การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX

DOUBLE-PULSE RESISTANCE SPOT WELDING OF JFE409L STAINLESS STEEL AND JFE429EX STAINLESS STEEL

นางสาวประภาพรรณ พรหมทอง

MS. PRAPAPAN PROMTHONG

นายปูรณ์พณิทธิ์ ดำศรี

MR. POONPHANIT DUMSRI

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศรกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

DOUBLE-PULSE RESISTANCE SPOT WELDING OF JFE409L STAINLESS STEEL AND JFE429EX STAINLESS STEEL

MS. PRAPAPAN PROMTHONG
MR. POONPHANIT DUMSRI

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 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX
DOUBLE-PULSE RESISTANCE SPOT WELDING OF JFE409L STAINLESS STEEL AND JFE429EX STAINLESS STEEL

นักศึกษา นางสาวประภาพรรณ พรหมทอง รหัสนักศึกษา 60010582
นายปูรณ์พณิทธิ์ ดำศรี รหัสนักศึกษา 60010627

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

_____

(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX
นักศึกษา	นางสาวประภาพรรณ พรหมทอง นายปูรณ์พณิทธิ์ ดำศรี
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง (First-Pulse Current) และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (Second-Pulse Current) ที่เหมาะสมกับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX บริเวณรอยต่อเกยของชิ้นงานที่ส่งผลอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือน (Tensile Shear Force) เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงสุด อีกทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของรอยเชื่อม โดยทำการเชื่อมชิ้นงานด้วยวิธีการเชื่อมต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding) จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^2 Factorial Design) ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลอง 2 ปัจจัย คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ คือ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแล้วไปทดสอบค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม แล้วศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ทราบว่า ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด คือขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ สำหรับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser Grains) บริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grain) และรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์มากยิ่งกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยวจนถึงเงื่อนไขค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Thesis Title	Double-Pulse Resistance Spot Welding of JFE409L Stainless Steel and JFE429EX Stainless Steel
Student	Ms. Prapapan Promthong Mr. Poonphanit Dumsri
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This research is studied the optimal electric current discharge of the first pulse current and the second pulse current for double-pulse resistance spot welding between JFE409L stainless steel and JFE429EX stainless steel at the lap joint area of the specimen that affects tensile shear force to obtain the highest tensile strength weld and studied microstructure of weld. The specimen is welded by double-pulse resistance spot welding from the design of experiment 3 raised of the power k full factorial design with 2 main factors are first pulse current and second pulse current for each factor has 3 levels of 7000, 8500 and 10000 amperes, 3 replications in the experiments and then take the specimens weld were tested for the tensile shear force of the weld and microstructures were studied by scanning electron microscope (SEM). The experimental result showed that the optimal welding condition leads to the highest value of tensile shear force of weld and it was achieved under the first pulse current is 10000 amperes and the second pulse current is 7000 amperes condition. In addition, the microstructure of the weld is complete. Due to the heat affected zone (HAZ) the grain is coarser grain and the grain is large. The fusion zone (FZ) is columnar grain and the nugget weld is more complete compared to single pulse resistance spot welding until certain conditions. After that, the microstructure of the weld is less complete.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX นี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายด้วยดีและมีความสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้รวมทั้ง ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยเหลือ ตลอดจนชี้แนะแนวทางสำหรับการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง คณะผู้จัดทำขอกล่าวขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาและความทุ่มเทที่มอบให้นี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ธีรวุฒิ เขื่อนแก้ว เป็นอย่างสูงที่ช่วยจัดหาวัสดุที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ประจักร จัตกุล และนายกำธร สุขพิมาย เป็นอย่างสูงที่คอยให้คำแนะนำความรู้และช่วยเหลือในเรื่องของการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และวิธีการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอบขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องตัดแผ่นโลหะไฮดรอลิคแบบเฉือน เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ยิ่งไปกว่านั้นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากปราศจากคณาจารย์ภายในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบวิชาความรู้ ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนชี้แนะแนวทาง และให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือมาโดยตลอด เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ ที่นี้

อนึ่ง คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างสูงว่า ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อันสูงสุดแก่ผู้ที่สนใจศึกษา เพื่อใช้เป็นสื่อในการจัดการเรียนรู้ และสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อไป ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องต่าง ๆ ที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

นางสาวประภาพรรณ พรหมทอง
นายปูรณ์พณิทธิ์ ดำศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 แผนการดำเนินงาน 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเชื่อมความต้านทาน 5

2.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด 5

2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 8

2.2.1 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม 8

2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม 8

2.2.3 แรงกดในการเชื่อม 8

2.3 การเกิดความร้อน 8

2.4 เวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 9

2.4.1 เวลากด 9

2.4.2 เวลาเชื่อม 9

2.4.3 เวลากดค้าง 9

2.4.4 เวลาเย็นตัว 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

2.5 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 10
2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม 12
2.6.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 12
2.6.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 13
2.6.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 14
2.6.4 เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส 14
2.7 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง 15
2.8 การออกแบบการทดลอง 17
2.8.1 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง 17
2.8.2 วิธีในการออกแบบการทดลอง 18
2.8.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง 18
2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน 19
2.10 กล้องจุลทรรศน์ 20
2.10.1 กล้องจุลทรรศน์ออปติคอลหรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง 20
2.10.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 22
2.11 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 22

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 25
3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 26
3.3 การออกแบบการทดลอง 28
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ 29
3.3.2 การออกแบบการทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 30
3.3.3 การออกแบบการทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 31
3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

3.4 กระบวนการเชื่อมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง 33
3.4.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดลองเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ 33
3.4.2 การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่เพื่อทดสอบแรงดึง 33
3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค 37

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 40
4.1.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงเฉือนของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 41
4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 41
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 42
4.2.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงเฉือนของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 42
4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง 43
4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน 46
4.2.4 วิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง 48
4.3 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 49
4.4 รูปแบบความเสียหายของรอยเชื่อม 52
4.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .. 53
4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 54
4.6.1 ลักษณะการเกิดความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 57
4.6.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 60
4.7.1 ลักษณะการเกิดความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 69
4.7.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 73
4.8 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่..... 76

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 การสรุปและอภิปรายผล 78
5.1.1 การเชื่อมชิ้นงาน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 78
5.1.2 การเชื่อมชิ้นงาน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 78
5.1.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 79
5.2 ข้อเสนอแนะ 79

เอกสารอ้างอิง 81
ภาคผนวก ก 84
ภาคผนวก ข 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงงานวิจัย 4
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ JFE409L และ JFE429EX wt% 26
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ JFE409L และ JFE429EX 26
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ JFE409L และ JFE429EX 26
ตารางที่ 3.4 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 27
ตารางที่ 3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมและระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (3^2 Factorial Design) 30
ตารางที่ 3.6 ค่าของตัวแปรอื่น ๆ ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 30
ตารางที่ 3.7 การออกแบบการทดลอง โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 31
ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลอง โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 32
ตารางที่ 3.9 ลักษณะรอยเชื่อมของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 35
ตารางที่ 3.10 ลักษณะรอยเชื่อมของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 36
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 41
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) 41
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ 43
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ 46
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมทั้ง 12 เงื่อนไข 50
ตารางที่ 4.6 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 57
ตารางที่ 4.7 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเกิดความต้านทานทางไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 7
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมต้านทานแบบจุด 9
รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด 12
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สีเข้ม) และออสเทนไนต์ (สีขาว) ในเหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส 15
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบมีจุดคราก 16
รูปที่ 2.9 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต 17
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 24
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการไหลของขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง 29
รูปที่ 3.2 ลักษณะของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง 34
รูปที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง 35
รูปที่ 3.4 Cross-section ชิ้นงานเชื่อม กำหนดให้สัญลักษณ์ D_1 คือ Nugget diameter T_1 T_2 คือ Depth of fusion และ H_1 H_2 คือ Indentation depth 38
รูปที่ 3.5 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน 38
รูปที่ 3.6 Cross-section ชิ้นงานเชื่อม กำหนดให้ (A) คือ บริเวณโลหะพื้นฐาน (B) คือ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) และ (C) คือ บริเวณหลอมละลาย (Fusion zone: FZ) 39
รูปที่ 4.1 อิทธิพลหลักของปัจจัย คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า 42
รูปที่ 4.2 Residual plots ของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ 44
รูปที่ 4.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมเทียบกับกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 45
รูปที่ 4.4 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมเทียบกับกระแสไฟฟ้าพัลส์สอง 45
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลักของปัจจัย คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สอง 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สอง 48
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม 49
รูปที่ 4.8 Boxplot ของค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม 52
รูปที่ 4.9 (a) ลักษณะความเสียหายแบบ Interfacial failure mode (b) ลักษณะความเสียหายแบบ Pull out failure mode 52
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) JFE409L (b) JFE429EX 53
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ 54
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ 55
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ 56
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ 58
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ 61
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ 62
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ 63
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ 65
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ 66
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ 67
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษาของปริญญานิพนธ์ เรื่องการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

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

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายโดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในปริมาณสูงเข้าสู่ชิ้นงานที่วางทับซ้อนกัน โดยปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อของวัสดุที่ต้องการเชื่อม และกดให้ติดกันจากแรงดันของหัวอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง กระบวนการเชื่อมนี้มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น การเชื่อมประกอบตัวถังรถยนต์ โครงสร้างรถยนต์ และท่อไอเสียรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถเชื่อมประกอบชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอัตราการผลิตสูง สามารถเชื่อมวัสดุได้หลากหลายชนิด รอยเชื่อมสม่ำเสมอ และมีความแข็งแรงต่อจุดเชื่อมเพียงพอในการรับแรง

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นโลหะที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ต่าง ๆ โดยมีเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้ คือ เกรดเฟอร์ริติก (Ferritic) เนื่องจากมีความแข็งแรง น้ำหนักเบา มีความสวยงาม และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง การประสานเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน จะเห็นได้ว่าปริมาณการต่อยึดด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงานระหว่างวัสดุชนิดเดียวกัน วัสดุต่างชนิดกัน หรือวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกันมีปริมาณมากกว่าหนึ่งพันจุด เนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของโลหะทั้งสองชนิด อาจส่งผลให้รอยเชื่อมไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน รอยเชื่อมอาจจะเกิดเป็นเฟสที่ไม่สมบูรณ์ และอาจจะเกิดความบกพร่องในรอยเชื่อม ในอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่ใช้กรรมวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เพียงหนึ่งครั้งเพื่อเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน หรือเรียกว่าการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว (Single-Pulse Resistance Spot Welding) แต่มีผลการวิจัยพบว่า การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding) อาจจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมให้ดีขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากความร้อนที่ได้จากการปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง [9,13,17] อย่างไรตามยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองกับความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษารูปแบบการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือน (Tensile Shear Force) เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงมากที่สุด อีกทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ซึ่งในงานวิจัยนี้มีตัวแปรสำคัญในการทดลองคือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง (First-Pulse Current) และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (Second-Pulse Current)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษารูปแบบการปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ เพื่อให้รอยเชื่อมของชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด

2. เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 125 มิลลิเมตร และความกว้าง 40 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกันด้วยรอยต่อเกย ที่ความยาว 40 มิลลิเมตร และความกว้าง 40 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z3139 โดยวางเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L ไว้ด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX

2. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทดลอง คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่กำหนดเป็นปริมาณกระแสที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เงื่อนไขในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

2. ได้ทราบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ถูกเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่

3. ได้ทราบขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

4. สามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการเชื่อมชิ้นงานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินโครงงานวิจัยนี้มีระยะเวลาในการดำเนินงาน โดยเริ่มจากเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 และจะสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ซึ่งมีรายละเอียด และขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและระบุหัวข้อของงานวิจัย ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	→									
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		→								
3. ออกแบบการทดลอง และเตรียมชิ้นงานสำหรับทำการเชื่อม			→	→						
4. เชื่อมชิ้นงาน			→	→	→					
5. ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม และสร้างแบบจำลองจากผลการทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสม				→	→	→				
6. ศึกษาโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อม ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาค						→	→	→		
7. สรุปผล และเสนอแนวทางในการเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น									→	
8. รวบรวมข้อมูลเพื่อทำเล่มรายงานวิจัย									→	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี และเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX โดยทำการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุด วิธีการออกแบบการทดลอง และการศึกษาโครงสร้างจุลภาคซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แสดงดังต่อไปนี้

1. การเชื่อมความต้านทาน
2. พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
3. อิเล็กโทรดที่ใช้ในงานเชื่อมความต้านทานแบบจุด
4. เหล็กกล้าไร้สนิม
5. ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง
6. การออกแบบการทดลอง
7. การวิเคราะห์ความแปรปรวน
8. กล้องจุลทรรศน์
9. การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.1 การเชื่อมความต้านทาน

การเชื่อมความต้านทาน เกี่ยวข้องกับการสร้างความร้อนจากกระแสไฟฟ้าผ่านโลหะที่มีความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งบริเวณที่มีความต้านทานสูง หรือบริเวณรอยต่อที่ผิวโลหะคนละชิ้นมาสัมผัสกัน จะเกิดความร้อนสูงสุด ทำให้โลหะหลอมละลายเกิดเป็นบ่อหลอมเชื่อมต่อโลหะทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมนี้ทำให้เกิดมลพิษต่ำ แต่มีข้อจำกัดด้านการใช้งานที่ไม่หลากหลาย และอุปกรณ์มีราคาแพง [1,2]

2.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด

การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นวิธีการเชื่อมโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงเข้าสู่ชิ้นงานที่วางซ้อนกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านผิวสัมผัสของชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนสูง จากความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงาน ทำให้เกิดการหลอมลายเฉพาะจุด ขณะเดียวกันจะมีการใช้แรงกด เพื่อให้ผิวสัมผัสที่หลอมละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งรอยเชื่อมเกิดขึ้นได้จากการทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสมของความร้อน แรงกด และชิ้นงานเชื่อม โดยปริมาณความร้อนที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 อย่าง คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า ความต้านทานของชิ้นงาน และเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งกระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เช่น การเชื่อมประกอบตัวถัง โครงสร้าง เพราะสามารถเชื่อมประกอบชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอัตราการผลิตสูง มีผลกระทบทางความร้อนต่อการผิดรูปของชิ้นงานน้อย ไม่ต้องใช้วัสดุประสาน สามารถเชื่อมวัสดุได้หลากหลาย ผิวงานหลังการเชื่อมเรียบเนียน มีความแข็งแรงต่อจุดเพียงพอในการรับแรง ต้นทุนต่ำ ความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสำหรับระบบอัตโนมัติ และรอยของการเชื่อมต้านทานแบบจุดนั้น จะเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ

การเชื่อมต้านทานแบบจุด คือ กรรมวิธีการประสานวัสดุที่ผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อด้วยความร้อนที่เกิดจากความต้านการไหลของกระแสผ่านรอยต่อที่ถูกกดแน่นด้วยแรงกดจากอิเล็กโทรด ผิวสัมผัสด้านในพื้นที่ที่มีกระแสเข้มข้น จะมีความร้อนเพิ่มขึ้นโดยความต่างศักย์มีค่าต่ำ และกระแสที่มีค่าสูงในช่วงพัลส์สั้น ๆ ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะเชื่อมเมื่อกระแสเกิดการไหล แรงกดจากอิเล็กโทรดจะกดนิ่งจนบริเวณที่หลอมละลายเย็นตัว และปล่อยแรงกดออกเมื่อแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างสั้น ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมชิ้นงาน ประกอบด้วยความต้านทานทั้งหมด 7 จุด ดังรูปที่ 2.1

1. ค่าความต้านทาน "R_1" คือ ความต้านทานของผิวชิ้นงานทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance)

2. ค่าความต้านทาน "R_2" คือ ความต้านทานระหว่างผิวชิ้นงานทดสอบบริเวณด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode contact resistance)

3. ค่าความต้านทาน "R_3" คือ ความต้านทานระหว่างผิวชิ้นงานทดสอบบริเวณด้านบน (Upper Specimen resistance) และผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)

4. ค่าความต้านทาน "R_4" คือ ความต้านทานของผิวชิ้นงานทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)

5. ค่าความต้านทาน "R_5" คือ ความต้านทานระหว่างผิวชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance) และผิวของหัวอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode contact resistance)

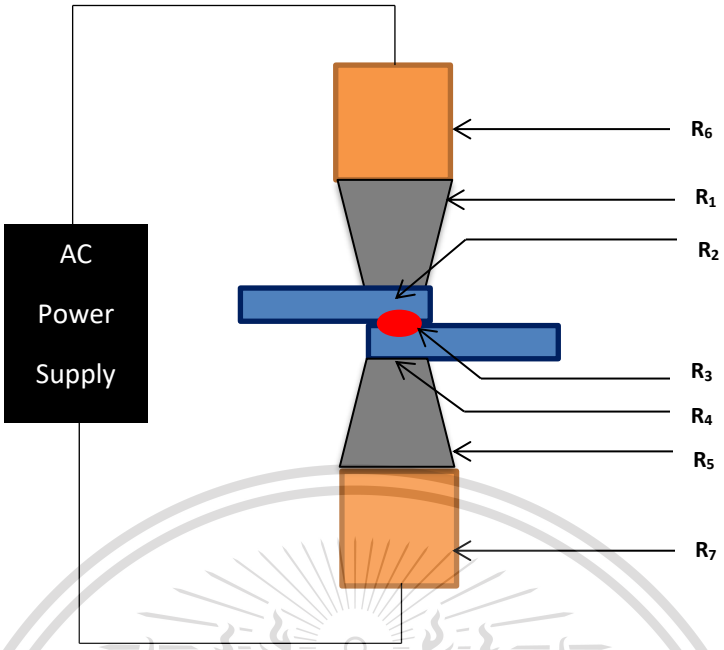
6. ค่าความต้านทาน "R_6" คือ ความต้านทานของหัวอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode resistance)

7. ค่าความต้านทาน "R_7" คือ ความต้านทานของหัวอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode resistance)

Asianlar ได้สรุปการหาค่าความต้านทานโดยรวมของการเชื่อมต้านทานแบบจุด ได้ตามสมการ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1 การเกิดความต้านทานทางไฟฟ้าในการเชื่อมต้านทานแบบจุด

เมื่อค่าความต้านทานประกอบด้วยสองส่วน คือ ความต้านทานของวัสดุ (R_2, R_4, R_6, R_7) และความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด (R_1, R_5) ความต้านทานของวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน (R_2, R_4) และอิเล็กโทรด (R_6, R_7) ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะทำการเชื่อมได้ ขณะเดียวกันค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสภาวะของปลายอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมนั้นเกิดจากค่าความต้านทาน R_3 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนสูงสุดในรอยต่อเกย ค่าความร้อนที่มีค่าสูงนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะพื้นผิวของของโลหะที่ใช้เชื่อมแรงกดกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นแล้วค่าความต้านทานโดยรวมขึ้นอยู่กับความดันที่ผิวสัมผัสค่า R_1, R_3 และ R_5 ที่อินเทอร์เฟสระหว่างชิ้นงาน การให้ความร้อนพื้นที่สัมผัส R_1 และ R_5 ที่ถูกต้องต้องมีการชดเชยค่าอุณหภูมิ และรักษาอุณหภูมิของอิเล็กโทรดให้มีค่าต่ำ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่ถูกต้อง คือ อิเล็กโทรดต้องมีสมบัติการนำความร้อนที่ดี มีผิวที่ละเอียด และสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน เช่น คราบน้ำมันหรือจาระบี การเชื่อมต้านทานแบบจุดนี้นิยมในการนำไปทำการเชื่อมประกอบโลหะแผ่นบาง เช่น โครงสร้างรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ สิ่งก่อสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น ข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบจุดที่เห็นได้เด่นชัด คือ ความเร็วในการเชื่อมมีค่าสูง และมีความเหมาะสมสำหรับการผลิตแบบอัตโนมัติ สามารถนำไปใช้กับการผลิตแบบอัตโนมัติในสายการผลิตร่วมกับเครื่องจักรต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการหาช่างฝีมือในการปฏิบัติงานได้อย่างดีเยี่ยม [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสามารถแบ่งออกเป็น 3 พารามิเตอร์ ดังนี้

2.2.1 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

ค่ากระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่สำคัญของการเชื่อมความต้านทาน ซึ่งจะเป็นตัวที่ส่งผลต่อความร้อนมากที่สุด ขนาดของรอยเชื่อม หรือที่เรียกว่า welding nugget จะขยายตัวอย่างรวดเร็วจากการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า แต่หากกระแสไฟฟ้ามากเกินไปอาจส่งผลให้ชิ้นงานระเบิด และเกิดความเสียหายต่อหัวอิเล็กโทรด โดยกระแสไฟฟ้าจะมีทั้งกระแสตรง และกระแสสลับขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องเชื่อม

2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม

เวลาที่ใช้ในการเชื่อมเป็นสัดส่วนที่ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนในการเชื่อม เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายออกมาจากบริเวณรอยเชื่อมถึงชิ้นงาน และถึงหัวอิเล็ดโทรด ตลอดจนการสูญเสียความร้อนจากพื้นผิววัสดุโดยรอบ ค่าต่ำสุดของกระแสไฟฟ้า และค่าต่ำสุดของเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เพราะหากกระแสไฟฟ้าต่ำเกินไป การเพิ่มเวลาก็ไม่สามารถทำให้วัสดุเชื่อมติดกันได้ และเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงมากพอ และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ขนาดของ nugget จะขยายใหญ่ขึ้นจนใกล้เคียงกับจุดปลายอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับชิ้นงาน แต่หากยังคงเชื่อมต่อไปเรื่อย ๆ อาจส่งผลให้ชิ้นงานระเบิดออก

2.2.3 แรงกดในการเชื่อม

แรงกดในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อกระบวนการเชื่อมต้านทาน โดยส่งผลต่อความต้านทานของหน้าสัมผัส (Contact resistance) และพื้นที่สัมผัสที่อาจส่งผลต่อการเสียรูปของวัสดุ ชิ้นงานเชื่อมจะต้องถูกกดด้วยแรงที่เหมาะสม เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านชิ้นงานได้ ถ้าหากแรงกดในการเชื่อมน้อยเกินไป อาจเกิดการระเบิดของชิ้นงานทันทีหลังจากเริ่มกระบวนการ เนื่องจากความต้านทานของหน้าสัมผัสสูงเกินไปเป็นผลให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันถ้าหากแรงกดในการเชื่อมสูงเกินไปหน้าสัมผัสจะกว้างขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ง่าย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และความต้านทานของหน้าสัมผัสน้อยลง จะทำให้การเกิดความร้อนลดลงรวมถึงขนาดของ nugget ที่เล็กลงด้วย

2.3 การเกิดความร้อน

ในรอยต่อการเชื่อมต้านทานแบบจุดเกิดจากการประยุกต์ใช้กฎของโอห์มเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำความต้านทานไฟฟ้าที่ยับยั้งของกระแส จะทำให้เกิดความร้อน (H) ที่สัมพันธ์กับกระแสเชื่อม (I) และความต้านทาน (R) โดยเป็นไปตามสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$H=I^2R \qquad (2.2)$$

H คือ ความปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (จากการแปลงกฎของโอห์มสามารถพิจารณาให้กำลังไฟฟ้า และความร้อนนั้นเหมือนกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าสู่ชิ้นงานโดยคิดเป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ต่อพื้นที่หน้าตัด หากใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณสูงจะส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสูงขึ้น ทำให้เวลาในการเชื่อมลดลง และสามารถยืดอายุการใช้งานของหัวอิเล็กโทรดได้นานยิ่งขึ้น การปรับกระแสเชื่อมจะต้องคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการเชื่อม และกำลังของเครื่องเชื่อมที่ใช้เป็นสำคัญ

2.4 เวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

2.4.1 เวลากด (Squeeze time)

เวลาเริ่มต้นของสัญญาณเชื่อม และกระแสเชื่อมในครั้งแรก ซึ่งเป็นเวลาที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงาน และมีแรงกดเพียงพอก่อนที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยออกมา

2.4.2 เวลาเชื่อม (Weld time)

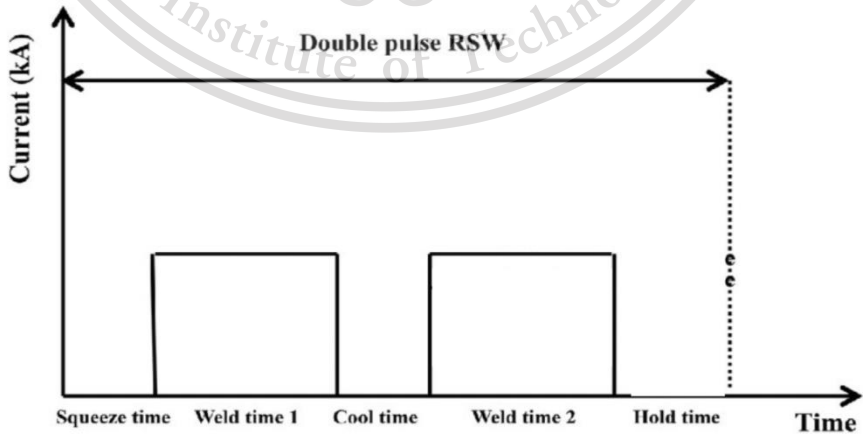
เวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ในช่วงการเชื่อมหนึ่งครั้ง

2.4.3 เวลากดค้าง (Hold time)

ช่วงเวลาที่แรงกดของหัวอิเล็กโทรดยังคงกระทำต่อชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในช่วงสุดท้ายสิ้นสุดลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวมากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงในรอยเชื่อม จนสามารถยอมรับได้

2.4.4 เวลาเย็นตัว (Cool time)

ช่วงเวลาระหว่างเวลาที่หัวอิเล็กโทรดเสร็จสิ้นการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อม และเคลื่อนที่ไปทำการเชื่อมที่ตำแหน่งต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อมซ้ำรอบของการเชื่อมเดิม (กระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมยังคงเดิม) [1] หากนำปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม และเวลาในการเชื่อมต้านทานแบบจุดมาเขียนในรูปแบบของกราฟจะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมต้านทานแบบจุด [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ด้วยเหตุนี้เมื่อทำการพิจารณาค่าเวลาการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องแล้ว สมการการเกิดความร้อนสมการที่ 2.2 อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งสมการการเกิดความร้อน (H) จากการเชื่อมต้านทานแบบจุดมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) เวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) ดังนี้

$$H=I^2R.T.K \quad (2.3)$$

เวลาในการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเชื่อมต้านทานแบบจุด ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไป อาจทำให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายได้ และอาจส่งผลทำให้เกิดโพรงอากาศภายในนอกจากนั้นอาจทำให้เกิดการดึงเอาโลหะหลอมเหลวออกจากพื้นที่การเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้าตัดลง เวลาในการเชื่อมที่สั้นเกินไป ทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ยากในโลหะเชื่อม และรอยนักเกตมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามสมการความร้อนที่แสดงในสมการที่ 2.3 ไม่นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีค่าที่สามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่ก่อตัวในแนวเชื่อม [10,12,13] ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และเวลาเชื่อม (t) ดังนี้

$$Q = I^2R.t \quad (2.4)$$

2.5 อิเล็กโทรดที่ใช้ในงานเชื่อมความต้านทานแบบจุด

แรงกด (Pressure) ของอิเล็กโทรดเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการเชื่อมต้านทานแบบจุด จุดประสงค์ของการใช้แรงกด คือ การกดยึดชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันในขั้นตอนเริ่มต้นของการเชื่อม เพื่อทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งการนำไฟฟ้าบริเวณจุดที่ต้องการเชื่อมไม่ได้ช่วยยึดชิ้นงานให้คงที่ติดกัน ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุดของชิ้นงานต้องใช้เครื่องมืออื่น ๆ เช่น อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เพื่อจับยึดชิ้นงานให้แน่น และอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมก่อนการกดของอิเล็กโทรดเสมอ โดยค่าแรงกดที่มีค่ามากจะทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมนั้นมีค่าลดลงที่จุดสัมผัสระหว่างปลายอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน ค่าแรงกดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการนำความร้อนจากโลหะเชื่อม ค่ากระแสที่มีค่าสูงนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าแรงกดที่มีค่ามาก ขณะที่แรงกดน้อยต้องการค่ากระแสที่มีค่าน้อย

ดังนั้นในการใช้งานเครื่องเชื่อมจึงควรมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง สำหรับหัวอิเล็กโทรด (Electrode tip) เป็นส่วนของกระบวนการเชื่อมที่สัมผัสกับโลหะเชื่อม และเป็นตัวส่งผ่านกระแสเพื่อให้เกิดความต้านทานความร้อนการหลอมละลาย หัวอิเล็กโทรดเกิดจากการเชื่อมยึดของโลหะทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่นิยมนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดการเชื่อมต้านทานแบบจุด จุดประสงค์หลักในการใช้อิเล็กโทรด คือ เพื่อเป็นตัวนำกระแสการเชื่อมสู่ชิ้นงานบริเวณจุดที่มีแรงกดกระทำ เพื่อนำความร้อนออกจากผิวหน้าชิ้นงาน รักษาคุณลักษณะของความร้อน และกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association: RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper based alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I-V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด เมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้นความแข็ง และอุณหภูมิการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง

- กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory metal) เป็นโลหะผงขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างทองแดงและไททำเนียมที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อน และความต้านทานการกดอัดที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 ยกตัวอย่างเช่น กลุ่ม 10 หมายถึง ค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของทองแดง ค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น [1]

รูปที่ 2.3 แสดงรูปร่างมาตรฐานของเครื่องเชื่อมอิเล็กโทรดทั้ง 6 รูปแบบ แสดงด้วยสัญลักษณ์อักษรตั้งแต่ A ถึง F ได้แก่

1. Type A หรือ Pointed คือ หัวอิเล็กโทรดปลายแคบ เหมาะสำหรับงานเชื่อมเฉพาะจุดส่วนใหญ่

2. Type B หรือ Dome คือ หัวอิเล็กโทรดปลายโค้งมน เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากการออกแบบที่รองรับปัญหาการจัดแนวที่ไม่ตรง เนื่องจากสามารถสัมผัสกับรัศมีได้ในระหว่างการเชื่อม

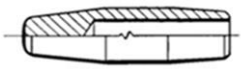
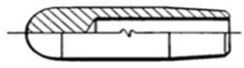
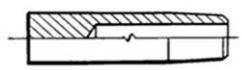
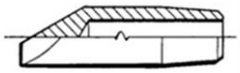
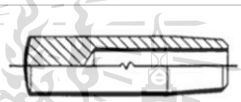
3. Type C หรือ Flat คือ หัวอิเล็กโทรดแบน ใช้สำหรับการเชื่อมส่วนของเครื่องสำอาง และการปรับสมดุลความร้อน ช่วยลดการเยื้องของรอยเชื่อม โดยจะเกิดการกระจายแรง และกระแสไฟฟ้าออกไปบนพื้นที่ผิวขนาดใหญ่

4. Type D หรือ Offset คือ หัวอิเล็กโทรดที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถเชื่อมเฉพาะจุดในที่ที่แน่นหนาได้ อาจเป็นหน้าแปลนขนาดเล็ก หรือในมุมแคบ

5. Type E หรือ Truncated คือ หัวอิเล็กโทรดหัวตัด ใช้กับงานที่ต้องการปรับปรุงพื้นผิวงานเชื่อมที่เรียบ โดยองศาของหัวตัดมีผลต่อความร้อนในการเชื่อม

6. Type F หรือ Radius คือ หัวอิเล็กโทรดหน้ารัศมีกว้าง มักใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียม รัศมีที่มีขนาดใหญ่จะให้จุดสัมผัสที่ดีในการเชื่อมผ่านอลูมิเนียม และยังคงมีพื้นที่ผิวเพียงพอในการควบคุมนักเก็ตเชื่อมระหว่างการเชื่อม [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด

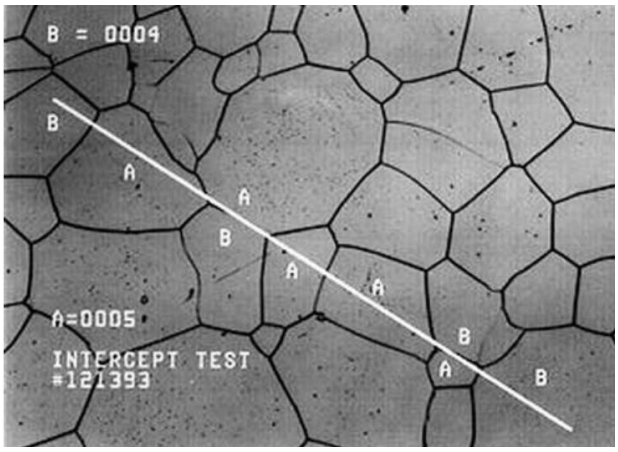
2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) มีสมบัติทนต่อการเกิดสนิม เนื่องมาจากการเติมธาตุโครเมียม (chromium) ลงไประหว่างกระบวนการหลอมเหล็กในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) โครเมียมที่เติมลงไปจะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกซีไฮดรอกไซด์ ($Cr_xO_y(OH)_z$) ปกคลุมผิวเหล็กไว้ ทำให้เนื้อเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดเป็นสนิมได้ เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ได้แก่

2.6.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade)

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด ได้แก่ AISI 430 AISI 446 AISI 409 เป็นต้น เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมในปริมาณร้อยละ 12-27 ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โดยความต้านทานต่อการกัดกร่อน จะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุโครเมียมเป็นสำคัญ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็น เฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าทั่วไป ไม่สามารถทำการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ และยังคงสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้

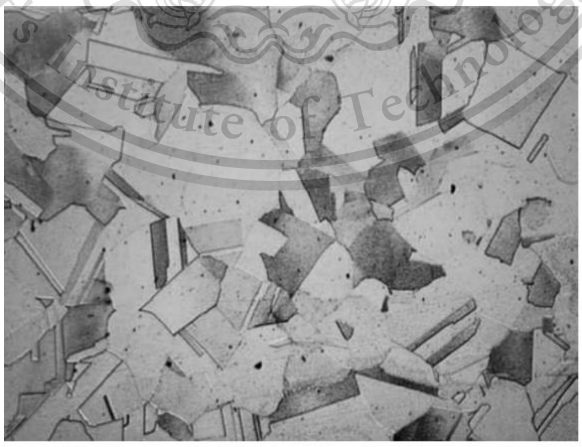
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก [16]

2.6.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เกรดที่รู้จักกันมาก เช่น AISI 304 304L 316 และ 316L เป็นต้น ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็น ออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งเป็นผลจากการเติมธาตุนิกเกิล (Nickel) หรือธาตุแมงกานีส (Manganese) ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์มีสมบัติโดดเด่นด้านการยืดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ ทำให้สามารถขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าว นอกจากนี้โครงสร้างออสเทนไนต์ยังเป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ แต่ถ้าหากทำการขึ้นรูปมาแล้วจะทำให้แม่เหล็กดูดติดบริเวณที่ทำการขึ้นรูปได้ เนื่องจากโครงสร้างบริเวณที่ถูกขึ้นรูปนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างออสเทนไนต์แล้ว

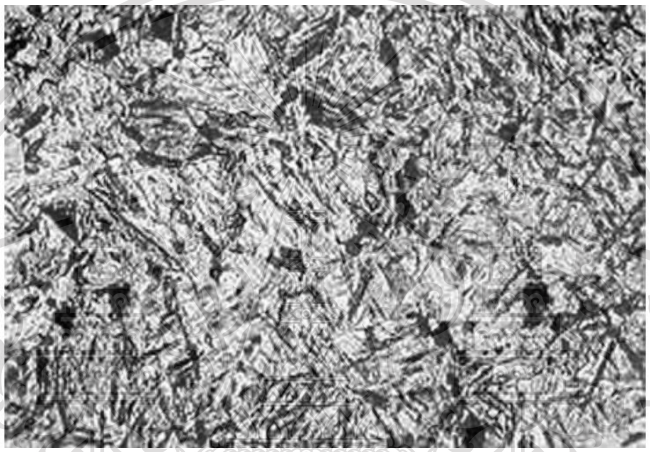


รูปที่ 2.5 โครงสร้างออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก แต่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่า ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถนำมาทำการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยเกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เช่น AISI 403 420 เป็นต้น โครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบแข็งจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ส่วนใหญ่คำนึงถึงความแข็งแรง และความทนทานต่อการเกิดสนิมในระดับปานกลางเท่านั้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง แต่ยังคงไม่เป็นสนิมในสารละลายที่มีการกัดกร่อนไม่สูงมากนัก หรือในสารละลายที่เป็นกลางได้ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลูกปืน เฟือง สปริง เป็นต้น

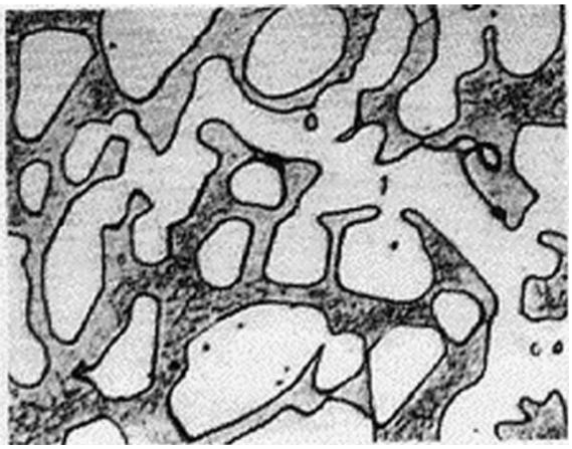


รูปที่ 2.6 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก [16]

2.6.4 เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส (Duplex grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะร่วมทางโครงสร้างจุลภาคระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ชนิด โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เกิดจากการมีปริมาณของธาตุนิกเกิลไม่ถึงร้อยละ 8 และมีปริมาณของธาตุโครเมียมสูงมากกว่าร้อยละ 20 ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์ และออสเทนไนต์ ตัวอย่างของกลุ่มนี้ เช่น AISI 329 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากมีความแข็งแรง และความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง (เนื่องจากปริมาณโครเมียมสูง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สีเข้ม) และออสเทนไนต์ (สีขาว) ในเหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส [16]

2.7 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบด้วยแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย การทดสอบนี้ช่วยให้ได้ค่าสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elongation) ความแข็งแรงคราก (Yield strength) หรือจุดที่วัสดุสามารถรับแรงได้สูงสุดโดยไม่เกิดการเสียรูป ความแข็งแรงทางแรงดึง (Tensile strength หรือ Ultimate strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงสูงสุด และอัตราส่วนการหดตัวสัมพันธ์ของหน้าตัด (Poison ratio) ซึ่งเหล่านี้เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของวัสดุ นอกจากนั้นยังสามารถหาการยืดตัวเมื่อเกิดการแตกหักของวัสดุได้อีกด้วย การทดสอบด้วยแรงดึง โดยทั่วไปเป็นการให้แรงในแนวแกนเดียว (Uniaxial tensile test) แก่ชิ้นทดสอบ โดยแรงดึงนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ หากนำขนาดของแรงดังกล่าวหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรง จะได้ค่าที่เรียกว่า “ความเค้น (Stress: $\boldsymbol{\sigma}$)” ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa ในขณะที่รับแรงดึงวัสดุจะเกิดการเสียรูปโดยยืดตัวออก สัดส่วนระหว่างระยะยืดตัวต่อความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบเรียกว่า “ความเครียด (Strain: $\boldsymbol{\varepsilon}$)” ซึ่งมีหน่วยเป็น m/m หรือไม่มีหน่วย

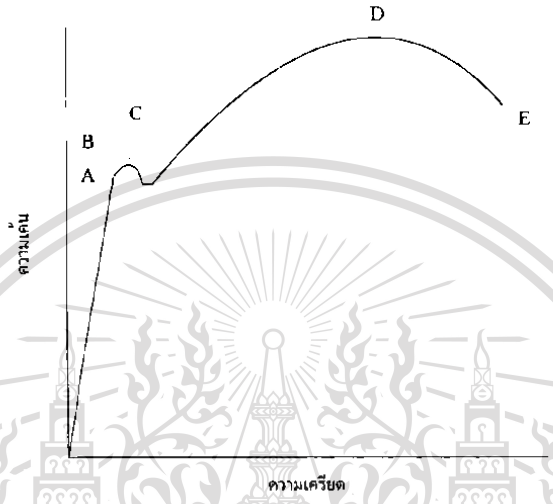
หลักการทำงานของการทดสอบแรงดึง ต้องให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ และบันทึกค่าค่าแรงดึง (Tension force) ที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของวัสดุ โดยขณะที่ชิ้นทดสอบยืดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานทดสอบนี้มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้ แรงที่วัดออกมามีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบจะต้องดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน

วิธีการทดสอบความแข็งแรงทางแรงดึงสามารถทำได้โดยการนำวัสดุตัวอย่างที่จะทดสอบมาทำการดึงช้า ๆ ด้วยแรง และอัตราเร็วคงที่ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียด จากนั้นนำมาวาดเป็นกราฟเส้น หรือเรียกว่า เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) โดยในการทดสอบวัสดุนั้นจะมีมาตรฐานของขนาดวัสดุทดสอบกำหนดไว้ ซึ่งมาตรฐานของการทดสอบที่นิยมใช้ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มาตรฐาน ASTM (American Society of Testing and Materials) มาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standards) และมาตรฐาน BS (British Standards) หรือ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) โดยได้กำหนดขนาด และรูปร่างของวัสดุทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับการกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย [3]



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบมีจุดคราก [3]

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดในรูปที่ 2.4 พบว่า เกิดค่าต่างๆ ขึ้นดังนี้

1. จุด A เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional limit) เกิดขึ้นหลังจากดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นงานทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุค (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่า ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic behavior) นั่นคือ เมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นงานทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2. จุด B เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) เป็นจุดกำหนดค่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent deformation or Offset) กับวัสดุนั้น หลังจากเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation)

3. จุด C เรียกว่า จุดคราก (Yield point) เป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก หรือ Yield strength ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

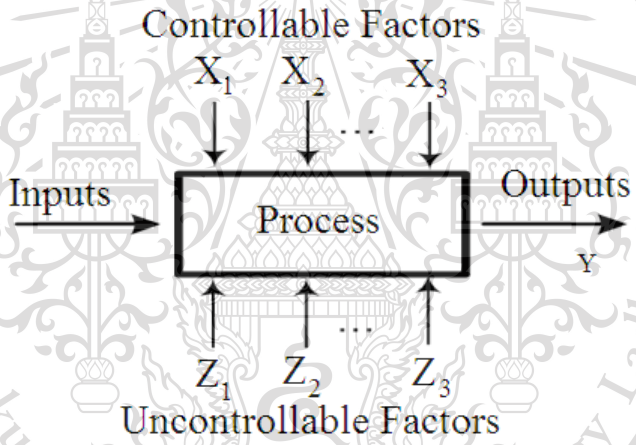
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. จุด D เรียกว่า ความเค้นแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) หรือความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกัน (Fracture)

5. จุด E เรียกว่า จุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) หรืออาจเรียกว่า ค่าความเค้นประลัย (Rupture strength) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หรือโลหะเหนียว มีค่าต่ำกว่าความเค้นสูงสุด ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold work) มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด

2.8 การออกแบบการทดลอง

มอนโกเมอรี่ (Montgomery, 1991) กล่าวว่าการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ [4]



รูปที่ 2.9 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต [4]

2.8.1 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบการทดลองทุกรูปแบบประกอบด้วย 3 หลักการ ดังนี้

1. การสุ่ม ในการทดลองทุกรูปแบบต้องทำการสุ่มลำดับการทดลอง เนื่องจากวิธีการทางสถิติกำหนดว่าการดำเนินการใด ๆ กับปัจจัยต้องเป็นอิสระ เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจะส่งผลให้ลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้

2. การทำซ้ำ หมายถึง การดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้สามารถมองเห็นค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว และนำไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการ

3. การบล็อก เป็นเทคนิคการเพิ่มความแม่นยำของการทดลอง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.8.2 วิธีในการออกแบบการทดลอง

1. ทำความเข้าใจกับปัญหา และกำหนดหัวข้อปัญหาที่ต้องการศึกษา ผู้ศึกษาต้องทำความเข้าใจกับปัญหา และกำหนดขอบเขตของปัญหาให้ชัดเจน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุได้อย่างถูกต้อง

2. กำหนดตัวแปรตอบสนอง (Y) หลังจากทำความเข้าใจกับปัญหาแล้ว ขั้นตอนต่อมา คือ การกำหนดตัวชี้วัดของปัญหา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ การกำหนดคุณลักษณะของปัญหาออกมาในเชิงปริมาณ เพื่อใช้สามารถวัดความผิดพลาดของปัญหา

3. กำหนดปัจจัย (X) พร้อมระดับของปัจจัย หลังจากระบุตัวแปรตอบสนองแล้ว ถัดมาทำการกำหนดปัจจัย (Factor) ที่ส่งผลต่อปัญหา หรือตัวแปรตอบสนอง ซึ่งแบ่งออกเป็น Controllable factor เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ หมายถึง ปัจจัยในกระบวนการที่สามารถกำหนด เปลี่ยนแปลง และแก้ไขได้ตามที่ต้องการ Design factor เป็นปัจจัยที่สนใจจะศึกษาถึงผลที่มีต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลอง Constant factor เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่มิได้สนใจศึกษาถึงผลกระทบในการทดลองครั้งนี้ และ Uncontrollable factor เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ หมายถึง ปัจจัยในกระบวนการที่ไม่สามารถกำหนด และเปลี่ยนแปลงได้ตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ฯลฯ โดยปัจจัยที่ควบคุมได้นั้น ให้ทำการกำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษาเป็น Design factor ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ไม่ใช่ปัจจัยที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้ จะถูกกำหนดให้เป็น Constant factor

4. เลือกตัวแบบในการทดลอง เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยแล้วลำดับถัดไป คือ การกำหนดรูปแบบในการทดลอง เพื่อให้สามารถนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ภายใต้เงื่อนไข หรือข้อจำกัดในการทดลอง ในปัจจุบันตัวแบบสำหรับการทดลองมีอยู่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีความแตกต่างของการนำไปใช้งาน

5. ดำเนินการทดลองตามแบบที่กำหนดไว้ หลังจากออกแบบการทดลองตามตัวแบบที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว ให้ไปทำการทดลองภายใต้สภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในการออกแบบภายใต้หลักการสุ่มและทำซ้ำจนครบทุกการทดลอง

6. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ หลังจากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์โดยใช้แนวคิดของการวิเคราะห์ ANOVA โดยแต่ละตัวแบบจะมีวิธีในการตีความที่แตกต่างกันไป

7. สรุปผลการทดลอง หลังจากสรุปผลทางสถิติแล้วนำผลที่ได้มาทำการสรุปสาเหตุของปัญหาและทำการปรับปรุงปัจจัยเหล่านั้น เพื่อปรับปรุงตัวแปรตอบสนองให้ได้ตามที่ต้องการต่อไป สำหรับการออกแบบ และวิเคราะห์ผลเชิงสถิติสำหรับตัวแบบต่าง ๆ [4]

2.8.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

ตัวแบบสำหรับการทดลองมีหลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างของการนำไปใช้งาน

1. General Full Factorial Design เป็นตัวแบบการทดลองที่ง่ายที่สุด เพราะสามารถกำหนดระดับของปัจจัยเป็นกี่ระดับก็ได้ แต่หากกำหนดระดับของปัจจัยมากเท่าไหร่ ก็จะส่งผลให้จำนวนครั้งในการทดลองมีจำนวนมากตามไปด้วย นอกจากนี้ยังใช้ได้ทั้งกรณีที่ตัวแปรเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. 2^k Factorial Design เป็นตัวแบบการทดลองที่ทุกปัจจัยมีเพียง 2 ระดับเท่านั้น (มักกำหนดเป็น High กับ Low) ทำให้จำนวนการทดลองลดลงเมื่อเทียบกับกรณี General Full Factorial Design นิยมใช้กับกรณีที่ตัวแปรเป็นค่าต่อเนื่อง และมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เนื่องจากในการคำนวณตัวแบบจะสมมติให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองในทุก ๆ ปัจจัยเป็นแบบเส้นตรงทั้งหมด

3. A Single Replicate of 2^k Factorial Design เป็นตัวแบบการทดลองที่ทุกปัจจัยมีเพียง 2 ระดับ และในแต่ละชุดการทดลองจะทำซ้ำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

4. 2^{k-p} Fractional Factorial Design เป็นตัวแบบการทดลองที่ทุกปัจจัยมีเพียง 2 ระดับ แต่ไม่ได้ทำครบทุกการทดลอง จะทำการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้น เช่น ½ หรือ ¼ ของการทดลองทั้งหมด เพื่อให้เข้าใจความแตกต่างของตัวแบบการทดลอง อย่างไรก็ตามจำนวนครั้งการทดลองที่ลดลงอาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง กล่าวคือ ยิ่งจำนวนครั้งการทดลองลดลงมากเท่าไหร่ ความน่าเชื่อถือของการทดลองก็ลดลงไปด้วย นอกจากนี้บางตัวแบบในการทดลองไม่สามารถประมาณค่าความผันแปรจากการทดลอง ส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์ ANOVA ทำให้การสรุปผลยุ่งยากมากขึ้น ดังนั้นการเลือกตัวแบบการทดลอง จำเป็นต้องพิจารณาทั้งความสามารถในการทดลอง และสารสนเทศที่ได้รับควบคู่กันไปด้วย นอกจากตัวแบบการทดลองที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังมีตัวแบบการทดลองแบบอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น 2^k Factorial Design with Center Point หรือ Plackett -Burman ที่ใช้สำหรับกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น หรือในกรณีที่ Uncontrollable Factor มีผลมาก จำเป็นต้องใช้หลักการ Blocking ในการออกแบบเพื่อช่วยเรื่องความแม่นยำในการทดลอง เช่น Randomized Complete Block, Design Latin Square Design หรือ Graeco-Latin Square Design [4]

2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ความแปรปรวน (Variance) เป็นมาตรการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง ความแปรปรวนจึงเป็นการวัดการกระจายของข้อมูลในรูปของพื้นที่ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือเรียกอย่างย่อว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งยังคงใช้หลักการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มประชากรกลุ่มเดียว หรือ 2 กลุ่ม ในการใช้ z หรือ t ทดสอบ กล่าวคือ ถ้าเป็นการเปรียบเทียบกับประชากรเพียงกลุ่มเดียว ส่วนใหญ่จะเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าที่ผู้วิจัยสนใจ หรือค่าที่กำหนดขึ้น ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างประชากร 2 กลุ่ม จะเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างประชากร ทั้ง 2 กลุ่มตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ ในกรณีที่มีประชากรมากกว่า 2 กลุ่ม หรือมีสิ่งที่ต้องการศึกษามากกว่า 2 สิ่ง ความแตกต่างระหว่างกลุ่มจะถูกวัดในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวน ซึ่งในที่นี้ คือ ค่าเฉลี่ยของความแปรผัน (Mean Squares) โดยที่ความแปรผันเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลรวมยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าแต่ละค่าของค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มกับความแตกต่างภายในกลุ่ม

ในกรณีที่ประชากรมีมากกว่า 2 กลุ่ม ในลักษณะของความแปรผัน โดยมีเงื่อนไขว่าข้อมูลที่ได้จากกลุ่มประชากรที่นำมาทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลของแต่ละกลุ่ม จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติเท่านั้น ในการทดสอบสมมติฐานโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ตัวแปรที่ศึกษาอาจมีเพียงตัวแปรเดียว หรือหลายตัวแปรที่ศึกษาพร้อม ๆ กันก็ได้ แต่ละตัวแปรอาจแยกออกได้หลายระดับ หรือหลายชนิด ซึ่งเรียกส่วนย่อย ๆ นี้ว่าส่วนทดลอง หรือ Treatment [4]

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เหมาะสำหรับการทดสอบสมมติฐานในการวิจัยเชิงทดลองหรือการวิจัยเชิงประยุกต์ โดยตัวแปรที่ต้องการศึกษาจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น อาจมีเพียงตัวเดียว หรือมากกว่าหนึ่งตัวแต่ตัวแปรตามต้องมีเพียงตัวเดียวเท่านั้น

2. ลักษณะของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น อาจจำแนกออกเป็นระดับต่าง ๆ หรือจำแนกออกเป็นประเภท ต่างๆ

3. ลักษณะของตัวแปรตามที่มีค่าต่อเนื่อง

2.10 กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เป็นเครื่องมือที่สำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพ และด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยทางด้านรูปร่าง โครงสร้าง และองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์และเทคนิคต่าง ๆ ทางจุลทรรศน์ ได้มีการพัฒนามาโดยตลอดนับจนถึงปัจจุบัน เป็นเวลากว่า 424 ปี กล้องจุลทรรศน์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์ออปติคอล (Optical microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) และกล้องจุลทรรศน์สอบสวนสแกน (Scanning probe microscope)

2.10.1 กล้องจุลทรรศน์ออปติคอล (optical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงส่องผ่าน หรือใช้แสงสะท้อนจากตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยเลนส์เดียวหรือหลายเลนส์ เพื่อให้ได้ภาพจากตัวอย่างตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา กล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้จะให้รายละเอียดไม่เกิน 0.2 ไมโครเมตร (Resolution < 0.2 micrometer) และมีกำลังขยายไม่เกิน 1500 เท่า กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อยู่ทั่วไปคือ Compound microscope ซึ่งประดิษฐ์โดย Hans Lippershey และ Zacharias Jenssen ชาวเนเธอร์แลนด์ ในปี พ.ศ. 2133 ปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์ได้พัฒนาเป็นกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล (Digital microscope) ซึ่งใช้กล้องถ่ายภาพ CCD (Charge-couple device camera) ไปจับภาพที่ต้องการ และภาพจะถูกถ่ายทอดมาปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ให้มองเห็นโดยไม่ต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เลนส์ตา (Eye-piece lens) เช่น กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์ในกลุ่มนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นอีกหลายประเภท เพื่อให้เหมาะสมกับตัวอย่าง โดยมีวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. Bright field microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยหลักการดูดกลืนแสงของวัตถุ ทำให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่บางและโปร่งแสง เช่น เนื้อเยื่อทางจุลชีวะ

2. Dark field microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยหลักการที่แสงถูกกระจายโดยวัตถุ ใช้ในการดูตัวอย่างที่ใสไม่มีสี หรือย้อมสีติดยาก เช่น สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก หรือเนื้อเยื่อบางชนิด

3. Phase contrast microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยหลักการหักเหของแสงสะท้อนหลังจากแสงส่องผ่านตัวอย่าง (Reflective index) ซึ่ง Frits Zernike นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ได้เป็นผู้พัฒนาขึ้นมาในปี พ.ศ. 2473 และได้รับรางวัลโนเบลในปี พ.ศ. 2496 กล้องดังกล่าวใช้ในการดูตัวอย่างที่เป็นสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ ที่บางและโปร่งใส เช่น เนื้อเยื่อเซลล์

4. Fluorescence microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงอัลตราไวโอเลต (Ultra violet light) ส่องผ่านไปยังตัวอย่างที่สามารถเรืองแสงได้ ตัวอย่างจะดูดกลืนแสง และจะปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ ใช้สำหรับการดูตัวอย่างที่เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สามารถเรืองแสงได้เอง หรือตัวอย่างที่ต้องย้อมด้วยสีฟลูออเรเซ้นส์ก่อนนำมาดูกล้องจุลทรรศน์ ปัจจุบันได้พัฒนาไปมากจนเป็น Super-resolved fluorescence microscope โดย Eric Betzig ชาวอเมริกัน Stefan Walter Hell ชาวเยอรมัน และ William E. Moerner ชาวอเมริกัน ทั้งสามคนได้รับรางวัลโนเบล ในปีนี้ พ.ศ. 2557

5. Confocal microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงเลเซอร์ (Laser) ส่องผ่านไปยังตัวอย่าง และตัวอย่างจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของการเรืองแสง ทำให้สามารถเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์ ใช้ในการดูตัวอย่าง และวิเคราะห์ภาพออกมาเป็นภาพ 3 มิติ โดยการใช้โปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วย

6. Polarized microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยหลักการนำเอา polarized light มาส่องหมุนรอบตัวอย่าง ใช้ในการดูลักษณะของรูปแบบโครงสร้างของตัวอย่างทางชีววิทยา เช่น เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ และตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์ เช่น แร่ธาตุและผลึกต่าง ๆ

7. Differential interference contrast microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้หลักการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Interferometry) สัญญาณคลื่นที่ได้จะถูกนำมารวมกันเพื่อสร้างเป็นภาพ ใช้สำหรับดูตัวอย่างทางชีววิทยาที่ยังมีชีวิตอยู่ และไม่ได้ย้อมสี เช่น สเมียร์จากเซลล์ หรือเนื้อเยื่อที่เพาะเลี้ยง และสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว เป็นต้น

8. Interference reflection microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยหลักการใช้ polarized light ส่องดูภาพของตัวอย่างที่อยู่บกกระจกแก้ว ใช้ศึกษาทางชีววิทยา เช่น cell adhesion และ cell migration เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

9. Infrared microscope เป็นกล้องที่อาศัยแสงอินฟราเรด (Infrared) ส่องผ่านตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนประกอบของตัวอย่าง ใช้สำหรับศึกษาอัญมณีต่าง ๆ เช่น เพชร พลอย มรกต หยก และหินอัญมณี เป็นต้น

10. Stereo microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยหลักการส่องดูตัวอย่างโดยตรง ซึ่งจะทำให้เห็นภาพรูปทรง หรือภาพ 3 มิติของตัวอย่าง กล้องชนิดนี้จะมีกำลังขยายไม่เกิน 100 เท่า เช่น ใช้ดูตัวพยาธิ

2.10.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องดูตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงมาก ประมาณ 50 อังสตรอม (Resolution = 50 angstrom) และให้กำลังขยายได้ถึง 50 ล้านเท่า

กล้องชนิดนี้ประดิษฐ์ขึ้นโดย Max Knoll และ Ernst Ruska สองนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ในปี พ.ศ. 2475 และได้รับรางวัลโนเบลในปี พ.ศ. 2529 ซึ่งใช้เวลากว่า 54 ปี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่

1. Transmission electron microscope (TEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน เป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่าง ซึ่งต้องมีการเตรียมตัวอย่างให้บางเป็นพิเศษ ใช้ในการศึกษาโครงสร้าง องค์ประกอบของเซลล์ และเนื้อเยื่อในระดับโมเลกุล

2. Scanning electron microscope (SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพ 3 มิติ ใช้ในการศึกษาโครงสร้าง องค์ประกอบ พื้นผิวของเซลล์ เนื้อเยื่อ และวัตถุ [5]

2.11 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับถ่ายภาพชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Electron gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่าง ๆ จากนั้นจะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลโดยให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น

SEM ประกอบด้วย ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางของการเคลื่อนที่นั้นจะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วย แอพเพอเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากแหล่งกำเนิด ให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน

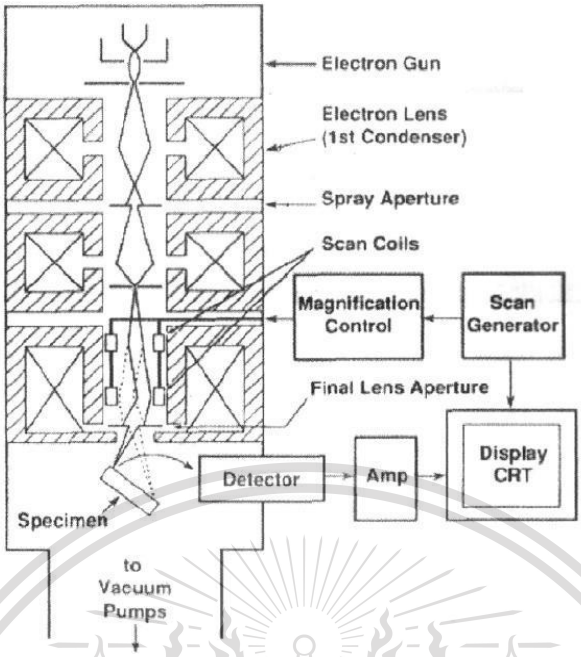
SEM มีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons: SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้วยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

จุดเด่นของ SEM คือ มีระยะชัดลึก และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูง เนื่องจาก SEM ใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินงานของงานวิจัยเรื่อง การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. การออกแบบการทดลอง Design of Experiments (DOE)
4. กระบวนการเชื่อมชิ้นงานและทดสอบแรงดึง
5. การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองเรื่อง การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ใช้เหล็กกล้าสนิมเกรดเฟอร์ริติก (Ferritic) ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จัดเป็นโลหะชนิดที่มีเหล็กเป็นส่วนผสมหลัก (Iron-based Alloy) โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC (Body-Centered Cubic) ทุกช่วงอุณหภูมิ เนื่องจากไม่มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก (Non-Allotropic Property) ดังนั้นโลหะผสมกลุ่มนี้จึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการอบชุบทางความร้อน มีความสามารถในการดูดติดแม่เหล็ก เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมโครเมียม มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน และโครงสร้างจุลภาคเป็น เฟอร์ไรต์ สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX ซึ่งทั้งสองชนิดเหมาะสำหรับการทำท่อไอเสียรถยนต์ เนื่องจากราคาถูก ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย โดยมีรายละเอียด ซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ และคุณสมบัติทางกายภาพ แสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ JFE409L และ JFE429EX wt%

Type of Steel	Element						
JFE409L	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
	0.03	1.00	1.00	0.04	0.03	10-11.75	balance
JFE429EX	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
	0.03	1.5	1.00	0.04	0.03	13-16	balance

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ JFE409L และ JFE429EX

Type of Steel	Hardness Test (HV)	Yield Strength (N/mm^2)	Tensile Strength (N/mm^2)	Elongation (%)
JFE409L	175 (สูงสุด)	175 (ต่ำสุด)	360 (ต่ำสุด)	25 (ต่ำสุด)
JFE429EX	200 (สูงสุด)	195 (ต่ำสุด)	360 (ต่ำสุด)	22 (ต่ำสุด)

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ JFE409L และ JFE429EX

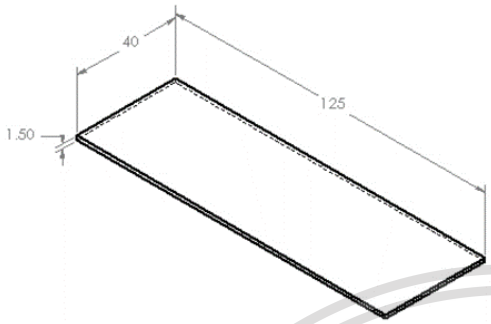
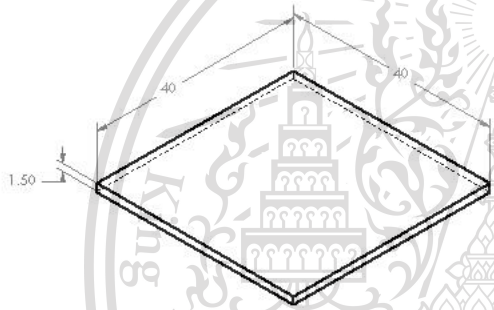
Type of Steel	Specific Heat (J/kg °C)	Density (g/cm^3)	Electric Resistance (μΩ•m)	Thermal Expansion (μ/°C)	Thermal Conductivity (W/m °C)
JFE409L	468	7.74	59	11.4 (20-100°C)	32.9 (100°C)
JFE429EX	460	7.70	67	10.9 (20-100°C)	26.8 (100°C)

3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองเรื่อง การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX เพื่อนำไปทดสอบแรงดึง มีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.4 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	รายละเอียด
	ชิ้นงานสำหรับทำการเชื่อม ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และชนิด JFE429EX ขนาดความยาว 125 มิลลิเมตร ความกว้าง 40 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร
	แผ่นรองรับ (Support) สำหรับการทดสอบแรงดึงเพื่อป้องกันการดัดงอของชิ้นงานขณะทำการทดสอบ โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และชนิด JFE429EX ความยาว 40 มิลลิเมตร ความกว้าง 40 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร
	อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน (Fixture) เพื่อทำการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ตำแหน่งรอยต่อเกย
	เครื่องสำหรับตัดแผ่นโลหะไฮดรอลิคแบบเฉือน (Hydraulic shearing machine) ใช้ตัดโลหะแนวเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	รายละเอียด
	เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding Machine) รุ่น PANASONIC YR-500C ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ หัวกดอิเล็กโทรดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของหัวอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร และแรงกดของหัวอิเล็กโทรด 3.3 กิโลนิวตัน
	เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test machine) ยี่ห้อ SHIMADZU Autograph AG-X-100KN ใช้ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยความเร็วในการดึงชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร/นาที

3.3 การออกแบบการทดลอง Design of Experiments (DOE)

ในงานวิจัยเรื่องการศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ Factorial Design แบบ General Full Factorial Design มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding) เพื่อให้รอยเชื่อมของชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด โดยมีการกำหนดขั้นตอนในการดำเนินงาน แสดงดังแผนภาพการไหลต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 3.1 แผนภูมิการไหลของขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

3.3.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^2 Factorial Design)

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) ประกอบด้วยปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลอง 2 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง การจัดลำดับสำหรับตัวแปรในการทดลองประกอบด้วย 2 ตัวแปร คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง (First pulse current) และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (Second pulse current) ซึ่งได้ทำการกำหนดระดับ และปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม และระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบทดลองเชิงแฟคทอเรียล (3^2 Factorial Design)

ปัจจัย	สัญลักษณ์ของปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
		ต่ำ	กลาง	สูง	
กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง	I_1	7000	8500	10000	แอมแปร์
กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	I_2	7000	8500	10000	แอมแปร์

ในการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ผู้วิจัยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX ความยาว 125 มิลลิเมตร ความกว้าง 40 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกันด้วยรอยต่อเกย ความยาว 40 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z3139 โดยวางเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L ไว้ด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX จากนั้นทำการเชื่อมชิ้นงานบริเวณรอยต่อเกยด้วยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 50 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิตร์ซ หัวกดอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และรัศมีความโค้งของหัวอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร โดยมีระดับขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 3 ระดับ คือ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ ดังตารางที่ 3.5 ในขณะที่ ตัวแปรอื่น ๆ ในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ คือ เวลากดชิ้นงานก่อนปล่อยกระแส (Squeeze time) เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (Welding time) แรงกดของหัวกดอิเล็กโทรด (Electrode force) เวลาในการพักชิ้นงาน (Cooling time) และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Holding time) มีค่าคงที่แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าของตัวแปรอื่น ๆ ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เวลากดชิ้นงานก่อนปล่อยกระแส (cycle)	เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (cycle)	แรงกดของหัวกดอิเล็กโทรด (kN)	เวลาในการพักชิ้นงาน (cycle)	เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (cycle)
45	25	3.3	5	50

3.3.2 การออกแบบการทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

สำหรับการเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว (Single-Pulse Resistance Spot Welding) เพื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนเชื่อมแล้ว มาทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ของรอยเชื่อมกับวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding) ซึ่งในการทดลองเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว จะทำการเชื่อมโดยเปลี่ยนระดับขนาดของกระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ ในส่วนของตัวแปรอื่น ๆ เช่น เวลากดชิ้นงานก่อนปล่อยกระแส (Squeeze time) เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (Welding time) แรงกดของหัวกดอิเล็กโทรด (Electrode force) เวลาในการพักชิ้นงาน (Cooling time) และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Holding time) มีค่าคงที่ ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ (Run) 3 การทดลอง และมีการทำซ้ำ (Replicate) 3 ครั้ง ดังนั้นการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 9 การทดลอง และเป็นการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นนำค่าผลตอบสนอง คือ ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (α = 0.05) โดยใช้โปรแกรม Minitab version 18

ตารางที่ 3.7 การออกแบบการทดลองโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

ลำดับการทดลอง	ขนาดของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม (นิวตัน)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	7000	-	-	-
2	8500	-	-	-
3	10000	-	-	-

3.3.3 การออกแบบการทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

สำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding) กำหนดระดับปัจจัยที่จะใช้ในการออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 3.5 ในส่วนของตัวแปรอื่น ๆ เช่น เวลากดชิ้นงานก่อนปล่อยกระแส (Squeeze time) เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (Welding time) แรงกดของหัวกดอิเล็กโทรด (Electrode force) เวลาในการพักชิ้นงาน (Cooling time) และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Holding time) มีค่าคงที่ กำหนดให้เป็นการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ (Run) 9 การทดลอง และมีการทำซ้ำ (Replicate) 3 ครั้ง ดังนั้นการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลจะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 27 การทดลอง และเป็นการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นนำค่าผลตอบสนอง คือ ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (α = 0.05) โดยจะวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

ลำดับการทดลอง	ขนาดกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง (I_1) (แอมแปร์)	ขนาดกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (I_2) (แอมแปร์)	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม (นิวตัน)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	7000	7000	-	-	-
2	7000	8500	-	-	-
3	7000	10000	-	-	-
4	8500	7000	-	-	-
5	8500	8500	-	-	-
6	8500	10000	-	-	-
7	10000	7000	-	-	-
8	10000	8500	-	-	-
9	10000	10000	-	-	-

3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองและสรุปผลการทดลองเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab18 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังนี้ต่อไปนี้

3.3.4.1 <u>การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)</u>

วิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลการทดลอง และความเป็นอิสระของข้อมูล โดยตรวจสอบว่าข้อมูลที่เราเก็บมานั้นเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ และข้อมูลที่ได้ควรจะมีการกระจายตัวแบบเท่า ๆ กัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normal Distribution of residuals)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independent of Residual)

3. การตรวจสอบความเสถียรของค่าส่วนตกค้าง (Variance Stability of residuals)

4. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกตกค้าง (Mean of Residuals)

3.3.4.2 <u>การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)</u>

วิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (α = 0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. วิเคราะห์ค่าอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effects Plot) สามารถใช้ในการพิจารณารูปแบบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญ เพื่อทราบเงื่อนไขในการทดลอง

2. วิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) สามารถใช้ในการพิจารณารูปแบบของอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญสำหรับการทดลอง

3.3.4.3 <u>การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง (Response Optimizer)</u>

เพื่อหาปริมาณของค่าปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมของชิ้นงานที่แข็งแรงที่สุดในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

3.3.4.4 <u>การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม (Boxplot)</u>

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม ระหว่างการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

3.4 กระบวนการเชื่อมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX เพื่อนำไปทดสอบแรงดึงหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม

3.4.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดลองเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่

1. เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ขนาดความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร ความกว้าง 40 มิลลิเมตร จำนวน 36 ชิ้น สำหรับตัดแผ่นรองรับในการทดสอบแรงดึง

2. เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ขนาดความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 125 มิลลิเมตร ความกว้าง 40 มิลลิเมตร จำนวน 9 ชิ้น สำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

3. เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ขนาดความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 125 มิลลิเมตร ความกว้าง 40 มิลลิเมตร จำนวน 27 ชิ้น สำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

3.4.2 การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่เพื่อทดสอบแรงดึง

ในการออกแบบขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ คณะผู้จัดทำได้ออกแบบขั้นตอนการทดลอง และรูปแบบของชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบแรงดึง ดังต่อไปนี้

1. วางชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมลงบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน โดยวางเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L ไว้ด้านบนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ทำการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) กับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดให้เหมาะสมกับหัวกดอิเล็กโทรด และทำการตรวจสอบให้แน่ใจว่าชิ้นงานมีความพร้อมสำหรับทำการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่

3. ตั้งค่าตัวแปรตามที่กำหนดบนเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดให้เรียบร้อย และตรวจสอบซ้ำอีกครั้ง

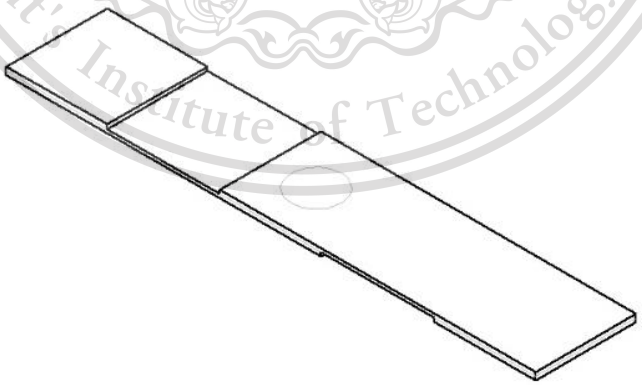
4. ทำการเชื่อมชิ้นงานโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ หัวกดอิเล็กโทรดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของหัวอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร และแรงกดของหัวอิเล็กโทรด 3.3 กิโลนิวตัน

5. หลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

6. ติดแผ่นรองรับไว้บนชิ้นงานเชื่อมที่จะนำไปทดสอบแรงดึง และบันทึกค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิมและแผ่นรองรับเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเดียวกัน ลักษณะของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง แสดงดังรูปที่ 3.2

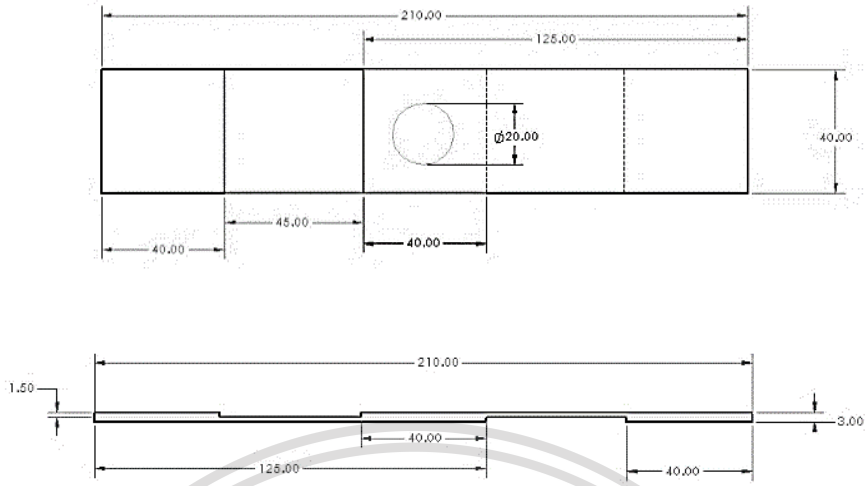
7. ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงด้วยความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที

8. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงไปทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab version 18 ได้แก่ ค่าความถูกต้องของการทดลอง ค่าความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานต้านแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงสุด



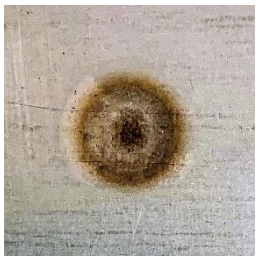
รูปที่ 3.2 ลักษณะของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



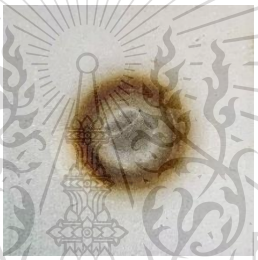
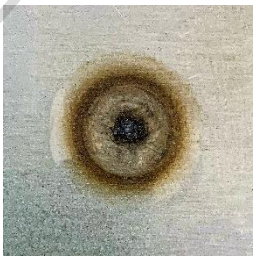
รูปที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.9 ลักษณะรอยเชื่อมของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

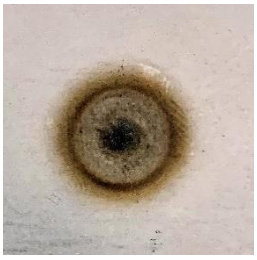
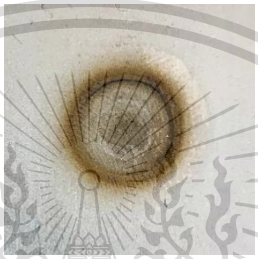
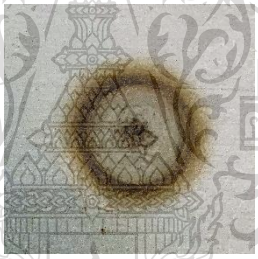
ขนาดของกระแสไฟฟ้า	เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L	เหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX
7000 แอมแปร์		
8500 แอมแปร์		
10000 แอมแปร์		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.10 ลักษณะรอยเชื่อมของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง	ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L	เหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX
7000 แอมแปร์	7000 แอมแปร์		
7000 แอมแปร์	8500 แอมแปร์		
7000 แอมแปร์	10000 แอมแปร์		
8500 แอมแปร์	7000 แอมแปร์		
8500 แอมแปร์	8500 แอมแปร์		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

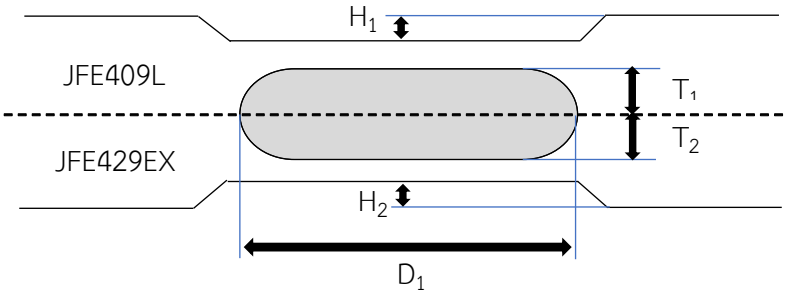
ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง	ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L	เหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX
8500 แอมแปร์	10000 แอมแปร์		
10000 แอมแปร์	7000 แอมแปร์		
10000 แอมแปร์	8500 แอมแปร์		
10000 แอมแปร์	10000 แอมแปร์		

3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

หลังจากทำการทดลองเชื่อมชิ้นงาน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองเสร็จสิ้นแล้ว ในขั้นตอนนี้เป็นการการเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ทำการเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่เรียบร้อยแล้วมา Cross-Section บริเวณตรงกลางรอยเชื่อม โดยให้ชิ้นงานมีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 20 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

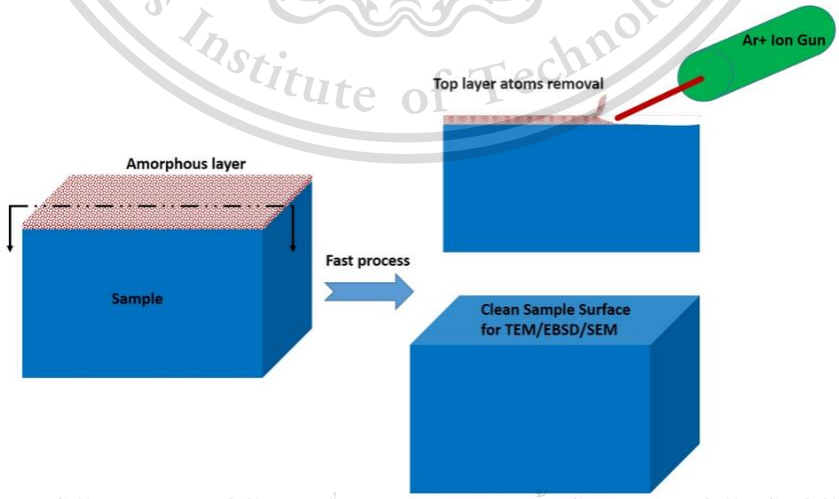


รูปที่ 3.4 Cross-section ชิ้นงานเชื่อม กำหนดให้สัญลักษณ์ D_1 คือ Nugget diameter T_1 T_2 คือ Depth of fusion และ H_1 H_2 คือ Indentation depth

2. นำชิ้นงานที่ตัด Cross-section แล้วทำการขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold mounting) ชิ้นงานจะถูกวางในแบบหล่อ จากนั้นผสมสาร Epoxy เข้าด้วยกัน โดยสารชนิดนี้มีการหดตัวต่ำสุด และระยะเวลาในการเซทตัวนาน แต่มีแรงยึดเกาะระหว่างชิ้นงานกับเรซิ่นดีมาก สามารถใช้กับระบบสุญญากาศได้

3. ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 400 800 1200 2000 และ 4000 ตามลำดับ เพื่อเปิดหน้าชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดด้วยผงเพชร (Diamond polishing: DP) ซึ่งเป็นผงขัดที่มีอำนาจในการขัดสูง และได้ระนาบดีที่สุด ทำให้ลดเวลาในการขัดลงได้มาก ขั้นตอนสุดท้ายนำไปขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน และ 0.3 ไมครอนตามลำดับ ล้างด้วยน้ำเปล่าและเป่าให้แห้ง

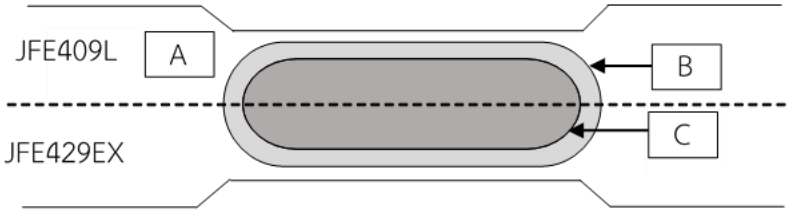
4. กัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิค (ion milling) โดยไอออนพลังงานสูงจะทำปฏิกิริยากับอะตอมพื้นผิวในชั้นอสัณฐานด้านบนของตัวอย่าง เพื่อเผยให้เห็นพื้นผิวที่สะอาดระดับอะตอม ซึ่งเป็นการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้มีความเรียบยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.5 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นฐาน (Base Metal) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) และบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ)



รูปที่ 3.6 Cross-section ชิ้นงานเชื่อม กำหนดให้ (A) คือ บริเวณโลหะพื้นฐาน (B) คือ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) และ (C) คือ บริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการของการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัย โดยวิธีการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX เพื่อทำการทดสอบแรงดึง และวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม อีกทั้งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยผลการทดลองดังกล่าว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว (Single-Pulse Resistance Spot Welding)

2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding)

3. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

4. รูปแบบความเสียหายของรอยเชื่อม (Resistance Spot Welding Failure Modes)

5. โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นฐาน (Base Metal) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

6. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

7. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

8. การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว (Single-Pulse Resistance Spot Welding)

ในการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปร คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม และระดับของตัวแปร รวมถึงค่าตอบสนอง หรือค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงเฉือนของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

ในการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว สำหรับในกรณีศึกษานี้ มีตัวแปร หรือพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 1 ตัวแปร กำหนดให้มี 3 ระดับ ได้แก่ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ โดยมีการทดลองจำนวน (Run) 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีการทำซ้ำ (Replicate) 3 ครั้ง ดังนั้นการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 9 การทดลอง และเป็นการทดลองแบบสุ่ม หลังจากทำการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวแล้ว นำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึง (Tensile shear testing) ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

ลำดับการทดลอง	ขนาดของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม (นิวตัน)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	7000	8026.15	8163.14	8201.84
2	8500	11828.22	12990.84	11441.71
3	10000	14536.44	15463.05	14204.79

4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

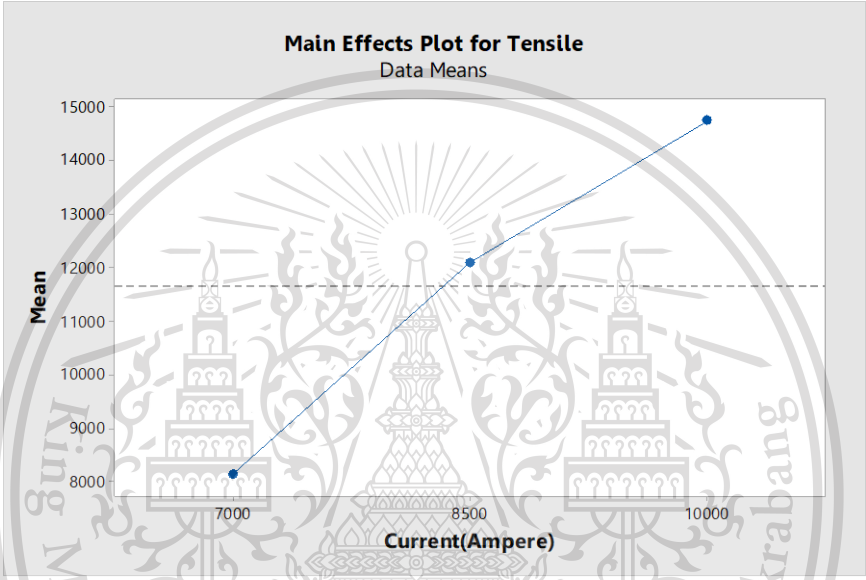
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab version 18 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (α=0.05) จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่า p-value < 0.05 อย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าขนาดของกระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลอย่างมีสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความผันแปรต่าง ๆ ของการทดลองสามารถควบคุมได้ เท่ากับ 95.78% ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Current (Ampere)	2	66283180	33141590	91.72
Error	6	2167942	361324	-
Total	8	68451122	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. การวิเคราะห์กราฟของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยใช้โปรแกรม Minitab 18 โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมกับขนาดของกระแสไฟฟ้า พบว่ากราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงค่ากลางที่กำหนดในระดับปัจจัยแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้ค่าระดับปัจจัยสูงสุด ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งที่ใช้ในการเชื่อมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อิทธิพลหลักของปัจจัย คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse Resistance Spot Welding)

ในการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปร คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม และระดับของตัวแปร รวมถึงค่าตอบสนองหรือค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม

4.2.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงเฉือนของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

ในการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ สำหรับในกรณีศึกษานี้ มีตัวแปรหรือพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง (First pulse current) และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง (Second pulse current) โดยกำหนดการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^2) ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ (Run) 9 การทดลอง และมีการทำซ้ำ (Replicate) 3 ครั้ง ดังนั้นการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลจะมีการทดลองทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เท่ากับ 27 การทดลอง และเป็นการทดลองแบบสุ่ม หลังจากทำการเชื่อมต้านทานจุดแบบพัลส์คู่แล้ว นำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Shear Testing) หรือค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม ซึ่งผลการทดลองค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ แสดงดังตารางที่ 4.3

จากนั้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab version 18 โดยทำการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังนี้ การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (α = 0.05) และการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง (Response Optimizer)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ (3^2)

ลำดับการทดลอง	ขนาดกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง (I_1) (แอมแปร์)	ขนาดกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (I_2) (แอมแปร์)	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม (นิวตัน)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	7000	7000	10657.10	10256.56	10145.70
2	7000	8500	11727.06	11589.59	11514.89
3	7000	10000	12923.77	12974.91	12439.81
4	8500	7000	10491.50	11304.38	10573.72
5	8500	8500	13651.08	11327.62	12870.47
6	8500	10000	14155.90	13196.59	13036.75
7	10000	7000	15411.71	15151.12	14551.75
8	10000	8500	14685.77	14836.85	14864.29
9	10000	10000	14456.57	14655.21	14536.83

4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลการทดลอง และความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งผลการตรวจสอบ แสดงดังรูปที่ 4.2

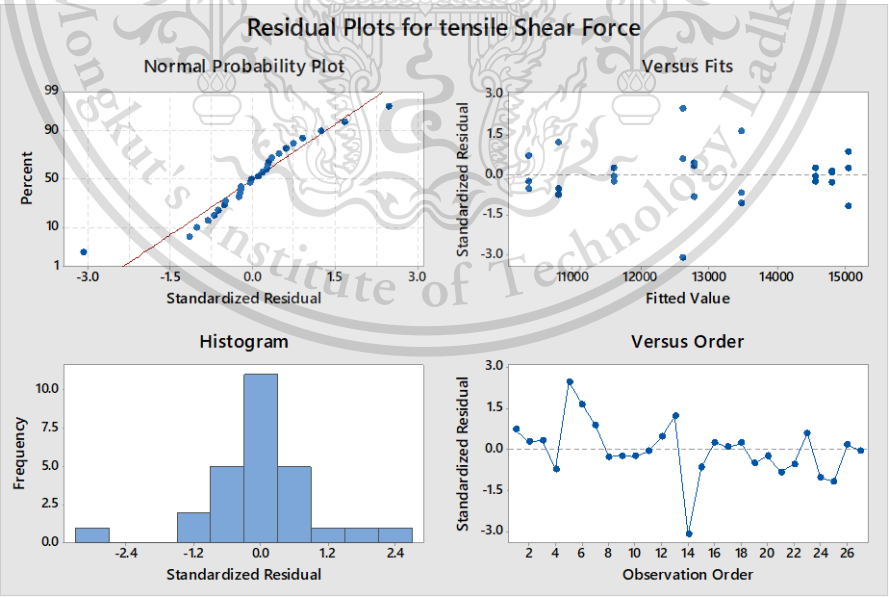
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normal Distribution of Residuals) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independent of Residual) พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่อิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

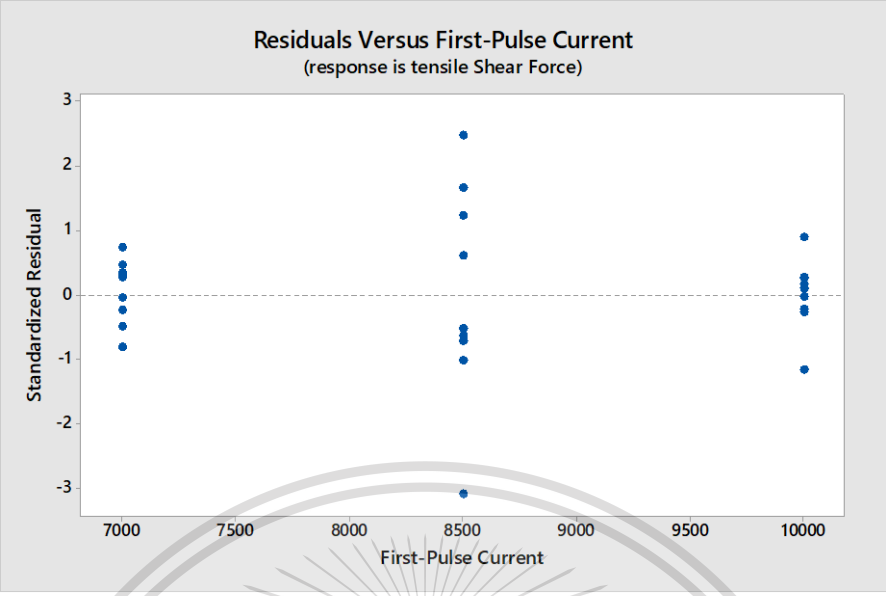
3. การตรวจสอบความเสถียรของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted value พบว่าค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

4. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกตกค้าง (Mean of Residuals) สร้างเป็นแผนภูมิแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับระดับของปัจจัยทุกตัว จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมเทียบกับขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งและขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง พบว่าค่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับศูนย์

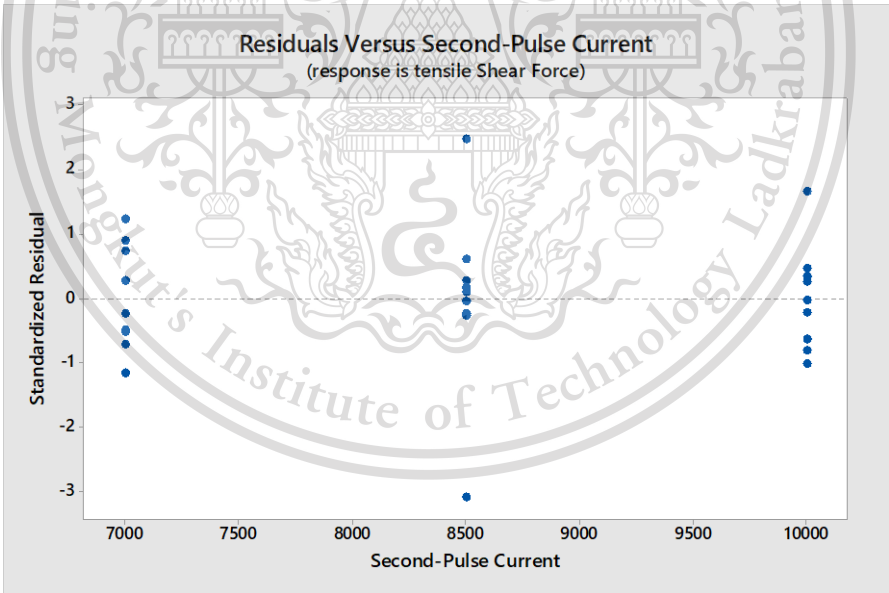


รูปที่ 4.2 Residual plots ของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ (3^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม เทียบกับกระแสไฟฟ้าพัลส์แรก



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม เทียบกับกระแสไฟฟ้าพัลส์สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง เป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้น และข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab 18 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α=0.05)

1. ปัจจัยที่มีผลโดยตรง (Main Effect) ต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ซึ่งค่า p-value < 0.05 อย่างมีนัยสำคัญ

2. ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way interaction effect) คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ซึ่งค่า p-value < 0.05 อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (3^2)

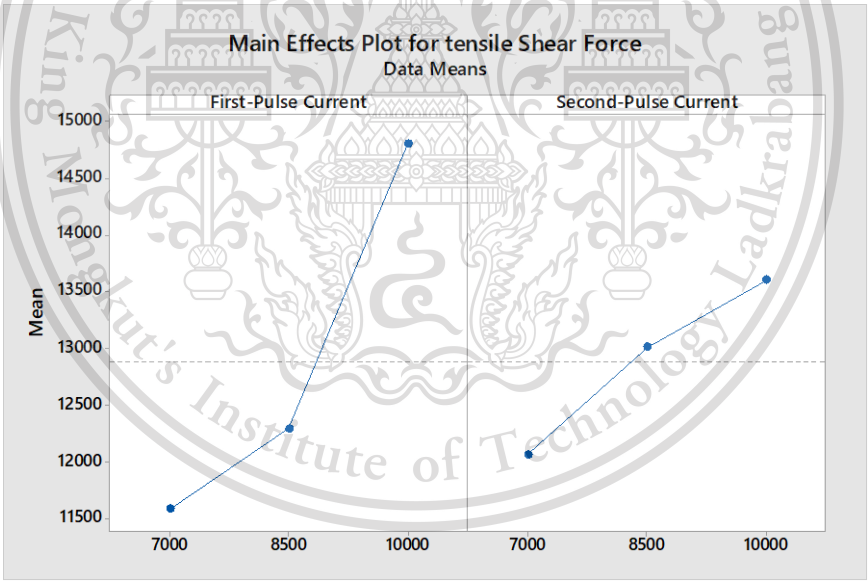
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	71696964	8962120	34.33	0.001
Linear	4	62126916	15531729	59.49	0.001
First-Pulse Current	2	51305619	25652810	98.26	<0.001
Second-Pulse Current	2	10821297	5410649	20.72	<0.001
2-Way Interactions	4	9570047	2392512	9.16	0.001
First-Pulse Current * Second-Pulse Current	4	9570047	2392512	9.16	<0.001
Error	18	4699266	261070	-	-
Total	26	76396230	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. การวิเคราะห์กราฟของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยใช้โปรแกรม Minitab 18 สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองแบบแฟคทอเรียล (3^2) และแสดงเป็นแผนภาพของอิทธิผลจากปัจจัยหลักต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.4

3.1 ปัจจัยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง (First pulse current) มีลักษณะเส้นกราฟเพิ่มขึ้นแต่ไม่ถึงค่ากลางที่กำหนดในระดับปัจจัย แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าใกล้ค่าระดับปัจจัยสูงสุด ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งที่ใช้ในการเชื่อมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

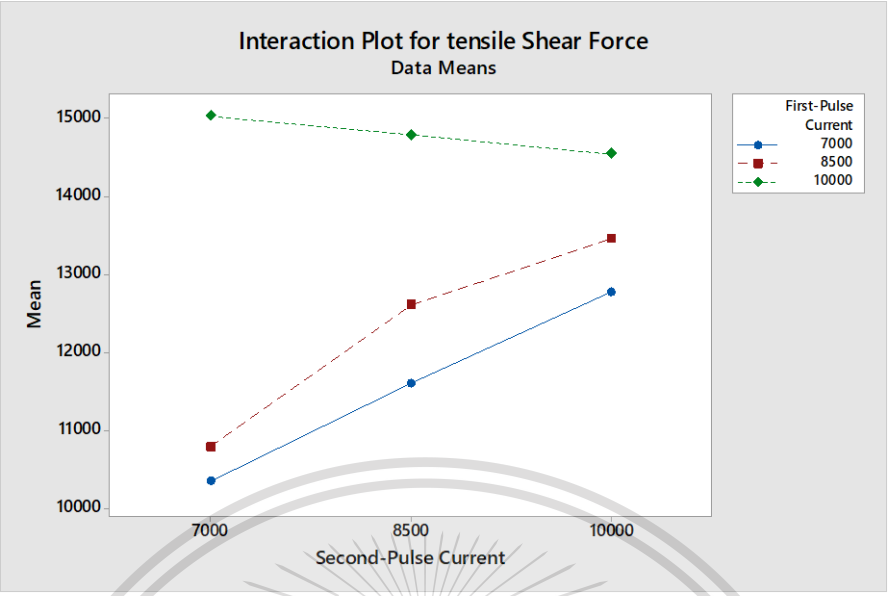
3.2 ปัจจัยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง (Second pulse current) มีลักษณะเส้นกราฟเพิ่มขึ้นจนถึงค่ากลางที่กำหนด แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้ค่าระดับปัจจัยสูงสุด ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่ใช้ในการเชื่อมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของปัจจัย คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สอง

4. อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง โดยการเชื่อมของกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะไม่ขนานกัน แสดงดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



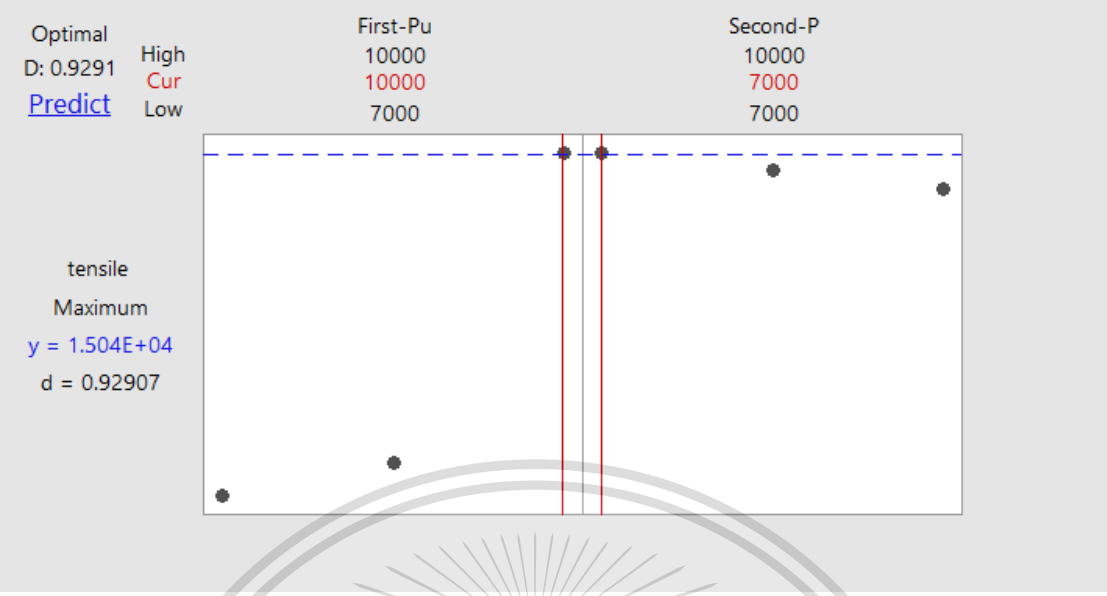
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สอง

4.2.4 วิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง (Response optimizer)

การทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 18 เลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง การหาค่าสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ แสดงดังรูปที่ 4.6

ในการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปได้ว่า ถ้าต้องการให้เกิดค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงสุด ต้องเลือกใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้นตามระดับปัจจัยที่กำหนด ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกันเมื่อปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองเข้าไปในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ พบว่าในช่วงขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่งมีค่า 7000 และ 8500 แอมแปร์ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองเพิ่มขึ้นตามระดับปัจจัยที่กำหนด คือ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ พบว่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงจุดที่ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงสุด เมื่อเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองตามระดับปัจจัยที่กำหนด ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม

4.3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว และการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมทั้ง 12 เงื่อนไข ระหว่างการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ แสดงดังตารางที่ 4.5

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองได้จำแนกผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะมีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม โดยมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว 1 ชุด ซึ่งจะประกอบด้วย 3 เงื่อนไข และจากการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ 3 ชุด ประกอบด้วย 9 เงื่อนไข

1. ผลการทดลองกลุ่มที่ 1 เปรียบเทียบผลการทดลอง โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 7000 แอมแปร์ กับค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ชุดที่ 1 ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข ได้แก่

1.1 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 7000 แอมแปร์

1.2 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 8500 แอมแปร์

1.3 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 10000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมทั้ง 12 เงื่อนไข

เงื่อนไข	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) ครั้งที่ 1	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) ครั้งที่ 2	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อม			ค่าเฉลี่ย (นิวตัน)
			ครั้งที่ 1 (นิวตัน)	ครั้งที่ 2 (นิวตัน)	ครั้งที่ 3 (นิวตัน)	
1	7000	-	8026.15	8163.14	8201.84	8130.38
2	8500	-	11828.22	12990.84	11441.71	12086.92
3	10000	-	14536.44	15463.05	14204.79	14734.76
4	7000	7000	10657.10	10256.56	10145.7	10353.12
5	7000	8500	11727.06	11589.59	11514.89	11610.51
6	7000	10000	12923.77	12974.91	12439.81	12779.50
7	8500	7000	10491.50	11304.38	10573.72	10789.87
8	8500	8500	13651.08	11327.62	12870.47	12616.39
9	8500	10000	14155.90	13196.59	13036.39	13462.96
10	10000	7000	15411.71	15151.12	14551.75	**15038.19**
11	10000	8500	14685.77	14836.85	14864.29	14795.64
12	10000	10000	14456.57	14655.21	14536.83	14549.54

จากรูปที่ 4.8 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ในชุดที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ ทุกเงื่อนไข

2. ผลการทดลองกลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบผลการทดลอง โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 8500 แอมแปร์ กับค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ชุดที่ 2 ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข ได้แก่

2.1 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 7000 แอมแปร์

2.2 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และชนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 8500 แอมแปร์

2.3 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 10000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.8 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ สำหรับเงื่อนไขที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ แต่ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ สำหรับเงื่อนไขที่ 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์

3. ผลการทดลองกลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบผลการทดลอง โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 10000 แอมแปร์ กับค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ชุดที่ 3 ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข ได้แก่

3.1 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 7000 แอมแปร์

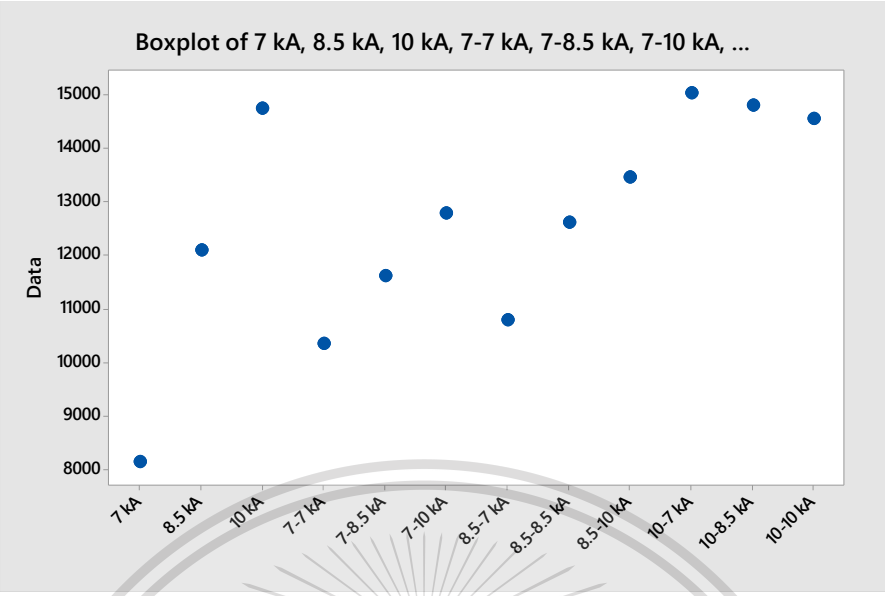
3.2 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 8500 แอมแปร์

3.3 ขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งที่สอง 10000 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.8 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ สำหรับเงื่อนไขที่ 1 และเงื่อนไขที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ แต่ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ สำหรับเงื่อนไขที่ 3 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์

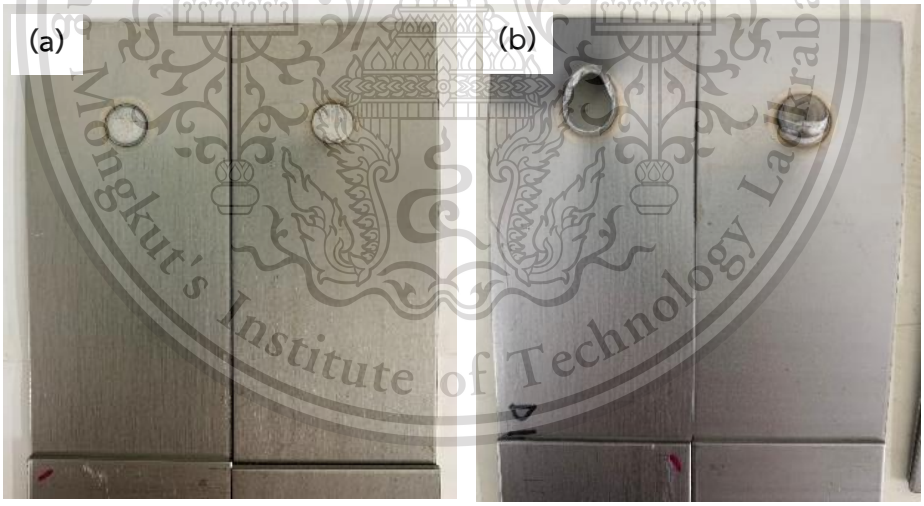
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 Boxplot ของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของรอยเชื่อม

4.4 รูปแบบความเสียหายของรอยเชื่อม (RSW Failure Modes)



รูปที่ 4.9 (a) ลักษณะความเสียหายแบบ Interfacial failure mode (b) ลักษณะความเสียหายแบบ Pull out failure mode

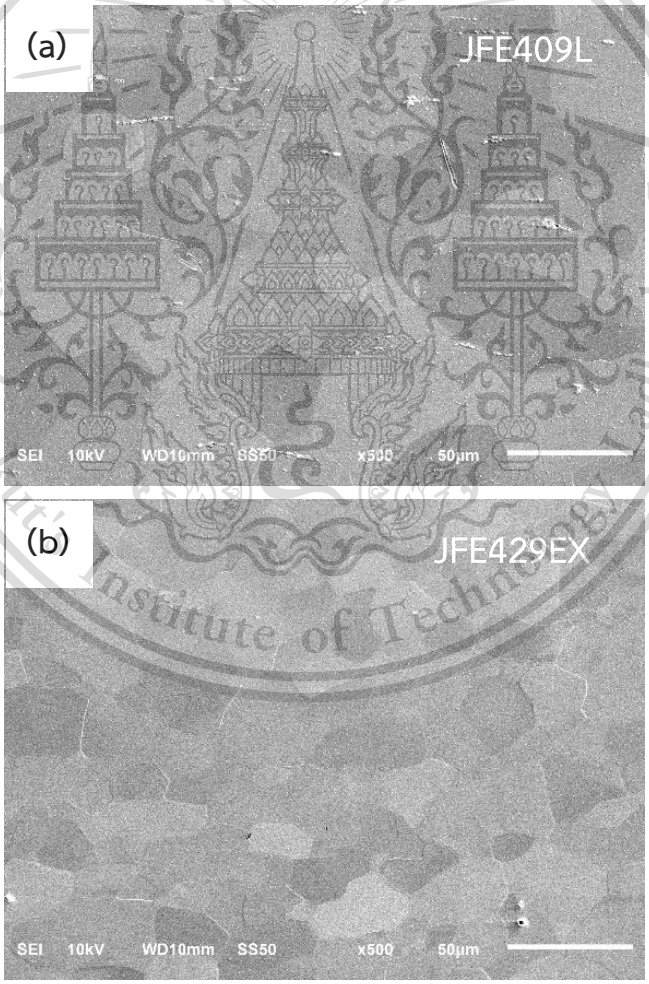
เมื่อทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมโดยวิธีการทดสอบแรงดึง พบว่าความเสียหายของชิ้นงานที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ Interfacial failure mode เป็นการขาดแยกของชิ้นงานออกเป็นสองส่วนที่บริเวณกึ่งกลางของนักเก็ตรอยเชื่อม และ Pull out failure mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นความเสียหายของชิ้นงานโดยเริ่มต้นจาก ในส่วน HAZ (Heat Affect Zone) และแพร่กระจายความเสียหายไปรอบ ๆ จุดเชื่อม ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.9

4.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

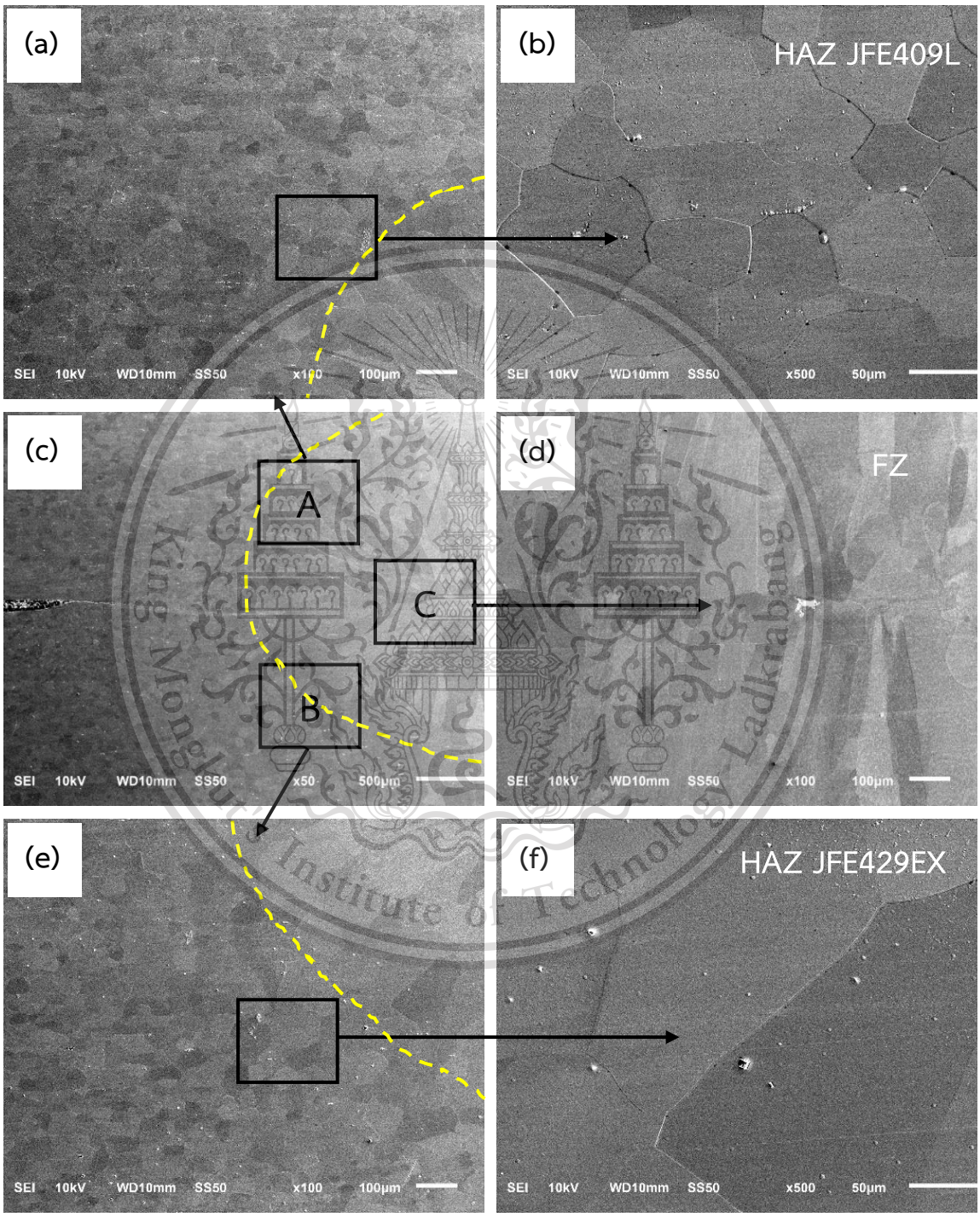
วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานจุด ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด JFE429EX จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L คือเฟอร์ริติก และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX คือเฟอร์ริติกเช่นเดียวกัน แต่ลักษณะเกรนของ JFE429EX มีความหยาบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับลักษณะเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L แสดงดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) JFE409L (b) JFE429EX

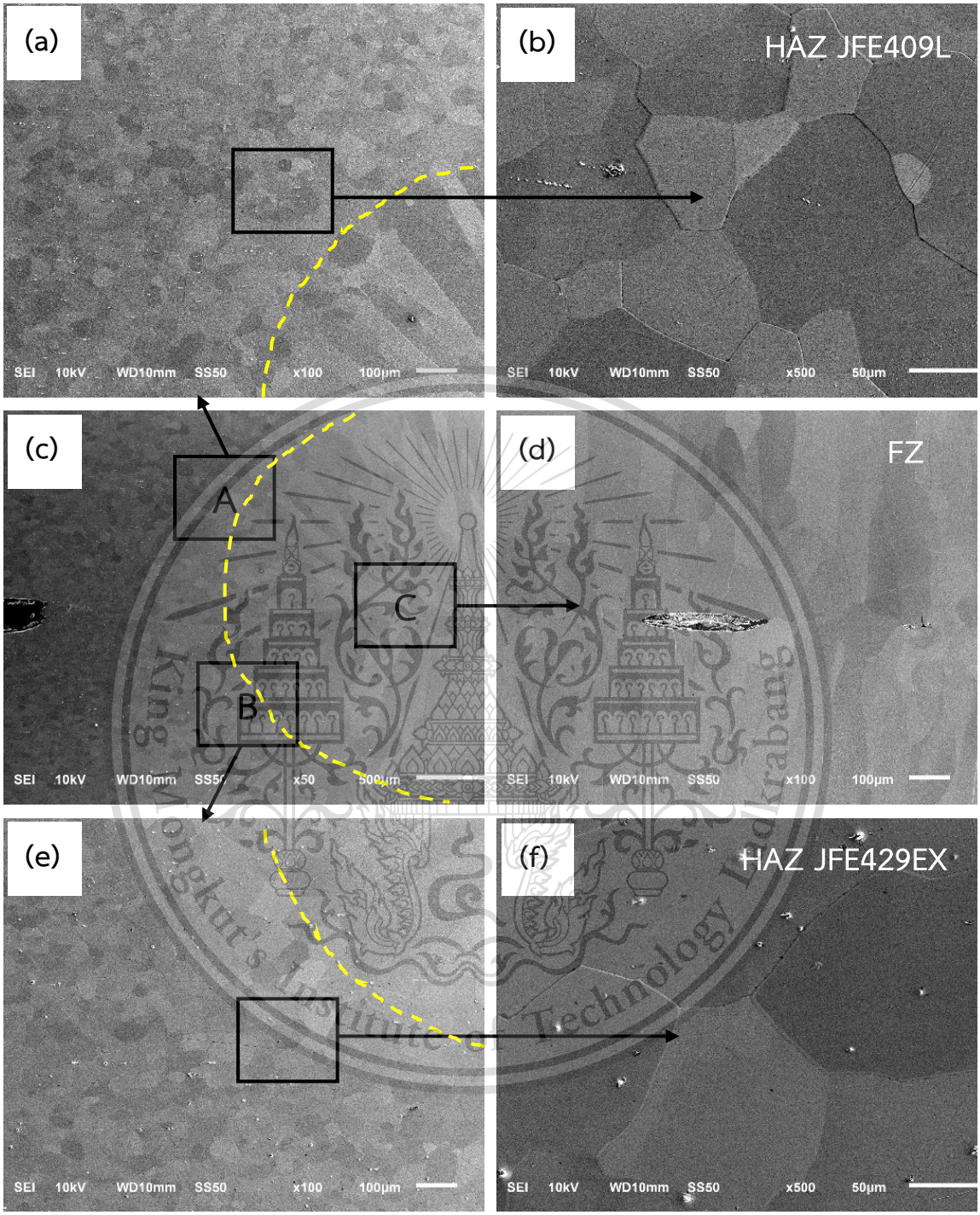
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



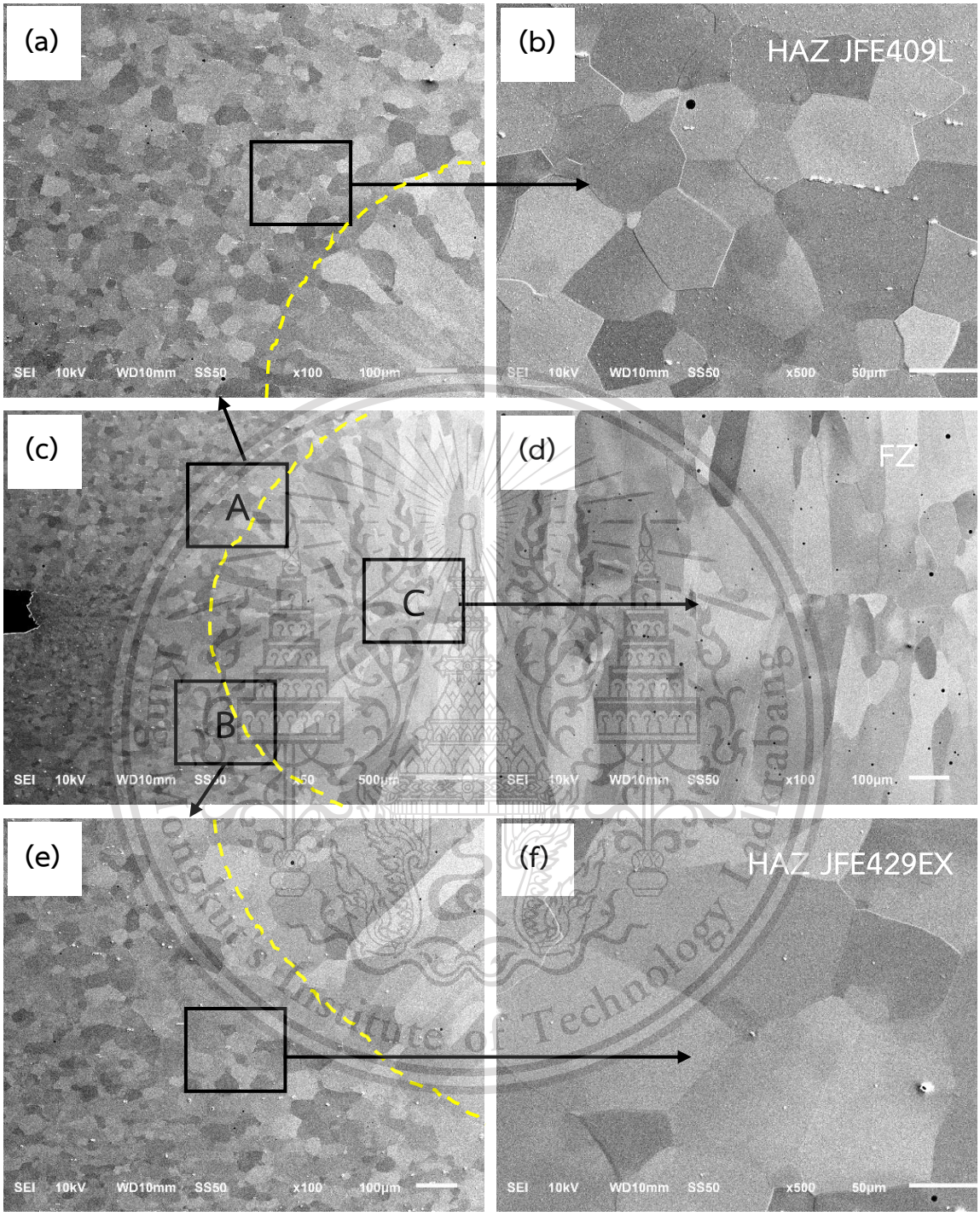
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดียวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

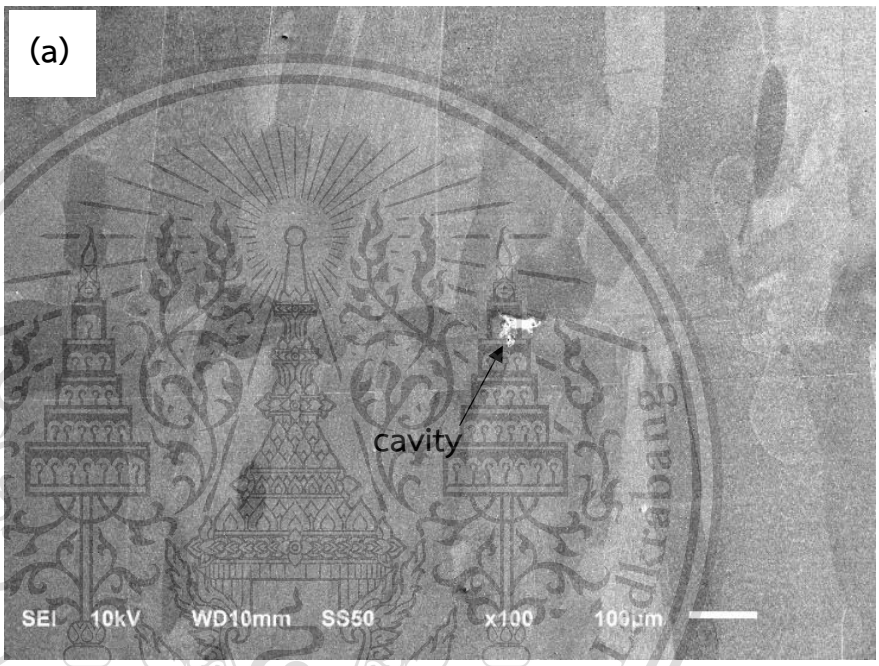
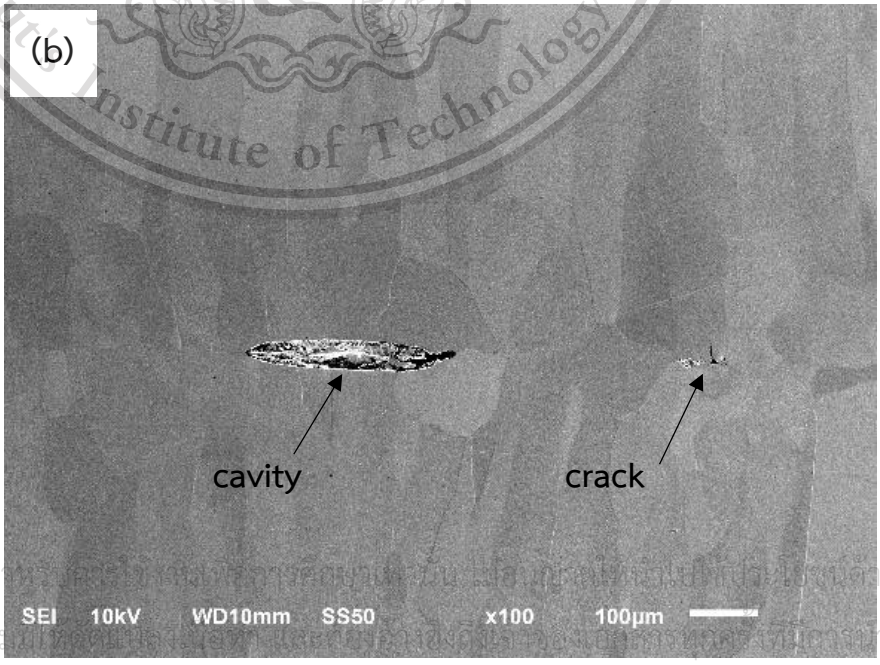


รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

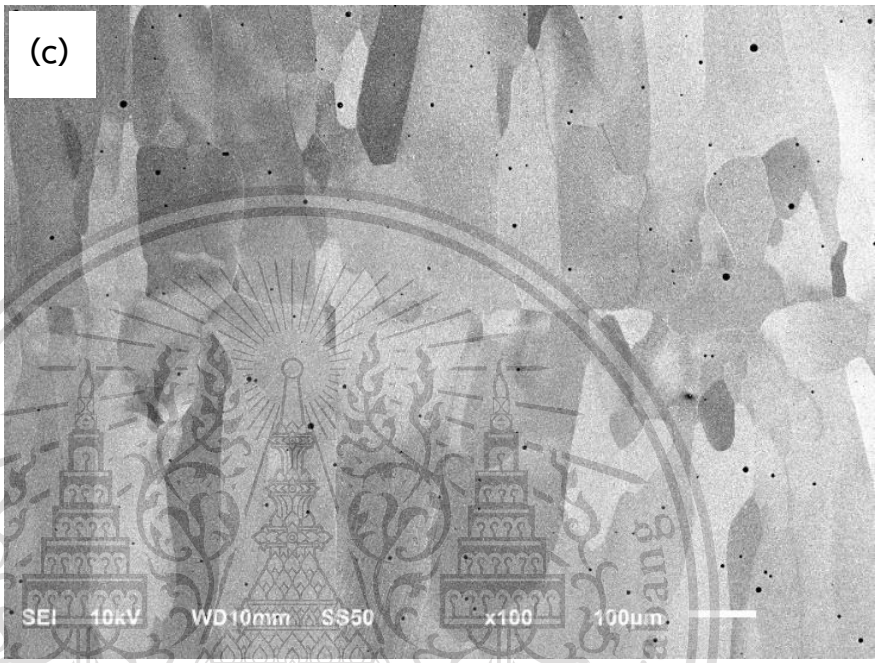
4.6.1 ลักษณะการเกิดความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

ตารางที่ 4.6 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

ขนาดของกระแสไฟฟ้า	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังขยาย 100 เท่า
7000 แอมแปร์	
8500 แอมแปร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.6 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

กระแสไฟฟ้า	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังงยาย 100 เท่า
10000 แอมแปร์	

4.6.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

จากรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยแบ่งลักษณะการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ รูป (a) และ (b) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L ซึ่งเป็นชิ้นงานที่อยู่ด้านบนในกระบวนการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยว รูป (c) และ (d) แสดงบริเวณโลหะที่เกิดการหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ) รูป (e) และ (f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ซึ่งเป็นชิ้นงานที่อยู่ด้านล่างในกระบวนการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยว สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว ประกอบด้วยชิ้นงาน 3 ชิ้น และภายใต้เงื่อนไขการเชื่อม คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ตามลำดับ พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแต่ละเงื่อนไขจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.11(a), 4.11(b), 4.11(e) และ 4.11(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.11(c) และ 4.11(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และมีโพรง (Cavity) ขนาดเล็กเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางบริเวณรอยเชื่อม (Nugget welded) ดังรูป (a) ในตารางที่ 4.6

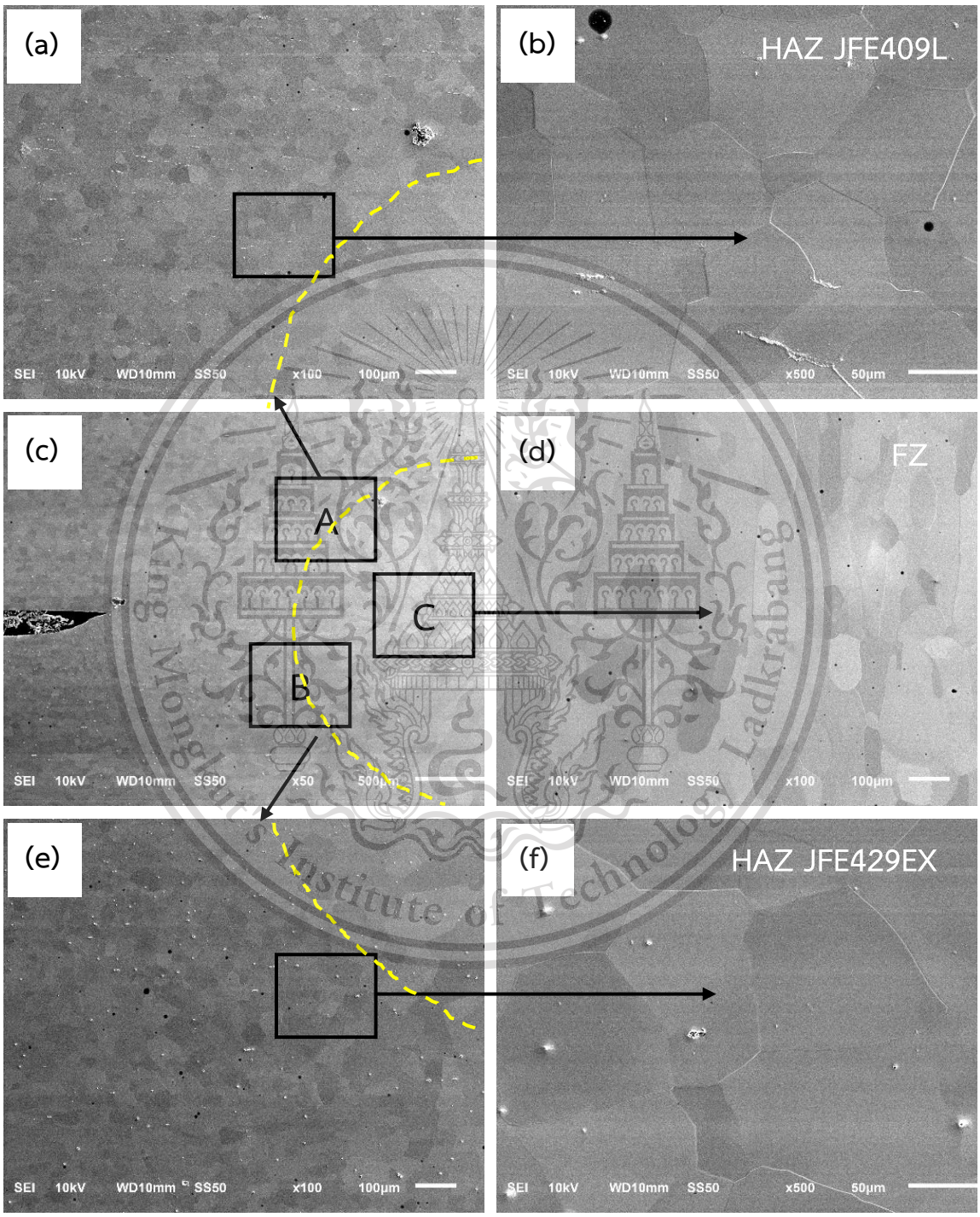
จากรูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.12(a), 4.12(b), 4.12(e) และ 4.12(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.12(c) และ 4.12(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และที่จุดกึ่งกางของรอยเชื่อม (Nugget welded) มีโพรง (Cavity) เกิดขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงาน และเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก ดังรูป (b) ในตารางที่ 4.6

จากรูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.13(a), 4.13(b), 4.13(e) และ 4.13(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.13(c) และ 4.13(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และไม่มีจุดบกพร่องในรอยเชื่อม ดังรูป (c) ในตารางที่ 4.6

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว (single pulse resistance spot welding) ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ พบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง แต่เกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L มีขนาดเล็ก และละเอียดมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ส่วนบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) เหมือนกันทั้ง 3 เงื่อนไข แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้รอยเชื่อม (Nugget welded) มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไปที่ 10000 แอมแปร์ พบว่าไม่เกิดโพรงที่จุดกึ่งกลางของรอยเชื่อม

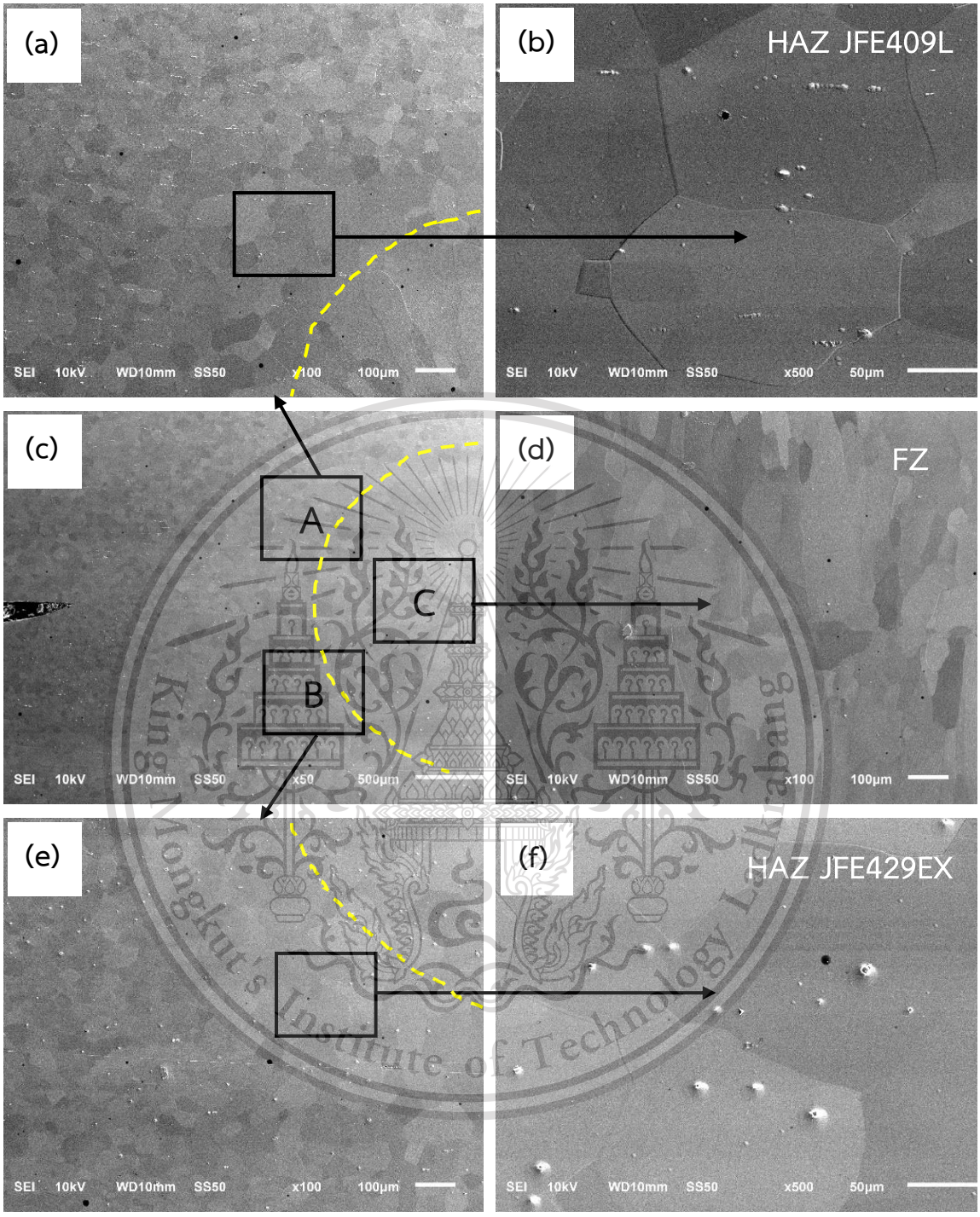
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



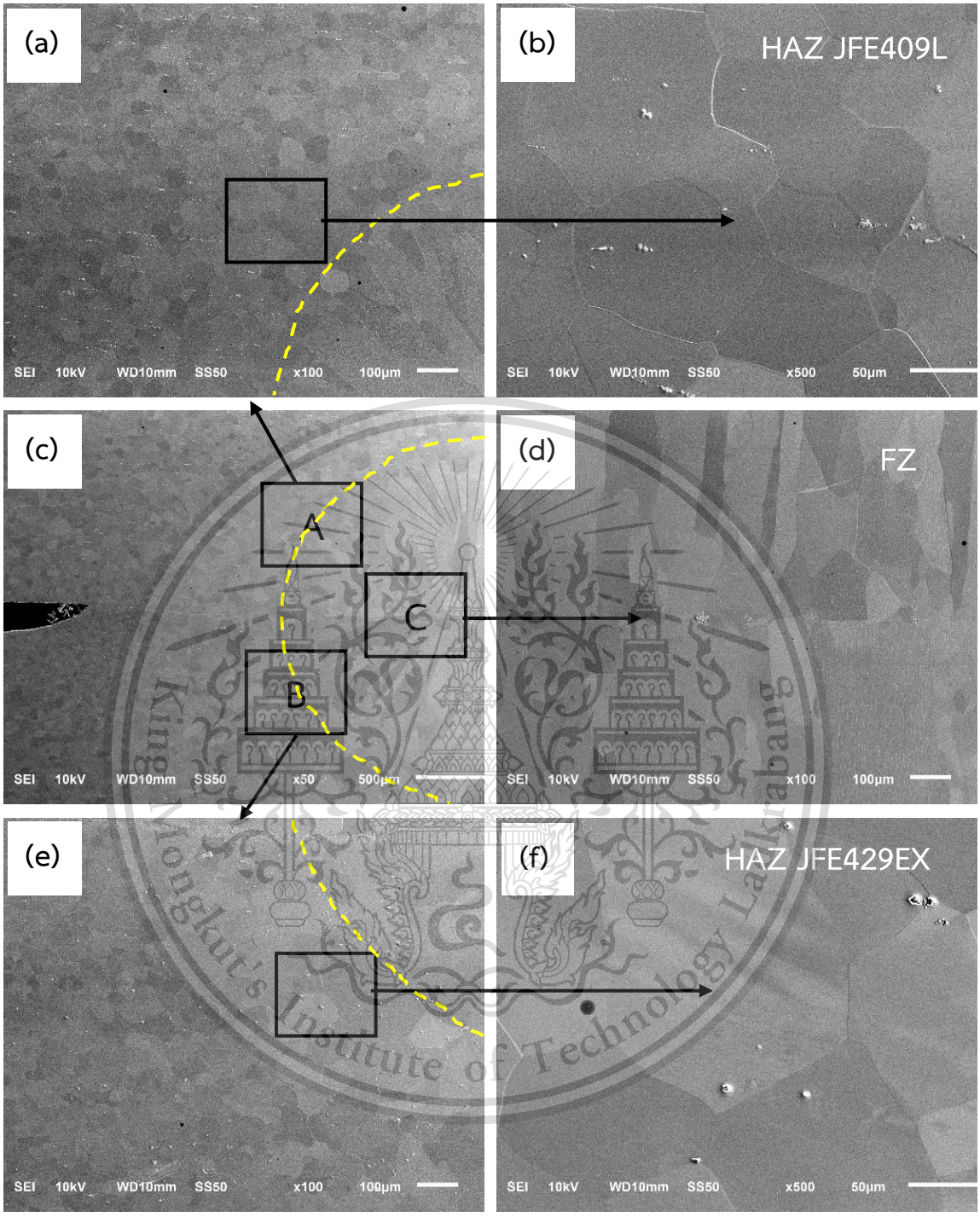
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 7000 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



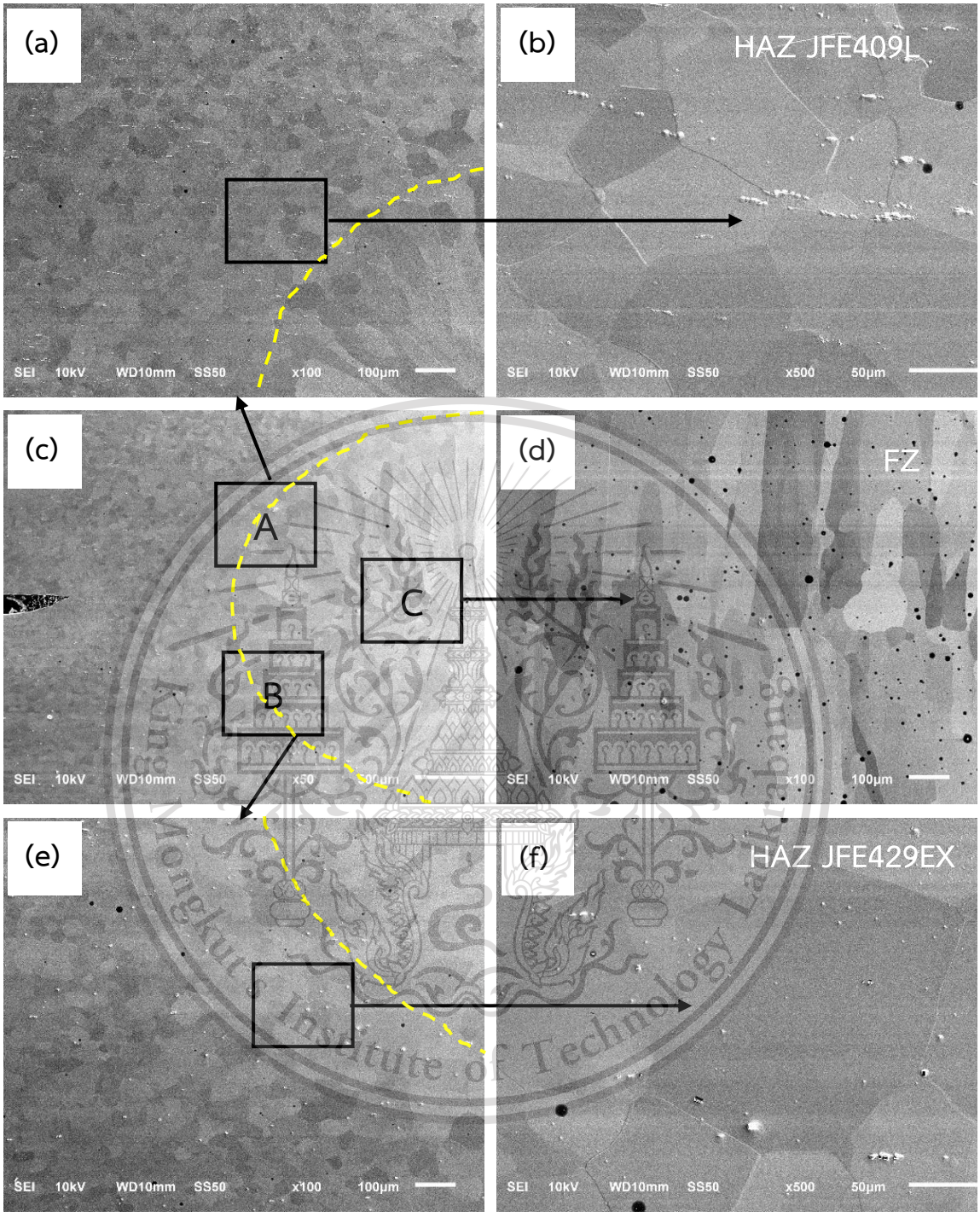
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 7000 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



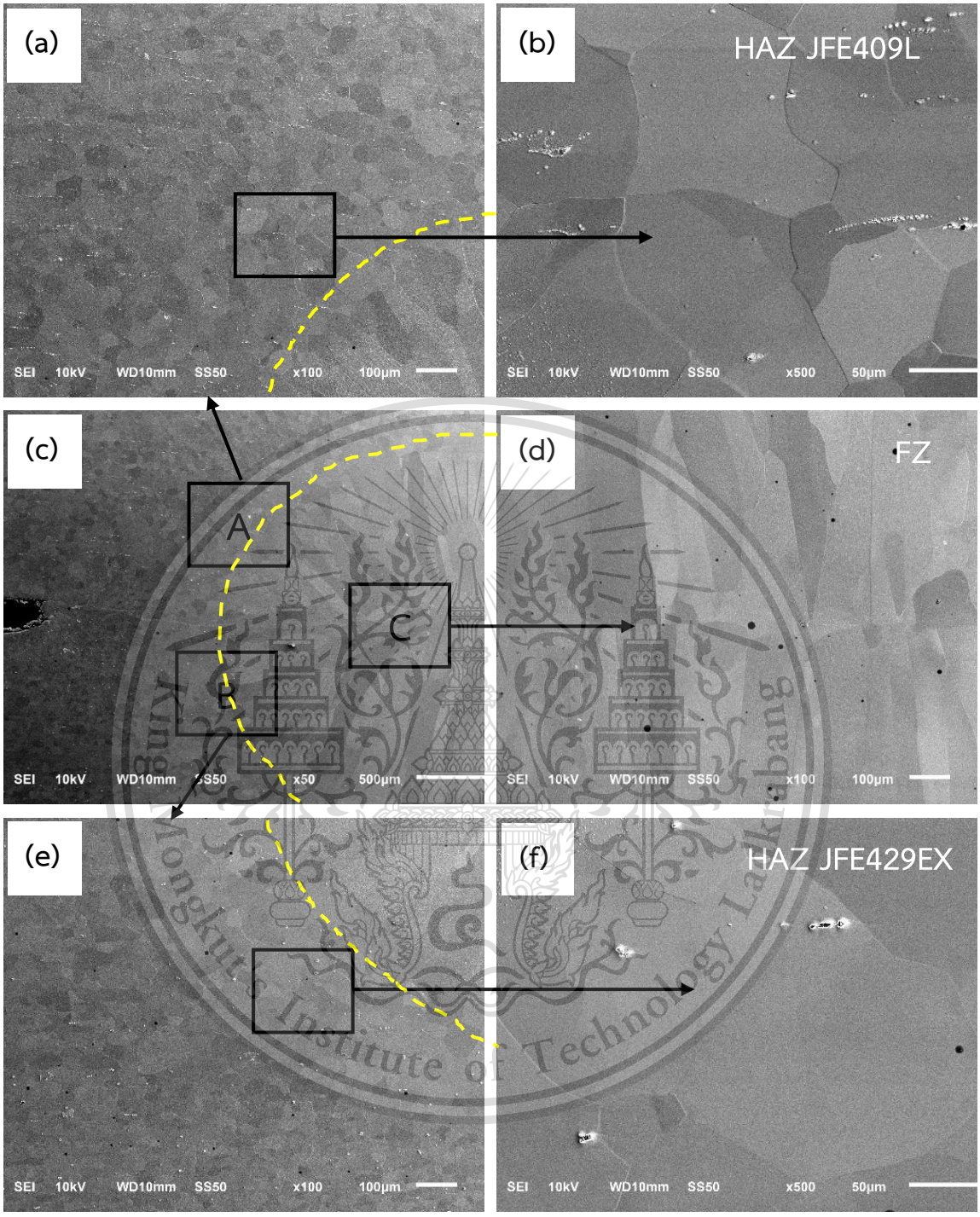
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 7000 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



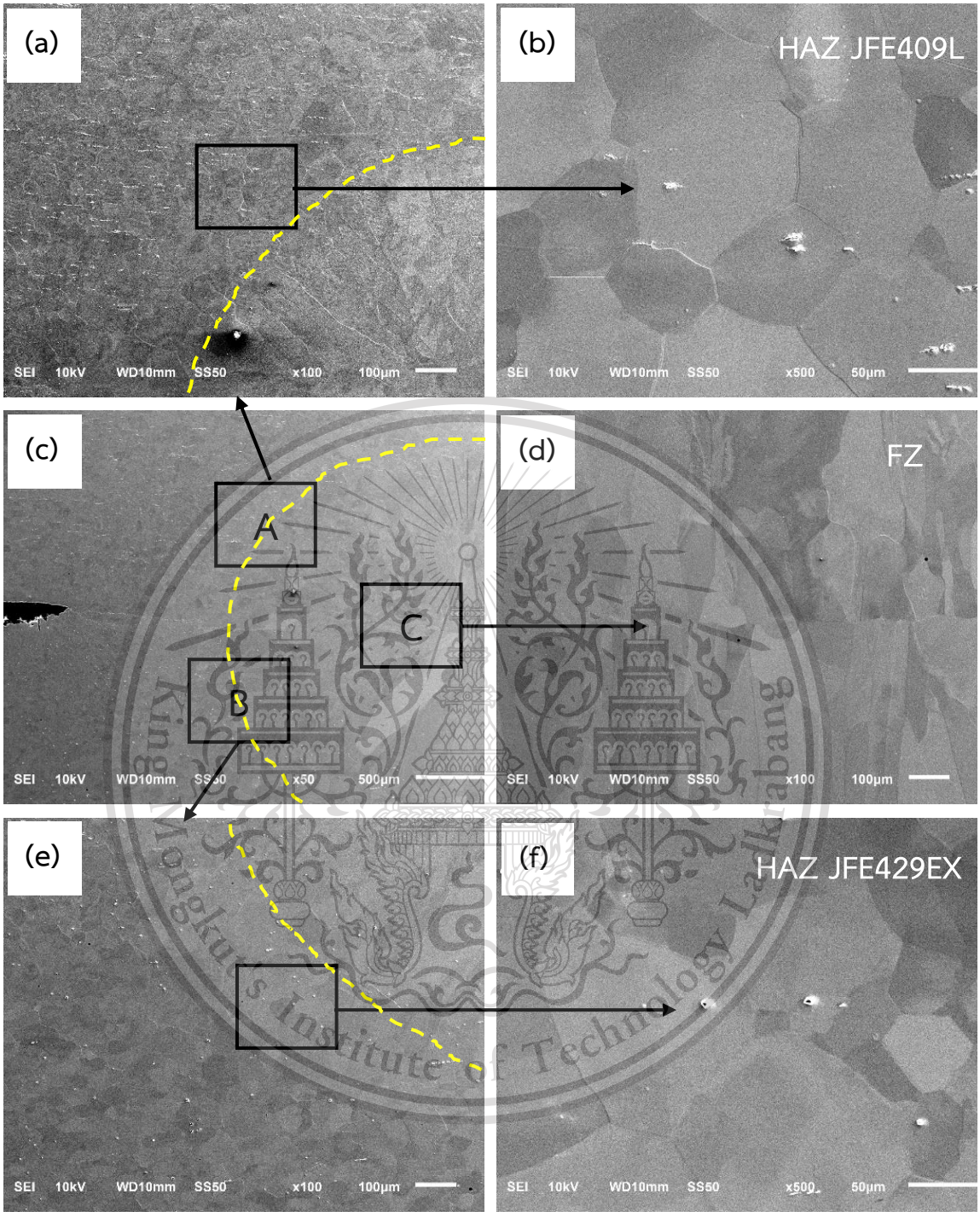
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 8500 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



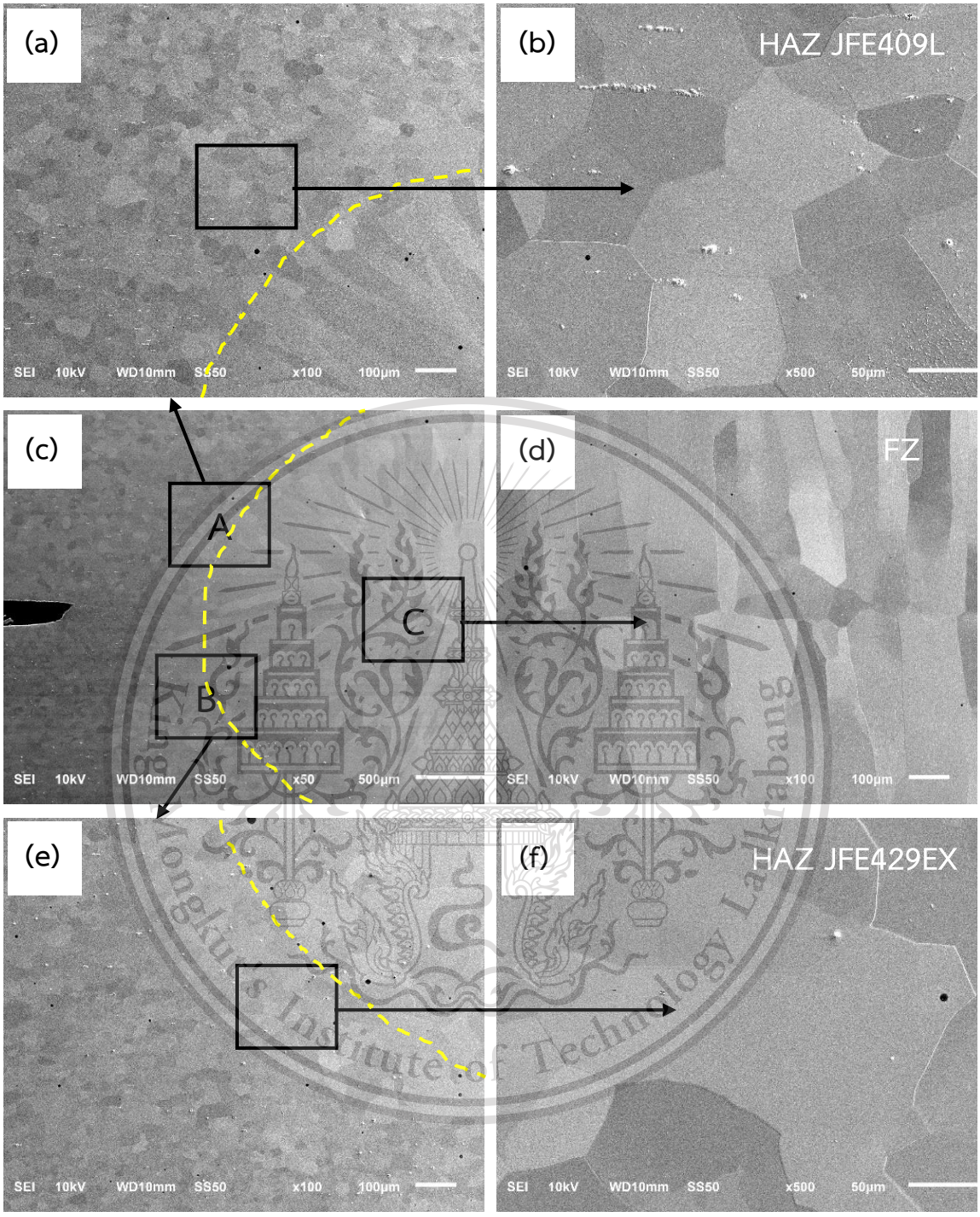
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 8500 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



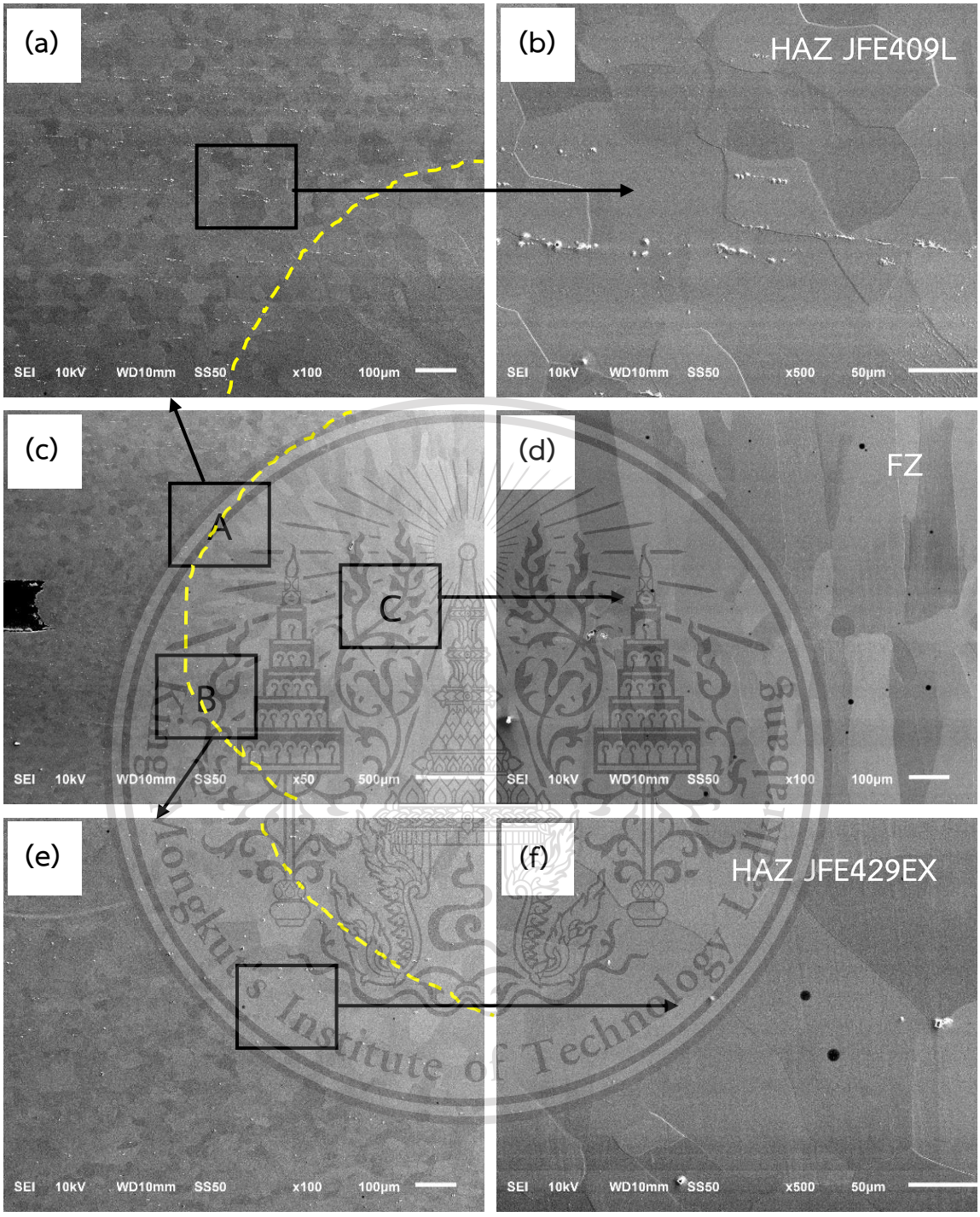
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 8500 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



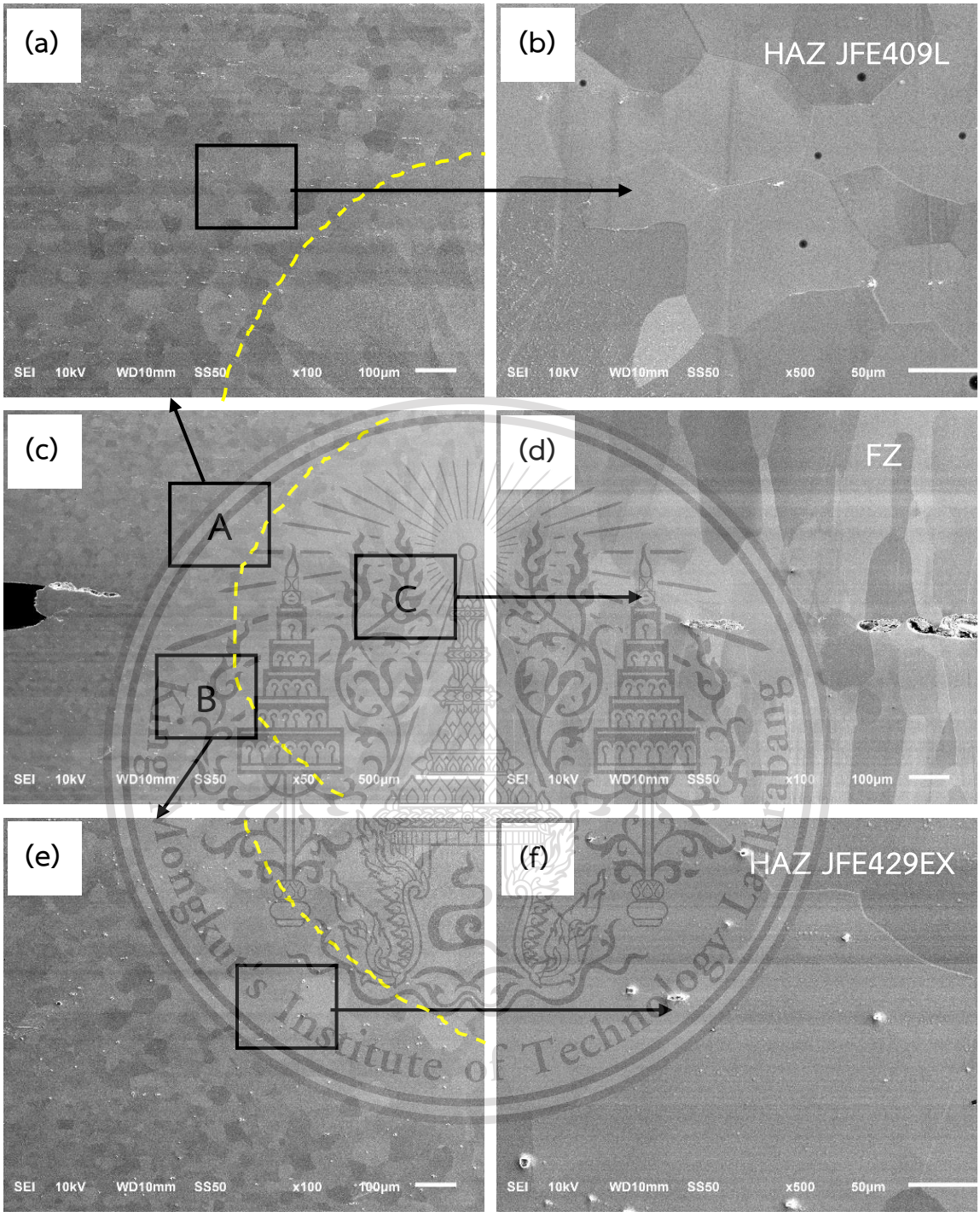
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 10000 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 10000 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

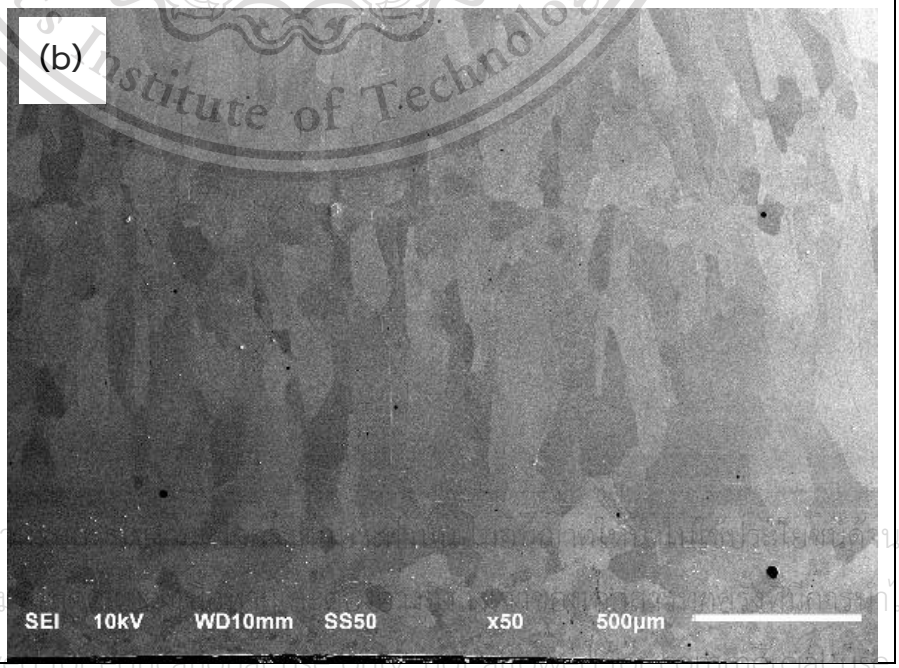


รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก 10000 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

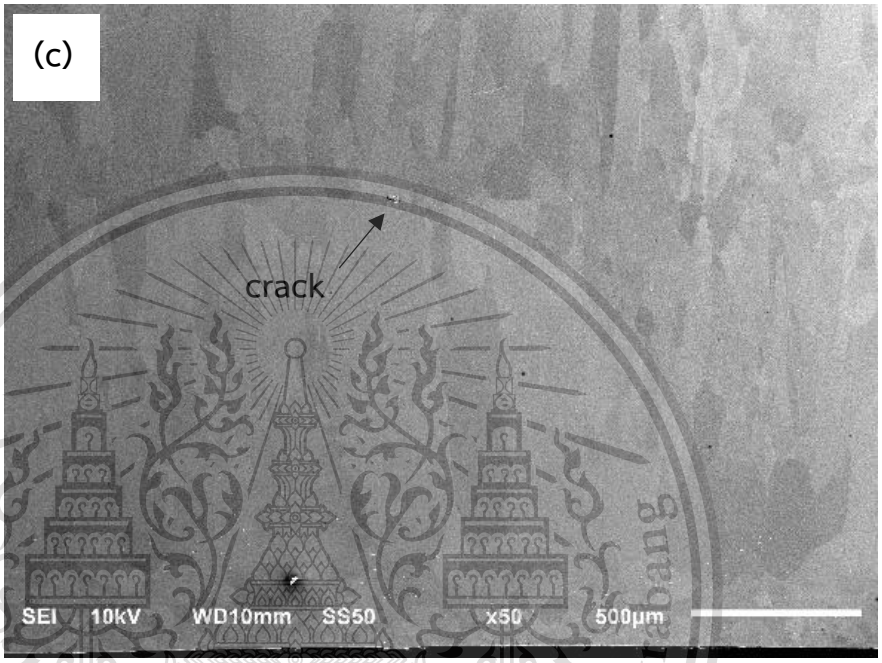
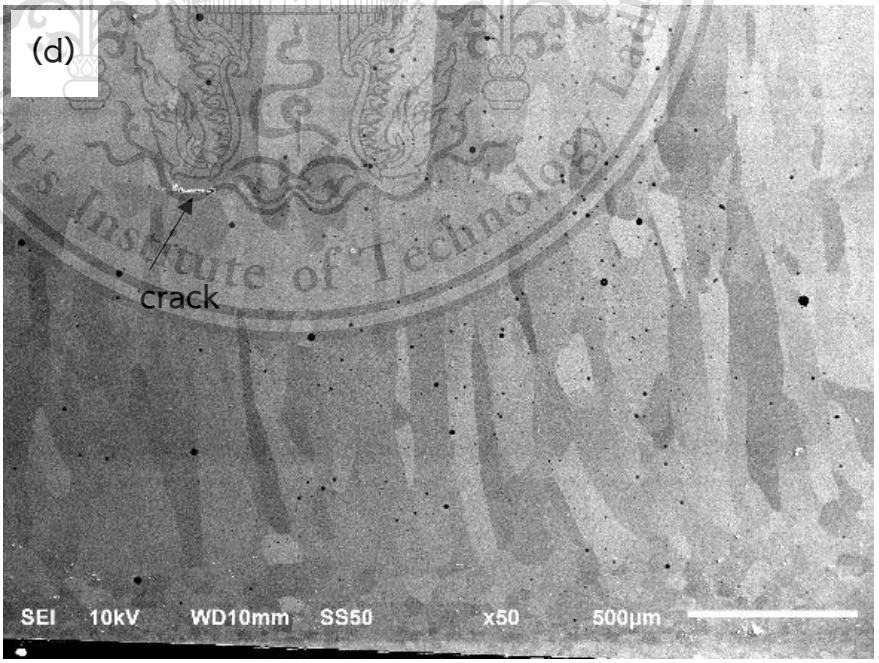
4.7.1 ลักษณะการเกิดความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

ตารางที่ 4.7 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก/กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังขยาย 50 เท่า
7000 แอมแปร์/ 7000 แอมแปร์	
7000 แอมแปร์/ 8500 แอมแปร์	

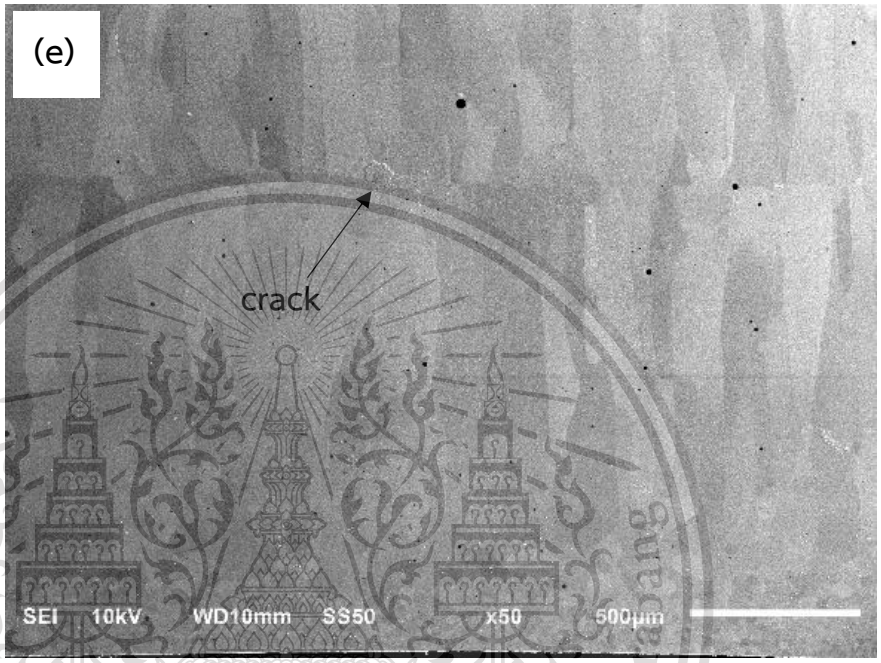
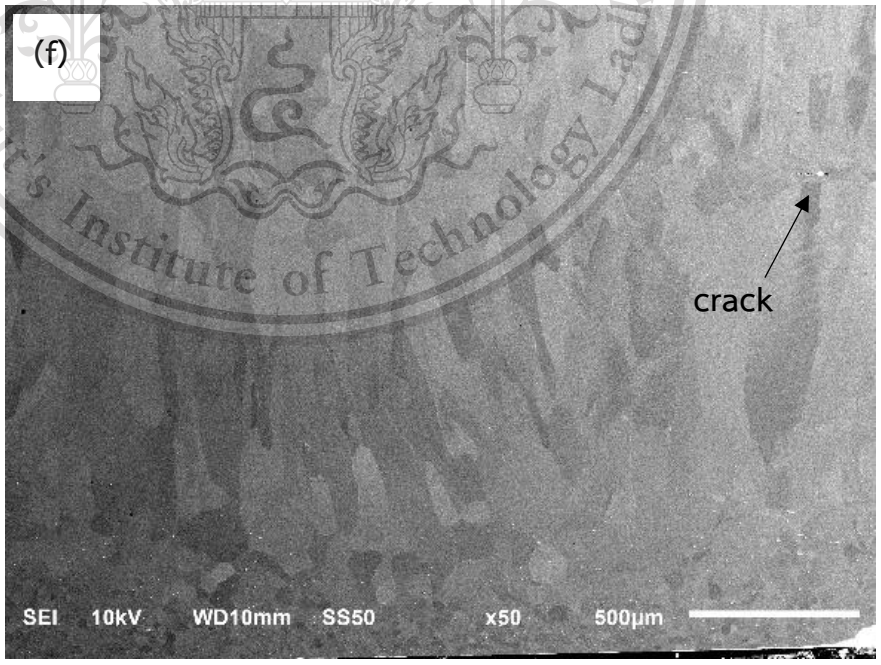
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้า
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก/กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังขยาย 50 เท่า
7000 แอมแปร์/ 10000 แอมแปร์	
8500 แอมแปร์/ 7000 แอมแปร์	

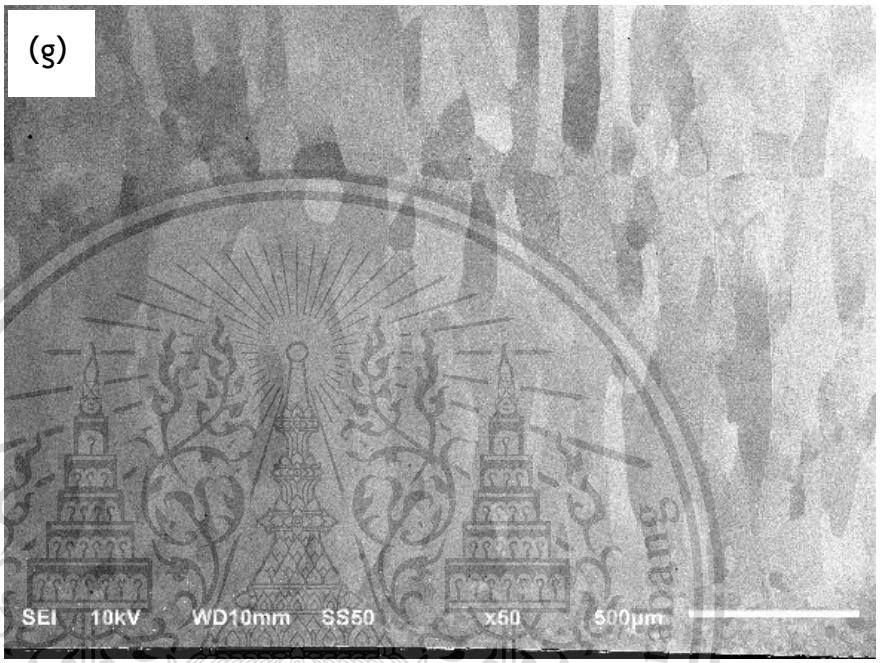
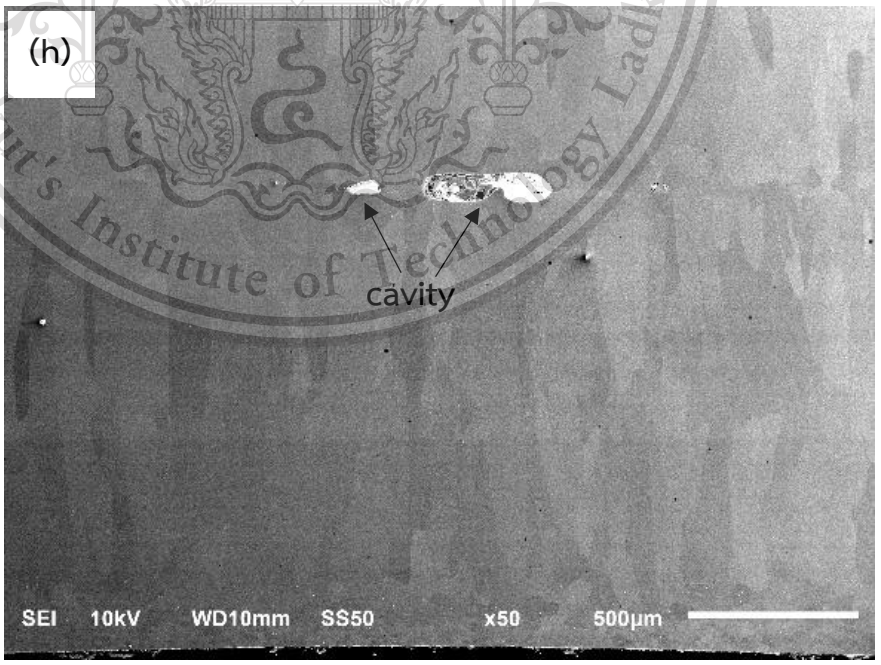
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก/กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังขยาย 50 เท่า
8500 แอมแปร์/ 8500 แอมแปร์	
8500 แอมแปร์/ 10000 แอมแปร์	

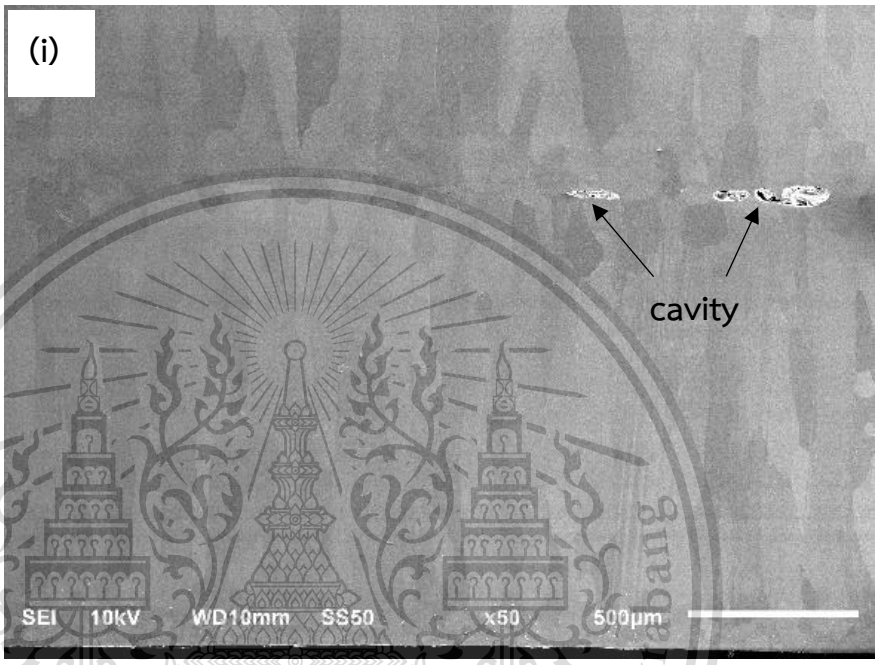
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก/กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังขยาย 50 เท่า
10000 แอมแปร์/ 7000 แอมแปร์	
10000 แอมแปร์/ 8500 แอมแปร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

กระแสไฟฟ้าพัลส์แรก/กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง	ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Nugget) ที่กำลังขยาย 50 เท่า
10000 แอมแปร์/ 10000 แอมแปร์	

4.7.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

จากรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.22 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยแบ่งลักษณะการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ รูป (a) และ (b) แสดงบริเวณที่โลหะได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L ซึ่งเป็นชิ้นงานที่อยู่ด้านบนในกระบวนการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยว รูป (c) และ (d) แสดงบริเวณโลหะที่เกิดการหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ) รูป (e) และ (f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ซึ่งเป็นชิ้นงานที่อยู่ด้านล่างในกระบวนการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยว สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ประกอบด้วยชิ้นงาน 9 ชิ้น และภายใต้เงื่อนไขการเชื่อม คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง ได้แก่ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ตามลำดับ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ได้แก่ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแต่ละเงื่อนไขจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

จากรูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของ

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.14(a), 4.14(b), 4.14(e) และ 4.14(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.14 (c) และ 4.14(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และไม่มีจุดบกพร่องในรอยเชื่อม แสดงดังรูป (a) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.15(a), 4.15(b), 4.15(e) และ 4.15(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.15(c) และ 4.15(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และไม่มีจุดบกพร่องในรอยเชื่อม แสดงดังรูป (b) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.16(a), 4.16(b), 4.16(e) และ 4.16(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.16(c) และ 4.16(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และพบรอยร้าว (Crack) เป็นจุดเพียงเล็กน้อยบริเวณรอยเชื่อมชิ้นงาน แสดงดังรูป (c) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.17(a), 4.17(b), 4.17(e) และ 4.17(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.17(c) และ 4.17(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และพบรอยร้าว (Crack) เป็นแนวยาวเพียงเล็กน้อยบริเวณรอยเชื่อม แสดงดังรูป (d) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.18(a), 4.18(b), 4.18(e) และ 4.18(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.18(c) และ 4.18(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และพบรอยร้าว (Crack) เพียงเล็กน้อยบริเวณรอยเชื่อม หรือแทบไม่มีจุดบกพร่องในรอยเชื่อมเลย แสดงดังรูป (e) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.19(a), 4.19(b), 4.19(e) และ 4.19(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.19(c) และ 4.19(d) แสดง บริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และพบรอยร้าว (Crack) เป็นแนวยาวเพียงเล็กน้อยบริเวณรอยเชื่อม แสดงดังรูป (f) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.20(a), 4.20(b), 4.20(e) และ 4.20(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.20(c) และ 4.20(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และไม่มีจุดบกพร่องในรอยเชื่อม แสดงดังรูป (g) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้พบว่า รูป 4.21(a), 4.21(b), 4.21(e) และ 4.21(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นและผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วนของรูป 4.21(c) และ 4.21(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และมีโพรง (Cavity) ขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางบริเวณรอยเชื่อม (Nugget welded) ดังรูป (h) ในตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้ พบว่ารูป 4.22(a), 4.22(b), 4.22(e) และ 4.22(f) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนของชิ้นนั้นหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง ในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ของรูป 4.22(c) และ 4.22(d) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) และมีโพรง (Cavity) 2 โพรงทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางบริเวณรอยเชื่อม (Nugget welded) แสดงดังรูป (i) ในตารางที่ 4.7

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ (Double-pulse resistance spot welding) พบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง แต่เกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L จะมีขนาดเล็ก และละเอียดมากกว่าเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX บริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) เหมือนกันทั้ง 9 เงื่อนไข และเมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในพัลส์แรก ส่งผลให้รอยเชื่อม (Nugget welded) มีขนาดใหญ่ขึ้น

ในส่วนของการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในพัลส์ที่สอง ส่งผลให้โพรง (Cavity) และรอยร้าว (Crack) เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรือไม่เกิดจุดบกพร่องในรอยเชื่อมเลย ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขต่อไปนี้

1. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ โดยใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง ได้แก่ 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ได้แก่ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์

2. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ โดยใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง ได้แก่ 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง ได้แก่ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์

3. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ แต่หลังจากการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 และ 10000 แอมแปร์ ผลปรากฏว่าเกิดโพรงบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมที่มีขนาดใหญ่อย่างเห็นได้ชัด

4.8 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว และวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ซึ่งในส่วนของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) บริเวณโลหะที่เกิดการหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ) มีลักษณะและขนาดของการเกิดเกรนที่ค่อนข้างเหมือนกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบนี้ จะทำการวิเคราะห์ในส่วนของความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว โดยใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ พบว่าเกิดข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง หรือที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เรียกว่าการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ทำให้ข้อพบพร่องบริเวณรอยเชื่อมเกิดขึ้นเล็กน้อยจนแทบไม่เกิดข้อบกพร่องเลย

2. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว โดยใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ พบว่าเกิดข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ แต่เมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง หรือที่เรียกว่าการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ทำให้ข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมเกิดขึ้นเล็กน้อย เกิดเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก หรือแทบไม่เกิดข้อบกพร่องเลย

3. การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว โดยใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ พบว่าไม่เกิดข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมเลย แต่เมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง หรือที่เรียกว่าการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 พบว่าไม่เกิดข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อม แต่เมื่อเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าเป็น 8500 และ 10000 แอมแปร์ พบว่าทำให้เกิดข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่

สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยวในเงื่อนไขที่ใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 และ 8500 แอมแปร์ พบว่าโพรงที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมนั้นมีสาเหตุมาจากการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion) เนื่องจากขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการเกิดความร้อนที่ทำให้ชิ้นงานสามารถหลอมละลายได้สมบูรณ์หลังจากการเชื่อม และในส่วนของความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์คู่ ในเงื่อนไขที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 และ 10000 แอมแปร์ พบว่าโพรงที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมนั้น มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าที่มากเกินกว่าที่ชิ้นงานสามารถทนต่อความร้อนได้ จึงทำให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดการระเบิดเนื่องจากความร้อน (Heat explosion) จนเกิดโพรงขนาดใหญ่บริเวณรอยเชื่อม

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อทำการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นจนถึงเงื่อนไขค่าหนึ่ง จากนั้นจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุป และอภิปรายผลของงานวิจัย เรื่องการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การสรุปผลและการอภิปรายผล
2. ข้อเสนอแนะ

5.1 การสรุปและอภิปรายผล

จุดประสงค์หลักของการทดลองการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ครั้งนี้ เพื่อศึกษารูปแบบการปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ เพื่อให้รอยเชื่อมของชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด อีกทั้งยังศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่

5.1.1 การเชื่อมชิ้นงานโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว

จากการเชื่อมชิ้นงานด้วยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว โดยมีเงื่อนไขในการทดลองคือปริมาณกระแสไฟฟ้าดังตารางที่ 3.7 พบว่าการเชื่อมชิ้นงานโดยใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในการทดลอง จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.1.2 การเชื่อมชิ้นงานโดยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่

จากการเชื่อมชิ้นงานด้วยวิธีการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ โดยมีเงื่อนไขในการทดลองคือขนาดของกระแสไฟฟ้าดังตารางที่ 3.8 พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อปล่อยขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองเข้าไปในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ ในช่วงขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง คือ 7000 และ 8500 แอมแปร์ และขนาดของของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง คือ 7000 8500 และ 10000 แอมแปร์ พบว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมสูงสุดที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สอง 7000 แอมแปร์ จากนั้นเมื่อยิ่งเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 และ 10000 แอมแปร์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลง

5.1.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว พบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบ (Coarser grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง บริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) เกิดเกรนตามยาว (Columnar grain) เหมือนกันในทุกเงื่อนไขของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยว และในเงื่อนไขที่ใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 และ 8500 แอมแปร์ พบว่าเกิดโพรง (Cavity) บริเวณรอยเชื่อม (Nugget welded) สาเหตุจากการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ (incomplete fusion) และเมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าจนถึงที่ขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ พบว่าไม่เกิดโพรงที่จุดกึ่งกลางของรอยเชื่อม

ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวางโดยการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ พบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และผิวเกรนหยาบเมื่อเทียบกับเกรนบริเวณใกล้เคียง บริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) เกิดเกรนตามยาวเหมือนกันในทุกเงื่อนไขของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ และเมื่อทำการเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในพัลส์ที่หนึ่ง ส่งผลให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่พบว่ามีสองเงื่อนไขของการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ นั่นคือเงื่อนไขแรก ใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ สำหรับเงื่อนไขที่สอง ใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ พบว่าเกิดโพรงขนาดใหญ่บริเวณรอยเชื่อม สาเหตุมาจากการระเบิดเนื่องจากความร้อน (Heat explosion) จึงสามารถสรุปได้ว่าในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX เมื่อเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้ามากขึ้นรอยเชื่อมจะมีความสมบูรณ์มากขึ้น และในการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX ทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์มากยิ่งกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมความต้านจุดแบบพัลส์เดี่ยวจนถึงเงื่อนไขค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์น้อยลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในระหว่างกระบวนการเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ ควรมีความควบคุมอุณหภูมิของหัวกดอิเล็กโทรดไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป เพราะอาจส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของชิ้นงานได้

2. การขัดผิวหน้าของชิ้นงานในขั้นตอนของการขัดกระดาษทราย ควรระวังไม่ให้ระนาบของชิ้นงานเอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง เพราะอาจส่งผลต่อความคมชัดของภาพขณะส่องดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. หลังจากการขัดชิ้นงานและนำไปทำ ion milling แล้วไม่ควรปล่อยชิ้นงานทิ้งไว้เกิน 1 วัน เพราะทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเสีย และอาจทำให้เกิดผลเสียเมื่อนำชิ้นงานไปเข้ากระบวนการ SEM

4. ในการกัดผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบด้วยวิธีการ milling ควรทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีระนาบที่เรียบ เพื่อความชัดเจนของภาพที่ได้สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

[1] ปภัชญา คุ้มนาคนพคุณ และ จิตต์จุฑา โพธิแท่น. 2562. การสร้างต้นแบบเครื่องเชื่อมอะลูมิเนียมแบบจุดโดยใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[2] ฐานทัพ นาทอง และ ศุภกิตติ์ ปานต่อเหล่า. 2562. การแล่นประสานโฟมทองแดงโดยการเชื่อมประสานแบบทางอ้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[3] พิมพ์ไทย สุภาวิมล และ ยุวดี จอกสูงเนิน. 2562. การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบของผักตบชวา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[4] ธนกานต์ วิชิระประเสริฐ. 2557. การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิกรณีศึกษาเฮลิคอปเตอร์กระดาษ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[5] ปราโมทย์ วณิตย์ธนาคม. การพัฒนาของกล้องจุลทรรศน์. วารสารนเรศวรพะเยา., ปีที่7, ฉบับที่3, กันยายน–ธันวาคม. 2557. หน้า 193-195

[6] ดนัย กิจชัยนุกูล. 2547. เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM). ม.ป.ท., ม.ป.ป.

[7] ณัฐกฤต แสงสว่าง และ จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์. คุณภาพงานเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกัลป์วาไนซ์ กับอลูมิเนียม เกรด 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304. รายงานสืบเนื่องจากการประชุมช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหการ., 2555. หน้า 1319-1330

[8] พ.อ.อ. ศักดิ์ชัย จันทศรี, ผศ.ไพบูลย์ แย้มเผื่อน และ ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2555. การศึกษาสมบัติต้านทานรอยเชื่อมแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[9] A.Subrammanian, P.V. Senthiil, D.B. Jabaraj and D.Devakumar. Improving mechanical performance of resistance spot welded joints of AISI 409Msteel by double pulse current. in Materials, Manufacturing and Applied Sciences international, Dr.M.G.R. educational and research institute university., pp. 949-955.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

[10] โยธิน จันทร์ทอง, กรรณชัย กัลยาศิริ, สกนธ์ คล่องบุญจิต และ สารภี จุลแก้ว. การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเฉือนสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1. งานประชุมทางวิชาการครั้งที่ 50 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์., 2559. หน้า 26-33

[11] สุชาดา มะโนชัย และ สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร. การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการเชื่อมแบบจุดโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาฐานโช๊คอัพ. งานประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 13 คณะวิศวกรรมศาสตร์., 2555. หน้า 194-202

[12] Teerawut Khuenkaew and Kannachai Kanlayasiri. Resistance Spot Welding of SUS316L Austenitic/SUS425 Ferritic Stainless Steels Weldment Characteristics, Mechanical Properties, Phase Transformation and Solidification. vol. 9, 2019. pp. 1-19

[13] Mohammad Hosein Bina, Mostafa Jamali, Morteza Shamanian and Hamed Sabet. Investigation on the resistance spot-welded austenitic and ferritic stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 12, 2014. pp. 1371-1379

[14] JFE Steel Corporation. stainless steel. [Online]. Available: http://www.jfe-steel.co.jp/en/ [Accessed: April 25 2021].

[15] NanoScienceInstruments. Ion Milling. [Online]. Available: https://www.nano- science. com/ techniques/iong-milling/ [Accessed: April 27 2021].

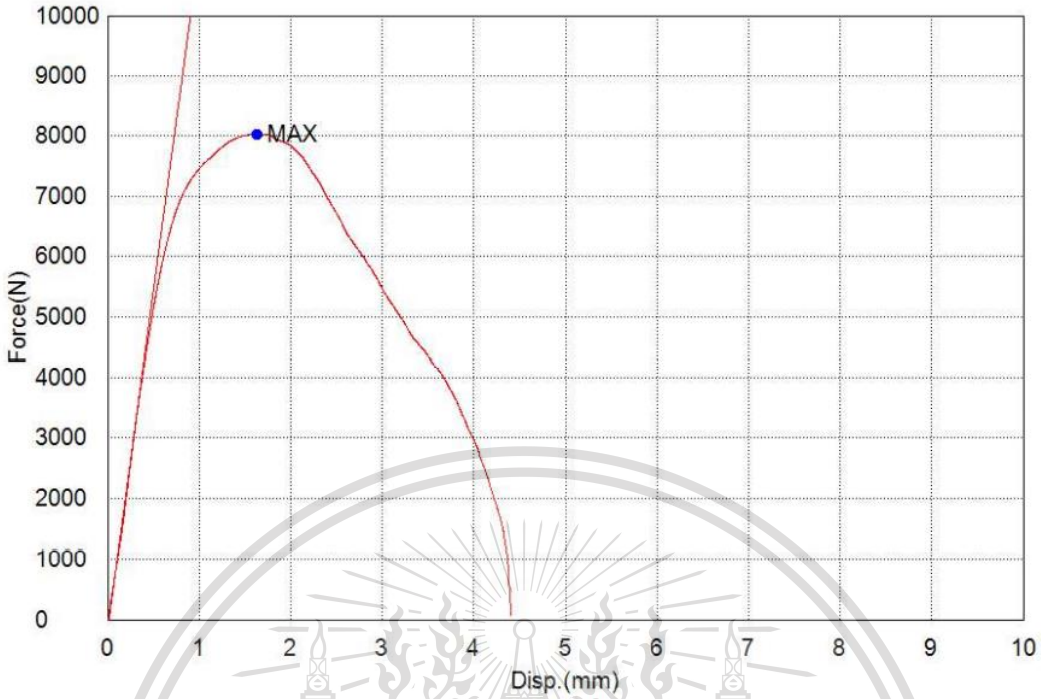
[16] ธีรพงศ์ หาญวิโรจน์กุล. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ., ฉบับที่ 62, มกราคม–มีนาคม, 2554. หน้า 70-73

[17] Hamidreza Aghajani and Majid Pouranvari. Influence of In Situ Thermal Processing Strategies on the Weldability of Martensitic Stainless Steel Resistance Spot Welds: Effect of Second Pulse Current on the Weld Microstructure and Mechanical Properties. in The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, Sharif University of Technology., pp. 1-19

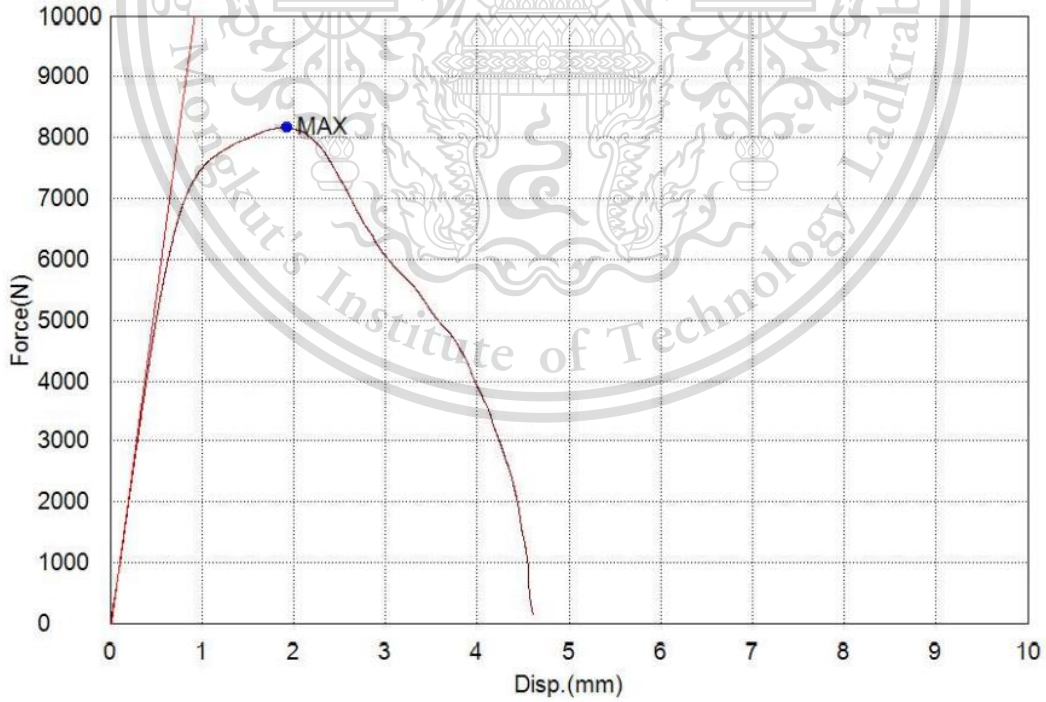
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



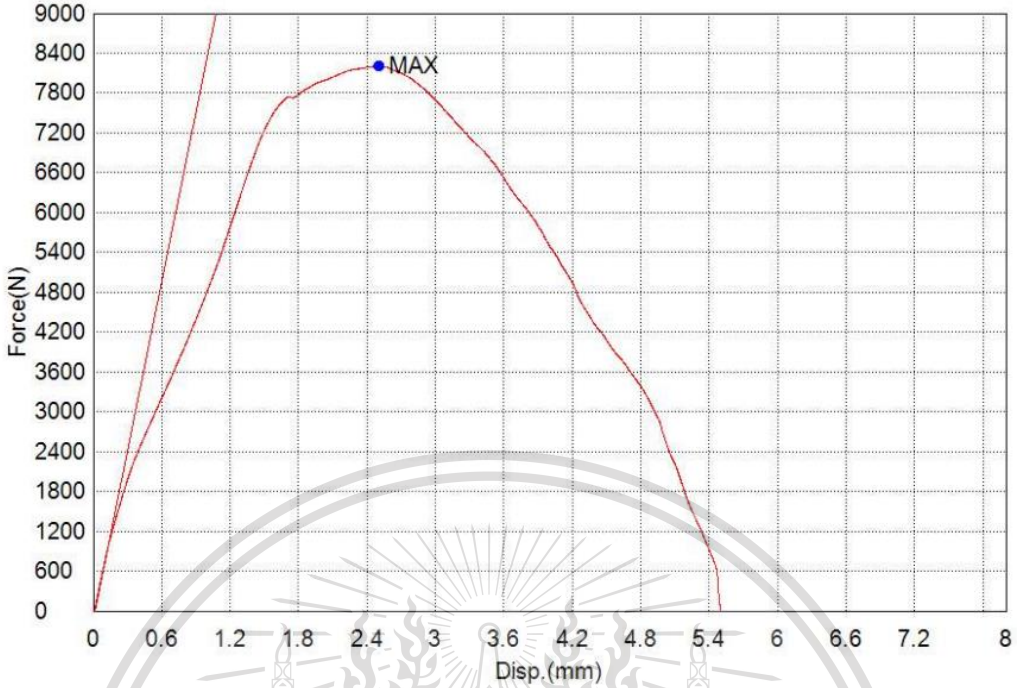
รูปที่ ผก. 1 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1



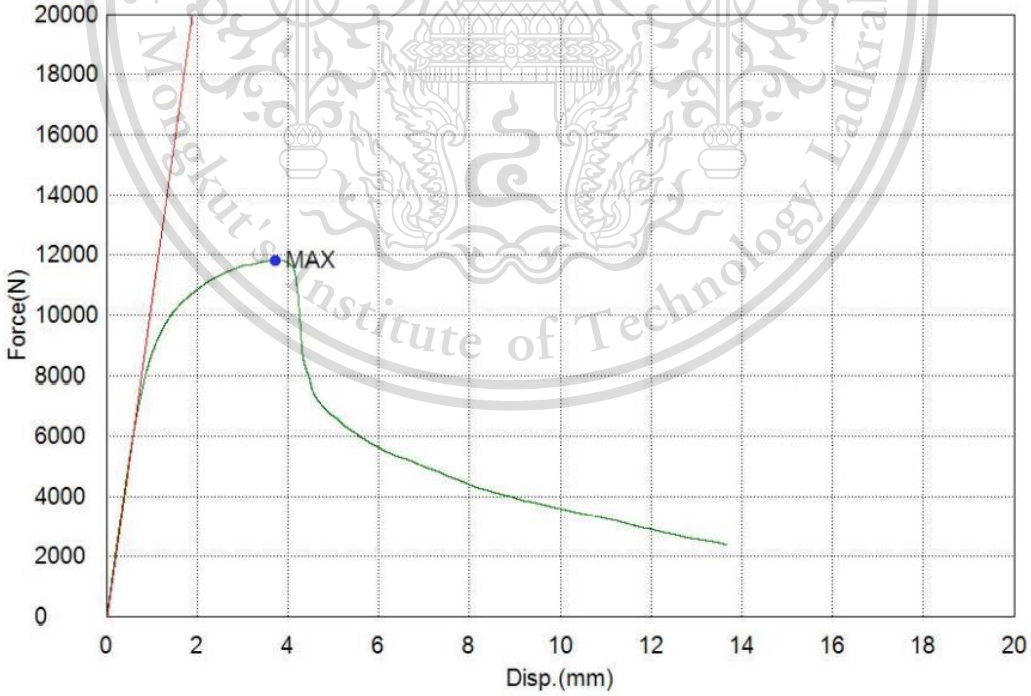
รูปที่ ผก. 2 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



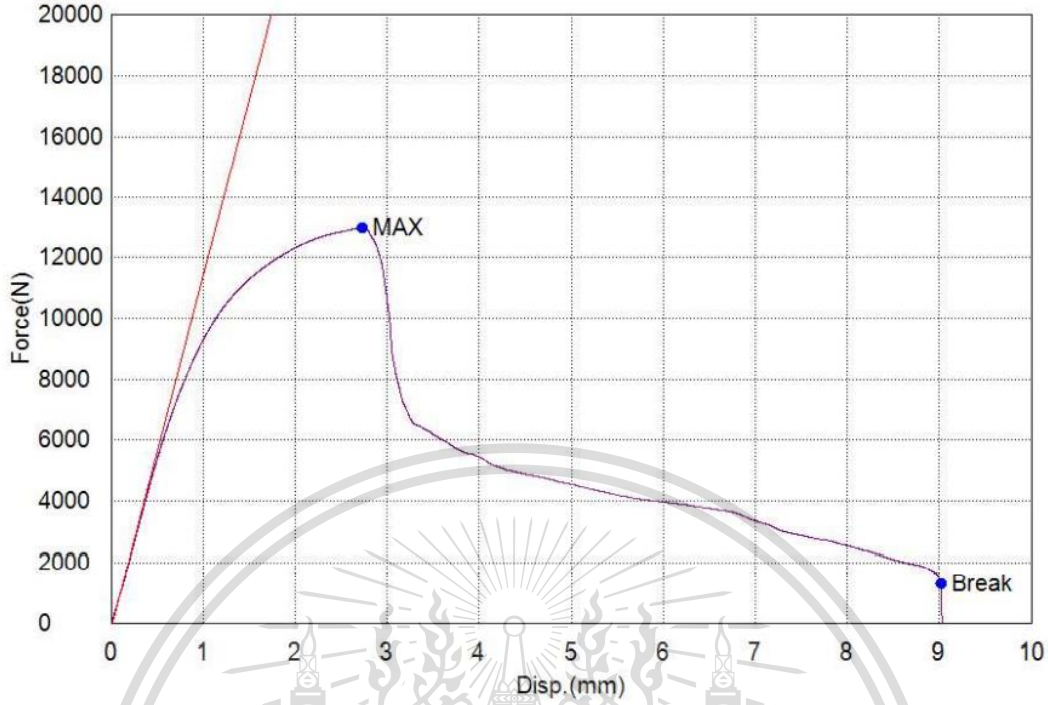
รูปที่ ผก. 3 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 3



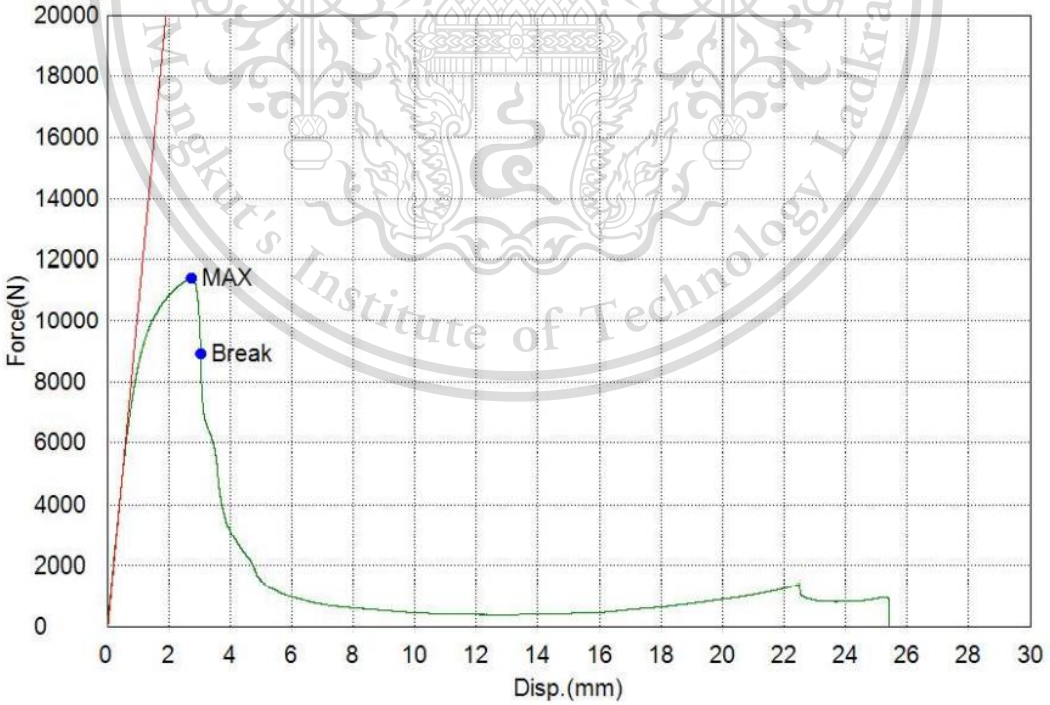
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ ผก. 4 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

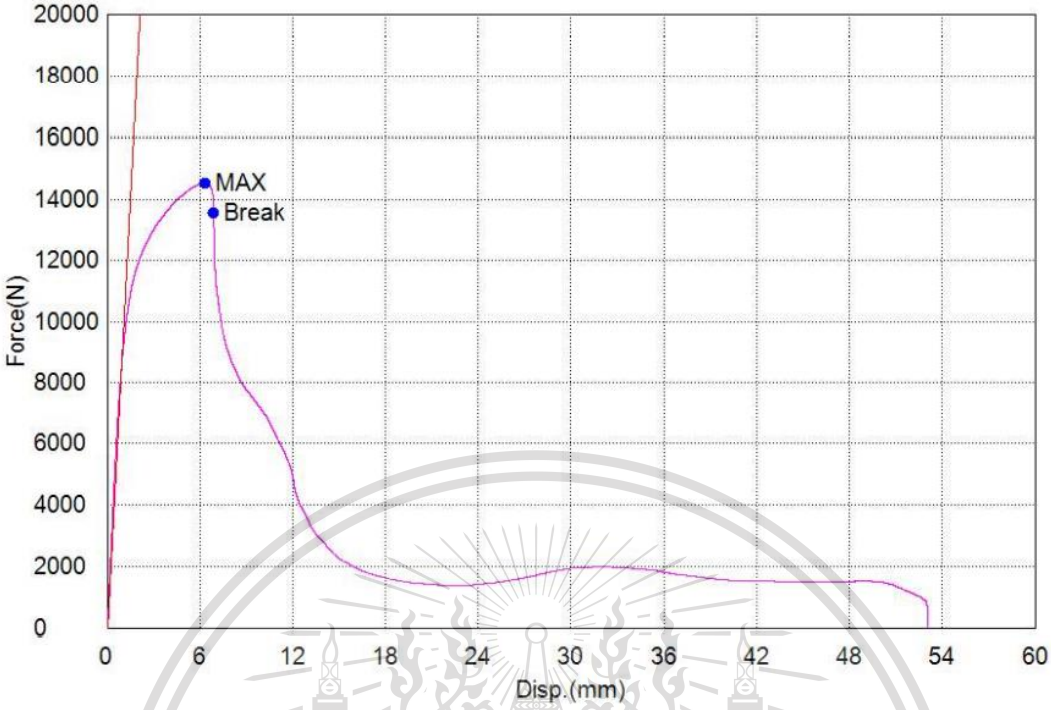


รูปที่ ผก. 5 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

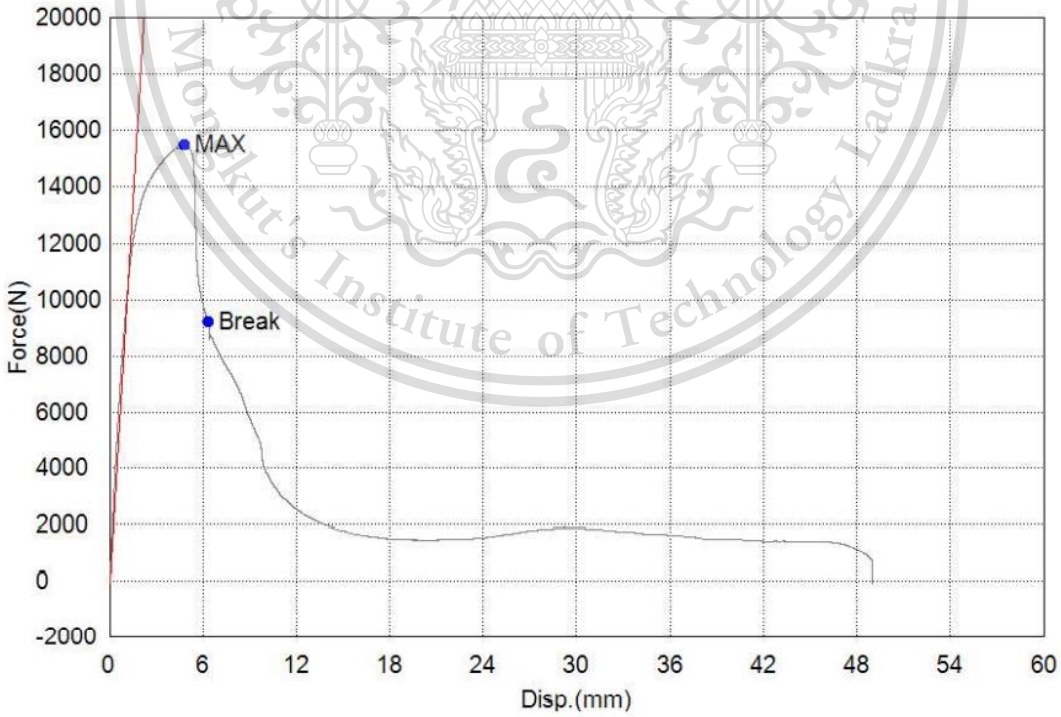


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ ผก. 6 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 3



รูปที่ ผก. 7 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1



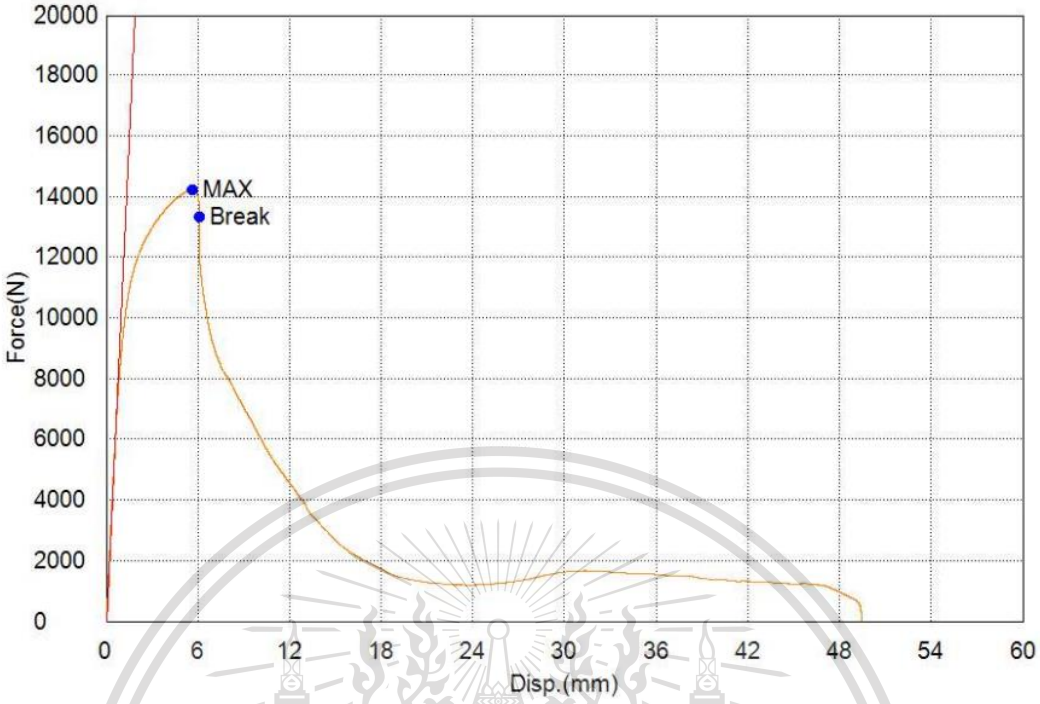
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ผก. 8 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

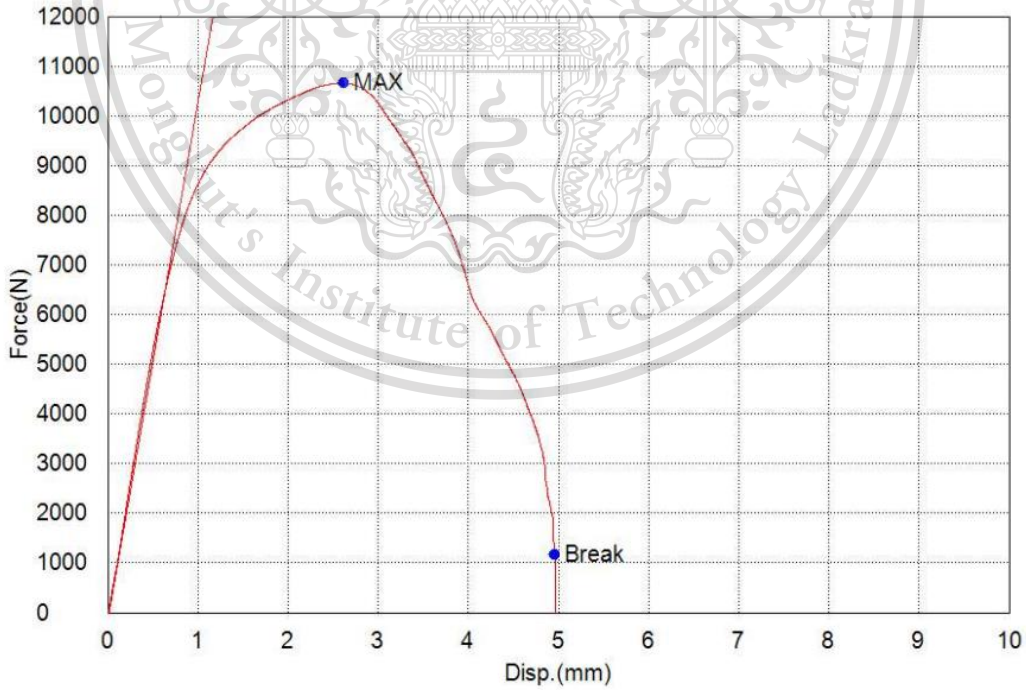
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

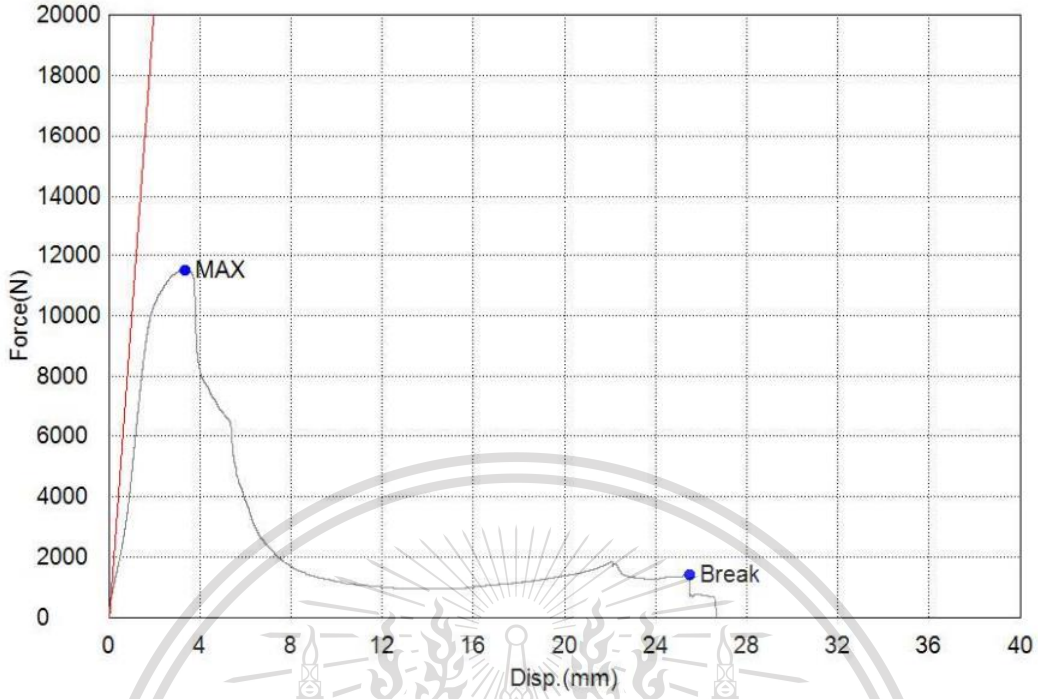


รูปที่ ผก. 9 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้า 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

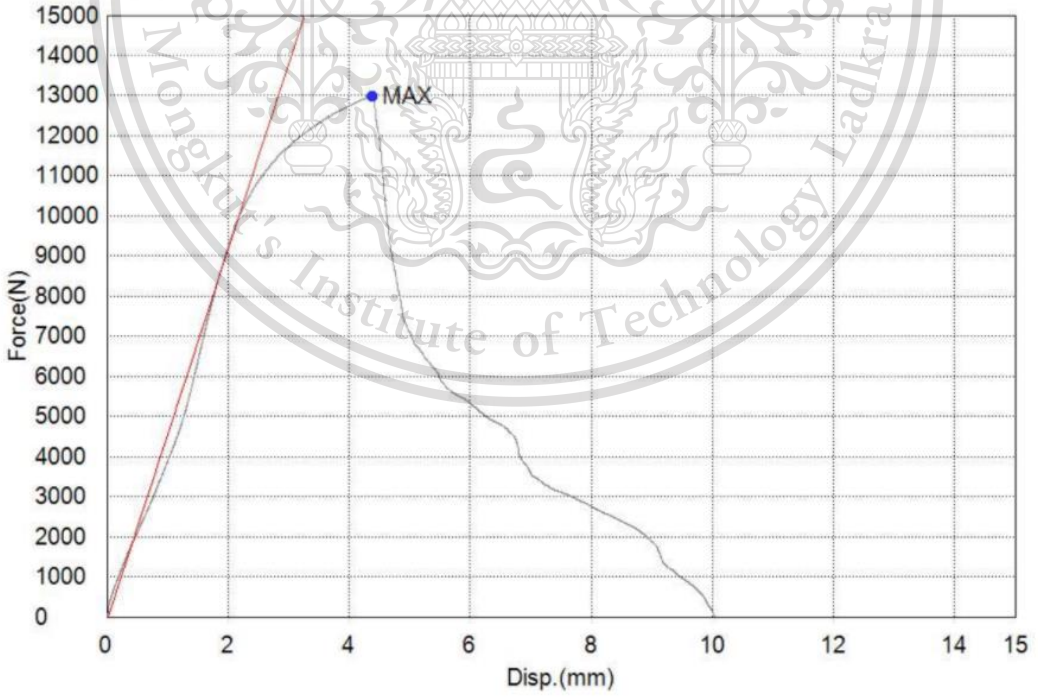


รูปที่ ผก. 10 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

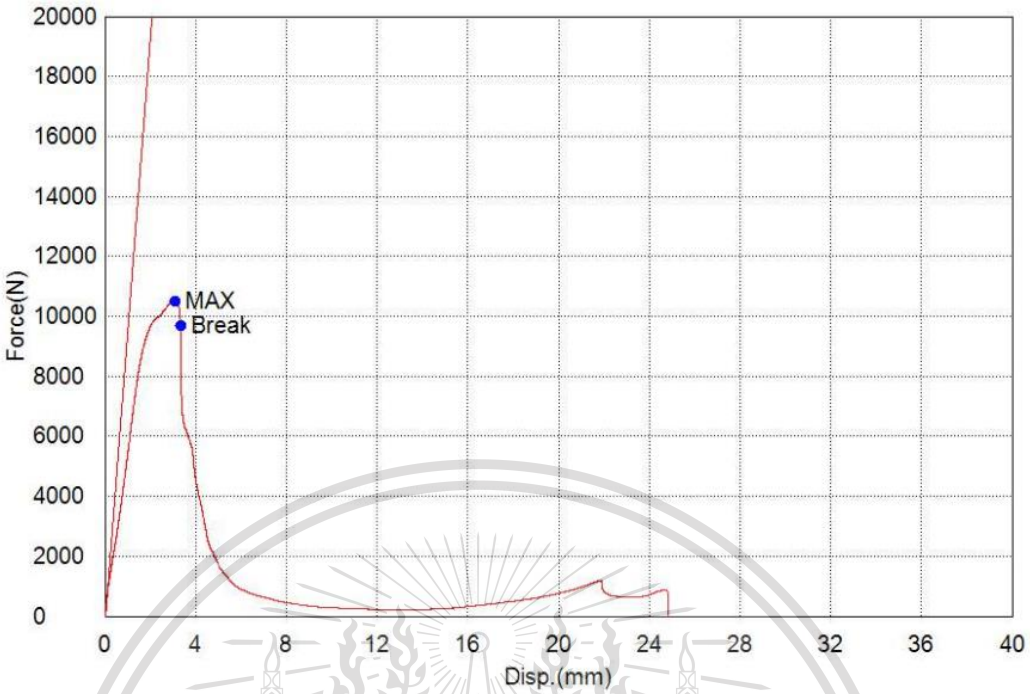


รูปที่ ผก. 11 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

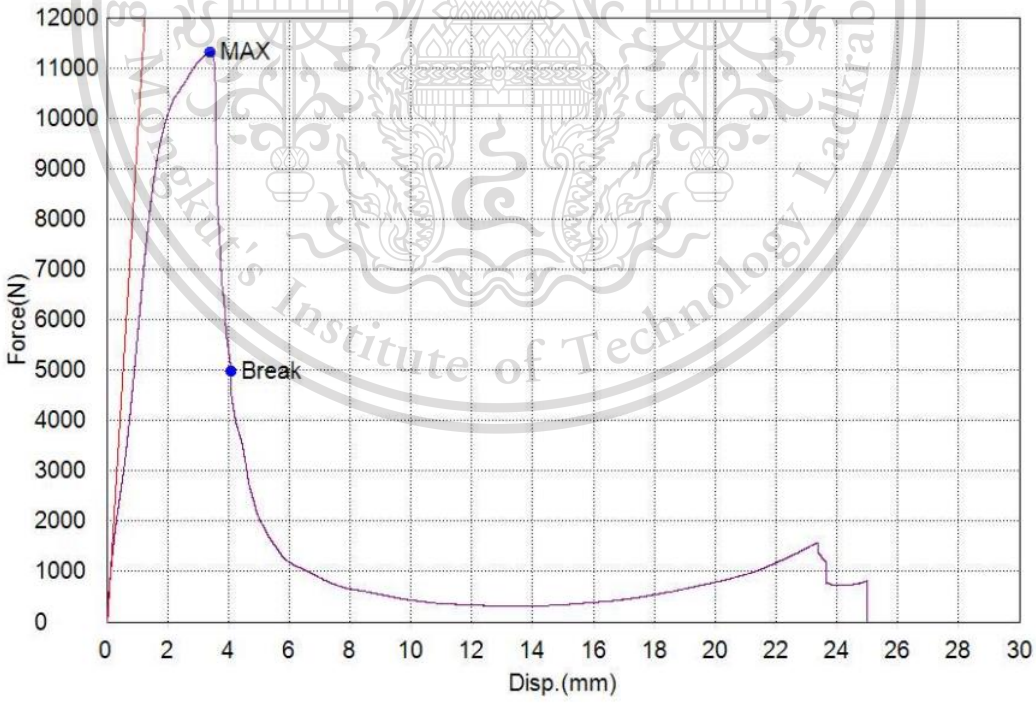


รูปที่ ผก. 12 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 7000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

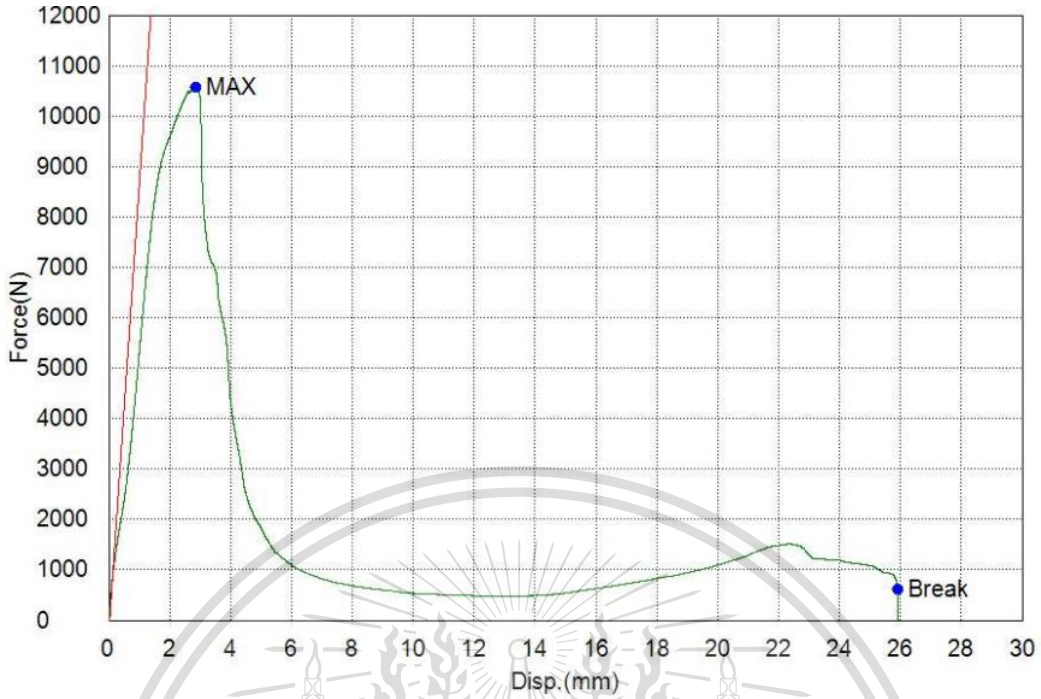


รูปที่ ผก. 13 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

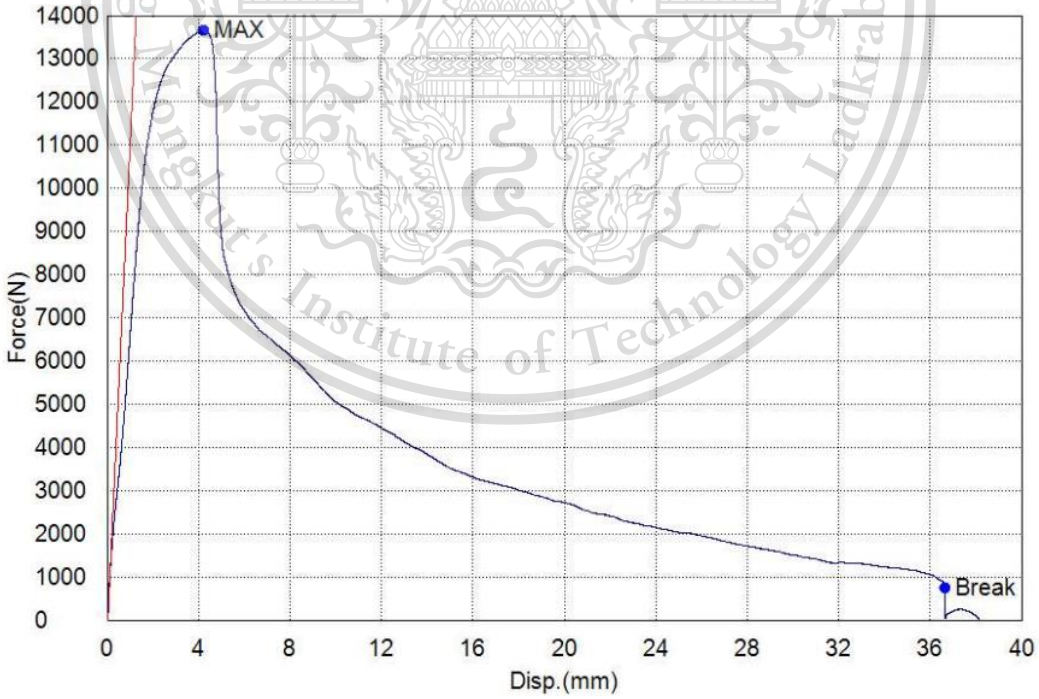


รูปที่ ผก. 14 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นสิ่งที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

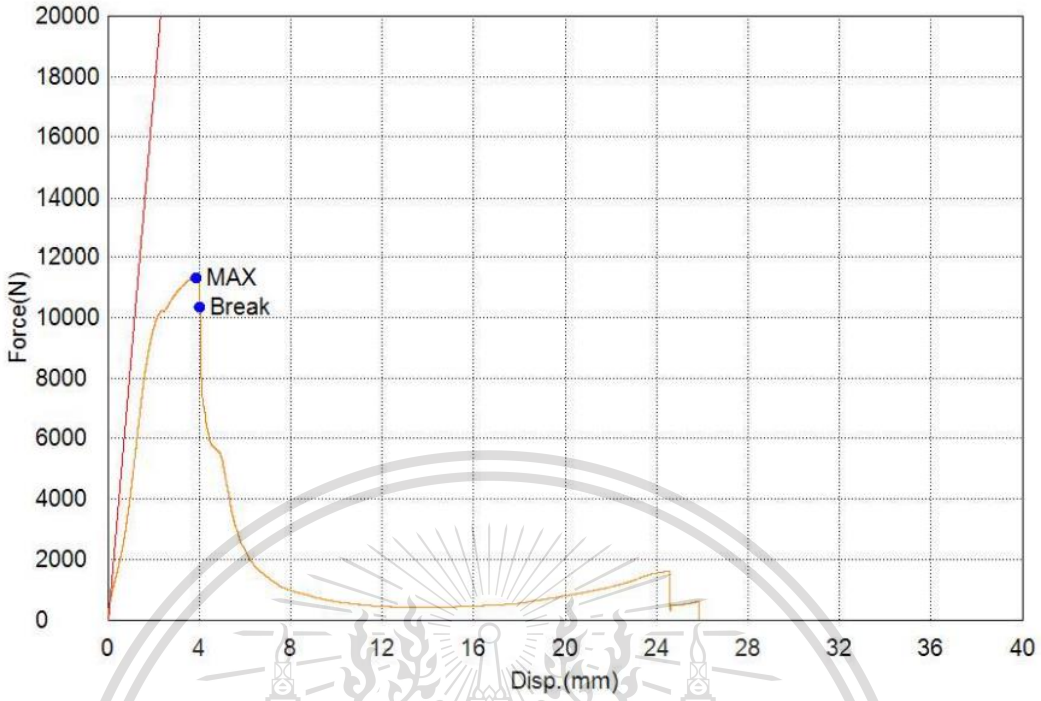


รูปที่ ผก. 15 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

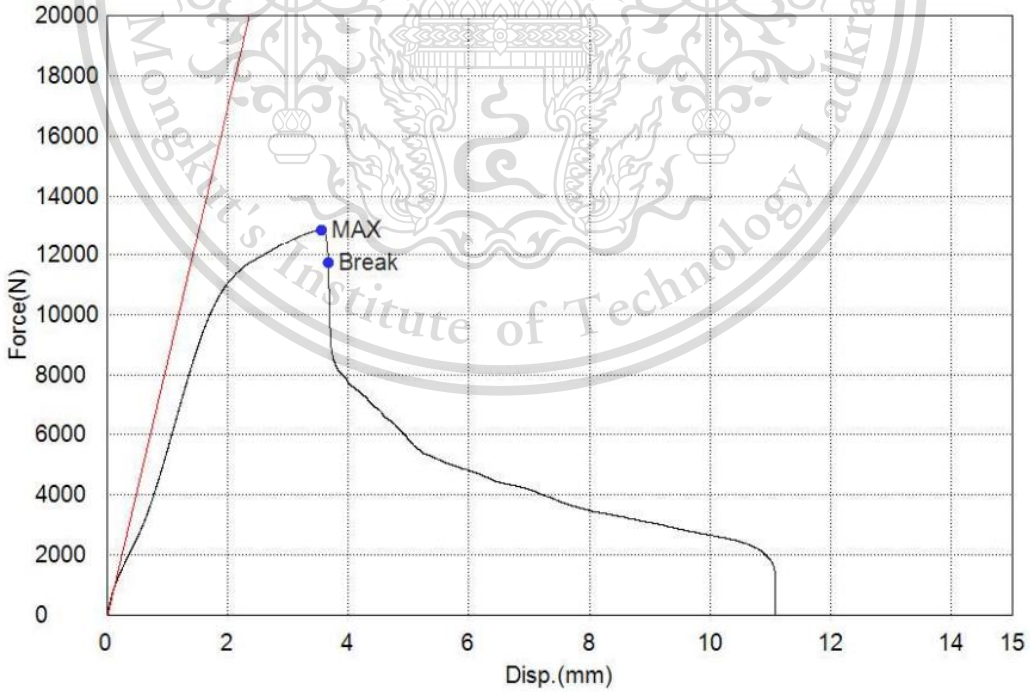


รูปที่ ผก. 16 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

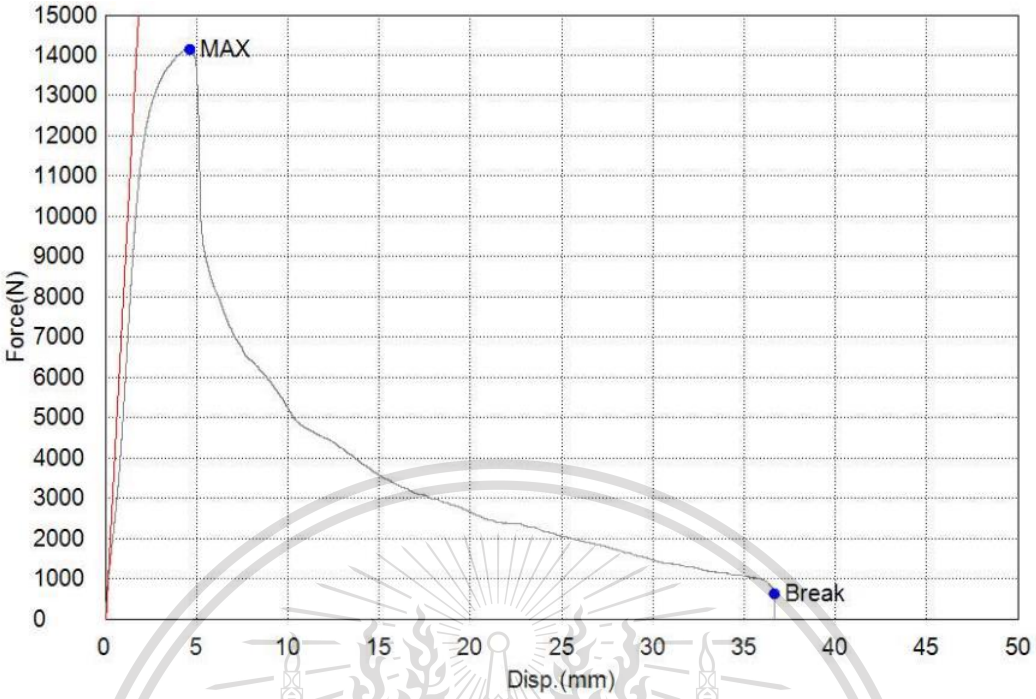


รูปที่ ผก. 17 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

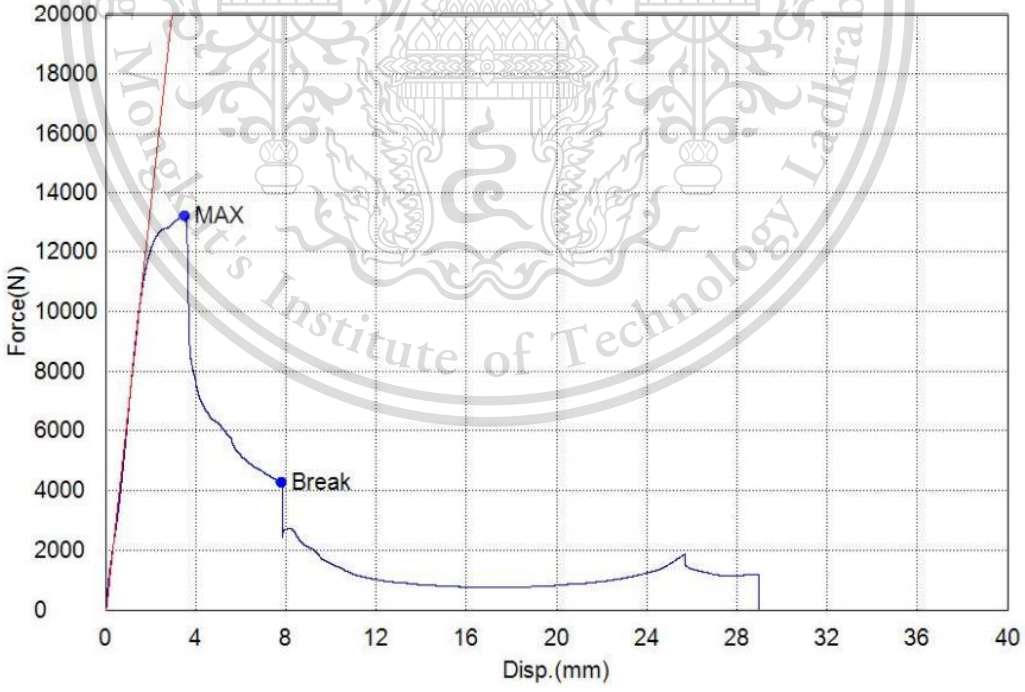


รูปที่ ผก. 18 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

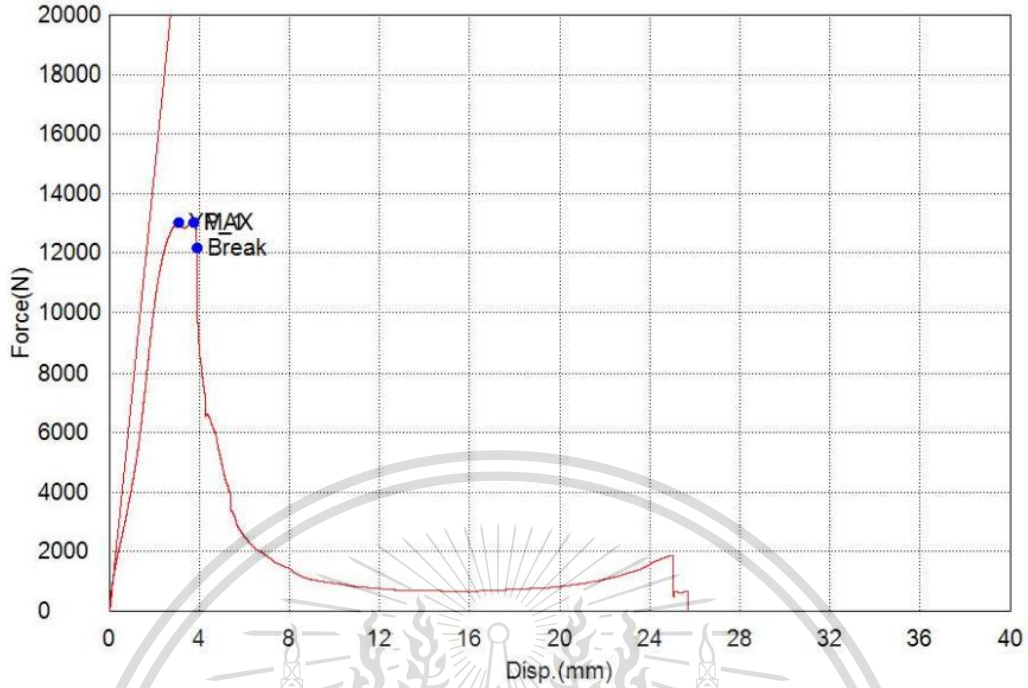


รูปที่ ผก. 19 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

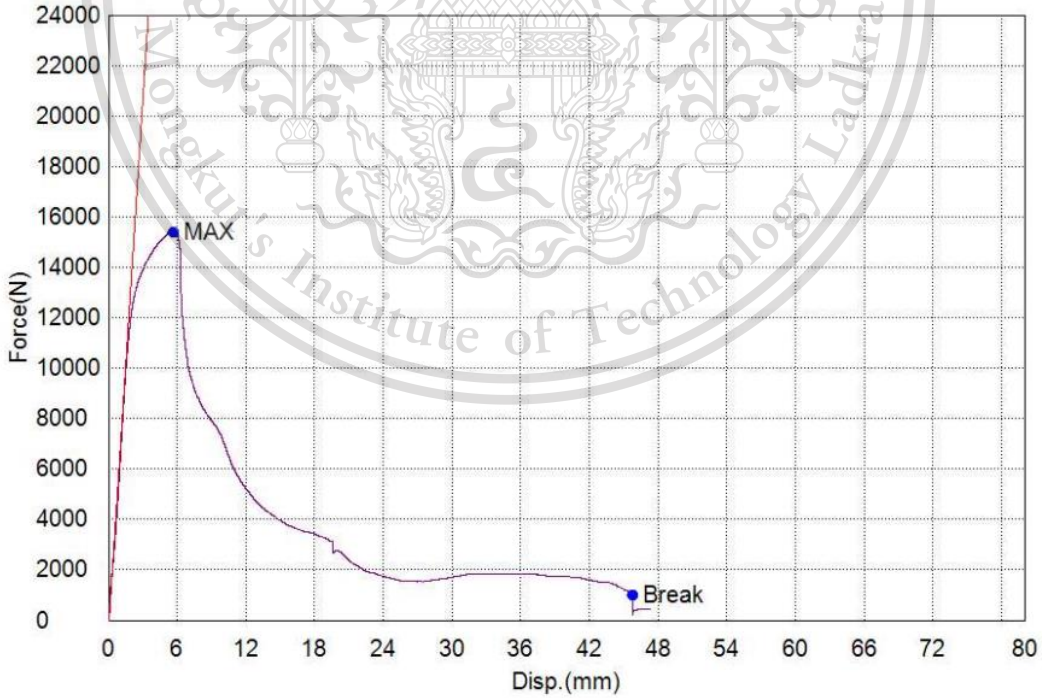


รูปที่ ผก. 20 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

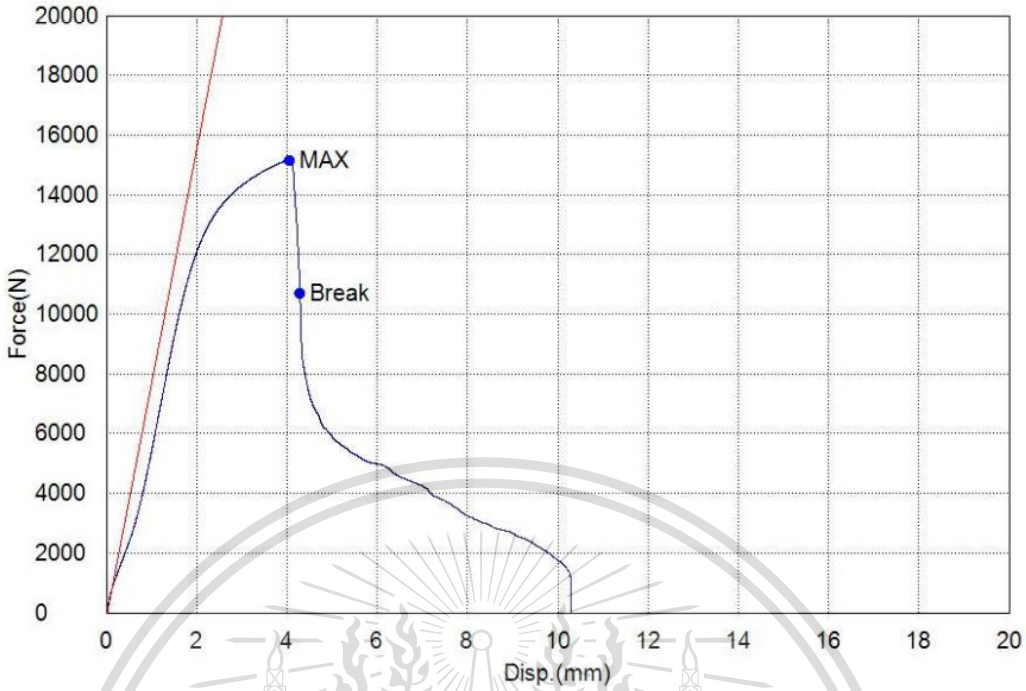


รูปที่ ผก. 21 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 8500 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

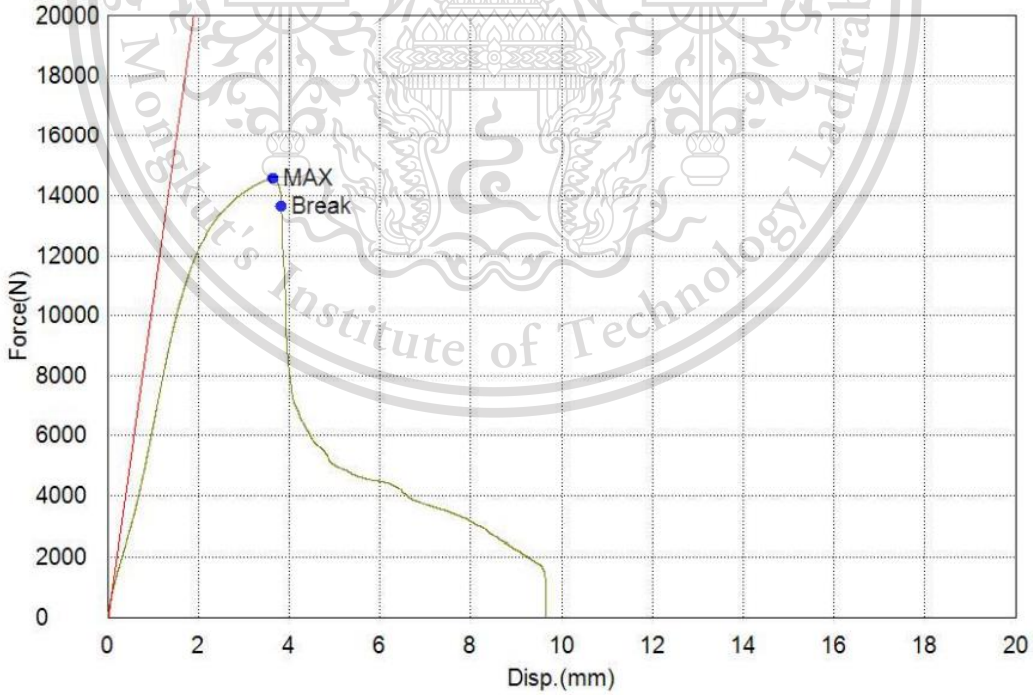


รูปที่ ผก. 22 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

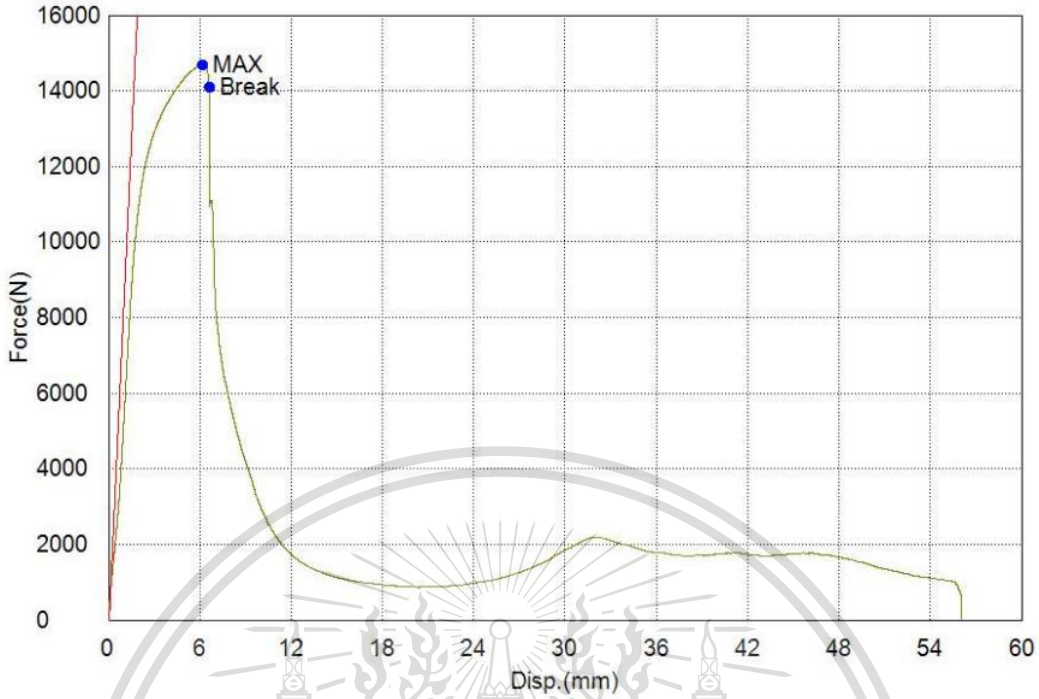


รูปที่ ผก. 23 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

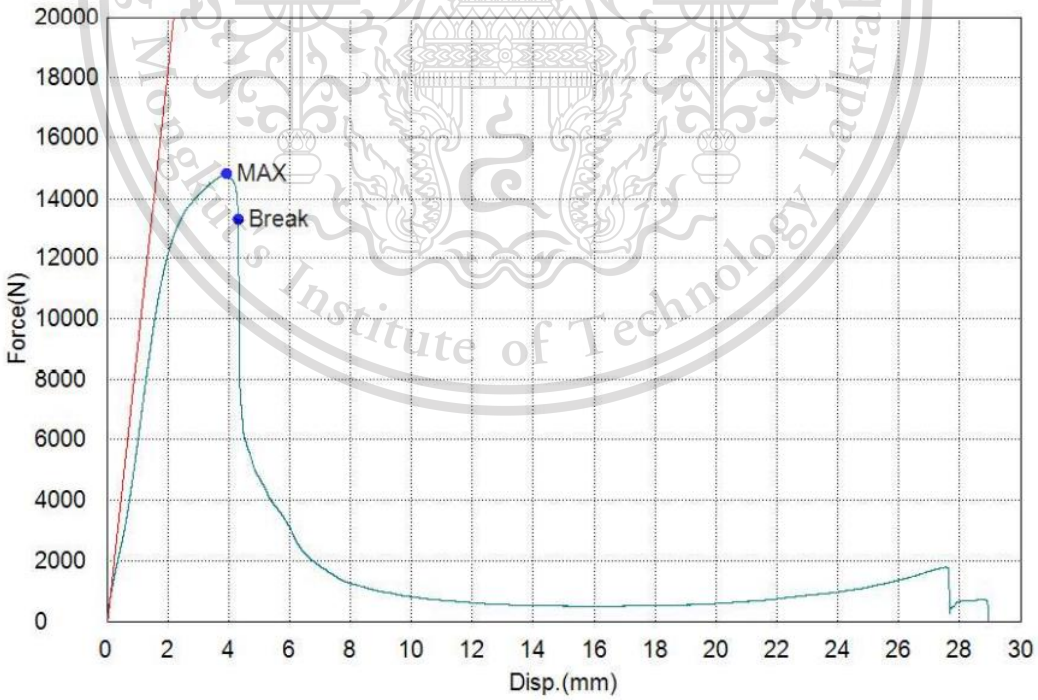


รูปที่ ผก. 24 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 7000 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

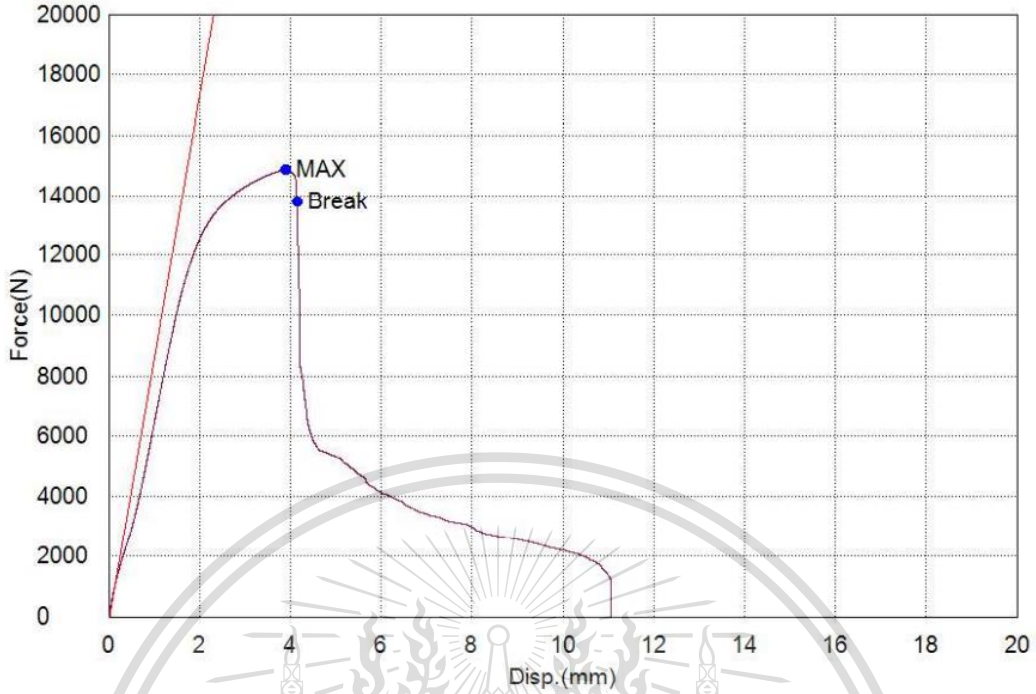


รูปที่ ผก. 25 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

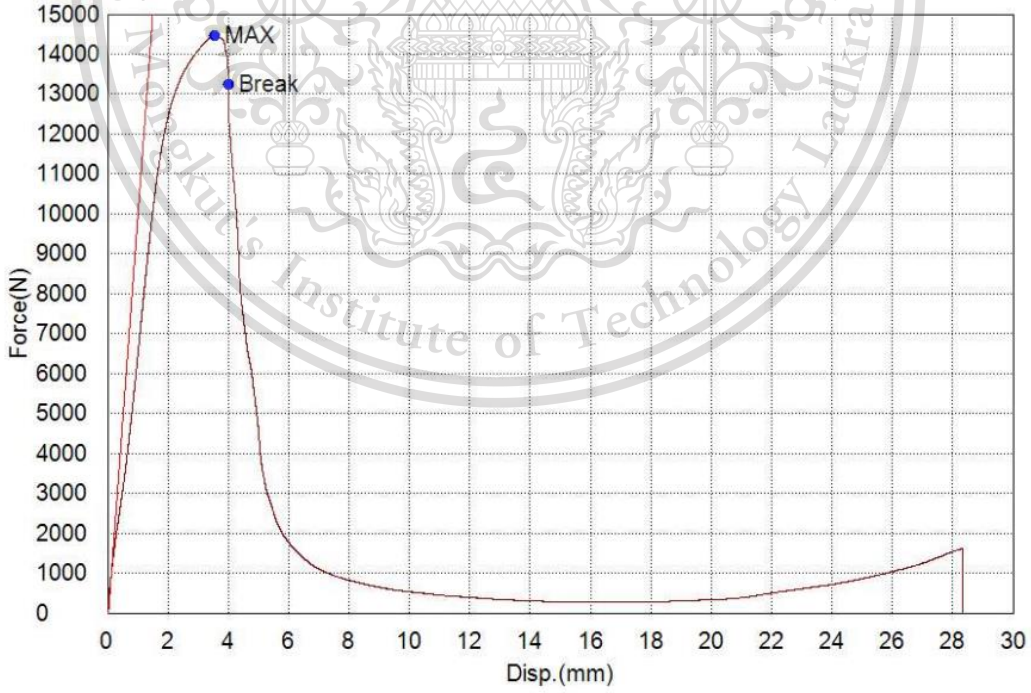


รูปที่ ผก. 26 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

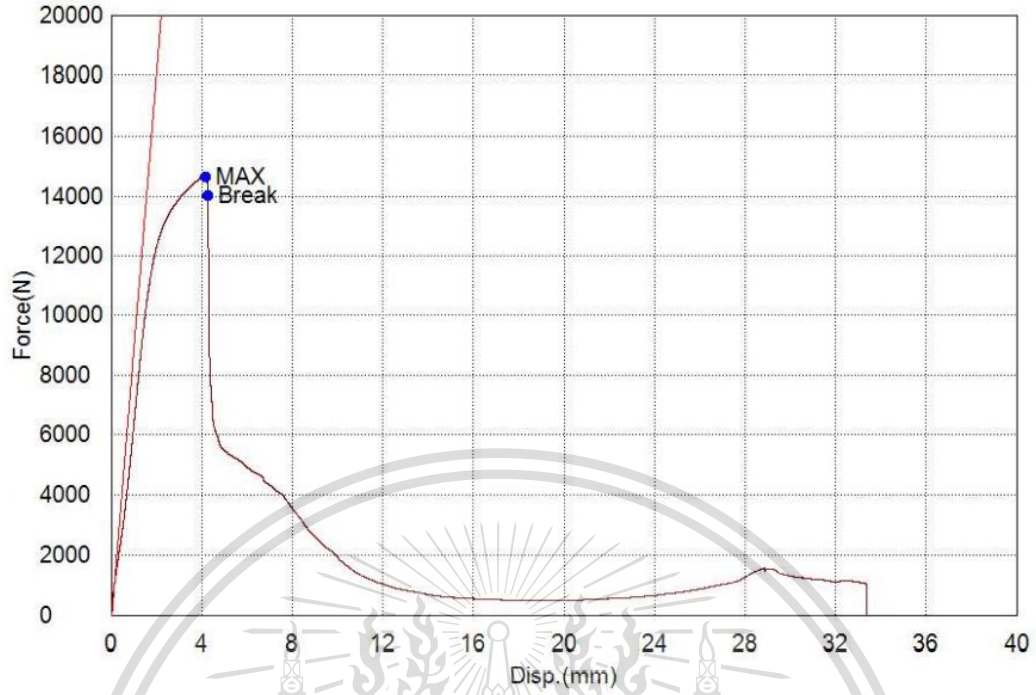


รูปที่ ผก. 27 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 8500 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

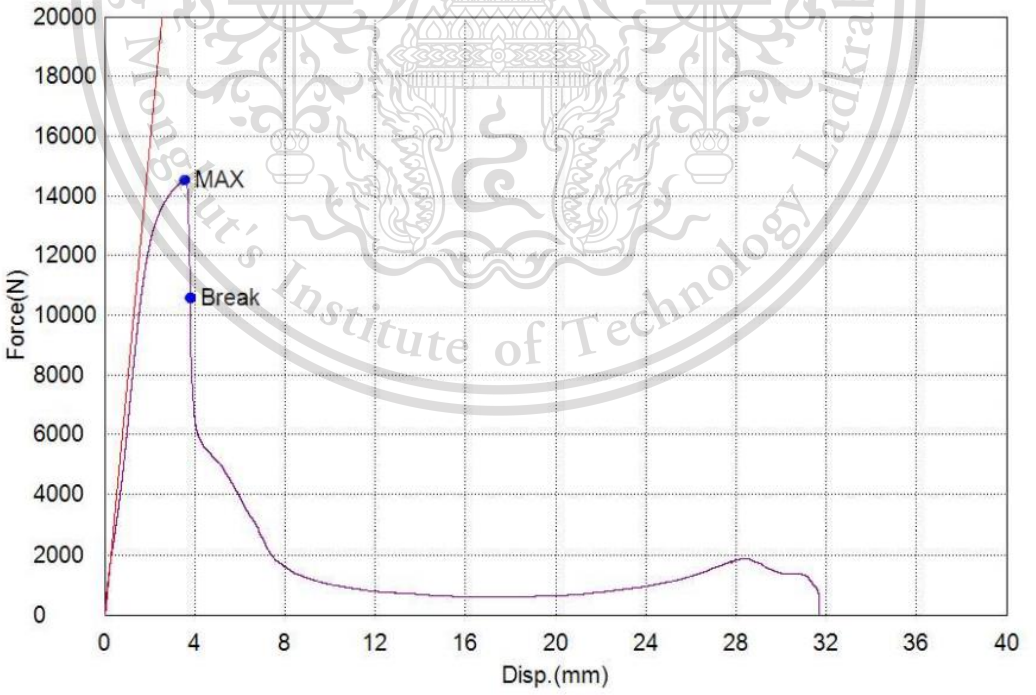


รูปที่ ผก. 28 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ผก. 29 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 2



รูปที่ ผก. 30 กราฟการทดสอบแรงดึง เงื่อนไขขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่หนึ่ง 10000 แอมแปร์ และขนาดของกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สอง 10000 แอมแปร์ ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ผข. 1 รายละเอียดของเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด

Model	YR-500C
Input Voltage	1-50Hz
Boost Voltage	1-50 Hz
Rated Capacity	50 kVA
Continuous power	35.4 kVA
Short current (spot)	22.5 kA (6.6%)
Continuous output current (spot)	5.7 kA
Max input (spot)	138 kVA
Electrode arm extension (spot)	425 mm
Arm distance (spot)	165 mm
Max electrode force	11700 N
Min electrode force	1500 N
Air pressure	0.5 MPa
Cooling water rated flow	3L/min
Cooling rate pressure drop	0.015 MPa
Projection class	IP20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.