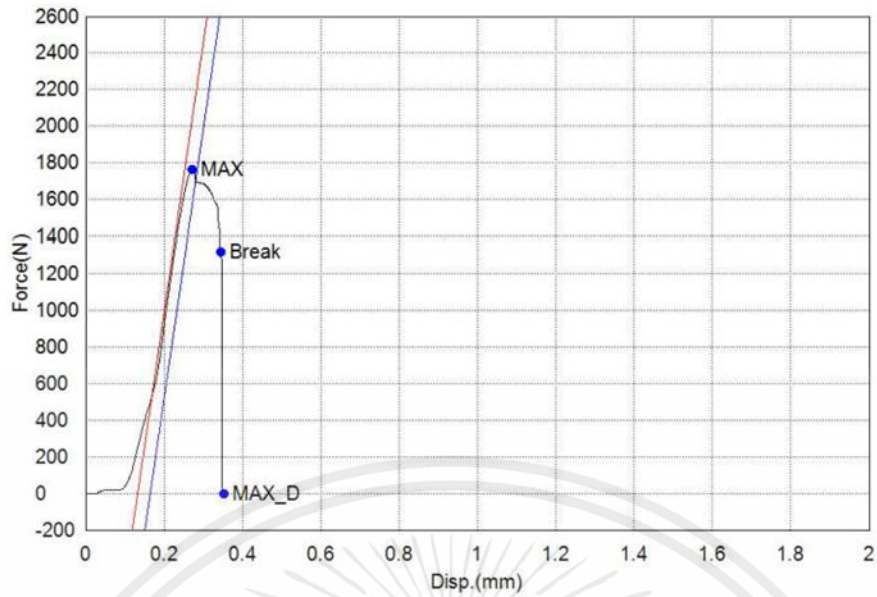
รูปที่ 32 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เลื่อนไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



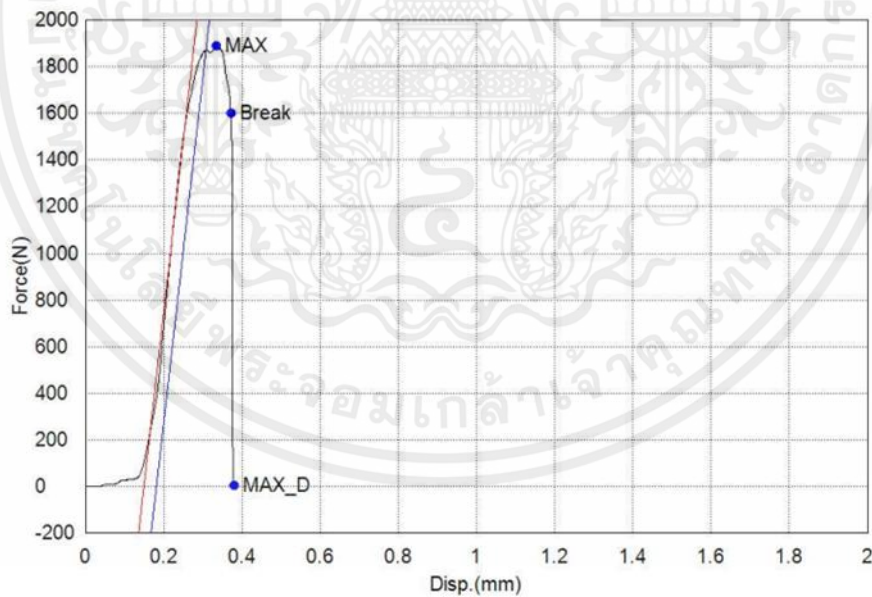
รูปที่ 33 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



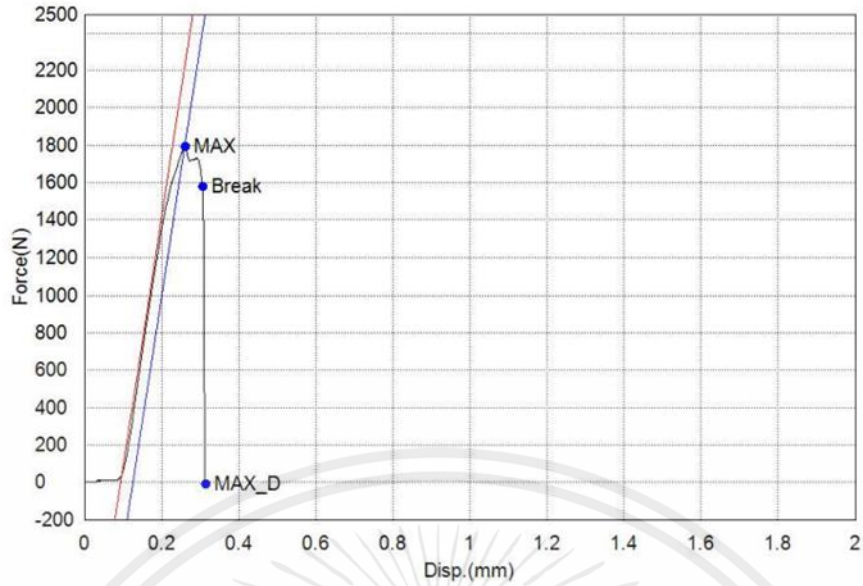
รูปที่ 34 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



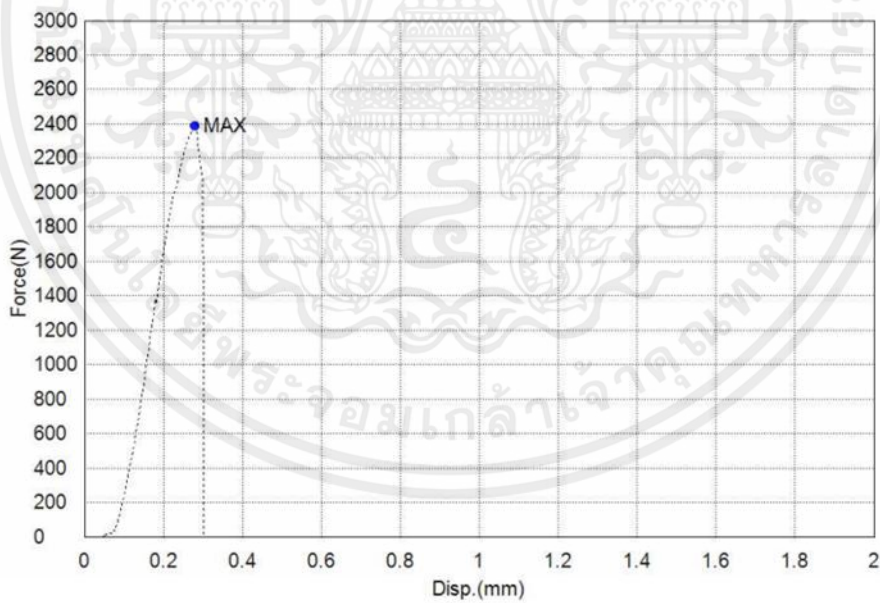
รูปที่ 35 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เงานโซแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



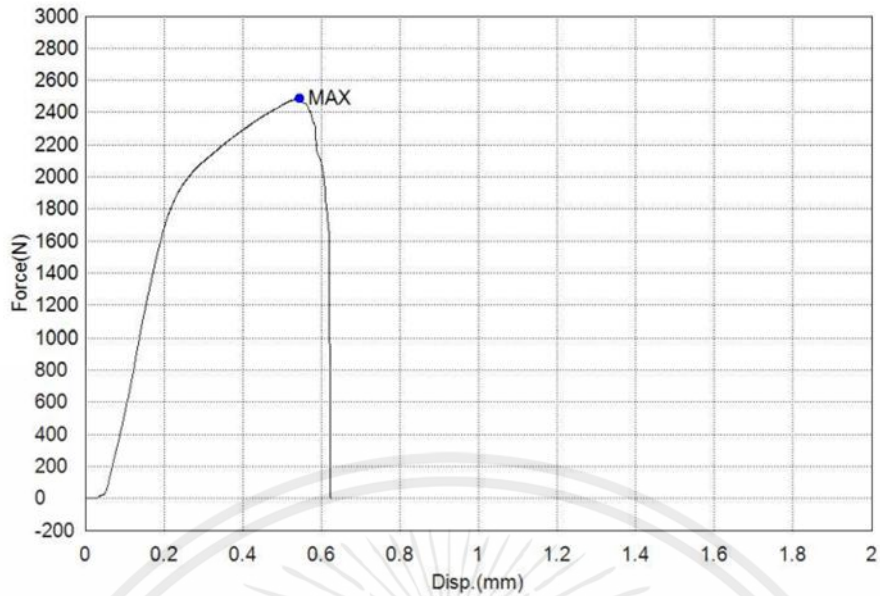
รูปที่ 36 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เงานโซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที ครั้งที่ 1



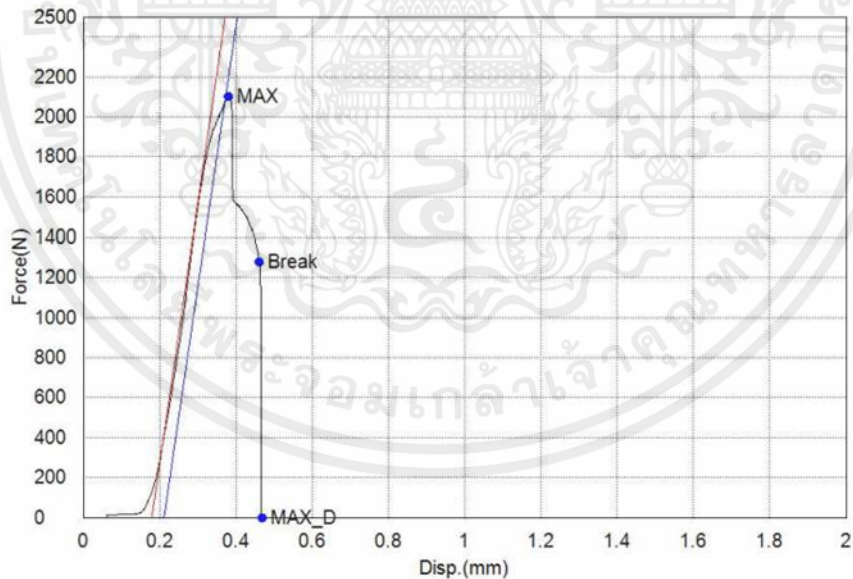
รูปที่ 37 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เ็นอนไซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไซเคิล ครั้งที่ 2



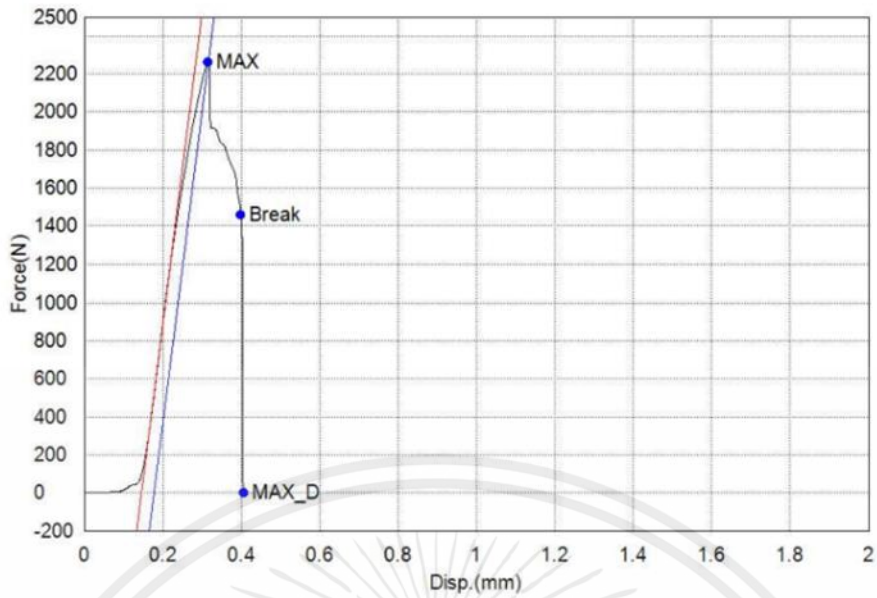
รูปที่ 38 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เ็นอนไซแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไซเคิล ครั้งที่ 3



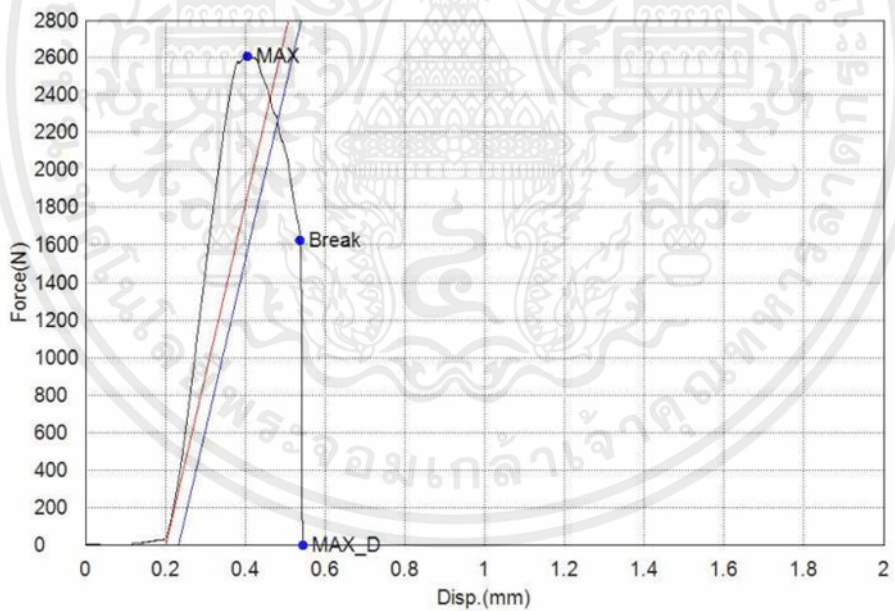
รูปที่ 39 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน แรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไซเคิล ครั้งที่ 4



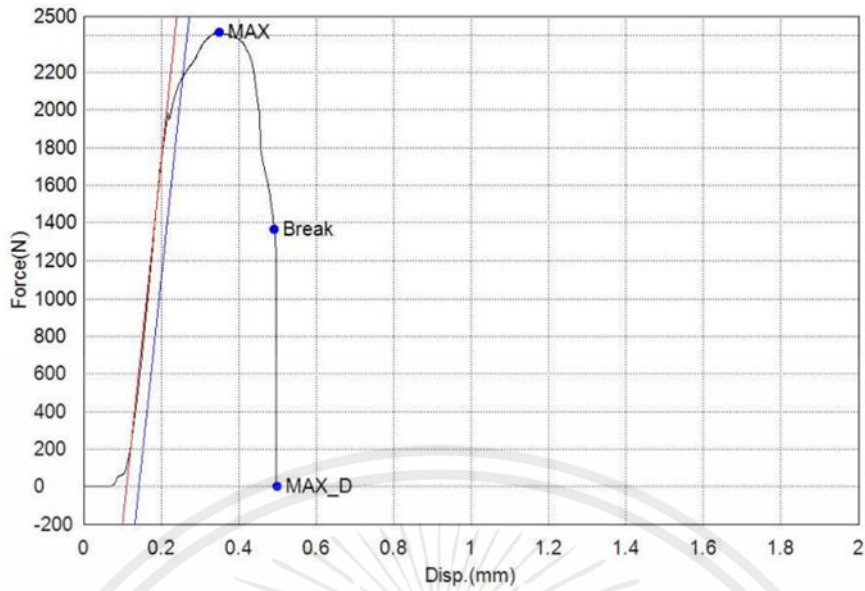
รูปที่ 40 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน แรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไซเคิล ครั้งที่ 1



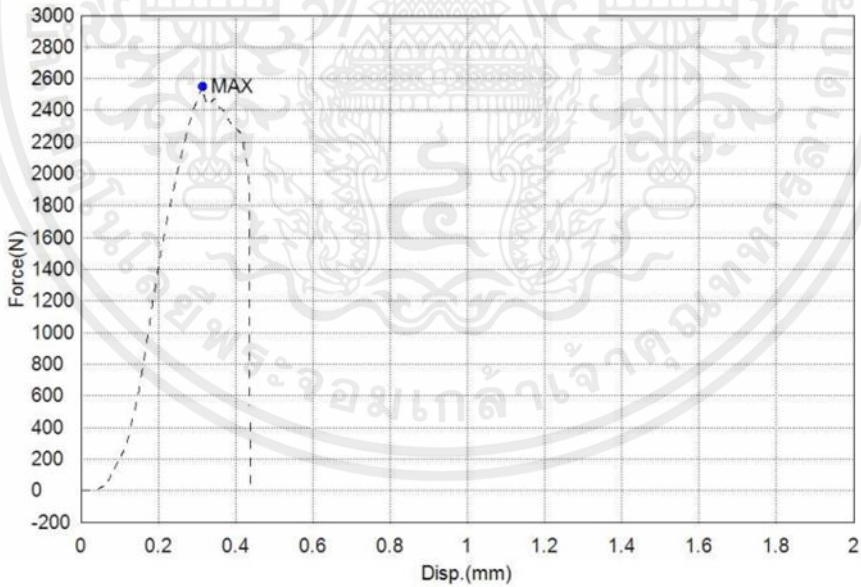
รูปที่ 41 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 2



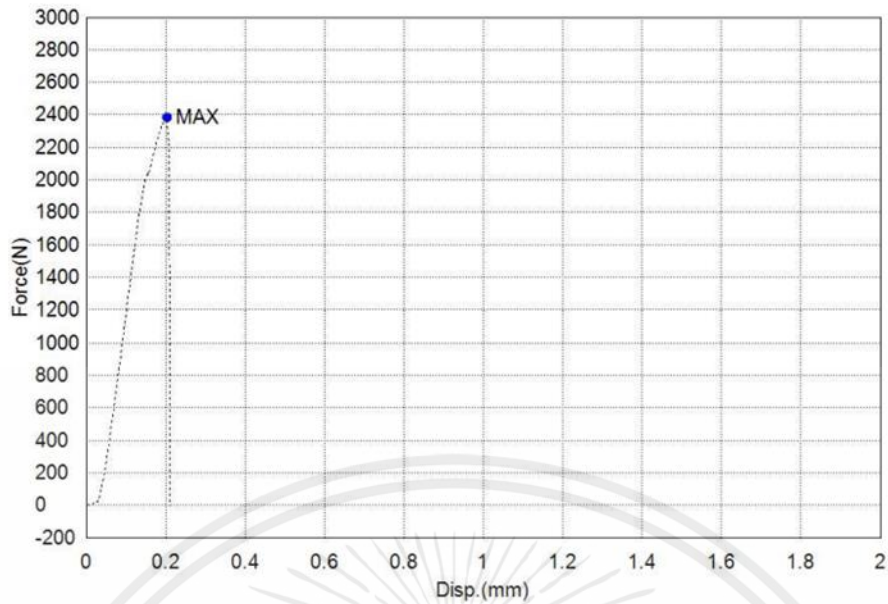
รูปที่ 42 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 3



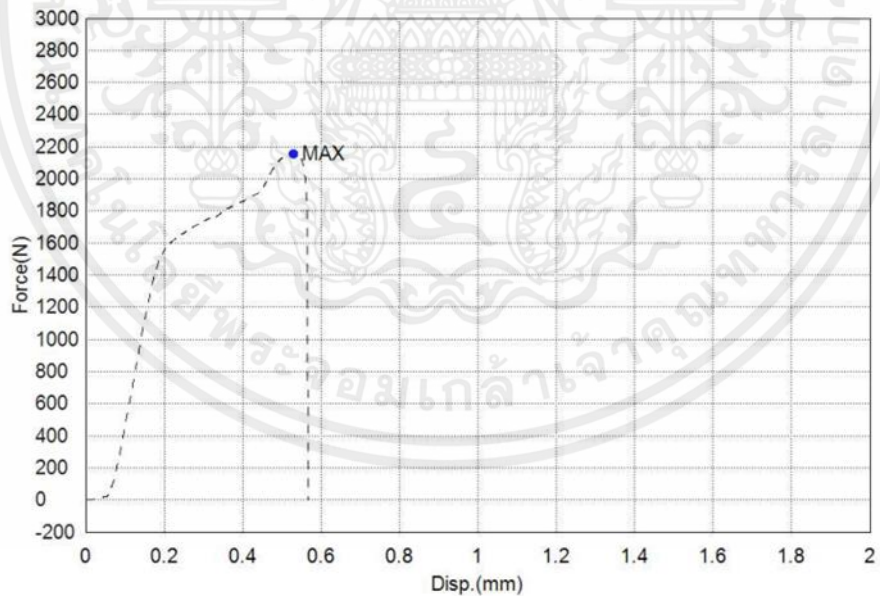
รูปที่ 43 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไมโครวินาที ครั้งที่ 4



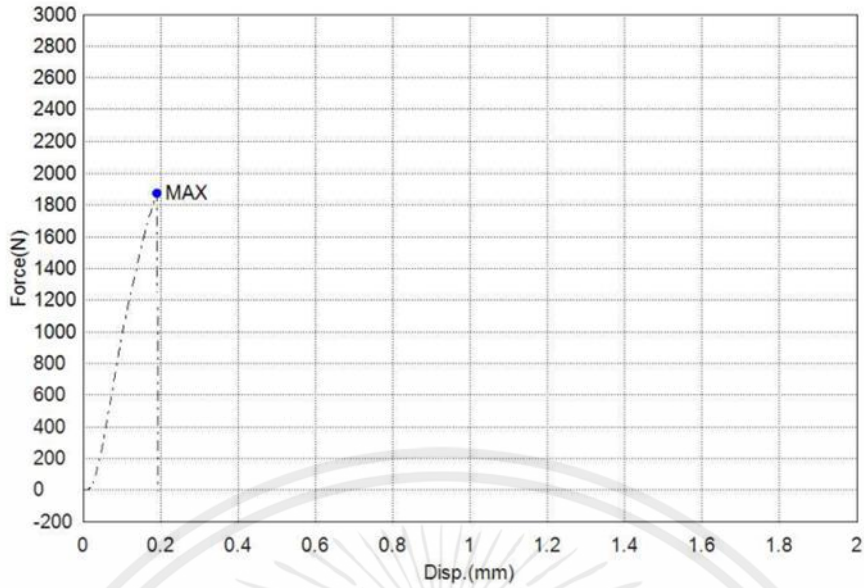
รูปที่ 44 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที



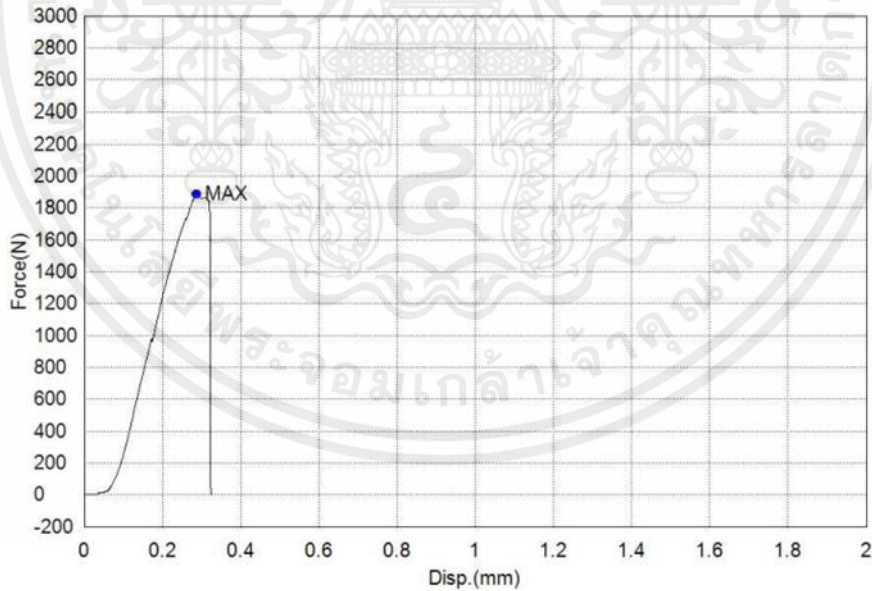
รูปที่ 45 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที



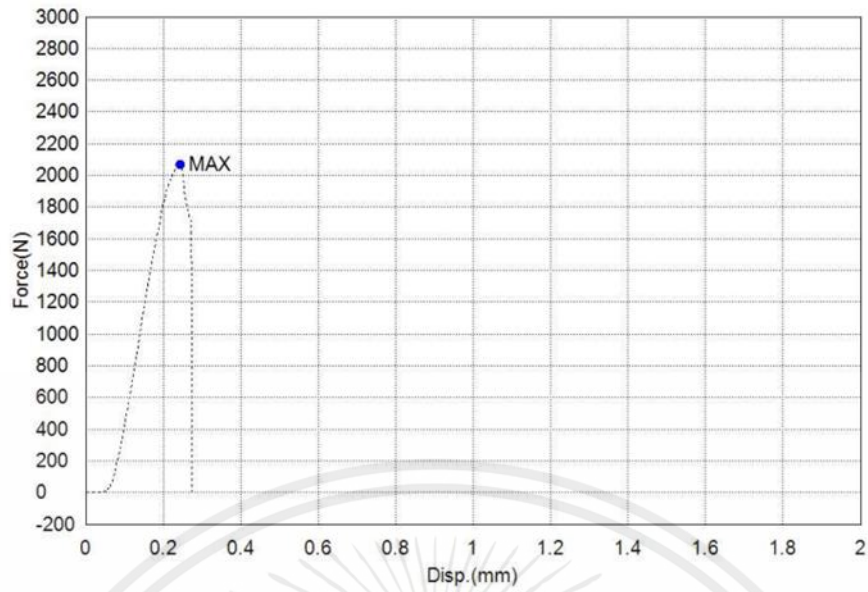
รูปที่ 46 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4200 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที



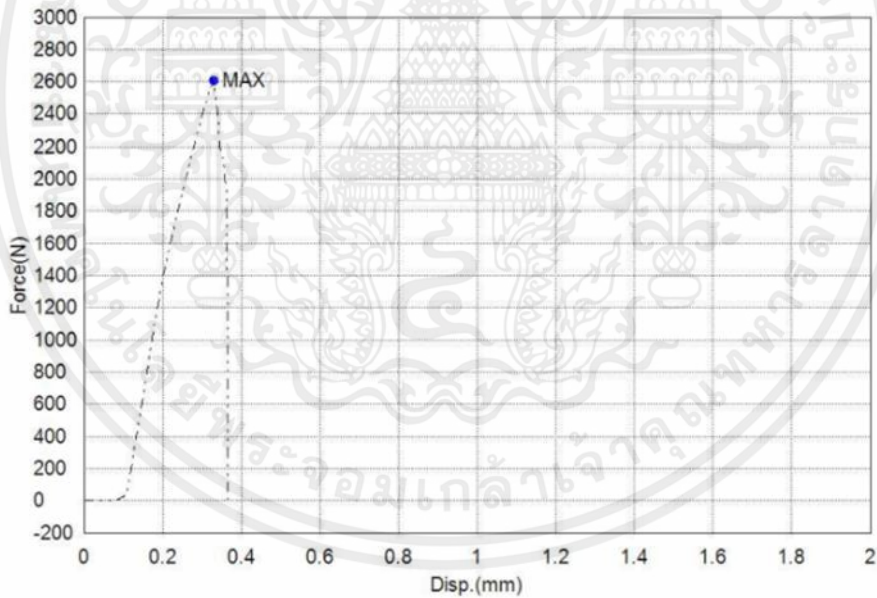
รูปที่ 47 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 ไมโครวินาที



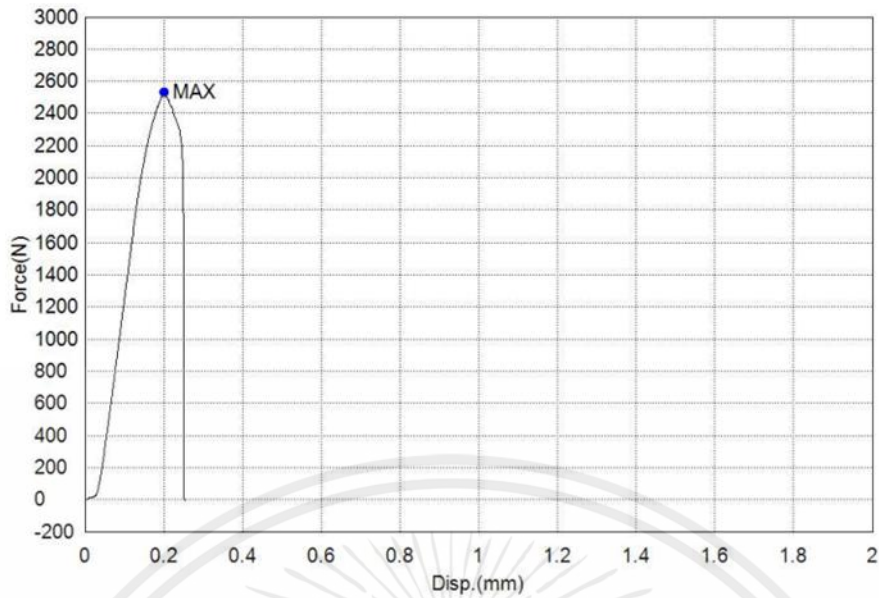
รูปที่ 48 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที



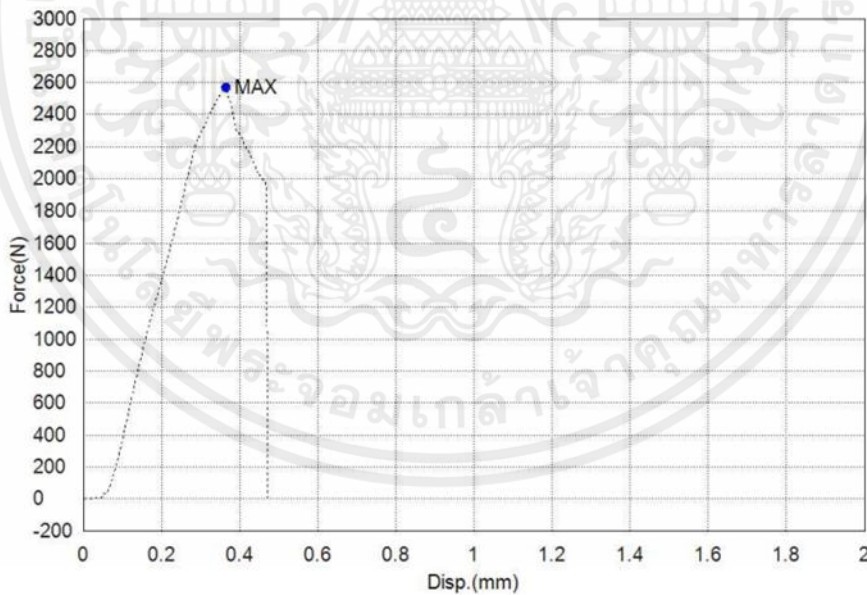
รูปที่ 49 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 3800 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที



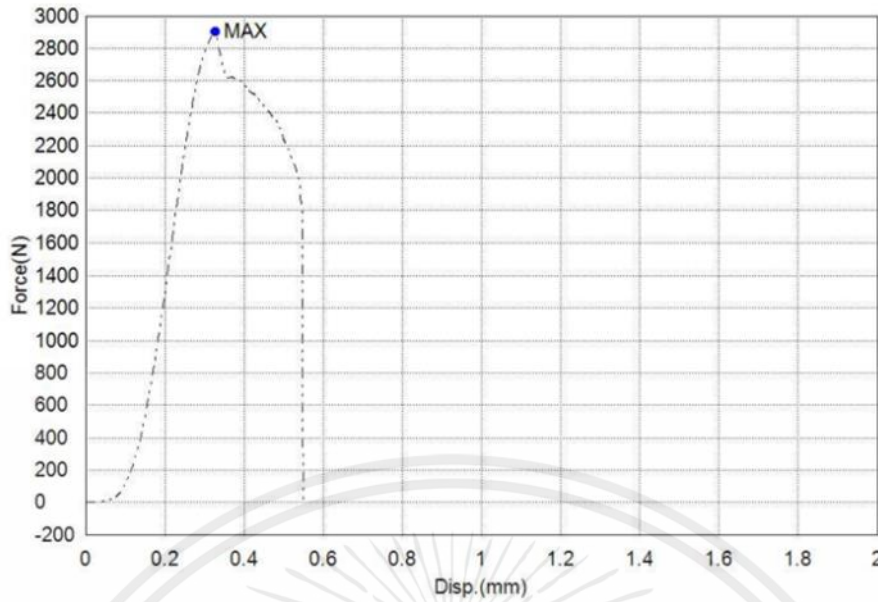
รูปที่ 50 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที



รูปที่ 51 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 2000 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไซเคิล

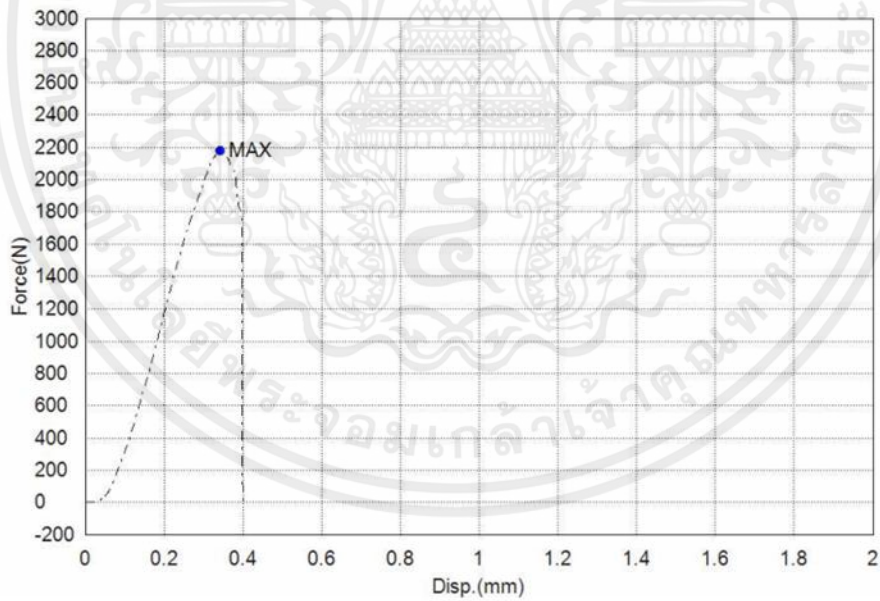


รูปที่ 52 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เกร็งไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไซเคิล

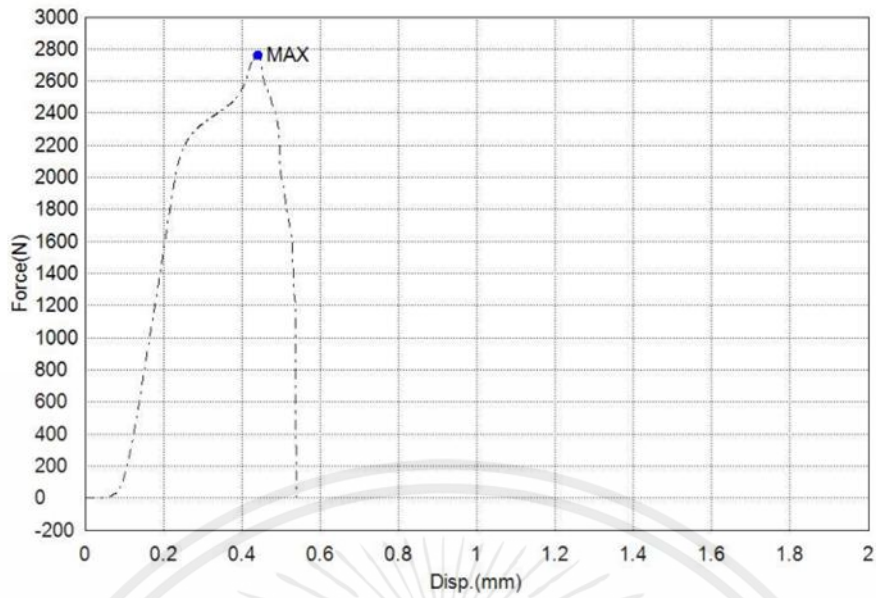


รูปที่ 53

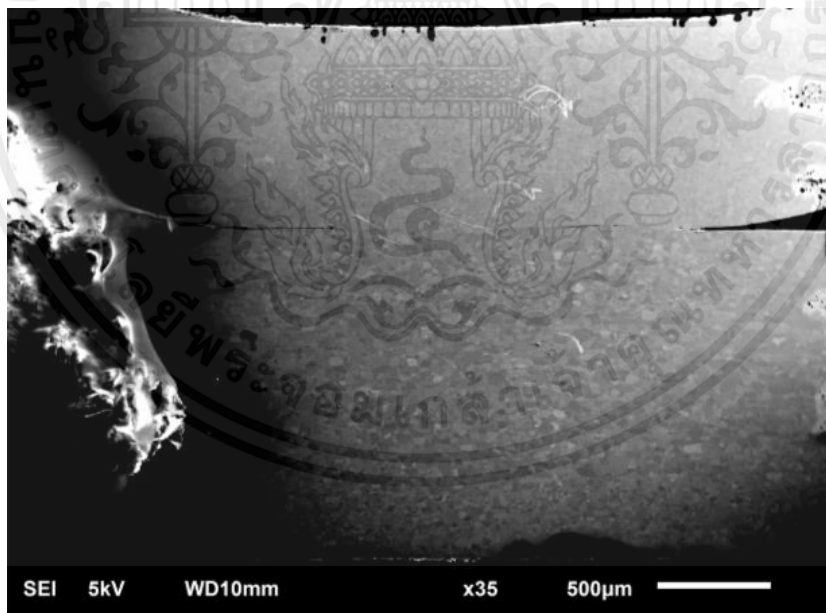
รูปที่ 53 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไซเคิล



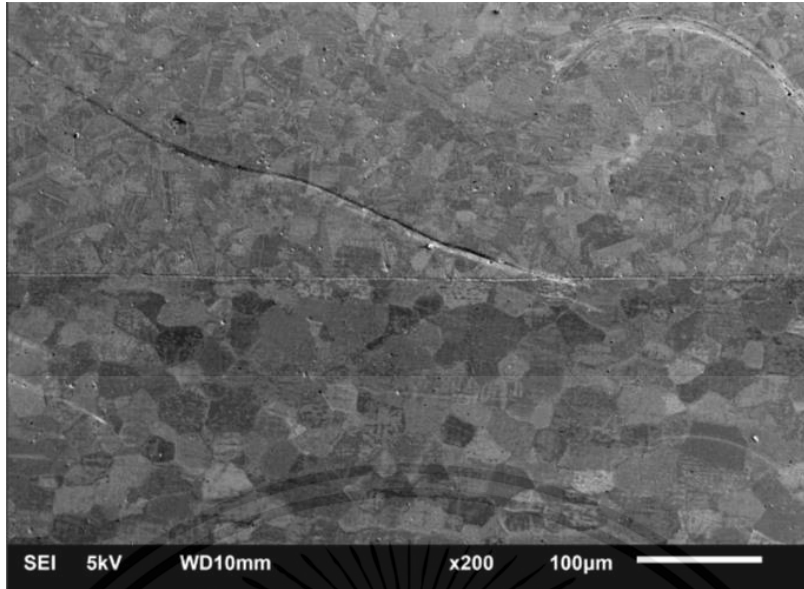
รูปที่ 54 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เจริญไขแรงกด 1800 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 12 ไซเคิล



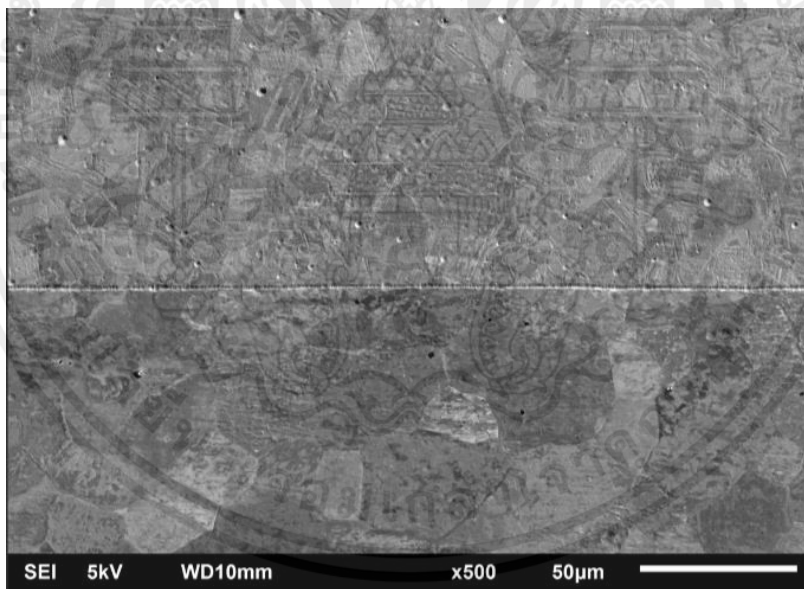
รูปที่ 55 กราฟการทดสอบแรงกดเฉือน เองโซ่แรงกด 1600 นิวตัน กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 ไมโครวินาที



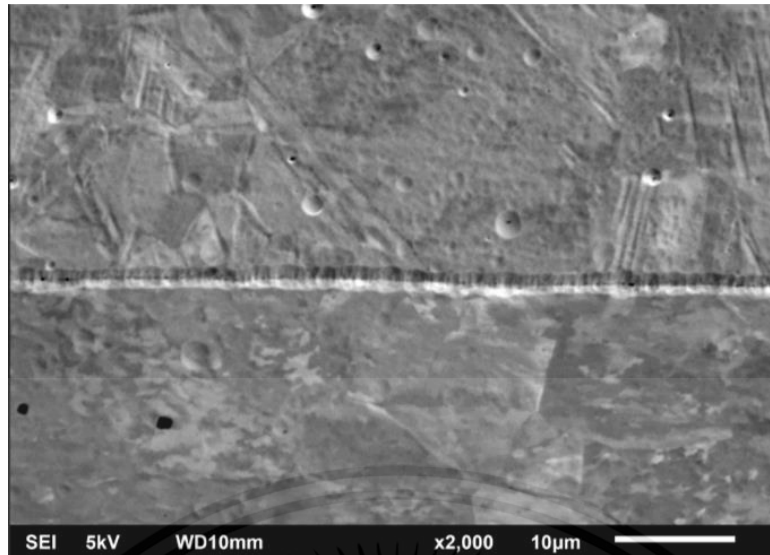
รูปที่ 56 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดที่กำลังขยาย 50 เท่า



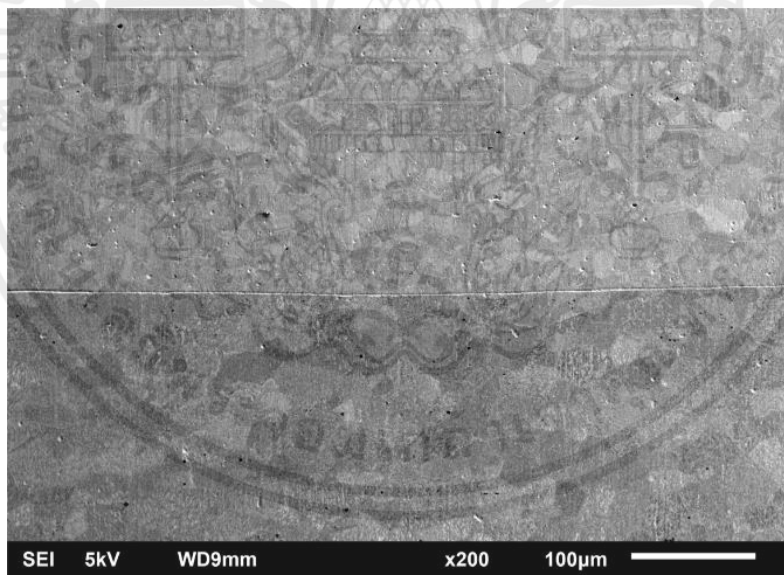
รูปที่ 57 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนสูงสุดที่กำลังขยาย 200 เท่า



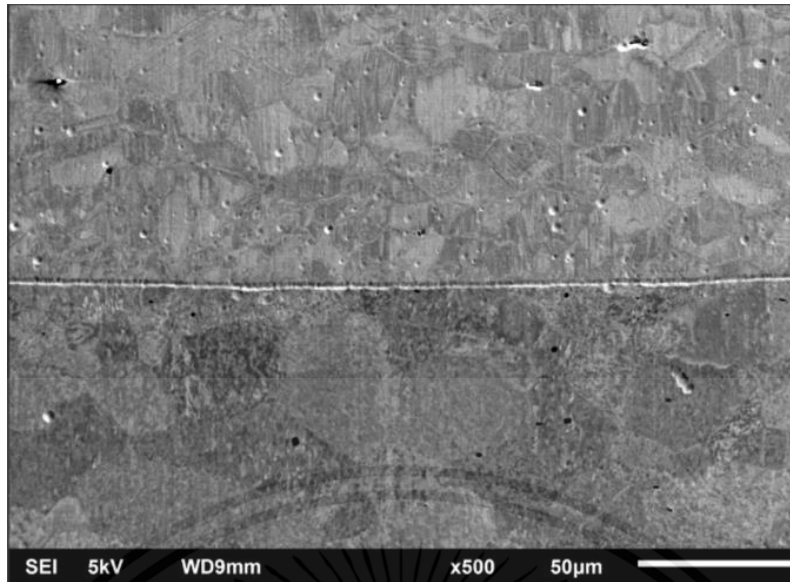
รูปที่ 58 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนสูงสุดที่กำลังขยาย 500 เท่า



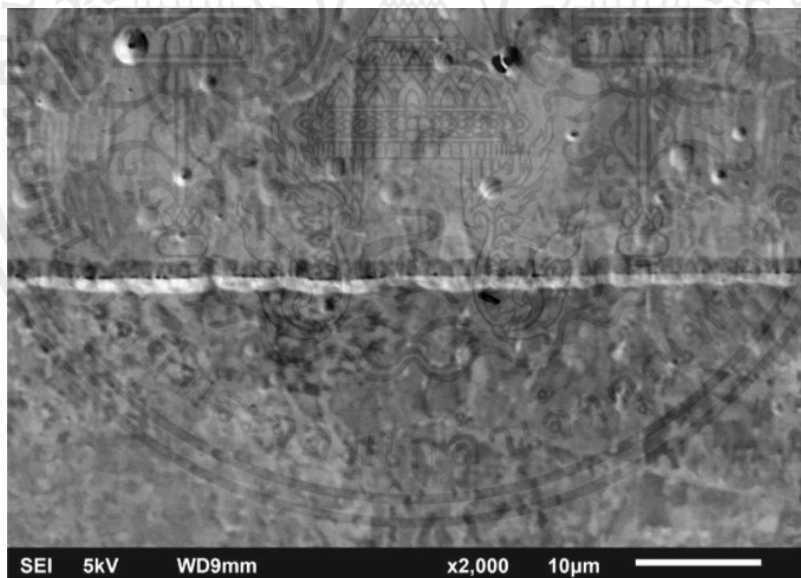
รูปที่ 59 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงสุดที่กำลังขยาย 2000 เท่า



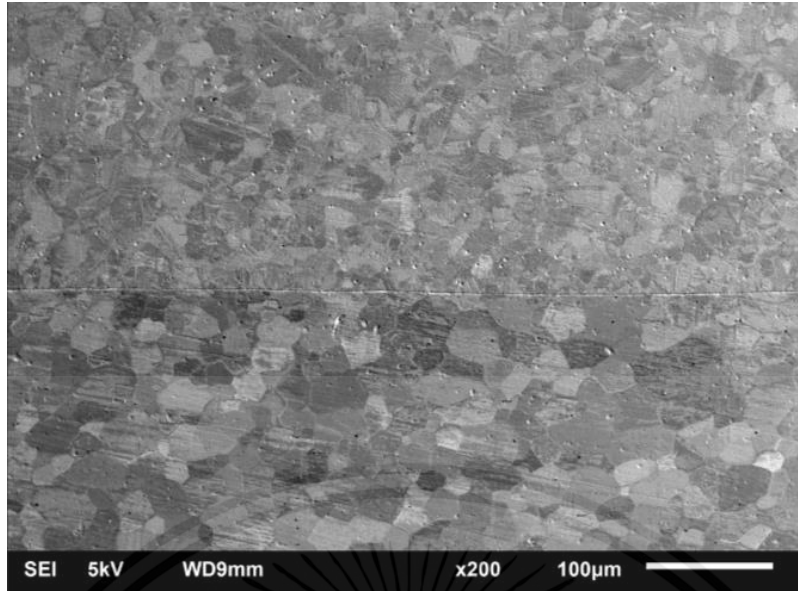
รูปที่ 60 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 200 เท่า



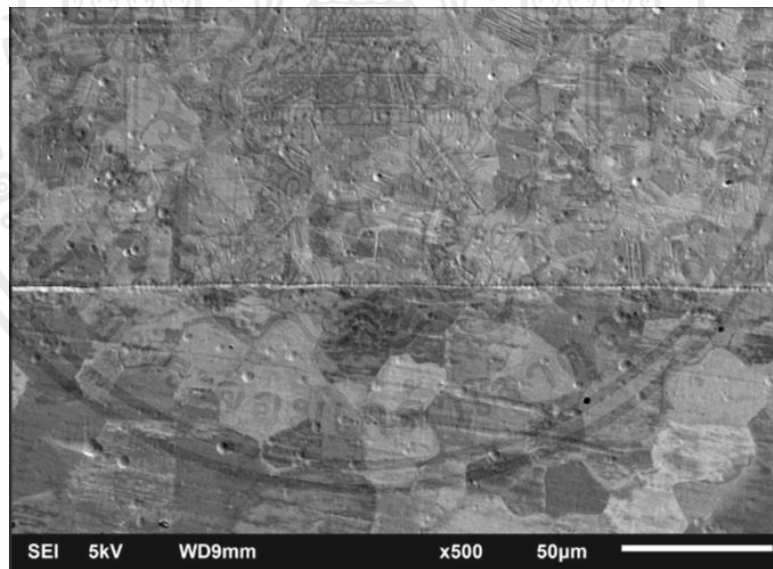
รูปที่ 61 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 500 เท่า



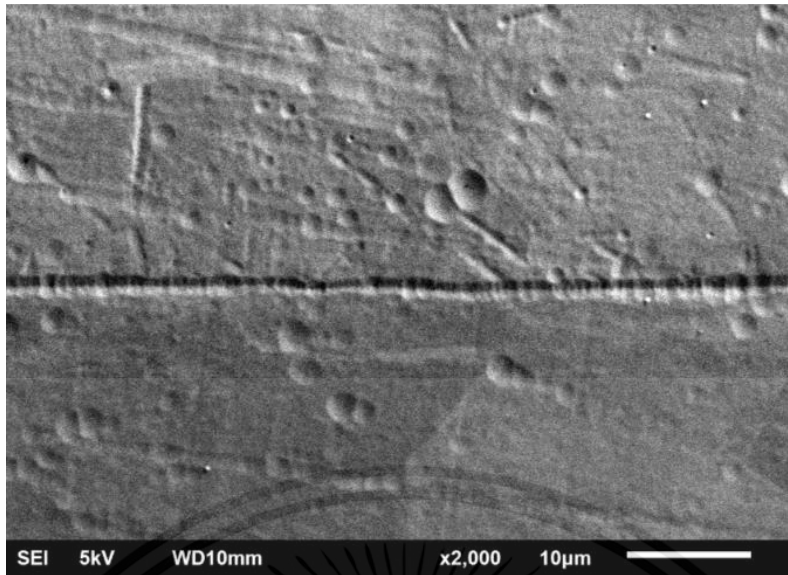
รูปที่ 62 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 2000 เท่า



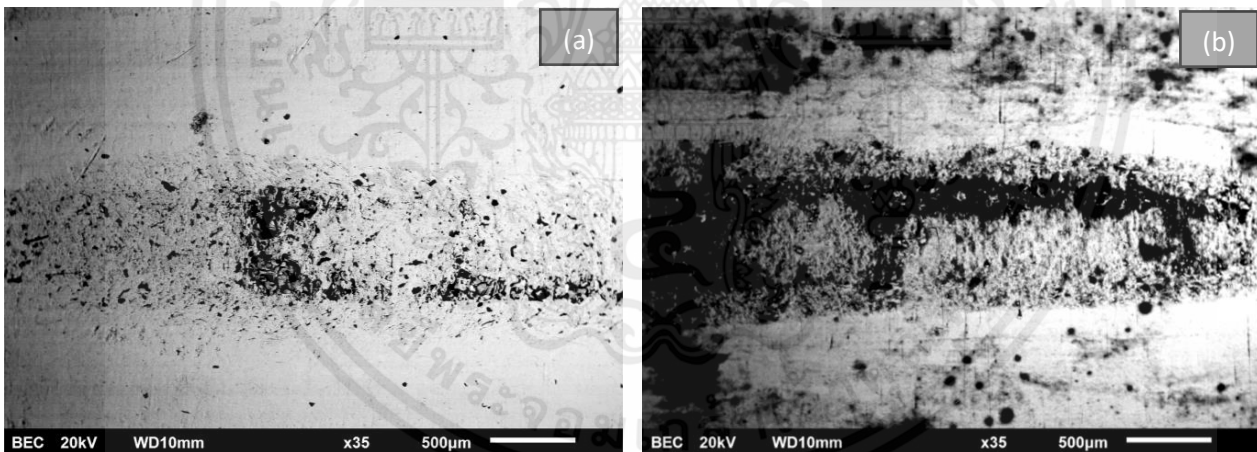
รูปที่ 63 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 200 เท่า



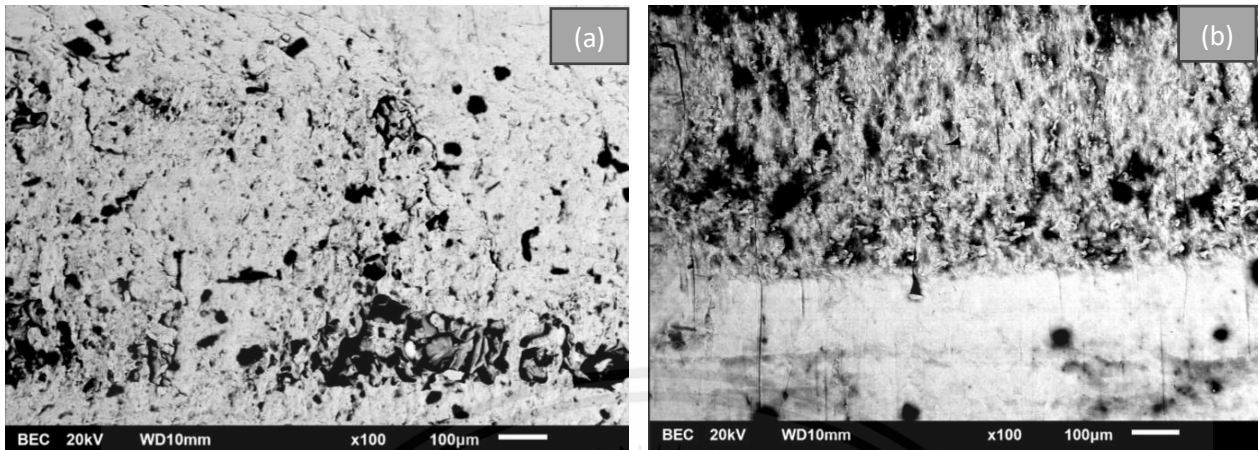
รูปที่ 64 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 500 เท่า



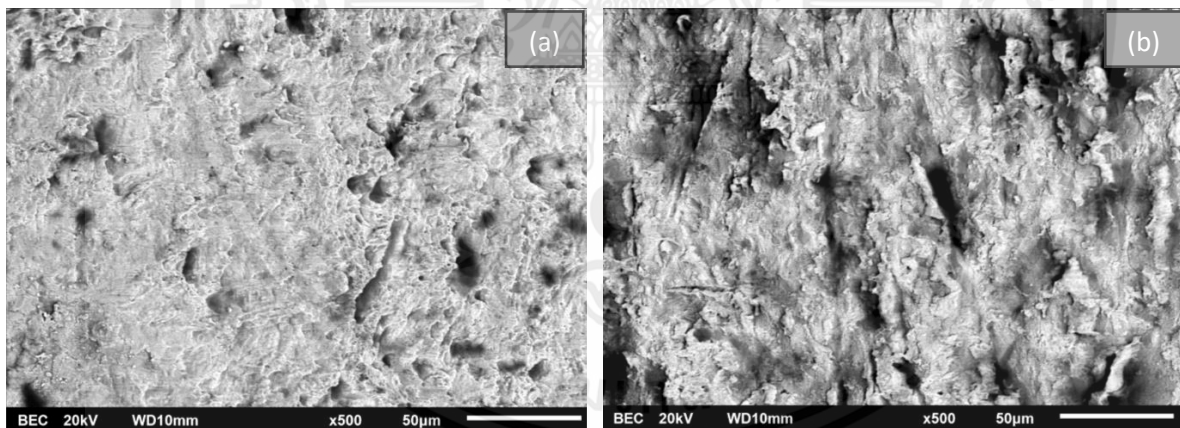
รูปที่ 65 โครงสร้างจุลภาคระหว่างรอยเชื่อมของท่อและแผ่นเหล็กจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันงานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 2000 เท่า



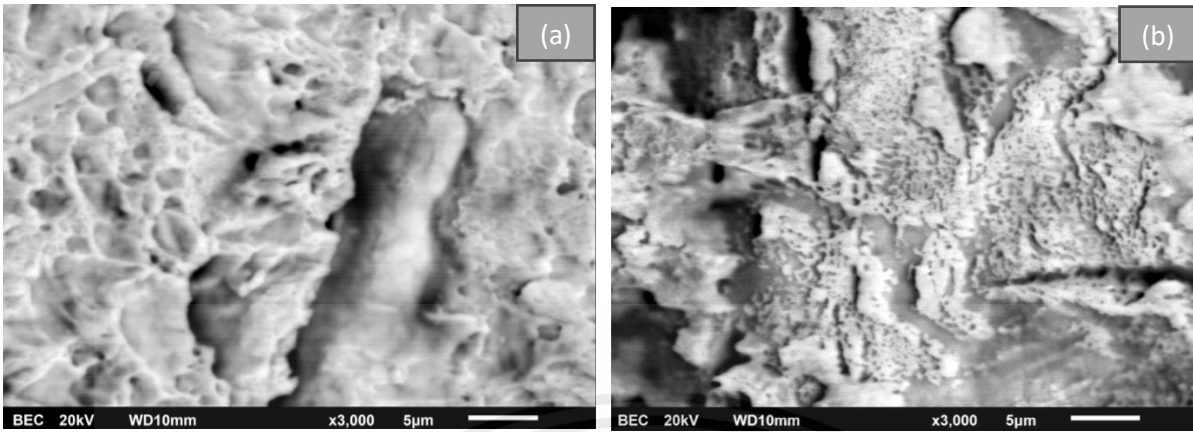
รูปที่ 66 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันงานแรงกดเฉือนสูงที่สุดที่กำลังขยาย 35 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



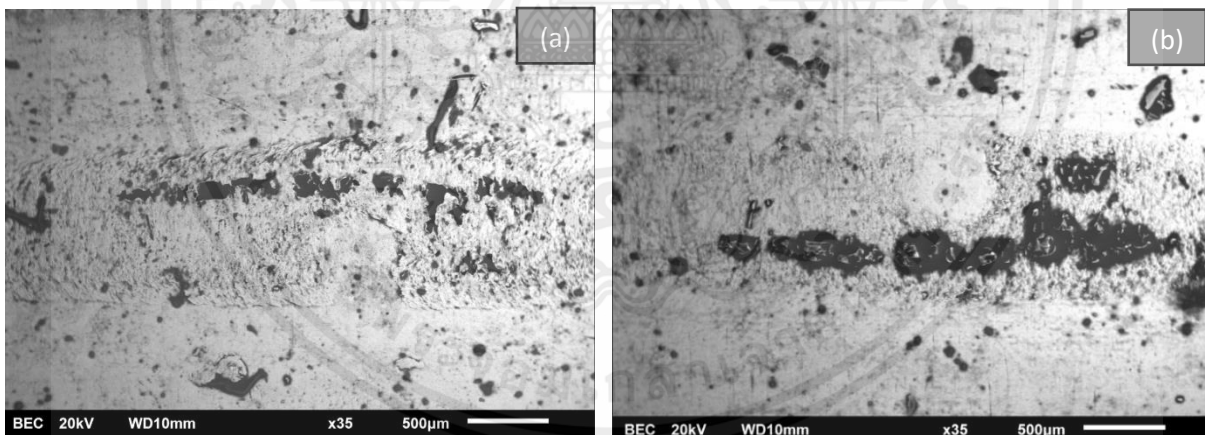
รูปที่ 67 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงที่สุดที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



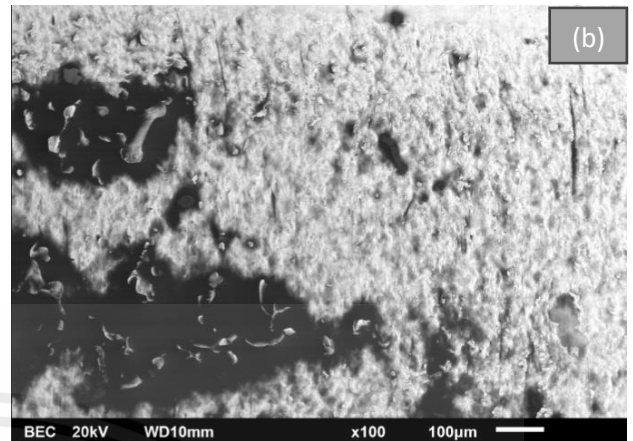
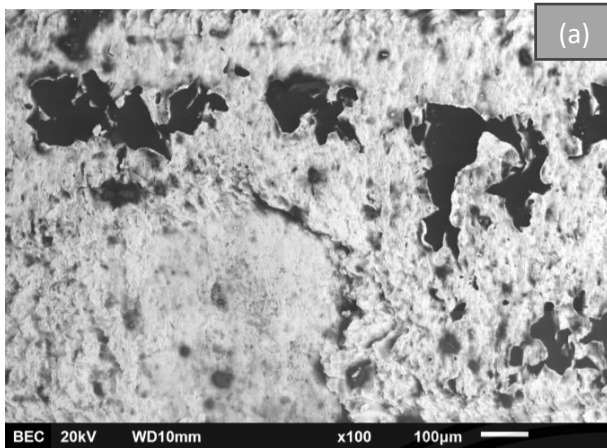
รูปที่ 68 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงที่สุดที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



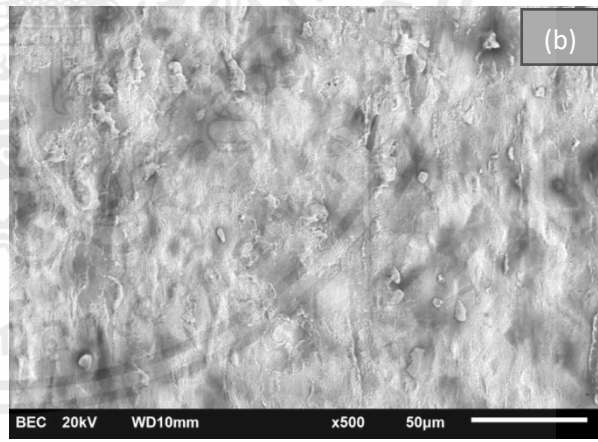
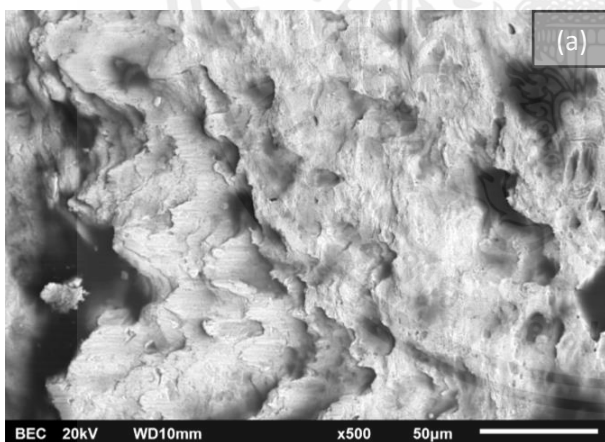
รูปที่ 69 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนสูงที่สุดที่กำลังขยาย 3000 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



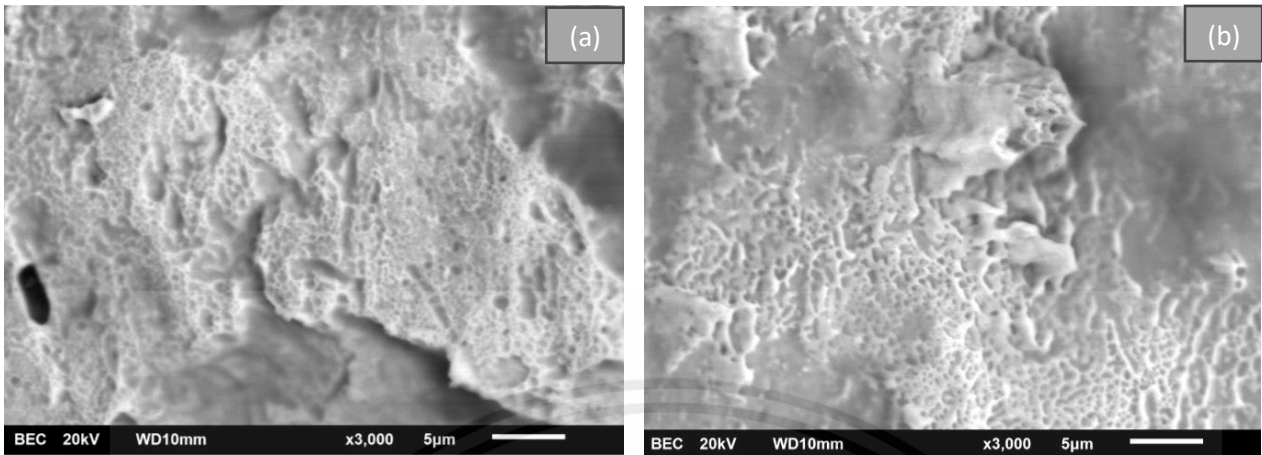
รูปที่ 70 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 35 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



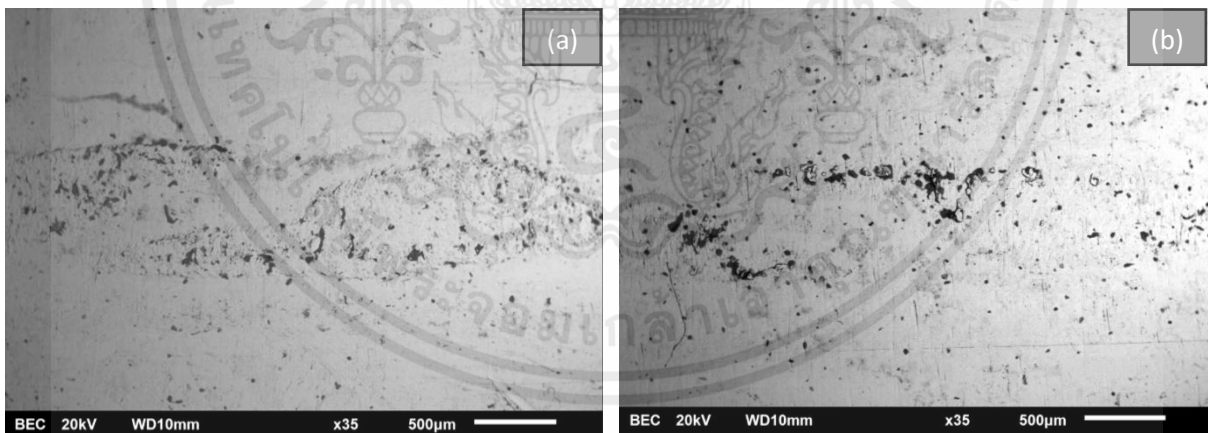
รูปที่ 71 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



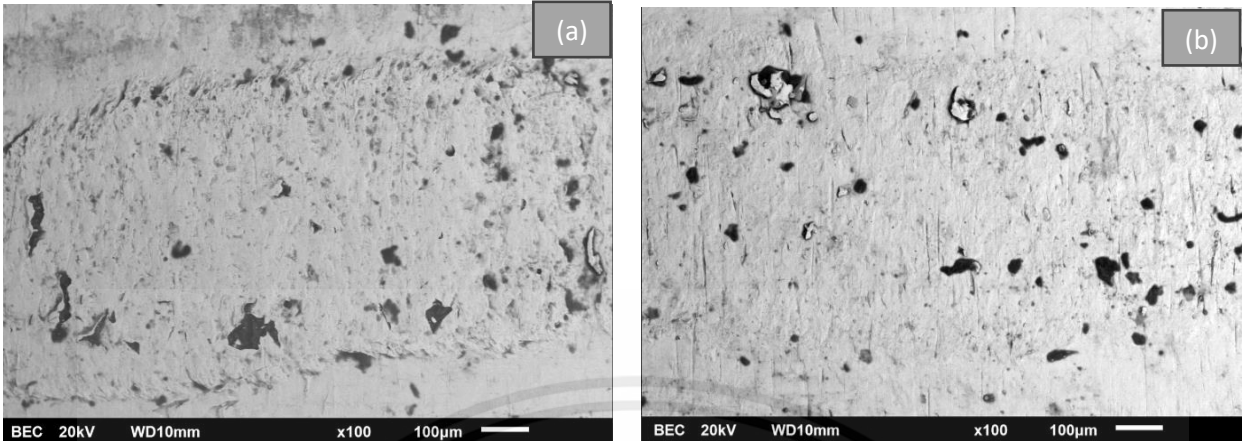
รูปที่ 72 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



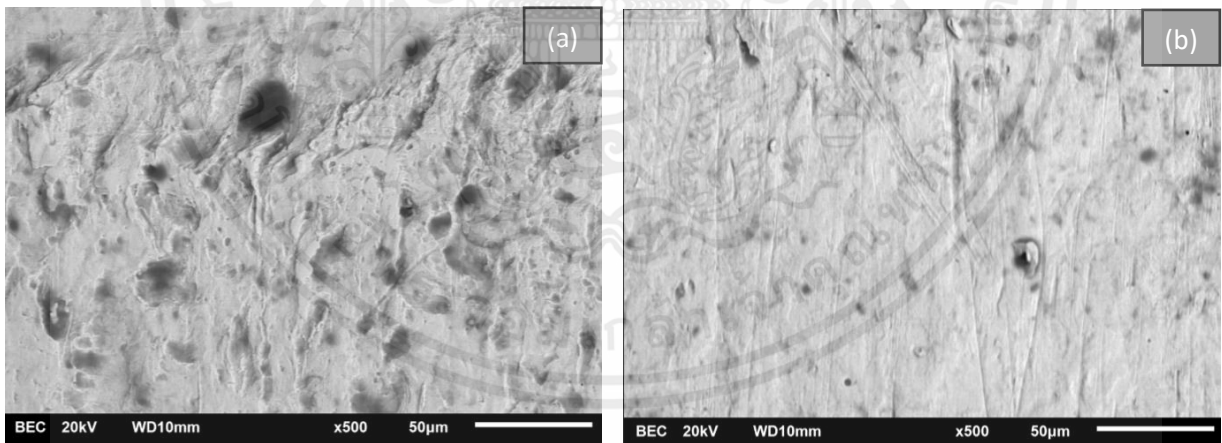
รูปที่ 73 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนระดับกลางที่กำลังขยาย 3000 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



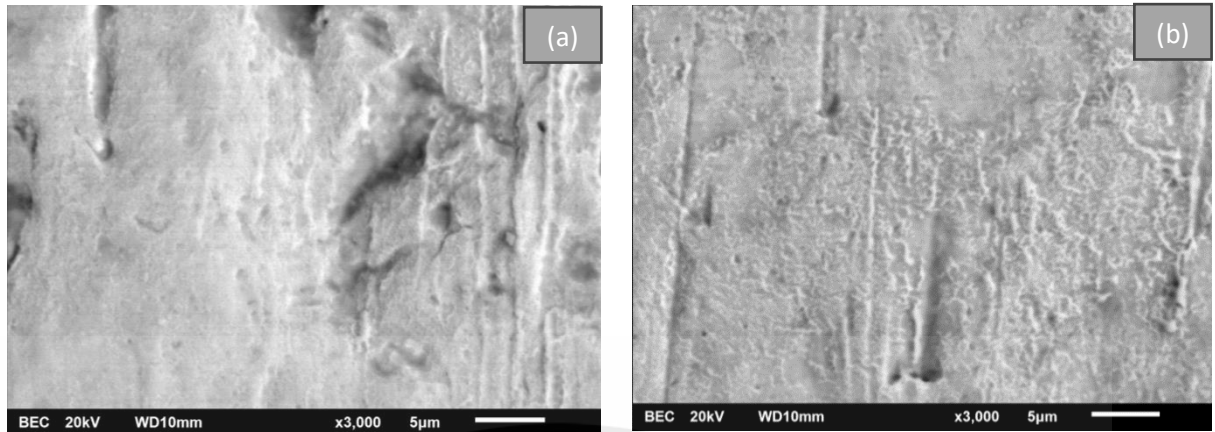
รูปที่ 74 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 35 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



รูปที่ 75 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



รูปที่ 76 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก



รูปที่ 77 ลักษณะความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้เงื่อนไขที่มีความต้านทานแรงกดเฉือนต่ำสุดที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) แผ่นเหล็ก (b) ท่อเหล็ก

