

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อ  
รอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

A STUDY ON INFLUENCE OF RESISTANCE BRAZING PARAMETERS ON  
BRAZED JOINT BETWEEN 316L STAINLESS STEEL PLATES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-217-017

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อ  
รอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

A STUDY ON INFLUENCE OF RESISTANCE BRAZING PARAMETERS ON  
BRAZED JOINT BETWEEN 316L STAINLESS STEEL PLATES



ภูเมศวร์ แสงระยับ  
PHOOMETH SANGRAYUB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559  
KMITL-2016-EN-M-217-017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON INFLUENCE OF RESISTANCE BRAZING PARAMETERS ON  
BRAZED JOINT BETWEEN 316L STAINLESS STEEL PLATES

PHOOMETH SANGRAYUB

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
2016  
KMITL-2016-EN-M-217-017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

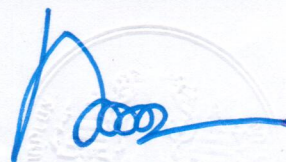
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L  
Thesis Title A Study on Influence of Resistance Brazing Parameters on Brazed Joint between 316L Stainless Steel Plates  
นักศึกษ นายภูเมศวร์ แสงระยับ  
รหัสประจำตัว 56601099  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-217-017

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วิภู	ศรียี่สิบสาย	
ดร.นิรันดร์	พิสุทธอานนท์	
รศ.สมนึก	วัฒน์ศรียกูล	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 13.30-15.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L
นักศึกษา	นายภูเมศวร์ แสงระยับ
รหัสประจำตัว	56601099
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด SiL CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบต่อเกย โดยมีตัวแปรในการเล่นประสาน คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า และตัวแปรตามของการศึกษา คือ ความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ ในขั้นตอนการศึกษาตัวแปรในการเล่นประสานที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป  $2^4$  ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน และอันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  และรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 4,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ให้ความแข็งแรงสูงสุด และพบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเล่นประสานจะส่งผลให้รอยเชื่อมและขนาดเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มีขนาดใหญ่ขึ้น และยังทำให้เกิดเฟส Fe-rich ในระหว่างชั้นของโลหะเติม ซึ่งขนาดของเฟส Fe-rich จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้การเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเล่นประสานยังส่งผลให้เฟส Ag-rich สามารถแทรกตัวในระหว่างเฟส Cu-rich ของโลหะเติมได้มากขึ้น ทำให้เฟส Cu-rich มีขนาดเฟสที่เล็กและละเอียด ซึ่งขนาดเฟส Fe-rich ที่ใหญ่ขึ้นและเฟส Cu-rich ที่ละเอียดและเล็กลง จะส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น สำหรับเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า พบว่า การเพิ่มเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้รอยเชื่อมสามารถประสานกันได้ดีและแข็งแรงกว่าใช้เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าน้อย แต่เนื่องจากระยะเวลาในการเล่นปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ศึกษาแตกต่างกันไม่มาก จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อทุกระดับที่ศึกษา มีขนาดเฟสและรูปร่างใกล้เคียงกัน สำหรับความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน พบว่า การเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานจะทำให้ รอยเชื่อม ขนาดเกรน และเฟส Fe-rich ที่เกิดในระหว่างชั้นของโลหะเติมจะมีขนาดเล็กลง และยังทำให้เฟส Ag-rich เกิดการแทรกตัวในระหว่างเฟส Cu-rich ได้น้อย จึงทำให้เฟส Cu-rich มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

<b>Thesis title</b>	A study on influence of resistance brazing parameters on brazed joint between 316L stainless steel plates
<b>Student</b>	Mr. Phoometh Sangrayub
<b>Student ID.</b>	56601099
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Industrial Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

## ABSTRACT

This research aims to study on influence of resistance brazing parameters on lap joint between 316L stainless steel plates using Sil CD1050-5M filler metal. The brazing parameters included welding current, welding time, electrode pressure and holding time. Shear strength and microstructure of the brazed joints of various experimental conditions were investigated. The  $2^4$  full factorial design with two replications was used to find the brazing parameters significantly affecting the joint strength. Results showed that welding current, welding time, electrode pressure and 2-way interactions between welding current and electrode pressure significantly affected the shear strength of brazed joint at significance level  $\alpha = 0.05$ . The brazed joint with welding current of 4,000 A, welding time of 2 s and electrode pressure of 0.3 MPa provided the maximum shear strength. In addition, it was found that the nugget size and average grain size of the brazed joint are larger with the increase of welding current. Fe-rich phase was found at the interfacial layer and its size was proportionally increased with the welding current. When the welding current was increased, Ag-rich phase appeared denser in the Cu-rich phase producing the smaller Cu-rich phase. It was found that with the larger Fe-rich phase and smaller Cu-rich phase, the joint strength was increased. Results also showed that a longer welding time provides a greater joint strength. However, effect of welding time on microstructure was not obvious because the welding times employed in this research were not considerably different. It was also found that the nugget size and average grain size of the brazed joint are smaller with the increase of electrode pressure. Ag-rich phase appeared smaller in the Cu-rich phase providing the larger Cu-rich phase. Consequently, the joint strength was decreased.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดี รวมถึงช่วยสนับสนุนทุนวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ อาจารย์นิวัฒน์ มูเก็ม สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่คอยชี้แนะ และให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ คุณอาทร แสงทับทิม ประธานบริษัท เอส.ที.ที. เมนเทนแนนซ์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ช่วยสนับสนุนวัสดุในการทดลอง และให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ คุณกัศร สุขพิมาย นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อำนวยความสะดวกในการทดลอง และให้โอกาสทางการศึกษา รวมถึงสนับสนุนทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน น้อง และญาติๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ แก่ข้าพเจ้าตลอดมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ภูเมศวร์ แสงระยับ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา .....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1.1 การต่อวัสดุ .....	4
2.1.2 ทฤษฎีการขาดของชิ้นงาน .....	22
2.1.3 ทฤษฎีทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล .....	26
2.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	35
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	41
2.2.1 การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด .....	41
2.2.1 การเล่นประสาน .....	44
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง .....	45
3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ .....	47
3.1.1 การออกแบบการทดลอง .....	47
3.1.2 วัสดุพื้นและโลหะเติม .....	48
3.1.3 การเล่นประสานด้วยความต้านทาน .....	49
3.1.4 การทดสอบแรงเฉือน .....	50
3.1.5 การวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคทางสถิติ .....	51
3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค .....	51
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง .....	51
3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	55
4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ .....	55
4.1.1 ผลการทดสอบแรงเฉือน .....	55
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	56
4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ .....	64
4.2.1 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า .....	64
4.2.2 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า .....	64
4.2.3 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน .....	65
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	65
4.3.1 ผลการทดลองจากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า .....	65
4.3.1.1 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	65
4.3.1.2 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด .....	72
4.3.1.3 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	75
4.3.2 ผลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า .....	84
4.3.2.1 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	85
4.3.2.2 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด .....	90
4.3.2.3 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	92
4.3.3 ผลจากการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน .....	98
4.3.3.1 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	98
4.3.3.2 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด .....	105
4.3.3.3 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	108
4.3.4 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคการทดสอบ แบบแผนที่ธาตุ .....	117
4.3.4.1 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping จากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า .....	117
4.3.4.2 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า .....	121
4.3.4.2 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping จากการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน .....	124
4.3.5 ผลการตรวจสอบลักษณะการแตกหักของรอยต่อ .....	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 สรุปผลจากการศึกษา.....	131
4.4.1. ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ ..	131
4.4.1.1 ผลการทดสอบแรงเฉือน .....	131
4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	132
4.4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ .....	132
4.4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	132
4.4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ EDS .....	133
4.4.2.3 ผลการศึกษารกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping .....	134
4.4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะการแตกหักของรอยต่อ .....	135
4.4.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาครั้งนี้ .....	135
4.4.4 แนวทางการศึกษาและพัฒนาต่อยอด.....	136
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	138
5.1 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ .....	138
5.2 ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ .....	138
5.2.1 ผลจากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า .....	138
5.2.2 ผลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า.....	139
5.2.3 ผลจากการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน .....	139
5.2.4 ผลจากการศึกษาลักษณะการแตกหักของรอยต่อ.....	140
เอกสารอ้างอิง .....	141
ภาคผนวก .....	144
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	145
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบแรงเฉือน .....	153
ภาคผนวก ค. ผลวิเคราะห์ EDS.....	170
ประวัติผู้เขียน .....	222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงผลการทดสอบและความผิดพลาดในการทดสอบ.....	28
2.2 รายละเอียดผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ $2^3$ แฟคทอเรียล.....	31
2.3 แผนการทดลอง $2^k$ แฟคทอเรียลเต็มรูป.....	32
2.4 แผนการทดลอง $3^3$ แฟคทอเรียลเต็มรูป.....	32
2.5 แผนการทดลอง $2^{4-1}$ แฟคทอเรียลบางส่วน.....	33
2.6 โครงสร้างซ้ำซ้อนของผลกระทบสำหรับ $2^{4-1}$ แฟคทอเรียลบางส่วน.....	34
2.7 แนวการกำหนดค่า Resolution สำหรับแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน.....	35
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	45
3.2 แสดงตัวแปรและระดับในการทดลอง.....	47
3.3 การออกแบบการทดลอง $2^4$ Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง.....	47
3.4 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้น.....	49
3.5 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมชนิด SiL CD1050-5M.....	49
4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงาน RSB และ RSW.....	55
4.2 Analysis of variance for RSB (coded units).....	57
4.3 Reduced model.....	57
4.4 Paired T-Test and CI: RSB, RSW.....	62
4.4 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม.....	64
4.5 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า.....	64
4.6 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะเปลวเพลิง Oxy fuel gas welding.....	5
2.2 ลักษณะการเชื่อม .....	5
2.3 กระบวนการเชื่อมแบบไฟฟ้า Arc welding.....	6
2.4 ลักษณะการเชื่อมด้วยรูปผสมฟลักซ์ .....	6
2.5 ลักษณะการเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบมิก.....	7
2.6 ลักษณะการเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบตึก.....	7
2.7 ลักษณะการเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบตึก.....	8
2.8 การเกิดความต้านทานในการเชื่อมต้านทานแบบจุด .....	8
2.9 รอบเวลาการเชื่อมต้านทานแบบจุด.....	10
2.10 กระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด.....	11
2.11 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด.....	12
2.12 การเล่นประสานท่อแอร์รถยนต์ทำจากอลูมิเนียม.....	15
2.13 การเล่นประสานในเตาของอัลลอย.....	16
2.14 การเล่นประสานเหนียวน้ำ.....	17
2.15 การเล่นประสานต้านทาน.....	17
2.16 การเล่นประสานแบบจุ่ม.....	18
2.17 การเล่นประสานอินฟราเรด.....	18
2.18 ตัวอย่างระยะต่อเกลยของกระบวนการเล่นประสาน 3-6 เท่าของความหนาชิ้นงาน.....	19
2.19 ลักษณะรอยต่อแบบต่างๆ.....	20
2.20 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความแข็งแรงของรอยต่อ.....	20
2.21 การใช้งานโลหะเติมของการเล่นประสานในรูปแบบต่างๆ.....	21
2.22 ลักษณะของแรงเฉือน.....	23
2.23 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก.....	24
2.24 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	24
2.25 การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก.....	26
2.26 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	36
2.27 การสะท้อนแสงที่ต่างกันบริเวณขอบเกรน และภายในเกรน.....	37
2.28 การสะท้อนแสงที่ต่างกันภายในเกรนเนื่องจากการเอียงของอะตอม.....	37
2.29 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	38
2.30 ปริมาตรอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของชิ้นงาน ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก่อให้เกิดสัญญาณต่างๆ.....	39
2.31 ตัวอย่างผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS.....	40
3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ.....	46
3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ชิ้นงานทดสอบ .....	49
3.4 เครื่อง Spot welding ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522 .....	50
3.5 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG - X .....	50
3.6 ลักษณะการต่อชิ้นงานทดสอบ.....	51
3.7 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom .....	52
3.8 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปตัวเรือนด้วยเรซิน .....	52
3.9 เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบยี่ห้อ Struers รุ่น Labolpol-1.....	53
3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab.....	53
3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV .....	54
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV .....	54
4.1 Pareto chart แสดงความแตกต่างของอิทธิพลของแต่ละตัวแปร .....	58
4.2 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลอง .....	59
4.3 กราฟตัวแปรหลัก (Main effects) ของการทดลอง .....	59
4.4 Interaction plots แสดงผลกระทบร่วม .....	60
4.5 ลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม .....	61
4.6 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างชิ้นงาน RSB กับ RSW .....	63
4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ยังไม่ได้เล่นประสาน ด้วยความต้านทาน .....	66
4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A .....	67
4.9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2500 A .....	68
4.10 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3000 A .....	69
4.11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A .....	70
4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A .....	71
4.13 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของรอยต่อที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (a) 2000 A, (b) 2500 A, (c) 3000 A และ (d) 3500 A.....	73
4.14 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อจากการถ่ายภาพ SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ที่กระแสไฟฟ้า ในการเชื่อม (a) 2000, (b) 2500, (c) 3000, (d) 3500 และ (e) 4000 A .....	74
4.15 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A บริเวณรอยเชื่อม (FZ) .....	75
4.16 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A บริเวณที่ได้รับผลกระทบ ทางความร้อนของรอยต่อ .....	76
4.17 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2500 A .....	77
4.18 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3000 A .....	79
4.19 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A .....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A บริเวณเฟส CuAg ที่เกิดระหว่างเฟส Fe .....	81
4.21 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A .....	83
4.22 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s .....	86
4.23 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1 s....	87
4.24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1.5 s .....	88
4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s....	89
4.26 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5 และ (d) 2 s.....	90
4.27 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (a) 0.5, (b) 1, (c) 1.5 และ (d) 2 s.....	91
4.28 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 0.5 s.....	92
4.29 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1 s.....	94
4.30 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1.5 s.....	95
4.31 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s.....	96
4.32 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s บริเวณเฟส AgCu.....	98
4.33 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa.....	100
4.34 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.35 MPa .....	101
4.35 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.4 MPa.....	102
4.36 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.45 MPa .....	103
4.37 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa.....	104
4.38 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน .....	106
4.39 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อจากการถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ที่ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน (a) 0.3, (c) 0.35, (d) 0.4, (e) 0.45 และ (f) 0.5 MPa .....	107
4.40 ผลวิเคราะห์ EDS ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa.....	108
4.41 ผลวิเคราะห์ EDS ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.35 MPa .....	110
4.42 ผลวิเคราะห์ EDS ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.4 MPa.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 ผลวิเคราะห์ EDS ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.45 MPa .....	113
4.44 ผลวิเคราะห์ EDS ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa.....	114
4.45 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า 2000 A .....	117
4.46 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า 4000 A .....	119
4.47 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s .....	121
4.48 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s .....	122
4.49 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa .....	124
4.50 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa .....	126
4.51 ลักษณะการแตกหักของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A เวลา ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa.....	128
4.52 ผลวิเคราะห์ EDS จุดแตกหักของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa ...	129
4.53 ลักษณะการแตกหักของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A เวลา ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa.....	129
4.54 ผลวิเคราะห์ EDS จุดแตกหักของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ...	130
4.55 ลักษณะการแตกหักของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A เวลาในการปล่อย กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa .....	130
4.56 ผลวิเคราะห์ EDS จุดแตกหักของรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa .....	131
4.57 รอยต่อของ 316L SS จากการแล่นประสานในเตาภายใต้บรรยากาศปกติ (a) ไม่ใช้ฟลักซ์, (b) ใช้ฟลักซ์ชนิด F-10HB ช่วยในการแล่นประสาน.....	136
4.58 องค์ประกอบและลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการเชื่อมประสานเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเชื่อมต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน และสามารถเชื่อมต่อโลหะที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยแทรกโลหะเติม (Filler metal) ไว้ระหว่างรอยต่อของโลหะหลัก ซึ่งกระบวนการนี้จะอาศัยหลักการให้ความร้อนแก่รอยต่อจนทำให้โลหะเติมหลอมละลาย และแทรกซึมตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างของรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary reaction) อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมประสานจะสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  แต่ไม่ถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะหลักที่นำมาเชื่อมประสาน โดยโลหะเติมที่ใช้จะจัดอยู่ในโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น เงิน หรืออาจเป็นโลหะผสม เช่น ทองเหลือง หรือทองแดงผสมฟอสฟอรัส ที่สำคัญโลหะเติมที่เลือกใช้จะต้องมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะหลัก ข้อดีของกระบวนการเชื่อมประสาน คือ สามารถใช้เชื่อมต่อวัสดุได้หลากหลายชนิด หรือมีลักษณะรอยต่อที่มีรูปร่างซับซ้อน และความสามารถที่เด่นชัดของกระบวนการเชื่อมประสาน คือ สามารถเชื่อมต่อวัสดุที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ให้ติดกันได้เต็มทั้งหน้าตัดของรอยต่อ [1-2] แต่ในกรณีการเชื่อมประสานวัสดุที่มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือไทเทเนียม นั้นจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากวัสดุจำพวกนี้เมื่อมีอุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดออกไซด์บนผิวของชิ้นงาน ซึ่งทำให้การเชื่อมประสานเกิดขึ้นได้ยาก [4] เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ในการเชื่อมประสาน วิธีการที่ยอมรับใช้ในการเชื่อมประสานวัสดุที่เกิดออกไซด์ได้ดี คือ การเชื่อมประสานในเตาสู่ญญากาศ หรือการควบคุมบรรยากาศภายในเตาโดยใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน (Ar) และใช้ฟลักซ์ช่วยในการกำจัดหรือป้องกันการเกิดออกไซด์ หรือสารเคมีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการเชื่อมประสาน [5-6] ซึ่งวิธีการที่กล่าวนี้เป็นวิธีการที่ซับซ้อนและใช้ระยะเวลานานในการดำเนินงาน จึงได้มีการนำการเชื่อมประสานด้วยความต้านทาน (Resistance brazing) มาศึกษาและประยุกต์ใช้ ซึ่งข้อดีของการเชื่อมประสานด้วยความต้านทาน คือ สามารถเชื่อมประสานชิ้นงานได้ง่าย สะดวก และไม่ต้องฟลักซ์ช่วยในการเชื่อมประสาน เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมที่รวดเร็ว โดยอาศัยทฤษฎีของการเกิดความร้อนจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้เกิดความร้อนสูงพอสำหรับการเชื่อมได้ในระยะเวลาอันสั้น จึงไม่ก่อให้เกิดออกไซด์บนผิวชิ้นงานในการเชื่อม ด้วยเหตุนี้การเชื่อมประสานด้วยความต้านทานจึงช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินงาน ความซับซ้อนในการดำเนินงาน และสามารถเชื่อมประสานวัสดุที่มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี หรือมีชั้นออกไซด์ที่แข็งแรงได้ภายใต้บรรยากาศแบบปกติ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อ และโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมประสานระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด Sil CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบต่อเกย (Lap joint) โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานด้วยความต้านทาน ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และเวลาเกิดขึ้นงานหลังปล่อยกระแส ไฟฟ้าที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L กับโลหะเติมชนิด Sil CD1050-5M

## 1.3 สมมติฐานการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ สามารถตั้งสมมติฐานเพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.3.1 ตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และเวลาเกิดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

1.3.2 ตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และเวลาเกิดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด Sil. CD1050 - 5M

1.4.2 ศึกษาเฉพาะตัวแปรและระดับในการทดลอง คือ กระแสไฟฟ้า 2000 - 4000 Amp เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 - 2 Sec ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 - 0.5 MPa และเวลาเกิดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 0 - 5 Sec

1.4.3 ออกแบบลักษณะการต่อแบบต่อเกย (Lap joint) ตามมาตรฐานการออกแบบชิ้นงานทดสอบสำหรับงานเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) AWS C3

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

1.5.2 ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทางสถิติ  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับ  $\alpha = 0.05$

1.5.3 เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองตามที่ออกแบบไว้

1.5.4 ทำการทดลองแล่นประสานตามที่ได้ทำการออกแบบทางสถิติไว้ เพื่อหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

1.5.5 ทดลองแล่นประสานเพิ่มเฉพาะตัวแปรที่มีผลกระทบ เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง ด้านตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ และการเปลี่ยนแปลงเฟสในระดับจุลภาค

1.5.7 สรุปผลการทดลองพร้อมทั้งเขียนข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1.1 การต่อวัสดุ (Joining of materials)

การต่อวัสดุ คือ การนำวัสดุตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่ามาต่อให้ติดกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้ในการต่อโลหะ โดยปกติการเชื่อมต่อวัสดุจะใช้วิธีที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย และเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้ความดันร่วมกับความร้อน หรือใช้อย่างเดียวเพื่อให้เกิดรอยเชื่อม ซึ่งตรงข้ามกับการบัดกรีอ่อนและการบัดกรีแข็ง ซึ่งชิ้นงานจะไม่เกิดการหลอมละลาย โดยทั่วไปมีแหล่งพลังงานหลายอย่างสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อม เช่น การใช้ความร้อนจากเปลวแก๊ส การอาร์คโดยการใช้กระแสไฟฟ้า ลำแสงเลเซอร์ การใช้ไอเล็กตรอน การเสียดทาน การใช้คลื่นเสียง เป็นต้น โดยกระบวนการต่อวัสดุจะมีอยู่จำนวนมาก เมื่อนำมาจัดเข้ากลุ่มใหญ่ๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการ คือ การเชื่อม (Welding) การบัดกรี (Soldering) การแล่นประสาน (Brazing) และการต่อยึดทางกล (Fasteners) [1]

#### 2.1.1.1 การเชื่อม (Welding)

การเชื่อมเป็นกระบวนการที่ทำให้เนื้อของชิ้นงานบริเวณรอยต่อหลอมติดกัน หรืออาจจะเติมวัสดุประสานในระหว่างรอยต่อของงานเชื่อมเพื่อให้ตัวชิ้นงานนั้นติดกัน ที่พบบ่อยในกระบวนการผลิตทั่วไปนั้น การเชื่อมจะอาศัยอุณหภูมิ (ในบางประเภทจะใช้ความดันร่วมด้วย) มาใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายที่บริเวณรอยต่อ โดยการเชื่อมทั่วไป สามารถแบ่งเป็นได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion) ใช้ความร้อนในการทำให้วัสดุหลอมละลายที่บริเวณจุดเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมประสานเมื่อเย็นตัวลง

การเชื่อมแบบไม่เปลี่ยนสถานะ (Solid state) ใช้ความดันและความร้อนที่จะทำให้เกิดการเชื่อมประสานโดยไม่เกิดการหลอมละลายของวัสดุ

#### การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding)

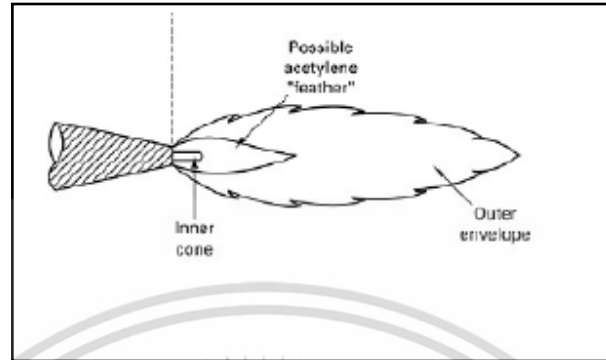
ลักษณะงานเชื่อมที่มีการหลอมละลาย เกิดขึ้นกับชิ้นงานบริเวณที่จะเชื่อมนั้น มักนิยมเติมวัสดุประสาน หรือ Filler metal เพื่อเป็นการเพิ่มเนื้อประสาน และเพิ่มความแข็งแรงกับรอยเชื่อมนั้นได้ ซึ่งมีหลายประเภทเช่น

##### 1) Oxy fuel gas welding (OFW)

เป็นการเชื่อมที่ใช้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Fuel gas) และแก๊สออกซิเจน เพื่อให้ได้เปลวไฟไปใช้ในการหลอมละลายให้ชิ้นงานติดกัน ชิ้นงานจะติดกันอาจเกิดจากการหลอมละลายของชิ้นงานเอง และมักจะมีลวดเชื่อม (Filler metal) ซึ่งอาจจะทำจากโลหะเดียวกับชิ้นงานมาเป็นตัวเสริมให้รอยเชื่อมนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มได้ ยกตัวอย่าง เช่น การเชื่อมด้วย Acetylene ( $C_2H_2$ ) ซึ่งมีปฏิกิริยา

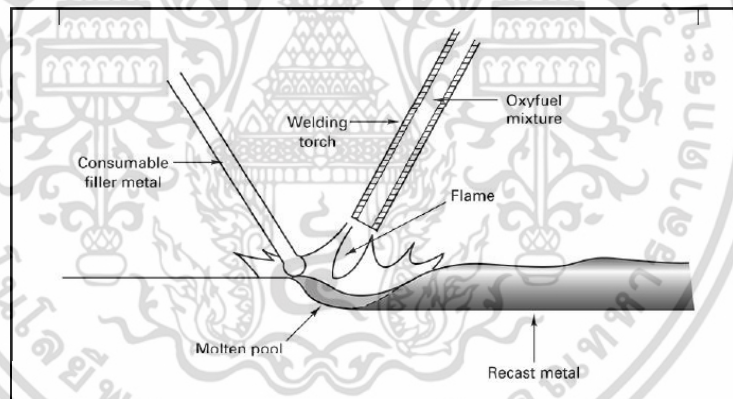
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสันดาป สองช่วง คือ ช่วงแรก คือ  $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + \text{heat}$  เปลวเพลิงด้านใน และ ช่วงที่สอง คือ  $2CO + H_2 + 1.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + \text{heat}$  เปลวเพลิงด้านนอกแสดงดังรูปที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 ลักษณะเปลวเพลิง Oxy fuel gas welding (OFW) [1]

นอกจาก Acetylene แล้ว แก๊สที่นิยมใช้มี Hydrogen ( $H_2$ ), MAPP ( $C_3H_4$ ), Propylene ( $C_3H_6$ ) และ Propane ( $C_3H_8$ ) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเชื่อม [1]

ข้อได้เปรียบของการเชื่อมแก๊ส

- เป็นการเชื่อมที่ไม่ต้องใช้แรงกดอัด
- ควบคุมอุณหภูมิในการเชื่อมง่าย
- อุปกรณ์ในการเชื่อมหาได้ง่าย

เสียเปรียบของการเชื่อมแก๊ส

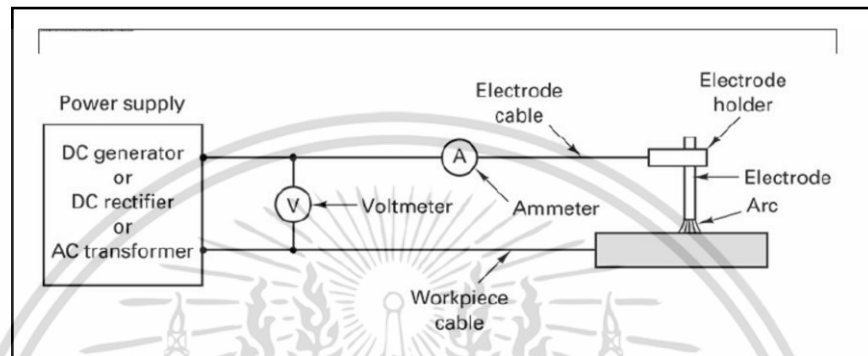
- การเชื่อมแบบนี้อาจทำให้เกิดสิ่งเจือปนบริเวณรอยเชื่อมได้ง่าย
- ต้องใช้ฟลักซ์เพื่อช่วยในการทำความสะอาดผิวงานบริเวณรอยเชื่อม
- ความร้อนอาจทำให้ชิ้นงานบิดงอได้
- ผู้เชื่อมต้องมีความชำนาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) Arc welding (AW)

เป็นการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากการอาร์คของกระแสไฟฟ้า เนื่องมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันของขั้วไฟฟ้าที่เกิดระหว่างรูปเชื่อม (Electrode) กับชิ้นงาน หลอมละลายทั้งตัวรูปเชื่อมและชิ้นงานให้ติดกัน โดยตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบ กระแสตรง (DC) หรือกระแสสลับ (AC) ก็ได้

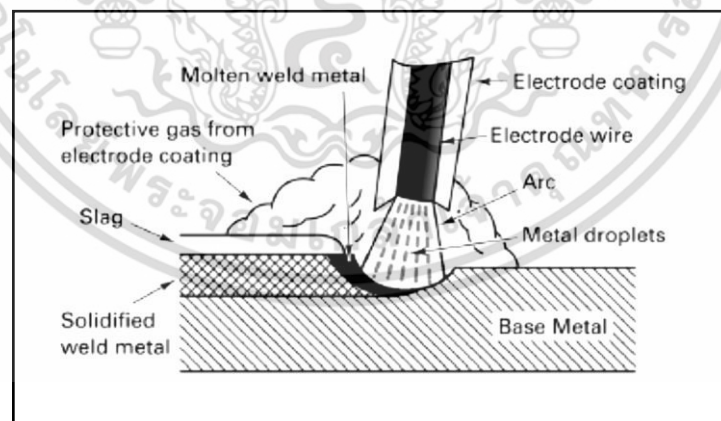
Arc shielding ในบางครั้ง จะมีการนำก๊าซเฉื่อยเช่น ก๊าซอาร์กอนหรือฮีเลียมมาติดที่ปลายรูปเชื่อม เพื่อป้องกันการออกซิไดซ์และการติดกันระหว่างรูปเชื่อมกับชิ้นงานขณะเชื่อม



รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมแบบไฟฟ้า Arc welding (AW) [1]

การเชื่อมด้วยรูปเชื่อมผสมฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW)

- มีการเคลือบสารที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นแก๊สปกป้องในขณะที่ทำการเชื่อม
- มักจะเกิดตะกรัน (Slag) เมื่อสารเคลือบเข้าไปในรูปเชื่อม ซึ่งจะส่งผลต่อเกิดตะกรันบนผิวเชื่อมชิ้นงานด้วย



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเชื่อมด้วยรูปผสมฟลักซ์ [1]

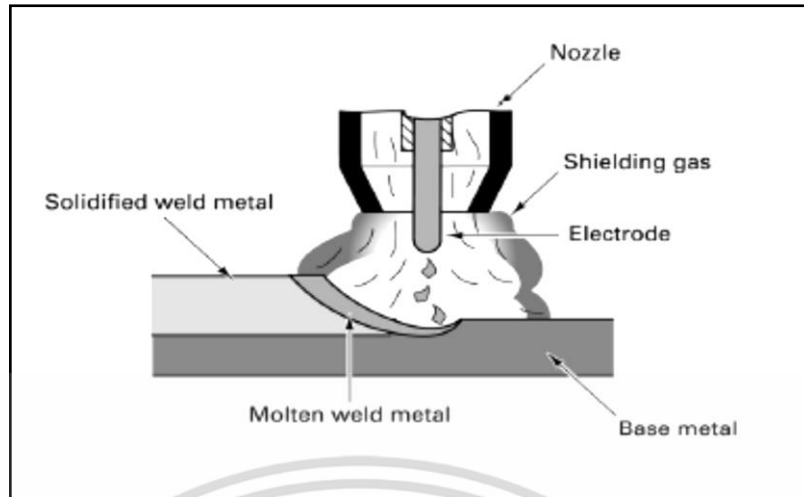
การเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบมิก (Gas metal arc welding: GMAW)

- คล้ายแบบ SMAW แต่มีการติดตั้ง ระบบส่งแก๊สปกป้องที่บริเวณปลายรูปเชื่อมแทนการใช้สารเคลือบกับรูปเชื่อมเหมือนกันกรณี SMAW

- ไม่มีตะกรัน มักจะเรียกกระบวนการนี้ว่าเชื่อมมิก (MIG = Metal inert gas welding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

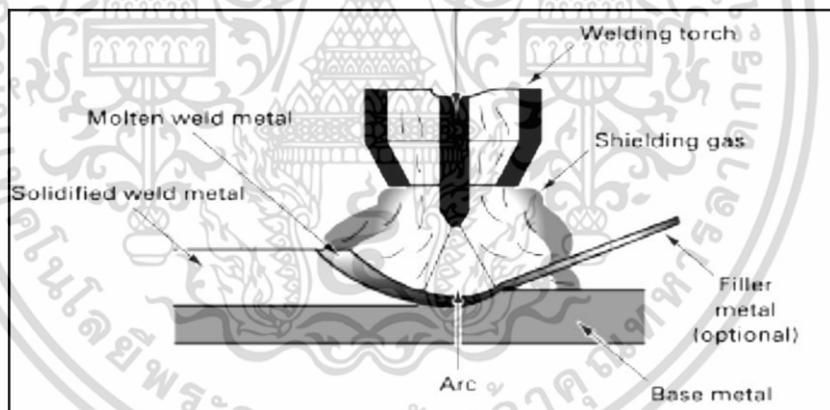
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบมิก [1]

การเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบตึง (Gas tungsten arc welding: GTAW)

- ใช้ทั้งสแตนมาทำเป็นรูปเชื่อม ซึ่งไม่หลอมละลายไป ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีโลหะเติม (Filler) มาเป็นตัวประสานรอยเชื่อมด้วย

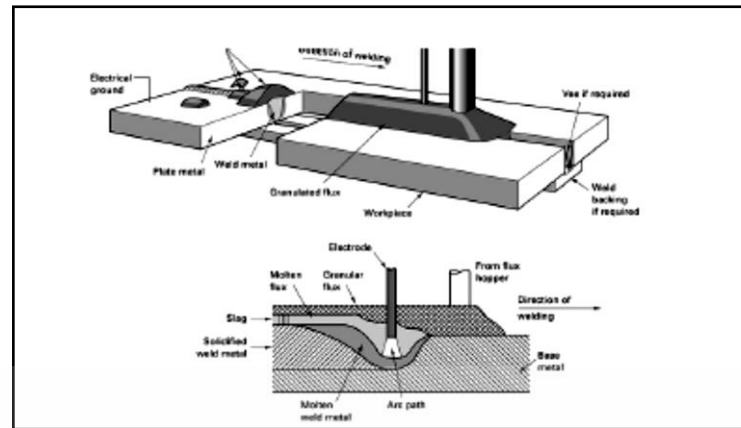


รูปที่ 2.6 ลักษณะการเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบตึง [1]

การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding : SAW)

- ไม่ใช่แก๊สปกป้อง ต้องมีการใช้สารเคลือบ (ฟลักซ์) เหมือนในกรณี SMAW แต่นำเอาฟลักซ์มาเคลือบบริเวณที่จะทำการเชื่อม และนำรูปเชื่อมสอดลงไปเหนือบริเวณที่จะเชื่อม

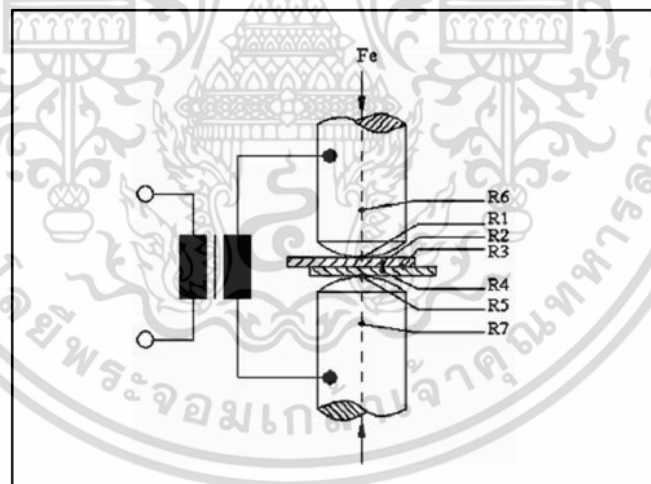
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อยแบบตึง (GTAW) [1]

### 3) Resistance welding (RW)

การเชื่อมความต้านทาน เป็นการหลอมชิ้นงานให้ติดกัน โดยใช้พลังงานจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ บริเวณรอยต่อของชิ้นงานภายใต้แรงกด การเชื่อมต้านทานแบบจุด



รูปที่ 2.8 การเกิดความต้านทานในการเชื่อมต้านทานแบบจุด [2]

การเชื่อมต้านทานแบบจุด คือ กรรมวิธีการประสานวัสดุที่ผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อด้วยความร้อนที่เกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสผ่านรอยต่อที่ถูกกดแน่นด้วยแรงกดจากอิเล็กโทรด (Fe) ดังแสดงในรูปที่ 1 ผิวสัมผัสในพื้นที่ที่กระแสเข้มข้นมีความร้อนเพิ่มขึ้นโดยความต่างศักย์ที่มีค่าต่ำและกระแสที่ค่าสูงในช่วงพัลส์ช่วงสั้นๆ เพื่อทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะเชื่อม เมื่อกระแสเกิดการไหล แรงกดจากอิเล็กโทรดจะคงกดนิ่งจนบริเวณที่หลอมละลายเย็นตัวและแข็งตัว และปล่อยแรงกดออกเมื่อแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.8 ประกอบด้วยความต้านทานทั้งหมด 7 จุด ดังนี้

- ค่าความต้านทาน  $R_1$  คือ ความต้านทานของผิวชั้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance)
- ค่าความต้านทาน  $R_2$  คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode contact resistance)
- ค่าความต้านทาน  $R_3$  คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)
- ค่าความต้านทาน  $R_4$  คือ ความต้านทานของผิวชั้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)
- ค่าความต้านทาน  $R_5$  คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode contact resistance)
- ค่าความต้านทาน  $R_6$  คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode resistance)
- ค่าความต้านทาน  $R_7$  คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode resistance)

Aslanlar [3] ได้สรุปค่าความต้านทานโดยรวมของการเชื่อมต้านทานแบบจุดว่าสามารถหาค่าได้ ตามสมการที่ 2.1 คือ

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

เมื่อค่าความต้านทานประกอบด้วยสองส่วน คือ ความต้านทานของวัสดุ ( $R_2, R_4, R_6, R_7$ ) และความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด ( $R_1, R_5$ ) ความต้านทานของวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน ( $R_2, R_4$ ) และอิเล็กโทรด ( $R_6, R_7$ ) ค่าต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำการเชื่อม ขณะเดียวกันค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสถานะของปลายอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมเกิดขึ้นจากค่าความต้านทาน  $R_3$  ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนสูงสุดในรอยต่อเกย ค่าความร้อนที่มีค่าสูงนี้ขึ้นอยู่กับสถานะพื้นผิวของของโลหะที่ใช้เชื่อม แรงกด กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม

นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นแล้ว ค่าความต้านทานโดยรวมขึ้นอยู่กับความดันที่ผิวสัมผัส ค่า  $R_1, R_3$  และ  $R_5$  ที่อินเตอร์เฟสระหว่างชิ้นงาน การให้ความร้อนพื้นที่สัมผัส  $R_1$  และ  $R_5$  ที่ถูกต้องต้องมีการชดเชยค่าอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิของอิเล็กโทรดให้มีค่าต่ำ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่ถูกต้อง คือ อิเล็กโทรดต้องมีสมบัติการนำความร้อนที่ดี มีผิวที่ละเอียดและสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน เช่น คราบน้ำมัน หรือจาระบี

การเชื่อมต้านทานแบบจุดนี้ นิยมในการนำไปทำการเชื่อมประกอบโลหะแผ่นบาง เช่น โครงสร้างรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ สิ่งก่อสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น ข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบจุดที่เห็นได้เด่นชัด คือ ความเร็วในการเชื่อมมีค่าสูง และมีความเหมาะสมสำหรับการผลิตแบบอัตโนมัติ สามารถนำเข้าไปร่วมในการผลิตแบบอัตโนมัติในสายการผลิตร่วมกับ

เครื่องจักรต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการหาช่างฝีมือในการปฏิบัติการได้อย่างดีเยี่ยม

ตัวแปรการเชื่อม

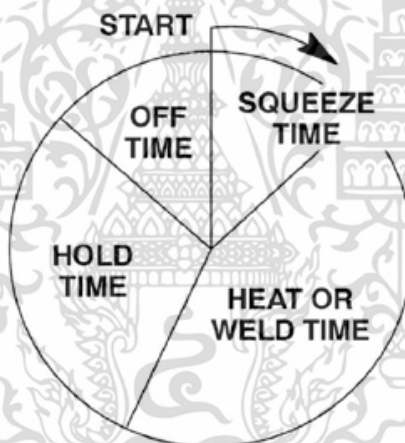
- การเกิดความร้อน (Heat generation)

การประยุกต์ใช้กฎของโอห์มเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำ ความต้านทานไฟฟ้าที่ยับยั้งการไหลผ่านของกระแสจะทำให้เกิดความร้อน (H) ที่สัมพันธ์กับกระแสเชื่อม (I) และความต้านทาน (R) โดยเป็นไปตามสูตรพื้นฐาน [2] ดังนี้

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

- เวลา (Time)

การเชื่อมต้านทานแบบจุดเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น โดยทั่วไปกระแสที่ใช้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุดมีค่าที่ 60 ไซเคิล (Cycle) โดยที่ 60 ไซเคิล มีค่าเท่ากับ 1 วินาที เวลาในการเชื่อมต้านทานแบบจุดแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยเวลาหลัก 4 ส่วน ดังรูปที่ 2.9 [4]



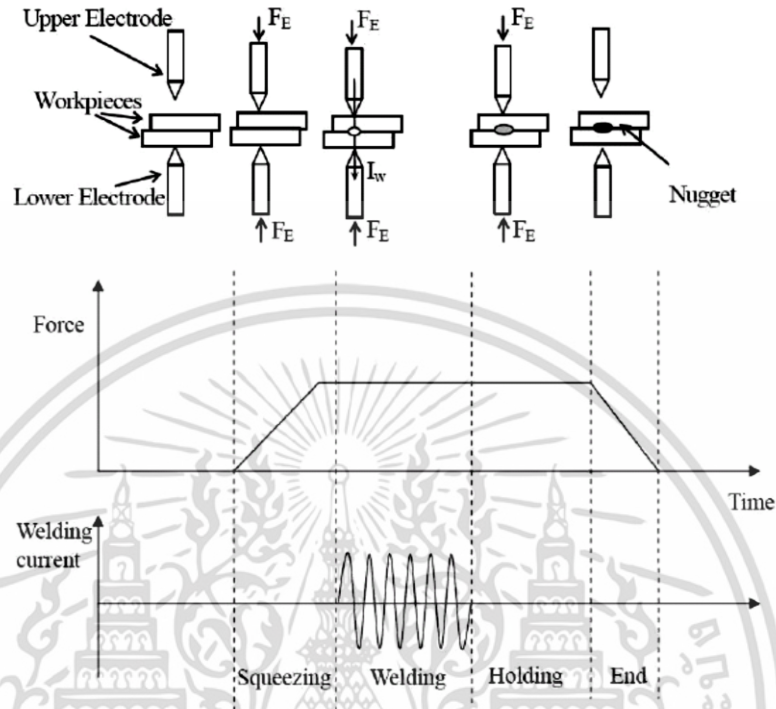
รูปที่ 2.9 รอบเวลาการเชื่อมต้านทานแบบจุด [5]

- เวลากด (Squeeze time) คือ เวลาที่เริ่มต้นเข้ามาของสัญญาณเชื่อมและกระแสเชื่อมในครั้งแรกเป็นเวลาที่ใช้เล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงานและมีแรงกดเพียงพอก่อนที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยออกมา

- เวลาเชื่อม (Weld time) คือ เวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้ามาในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมในช่วงลักษณะการเชื่อมหนึ่งครั้ง

- เวลาอดค้าง (Hold time) คือ ช่วงเวลาที่แรงกดจากหัวอิเล็กโทรดที่ยังกระทำต่อชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในช่วงเวลาท้ายสุดสิ้นสุดลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวที่มากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงขึ้นในรอยเชื่อมจนสามารถยอมรับได้

- เวลาเย็นตัว (Off time) คือ ช่วงเวลาระหว่างเวลาที่หัวอิเล็กโทรดเสร็จสิ้นการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมและการเคลื่อนที่ไปที่ทำการเชื่อมที่ตำแหน่งที่ต้องการต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อมซ้ำรอบการเชื่อมเดิม (กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมยังคงเดิม)



รูปที่ 2.10 กระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด [5]

ด้วยเหตุนี้ เมื่อทำการพิจารณาค่าเวลาการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องแล้ว สมการการเกิดความร้อนสมการที่ 2.3 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สมการการเกิดความร้อน (H) จากการเชื่อมต้านทานแบบจุด ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) เวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) ดังนี้

$$H = I^2 R t K \tag{2.3}$$

เวลาการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเชื่อมต้านทานแบบจุด ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไปแล้วอาจทำให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายได้ และอาจส่งผลทำให้เกิดโพรงอากาศภายในได้ นอกจากนั้นอาจทำให้เกิดการดึงเอาโลหะหลอมเหลวออกจากพื้นที่การเชื่อมซึ่งทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้าตัดลงได้ เวลาการเชื่อมที่สั้นเกินไปนั้นทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไป得太ลำบากในโลหะเชื่อม ไม่เกิดการบิดเบี้ยว พื้นที่ผลกระทบความร้อนรอบๆ รอยเชื่อมมีขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตามสมการความร้อนที่แสดงในสมการที่ 2.3 ไม่นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีค่าที่สามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่ก่อตัวในแนวเชื่อม [5] ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และเวลาเชื่อม (t) ดังต่อไปนี้

$$Q = I^2 R t \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงกด (Pressure)

จุดประสงค์ของการใช้แรงกดดันต่อรอยต่อการเชื่อมด้านทานแบบจุด คือ การกดยึดชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันในขั้นตอนเริ่มต้นการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าที่จุดที่ต้องการเชื่อม ไม่ได้มีหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงานให้แน่นเข้าหากัน ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมด้านทานแบบจุด ชิ้นงานต้องใช้เครื่องมืออื่นๆ เช่น อุปกรณ์จับยึด ในการจับยึดชิ้นงานให้แน่นและอยู่ในตำแหน่งการเชื่อมก่อนการกดของอิเล็กโทรดเสมอ

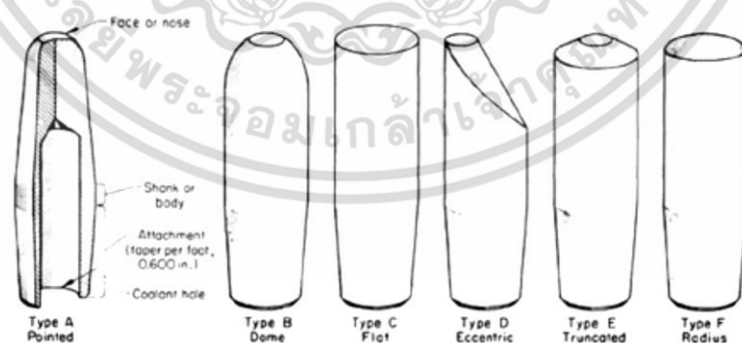
- หัวอิเล็กโทรด (Electrode tip)

ทองแดง คือ โลหะที่นิยมนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุด จุดประสงค์หลักในการใช้อิเล็กโทรด คือ เพื่อเป็นตัวนำกระแสการเชื่อมสู่ชิ้นงาน บริเวณจุดที่มีแรงกดกระทำ เพื่อนำความร้อนออกจากผิวหน้าชิ้นงาน และเพื่อรักษาคุณลักษณะของความร้อนและกระแสไฟฟ้การเชื่อมต่อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมขณะทำการเชื่อม

ปลายอิเล็กโทรดทำจากทองแดงผสมหรือวัสดุอื่นๆ โดยสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน (The resistance welders manufacturing association: RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper based alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I-V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด เมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งและอุณหภูมิการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง

- กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory metal) เป็นโลหะผงขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่นของผสมระหว่างทองแดงและไททาเนียม ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อนและความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 ยกตัวอย่างเช่น กลุ่ม 10 หมายถึง ค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของทองแดง ค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.11 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด [4]

รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบของอิเล็กโทรดมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน 6 รูปแบบแสดงด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษรตั้งแต่ A ถึง F อิเล็กโทรด A แบบจุด (Type A pointed) ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานที่ต้องการค่าความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมสูง อิเล็กโทรด D แบบรูปร่าง ผิดปกติ (Eccentric type) ใช้กับพื้นที่แคบๆ หรือมุมอับ เป็นต้น

พิจารณาขั้นตอนการเชื่อมด้านทานแบบจุด พบว่าขนาดของรอยเชื่อมนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดของปลายอิเล็กโทรด โดยปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมควรมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดเล็กน้อย ถ้าปลายอิเล็กโทรดมีค่าน้อยจะส่งผลทำให้รอยเชื่อมมีขนาดเล็กและไม่แข็งแรง แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดนั้นมีขนาดที่ใหญ่เกินไป จะส่งผลทำให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ และทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนได้

การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดของการเชื่อมอิเล็กโทรด สามารถหาค่าได้โดยการใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} = 0.100'' + 2t \quad (2.5)$$

เมื่อ  $t$  คือ ความหนาของวัสดุมีหน่วยเป็นนิ้ว สมการนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่างกันได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.5 นี้แตกต่างจากสมการที่เสนอโดยสมาคมโลหะอเมริกา [6] ที่แสดงสมการสำหรับคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดสำหรับแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่เกิน 3 มม. (1/8 นิ้ว) เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F ที่แสดงในรูปที่ 2.11 สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่มีค่าดังสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$D_2 = \sqrt{t} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D_2$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดในหน่วย mm และ  $t$  คือ ความหนาของแผ่นวัสดุ โดยเมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F แล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมหรืออาจมีค่าเท่ากับ

$$D = D_2 = 5\sqrt{t} \quad (2.7)$$

เมื่อทำการเชื่อมวัสดุที่มีความหนาต่างกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นบางกว่าเป็นหลัก หรือหากทำการเชื่อมโลหะสามแผ่นเข้าด้วยกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นที่สอง

หากใช้อิเล็กโทรดแบบ A หรือ B สมการที่ 2.5 อาจไม่สามารถใช้ได้ ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะขึ้นอยู่กับความกว้างของแผ่นประกบซึ่งอาจสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.6 นอก จากนั้นเมื่อพิจารณาการใช้งานจากสภาพการใช้งานจริงแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจึงต้องมีการปรับปรุงให้มีขนาดที่ยอมรับได้เสมอ ซึ่งขนาดที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่าไม่เกิน 30% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดเริ่มต้น

การเชื่อมแบบไม่เปลี่ยนสถานะ (Solid state welding)

เป็นการเชื่อมที่ทำให้ชิ้นงานติดกันโดยไม่ทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อวัสดุ แต่การเชื่อมจะได้รับแรงกด หรือทั้งแรงกด หรือความดัน และพลังงานความร้อนควบคู่กันไป (ในกรณีใช้ความร้อน อุณหภูมิยังไม่ถึงจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน) มีหลายประเภทเช่น

(1) Friction welding (FRW) เป็นการเชื่อมกันที่เกิดจากการกดผิวสัมผัสของชิ้นงานเข้าด้วยกันเพียงอย่างเดียว

(2) Diffusion welding (DFW) เป็นการเชื่อมกันที่เกิดจากการกดผิวสัมผัสของชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิและบรรยากาศที่เหมาะสม สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้

(3) Ultrasonic welding (USW) เป็นการเชื่อมกันของชิ้นงานที่อาศัยระบบการสั่นแบบ Ultrasonic ที่ทำให้ผิวชิ้นงานประสานติดกันได้ (Ultrasonic ความถี่เหนือเสียง) เช่น เชื่อมลวดแผ่นอลูมิเนียมบางๆ

### 2.1.1.2 การบัดกรีและการแล่นประสาน

การบัดกรีจัดอยู่ในกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็งเป็นการเชื่อมวัสดุให้เป็นชิ้นเดียวกันโดยใช้ความร้อนและความดันพร้อมๆกัน หรือใช้ความดันเพียงอย่างเดียว ถ้ามีการใช้ความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมจะต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่เชื่อมโดยปกติแล้วจะไม่มีการใช้โลหะเติมในการเชื่อมในสถานะของแข็งประเภทต่างๆ ตัวอย่างของการเชื่อมในสถานะของแข็ง

#### 1) การบัดกรี (Soldering) [6]

การบัดกรี คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงานโลหะเติมนี้อาจหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลลารี (Capillary reaction) ในขั้นตอนการทำให้เย็น การบัดกรีจะสามารถต้านทานการขยายตัว การบิดตัว และการงอตัวโดยไม่ก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงใดๆ ต่อรอยบัดกรี เมื่อเวลาผ่านไปและอยู่ภายใต้สภาพที่การบัดกรีจะถูกใช้งาน เช่น ความดันอากาศ อุณหภูมิ เป็นต้น ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการบัดกรีอ่อนได้แก่ งานที่บัดกรีท่อทองแดงสำหรับงานแรงดันต่ำ งานที่มีอุณหภูมิการใช้งานไม่เกิน  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  หรืองานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อให้เป็นที่เข้าใจมากยิ่งขึ้น อาจจะพอสรุปได้ว่าจุดสังเกตของการบัดกรีที่ต่างจากการเชื่อม คือโลหะที่นำมาประสานรอยต่อ อุณหภูมิการปฏิบัติงานรวมทั้งลักษณะการประสานของรอยต่อ เมื่อเรานำชิ้นงานที่ได้จากการบัดกรีมาตัดในแนวขวางของรอยต่อจะเห็นได้ชัดเจนว่าในการต่อโลหะด้วยวิธีการบัดกรีนั้นโลหะหลักจะไม่หลอมละลาย ซึ่งมีวิธีการบัดกรีแบบต่างๆ เช่น

2.1.1) การบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) วิธีนี้จะอาศัยแหล่งพลังงานความร้อนจากปืนบัดกรีหรือหัวแร้งบัดกรี เพื่อให้ความร้อนกับโลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปแบบลวด (Solder wire) วิธีนี้เหมาะกับการบัดกรีซ่อมแซมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.1.2) การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ หรือแผ่นบอร์ด (Printed circuit board; PCB) โดยที่แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่เคลื่อนที่ไปบนอ่างของโลหะบัดกรีเหลว และของเหลวดังกล่าวจะถูกดูดและพันไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร

1.3) การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface mount components) กับแผ่นวงจรพิมพ์ในกระบวนการนี้ใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมกับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการ

## 2) การแล่นประสาน (Brazing) [7]

การแล่นประสานหรือการบัดกรีแข็งคือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกันซึ่งโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  แต่ไม่ถึงกับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะหลักที่นำมาแล่นประสาน วิธีนี้ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่ไม่อยู่ในจำพวกเหล็ก เช่น ลวดเงินหรืออาจเป็นโลหะผสม เช่น ลวดทองเหลือง ลวดทองแดงผสมฟอสฟอรัสก็ได้ ซึ่งโลหะเติมจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการแล่นประสานโลหะเติมจะถูกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะเติมที่หลอมละลายจะแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งข้อดีในการแล่นประสาน คือ สามารถทำได้รวดเร็ว สามารถต่อโลหะต่างชนิดและความหนาเข้าด้วยกันได้ แต่มีข้อควรระวังที่ต้องคำนึงถึงในเรื่องฟลักซ์ที่ใช้ เพราะสารเคมีอาจมีอันตรายต่อร่างกาย จึงควรทำการแล่นประสานในที่อากาศถ่ายเทสะดวกลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการแล่นประสาน ได้แก่ งานต่อคอมตัดคาร์ไบด์ติดกับด้ามมีด งานต่อท่อทองแดงในระบบเครื่องทำความเย็นหรืองานเชื่อมต่อท่ออลูมิเนียมบางๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นต้น ข้อดีของการแล่นประสาน ได้แก่ ได้รับความแข็งแรงและไม่ต้องตกแต่งภายหลังการเชื่อม ใช้ความร้อนต่ำ ลดการเปลี่ยนรูปของโลหะชิ้นงาน ไม่มีประกายไฟและการกระเด็นของเม็ดโลหะขณะทำการแล่นประสาน สำหรับชิ้นงานที่ต้องการตกแต่งภายหลังการเชื่อมก็ตกแต่งได้ไม่ยาก ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการต่อยึดชิ้นงาน และที่สำคัญสามารถต่อวัสดุต่างชนิดที่ยากแก่การเชื่อมด้วยวิธีอื่นๆ ได้



รูปที่ 2.12 การแล่นประสานท่อแอร์รถยนต์ทำจากอลูมิเนียม [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการเล่นประสาน เมื่อพิจารณาตามวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน สามารถแบ่งกระบวนการเล่นประสานดังต่อไปนี้ การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม (Torch brazing) การเล่นประสานในเตา (Furnace brazing) การเล่นประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction brazing) การเล่นประสานด้วยความต้านทาน (Resistance brazing) การเล่นประสานโดยการจุ่ม (Dip brazing) และการเล่นประสานด้วยอินฟราเรด (Infrared brazing) [8]

#### 1) การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม (Torch brazing)

การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม เป็นการเล่นประสานโดยใช้หัวทอร์ชเชื่อมหัวเดียวหรือหลายหัวเผาชิ้นงานให้ร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องการและก๊าซที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ อะเซทิลีน โพรเพน และก๊าซหุงต้มทั่วไป

#### 2) การเล่นประสานในเตา (Furnace brazing)

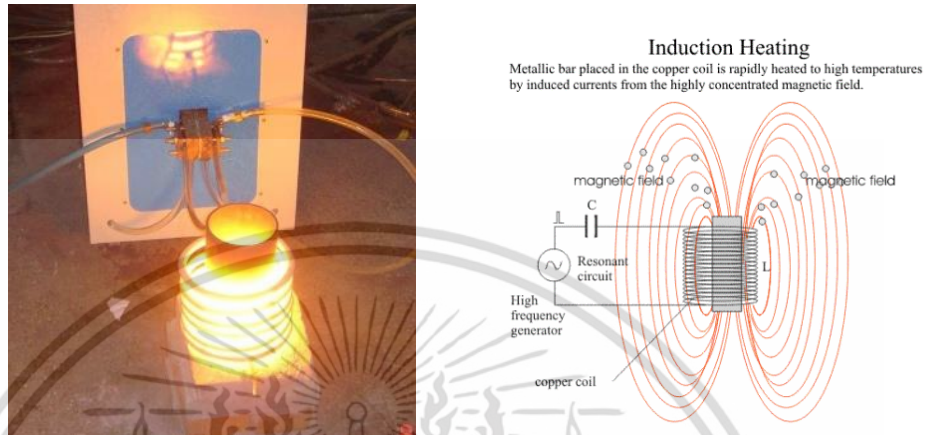
วิธีนี้เป็นการประสานงานที่สามารถวางประกอบกันได้ง่าย โดยวางบนสายพานเติมโลหะเติม และฟลักซ์ไว้ที่รอยต่อแล้วให้สายพานจะเคลื่อนพางานผ่านเข้าไปในเตาโดยที่งานจะเล่นประสานจนเสร็จสิ้นเมื่อเคลื่อนออกมาจากเตา การเล่นประสานแบบนี้เหมาะสมกับงานที่ต้องการผลผลิตจำนวนมาก ส่วนโลหะเติมที่เติมบนรอยต่ออาจเป็นชนิดเส้น แผ่นบาง ผง ก้อนขนาดเล็กหรือครีม เป็นต้น เตาที่ใช้ให้ความร้อนแก่งานเพื่อให้เกิดการเล่นประสาน ส่วนใหญ่จะเป็นเตาที่ควบคุมบรรยากาศให้เป็นแก๊สรีดิวซิ่ง เช่น ไฮโดรเจน แก๊สเอ็ทไซเธอร์มิก หรือเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ถ้าเป็นเตาขนาดใหญ่มักนิยมใช้แบบสุญญากาศเพื่อป้องกันออกซิเดชันบางครั้งไม่ต้องใช้ฟลักซ์ เตาสุญญากาศเหมาะกับการเล่นประสานงานที่ใช้กับอากาศยานหรืออุปกรณ์นิวเคลียร์ ถ้าคงสถานะสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุบอากาศออกอย่างต่อเนื่อง สารต่างๆ ที่ระเหยขณะเล่นประสานจะถูกดูดออกไปด้วย อย่างไรก็ตามโลหะงานหรือโลหะเติมหลายชนิดไม่เหมาะกับการเล่นประสานในเตาสุญญากาศ เพราะอาจสูญเสียหรือธาตุผสมที่มีจุดเดือดต่ำหรือความดันไอสูงไป ตัวอย่างการเล่นประสานในเตาแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเล่นประสานในเตาของอัลลอย [8]

### 3) การแล่นประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction brazing)

เป็นกระบวนการแล่นประสานแบบอาศัยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำงานจนเกิดความร้อนสูงพอที่จะทำให้โลหะเติมละลาย โดยจะวางงานที่ต้องการแล่นประสานไว้ใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การแล่นประสานเหนี่ยวนำ [8]

### 4) การแล่นประสานด้วยความต้านทาน

การแล่นประสานด้วยความต้านทานเป็นการแล่นประสานโดยอาศัยความร้อนจากการต้านทานไฟฟ้าของโลหะงาน โดยงานจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้าส่วนโลหะเติมควรเติมก่อนที่จะแล่นประสานและใช้ฟลักซ์เสมอ นอกจากจะควบคุมบรรยากาศ เมื่อจะแล่นประสานให้วางงานระหว่างแท่งอิเล็กโทรด (2 แท่ง) และกวดอิเล็กโทรดเข้ากับชิ้นงานพร้อมกับปล่อยกระแสไฟในขณะเดียวกันซึ่งเมื่อกระแสไหลผ่านงานจะทำให้รอยต่อร้อน (เนื่องจากความต้านทาน) โลหะเติมจะละลายและไหลเข้าตามซอกผิวสัมผัส และต้องให้อิเล็กโทรดกดงานอยู่จนกว่าโลหะเติมจะแข็งตัว สำหรับการแล่นประสานด้วยวิธีนี้จะแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.15



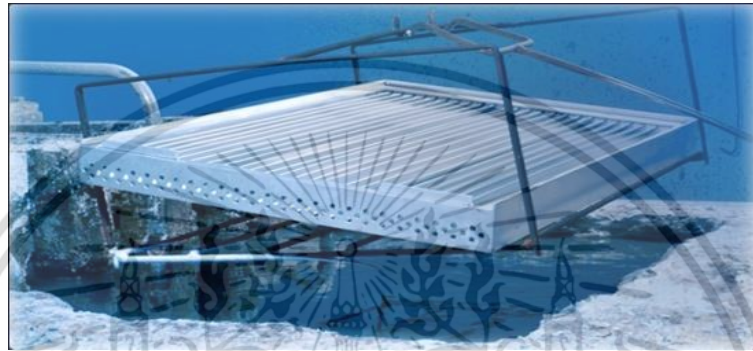
รูปที่ 2.15 การแล่นประสานต้านทาน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5) การเล่นประสานแบบการจุ่ม

การประสานแบบการจุ่มนี้ มี 2 วิธี คือ

จุ่มในน้ำยาสารเคมี (Chemical bath dip brazing) โดยเติมโลหะเติมบนรอยต่อแล้วจุ่มงานลงในเกลือเหลว เกลือจะเป็นตัวให้ความร้อนแก่งานและโลหะเติมช่วยป้องกันงานจากออกซิเจน ซึ่งอาจไม่ต้องใช้ฟลักซ์ ภาชนะบรรจุเกลืออาจเป็นบ้ำหรือหม้อที่เหมาะสมจุ่มในโลหะเหลว (Molten metal bath brazing) โดยจุ่มงานลงในโลหะเติมซึ่งหลอมเหลวบรรจุอยู่ในบ้ำหรือที่เหมาะสม ที่สำคัญคืองานต้องสะอาดและต้องใช้ฟลักซ์คลุมผิวโลหะเติมเหลวตลอดเวลาเพื่อป้องกันออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเล่นประสานแบบจุ่ม [8]

### 6.) การเล่นประสานด้วยอินฟราเรด (Infrared brazing)

การเล่นประสานด้วยอินฟราเรดเป็นการประสานโดยอาศัยความร้อนอินฟราเรด (Infrared heat) ซึ่งแผ่รังสีออกจากรังสีสีแดงในสเปกตรัมหลอดไฟที่เป็นแหล่งความร้อนในการเล่นประสาน เรียกว่า Quartz lamp มีถึงขนาด 5,000 วัตต์ หลอดไม่จำเป็นต้องมีรูปร่างตามลักษณะงาน แต่อาจใช้วิธีสะท้อนความร้อนให้ไปรวมตัวที่จุดหนึ่งตามต้องการ งานที่จะเล่นประสานต้องประกอบและอยู่ในตำแหน่งที่สามารถรับความร้อนได้ดีแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเล่นประสานอินฟราเรด [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางครั้งจะวางงานและหลอดไฟให้ความร้อนไว้ภายในภาชนะที่สามารถสูบอากาศออกได้ (เพื่อทำให้เป็นสุญญากาศขณะเล่นประสาน) หรือสามารถควบคุมบรรยากาศ (อาจใช้แก๊สเฉื่อย) หลังจากนั้นจึงเริ่มให้ความร้อนแก่งานจนถึงอุณหภูมิบัดกรี

ชนิดของรอยต่อในการเล่นประสาน

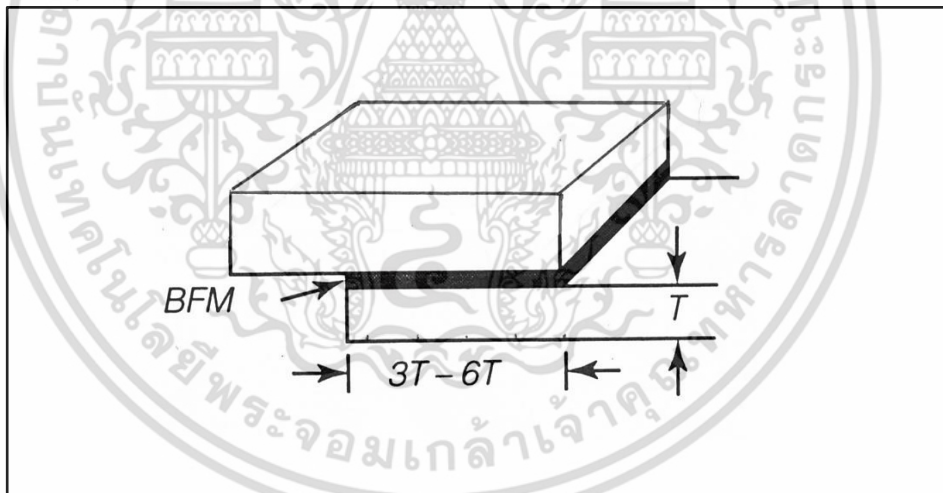
ในการต่อวัสดุ มีรอยต่อแบบต่าง ๆ ได้แก่ รอยต่อชน รอยต่อมุม รอยต่อขอบ รอยต่อเกย และรอยต่อตัวที แสดงลักษณะรอยต่อต่างๆ ดังรูปที่ 2.19

รอยต่อชน (Butt joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองชิ้นมาชนกัน โดยผิวของงานทั้งสองอยู่ในระนาบเดียวกัน ลักษณะของการต่อชนแบ่งออกเป็นหลายแบบขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน เช่น ต่อชนไม่เว้นช่องว่าง ต่อชนไม่บากงาน และต่อชนรูปตัววี เป็นต้น

รอยต่อมุม (Conner joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานสองชิ้นมาชนกันโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองทำมุมประมาณ  $90^{\circ}$  (จะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้)

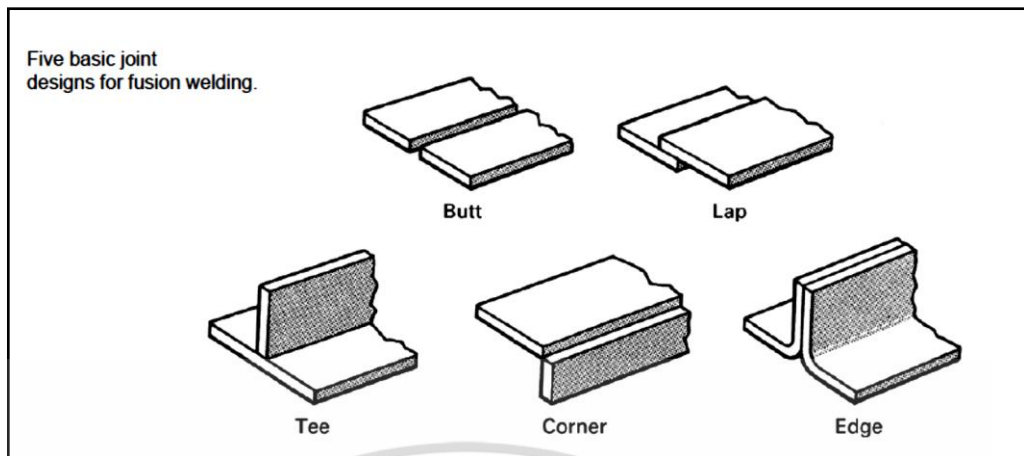
รอยต่อขอบ (Edge joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองมาชนกันในลักษณะผิวของชิ้นงานทั้งสองมาทับกันแนบชิด ทำให้ขอบของงานทั้งสองชิดกันและขนานกันตลอดแนว

รอยต่อเกย (Lap joint) เป็นวิธีการนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางซ้อนกันหรือเกยกัน (ในกรณีของกระบวนการเล่นประสานควรระยะต่อเกย (Overlap) 3-6 เท่าของความหนาชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างระยะต่อเกยของกระบวนการเล่นประสาน 3-6 เท่าของความหนาชิ้นงาน [9]

รอยต่อตัวที (Tee joint) เป็นการนำขอบของชิ้นงานชิ้นหนึ่งตั้งบนผิวชิ้นงานอีกชิ้น มีลักษณะเป็นรูปตัวที

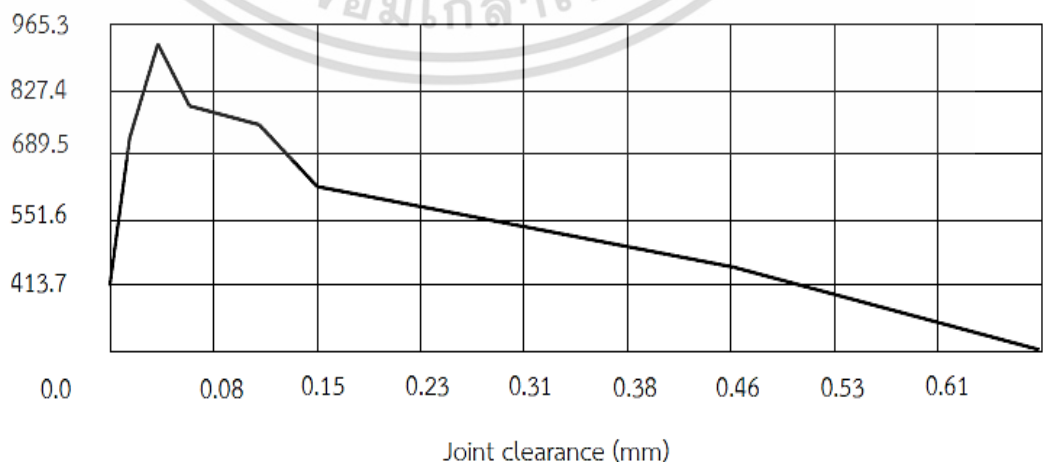


รูปที่ 2.19 ลักษณะรอยต่อแบบต่างๆ [6]

ระยะระหว่างชิ้นงานในการแล่นประสาน

โดยทั่วไปแล้วรอยต่อระหว่างชิ้นงานที่ทำการแล่นประสานมีอยู่ 2 แบบ ด้วยกัน คือ รอยต่อชน (Butt joint) และรอยต่อเกย (Lap joint) ซึ่งระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (Clearance) เป็นสิ่งสำคัญในการแล่นประสาน เนื่องจากเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดแรงดึงตามรูเล็กระหว่างโลหะเต็มที่กำลังหลอมเหลวกับตัวชิ้นงาน ระยะห่างระหว่างชิ้นงานจะต้องไม่น้อยเกินไปจนทำให้โลหะไม่สามารถไหลเข้าไปในรอยต่อได้อย่างทั่วไป และระยะห่างระหว่างชิ้นงานจะต้องไม่มากเกินไปจะทำให้แรงดึงตามรูเล็กน้อยลงจนกระทั่งไม่สามารถที่จะอุดโลหะเต็มเข้าไปบรรจุในรอยต่อได้จนเต็ม รูปที่ 2.20 แสดงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความต้านแรงดึงของรอยต่อแบบต่อชนที่เกิดจากการแล่นประสานด้วยระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่างๆ กัน ในการแล่นประสานจะมีช่วงระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่เหมาะสม (Optimum clearance) ที่ทำให้ได้รอยประสานที่แข็งแรงที่สุด ซึ่งระยะห่างระหว่างชิ้นงานเหมาะสมนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยคือ ชนิดของวัสดุชิ้นงานและโลหะเติม ลักษณะของรอยต่อและเงื่อนไขในการแล่นประสาน เช่น อุณหภูมิในการแล่นประสาน [6]

Tensile strength (MPa)



รูปที่ 2.20 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความแข็งแรงของรอยต่อ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้ไปใช้โดยไม่แจ้งชื่อผู้แต่ง หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องแจ้งชื่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเล่นประสานยังมีปัจจัยที่สำคัญมากอยู่อีกปัจจัยหนึ่งคือ ความสะอาดของผิวชิ้นงาน โดยผิวชิ้นงานที่จะเล่นประสานจะต้องปราศจากออกไซด์ (Oxide) น้ำมันหรือสิ่งเจือปนอย่างอื่นซึ่งผิวชิ้นงานที่สะอาดจะทำให้โลหะเติมกระจายติดกับผิวชิ้นงานได้ดีและแรงดึงตามรูเล็กก็จะเกิดขึ้นได้ดีเช่นกัน นอกจากนี้การเล่นประสานก็จะเกิดขึ้นอย่างทั่วถึงบนผิวของชิ้นงาน การทำความสะอาดผิวชิ้นงานสามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางกลโดยจะใช้ฟลักซ์ (Flux) รักษาความสะอาดของผิวชิ้นงานไว้ทั้งหลังจากทำความสะอาดและระหว่างการเล่นประสาน นอกจากนี้ฟลักซ์ยังช่วยให้โลหะเติมกระจายติดกับผิวชิ้นงานได้ดีและเกิดแรงดึงตามรูเล็กได้ดี

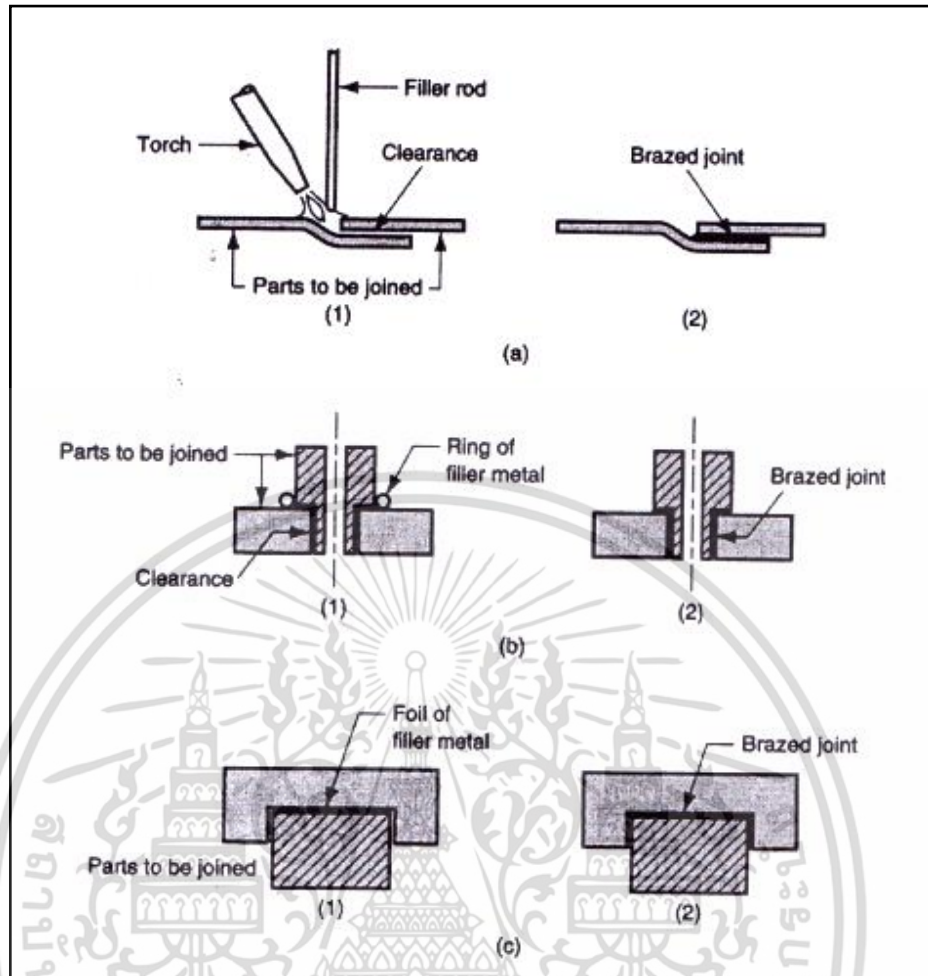
#### ฟลักซ์สำหรับการเล่นประสาน (Fluxes for brazing)

ฟลักซ์ทำหน้าที่กำจัดหรือป้องกันการเกิดออกไซด์หรือสารเคมีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการเล่นประสาน โดยที่ลักษณะของฟลักซ์ที่ดีคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความหนืดต่ำ สามารถทำให้โลหะเติมกระจายตัวบนชิ้นงานได้ดีขึ้น และปกป้องรอยเล่นประสานจนกระทั่งการแข็งตัวของโลหะเติมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และง่ายต่อการกำจัดออกไปหลังจากทำการเล่นประสานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ในฟลักซ์มีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ สารลดแรงดึงผิว ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงดึงผิวของโลหะเติมขณะที่อยู่ในสภาพของเหลว โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์สามารถพบได้ในหลายรูปแบบ เช่น เป็นผง เป็นครีม หรือเป็นสารละลาย นอกจากนี้ในการเล่นประสานสามารถใช้วิธีการอื่นแทนการใช้ฟลักซ์ได้เช่นเดียวกัน เช่น การเล่นประสานในเตาสุญญากาศหรือในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย

#### โลหะเติม (Filler metal)

โลหะเติมที่ใช้ในการเล่นประสานมีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งการเลือกใช้โลหะเติมจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับวัสดุชิ้นงาน นอกจากนี้จุดหลอมเหลวของโลหะเติมที่ใช้จะต้องไม่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุงาน เมื่อโลหะเติมอยู่ในสถานะของเหลวจะต้องมีค่าแรงดึงผิวต่ำเพื่อให้มีการกระจายตัว (Wettability) ที่ดีบนผิว มีความสามารถในการไหล (Fluidity) สูง ซึ่งทำให้โลหะเติมไหลเข้าไปในรอยต่อได้ดีและให้ความแข็งแรงของรอยต่อที่เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้โลหะเติมที่ใช้ต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพกับชิ้นงาน เช่น การเกิดการกัดกร่อน สำหรับโลหะเติมที่ใช้ในการเล่นประสานนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น เป็นแท่งโลหะ เป็นแผ่นโลหะ อยู่ในรูปครีม (Paste) อยู่ในรูปผง (Powder) หรืออาจจะอยู่ในรูปแบบอื่นๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งาน [6]

รูปที่ 2.21 แสดงการใช้งานโลหะเติมของการเล่นประสานในลักษณะรูปแบบต่างๆ โดยรูปที่ 2.21 (a) เป็นการเล่นประสานโดยใช้เปลวไฟเทอร์ชเชื่อมและใช้โลหะเติมแบบแท่ง แต่สำหรับ 2.21 (b) เป็นการใช้โลหะเติมที่มีลักษณะเหมือนแหวนซึ่งเหมาะกับการเล่นประสานในเตาเช่นเดียวกับ 2.21 (c) ใช้โลหะเติมแบบแผ่นบาง



รูปที่ 2.21 การใช้งานโลหะเติมของการแล่นประสานในรูปแบบต่างๆ [6]

### 2.1.2 ทฤษฎีการขาดของชิ้นงาน [10]

ความเค้น (Stress)

ตามความเป็นจริงความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงที่มากระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น (Pa, 1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>) หรือ kgf/mm<sup>2</sup>

หรือ psi (lbf/in<sup>2</sup>)

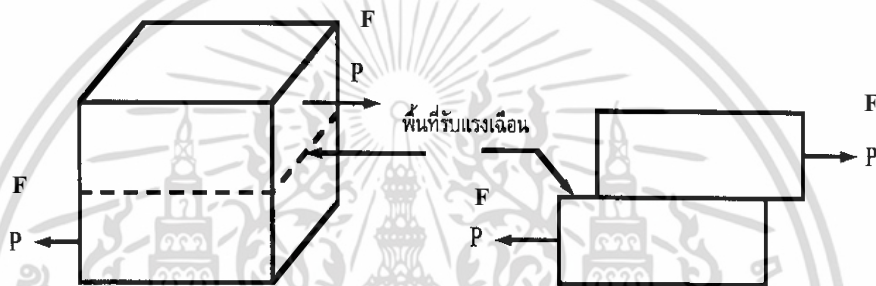
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \text{แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf}$$

$$A = \text{พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ: m}^2 \text{ หรือ mm}^2 \text{ หรือ in}^2$$

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) ใช้สัญลักษณ์  $\tau$  เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.22 มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน



รูปที่ 2.22 ลักษณะของแรงเฉือน [10]

### ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and deformation)

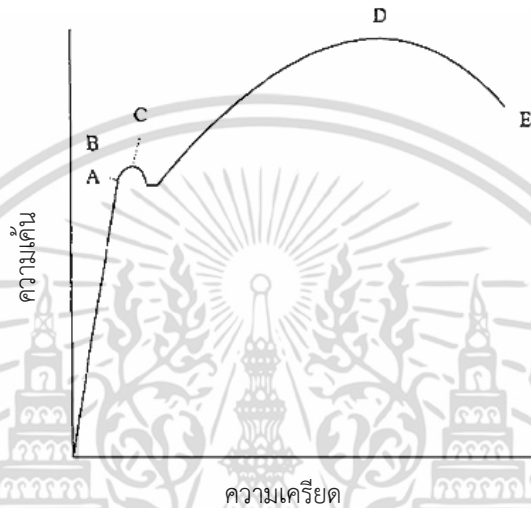
ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic deformation or elastic strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ ยางยืด สปริง ถ้าดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic deformation or plastic strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยน ไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกิน พิกัดการคืนรูป (Elastic limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic behavior) แต่ถ้าความเค้น มากเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบ พลาสติก (Plastic deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-strain relationship)

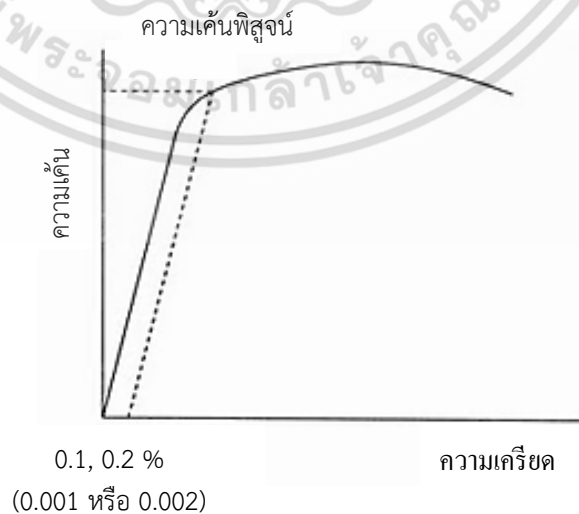
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในที่นี่จะใช้เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-strain curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นหลักโดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 2.23 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะและเหนียวของวัสดุ (Brittleness and ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.23 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก (Yield) [10]

การทดสอบแรงดึง (Tension test)

วิธีการทดสอบนั้น อธิบายโดยการนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.24



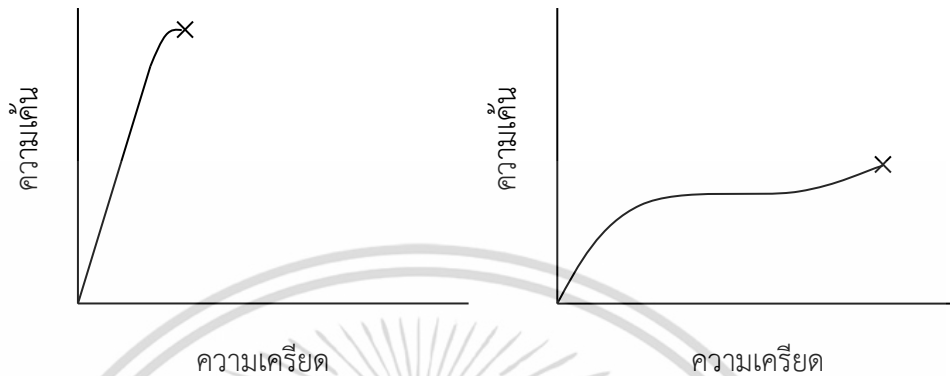
รูปที่ 2.24 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบชิ้นงาน เช่น มาตรฐานของ ASTM (American society of testing and materials), BS (British standards), JIS (Japanese industrial standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งเพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น - ความเครียดพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยให้แรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุด นี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent deformation or offset) กับวัสดุนั้นเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้วทำให้วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิดเช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่า จุดคราก (Yield point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือ Yield strength ซึ่งค่า Yield strength นี้จะมีประโยชน์กับวิศวกรอย่างมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่คงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายวัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่ก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20 % ของความยาวกำหนดเดิม (Original gage length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.24 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2 % Offset หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มากๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้นอกจากนี้ค่านี้นี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุหรือกำลังวัสดุนั้นโดยทั่วไปจะหมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เองที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิดเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุดเพราะเมื่อเลยจุด D ไปพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลงทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วยในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุ ก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึงดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold work) มาแล้วมันจะแตก หักที่จุดความเค้นสูงสุดโดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.25 (รูปซ้าย) ในทำนองเดียว กับพวกวัสดุเปราะ (Brittle materials) เช่น เซรามิกที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือ ไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดการแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.25 (รูปขวา)



รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [10]

### 2.1.3 ทฤษฎีทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล [11]

#### 2.1.3.1 การทดสอบสมมติฐาน

##### 1) ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

ขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 5 ลักษณะ ดังนี้

1.1) การตั้งสมมติฐาน คือ การระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับระบบหรือประชากร โดยทั่วไปจะกำหนด  $H_1$  ก่อนและส่วนกลับของข้อความใน  $H_1$  บนเส้นจำนวนจริงจะระบุไว้ใน  $H_0$  ดังนี้

$H_1$  คือ ข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเป็นจริง

$H_0$  คือ ข้อความที่เป็นบทกลับของ  $H_1$

1.2) กำหนดระดับทดสอบหรือระดับนัยสำคัญ (Significance level;  $\alpha$ ) โดยทั่วไปค่าที่นิยมใช้ คือ 5 % หรือ  $\alpha = 0.05$  แต่ตามความเป็นจริงแล้วค่า  $\alpha$  ที่ใช้สามารถใช้ได้ในช่วง 1 % ถึง 10 % หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90 %

1.3) ระบุค่าตัวทดสอบทางสถิติหรือการแจกแจงทางสถิติที่ใช้การทดสอบ (Test statistic) และคำนวณค่าโดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่างค่าตัวทดสอบทางสถิติที่ใช้สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ขึ้นอยู่กับค่า พารามิเตอร์ ( $\theta$ ) ที่สนใจเกี่ยวกับระบบ คือ

สนใจทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย ( $\theta = \{ \mu, \mu - 1 \}$ ) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ทราบความแปรปรวนที่แท้จริง ( $\sigma^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ Z

กรณีที่ 2 ไม่ทราบ  $\sigma^2$  แต่ทราบความแปรปรวนจากตัวอย่าง ( $S^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ t

สนใจทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวน ( $\theta = \{ \sigma^2, \sigma_1^2 / \sigma_2^2 \}$ ) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ต้องการศึกษาประชากรเดียว ( $\sigma^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ  $\chi^2$

กรณีที่ 2 ต้องการศึกษาประชากร 2 กลุ่ม ( $\sigma_1^2 / \sigma_2^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4) กำหนดบริเวณวิกฤติ หรือบริเวณที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ซึ่งมีพื้นที่ขนาดเท่ากับ และตำแหน่งถูกกำหนดตามเครื่องหมายใน  $H_1$  ค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  และบริเวณที่ปฏิเสธ  $H_0$  ไม่ได้ คือ ค่าวิกฤติ (Critical value) ซึ่งได้จากการเปิดตารางของตัวทดสอบนั้นๆ ซึ่งปัจจุบันถ้าใช้โปรแกรมสำเร็จรูป จะใช้ค่า P - value เป็นตัวตัดสินใจ

1.5) สรุปผลการทดสอบในปัจจุบันการสรุปผลทำได้ 2 ลักษณะ คือ พิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 3 ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  หรือไม่ จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่าทางสถิติที่ใช้ทดสอบในขั้น ตอนที่ 3 นั้นตกในบริเวณที่ปฏิเสธ  $H_0$

พิจารณาเทียบพื้นที่โดยใช้ค่า P - value เปรียบเทียบกับพื้นที่ของบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  ( $\alpha$ ) แทนจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า P-value <  $\alpha$  เท่านั้น

จะเห็นได้ว่า สะดวกกว่าการกำหนดบริเวณวิกฤติ หรือปฏิเสธ  $H_0$  ซึ่งต้องคำนึงถึงเครื่องหมายของ  $H_1$  ในการชี้ตำแหน่งที่จะปฏิเสธ  $H_0$  ค่า P - value และการคำนวณ

P - value คือ ระดับนัยสำคัญที่มีค่าน้อยที่สุด หรือโอกาสที่มีน้อยที่สุดที่จะสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ในการทดสอบสมมติฐาน เมื่อสมมติฐานหลักนั้นถูกต้อง ( $P - value = \min_i \{\alpha_i\}$ )

1 - (P - value) คือ ระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงของการทดสอบสมมติฐานนั้นๆ นั้นเอง ดังนั้น ในการใช้ P - value ในการทดสอบสมมติฐานนั้น จะทำให้ทราบค่าความเชื่อมั่นที่แท้จริงและสะดวก เนื่องจากไม่ต้องมีตารางสถิติของตัวทดสอบอยู่ข้างกาย และตัดปัญหาการเปิดตารางผิด ที่สำคัญคือ โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติทั่วไปจะคำนวณค่านี้ได้โดยอัตโนมัติ

2) การใช้ P - value ในการทดสอบสมมติฐาน [11]

P - value คือ ระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดหรือโอกาสที่น้อยที่สุดที่จะสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ได้ในการทดสอบสมมติฐานเมื่อสมมติฐานหลักนั้นถูกต้อง ( $P - value = \min_i \{\alpha_i\}$ ) 1 - (P-value) คือ ระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงของการทดสอบสมมติฐานนั้นๆ นั้นเอง ดังนั้นการใช้ P - value ในการทดสอบสมมติฐานนั้นจะทำให้ทราบค่าความเชื่อมั่นที่แท้จริงและสะดวก เนื่องจากไม่ต้องมีตารางสถิติของตัวทดสอบขจัดปัญหาของการเปิดตารางผิดพลาดและเหตุผลสำคัญคือ โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติทั่วไปจะคำนวณค่านี้ได้โดยอัตโนมัติ ที่สำคัญคือ ต้องทราบว่าในการสรุปผลนั้นจะมีปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า P - value <  $\alpha$  เท่านั้นไม่ต้องคำนึงถึงเครื่องหมายใน  $H_1$  เนื่องจากจะใช้ในการคำนวณ P - value มาก่อนแล้วนั่นเอง

การคำนวณค่า P - value แบ่งได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบการทดสอบสมมติฐานรอง คือ

(ก) กรณีทดสอบทางเดียว ( $H_1 : > \text{ หรือ } <$ )

P - value = P (ตัวทดสอบที่ใช้) (เครื่องหมายตาม  $H_1; > \text{ หรือ } <$ ) ค่าที่คำนวณได้ในขั้นที่ 3

(ข) กรณีทดสอบสองทาง ( $H_1 : \neq$ )

P - value = 2 \* P (ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ {>, <} ค่าที่คำนวณได้ในขั้นที่ 3)

เครื่องหมายในวง { } กำหนดตามตำแหน่งของค่าที่คำนวณได้ กล่าวคือ

ถ้าค่าตกอยู่ทางด้านซ้ายของค่ามัธยฐานของการแจกแจง ใช้เครื่องหมาย “ > ”

ถ้าค่าตกอยู่ทางด้านขวาของค่ามัธยฐานของการแจกแจง ใช้เครื่องหมาย “ < ”

2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of coefficient of determination)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เป็นค่าที่ใช้สำหรับอธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือตัวแปร ( $y$ ) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า  $R^2$  ยิ่งยากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนแยกความแปรปรวนของตั้งแปรตาม  $y$  เนื่องจากค่าประมาณความแปรปรวนของ  $y$  คือ

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \text{ หรือ } S_y^2 \propto \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.8)$$

โดยที่  $\sum (y_i - \bar{y})^2$  คือผลบวกของผลต่างกำลังสองของ  $Y$  จากค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}))^2 \\ \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

LHS เรียกว่า Sum total of Y หรือ

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

RHS ; จะได้ว่า  $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 =$  Sum square error = SSE

SSE คือ ส่วนที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained part) ด้วยสมการถดถอย

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \text{Sum square regression} = SS_{\text{Regr}}$$

$SS_{\text{Regr}}$  คือ ส่วนที่อธิบายได้ (Explained Part) ด้วยสมการถดถอย

จึงสรุปได้ว่า  $SST = SS_{\text{Regr}} + SSE$

และสรุปความสัมพันธ์ได้ตาราง ANOVA ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปความสัมพันธ์ ANOVA ของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ [11]

แหล่งที่มา	d.f.	SS	MS	F
Regression	P	$SS_{\text{Regr}}$	$SS_{\text{Regr}}$	$\frac{MS_{\text{Regr}}}{MSE}$
Error	n-p	SSE	MSE	
Total (adj)	n-1	SST		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $p$  = จำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการ  
 หรือ = จำนวนสัมประสิทธิ์ในการถดถอยไม่นับค่าจุดตัดแกน  
 $N$  = จำนวนข้อมูล  
 $SS_{\text{Regr}}$  =  $\hat{\beta}_1 S_{xy}$  (กรณีสมการเส้นตรงคงรูป)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad SSE &= SST - SS_{\text{Regr}} & (2.11) \\ &= S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy}; \sum (y_i - \bar{y}) = S_{yy} \end{aligned}$$

$$MSE = \frac{SSE}{\text{d.f.}_E} = \frac{SSE}{n-p} S^2 \quad (2.12)$$

สำหรับสมการเต็มรูป จะสรุปได้ว่า

$$S^2 = MSE = \frac{S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy}}{n-1}; p=2 \Rightarrow (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) \quad (2.13)$$

ตัวสถิติ F ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ในการทดสอบสมมติต่อไปนี้ คือ

$$H_0: \beta_i = 0 \quad \forall_i; i=1,2,\dots,k \text{ (ไม่รวม } \beta_0)$$

(ตัวแปรอิสระไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ  $y$  ได้)

$$H_1: \beta_i \neq 0 \exists_i$$

(ตัวแปรอิสระบางตัวสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ  $y$  ได้)

หรือ สำหรับกรณีการถดถอยเชิงเส้นอย่าง

$$H_0: \beta_1 = 0 \text{ (ไม่มีสมการถดถอย)}$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0 \text{ (สมการถดถอยสร้างได้)}$$

$$F = \frac{MS_{\text{Regr}}}{MSE}; v = (p, n-p) \text{ และสมการทดสอบทางเดียวด้านบน}$$

บริเวณปฏิเสธ  $H_0$  คือ  $F > F_{\alpha}(p, n-p)$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) นั้น เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่า  $SS_{\text{Regr}}$  และค่า  $SST$  ดังนั้นค่า ( $R^2$ ) จึงระบุเป็น % การเปลี่ยนแปลงของ  $y$  ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอยที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regr}}}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.14)$$

$$\text{หรือ} \quad R^2 = r^2$$

$r$  = ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlation coefficient)

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $r$  คือ ค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปร  $X$  และ  $Y$  นั้นเองในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า  $R^2$  มีความในการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่า  $R^2$  จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจึงให้ค่า  $R^2$  ที่ทำการปรับค่าแล้ว ( $R^2_{adj}$ ) แทน

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST}; MST = \frac{MST}{n-1} \quad (2.15)$$

ซึ่งอธิบาย % จากการเปลี่ยนแปลงของ  $y$  ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถด ถอยเช่นกัน

#### 4) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ [11]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการสถิติหรือไม่โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.20)$$

โดยที่  $y_{ij}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม  
 $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่  
 $\tau_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม  
 $\varepsilon_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้  $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต  $j$  ของระดับที่  $i$  ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_i \quad (2.21)$$

โดยที่  $\hat{y}_{ij}$  คือค่าประมาณของค่าสังเกต  $\hat{y}_{ij}$  ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} \hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} = \hat{t} \\ &= \hat{y} + (\hat{y}_i + \hat{y}) \\ &= \hat{y}_i \end{aligned} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่  $i$  ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้นการตรวจสอบ ความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลง่ายเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตก ค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

- การทดสอบแบบไคร์สแควร์ ( $\chi^2$  – goodness of fit test)
- การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ – สเมอร์นอฟ (Kolgomorov – Smirnov test)
- การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลเป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันหรือไม่ทดสอบโดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลแล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual plot) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ถ้าหากข้อมูลนั้นมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมา จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดง

#### 2.1.3.2 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full factorial experiment) [11]

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปนั้น ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ นั่นคือ จะสามารถศึกษาผลกระทบหลัก (Main effect) ซึ่งเป็นผล กระทบของปัจจัยเดียว (Main factors) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction factors) เช่นกรณีศึกษา 3 ปัจจัย (A, B และ C) แต่ปัจจัยศึกษาที่ 2 ระดับ การทดลองแฟคทอเรียลนั้นสามารถศึกษาผลกระทบปัจจัยได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ  $2^3$  แฟคทอเรียล [11]

ผลกระทบหลัก	อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย	อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปนั้น จำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดที่เป็นไปได้ (จำนวนการทดลองโดยไม่ทำซ้ำ) มีค่าเท่ากับ  $a^k$  โดยที่  $a$  = จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา  $k$  = จำนวนปัจจัยในกรณีที่ศึกษา 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะศึกษาที่ 3 ระดับ จำนวนของวิธีปฏิบัติทั้งหมด คือ  $3^k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเรียกแผนการทดลองว่าการทดลอง  $3^k$  แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ( $3^k$  Full factorial experiment) ตารางที่ 2.3 แสดงแผนการทดลอง  $2^k$

ตารางที่ 2.3 แผนการทดลอง  $2^k$  แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ [11]

Run	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

ในกรณีทำการทดลอง 3 ระดับ 3 ปัจจัยหรือแผนการทดลอง  $3^3$  แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ จำนวนการทดลองขั้นต่ำที่สุด (จำนวนวิธีการปฏิบัติทั้งหมดที่เป็นไปได้) เท่ากับ  $3^3 = 27$  การทดลอง เป็นการทดลอง ที่สมดุลทั้งแนวตั้งและแนวนอน (Balance vertically and horizontally) แผนการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แผนการทดลอง  $3^3$  แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ [11]

Run	Factors			Run	Factors			Run	Factors		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
1	+	+	+	10	0	+	+	19	-	+	+
2	+	+	0	11	0	+	0	20	-	+	0
3	+	+	-	12	0	+	-	21	-	+	-
4	+	0	+	13	0	0	+	22	-	0	+
5	+	0	0	14	0	0	0	23	-	0	0
6	+	0	-	15	0	0	-	24	-	0	-
7	+	-	+	16	0	-	+	25	-	-	+
8	+	-	0	17	0	-	0	26	-	-	0
9	+	-	-	18	0	-	-	27	-	-	-

สรุปได้ว่าข้อดีของการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบคือ

- (i) ความเป็นออร์ทอกอนอลลี (Orthogonally)
- (ii) ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน (Structure no aliases)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(iii) ศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลัก (Main factors) และปัจจัยร่วม/อันตรกิริยา (Interaction factors) ได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามแผนการทดลองนี้มีข้อเสียที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ ค่าใช้จ่ายสูงต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองที่ใช้แปรผันตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัยที่ศึกษาเช่น กรณีศึกษา 7 ปัจจัย แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 2 ระดับ หรือ  $2^7$  Full factorial ทำการทดลองโดยไม่ทำซ้ำ ต้องทำการทดลองทั้งหมด  $2^7 = 128$  การทดลองกรณีศึกษา 7 ปัจจัย แต่ละปัจจัยที่ 3 ระดับ ทำการทดลองโดยไม่ซ้ำต้องทำการทดลองทั้งหมด  $3^7 = 2,128$  การทดลองโดยทั่วไปเมื่อใช้การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปผู้ทดลองจะกำหนดระดับปัจจัยไม่เกิน 3 ระดับ กล่าวคือจะใช้การทดลอง  $2^k$  หรือ  $3^k$

การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial experiment)

การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนนิยมใช้ในกรณีที่ผู้ทดลองมีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่ใช้ในการทดลองจำกัดการทดลองแฟคทอเรียลทำให้เสียเวลาและต้องการทดลองจำนวนมาก จึงต้องทำการลดจำนวนการทดลองลงโดยทดลองเพียงบางส่วน ซึ่งนิยมใช้ศึกษาที่ 2 ระดับ กรณีความสัมพันธ์แผนการทดลอง  $2^{k-p}$  หรือ  $3^{k-p}$  แฟคทอเรียลบางส่วน รูปแบบการทดลองเป็นแบบ Orthogonal ซึ่งผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมได้ตามที่ต้องการ (แต่ไม่ทั้งหมด) ดังตัวอย่างตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แผนการทดลอง  $2^{4-1}$  แฟคทอเรียลบางส่วน [11]

Run	Factors						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
2	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 โครงสร้างซ้ำซ้อนของผลกระทบสำหรับ  $2^{4-1}$  แฟคทอเรียลบางส่วน [11]

Effect	Alias
A	BCD
B	ACD
C	ABD
D	ABC
AB	CD
AC	BD
AD	BC
BC	AD
BD	AC
CD	AB
ABC	D
ABD	C
BD	AC
CD	AB
ABC	D
ABD	C
ABC	B
BCD	A
ABCD	I

การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนมีข้อดีคือ ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง เนื่องจากใช้การทดลองที่ลดลงจากการทดลองเต็มรูป (จาก  $n = a^k$  เหลือเพียง  $n = a^{k-p}$ ) ข้อเสียในการทดลองนี้คือการตีความผลจะซับซ้อนขึ้นเนื่องจากการทดลองมีการเกิดโครงสร้างซ้ำซ้อนของผลกระทบดังตัวอย่างในตารางที่ 2.6 จึงจำเป็นที่ให้ผู้ทดลองต้องศึกษาโดยกำหนดค่า Resolution (รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ) ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษารูปได้ดังตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 แนวทางการกำหนดค่า Resolution สำหรับแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน [11]

Resolution	สรุปรายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ
III	ผลกระทบหลัก (Main effect) ไม่เข้าช้อนกับผลกระทบหลัก แต่จะเข้าช้อนกับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับใช้ในการตัดปัจจัยในการทดลองทั้งในกรณีที่มีปัจจัยในการทดลองจำนวนมาก
IV	ผลกระทบหลักไม่เข้าช้อนกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย แต่ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยเข้าช้อนกัน จึงเหมาะสำหรับใช้ในการศึกษาปัจจัยหลัก (Main effect) และสามารถนำผลไปสร้างสมการพยากรณ์ในกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการโดยใช้ Resolution V ได้
V	ผลกระทบหลักไม่เข้าช้อนกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยไม่เข้าช้อนกัน จึงเหมาะสำหรับใช้ศึกษาปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย เหมาะสมที่สุดในการนำไปสร้างสมการพยากรณ์ในกรณีที่ไม่สนใจผลกระทบตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป

#### 2.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

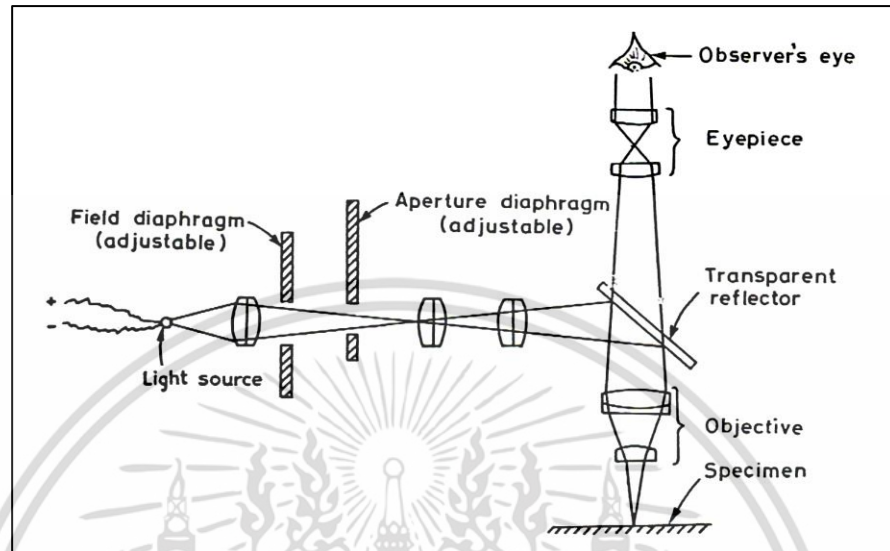
การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macro-scopic examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำ กล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual inspection) หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Micro-scopic examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างในระดับจุลภาค คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า ที่กำลังขยายสูงช่วยให้การจำแนกชนิดของเฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่ รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือโครงสร้างนั้นๆ ในชิ้นงานตัวอย่างได้ง่ายขึ้นในบางกรณีที่โครงสร้าง หรือเฟสที่ปรากฏในตัวอย่างชิ้นงานมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ที่ระดับกำลังขยาย 10-1,000 เท่า จึงต้องมีการเลือกใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูง ในที่นี้คือมีกำลังขยายที่มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำแสงอิเล็กตรอน ดังนั้นกล้องชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน” (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้งานในทางโลหะกรรมมีอยู่ 2 ชนิดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน)

##### 1) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

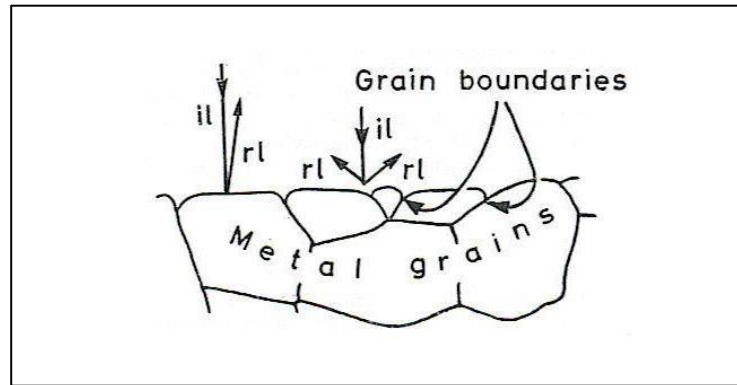
กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะบริเวณพื้นผิวเท่านั้น โดยการสะท้อนแสง สำหรับวัสดุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์บางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งผ่านไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ซึ่งหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงดังรูปที่ 2.26



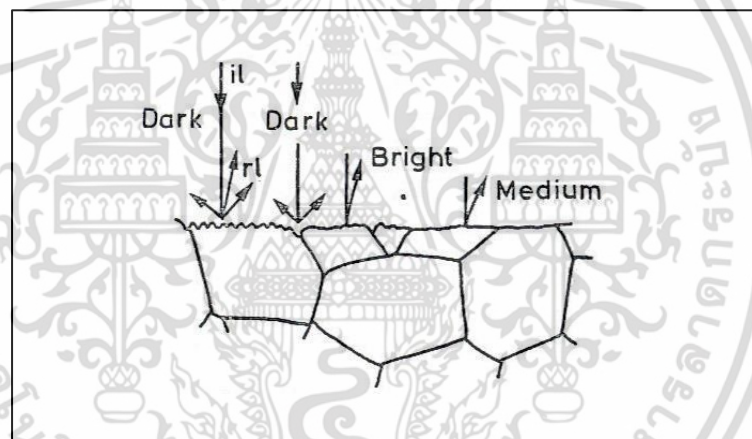
รูปที่ 2.26 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [12]

ผิวหน้าชิ้นงานเมื่อผ่านการขัดเงาแล้วยังไม่สามารถตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้าง หรือเฟสที่อยู่ภายในได้ทั้งนี้ เพราะพื้นผิวหน้าชิ้นงานนั้นค่อนข้างเรียบเสมอกัน เมื่อนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ก็จะสะท้อนแสงกลับหมด เพราะไม่มีความขรุขระต่างกันของโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องนำชิ้นงานไปทำให้เกิดความขรุขระของแต่ละโครงสร้างภายในชิ้นงานด้วยสารเคมี และเรียกกระบวนการนี้ว่า การกัดกรดหรือกัดชิ้นรอย (Etching) และเรียกสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรดว่า Etching reagent ซึ่งสารเคมีที่ใช้มีอยู่หลายชนิดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ประเภทของโลหะ ตลอดจนโครงสร้าง หรือเฟสที่ต้องการตรวจสอบ โดย Etching reagent จะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างหรือเฟสแต่ละชนิดที่อยู่ภายในโครงสร้างของโลหะนั้นด้วยอัตราปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดความลึก ต้นไม่เท่ากันของโครงสร้างที่ถูกกัดกรด ในโครงสร้างของโลหะบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับ Etching reagent ได้รวดเร็วกว่าบริเวณภายในเกรน ดังนั้นขอบเกรนจึงมีความลึกมากกว่าเมื่อแสงจากกล้องจุลทรรศน์ส่องผ่านก็จะสะท้อนกลับมายังเลนส์ตานั้นน้อยกว่าบริเวณภายในเกรนที่ตื้นกว่าจึงทำให้เห็นขอบเกรนเป็นเส้นๆ สีดำนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การสะท้อนแสงที่ต่างกันบริเวณขอบเกรน และภายในเกรน [12]

ส่วนกรณีทีบริเวณภายในเกรนเองมีความเข้มของเฉดสีที่ต่างกันทั้งนี้ก็เป็นเพราะระนาบ การจัดเรียงตัวของอะตอมแต่ละแถวไม่เหมือนกัน ดังนั้นเมื่อบริเวณดังกล่าวถูกก่ดขึ้นรอยก็จะทำปฏิกิริยาไม่เท่ากันส่งผลให้การสะท้อนกลับของแสงไม่เท่ากันดังรูปที่ 2.28



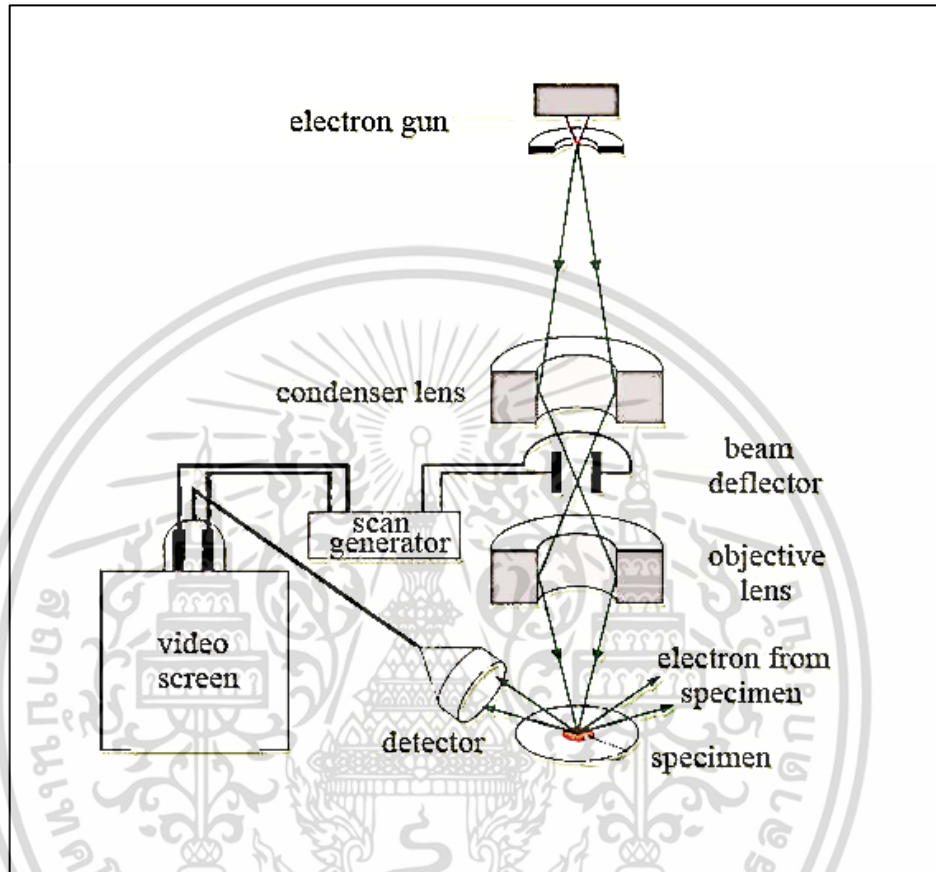
รูปที่ 2.28 การสะท้อนแสงที่ต่างกันภายในเกรนเนื่องจากการเอียงของอะตอม [12]

## 2) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy dispersive spectrometry (EDS) และ Wavelength dispersive spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]

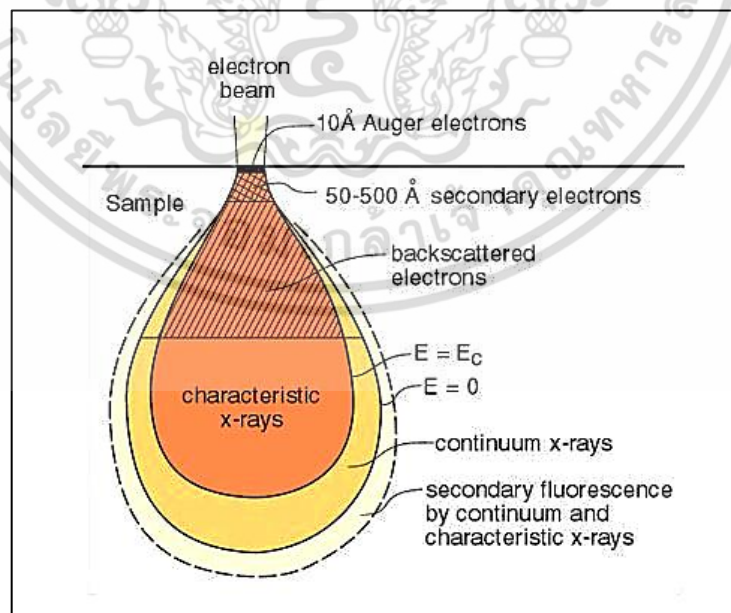
หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดคือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (100 ถึง 30,000 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบี่ยงล่างโดยแผ่นแอนอด (Anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7}$  ทอร์ และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการกราด (Scan coil) ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (Control unit) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal) ชนิดเอกสารถิ่นเป็นเอกสารถิ่นที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ ออกมาซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นคือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image, BEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงมุมสูง (มากกว่า 90 องศา) สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชั้นงานเพียงบางส่วน และกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง สัญญาณภาพที่ได้จะเป็นการแสดงความแตกต่างระหว่างเลขอะตอมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่บนผิวชั้นงาน

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับไม่ลึก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่นำมาสร้างภาพใช้งานแพร่หลายมากที่สุด

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอ็กซ์ (X-Ray image, XRI) รังสีเอ็กซ์ลักษณะเฉพาะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ถูกกระตุ้น (Excited) หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดระดับพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนมีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพปริมาณอันตรกิริยาจากสัญญาณต่าง ๆ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูป 2.30



รูปที่ 2.30 ปริมาณอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของชั้นงานในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก่อให้เกิดสัญญาณต่างๆ [13]

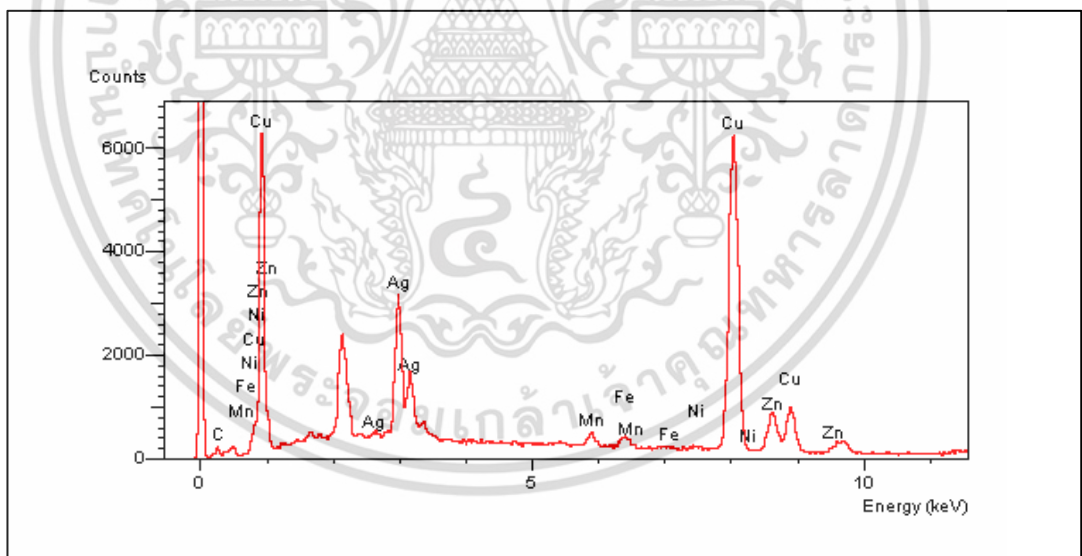
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) การตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy)

เครื่องเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน โดยทั่วไปแล้วได้ถูกติดตั้งคู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง โดย EDS เป็นเทคโนโลยีระดับไมโคร ที่มีพื้นฐานมาจากลักษณะเฉพาะของเอ็กซ์เรย์ ซึ่งก่อให้เกิดยอดคลื่นเมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงกระทบกับตัวอย่างเนื่องจากธาตุแต่ละชนิดจะให้ลายพิมพ์ของสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ จึงใช้ระบุชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ความหนาแน่นของยอดสเปกตรัมอาจใช้หาความเข้มข้นของธาตุแต่ละชนิดในตัวอย่างได้ สัญญาณเอ็กซ์เรย์จะถูกตรวจจับโดยหัววัด Silicon lithium ในการสร้างให้มีประสิทธิภาพต้องตั้งหัววัดในระดับต่ำกว่าเลขอะตอมของธาตุที่จะนำมาวัด โดยทั่วไปธาตุที่หนักกว่าคาร์บอน ( $Z=5$ ) จะสามารถวัดได้

หลักการการทำงานของเครื่องนี้ คือ เมื่ออิเล็กตรอนชนกับตัวอย่างจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น หากพลังงานนั้นมากพอจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสได้ อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่สูงกว่า จะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกิน ออกมาในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า รังสีเอ็กซ์ ดังนั้นเมื่อนำหัววัดมาวัดความเข้มและพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้น แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ การแยกแยะชนิดของธาตุต่างๆทำได้โดยการพิจารณาค่าพลังงานของพีคที่กระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ แล้วระบุค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นเป็นของธาตุอะไร เพราะว่าในแต่ละค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ในแต่ละธาตุที่มีค่าแน่นอนแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วย EDS [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อรอยเชื่อมครั้งนี้ จากการค้นคว้าหาข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ พบว่ายังไม่ม้งานวิจัยที่ตีพิมพ์เกี่ยวข้องกับการเล่นประสานด้วยความต้านทาน ซึ่งทำให้หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องโดยตรงได้ยาก จึงได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่มีทฤษฎีและกระบวนการดำเนินงานใกล้เคียงกัน ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) และการเล่นประสาน (Brazing)

### 2.2.1 การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด

ในงานวิจัยของ โยธิน จันทรทอง และคณะ [14] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งได้ทำการศึกษา 5 ปัจจัย 2 ระดับ คือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม 0.12 และ 0.25 MPa, เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน 20 และ 30 Cycles, กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม 11000 และ 12000 A, เวลาในการปล่อยกระแสขณะเชื่อม 20 และ 26 Cycles, เวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม 15 และ 25 Cycles โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ  $2^{5-1}$  Fractional factorial Design ผลจากการทดลองพบว่าทุกปัจจัยมีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ระดับ  $\alpha = 0.05$

Aslanlar และคณะ [15] ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กชุบโครเมต หนา 1.2 mm โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ กระแสไฟฟ้า 6, 7, 8, 9, 10 และ 12 kA และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 5, 10, 15 และ 20 Cycles ซึ่งในการทดลองจะกำหนดแรงกดจากอิเล็กโทรดคงที่ 6 kN ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมเกิดขึ้นเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 10 kA สำหรับเวลาในการเชื่อมที่ 12 Cycles

Marashi [16] ศึกษาความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคโลหะ ด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กแผ่นชุบสังกะสีหนา 1.1 mm กับเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนา 1.2 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันกดจากอิเล็กโทรด และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่า ที่กระแสไฟฟ้า 13,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 Cycles และความดันกดจากอิเล็กโทรด 4 bars ทำให้ได้รอยเชื่อมที่สามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด

Dursun [17] ได้ศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม 304 มีความหนา 1 mm ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้า 4,000, 7,000 และ 9,000 A โดยกำหนดแรงกดจากอิเล็กโทรด เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่  $6 \times 10^{-5}$  Pa, 20 Cycles และ 30 Cycles ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมจะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้น และรอยเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้า 9,000 A รับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด

Danial และคณะ [18] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 1 mm ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 4, 5, 6 และ 7 Cycles โดยกำหนดตัวแปรอื่นในกระบวนการเชื่อมคงที่ คือ เวลาในการกดชิ้นงานให้ติดกันก่อนปล่อยกระแสไฟฟ้า 20 Cycles แรงกดจากอิเล็กโทรด 4000 N และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 30 Cycles ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ผลจากการทดลองพบว่า ขอบเขตความร้อนและขนาดของรอยเชื่อมจะมีขนาดโตขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม และรอยเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้า 8 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 4 Cycles รับแรงเฉือนได้สูงสุด

Sahota และคณะ [19] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316 หนา 0.5 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า 4, 4.5 และ 5 kA แรงกดจากอิเล็กโทรด 2, 2.5 และ 3 kg/cm<sup>2</sup> และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 6, 8 และ 10 Cycles ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า แรงกดจากอิเล็กโทรด และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ทำให้เฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟสออสเตนไนต์เป็นมาเทนไซต์ รอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้น และมีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น

Verma และ คณะ [20] ได้ศึกษากระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับ AISI 316 หนา 0.6 mm โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 5, 6 และ 7 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 5, 6 และ 7 Cycles และแรงกดจากอิเล็กโทรด 2, 2.2 และ 2.5 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งใช้อิเล็กโทรดในการเชื่อมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm และใช้เทคนิคทางสถิติ ทากูชิ ในการวิเคราะห์ผล ผลจากการทดลองสรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้า 66.94% ตามด้วยเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 17.97% และแรงกดจากอิเล็กโทรด 10.10% เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม มีผลให้ขนาดของรอยเชื่อม และค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมด้วยความต้านทานของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับ AISI 316 หนา 0.6 mm คือ กระแสไฟฟ้า 7 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 7 Cycles และแรงกดจากอิเล็กโทรด 2.2 kg/cm<sup>2</sup>

Singh และคณะ [21] ได้ศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดระหว่างแผ่น 316L SS หนา 1 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงกดจากอิเล็กโทรด และใช้เทคนิคทางสถิติ ทากูชิ (Taguchi) ช่วยในการวิเคราะห์ผล จากการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่ออย่างมีนัยสำคัญ และเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรในการเชื่อม คือ กระแสไฟฟ้า 15 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 4 ms และใช้แรงกดจากอิเล็กโทรด 3.1 kN ซึ่งจะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 789.46 N/mm<sup>2</sup>

Charde [22] ได้ศึกษาการเติบโตของรอยเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 304L กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหนา 1 mm โดยศึกษาอันตรกิริยาของตัวแปรระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับแรงกดจากอิเล็กโทรด ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า มีผลให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มแรงกดจากอิเล็กโทรด จะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อและขนาดของรอยเชื่อมลดลง เนื่องจากการเพิ่มแรงกดจากอิเล็กโทรดจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างรอยต่อลดลง ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ใช้แรงกดจากอิเล็กโทรดต่ำ

Pouranvari และ Ranjbarnoode [23] ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงกดจากอิเล็กโทรดในการเชื่อมด้วยความต้านทานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หนา 2 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ แรงกดจากอิเล็กโทรด 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7 kN และกำหนดตัวแปรอื่นที่ใช้ในกระบวนการคงที่ เวลา กดขึ้นงานก่อนปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.6 s กระแสไฟฟ้า 13 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.18 s และเวลากดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.4 s ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มแรงกดจากอิเล็กโทรดจะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อลดลง เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง และรอยเชื่อมที่มีขนาดใหญ่สามารถรับแรงดึงได้สูงกว่ารอยเชื่อมที่มีขนาดขนาดเล็ก

Aravinthan และ NachiMani [24] ได้ศึกษาการเติบโตของรอยเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม 302 และรอยเชื่อมของวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความหนา 1 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ กระแสไฟฟ้า 6, 7, 8 kA เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10, 15, 20 Cycles และกำหนดแรงกดจากอิเล็กโทรดคงที่ 3 kN ผลการทดลองพบว่า บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณนอกรอยเชื่อมสำหรับรอยต่อทั้งสามชนิด ค่าความแข็งแรงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากวัสดุมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่างกัน จึงทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน ผลจากการทดสอบแรงดึงพบว่า รอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงมากกว่า เมื่อเทียบกับรอยต่อของเหล็กกล้าคาร์บอน และรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอน สำหรับการเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมที่เท่ากัน

Hayazi และ Shamsudin [25] ได้ศึกษาความแข็งแรงเฉือนของการต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียม 6063 กับ เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 2 mm ด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4, 5, 6 kA และกำหนดตัวแปรอื่นที่ใช้ในกระบวนการคงที่ คือ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 10 Cycles แรงกดจากอิเล็กโทรด 1500 N ผลจากการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อขนาดความโตของรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อ ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม จะส่งผลให้ขนาดของรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น

### 2.2.1 การแล่นประสาน

Tashi และคณะ [26] ได้ศึกษากลไกการแพร่ในการแล่นประสานไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ในเตาสัญญากาศ โดยใช้โลหะเติมชนิด AgCuZn ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 800, 830 และ 860 °C และเวลา 5, 15 และ 30 min ผลจากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิในการแล่นประสาน 800 °C สำหรับเวลา 5 min สามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาในการเวลาประสานทำให้โครงสร้างเฟสที่มีความเหนียวเพราะอุดมไปด้วยเงิน (Ag) ถูกแทนที่ด้วยเฟสที่มีความเปราะ และมีรอยแตกกว้างบนพื้นผิว ซึ่งมีผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

Yue และคณะ [27] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และเฟสระหว่างชั้นของการแล่นประสานในเตาสัญญากาศระหว่างไทเทเนียมผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้โลหะเติมชนิด AgCuTi ที่อุณหภูมิ 920 °C และ 980 °C ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของชั้นอินเตอร์เฟซของตัวอย่างที่แล่นประสานที่อุณหภูมิ 920 °C คือ 1Cr18Ni9Ti/CuTi/Ag-rich+Cu4Ti/Cu4Ti/ $\beta$ -Ti/TC4. ผลจากการทดสอบความแข็งแรงเฉือนพบว่าเฟสที่อุดมไปด้วยเงินจะเกิดฉีกขาดแบบเหนียว และค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อขึ้นถึง 188 MPa เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแล่นประสานถึง 980 °C ชั้นอินเตอร์เฟซของรอยต่อกลายเป็น 1Cr18Ni9Ti/Ag-rich/CuTi2/Ti-Cu-rich/ $\beta$ -Ti/TC4. และค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อจากการทดสอบลดลงเหลือ 123 MPa

Elrefaey และ Tillmann [28] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางกล และอุณหภูมิในการแล่นประสานของรอยต่อระหว่างไทเทเนียมกับเหล็ก โดยใช้โลหะเติม พื้นเงิน (Incusil ABA) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการแล่นประสานในช่วง 650-850 °C สำหรับเวลา 15 min ในเตาสัญญากาศ ผลจากการทดลองพบว่า ชั้นสารประกอบหลักที่เกิดระหว่างเหล็กกับโลหะเติม คือ เฟส FeTi และชั้นสารประกอบหลักที่เกิดฝั่งไทเทเนียมพบ เฟส Ti-Cu และ  $\alpha$ - $\beta$ Ti รอยต่อที่มีค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุด 113 MPa คือ รอยต่อที่ใช้อุณหภูมิในการแล่นประสาน 750 °C ซึ่งการแตกหักของรอยต่อจะมีลักษณะแตกหักแบบเหนียวผ่านเฟส Ag-rich และเมื่อใช้อุณหภูมิในการแล่นประสานสูง รอยต่อจะเกิดการแตกหักแบบเปราะบริเวณระหว่างชั้นของไทเทเนียมกับโลหะเติม Incusi หรือบริเวณเฟสของชั้นสารประกอบ Ti-Cu

Zakipour และคณะ [29] ได้ศึกษาวิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลของรอยต่อระหว่าง 316L SS กับ Ti-6Al-4V โดยใช้โลหะเติมแบบแผ่นชนิด Cu หนา 50, 100 และ 150  $\mu$ m และวัสดุพื้นมีขนาด 10x10x5 mm<sup>3</sup> ทดลองแล่นประสานในเตาสัญญากาศ 10<sup>-4</sup> mBar ที่อุณหภูมิ 900 และ 960 °C สำหรับใช้เวลาในการแล่นประสาน 60 นาที ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุด ได้รับจากรอยต่อที่แล่นประสานด้วยอุณหภูมิ 900 °C ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเฉือน 220 MPa เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแล่นประสานเป็น 960 °C ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อลดลง เนื่องจากอาณาเขตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเปราะมาก เช่น Fe<sub>2</sub>Ti เกิดการขยายตัว

### บทที่ 3

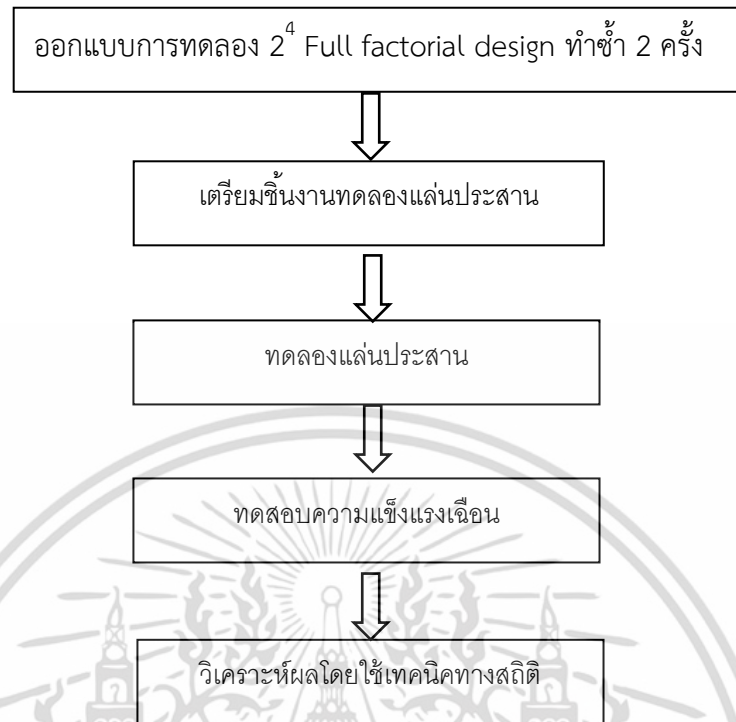
## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด SiL. CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบต่อเกย ซึ่งแผนในการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อแสดงดังในรูปที่ 3.1 และขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L กับโลหะเติมชนิด SiL CD1050-5M แสดงดังในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

งาน	2558									
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย										
2. ออกแบบวางแผนและวิธีการดำเนินงานวิจัย										
3. จัดหาอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย										
4. ทดลองและบันทึกข้อมูล										
5. สรุปผลทดลอง										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการประสานด้วยความดันทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด Sil. CD1050-5M ซึ่งจะมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 การออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษา 4 ตัวแปร คือ A : กระแสไฟฟ้า, B : เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า, C : ความดันจากอเล็กโทรดกตขึ้นงาน, D : เวลากดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า โดยแต่ละตัวแปรได้กำหนดระดับในการศึกษา 2 ระดับ ดังนั้นจึงได้ออกแบบการทดลองแบบ  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง ทั้งหมด 32 การทดลอง แสดงตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.2 และการออกแบบลำดับในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและระดับในการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับ	
		ต่ำ (-1)	สูง (1)
1	A : กระแสไฟฟ้า (A)	2,000	4,000
2	B : เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Sec)	0.5	2.0
3	C : ความดันจากอเล็กโทรดกตขึ้นงาน (MPa)	0.3	0.5
4	D : เวลากดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า (Sec)	0	5

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D
27	1	1	1	-1	1	-1	1
23	2	1	1	-1	1	1	-1
18	3	1	1	1	-1	-1	-1
21	4	1	1	-1	-1	1	-1
5	5	1	1	-1	-1	1	-1
8	6	1	1	1	1	1	-1
3	7	1	1	-1	1	-1	-1
28	8	1	1	1	1	-1	1
10	9	1	1	1	-1	-1	1
17	10	1	1	-1	-1	-1	-1
24	11	1	1	1	1	1	-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D
1	12	1	1	-1	-1	-1	-1
30	13	1	1	1	-1	1	1
26	14	1	1	1	-1	-1	1
12	15	1	1	1	1	-1	1
11	16	1	1	-1	1	-1	1
9	17	1	1	-1	-1	-1	1
31	18	1	1	-1	1	1	1
25	19	1	1	-1	-1	-1	1
14	20	1	1	1	-1	1	1
29	21	1	1	-1	-1	1	1
13	22	1	1	-1	-1	1	1
4	23	1	1	1	1	-1	-1
19	24	1	1	-1	1	-1	-1
32	25	1	1	1	1	1	1
15	26	1	1	-1	1	1	1
2	27	1	1	1	-1	-1	-1
6	28	1	1	1	-1	1	-1
16	29	1	1	1	1	1	1
20	30	1	1	1	1	-1	-1
22	31	1	1	1	-1	1	-1
7	32	1	1	-1	1	1	-1

### 3.1.2 วัสดุพื้นและโลหะเติม

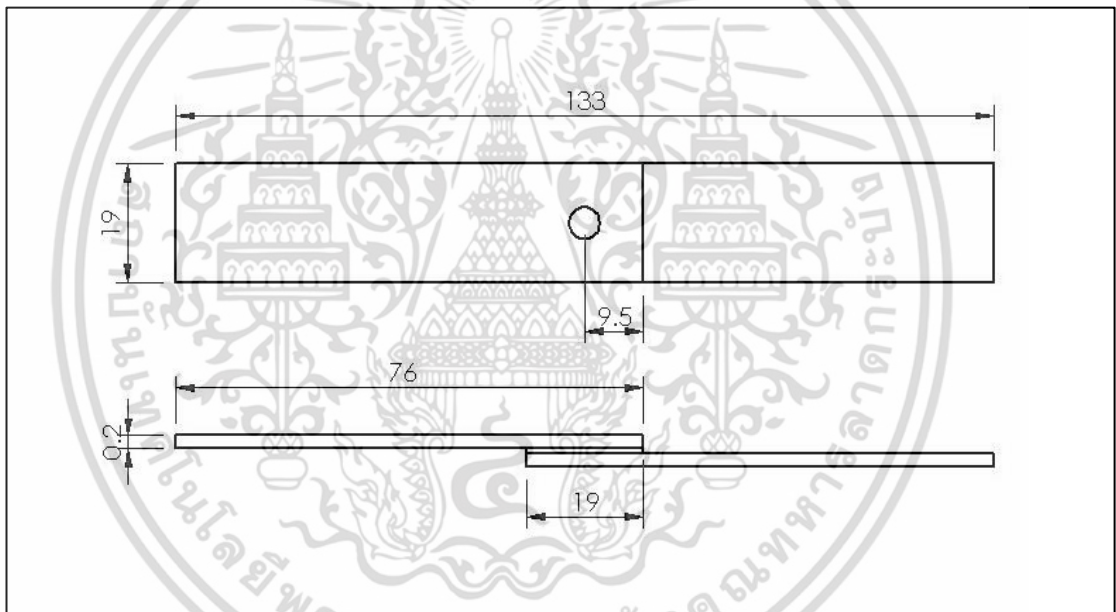
ขั้นตอนการเตรียมโลหะพื้นและโลหะเติม ในส่วนของโลหะพื้นจะใช้วัสดุชนิดแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มาต่อเข้าด้วยกัน โดยใช้โลหะเติมแบบแผ่น ชนิด Sil. CD1050-5M ตัดให้ได้ขนาด 19 X 19 X 0.15 mm ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้นและโลหะเติมแสดงดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ โดยออกแบบการต่อแบบต่อเกย ตามมาตรฐานของการกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบสำหรับงานเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) AWS C3 [8] ดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้น [30]

Item	Chemical component (%)									Fe Base
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	
SS 316L	0.022	0.5	1.77	0.039	0.002	17.1	10.00	2.04	0.038	

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมชนิด Si1 CD1050-5M [31]

Item	Chemical component (%)							Solidus (°C)	Liquidus (°C)	Brazing temperature (°C)
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	Ni	Mn			
Si1CD1050-5M	49	27.5	20.5	-	-	0.5	2.5	630	670	670 - 770



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบ [32]

### 3.1.3 การเล่นประสานด้วยความต้านทาน

หลังจากเตรียมโลหะพื้นและโลหะเติมให้ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำโลหะพื้นและโลหะเติมมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 และ 400 แล้วล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) และแอลกอฮอล์ เพื่อกำจัดคราบน้ำมันหรือสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่บนผิวของวัสดุ และยังช่วยให้ชิ้นงานสามารถเชื่อมติดกันได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นนำโลหะพื้นมาจับยึดบนฟิกเจอร์ โดยการต่อแบบต่อเกย ซึ่งจะสอดแผ่นโลหะเติมไว้ระหว่างรอยต่อของโลหะพื้น จากนั้นนำไปเล่นประสานด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศปกติด้วยเครื่อง Spot welding ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522 แสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้อิเล็กโทรดชนิดทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่อง Spot welding ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522

#### 3.1.4 การทดสอบแรงเฉือน

ในขั้นตอนการทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อ จะนำชิ้นงานที่แล่นประสานด้วยความต้านทานแล้ว มาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG - X แสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3192 ใช้ความเร็ว 10 mm/min



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG - X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 วิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคทางสถิติ

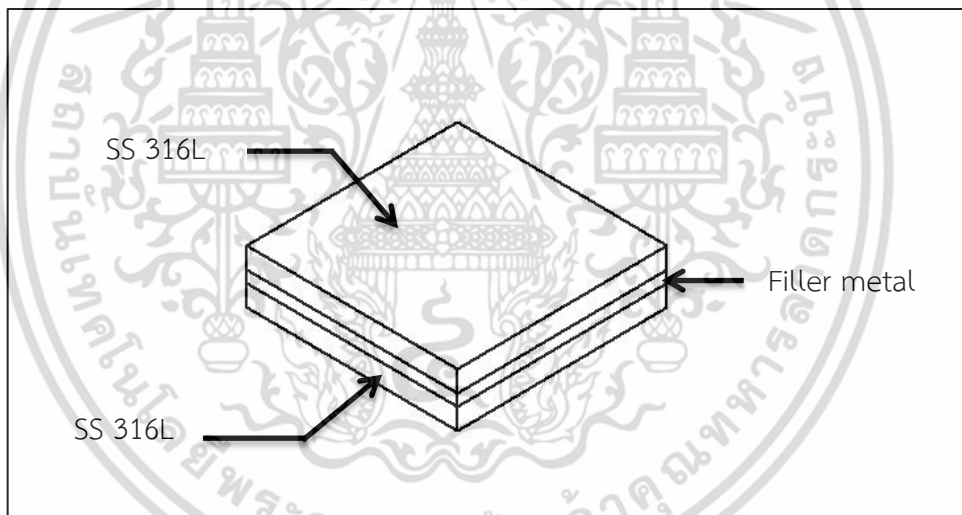
หลังจากการทดสอบแรงเฉือน จะนำผลจากการทดสอบมาวิเคราะห์ผล โดยใช้เทคนิคทางสถิติ เพื่อกำหนดตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ และให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนมากที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้โปรแกรม Minitab V.16 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

## 3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด SiL CD1050-5M มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

### 3.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L กับโลหะเติมชนิด SiL CD1050-5M โดยจะตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และโลหะเติมให้ได้ขนาด 20x20 mm ซึ่งจะต่อในลักษณะการต่อเกย โดยจะสอดโลหะเติมไว้ระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L แสดงดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะการต่อชิ้นงานทดสอบ

### 3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

#### 3.2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น เป็นการตรวจสอบลักษณะของโครงสร้าง และขนาดเกรนของรอยเชื่อม ซึ่งจะมีรายละเอียดขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานดังนี้

นำชิ้นงานทดสอบหลังจากแล่นประสานด้วยความต้านทานแบบจุดแล้ว มาตัดด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยจะตัดชิ้นงานผ่านบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom

นำชิ้นงานทดสอบหลังตัดผารอยเชื่อมมาทำความสะอาด แล้วล้างด้วยอะซิโตน เพื่อป้องกันการตกค้างของน้ำมันหล่อเย็นจากการตัด จากนั้นนำชิ้นงานไปขึ้นรูปตัวเรือนด้วยเรซิน แสดงดังรูปที่ 3.8 แล้วนำไปขัดผิวหน้าด้วยกระดาษที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 400, 800, 1000, 1200 และ 4000 จากนั้นจึงขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 และ 0.3  $\mu m$  ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปตัวเรือนด้วยเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1

หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงาน จะนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุด 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab

### 3.2.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

ในขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะนำชิ้นงานที่ขัดผิวหน้าเตรียมไว้ของแต่ละชุดการทดลอง มาตรวจสอบโครงสร้างจุภาค และชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และศึกษาการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคการทดสอบแบบแผนที่ธาตุ (X-ray mapping) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV ดังแสดงในรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV

### 3.2.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของลักษณะการแตกหักของรอยต่อ

ในขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของลักษณะการแตกหักของรอยต่อ จะนำชิ้นงานจากการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนมาวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักของรอยต่อ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรอยแตกหักด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า ผลจากการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

##### 4.1.1 ผลการทดสอบแรงเฉือน

จากการนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3192 ใช้ความเร็วในการทดสอบ 10 mm/min โดยที่ตัวแปร A : กระแสไฟฟ้า, B : เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า, C : ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน และตัวแปร D : เวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งออกแบบการทดลองแบบ  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง ทั้งหมด 32 การทดลอง โดยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรอยต่อ จะนำผลผลการทดสอบแรงเฉือนของชิ้นงานเล่นประสานด้วยความต้านทานมาเปรียบเทียบกับค่าแรงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมด้วยความต้านทาน แสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนของชิ้นงาน RSB และ RSW

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Shear force (N)	
								RSB	RSW
27	1	1	1	-1	1	-1	1	1459.74	1891.38
23	2	1	1	-1	1	1	-1	1249.62	1663.79
18	3	1	1	1	-1	-1	-1	1752.93	2369.53
21	4	1	1	-1	-1	1	-1	670.13	979.058
5	5	1	1	-1	-1	1	-1	571.55	1202.35
8	6	1	1	1	1	1	-1	1515.47	2247.27
3	7	1	1	-1	1	-1	-1	1133.55	1785.06
28	8	1	1	1	1	-1	1	2001.99	2339.35
10	9	1	1	1	-1	-1	1	1715.37	2262.51
17	10	1	1	-1	-1	-1	-1	904.78	1915.52
24	11	1	1	1	1	1	-1	1401.25	2205.98
1	12	1	1	-1	-1	-1	-1	758.22	1756.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนของชิ้นงาน RSB และ RSW (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Shear force (N)	
								RSB	RSW
30	13	1	1	1	-1	1	1	917.66	2479.71
26	14	1	1	1	-1	-1	1	1680.12	2489.52
12	15	1	1	1	1	-1	1	1921.18	2445.33
11	16	1	1	-1	1	-1	1	1068.70	2015.85
9	17	1	1	-1	-1	-1	1	833.30	1898.27
31	18	1	1	-1	1	1	1	1090.70	1547.93
25	19	1	1	-1	-1	-1	1	824.32	1931.02
14	20	1	1	1	-1	1	1	1180.08	2260.99
29	21	1	1	-1	-1	1	1	478.41	1081.82
13	22	1	1	-1	-1	1	1	518.53	1108.19
4	23	1	1	1	1	-1	-1	1889.74	2442.52
19	24	1	1	-1	1	-1	-1	1115.48	1756.10
32	25	1	1	1	1	1	1	1309.44	2211.06
15	26	1	1	-1	1	1	1	879.18	896.994
2	27	1	1	1	-1	-1	-1	1541.79	2404.63
6	28	1	1	1	-1	1	-1	854.45	2098.15
16	29	1	1	1	1	1	1	1189.01	1995.58
20	30	1	1	1	1	-1	-1	1839.75	2280.59
22	31	1	1	1	-1	1	-1	1109.65	2071.79
7	32	1	1	-1	1	1	-1	1007.00	1314.43

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะนำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ ANOVA และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking) โดยใช้โปรแกรม Minitab V. 16 แสดงผลจากการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

##### 4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของชิ้นงานแล่นประสานด้วยความต้านทาน

จากการนำผลการทดสอบแรงเฉือนของชิ้นงานแล่นประสานด้วยความต้านทาน (RSB) มาวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab V. 16 แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 Analysis of variance for RSB (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	13129.3	3282.32	79.40	< 0.001
A	1	6974.1	6974.10	168.70	< 0.001
B	1	2707.9	2707.93	65.50	< 0.001
C	1	3443.0	3443.05	83.28	< 0.001
D	1	4.2	4.21	0.10	0.732
A*B	1	106.8	106.84	2.58	0.132
A*C	1	836.9	836.92	20.24	< 0.001
A*D	1	5.0	4.98	0.12	0.733
B*C	1	71.9	71.85	1.74	0.206
B*D	1	4.5	4.51	0.11	0.746
C*D	1	151.0	150.99	3.65	0.074
Residual Error	16	661.5	41.34		
Pure Error	16	661.5	41.34		
Total	31	15096.9			
R-Sq = 95.63% R-Sq (adj) = 91.54%					

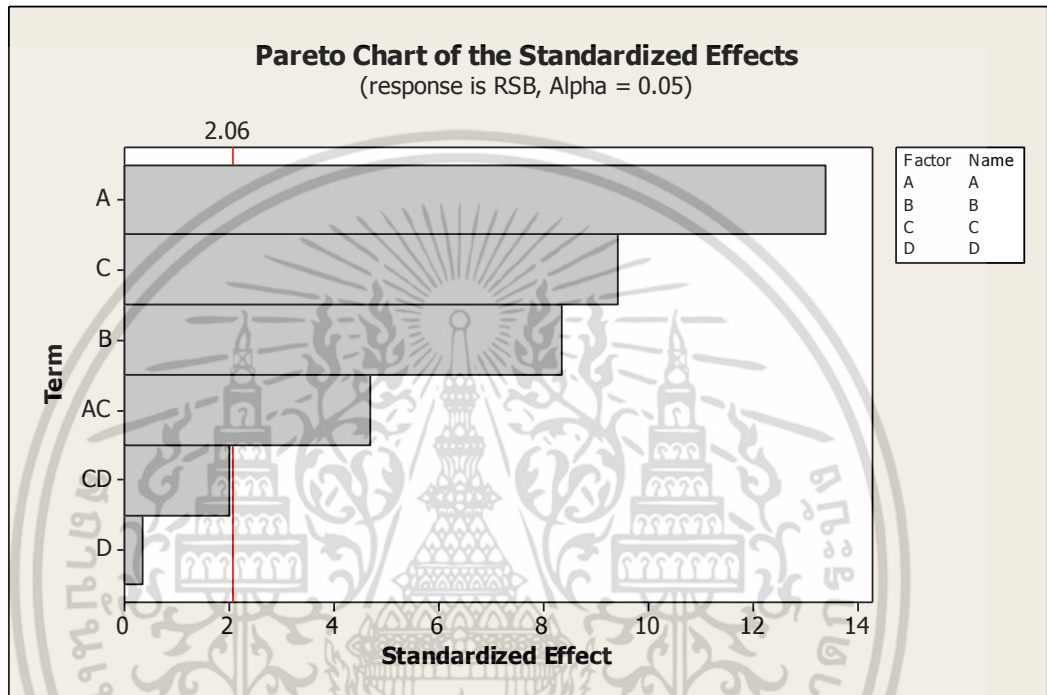
จากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ ได้แก่ ตัวแปรหลัก D และอันตรกิริยาระหว่าง A\*B, A\*D, B\*C, B\*D และ C\*D จึงต้องวิเคราะห์ ANOVA อีกครั้ง โดยตัดตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบบอก ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 Reduced model

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	13125.1	4375.03	104.08	<0.001
A	1	6974.1	6974.10	165.91	<0.001
B	1	2707.9	2707.93	64.42	<0.001
C	1	3443.0	3443.05	81.91	<0.001
A*C	1	836.9	836.92	19.91	<0.001
Residual Error	27	1135.0	42.04		
Lack of Fit	3	180.8	60.25	1.52	0.236
Pure Error	24	954.2	39.76		
Total	31	15096.9			
R-Sq = 92.48% R-Sq (adj) = 91.37%					

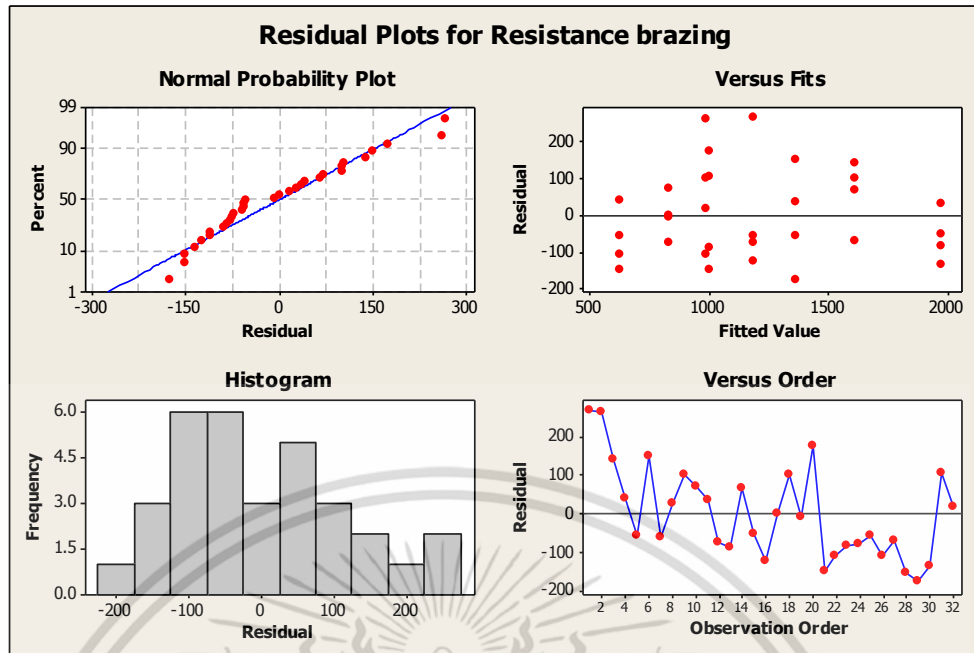
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อในการแล่นประสานด้วยความต้านทาน คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน รวมทั้งอันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยประสานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้าไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อ (P-value > 0.05)



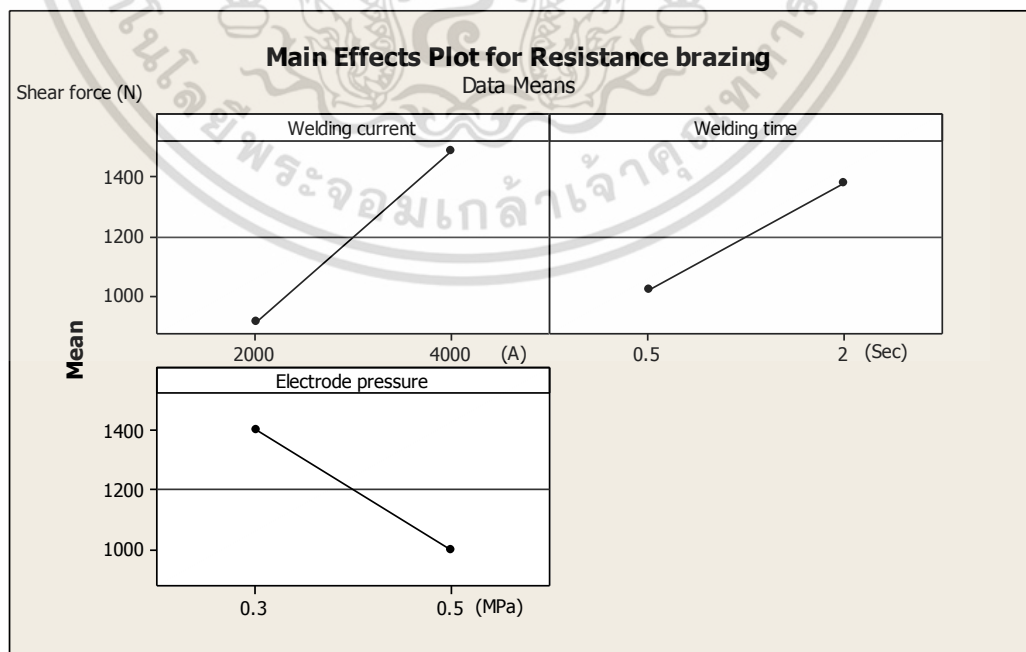
รูปที่ 4.1 Pareto chart แสดงความแตกต่างของอิทธิพลของแต่ละตัวแปรในการแล่นประสานด้วยความต้านทาน (RSB)

จากกราฟ Pareto chart ในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อที่ต่างกัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบระดับความสูงของกราฟแท่งของแต่ละตัวแปร จะเห็นได้ว่าที่ตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า (A) มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อมากที่สุด รองลงมา คือ ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน (B) ตามด้วยเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (C) และสุดท้าย คือ อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน (AC) ส่วนตัวแปรอื่น เวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า และอันตรกิริยาระหว่างความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานกับเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้าไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับ  $\alpha = 0.05$



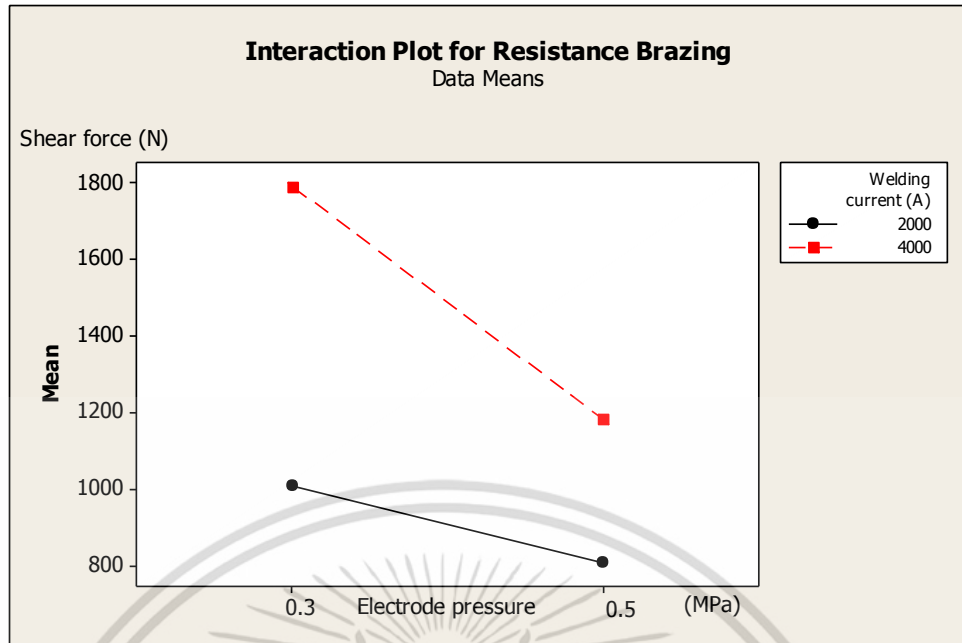
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลอง RSB

จากกราฟ Normal probability plot และ Histogram ในรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันในลักษณะเส้นตรง มีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟ Versus fits ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ และเป็นอิสระของส่วนตกค้างจากกราฟ Versus order ลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ จึงสรุปได้ว่าไม่พบสิ่งผิดปกติในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 4.3 กราฟตัวแปรหลัก (Main effects) ของการทดลอง RSB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Interaction plots แสดงผลกระทบรวมของ RSB

จากการพิจารณารูป Main effects และ Interaction plots ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าตัวแปรและระดับที่มีผลกระทบให้ค่าแรงเฉือนสูงสุดจากการทดลองในครั้งนี้ คือ กระแสไฟฟ้าที่ 4,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานที่ 0.3 MPa

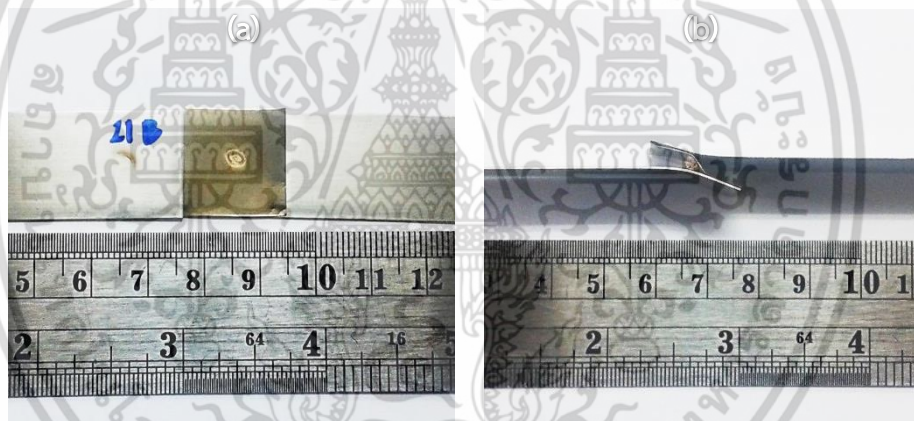
จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า หรือเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ทำให้ความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการตามทฤษฎี คือ

$$H = I^2 R t \quad (4.1)$$

เมื่อ H คือ ความร้อน I คือ กระแสไฟฟ้า R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ t คือ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aslanlar [6] และ Marashi [7] โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า ทำให้ความร้อนที่เกิดในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมจะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้ความร้อนที่เกิดในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้รอยเชื่อมสามารถประสานกันได้ดีและแข็งแรงกว่าที่ใช้ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าน้อย ผลจากการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานพบว่า รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าที่รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa เนื่องจากที่ความดันจากอิเล็กโทรด 0.5 MPa ทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเสียรูปมากกว่า หรือมีผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสของรอยต่อต่ำกว่าที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าจึงน้อยกว่าที่ความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.3 MPa ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ โยธิน จันทรทอง [5] ที่พบว่า เมื่อใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.15 MPa รอยต่อจะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.25 MPa สำหรับเวลา กดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้าในงานการทดลองครั้งนี้ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม เนื่องจากใช้วัสดุที่มีความหนา 0.5 mm ซึ่งมีความหนาน้อยมาก และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเพียง 2 s มีผลให้รอยเชื่อมเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เวลา กดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้าจึงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม สำหรับรูปที่ 4.5 แสดงมุมบิตการแตกหัก (Fracture) ของชิ้นงานทดสอบที่ต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.5 a รอยเชื่อมจากการใช้กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s ความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.5 MPa และเวลา กดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 0 s ชิ้นงานทดสอบจะไม่เกิดมุมบิตของการแตกหัก เนื่องจากรอยเชื่อมมีความแข็งแรงน้อย ซึ่งต่างจากรูปที่ 4.5 b ใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s ความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.3 MPa และเวลา กดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 5 s ชิ้นงานทดสอบมีรอยเชื่อมที่แข็งแรง และจากการทดสอบความแข็งแรงเฉือน พบว่า ชิ้นงานจะเกิดมุมบิตก่อนจะเกิดการแตกหัก



รูปที่ 4.5 ลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม (a) รอยเชื่อมจากการใช้กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s ความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.5 MPa และเวลา กดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 0 s และ (b) รอยเชื่อมจากการใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s ความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.3 MPa และเวลา กดขึ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า 5 s

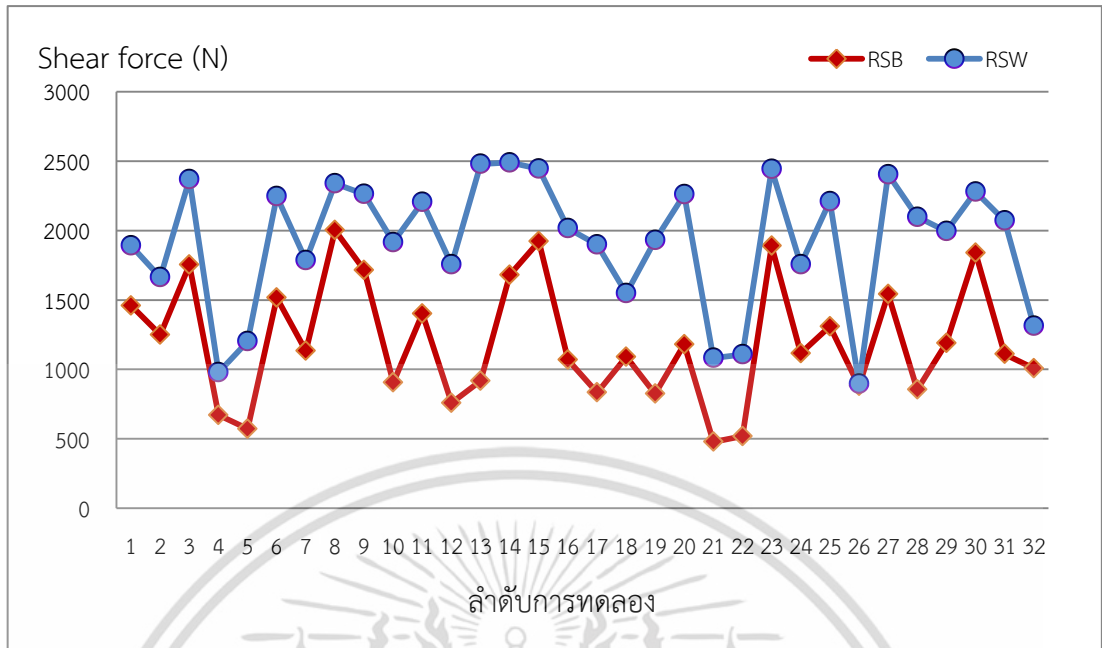
4.1.2.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างการเล่นประสานด้วยความต้านทาน (RSB) กับการเชื่อมด้วยความต้านทาน (RSW)

ในการเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างการเล่นประสานด้วยความต้านทาน (RSB) กับการเชื่อมด้วยความต้านทาน (RSW) ภายใต้การทดลองที่มีเงื่อนไขในการทดลองเหมือนกัน จะใช้เทคนิค Paired T-Test and CI ในการวิเคราะห์ ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 Paired T-Test and CI: RSB, RSW

Paired T for RSB - RSW				
	N	Mean	StDev	SE Mean
RSB	32	1199.5	432.4	76.4
RSW	32	1901.5	490.4	86.7
Difference	32	-702.0	347.1	61.4
95% CI for mean difference: (-827.2, -576.9)				
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -11.44 P-Value < 0.001				

ผลการวิเคราะห์ Paired T-Test and CI ระหว่าง RSB และ RSW จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ค่า T-Value = -11.44 และค่า P-Value < 0.001 นั้นแสดงให้เห็นว่า ความแข็งแรงของรอยต่อของทั้งสองกระบวนการภายใต้จากการทดลองที่เงื่อนไขเดียวกัน จะมีความแข็งแรงต่างกันที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  โดยชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทาน (RSW) สามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเล่นประสานด้วยความต้านทาน (RSB) เฉลี่ย 702.0 N ผลเปรียบเทียบแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสาเหตุของชิ้นงานที่ผ่านการเล่นประสานด้วยความต้านทานมีค่าแรงเฉือนน้อยกว่าเนื่องจากอิทธิพลทางความร้อนที่เกิดในการเชื่อม โดยชิ้นงานที่ผ่านการเล่นประสานด้วยความต้านทานจะมีโลหะเติมแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อ โลหะเติมที่ใช้ คือ ชนิด SiL. CD1050 – 5M ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน RSB มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน RSW ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขในการทดลองที่เหมือนกัน ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานจึงเกิดความร้อนมากกว่า ทำให้รอยต่อเกิดการหลอมละลายเชื่อมเข้ากันได้ดีกว่า เกิดเป็นรอยต่อที่แข็งแรงกว่า และสาเหตุอีกประการหนึ่ง คือ โลหะเติมที่ใช้ในการเล่นประสานด้วยความต้านทาน มีส่วนผสมต่างจากโลหะพื้น ทำให้เกิดเฟสใหม่ในระหว่างการเล่นประสาน เช่น เฟส Ag-rich และเฟส Cu-rich ซึ่งเฟสใหม่เหล่านี้จะส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง แต่การเชื่อมด้วยความต้านทาน รอยต่อจะหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทนต่อแรงเฉือนได้ดีกว่า



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างชิ้นงาน RSB กับ RSW

จากการเปรียบเทียบผลความแข็งแรงของรอยต่อชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสานด้วยความต้านทานกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความต้านทาน พบว่า รอยต่อของชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสานด้วยความต้านทานมีความแข็งแรงเฉลี่ย 1199.5 N รอยต่อของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทานมีความแข็งแรงเฉลี่ย 1901.5 N ซึ่งความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสานด้วยความต้านทานมีค่าประมาณ 63 % ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความต้านทาน และเนื่องจากการใช้งานของชิ้นงานแล่นประสานส่วนใหญ่ ไม่ต้องการความแข็งแรงของรอยต่อมากนัก แต่ต้องการไม่ให้เกิดช่องว่าง หรือมีรอยร้าว [7] ดังนั้นความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสานด้วยความต้านทานจากการทดลองครั้งนี้ คาดว่ามีความแข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

#### ข้อเด่นและข้อด้อยของการแล่นประสานด้วยความต้านทาน (RSB) กับการเชื่อมด้วยความต้านทาน (RSW)

ข้อดีของการแล่นประสานด้วยความต้านทาน และการเชื่อมด้านที่เห็นได้เด่นชัด คือ ใช้เวลาในการเชื่อมสั้นมาก แต่ในกรณีการต่อวัสดุต่างชนิดกัน ถ้าใช้กระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทาน จะเกิดการเชื่อมติดกันได้ยาก ซึ่งถ้าใช้การแล่นประสานด้วยความต้านทาน จะสามารถประสานรอยต่อที่มีชนิดต่างกันได้ เนื่องจากใช้โลหะเติมช่วยในการประสานเนื้อโลหะที่ต่างชนิดกัน และข้อด้อยอีกประการหนึ่งของการเชื่อมด้วยความต้านทาน คือ ความร้อนที่เกิดในการเชื่อมสูงจนทำให้เนื้อชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว ซึ่งในงานบางลักษณะไม่ต้องการให้เกิดการหลอมเหลวของเนื้อชิ้นงาน เช่น ในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะซ้อนกันหลายๆ โดยแต่ละชั้นจะมีช่องสำหรับให้ของเหลวไหลผ่าน เพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน ซึ่งถ้าใช้กระบวนการเชื่อมที่ทำให้เกิดการหลอมเหลว อาจทำให้เนื้อโลหะที่หลอมเหลวไหลไปปิดช่องสำหรับให้ของเหลวไหลผ่าน ทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นในการสร้างอุปกรณ์ประเภทนี้จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมด้วยความต้านทาน ซึ่งวิธีการเชื่อมประสานด้วยความต้านทาน จะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าสำหรับลักษณะงานที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมเหลวของชิ้นงาน เนื่องจากเกิดความร้อนในการประสานต่ำกว่าการเชื่อมด้วยความต้านทาน ถ้าใช้เงื่อนไขในการเชื่อมประสานด้วยความต้านทานที่เหมาะสม จะทำให้รอยต่อประสานกันในสภาวะของแข็ง โดยไม่เกิดการหลอมละลายของโลหะเติมและโลหะชิ้นงาน

## 4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

### การออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นสารประกอบที่เกิดขึ้น จะนำผลการทดลองจากการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อมากำหนดตัวแปรที่จะศึกษา และแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด คือ ศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน โดยแต่ละชุดจะทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งตัวแปรและระดับในการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า โดยจะศึกษากระแสไฟฟ้าในการเชื่อมประสานด้วยความต้านทานที่ 5 ระดับ ซึ่งจะกำหนดตัวแปรอื่นที่ใช้ในกระบวนการคงที่ โดยเลือกจากระดับที่ใช้เชื่อมประสานแล้วทำให้รอยต่อสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุด คือ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่ 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa แสดงแผนการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า

ระดับ	1	2	3	4	5
กระแสไฟฟ้า (A)	2000	2500	3000	4000	5000

4.2.2 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า โดยจะศึกษาเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมประสานด้วยความต้านทานที่ 4 ระดับ ซึ่งจะกำหนดตัวแปรอื่นที่ใช้ในกระบวนการคงที่ โดยเลือกจากระดับที่ใช้เชื่อมประสานแล้วทำให้รอยต่อสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุด คือ กระแสไฟฟ้า 4000 A และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa แสดงแผนการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า

ระดับ	1	2	3	4
เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (s)	0.5	1	1.5	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน โดยจะศึกษาความดันจากอิเล็กโทรดในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่ 5 ระดับ ซึ่งจะกำหนดตัวแปรอื่นที่ใช้ในกระบวนการคงที่ โดยเลือกจากระดับที่ใช้เล่นประสานแล้วทำให้รอยต่อสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดคือ กระแสไฟฟ้าคงที่ 4000 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s แสดงแผนการทดลองดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน

ระดับ	1	2	3	4	5
แรงกดจากอิเล็กโทรด (MPa)	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5

### 4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

#### 4.3.1 ผลการทดลองจากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า โดยจะศึกษากระแสไฟฟ้าในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่ 5 ระดับ คือ 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 kA ซึ่งจะกำหนดเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่ 2 s และใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ชิ้นงานทดสอบหลังผ่านกระบวนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแสดงผลดังนี้

##### 4.3.1.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้า จะส่งผลให้ขนาดเกรนของ 316L SS ใหญ่ขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ขึ้นตรงรอยต่อของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าตามทฤษฎีดังสมการที่ 4.1 ทำให้ 316L SS และโลหะเติมบริเวณรอยเชื่อมเริ่มหลอม จึงมีผลให้เกรนของ 316L SS บริเวณรอยเชื่อมเกิดการขยายตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.7 คือ ขนาดเกรนของ 316L SS ที่ยังไม่ได้เล่นประสานด้วยความต้านทาน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ขนาดเกรนของ 316L SS จะมีขนาดเล็ก เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2000 และ 2500 A แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ขนาดเกรนของ 316L SS บริเวณรอยเชื่อมจะมีขนาดเล็ก และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเกรนของ 316L SS ที่ยังไม่ได้เล่นประสานด้วยความต้านทาน พบว่า เกรนจะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า 3000 A ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะพบว่า เกิดเฟส Fe ในระหว่างชั้นของโลหะเติมและเกรน 316L SS จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจากเพิ่มกระแสไฟฟ้า และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 3500 และ 4000 A แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ขนาดเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมและพื้นที่ของเฟส Fe ที่เกิดระหว่างชั้นของโลหะเติมจะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า จะส่งผลให้ขนาดเกรนของ 316L SS และเฟส Fe ที่เกิดระหว่างชั้นของโลหะเติมจะมีขนาดใหญ่ขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน และเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า ผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ

จากการทดสอบแรงเฉือน และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคทางสถิติพบว่า ตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  และรอยต่อที่ได้จากการแล่นประสานด้วยความต้านทาน โดยใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุด

ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อที่ต่างกัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่า ตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อมากที่สุด รองลงมาคือ ความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน ตามด้วยเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และลำดับสุดท้ายคือ อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน ส่วนตัวแปรอื่น ได้แก่ เวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า และอันตรกิริยาระหว่างความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงานกับเวลากดชิ้นงานหลังปล่อยกระแสไฟฟ้า ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 5.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

##### 5.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่า อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า มีผลให้ขนาดเกรนของ 316L SS เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า จะทำให้ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้น และรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A มีขนาดเกรนโตที่สุด

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ EDS พบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดเฟส Fe-rich ในระหว่างชั้นของโลหะเติม โดยรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A มีขนาดเฟส Fe-rich ที่เกิดในระหว่างชั้นของโลหะเติมโตที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มกระแสไฟฟ้ายังส่งผลให้เฟส Ag-rich เกิดการแทรกตัวในระหว่างเฟส Cu-rich ของโลหะเติมได้มากขึ้นทำให้เฟส Cu-rich มีขนาดเฟสที่เล็กลงแต่ละเม็ดขึ้น ซึ่งขนาดเฟส Fe-rich ที่โตขึ้นและเฟส Cu-rich ที่มีขนาดเฟสเล็กและละเอียด จะส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น

ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping พบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า 4000 A เกิดธาตุ Fe, Cr และ Ni กระจายตัวอยู่ในระหว่างชั้นของโลหะเติมหนาแน่น ในขณะที่รอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 2000 A ไม่เกิดธาตุ Fe, Cr และ Ni กระจายตัวอยู่ในระหว่างชั้นของโลหะเติม เนื่องจากเกิดความร้อนในการเชื่อมน้อยกว่า รอยต่อจึงประสานกันในสภาวะของแข็ง ธาตุ Fe, Cr และ Ni จึงไม่เกิดการกระจายตัว

### 5.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่า อิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 – 2 s ไม่ส่งผลกระทบต่อการเติบโตของขนาดเกรน ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมของ 316L SS ทุกระดับที่ศึกษามีขนาดโตใกล้เคียงกัน

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ EDS พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เฟส Fe-rich ที่เกิดระหว่างชั้นโลหะเติมมีปริมาณหนาแน่นขึ้น แต่เนื่องจากเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ศึกษาแตกต่างกันไม่เกิน 1.5 s จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเฟสและรูปร่างใกล้เคียงกันทุกระดับที่ศึกษา และเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน จะพบว่า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลน้อยที่สุด

ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping พบว่า ทุกระดับที่ศึกษาจะมีลักษณะการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบที่เกิดขึ้น มีลักษณะกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน เกิดธาตุ Fe, Cr และ Ni กระจายตัวอยู่ในระหว่างชั้นของโลหะเติมทุกระดับที่ศึกษา

### 5.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่า เมื่อเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน จะมีผลให้ขนาดเกรนของ 316L SS เล็กลง ซึ่งจากผลการตรวจสอบ พบว่า รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa มีขนาดเกรนโตสุด และรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa จะมีขนาดเกรนเล็กที่สุด

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ EDS พบว่า พื้นที่ของเฟส Fe-rich ที่เกิดในระหว่างชั้นของโลหะเติม และขนาดของรอยเชื่อมจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน ซึ่งรอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa จะมีพื้นที่ของเฟส Fe-rich และขนาดของรอยเชื่อมโตที่สุด และยังพบว่า เฟส Ag-rich แทรกตัวอยู่ในระหว่างเฟส Cu-rich หนาแน่น ทำให้เฟส Cu-rich มีขนาดเฟสที่เล็กและละเอียด เมื่อเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa พบว่า ไม่เกิดเฟส Fe-rich ในระหว่างชั้นของโลหะเติม และขนาดของเฟส Cu-rich จะมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเฟส Ag-rich เกิดแทรกตัวในระหว่างเฟส Cu-rich ได้น้อย โดยเฟส Fe-rich ที่มีขนาดเล็กลง และเฟส Cu-rich ที่มีขนาดโต จะส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping พบว่า รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa จะเกิดธาตุ Fe, Cr และ Ni ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L กระจายตัวในชั้นของโลหะเติมหนาแน่น และเมื่อเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa จะพบว่า ธาตุ Fe, Cr และ Ni ไม่เกิดการกระจายตัวในชั้นของโลหะเติม เนื่องจากเกิดความร้อนในการเชื่อมน้อย ทำให้รอยต่อจึงประสานกันในสภาวะของแข็ง

#### 5.2.4 ผลการศึกษาลักษณะการแตกหักของรอยต่อ

ผลจากการศึกษาลักษณะการแตกหักของรอยต่อ พบว่า รอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.5 MPa จะมีความแข็งแรงต่ำ และมีลักษณะการแตกหักบริเวณชั้นของโลหะเติมหรือบริเวณเฟส AgCuZn เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa รอยต่อจะมีความแข็งแรงสูง และมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วสวัชร นาคเขียว, “กระบวนการผลิต (Manufacturing Processes) กระบวนการต่อวัสดุ” วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] ศักดิ์ชัย จันทศรี, ไพบุลย์ แยมเฟื่อน, สมชาย วนไทยสงค์, กิตติพงษ์ กิมะพงค์, การเชื่อมต้านทานแบบจุดอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ, ตุลาคม 2554. หน้า 907-912
- [3] Aslanlar A., Qgur A., Ozasrac U., Ilhan E. and Demir Z. “Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding” **Materials and Design**, Vol. 28 2007. Pp. 2-7
- [4] นิวัฒน์ คุณาวงศ์. “การศึกษาผลกระทบของรอยเชื่อมเนื่องจากการเตรียมสภาพผิวหน้าของอลูมิเนียมผสมในการเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุด” วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2551.
- [5] Salem M., “Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW)” **The University of Western Ontario**. April 2011.
- [6] กรรณชัย กัลยาศิริ, “กรรมวิธีการผลิต” หจก. วี.เจ.พรินติ้ง, กรุงเทพฯ, 2551.
- [7] ประภาส เกตุไทย. “งานเชื่อมโลหะแผ่น” สกายบุ๊กส์, กรุงเทพฯ, 2545.
- [8] ยุคล จุลอุทัย. “การเชื่อมบัดกรีแข็ง” **เชื่อมและเทคโนโลยีโลหะ**, ปีที่ 14, ฉบับที่ 25, 2539. หน้า 51-61
- [9] AWS C3.1-63. “Establishment of a Standard Test for Brazed Joints” **A committee Report, American Welding Society (AWS)**, 1963.
- [10] อมรรัตน์ เลิศวารสิริกุล, เอกสารเสริมประกอบการเรียนวิชา 213211 **Material Sciences for Engineers**.
- [11] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. “การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง” ท็อป, กรุงเทพฯ, 2549.
- [12] พรวิสา วงศ์ปัญญา. “การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อน” วิศวกรรมโลหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [13] หัสวิภา หมายมัน. “Scanning Electron Microscope : SEM” ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2012.
- [14] โยธิน จันทร์ทอง, กรรณชัย กัลยาศิริ และสกนธ์ คล่องบุญจิต. “ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1” **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**, ครั้งที่ 50, 2555. หน้า 26-33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] Aslanlar A., Qgur A., Ozasarac U., Lthan E., and Demir Z. “Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding” **Materials and Design**, Vol. 28, 2007 Pp. 2-7
- [16] Marashi P. “Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steel” **Materials Science and Engineering**, Vol. 480 (1-2), 2008; pp. 175–180
- [17] Dursun O., “An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel” **Materials and Design**, Vol. 29, 2008. Pp. 597–603
- [18] Danial K. and et al. “Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations” **Materials and Design**, Vol. 61, 2014. Pp. 251–263
- [19] Sahota D.S. and et al. “Study of effect of parameters on resistance spot weld of ASS316 material” **Mechanical Confab**, Vol. 2, 2013. Pp. 67-78
- [20] Verma A.B., and et al. “Resistance Welding of Austenitic Stainless Steels (AISI 304 with AISI 316),” **Manufacturing Technology**, Vol. 5, 2014. Pp. 302-308
- [21] Singh A. and et al. “Parameter optimization for tensile strength of spot weld for 316L stainless steel” **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Vol. 4, 2013. Pp 2443-2446
- [22] Charde N. “An Experimental Investigation on Spot Weld Growth on Dissimilar Joints of 304L Austenitic Stainless Steel and Medium Carbon Steel” **International Journal of Advances in Applied Sciences**, Vol. 2, 2013. Pp. 25-32
- [23] Pouranvari M. and Ranjbarnoode E. “Effect of electrode force on fracture type of DQSK steel resistance spot welds” **Acta Metallurgica Slovaca**, Vol. 19, 2013, pp. 149-153
- [24] Aravinthan A. and NachiMani C. “Analysis of spot weld growth on mild and stainless steel,” **American welding society and the welding research council**, Vol. 90, 2011. Pp. 143-147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [53] Hayazi N.F. and Shamsudin S.R. “Joining of Dissimilar 6063 Aluminium Alloy–316L Stainless Steel by Spot Welding: Tensile Shear Strength and Heat Treatment” **Advanced Materials Research**, Vol. 795, 2013.Pp. 492-495
- [26] Tashi and et al. “Diffusion brazing of Ti-6Al-4V and stainless steel 316L using AgCuZn filler metal” **Metallurgical and Materials Engineering**, vol. 19, 2013. Pp. 189-199
- [27] Yue X. and et al. “Microstructure and interfacial reactions of vacuum brazing titanium alloy to stainless steel using an AgCuTi filler metal,” **Materials characterization**, vol. 59, 2008. Pp. 1721-1727
- [28] Elrefaey A. and Tillmann W. “Correlation between microstructure mechanical properties and brazing temperature of steel to titanium joint” **Journal of Alloys and Compounds**, Vol.487, 2009. Pp. 639–645
- [29] Zakipour S. and et al. “An investigation on microstructure evolution and mechanical properties during transient liquid phase bonding of stainless steel 316L to Ti-6Al-4V” **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 626, 2015. Pp. 269–276
- [30] Outokumpu “Table chemical composition of 316L stainless” **Inspection certificate 3.1 EN 10204 3.1**, ACL-2012/24
- [31] Neis and Sales office, Amatanakorn Industrial Estate 700/436 Moo7 Bangna-Trad Highway Km57, Donhuaroh, Muang District, Chonburi 20000 Thailand
- [32] AWS C1.4M/C1.4. “Specification for resistance welding of carbon and low-alloy steels” **American national standard**, 2009.
- [33] Richard B. “**Advanced Microchannel Heat Exchangers**” [Online]. Available : <http://mbi-online.org/advanced-microchannel-heat-exchangers>, 2015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ปีที่ 32 ฉบับที่ 3

กันยายน 2558

### บทความวิจัย

1. การขจัดเขม่าเข็พพอยท์ในการซึ่งแบบเดิมโดยใช้คาร์บอนฟิลเตอร์	1
ศักกรินทร์ สีนโอย จีรุตตา โกษิยาภรณ์ ปราโมทย์ วาดเขียน	
2. ผลกระทบจากการให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO	7
สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
3. อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นดึง และความหนาในกระบวนการดึงขึ้น	13
รูปท่อทองแดง	
ทัพพรสมร คุณิตโสภิตวงศ์ สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ	
4. การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์ที่ใช้แบบจำลอง	19
สถานการณ์	
เดชพล พลังไปญลย์ ทีระพัฒน์ ภูผ่าน อุคม จันทร์จิรสสุข	
5. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแลกเปลี่ยนประจุด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อ	25
ระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L	
ภูเมศวร์ แสงระยับ กักรร ลุขพิมาย กรรณชัย กัลยาศิริ	
6. การอธิบายกลไกการทำความสะอาดของการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งโดยพารามิเตอร์การละลาย	31
ทัชกร หิรัญวิทย์ยะ สุรัตน์ ฮาวรัตน์	
7. การเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันในประเทศไทยโดยใช้วิธีลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์	37
ธนวัฒน์ เมธธีฎญรัตน์	
8. แรงจลนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียว	43
สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อุกฤษฏชน	
9. การออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมคี่เหลี่ยมรับแรงคดสองทางด้วยวิธี	49
อาณานิคมฝั่งประดิษฐ์	
อัคนัย ทานภา เรืองฤทธิ์ ชีระโรจน์	
10. ศึกษาการสร้างฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงสำหรับเซลล์	55
แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนโครงสร้างเซลล์ซ้อน a-Si:H/a-SiGe:H	
อภิชาญ มูลละคร รังสรรค์ เมืองเหลือ สรพงศ์ อินอินสง ทวีวัฒน์ กระจำงสังข์	
พีระวุฒิ ชินวรวัจน์ ทรงเกียรติ กิตติสินศิริรักษ์ อัครวิน หงษ์สิงห์ทอง วัณณ์ ศรีธาราธิคุณ	
กอบศักดิ์ ศรีประภา	

<http://www.kmitl.ac.th/iej>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความ ต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิม 316L

## A Study on Influence of Resistance Brazing Parameters on Joint Strength Between 316L Stainless Steel Plates

ภูเมศวร์ แสงระยับ กัษร สุขทิมา ย กรรณชัย กัลยาสิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด SiI CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบตอกเกลียว โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล  $2^4$  ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และมีตัวแปรที่ศึกษาคือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และเวลาในการกดแซ่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ผลจากการทดลองพบว่าตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และตัวแปรร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กโทรด มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  และรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 4,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa สามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด

คำสำคัญ : การเล่นประสานด้วยความต้านทาน/ ความแข็งแรงดึงเฉือน / การออกแบบการทดลอง

### Abstract

This research aims to study on influence of resistance brazing parameters on brazed joint between 316L stainless steel plates. SiI CD1050-5M filler metal was used in joining form lap joint. The experimental design of  $2^4$  full factorial design with 2 replicates was employed, and the factors of interest included welding current, welding time, electrode pressure and holding time. Results showed that the main effects were welding current, welding time, electrode pressure and 2-way interactions between welding current and electrode pressure significantly affect to the shear strength of brazed joint at  $\alpha = 0.05$ . In addition, the brazed joint with welding current of 4,000 A, welding time of 2 s and electrode pressure of 0.3 MPa provided the maximum shear strength.

Keywords: Resistance brazing/ Shear strength /Design of experiments

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการแผ่นประสานเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุ เนื่องจากสามารถใช้เชื่อมต่อวัสดุได้หลากหลายชนิด หรือมีลักษณะรอยต่อที่มีรูปร่างซับซ้อน และความสามารถที่เด่นชัดของกระบวนการแผ่นประสาน คือ สามารถเชื่อมต่อวัสดุที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ให้ติดกันได้เต็มทั้งหน้าตัดของรอยต่อ [1] แต่ในการแผ่นประสานวัสดุที่มีความสามารถด้านการกัดกร่อนได้ดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือไทเทเนียม นั้นจะทำให้ต้นทุนขี้ยาก เนื่องจากวัสดุจำพวกนี้เมื่อมีอุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดออกไซด์บนผิวของชิ้นงาน ทำให้รอยต่อของชิ้นงานเกิดการแพร่ได้น้อย มีผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง [2] เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ในการแผ่นประสาน วิธีการที่นิยมประยุกต์ใช้ในการประสานวัสดุที่มีความสามารถในการกัดกร่อนได้ดี คือ การแผ่นประสานในเตาสูญญากาศ หรือการควบคุมบรรยากาศภายในเตาโดยใช้ก๊าซคลุม เช่น ก๊าซอาร์กอน (Ar) และใช้ฟลักซ์ช่วยกำจัดหรือป้องกันการเกิดออกไซด์หรือสารเคมีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแผ่นประสาน [3-4] วิธีการที่กล่าวนี้เป็นวิธีการที่ซับซ้อนและใช้ระยะเวลาในการดำเนินงาน จึงได้มีการนำเทคนิคการแผ่นประสานด้วยความต้านทาน (Resistance brazing) มาศึกษาและประยุกต์ใช้ เพื่อลดระยะเวลาและความซับซ้อนในการดำเนินงาน

ในงานวิจัยของ โยชิน จันท์ทอง และคณะ ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งได้ทำการศึกษา 5 ปัจจัย คือ แรงกดจากอิเล็กโทรด เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ผลจากการทดลองพบว่า ทุกปัจจัยมีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  [5] Aslanlar และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กชุบโครเมตหนา 1.2 mm โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งใน

การทดลองจะกำหนดแรงกดจากอิเล็กโทรดคงที่ 6 kN ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดของรอยเชื่อมเกิดขึ้นเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 10 kA สำหรับเวลาในการเชื่อมที่ 12 cycle [6] และงานวิจัยของ Marashi ศึกษาความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคโลหะ ด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กแผ่นชุบสังกะสี หนา 1.1 mm กับเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนา 1.2 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงกดจากอิเล็กโทรด และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ผลจากการทดลองพบว่า ที่กระแสไฟฟ้า 13,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 cycle และแรงกดจากอิเล็กโทรด 4 bar ทำให้ได้รอยเชื่อมที่สามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด [7] ซึ่งจากการศึกษา และรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยของ โยชิน จันท์ทอง, Aslanlar และ Marashi สามารถกำหนดตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแผ่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด SiI CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบต่อเกย (Lap joint) โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงกดจากอิเล็กโทรด และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองแบบ  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง รวมทั้งหมด 32 การทดลอง โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ A : กระแสไฟฟ้า, B : เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า, C : แรงกดจากอิเล็กโทรด, D : เวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ซึ่งแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับดังแสดงในตารางที่ 1

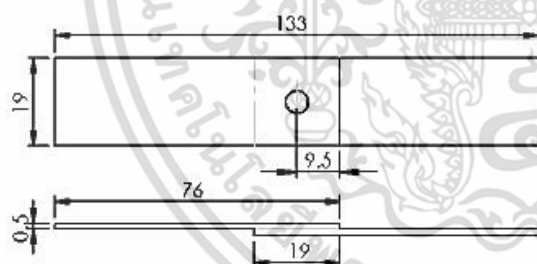
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับในการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับ	
		ต่ำ (-1)	สูง (1)
1	A (A)	2,000	4,000
2	B (Sec)	0.5	2.0
3	C (MPa)	0.3	0.5
4	D (Sec)	0	5

## 2.2 การเตรียมโลหะพื้นและโลหะเติม

ในส่วนนี้จะใช้วัสดุชนิดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มาต่อเข้าด้วยกัน โดยใช้โลหะเติมแบบแผ่น ชนิด SiL CD1050-5M ตัดให้ได้ขนาด 19 X 19 X 0.15 mm ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติม แสดงดังตารางที่ 2 โดยออกแบบการต่อแบบต่อเกลย ตามมาตรฐานของการกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบสำหรับงานเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) AWS C3 [8] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ [8]

## 2.3 การแล่นประสาน

หลังจากเตรียม โลหะพื้นและ โลหะเติมให้ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำโลหะพื้นและ โลหะเติมมาขัดด้วย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมชนิด SiL CD1050-5M [9]

Item	Chemical component (%)					Solidus (°C)	Liquidus (°C)	Brazeing temperature (°C)
	Ag	Cu	Zn	Ni	Mn			
SiL CD1050-5M	49	27.5	20.5	0.5	2.5	630	670	670 - 770

กระดาษทรายเบอร์ 320 และ 400 แล้วล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) และเอทานอล (Ethanol) หลังจากนั้นนำโลหะพื้นมาจับยึดบนฟิกเจอร์ โดยการต่อแบบต่อเกลย ซึ่งจะ สอดแผ่นโลหะเติมไว้ระหว่างรอยต่อของโลหะพื้น จากนั้นนำไปแล่นประสานด้วยความต้านทานด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522 โดยใช้อิเล็กโทรดทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm

## 2.4 ทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน

ในขั้นตอนการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน จะนำชิ้นงานมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG - X ใช้ความเร็วในการทดสอบ 10 mm/min จากนั้นนำผลจากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือนมาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ โดยใช้โปรแกรม Minitab V.16 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

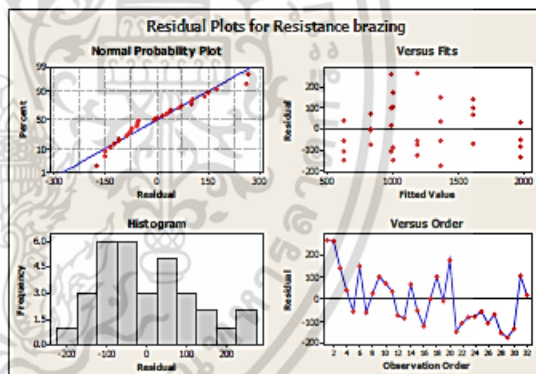
ผลจากการทดลองนำมาวิเคราะห์ ANOVA และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking) โดยใช้โปรแกรม Minitab V. 16 แสดงผลจากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 2

ตารางที่ 3 Analysis of variance for RB (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	13129.3	3282.32	79.40	< 0.001
A	1	6974.1	6974.10	168.70	< 0.001
B	1	2707.9	2707.93	65.50	< 0.001
C	1	3443.0	3443.05	83.28	< 0.001
D	1	4.2	4.21	0.10	0.732
A*B	1	106.8	106.84	2.58	0.132
A*C	1	836.9	836.92	20.24	< 0.001
A*D	1	5.0	4.98	0.12	0.733
B*C	1	71.9	71.85	1.74	0.206
B*D	1	4.5	4.51	0.11	0.746
C*D	1	151.0	150.99	3.65	0.074
Residual Error	16	661.5	41.34		
Pure Error	16	661.5	41.34		
Total	31	15096.9			
R-Sq = 95.63% R-Sq (adj) = 91.54%					

ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อในการแผ่นประสานด้วยความต้านทาน คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และแรงกดจากอิเล็กโทรด รวมทั้งอันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและแรงกดจากอิเล็กโทรด มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยประสานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนเวลาในการกดชิ้นงานหลังการเชื่อม ไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อ (P-value > 0.05) และผลจากการวิเคราะห์ ANOVA จากตารางที่ 4 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการเส้นตรงสำหรับการทำนายค่าความแข็งแรงของรอยต่อได้ดังสมการที่ 1

$$Y = 61.0578 + 14.7628 A + 9.19906 C - 10.3728 C - 5.11406 A * C \quad (1)$$



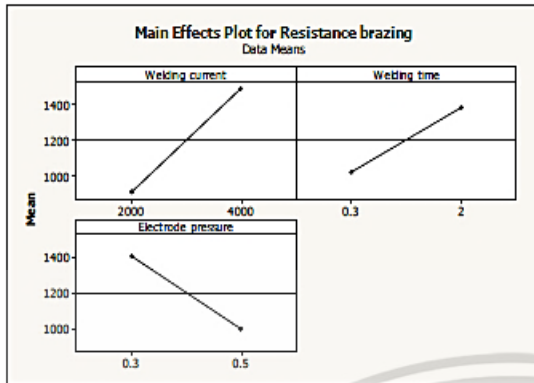
จากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ จึงต้องวิเคราะห์ ANOVA อีกครั้ง โดยตัดตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบออก ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Reduced model

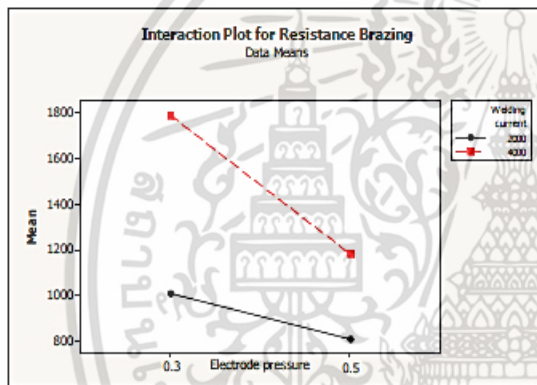
Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	13125.1	4375.03	104.08	< 0.001
A	1	6974.1	6974.10	165.91	< 0.001
B	1	2707.9	2707.93	64.42	< 0.001
C	1	3443.0	3443.05	81.91	< 0.001
A*C	1	836.9	836.92	19.91	< 0.001
Residual Error	27	1135.0	42.04		
Lack of Fit	3	180.8	60.25	1.52	0.236
Pure Error	24	954.2	39.76		
Total	31	15096.9			
R-Sq = 92.48% R-Sq (adj) = 91.37%					

รูปที่ 2 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลอง

จากกราฟ Normal probability plot และ Histogram ในรูปที่ 2 เห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันในลักษณะเส้นตรง มีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟ Versus fits ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ และความถี่เป็นอิสระของส่วนตกค้างจากกราฟ Versus order ลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ จึงสรุปได้ว่าไม่พบสิ่งผิดปกติในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 3 กราฟตัวแปรหลัก (Main effects) ของการทดลอง



รูปที่ 4 Interaction plots แสดงผลกระทบร่วม

จากการพิจารณากราฟ Main effects และ Interaction plots จะเห็นได้ว่าตัวแปรและระดับที่มีผลกระทบให้ค่าความแข็งแรงเดือนสูงสุดจากการทดลองในครั้งนี้ คือ กระแสไฟฟ้าที่ 4,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดที่ 0.3 MPa

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า หรือเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ทำให้ความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการตามทฤษฎี คือ

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

เมื่อ H คือ ความร้อน I คือ กระแสไฟฟ้า R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ t คือ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aslanlar [6] และ Marasli [7] และผลจากการทดลองที่ใช้ความดัน 0.3 MPa ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าที่ความดัน 0.5 MPa เนื่องจากความดัน 0.5 MPa ทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเสียดสีรูปมากกว่า หรือมีผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสต่ำกว่าที่ใช้ความดัน 0.3 MPa ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากความต้านทานไฟฟ้าจึงน้อยกว่าที่ความดัน 0.3 MPa ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ โยชิน จันทรทอง [5] เมื่อใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.15 MPa รอยต่อจะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.25 MPa สำหรับเวลาทดสอบชิ้นงานในงานการทดลองครั้งนี้ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม เนื่องจากใช้วัสดุที่มีความหนา 0.5 mm ซึ่งมีความหนาน้อยมาก และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเพียง 2 s มีผลให้รอยเชื่อมเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เวลาทดสอบชิ้นงานหลังการเชื่อมจึงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

#### 4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแปรผันประสาณด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และเวลาทดสอบชิ้นงานหลังการเชื่อม จากการทดสอบค่าความแข็งแรงเดือน และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคทางสถิติพบว่า ตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กโทรดมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยประสาณที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  และรอยต่อที่ได้จากการแปรผันประสาณด้วยความต้านทาน โดย

ใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุด

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Kanlayasiri, "Manufacturing Processes," VJ. printing, Bangkok, 2008.
- [2] L. Yajiang, Z. Zengda, F. Tao and W. Xinghong, "Oxidation resistance and phase constituents in the brazing interface of WC-TiC-Co hard alloys," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, pp. 51–55, 2002.
- [3] A. Elrefaey and W. Tillmann, "Effect of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of titanium joints," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 4842–4849, 2009.
- [4] A. Elrefaey and W. Tillmann, "Correlation between microstructure, mechanical properties, and brazing temperature of steel to titanium joint," Journal of Alloys and Compounds, Vol.487, pp. 639–645, 2009.
- [5] Y. Janthong, K. Kanlayasiri and S. Klongboonjit, "Study on influence of welding parameters of resistance spot welding on tensile shear load for hot-dipped zinc-coated steel sheets SGCD1," Kasetsart University Annual Conference Vol.343, No.50, pp.26-33, 2555.
- [6] S. Aslanlar a, A. Ogur b, U. Ozsarac and E. Ilhan, "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding," Materials and Design, Vol. 29, pp.1427–1431, 2008.
- [7] P. Marashi, "Microstructure and failure behavior of carbon galvanized and austenitic stainless steel," Materials Science and Engineering :A, Vol.480, pp.175–180, 2008.
- [8] AWS C3, "Establishment of a Standard Test for Brazed Joints," A committee Report, American Welding Society (AWS), pp. 1-63, 1963.
- [9] Neis, "Brazing filler metals," Amatanakorn Industrial Estate 700/436 Moo7 Bangna-Trad Highway Km57, Donhuaroh, Muang District, Chonburi 20000 Thailand.

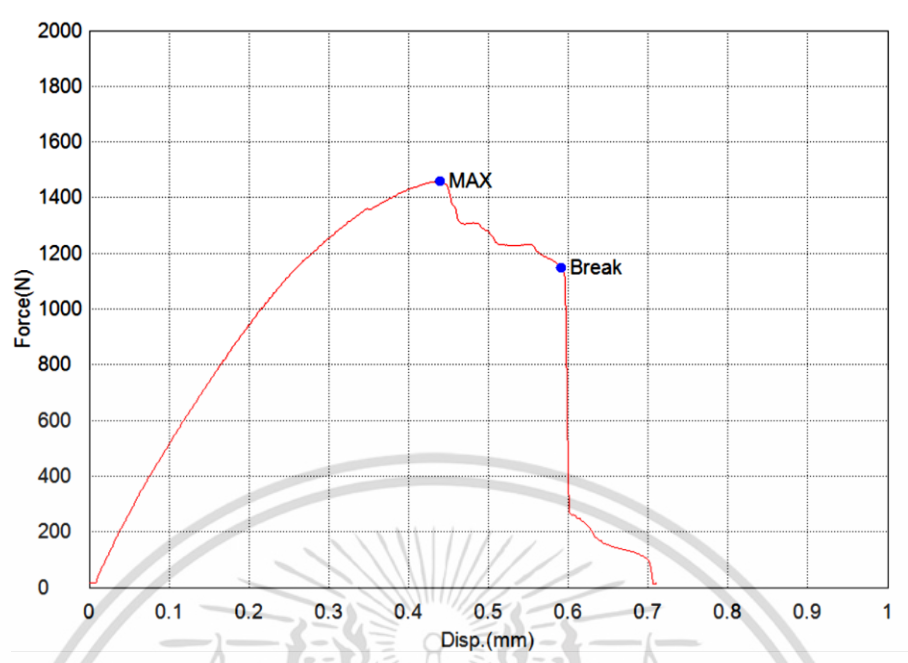
เอกสารนี้เป็น dissimilar resistance spot welds ระหว่าง low ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



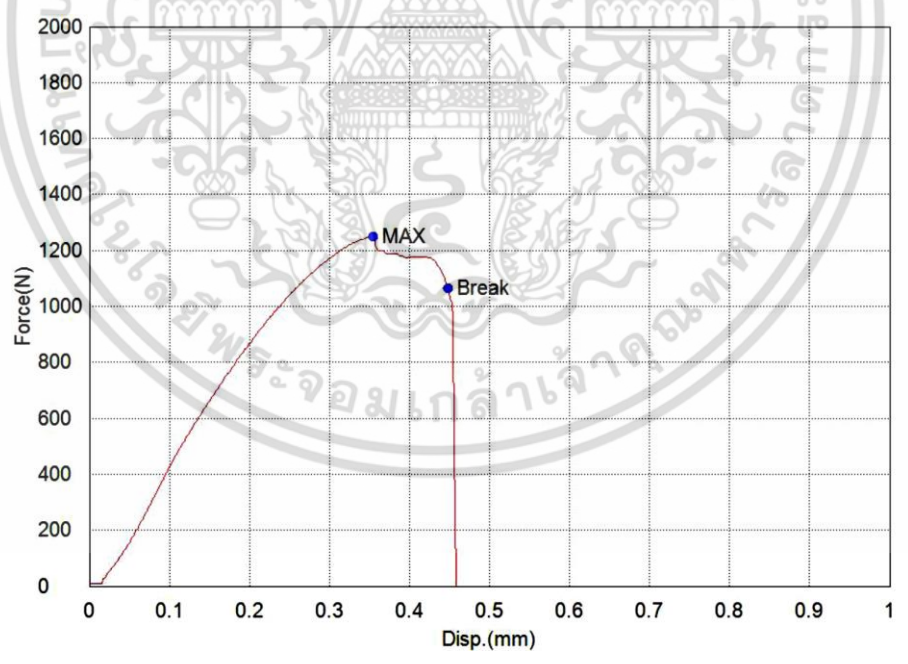
ภาคผนวก ข.

## ผลการทดสอบความแข็งแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

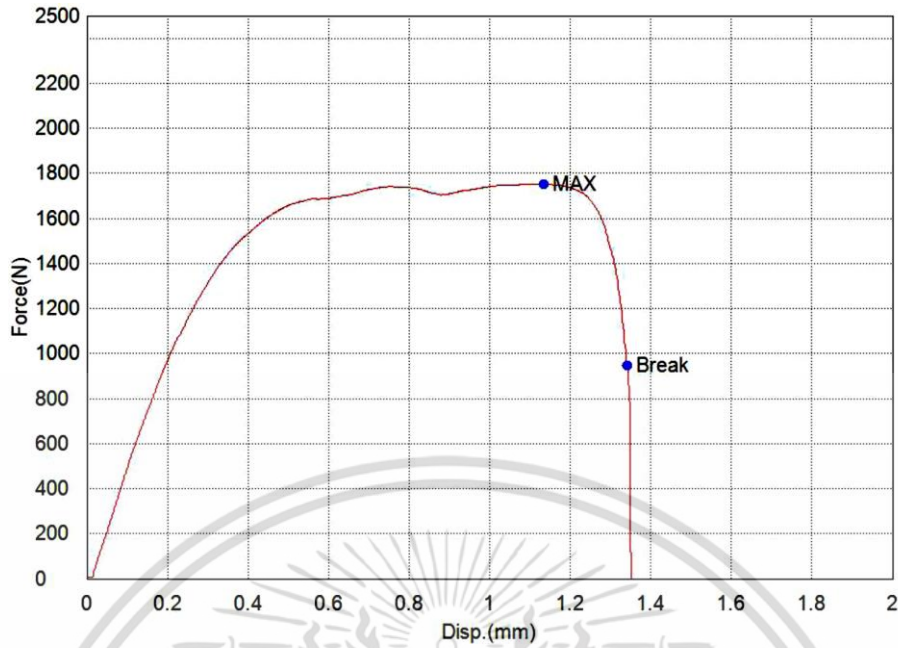


รูปที่ ข.1 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 27 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

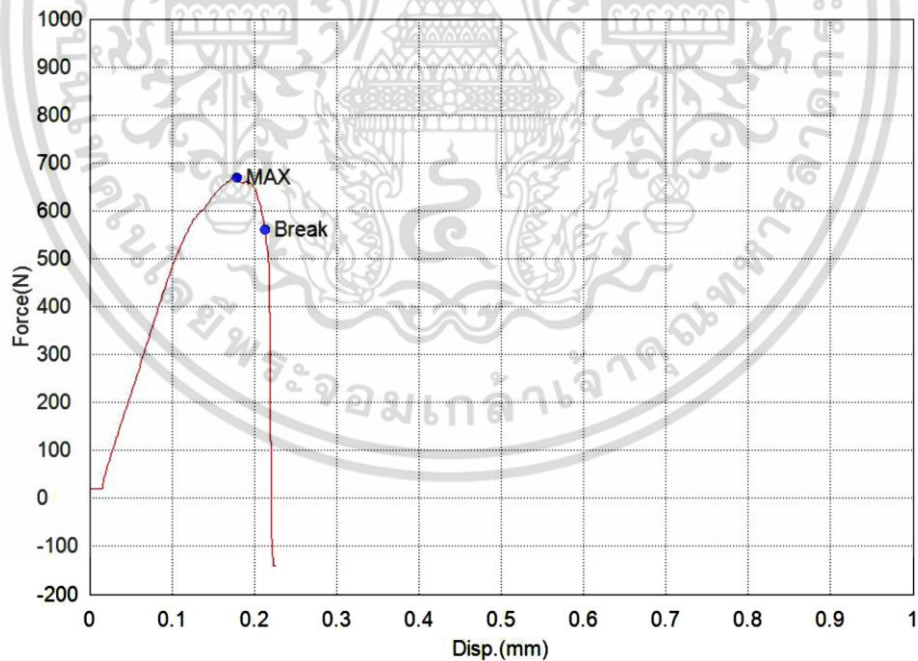


รูปที่ ข.2 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 23 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

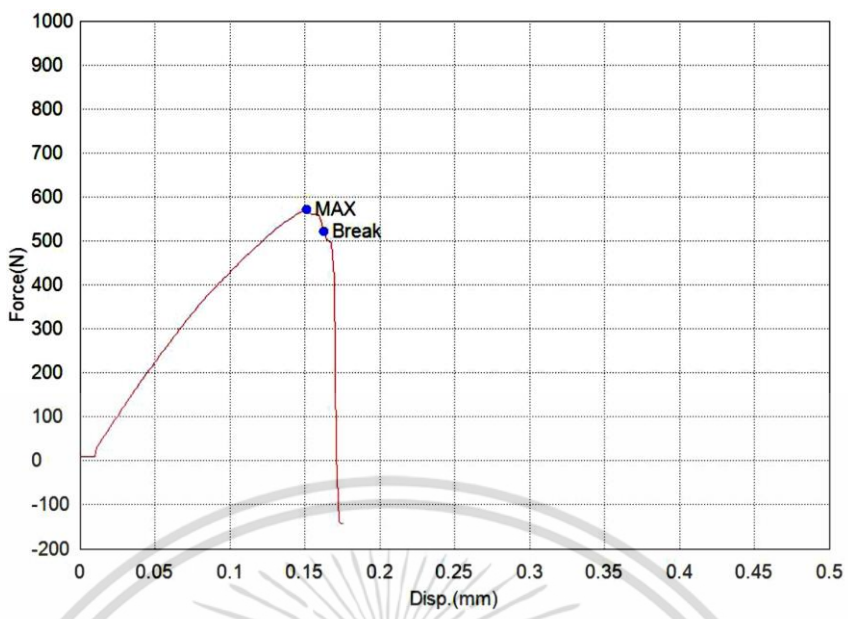


รูปที่ ข.3 ผลทดสอบความแข็งแรงเหนือนชิ้นงานทดสอบที่ 18 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

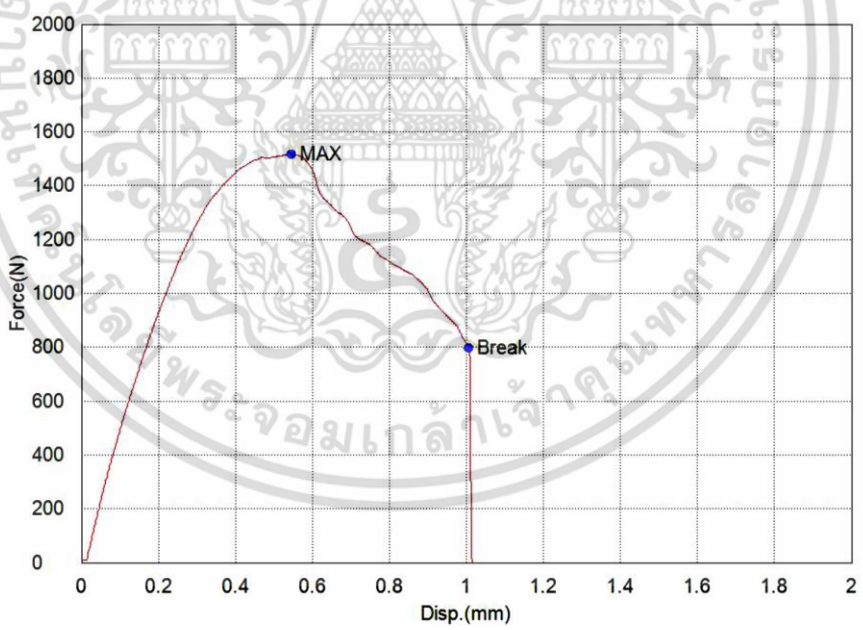


รูปที่ ข.4 ผลทดสอบความแข็งแรงเหนือนชิ้นงานทดสอบที่ 21 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

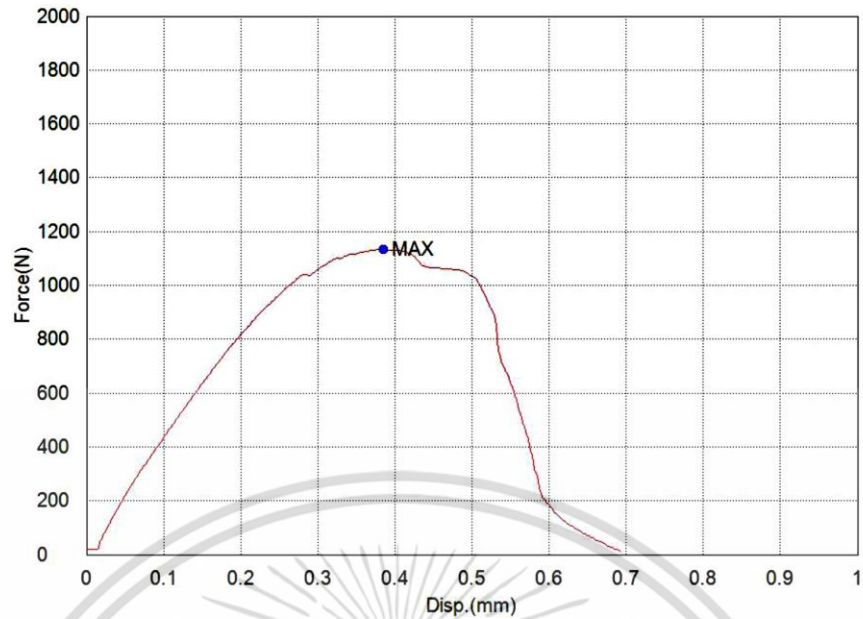


รูปที่ ข.5 ผลทดสอบความแข็งแรงเหนือนชิ้นงานทดสอบที่ 5 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

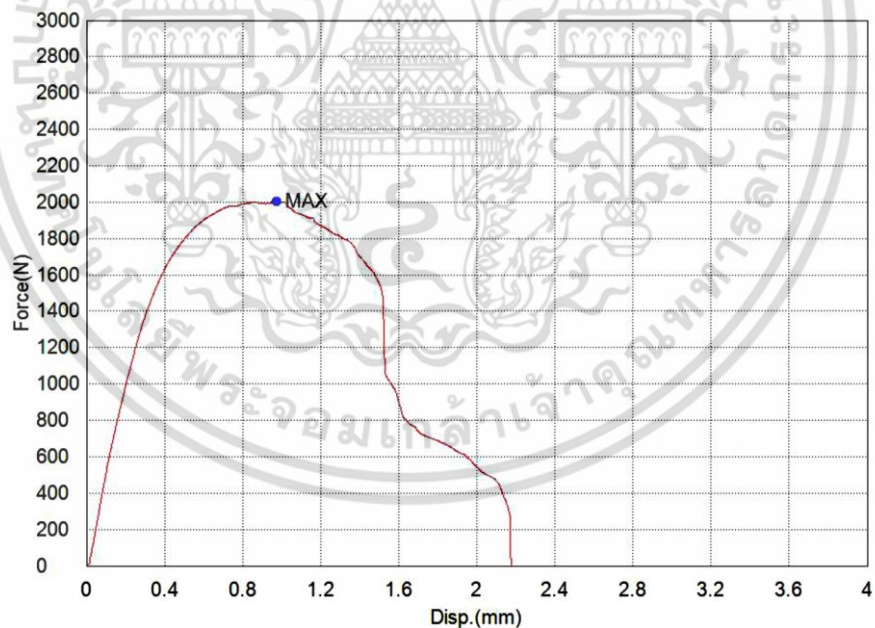


รูปที่ ข.6 ผลทดสอบความแข็งแรงเหนือนชิ้นงานทดสอบที่ 8 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

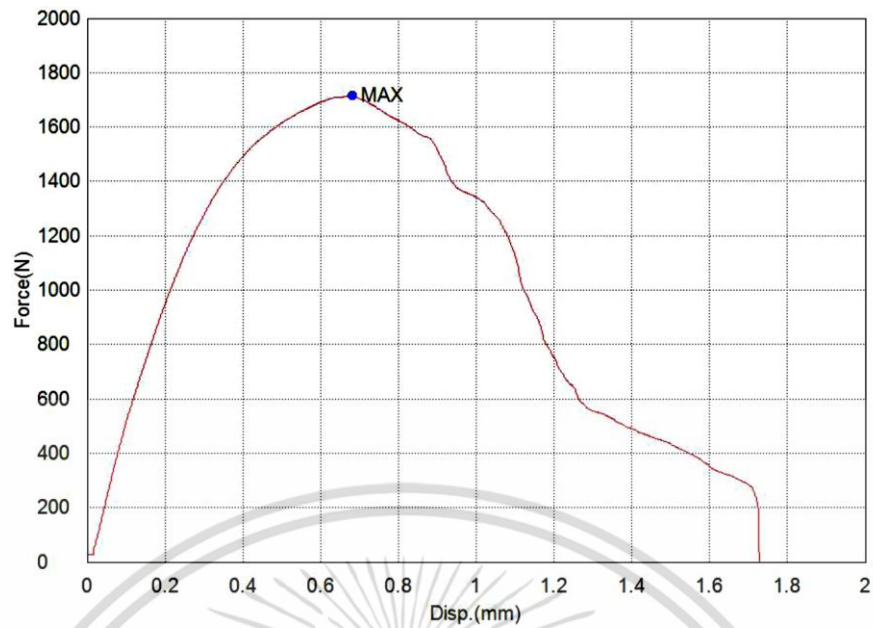


รูปที่ ข.7 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 3 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

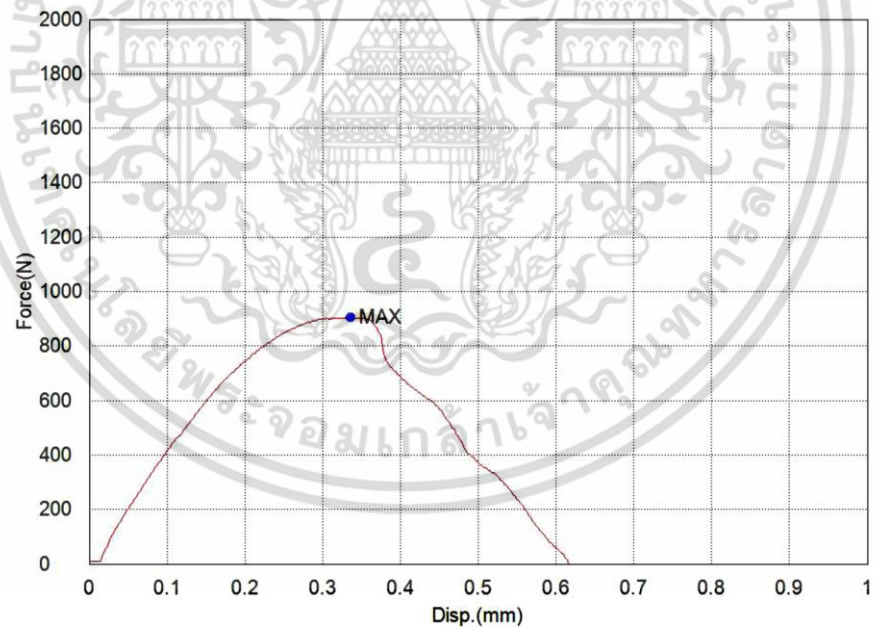


รูปที่ ข.8 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 28 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

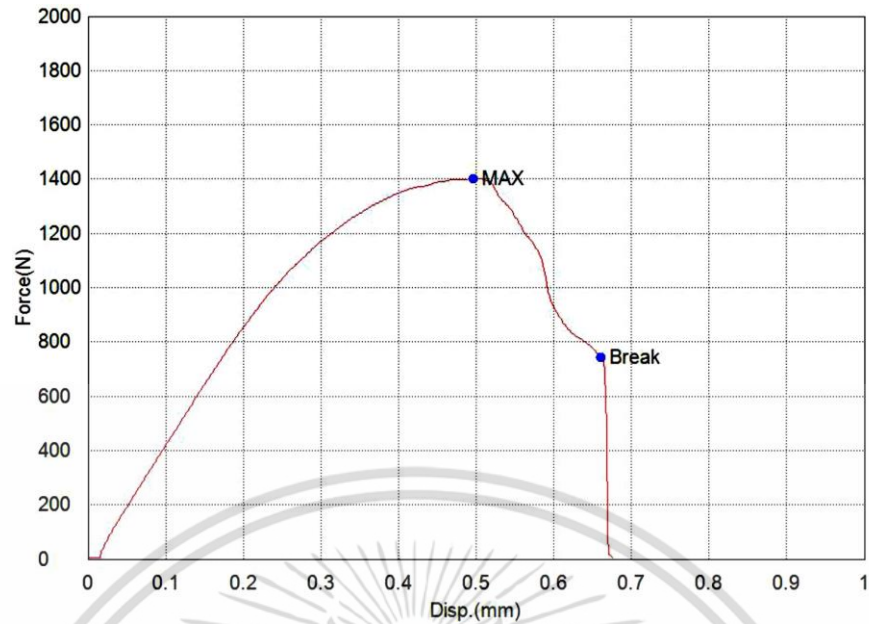


รูปที่ ข.9 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 10 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

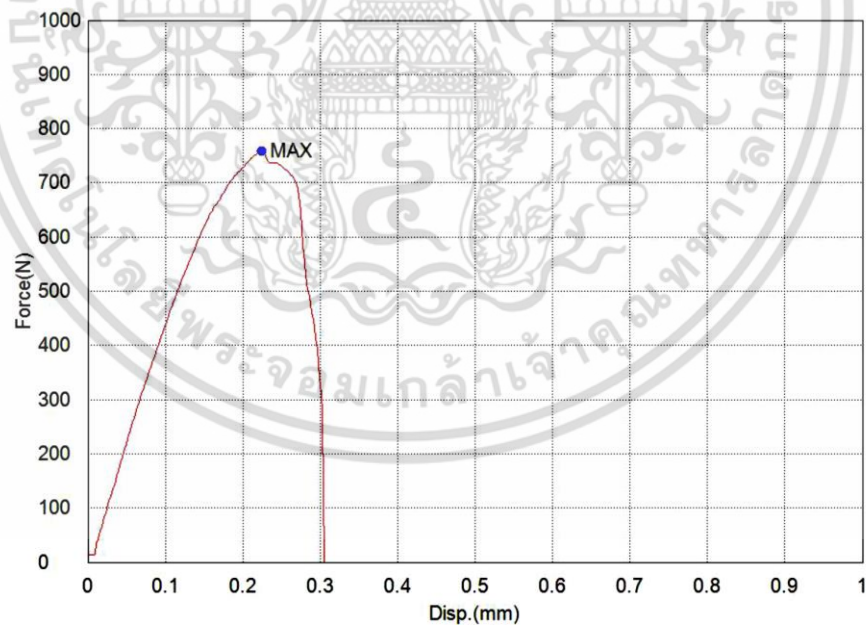


รูปที่ ข.10 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 17 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

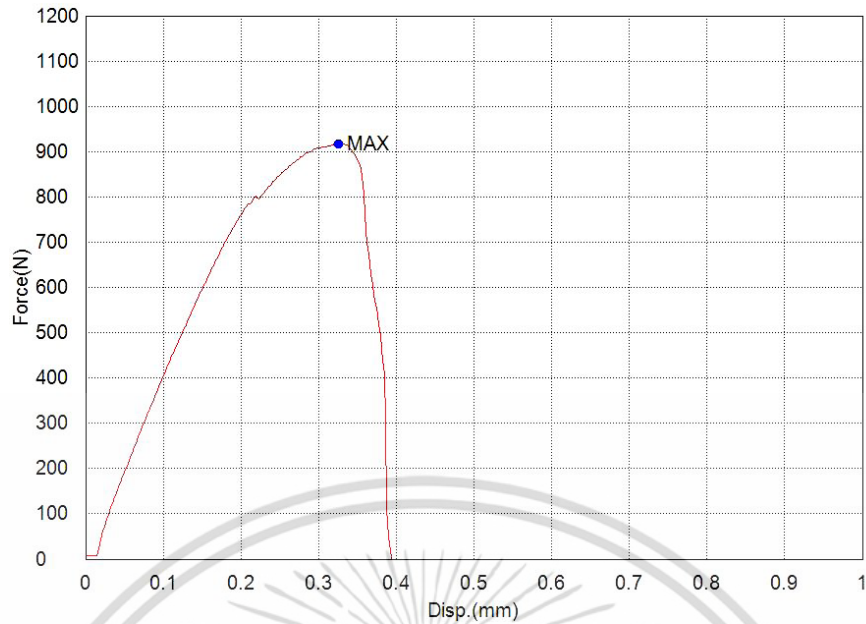


รูปที่ ข.11 ผลทดสอบความแข็งแรงเหนือนชิ้นงานทดสอบที่ 24 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

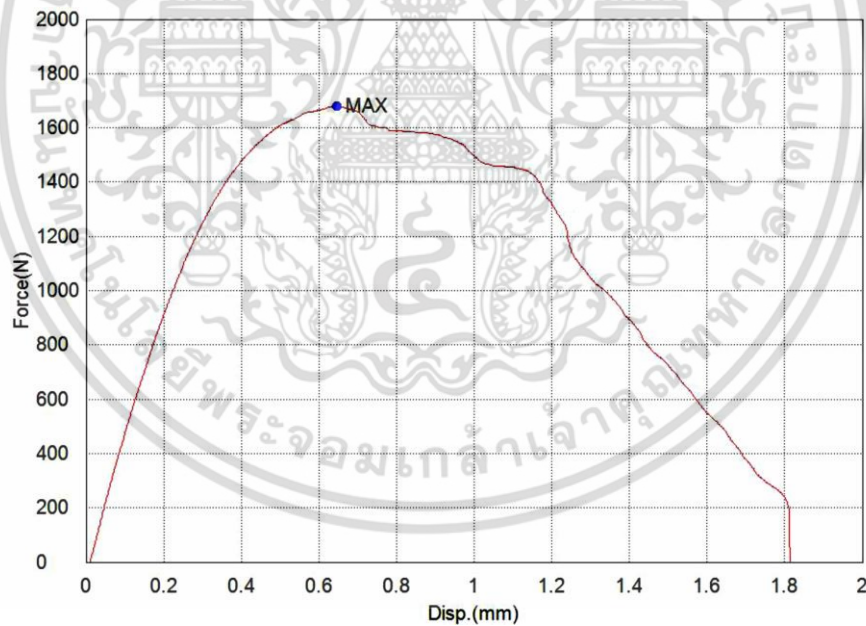


รูปที่ ข.12 ผลทดสอบความแข็งแรงเหนือนชิ้นงานทดสอบที่ 1 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

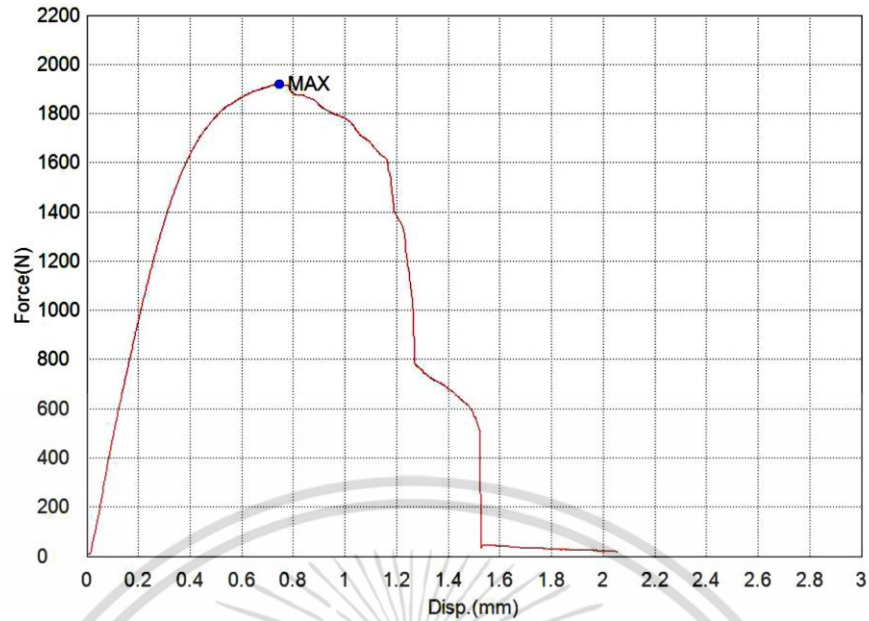


รูปที่ ข.13 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 30 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

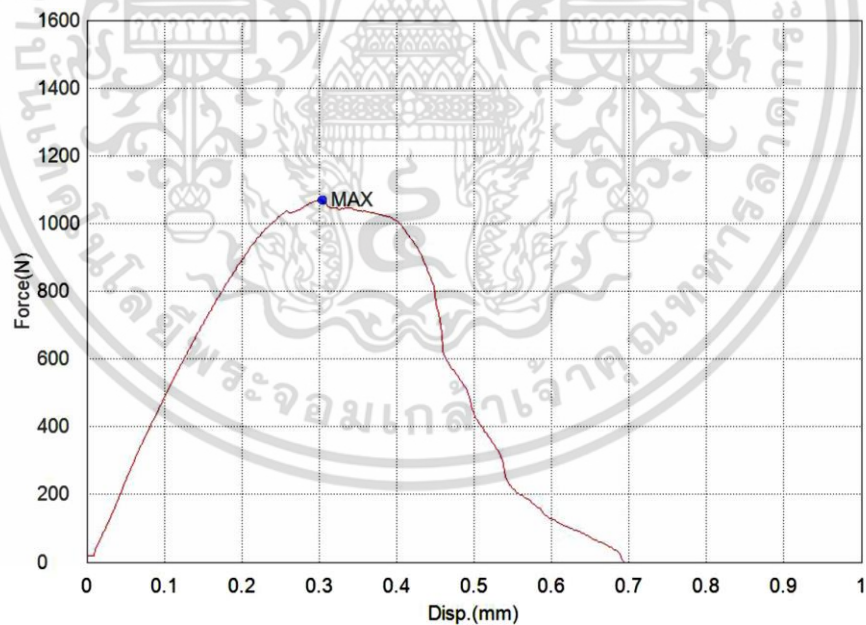


รูปที่ ข.14 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 26 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

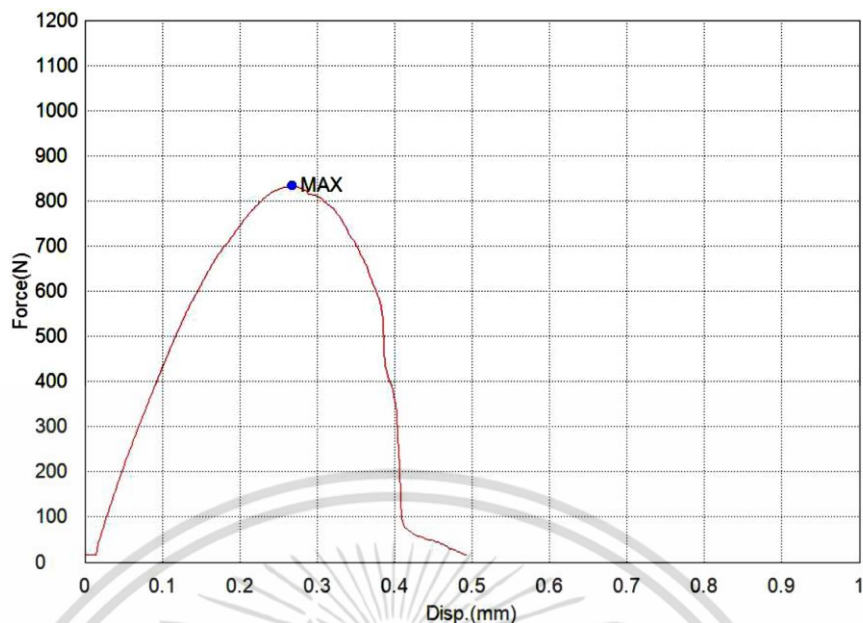


รูปที่ ข.15 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 12 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

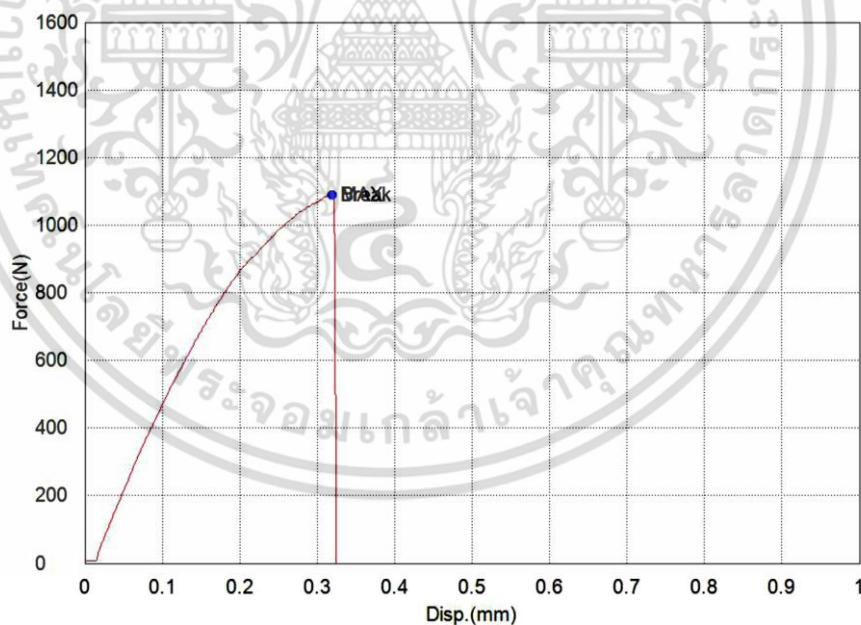


รูปที่ ข.16 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 11 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

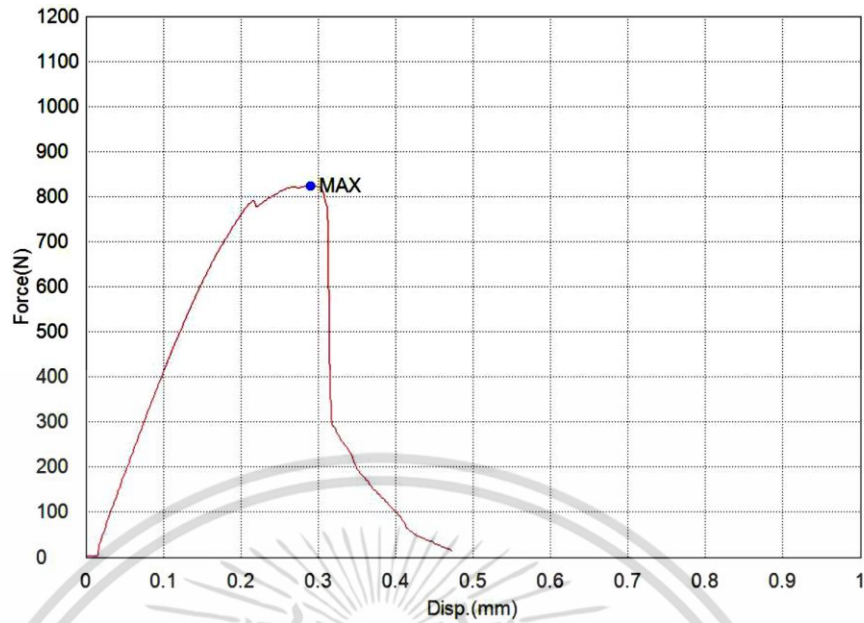


รูปที่ ข.17 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 9 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

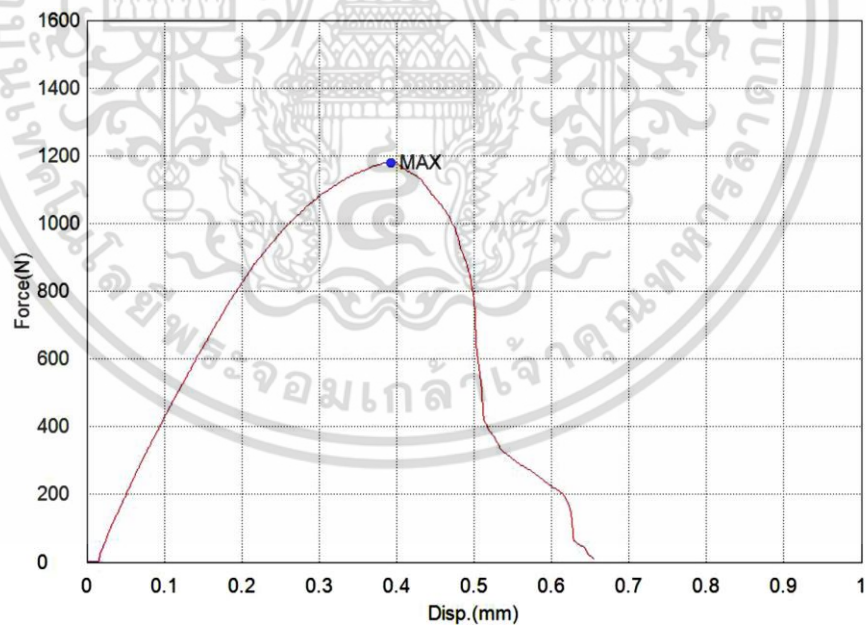


รูปที่ ข.18 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 31 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

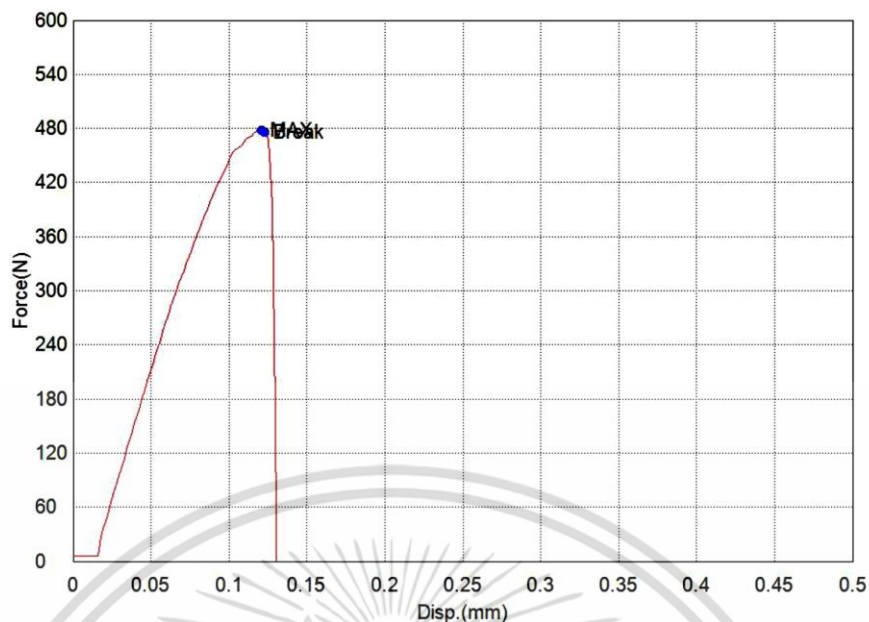


รูปที่ ข.19 ผลทดสอบความแข็งแรงฉนวนขึ้นงานทดสอบที่ 25 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นงาน 0.3 MPa

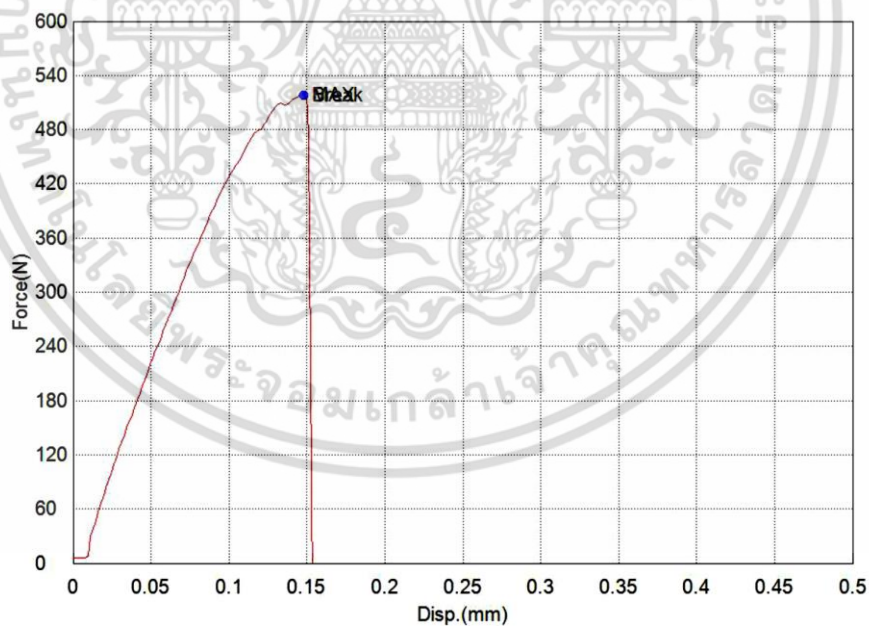


รูปที่ ข.20 ผลทดสอบความแข็งแรงฉนวนขึ้นงานทดสอบที่ 14 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

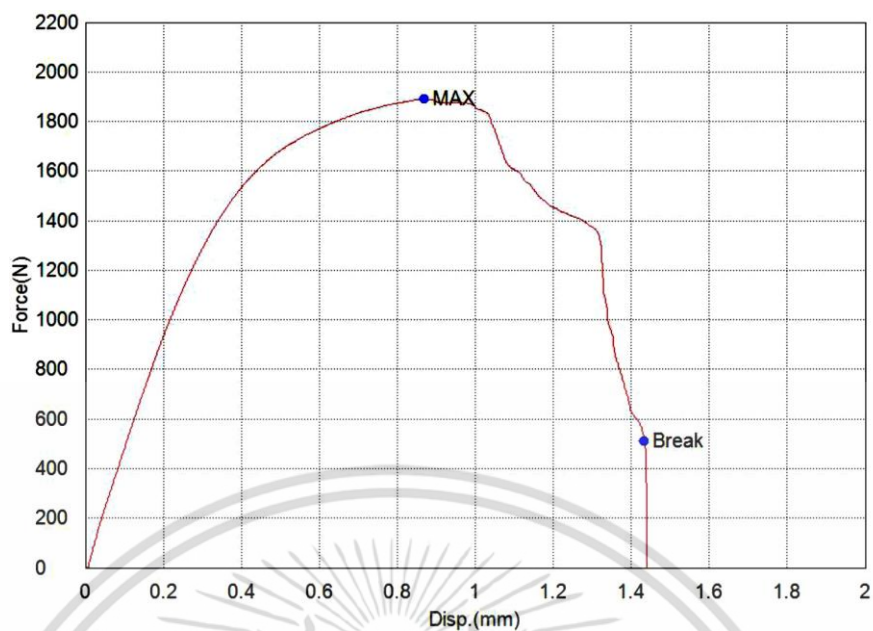


รูปที่ ข.21 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 29 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

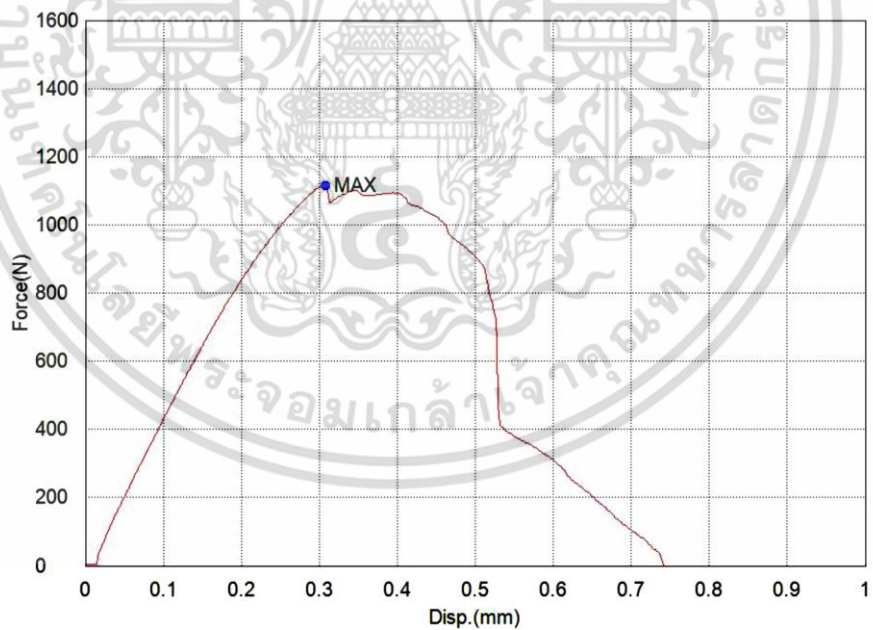


รูปที่ ข.22 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 13 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

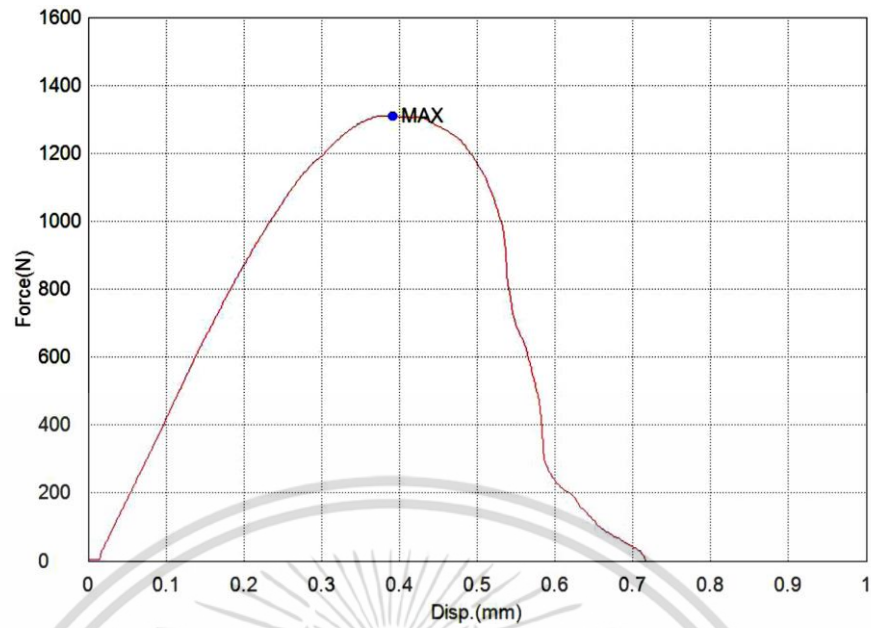


รูปที่ ข.23 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 4 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

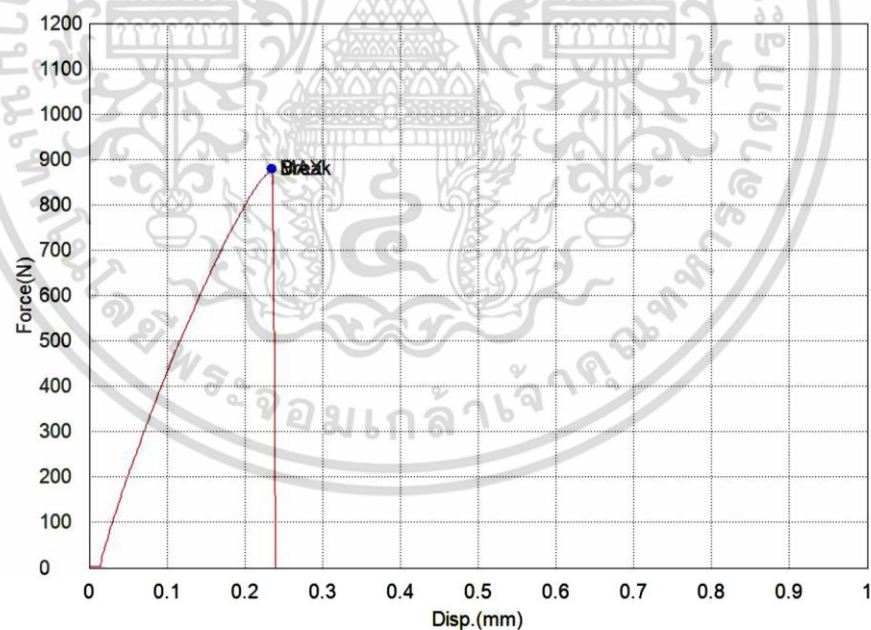


รูปที่ ข.24 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 19 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

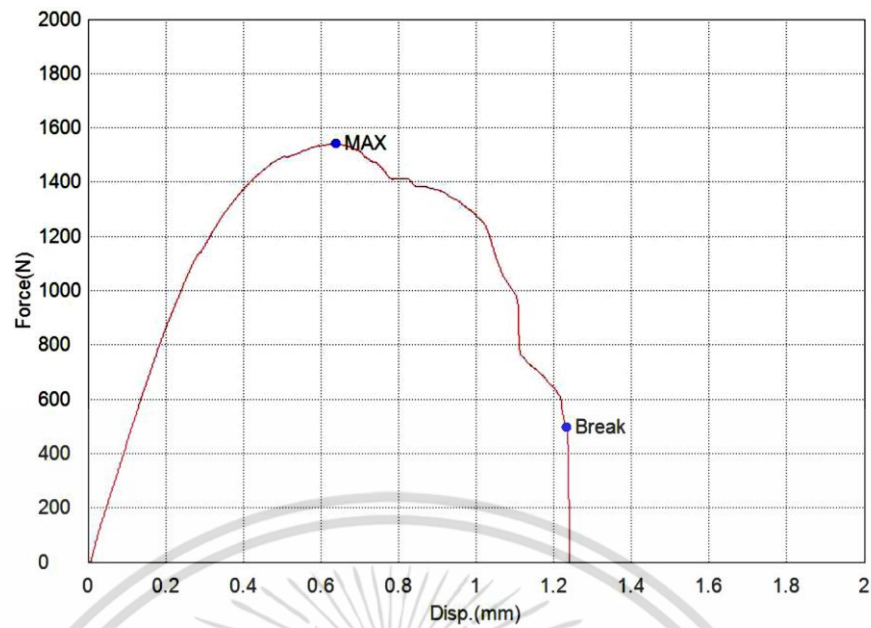


รูปที่ ข.25 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 32 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

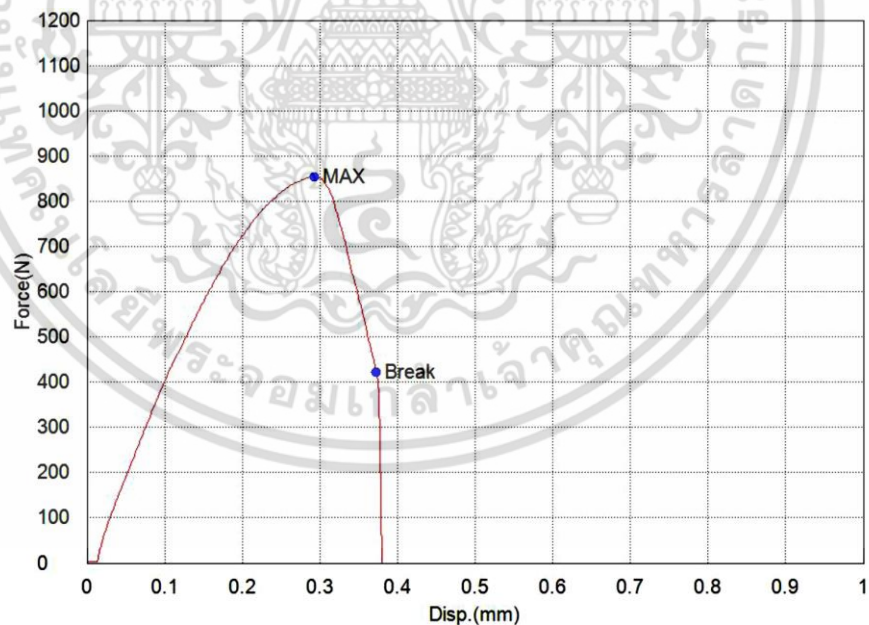


รูปที่ ข.26 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 32 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

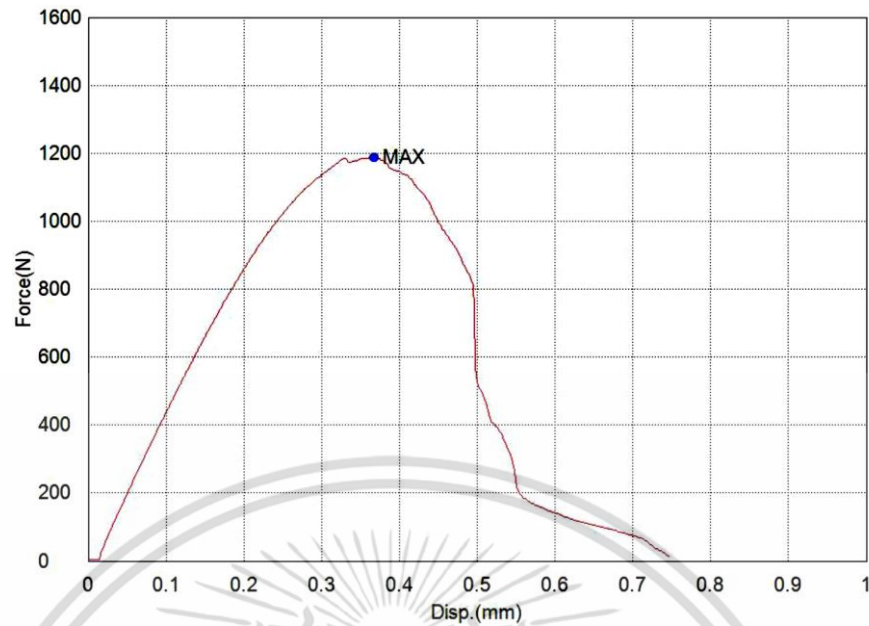


รูปที่ ข.27 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 2 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

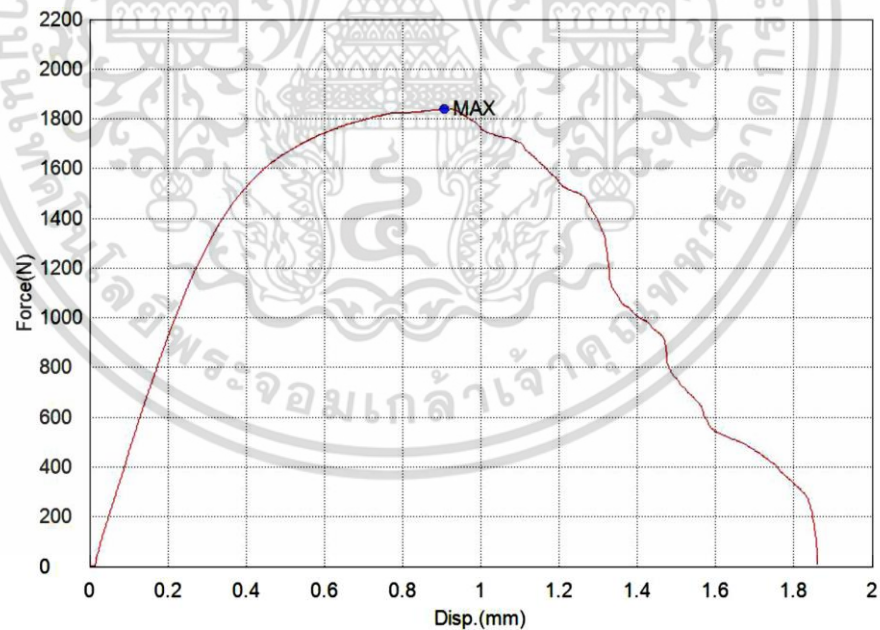


รูปที่ ข.28 ผลทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ 6 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

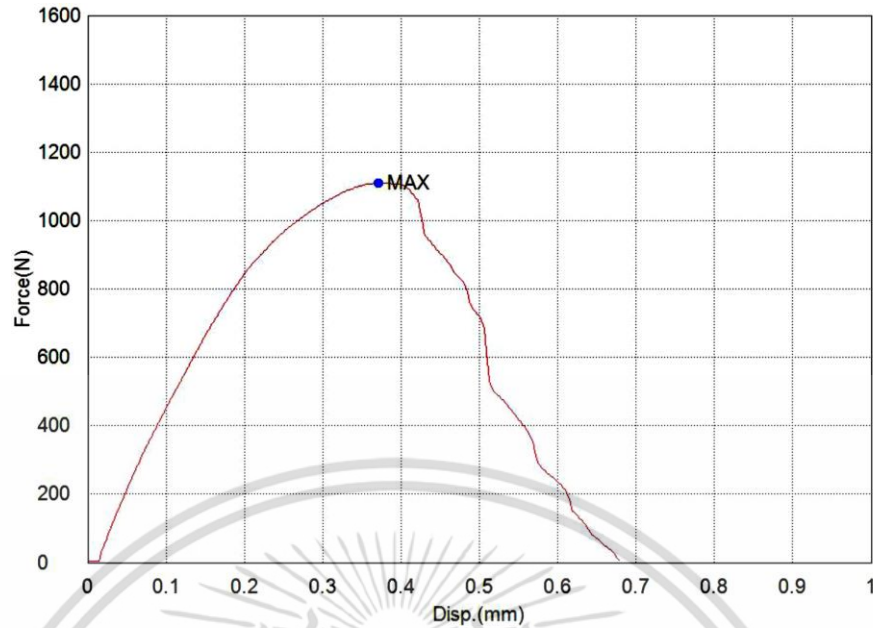


รูปที่ ข.29 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 16 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

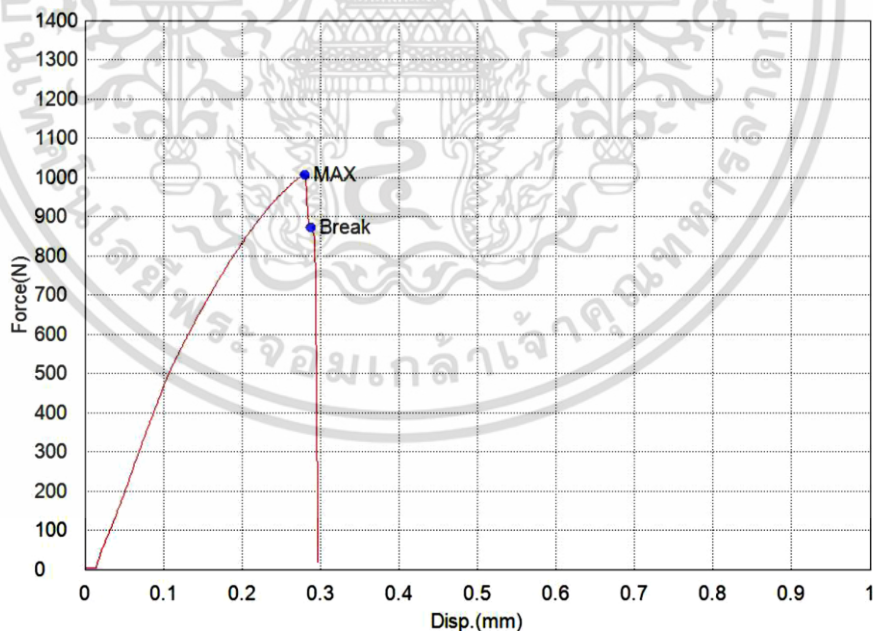


รูปที่ ข.30 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 20 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.31 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 20 กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa



รูปที่ ข.32 ผลทดสอบความแข็งแรงเฉือนชิ้นงานทดสอบที่ 7 กระแสไฟฟ้า 2000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.5 MPa

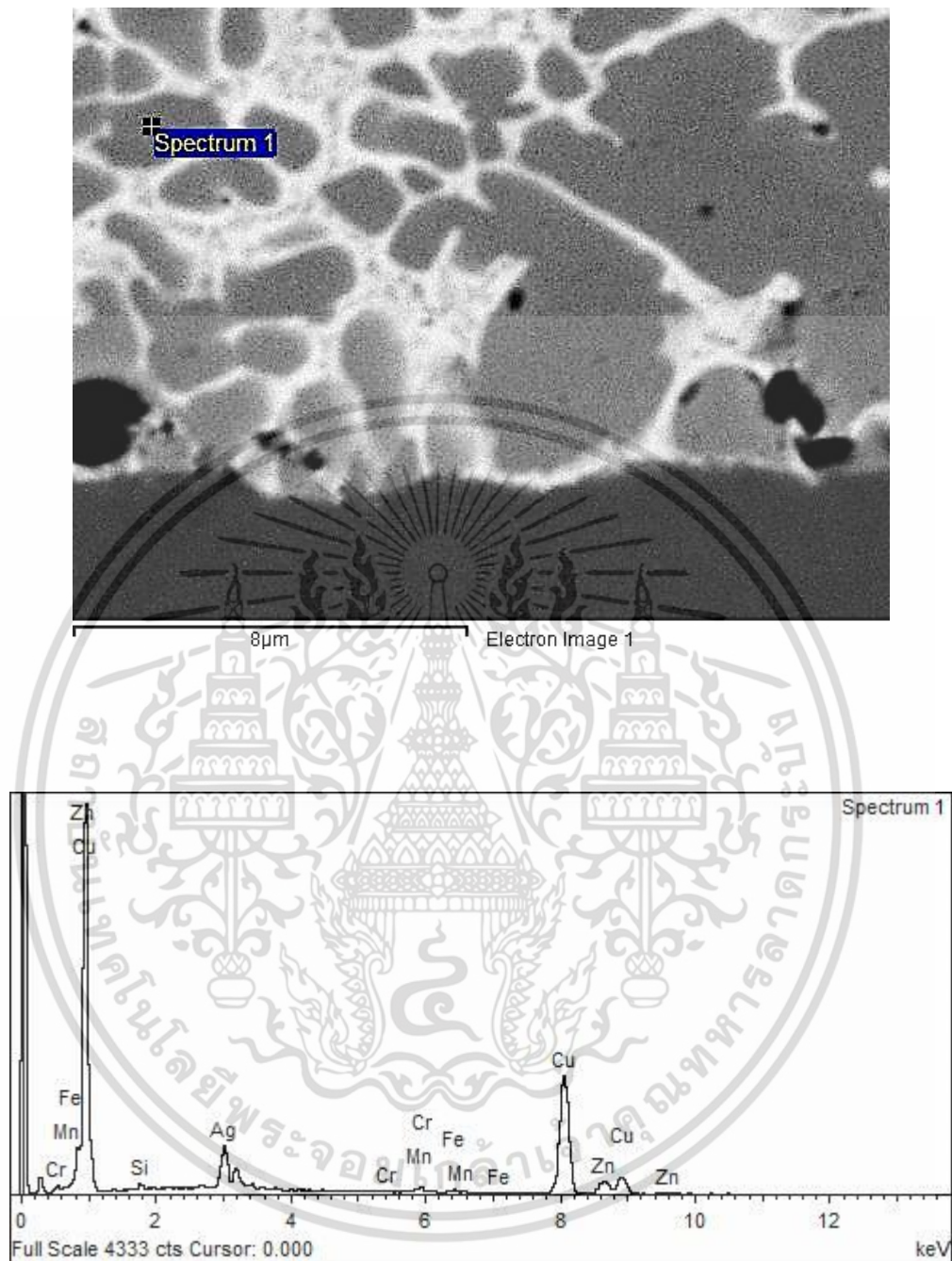
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

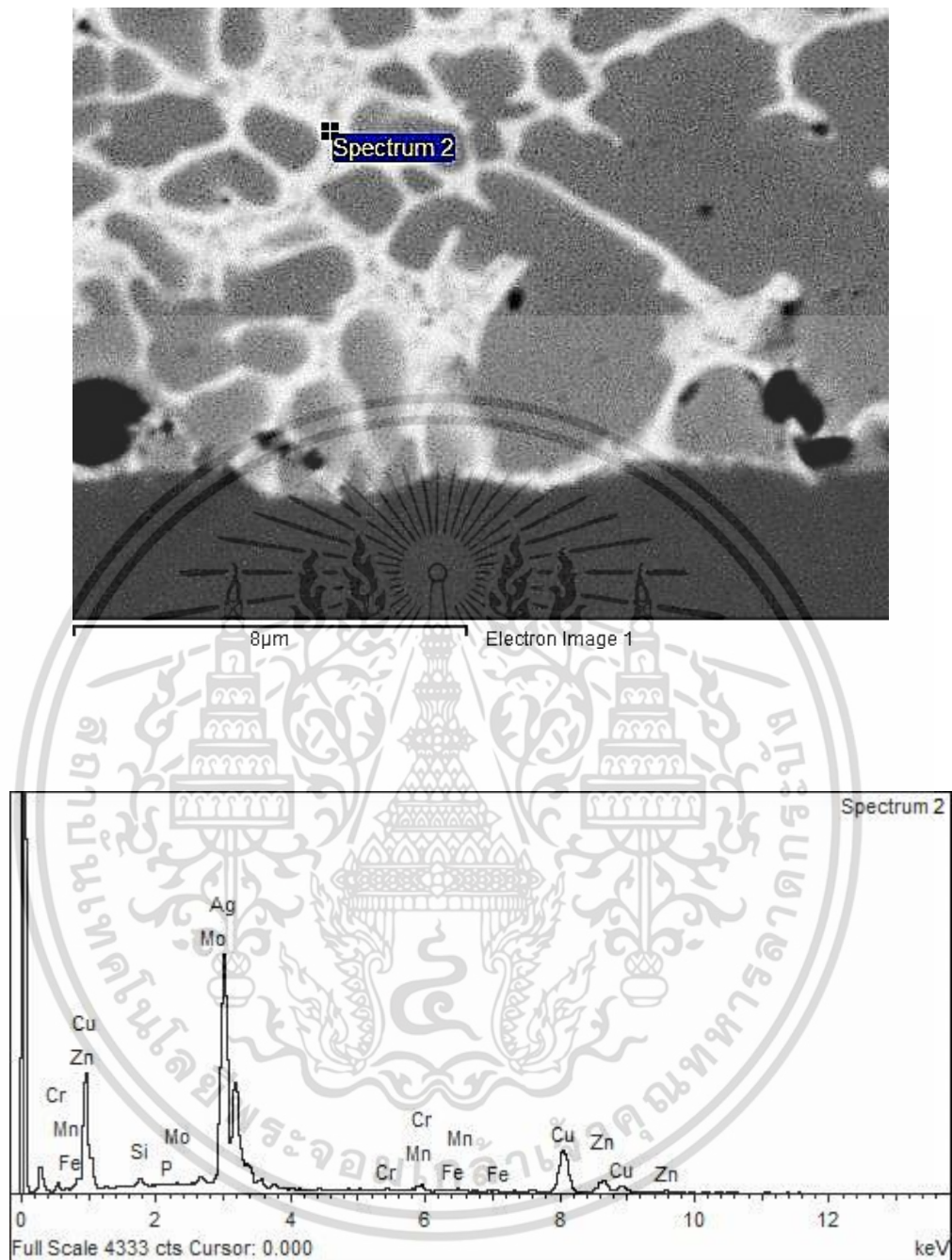
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย EDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



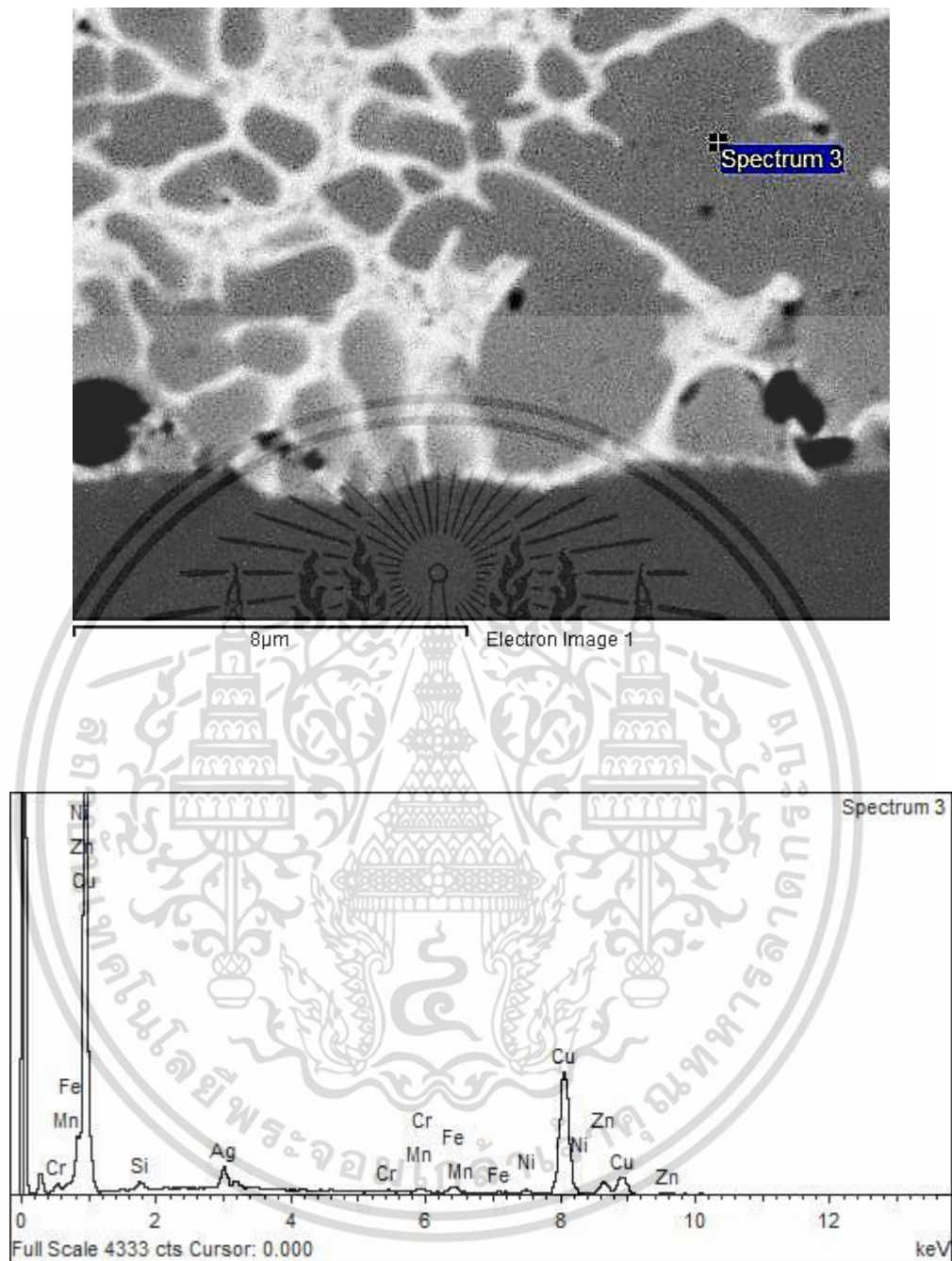
รูปที่ ค.1 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



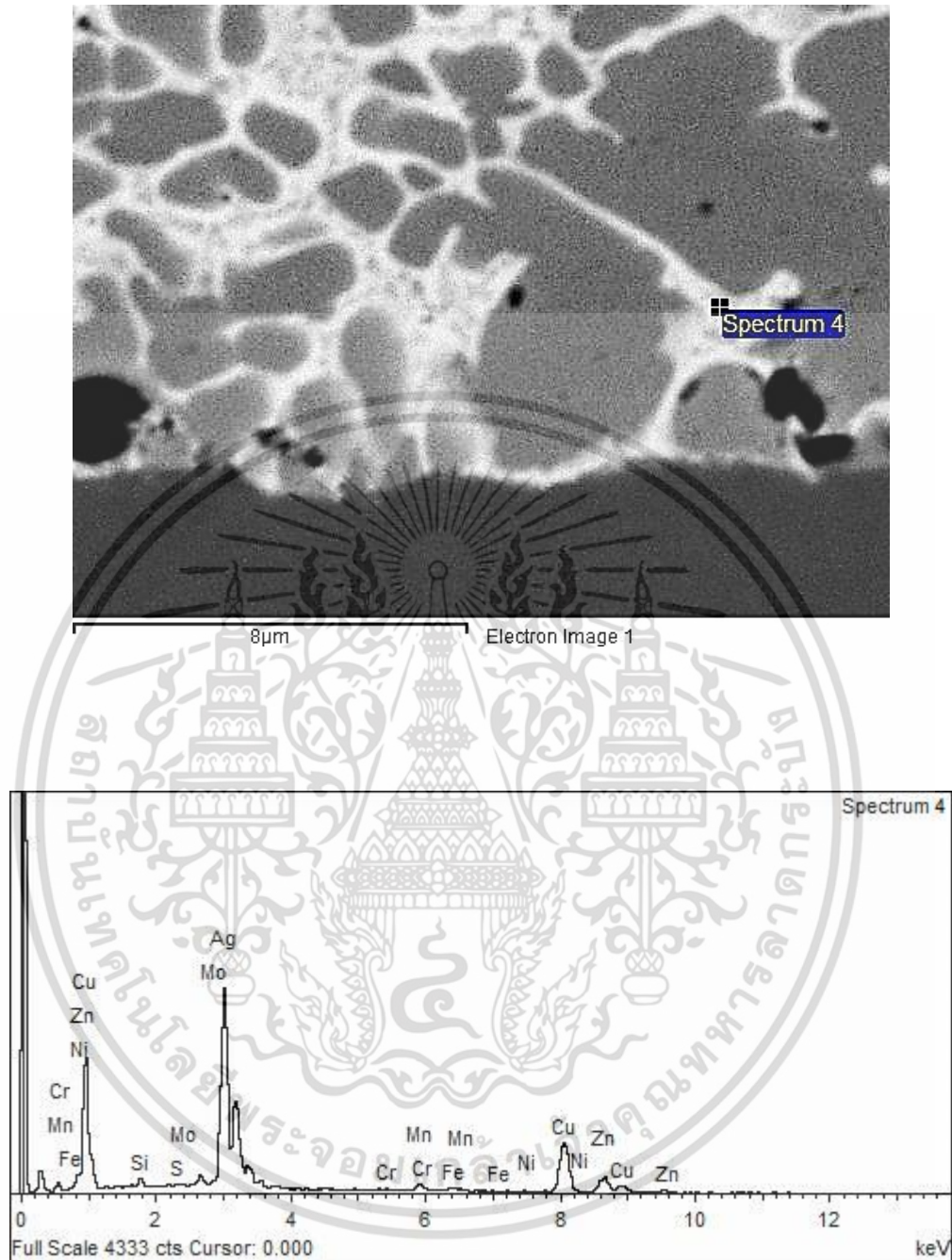
รูปที่ ค.2 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



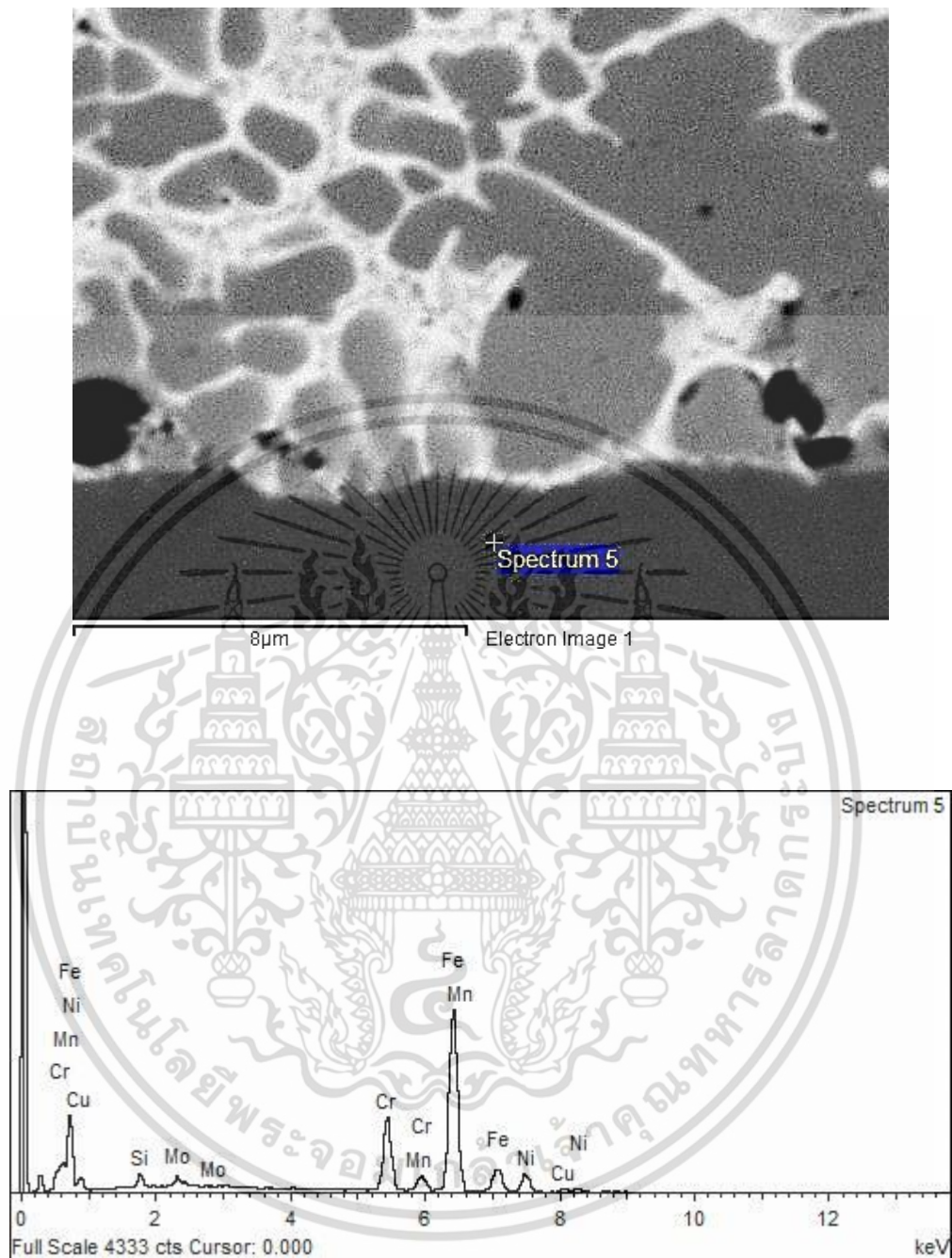
รูปที่ ค.3 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



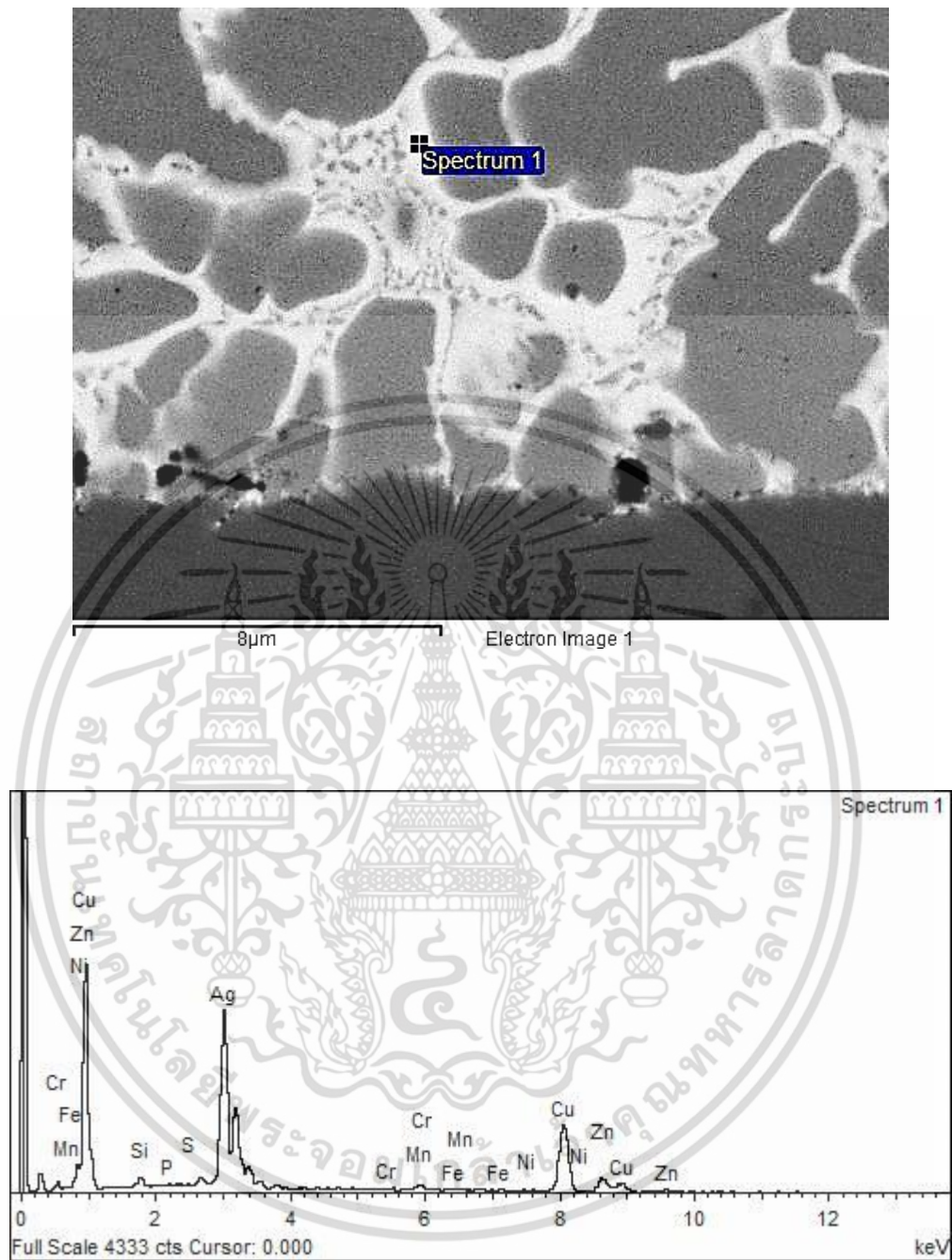
รูปที่ ค.4 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A สเปกตรัมที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



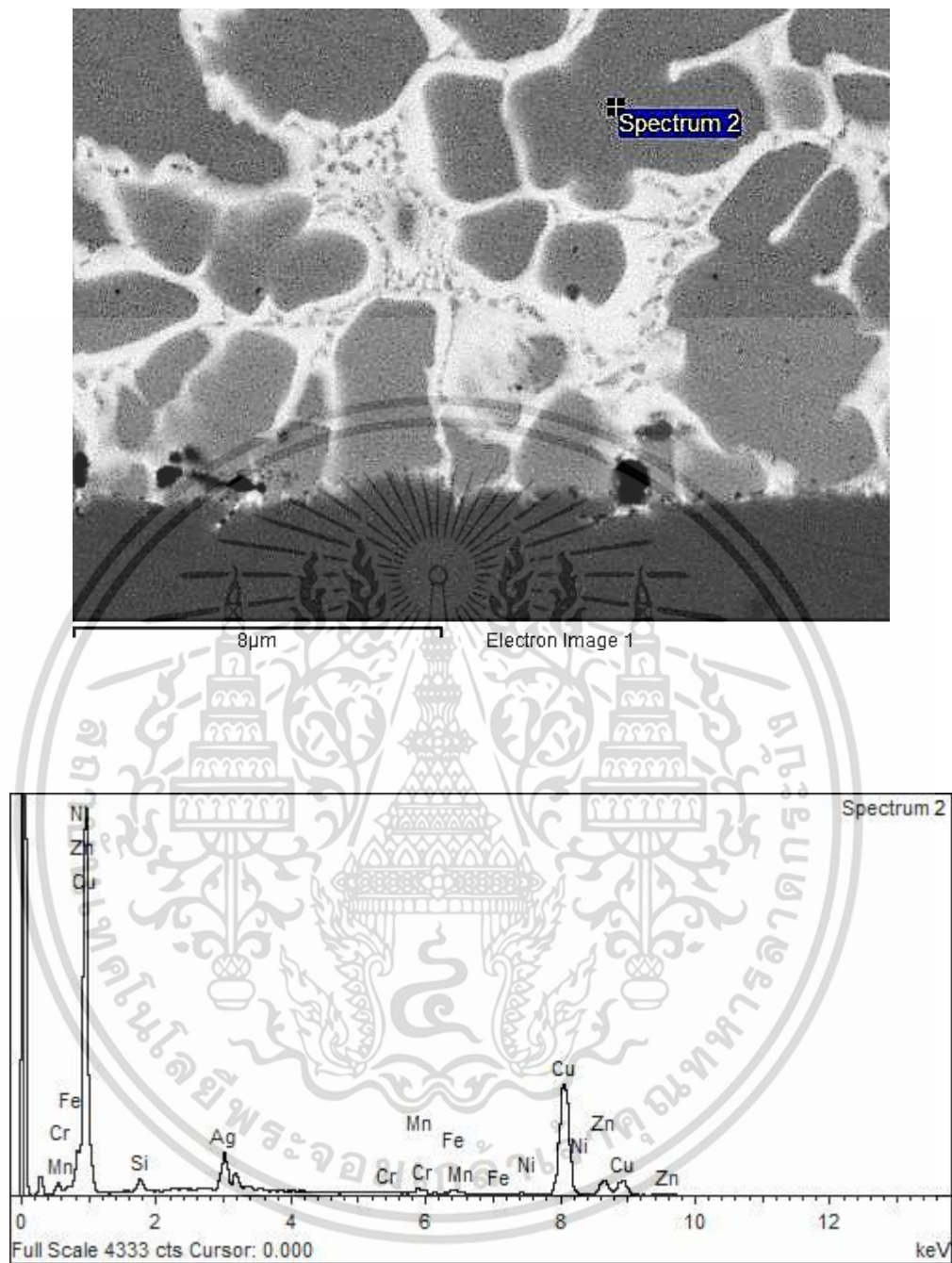
รูปที่ ค.5 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2000 A สเปกตรัมที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



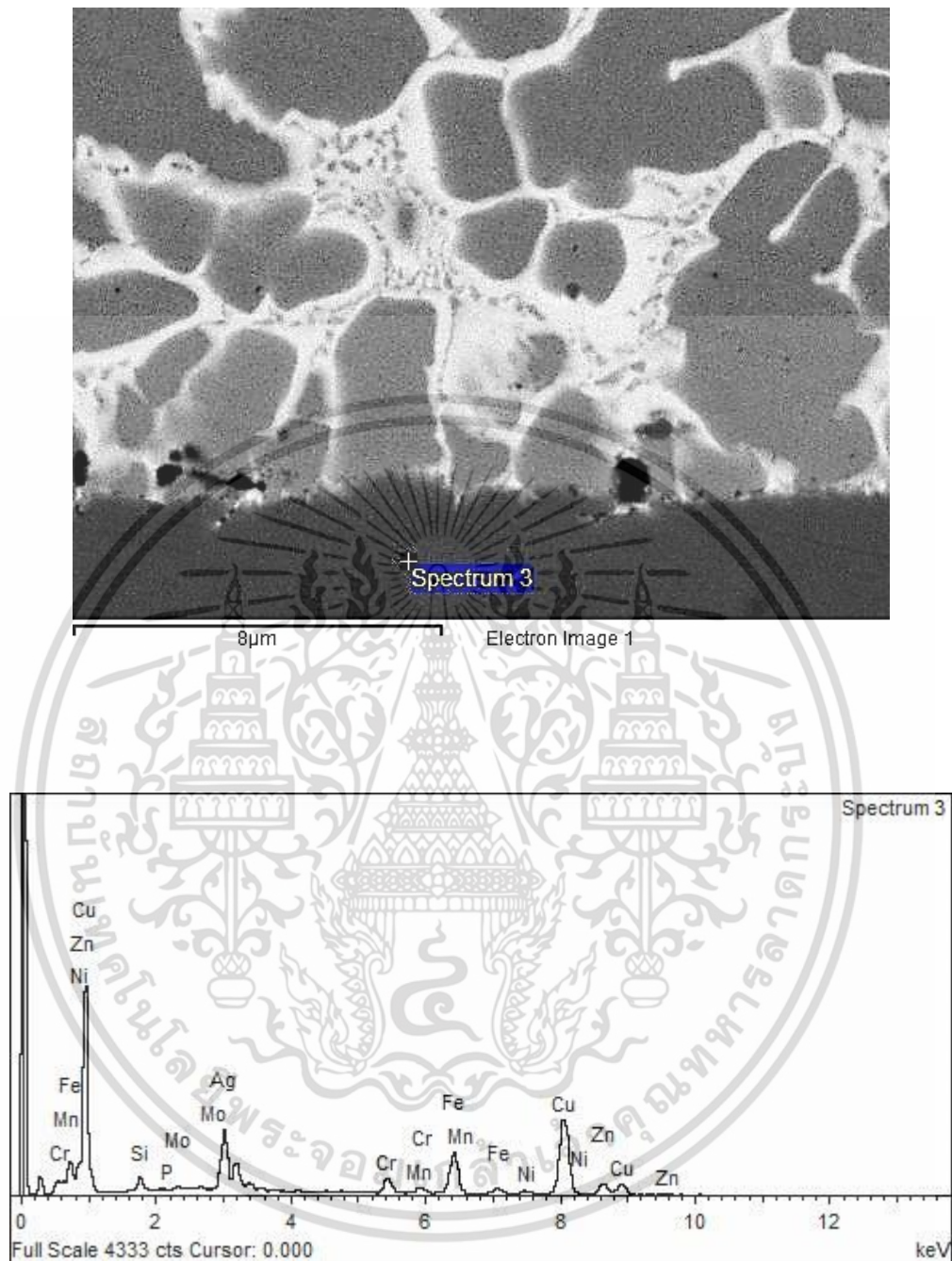
รูปที่ ค.6 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2500 A สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



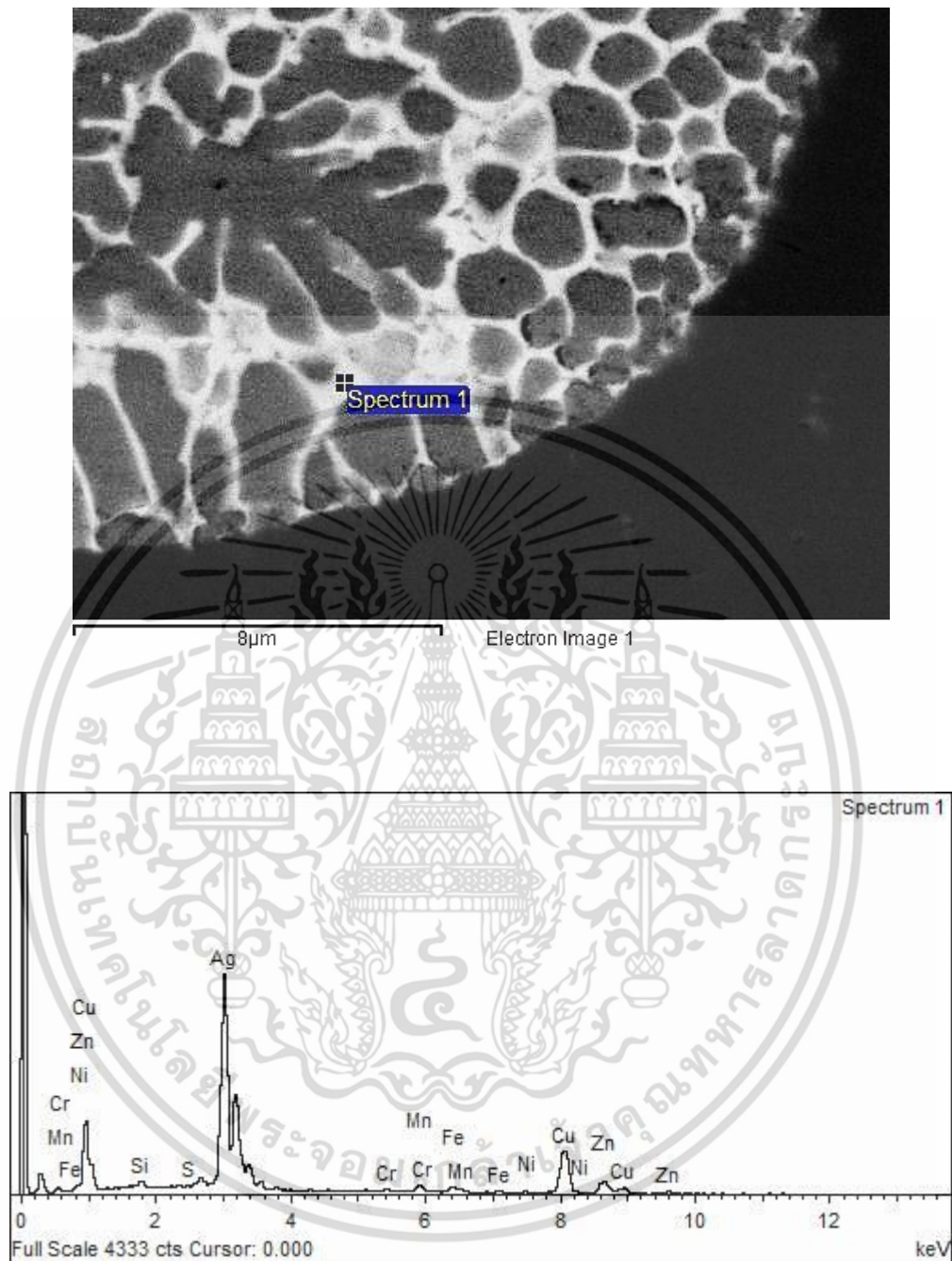
รูปที่ ค.7 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2500 A สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



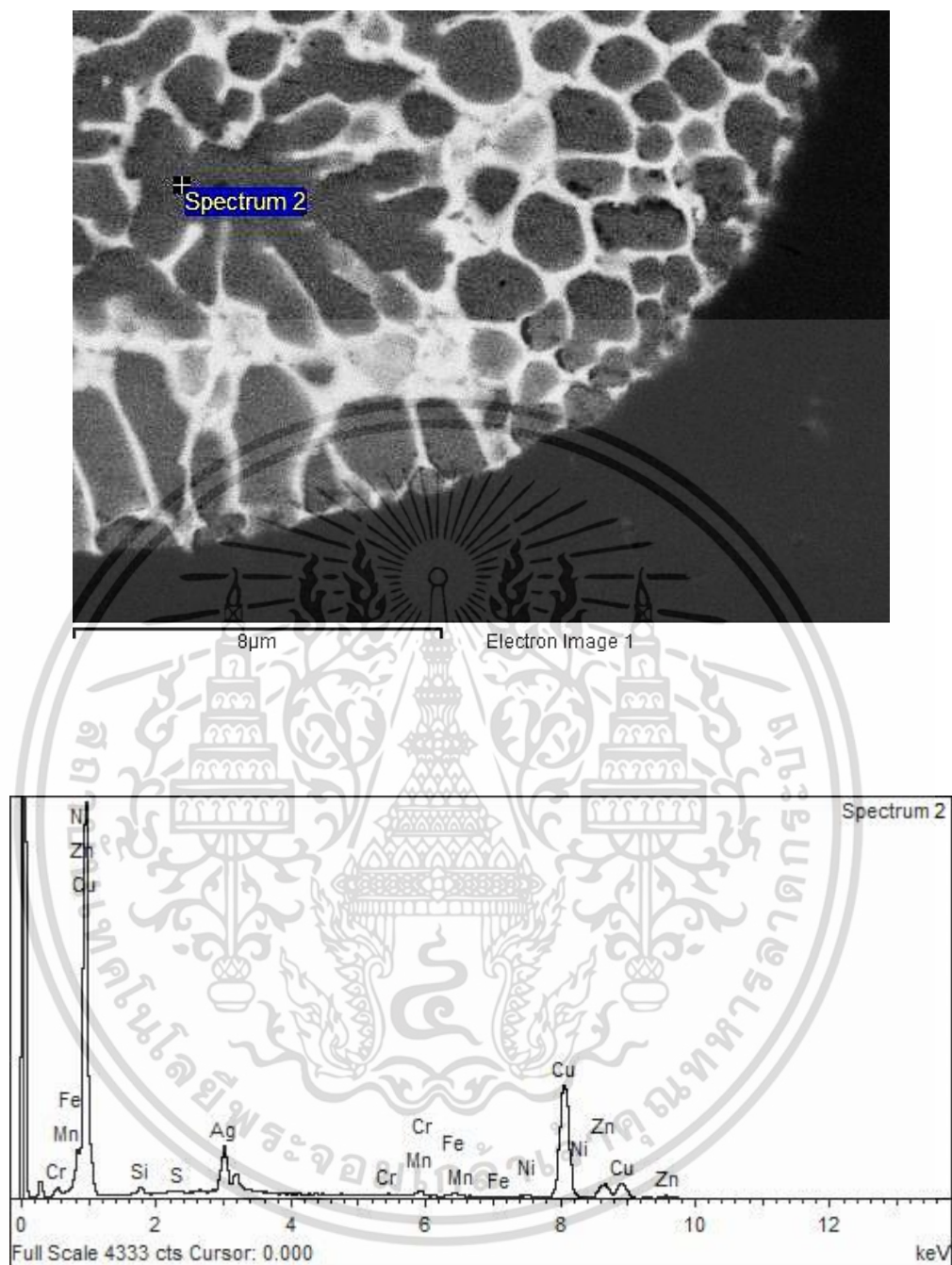
รูปที่ ๘.๘ ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2500 A สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



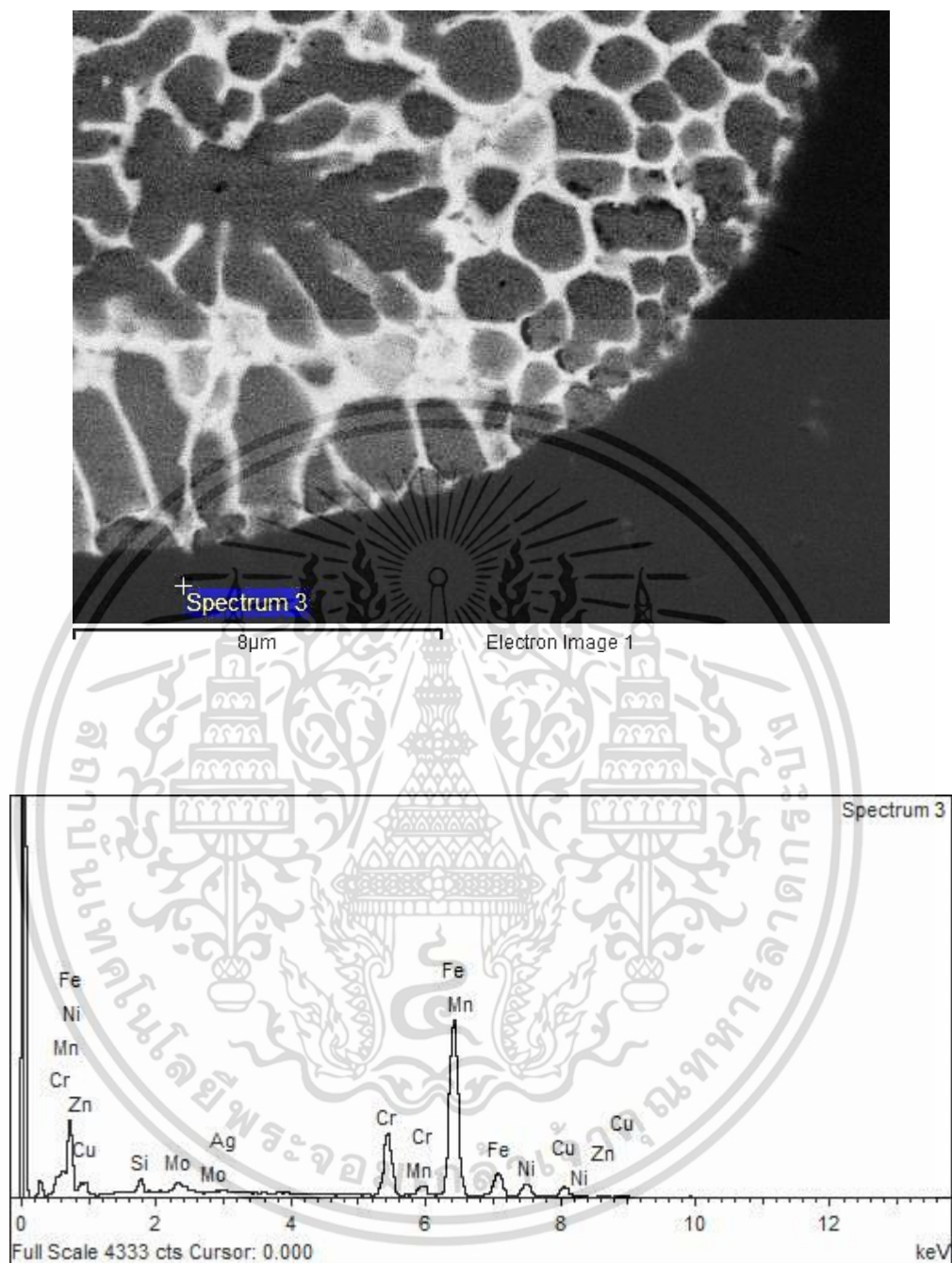
รูปที่ ค.9 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3000 A สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



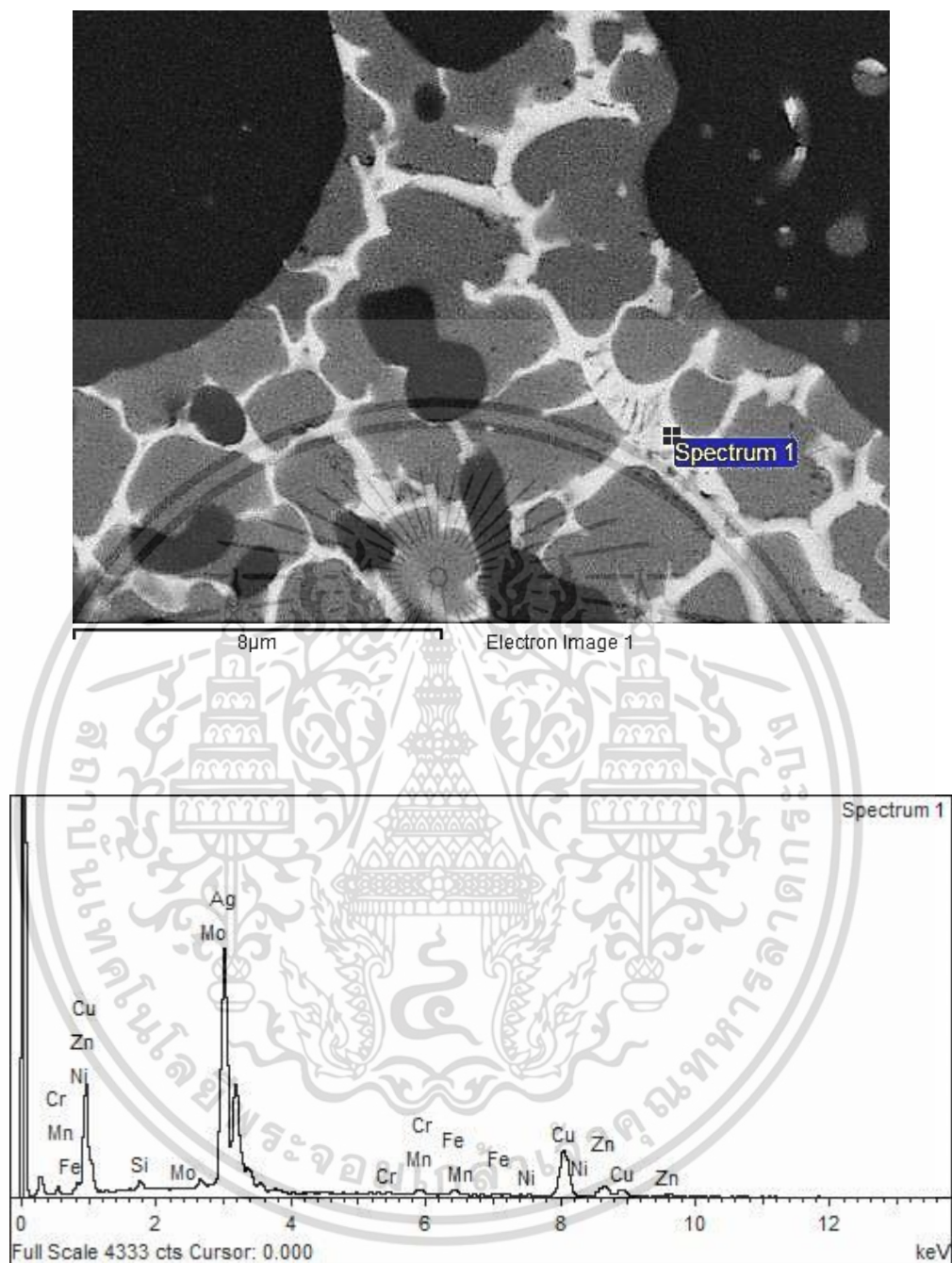
รูปที่ ค.10 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3000 A สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



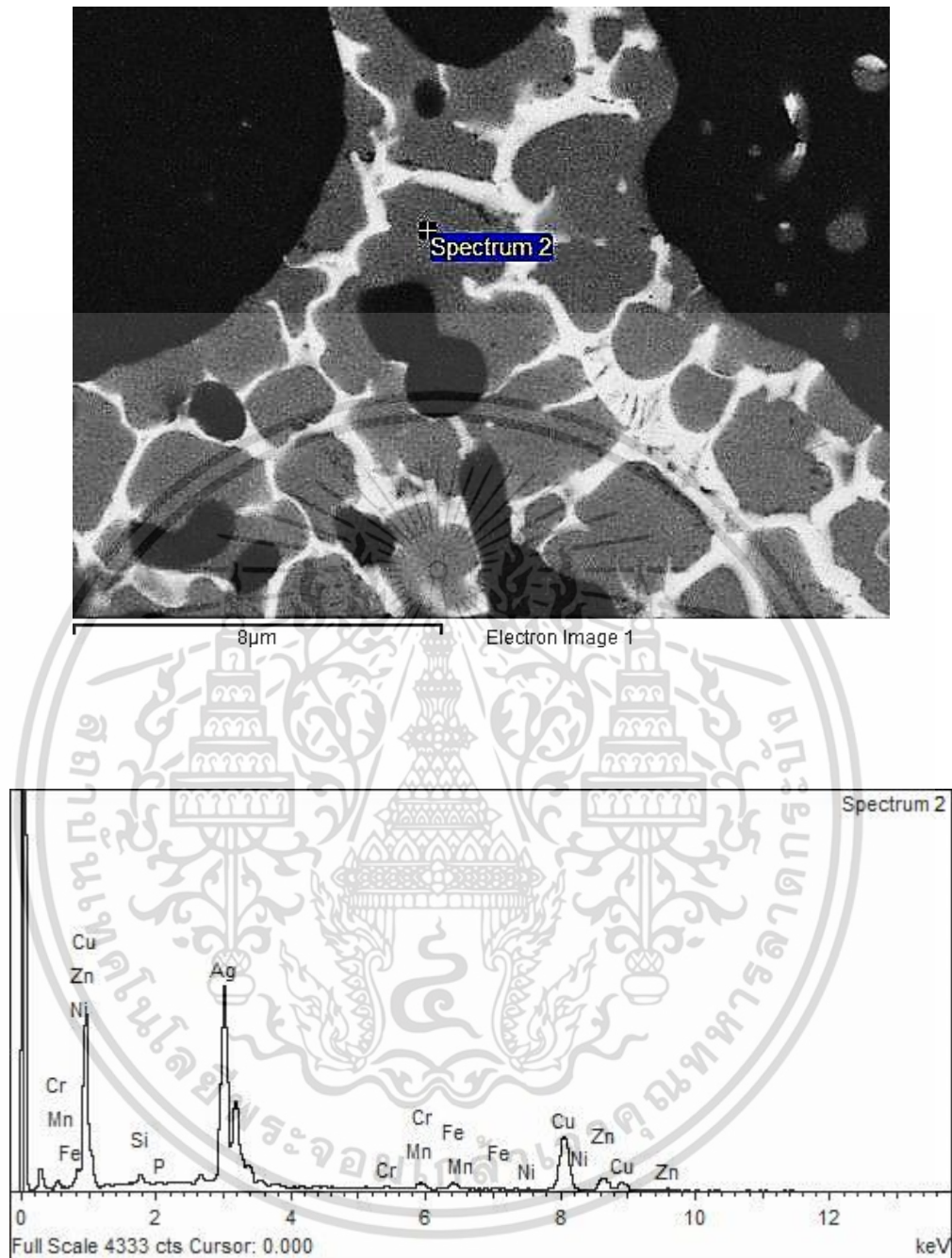
รูปที่ ค.11 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3000 A สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



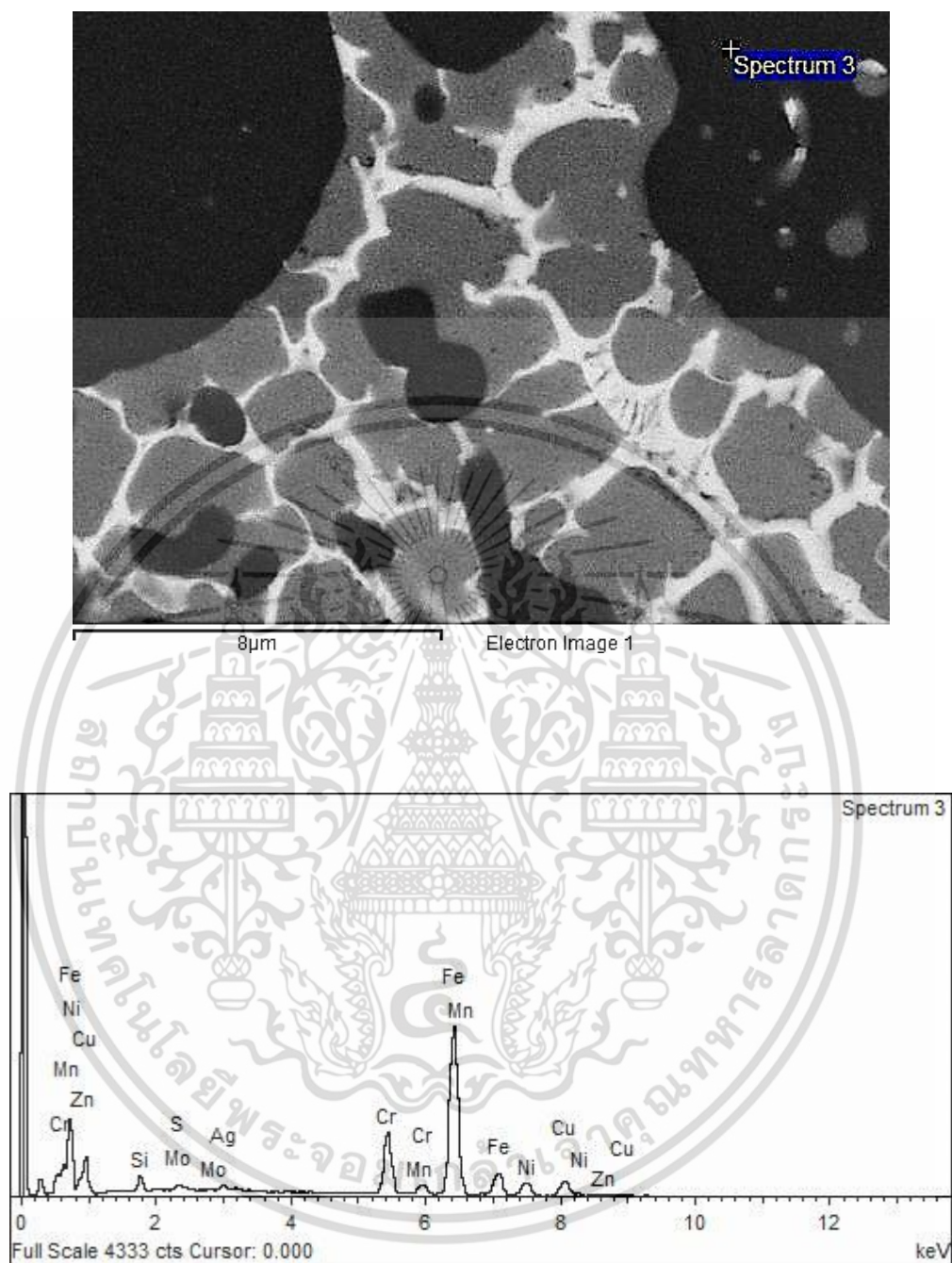
รูปที่ ค.12 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



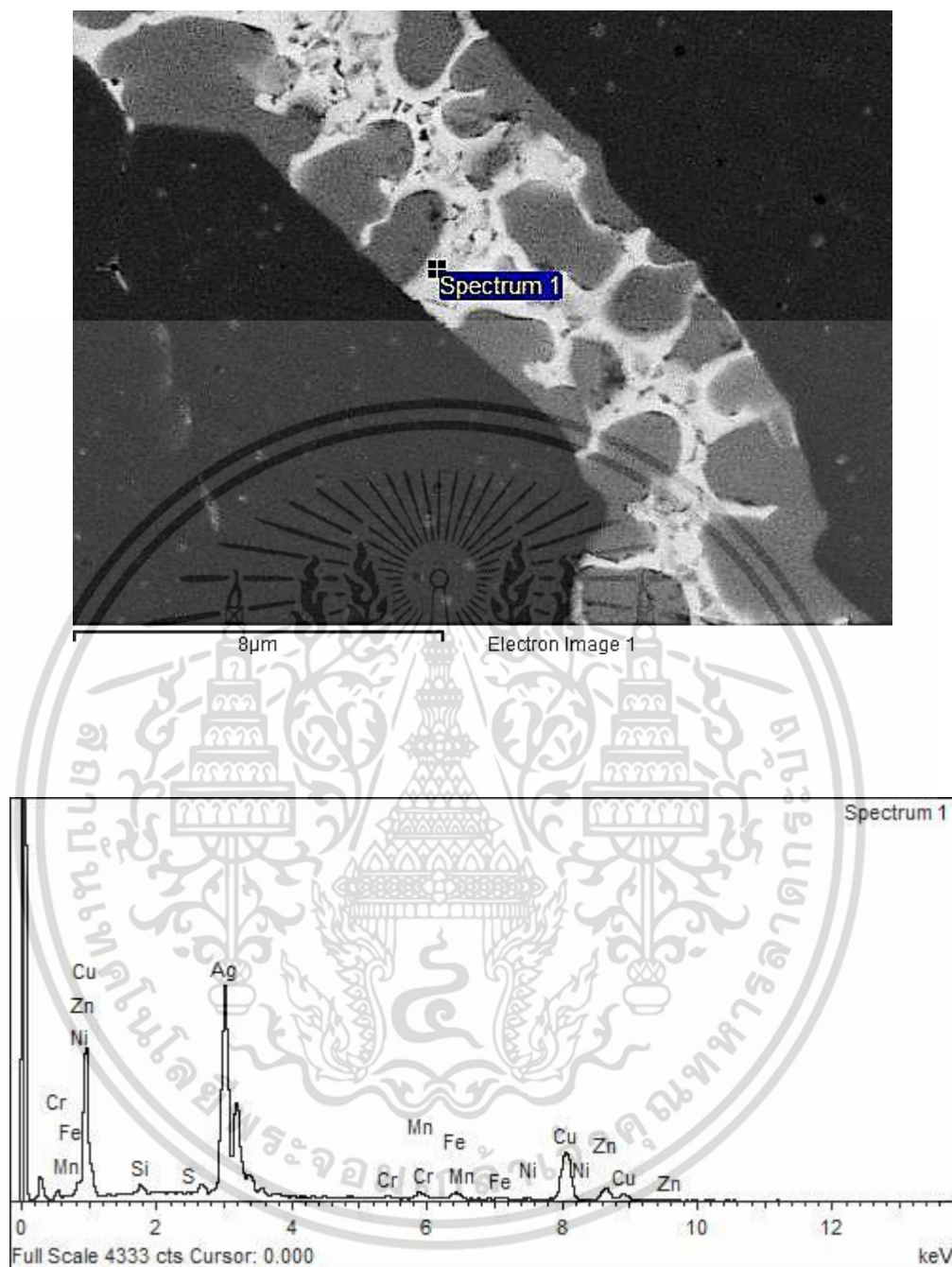
รูปที่ ค.13 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



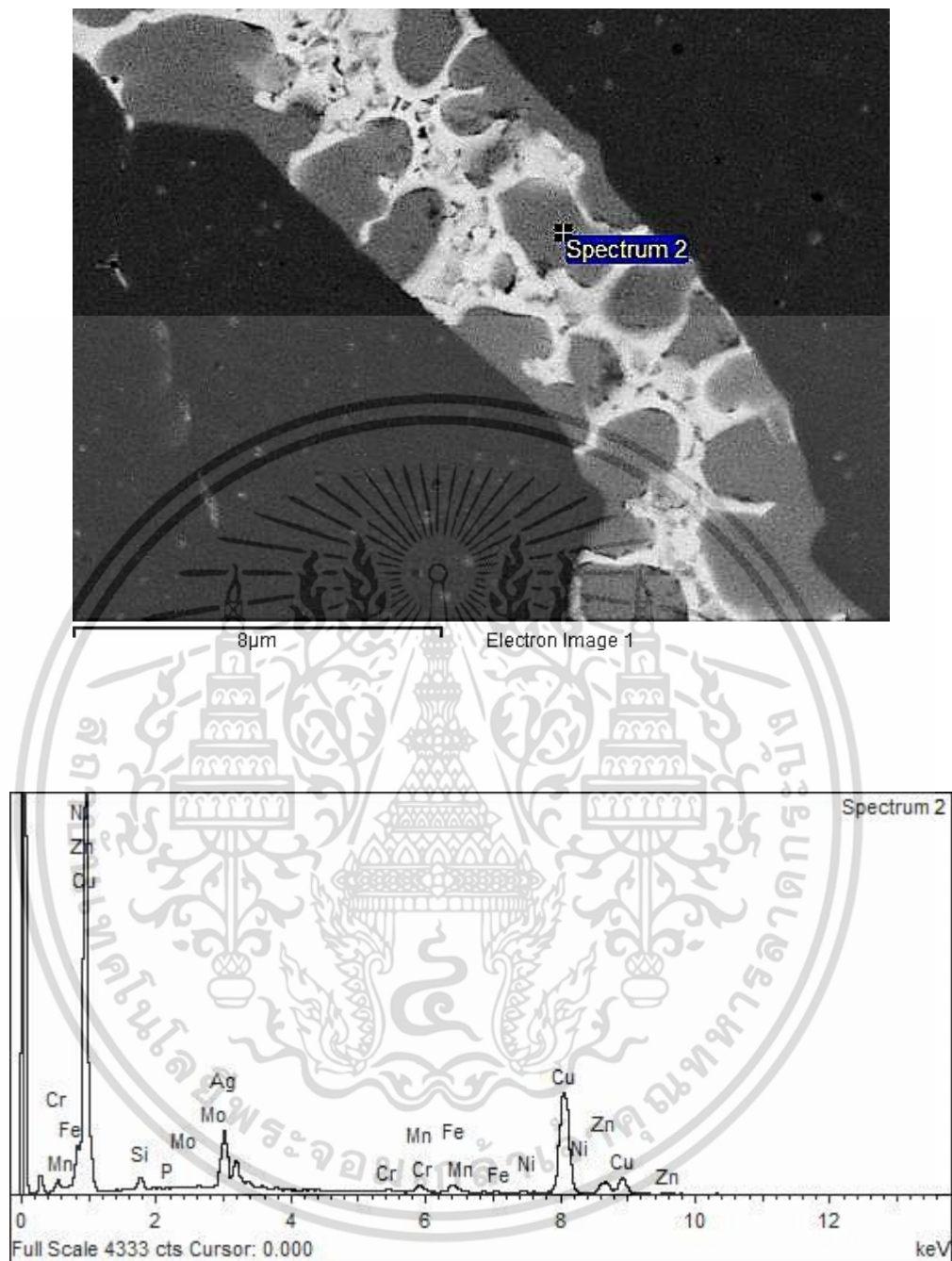
รูปที่ ค.14 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



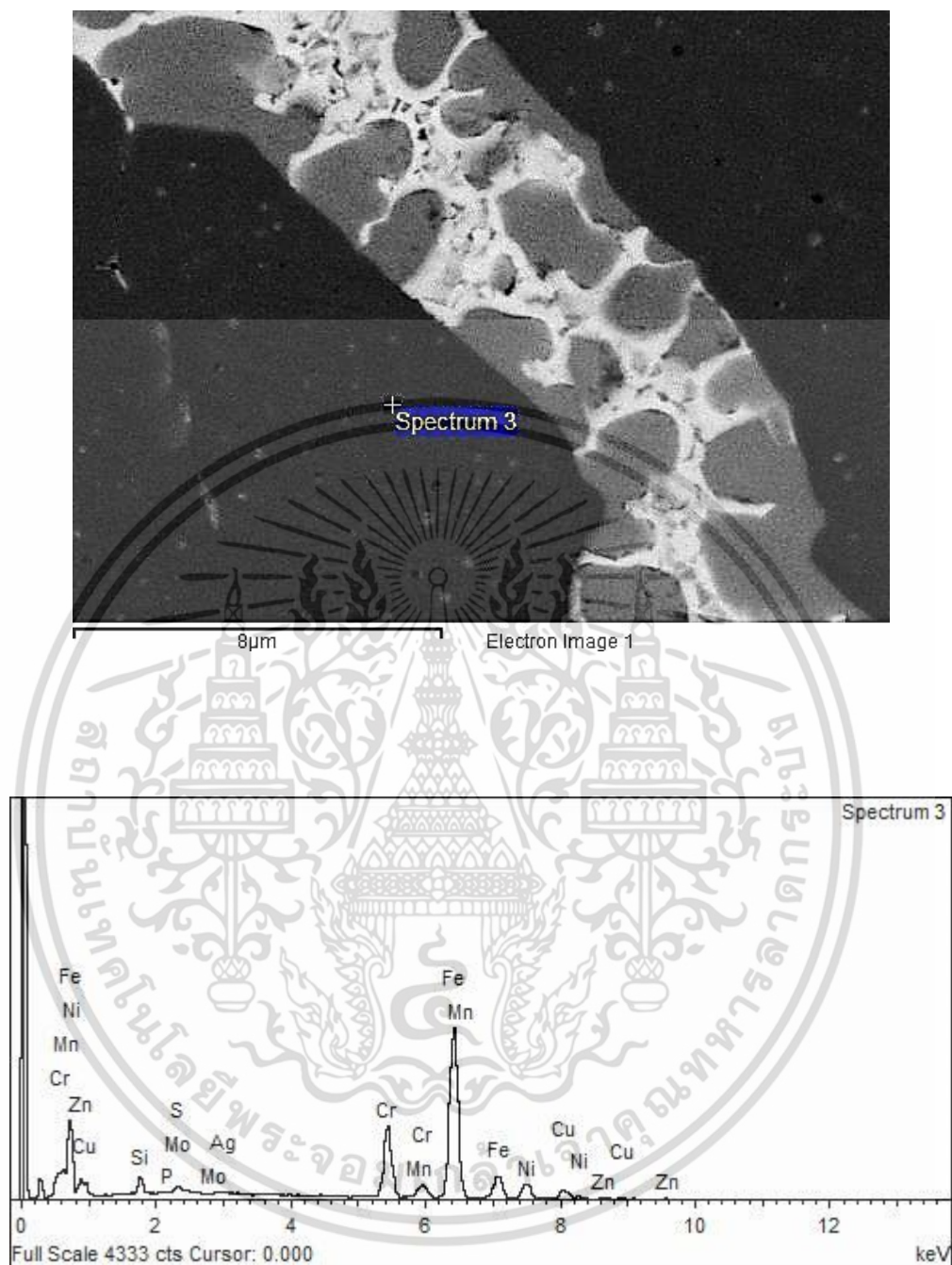
รูปที่ ค.15 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A สเปกตรัมที่ 1 บริเวณเฟส CuAg ที่เกิดระหว่างเฟส Fe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



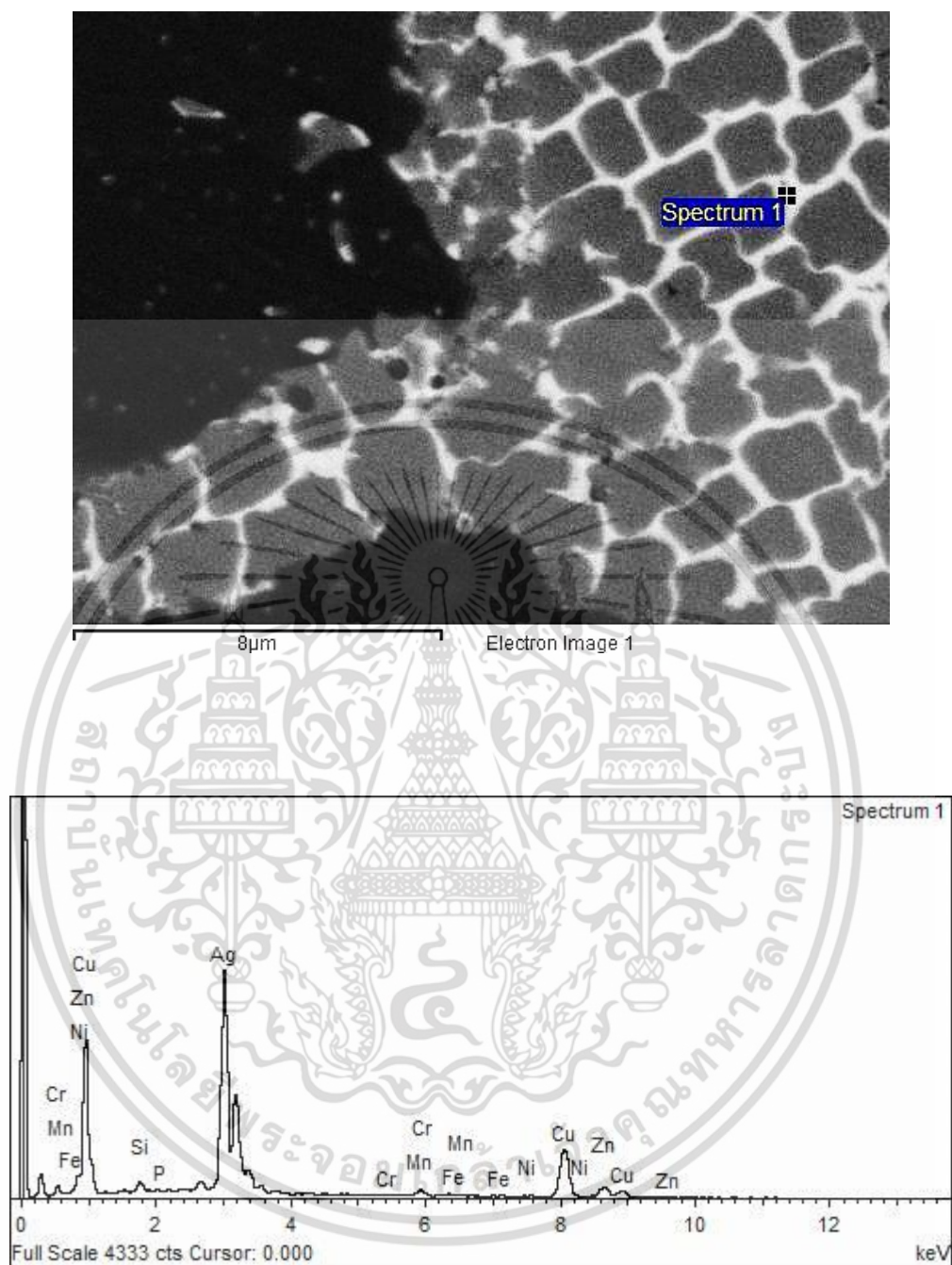
รูปที่ ค.15 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A สเปกตรัมที่ 2 บริเวณเฟส CuAg ที่เกิดระหว่างเฟส Fe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



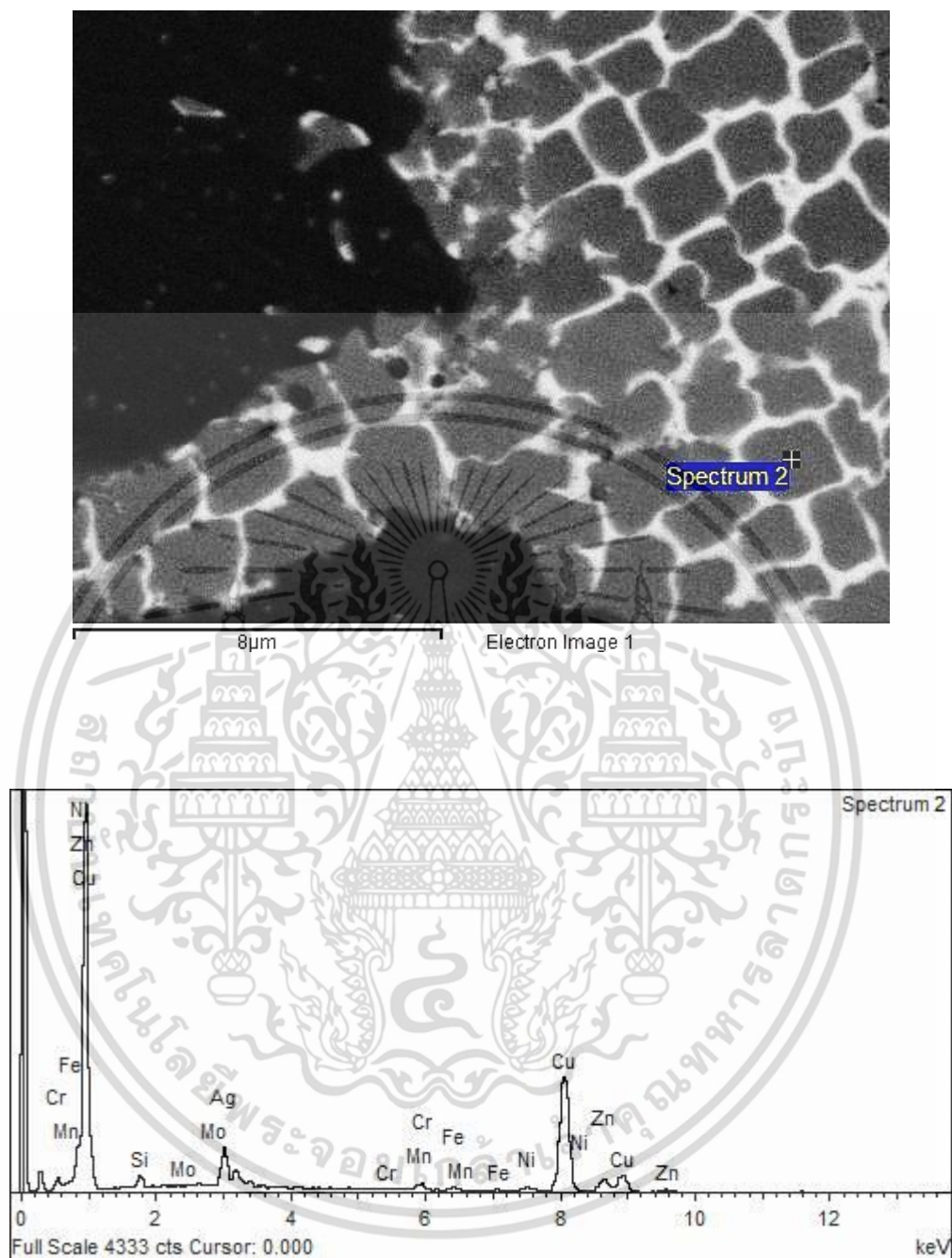
รูปที่ ค.16 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 3500 A สเปกตรัมที่ 3 บริเวณเฟส CuAg ที่เกิดระหว่างเฟส Fe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



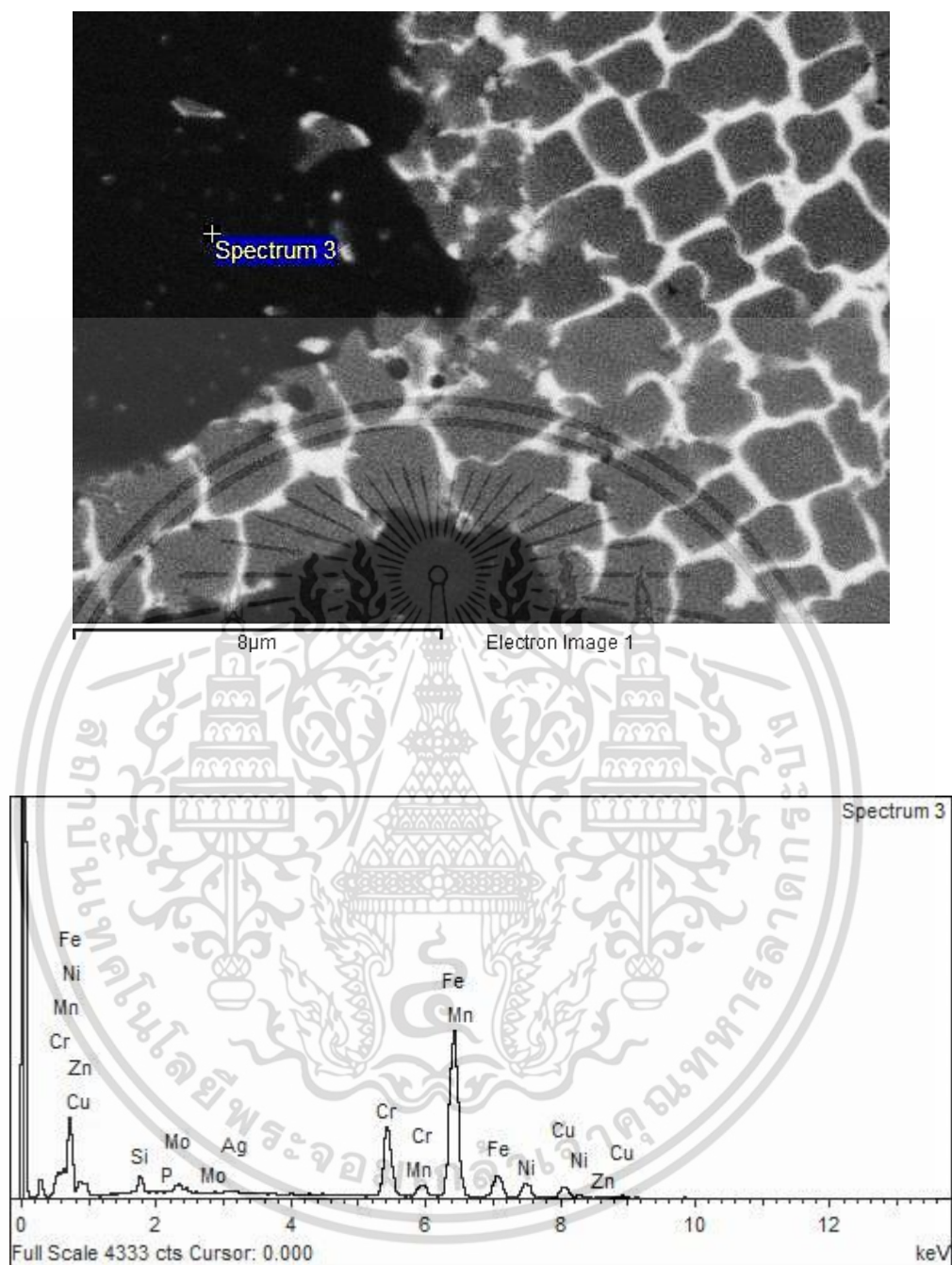
รูปที่ ค.16 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



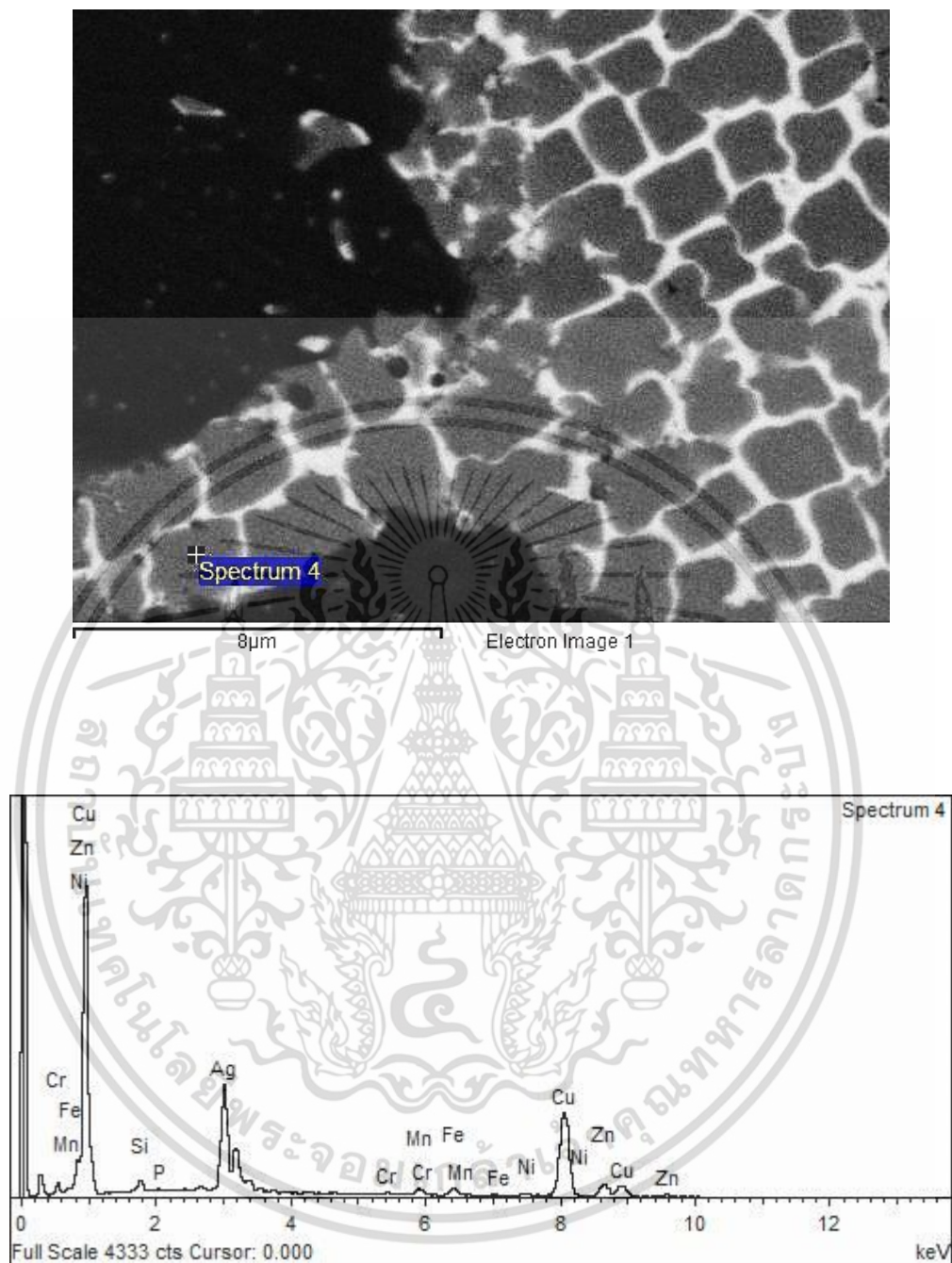
รูปที่ ค.17 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



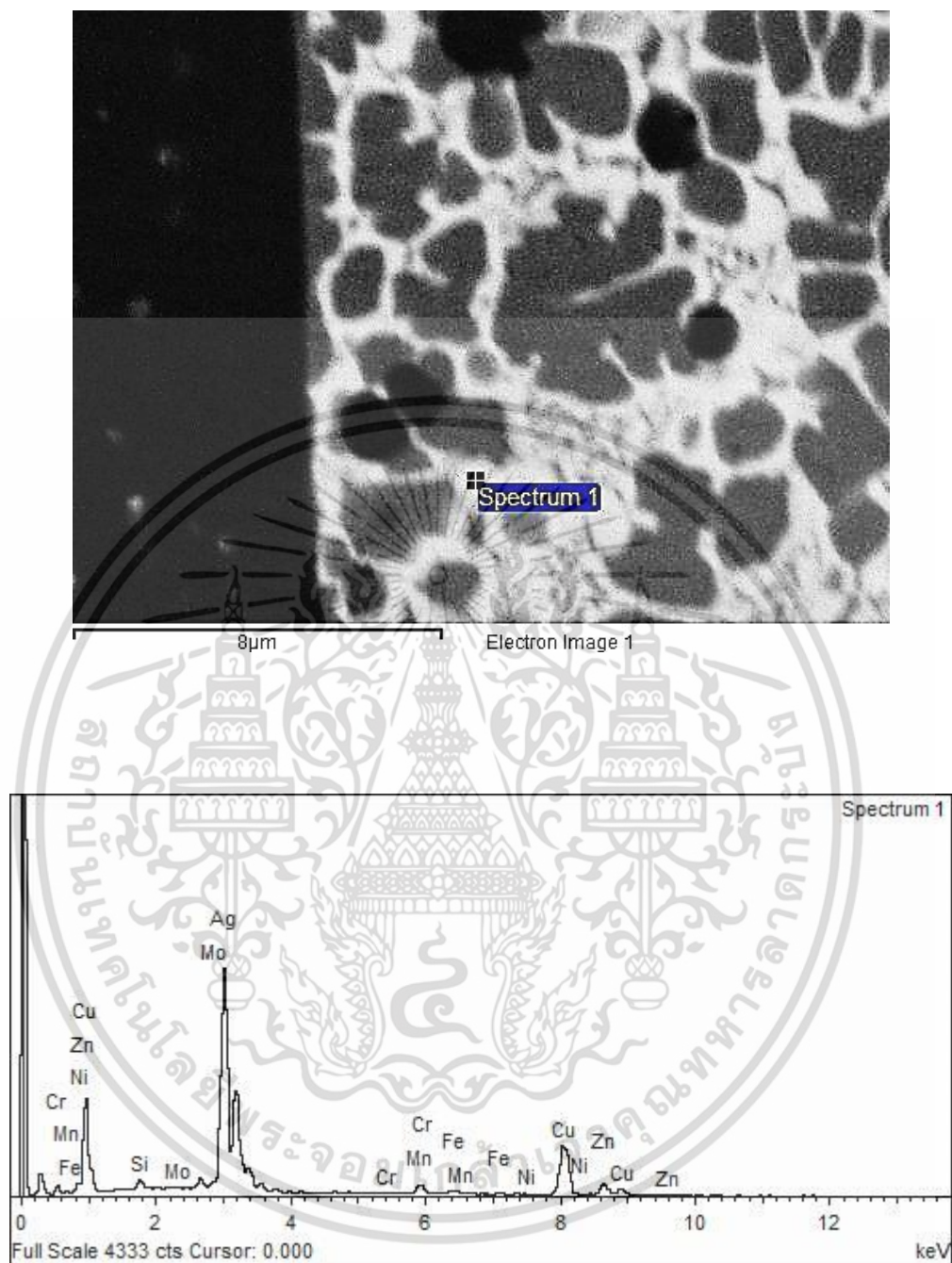
รูปที่ ค.18 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



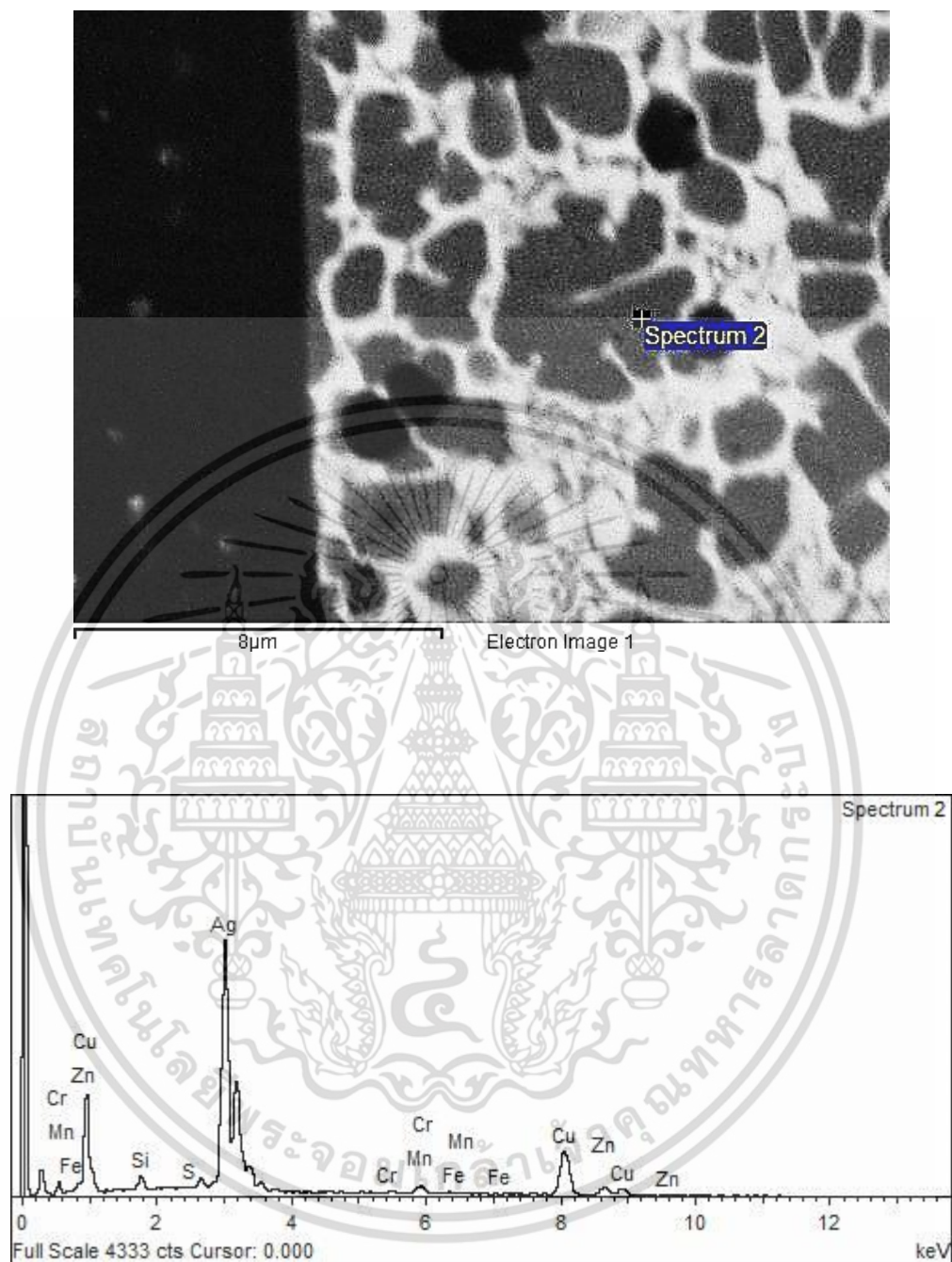
รูปที่ ค.19 ผลวิเคราะห์ EDS กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4000 A สเปกตรัมที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



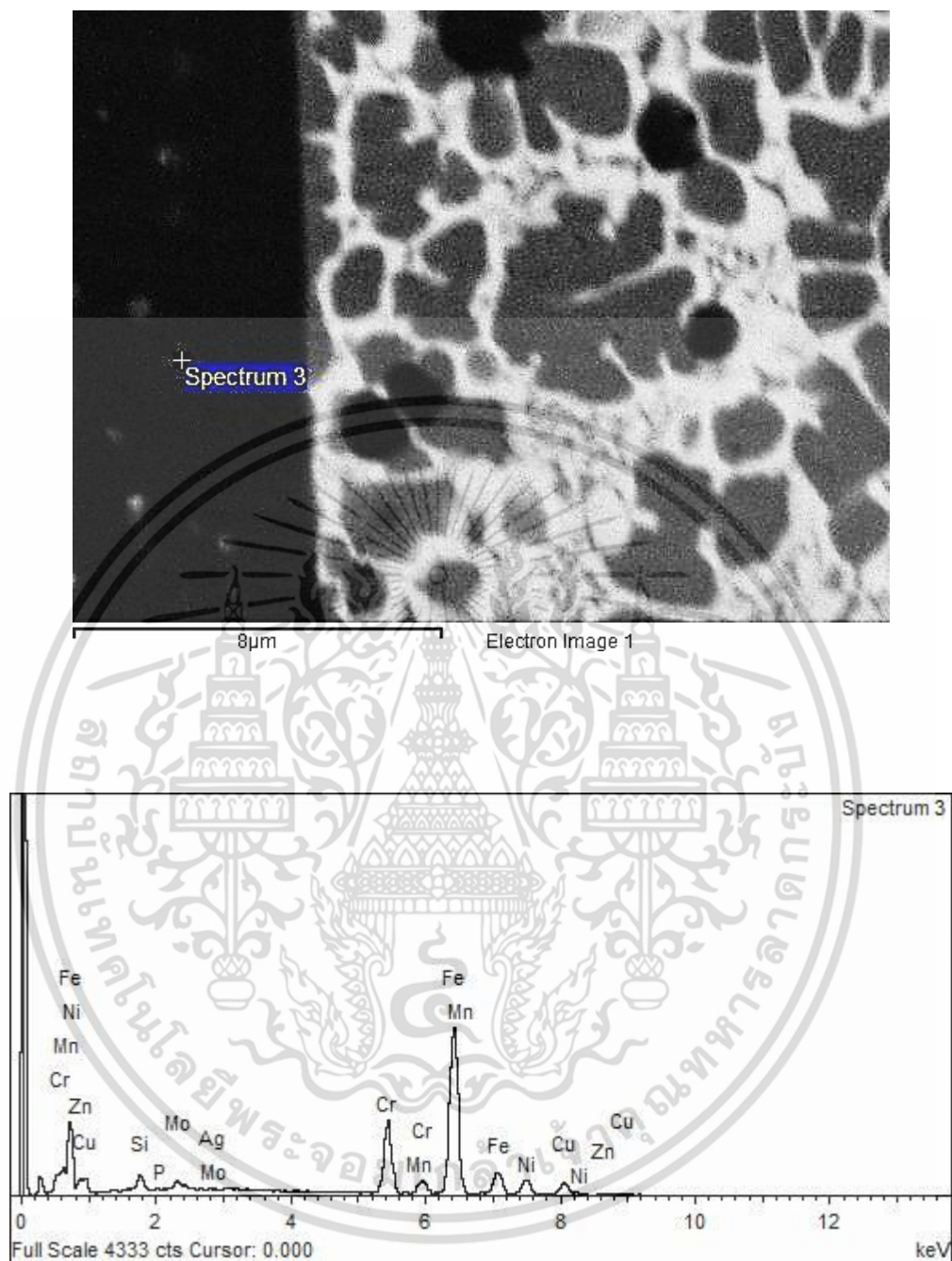
รูปที่ ค.20 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 0.5 s สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



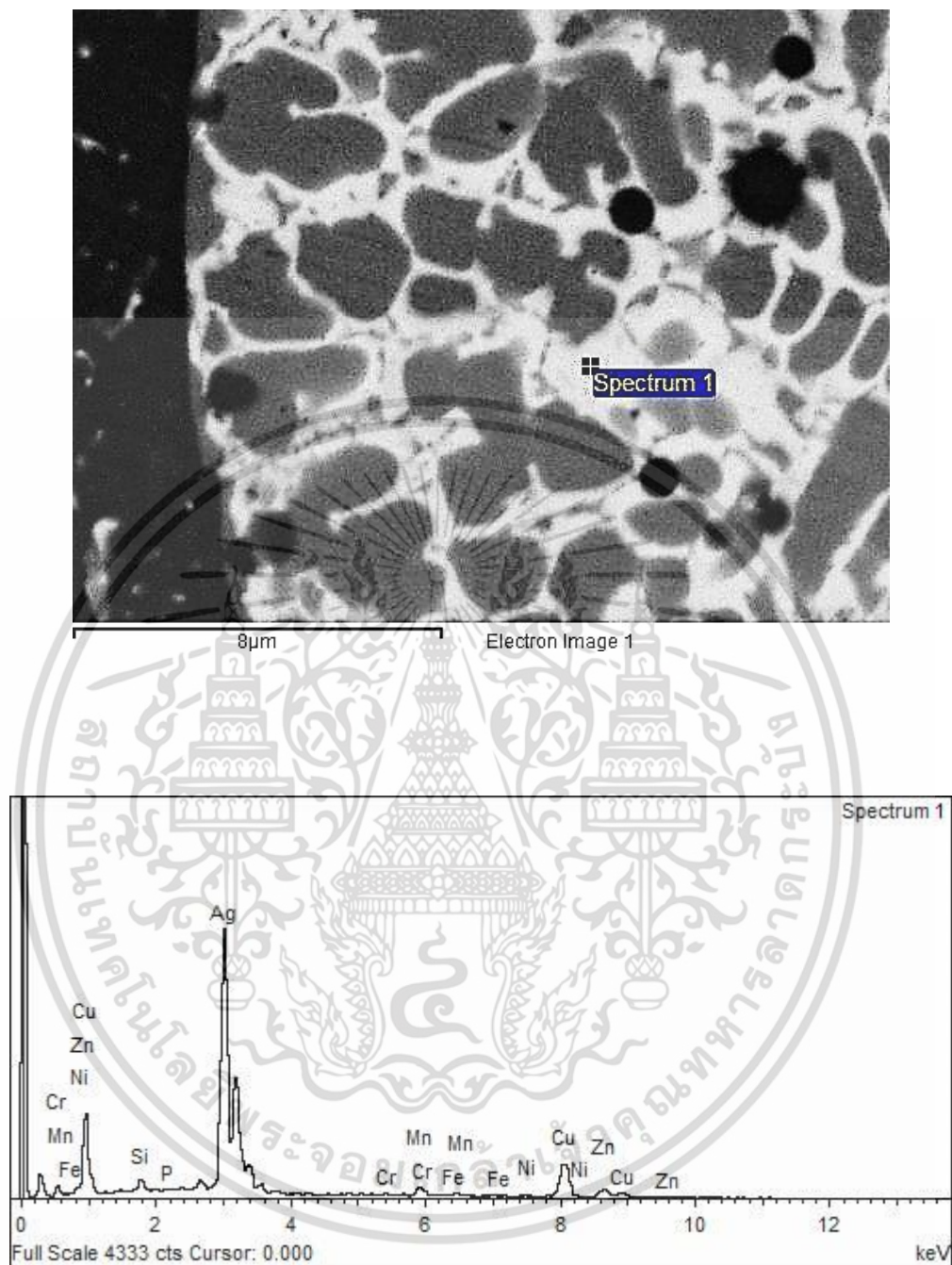
รูปที่ ค.21 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 0.5 s สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



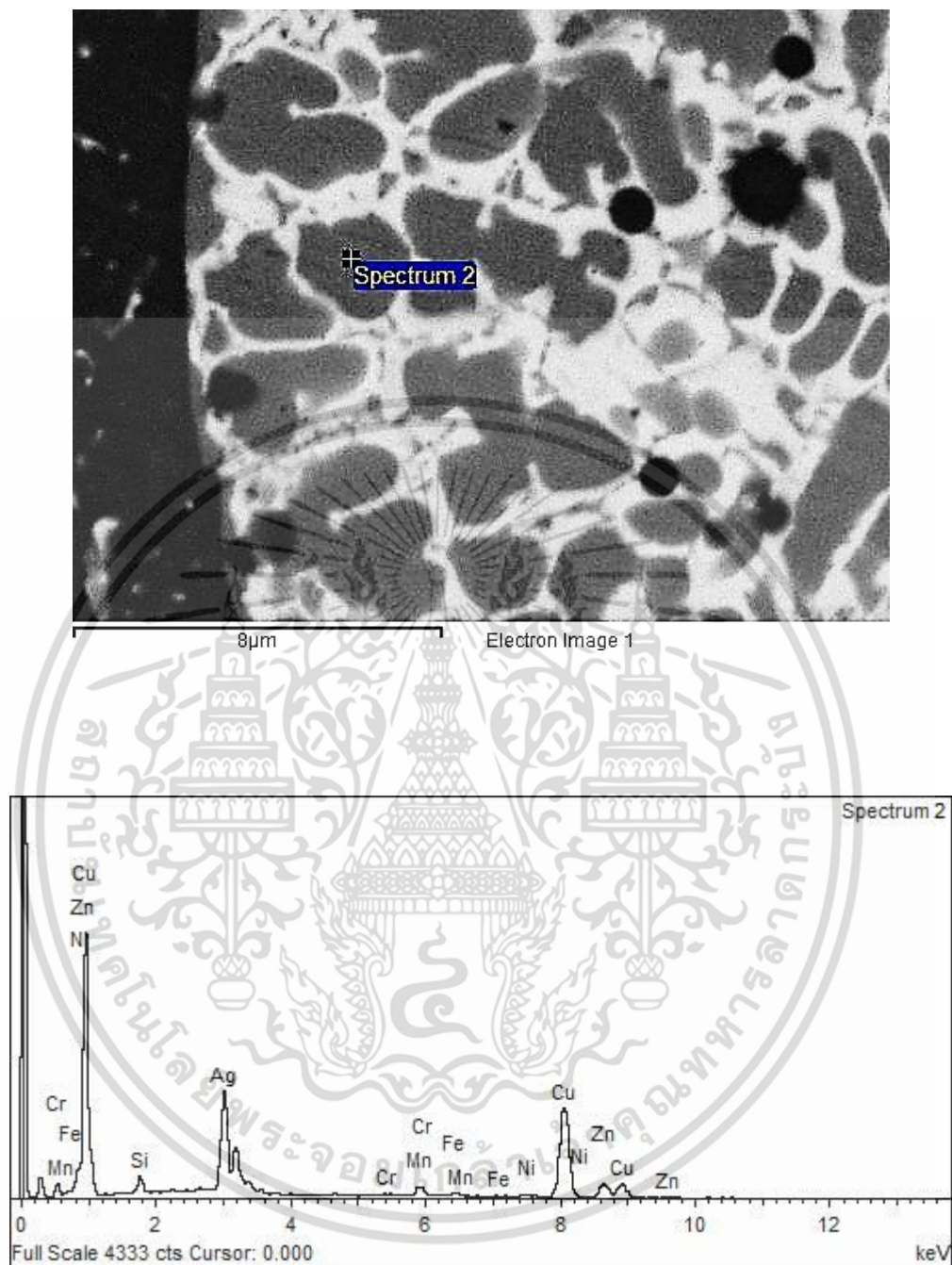
รูปที่ ค.22 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 0.5 s สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



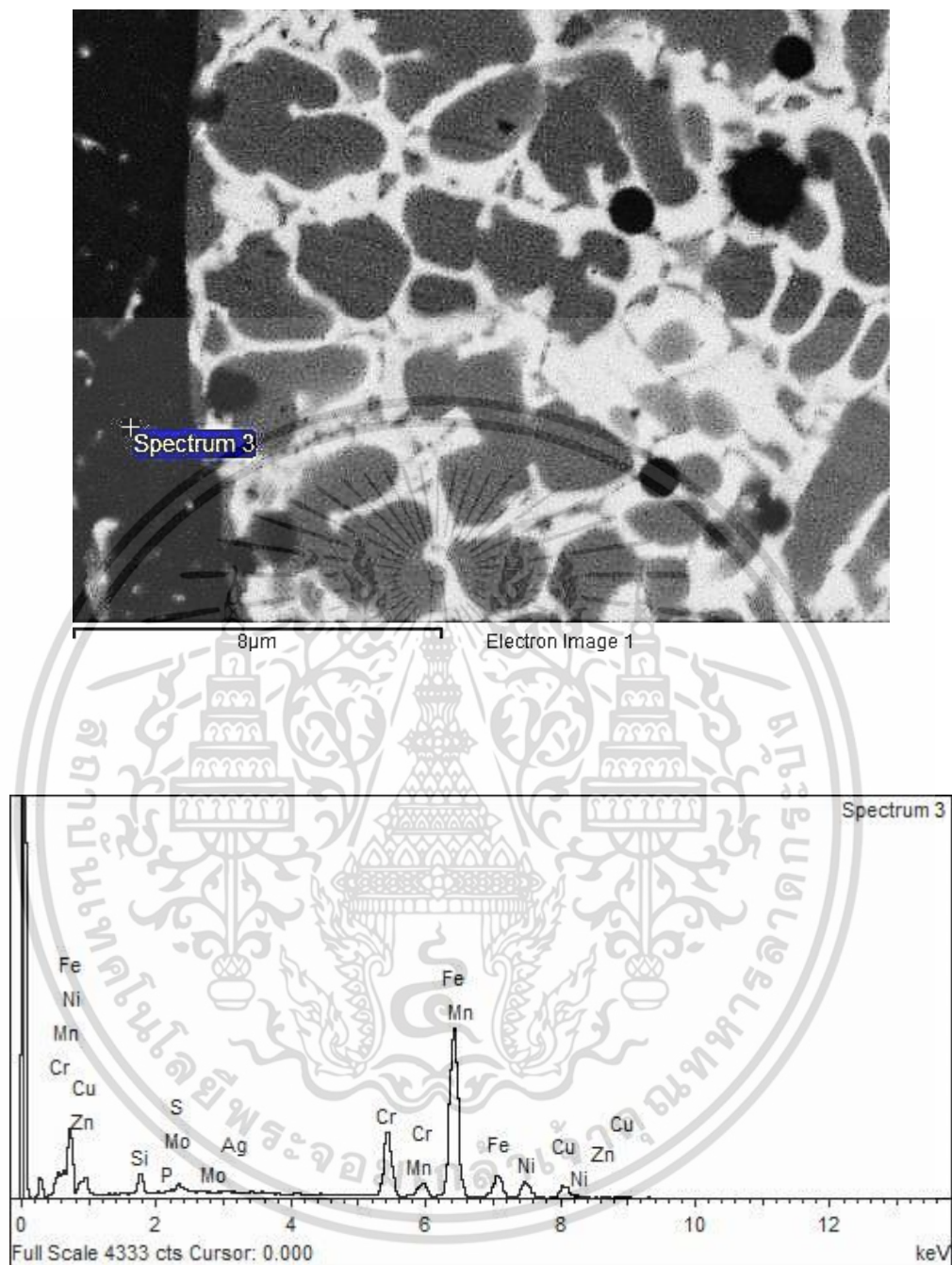
รูปที่ ค.23 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1 s สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



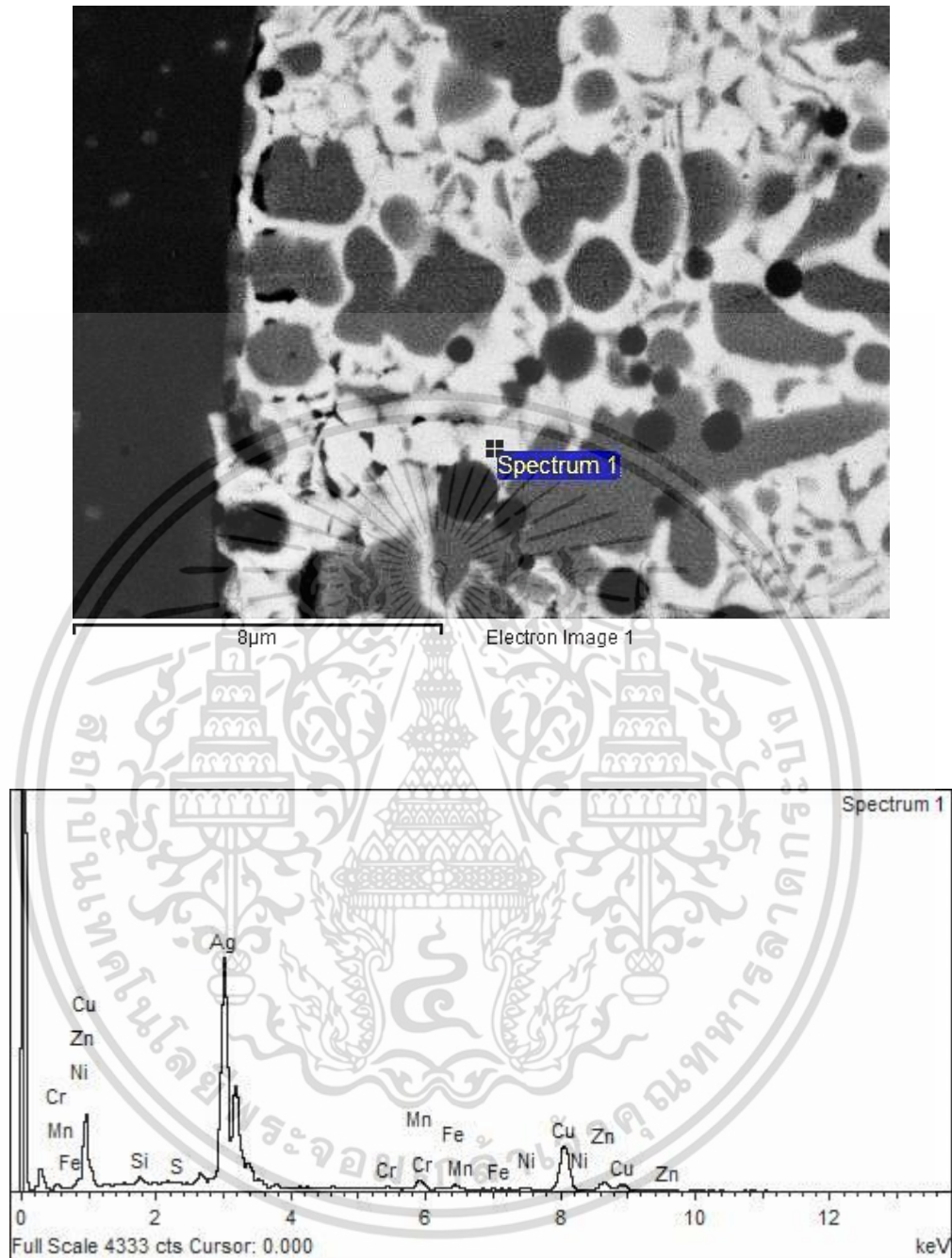
รูปที่ ค.24 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1 s สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



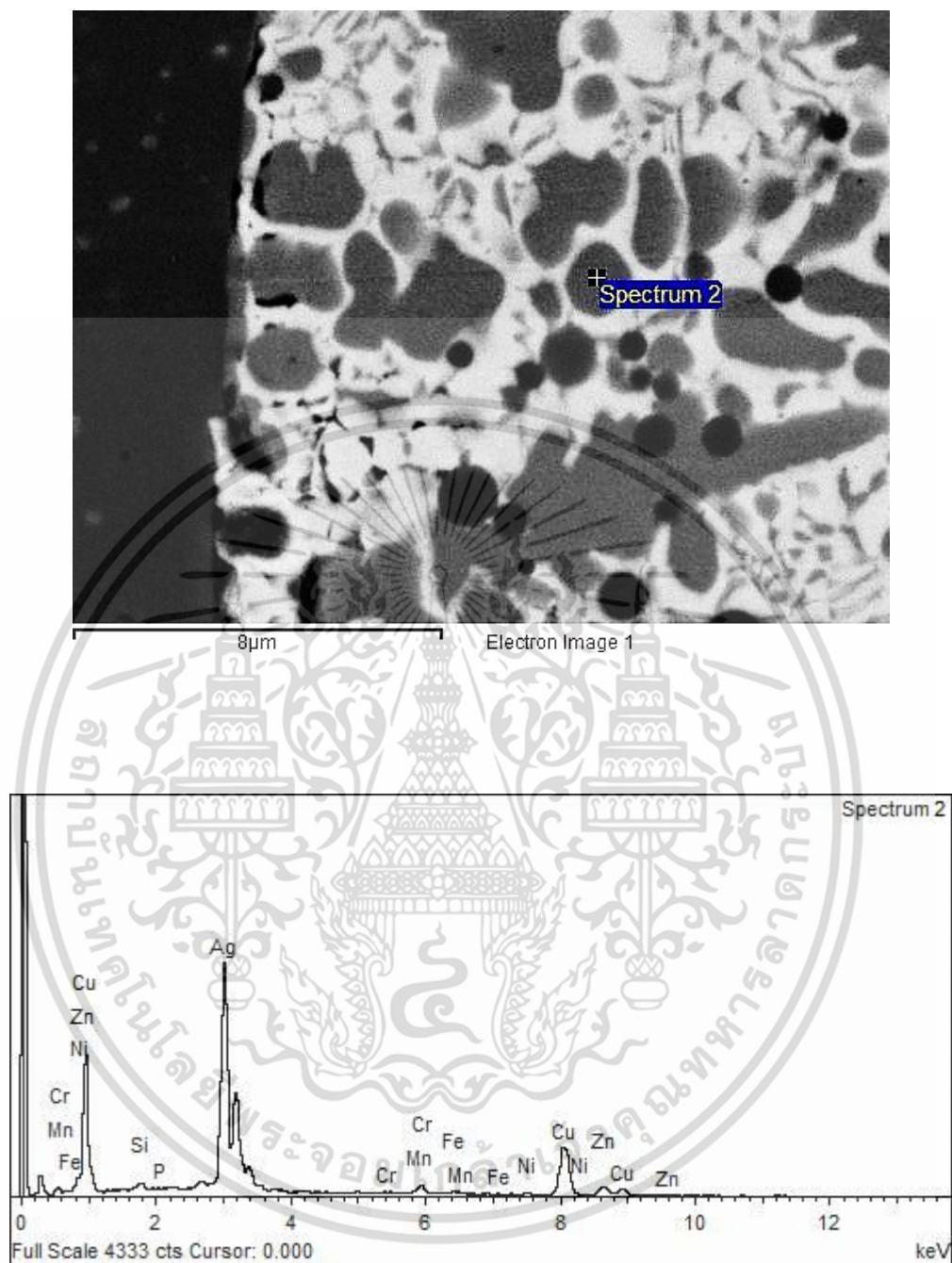
รูปที่ ค.25 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1 s สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



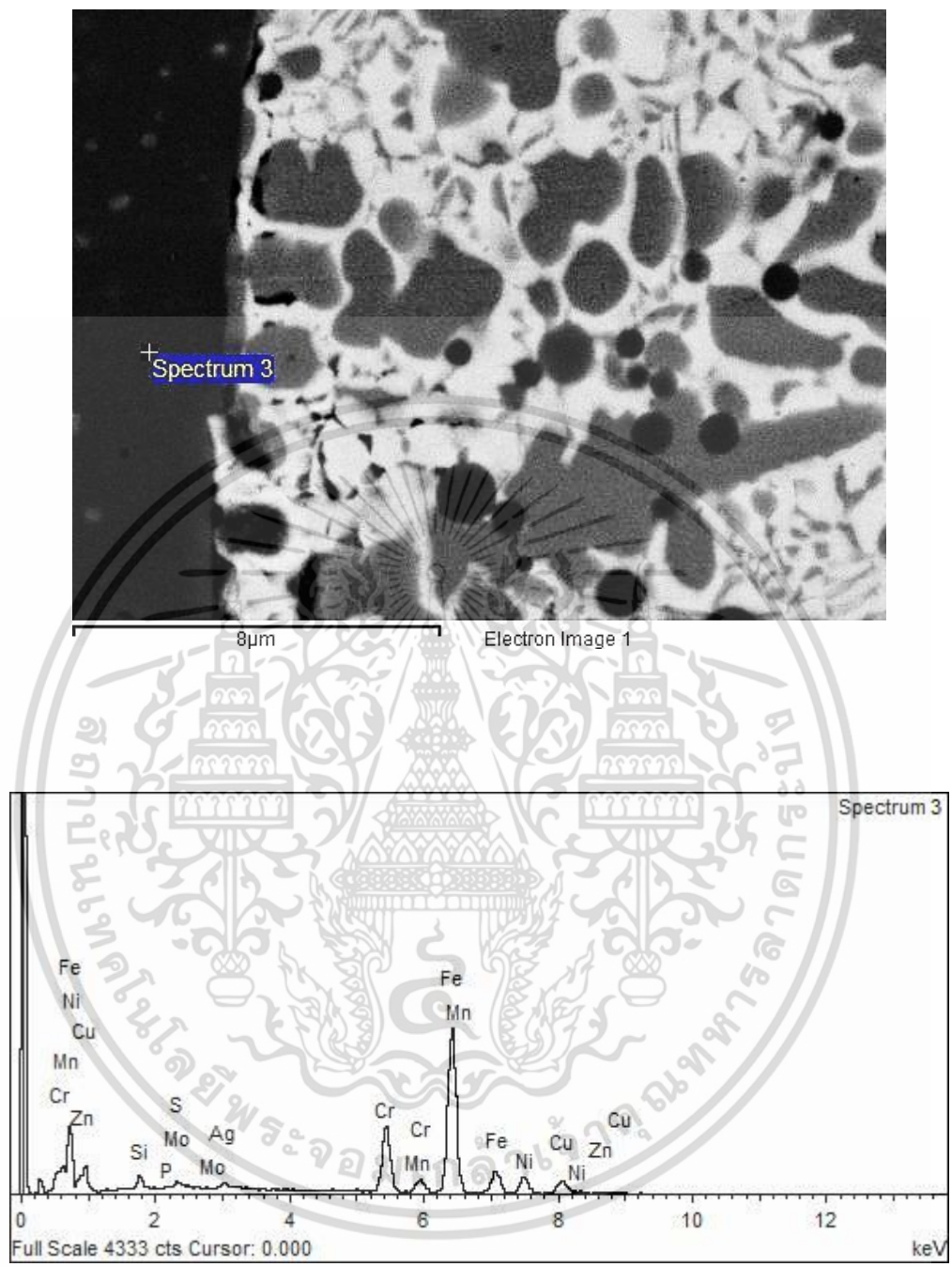
รูปที่ ค.26 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1.5 s สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



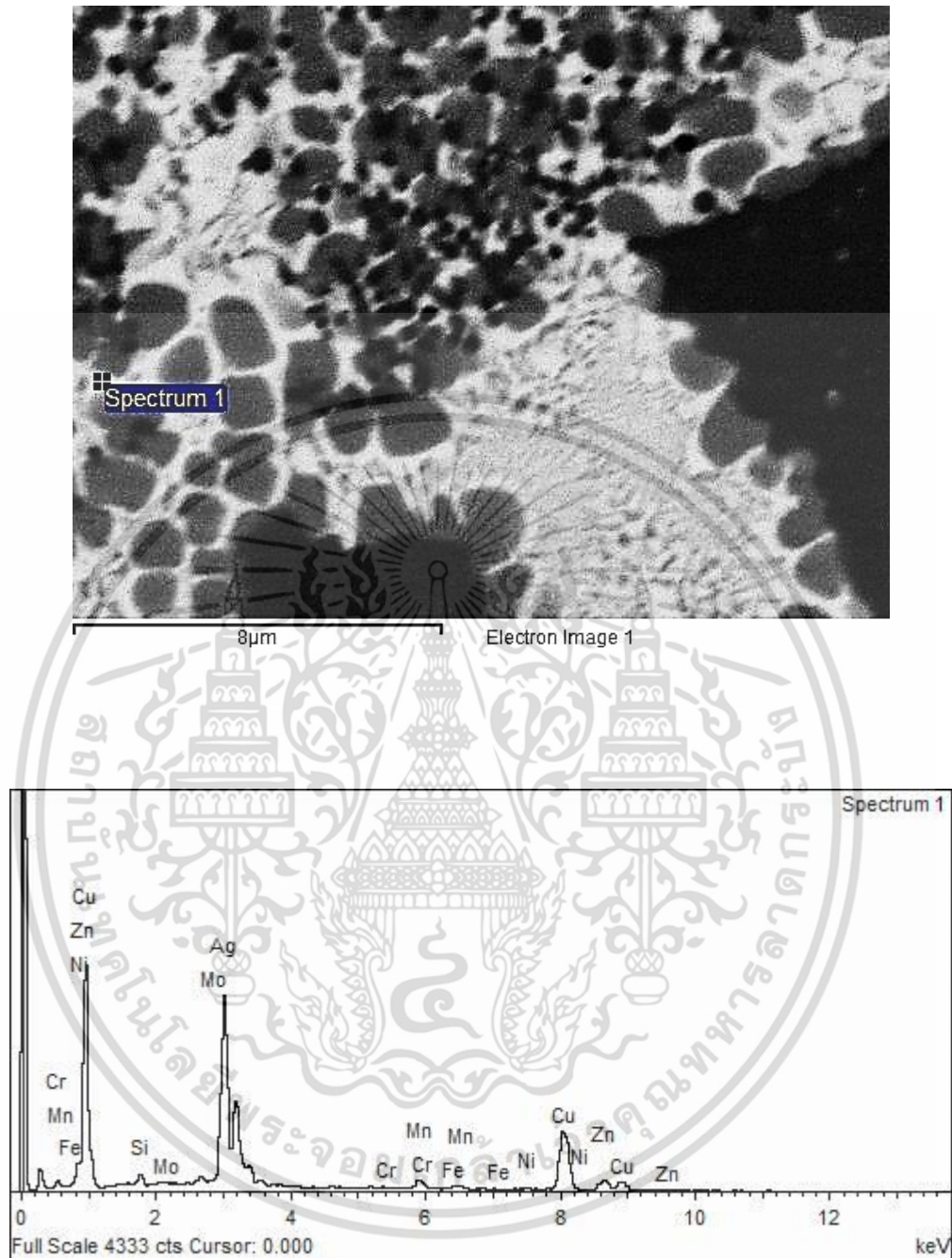
รูปที่ ค.27 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1.5 s สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



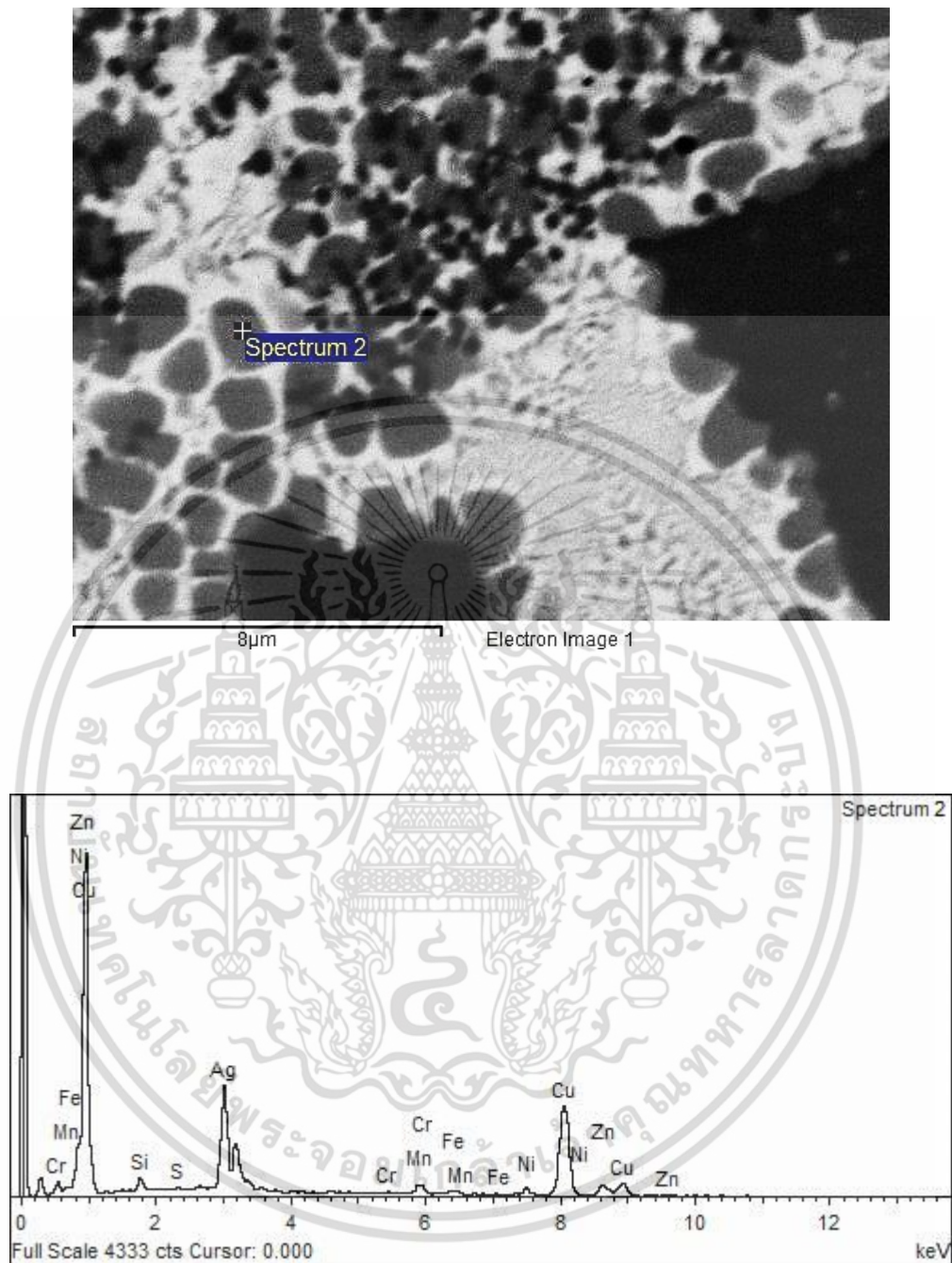
รูปที่ ค.28 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1.5 s สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



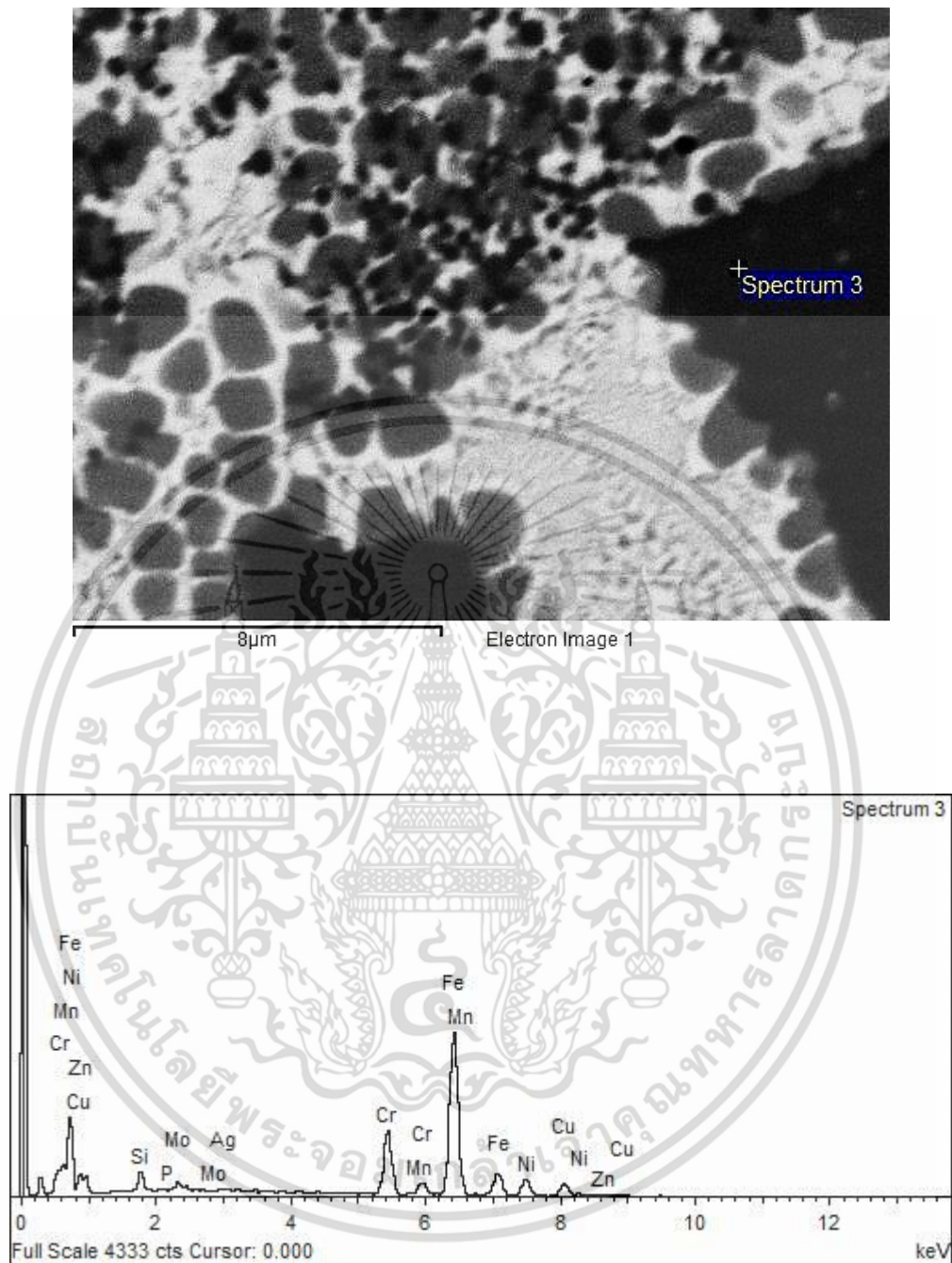
รูปที่ ค.29 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



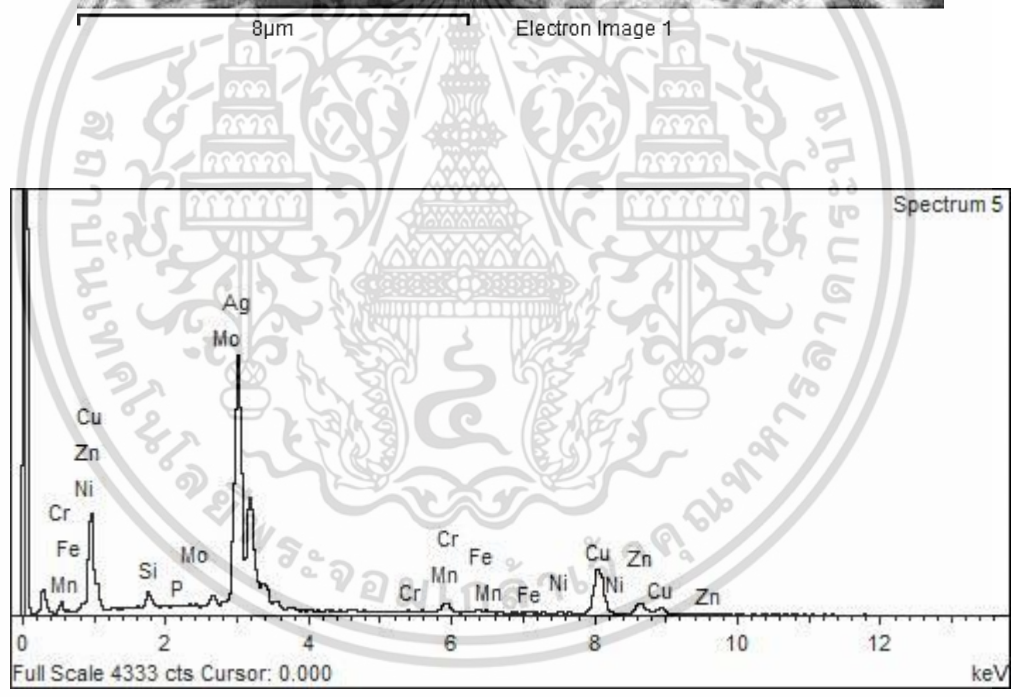
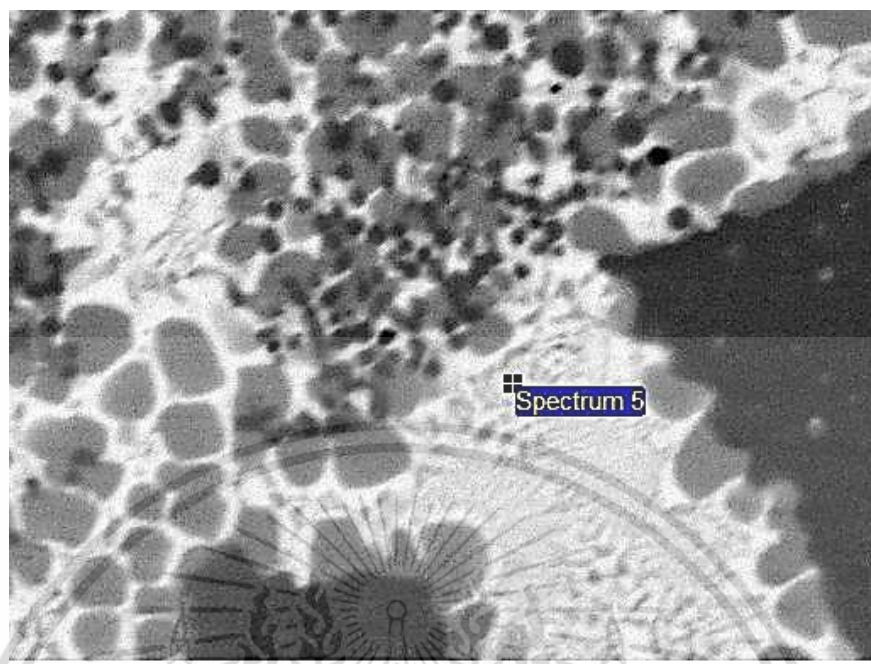
รูปที่ ค.30 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



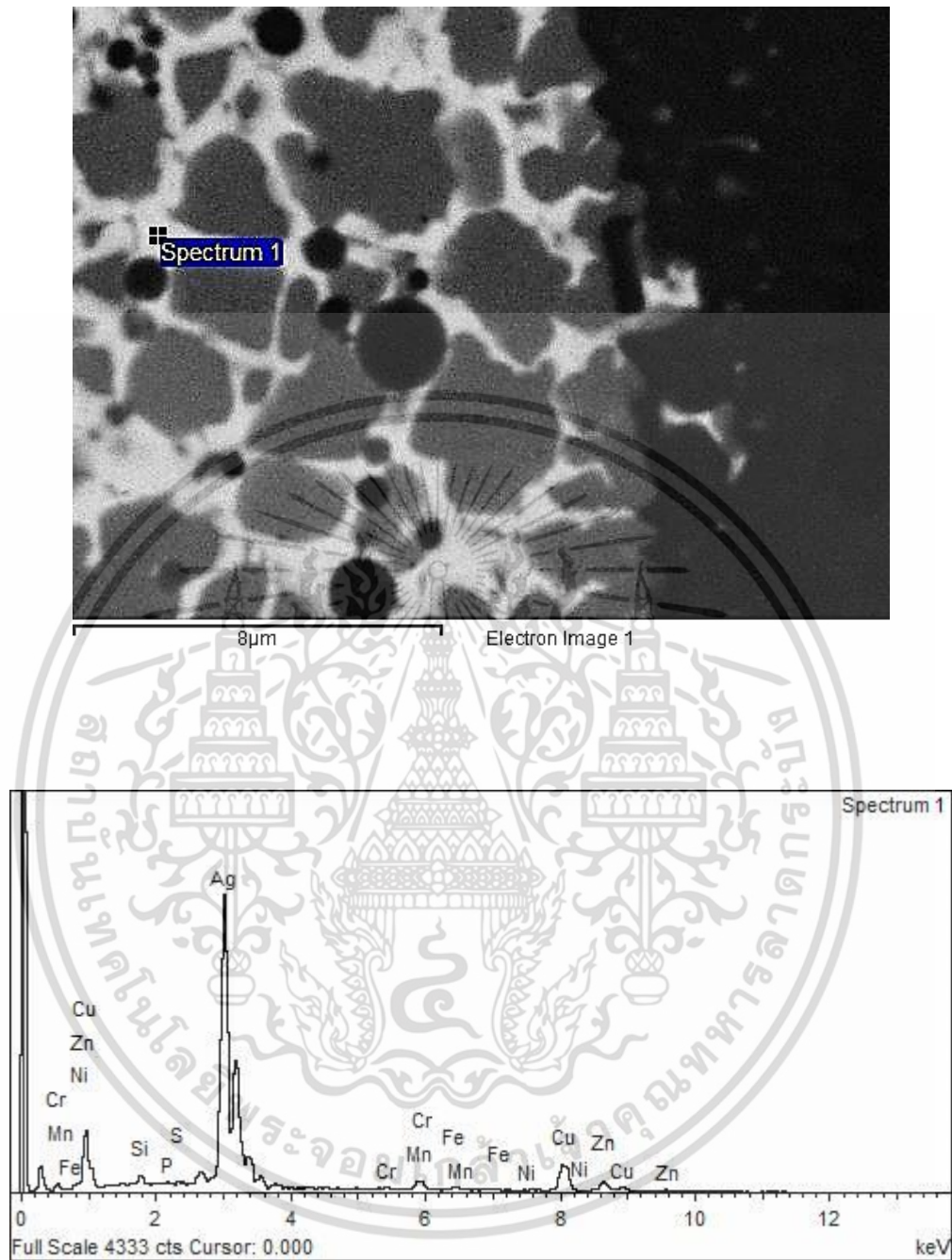
รูปที่ ค.31 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



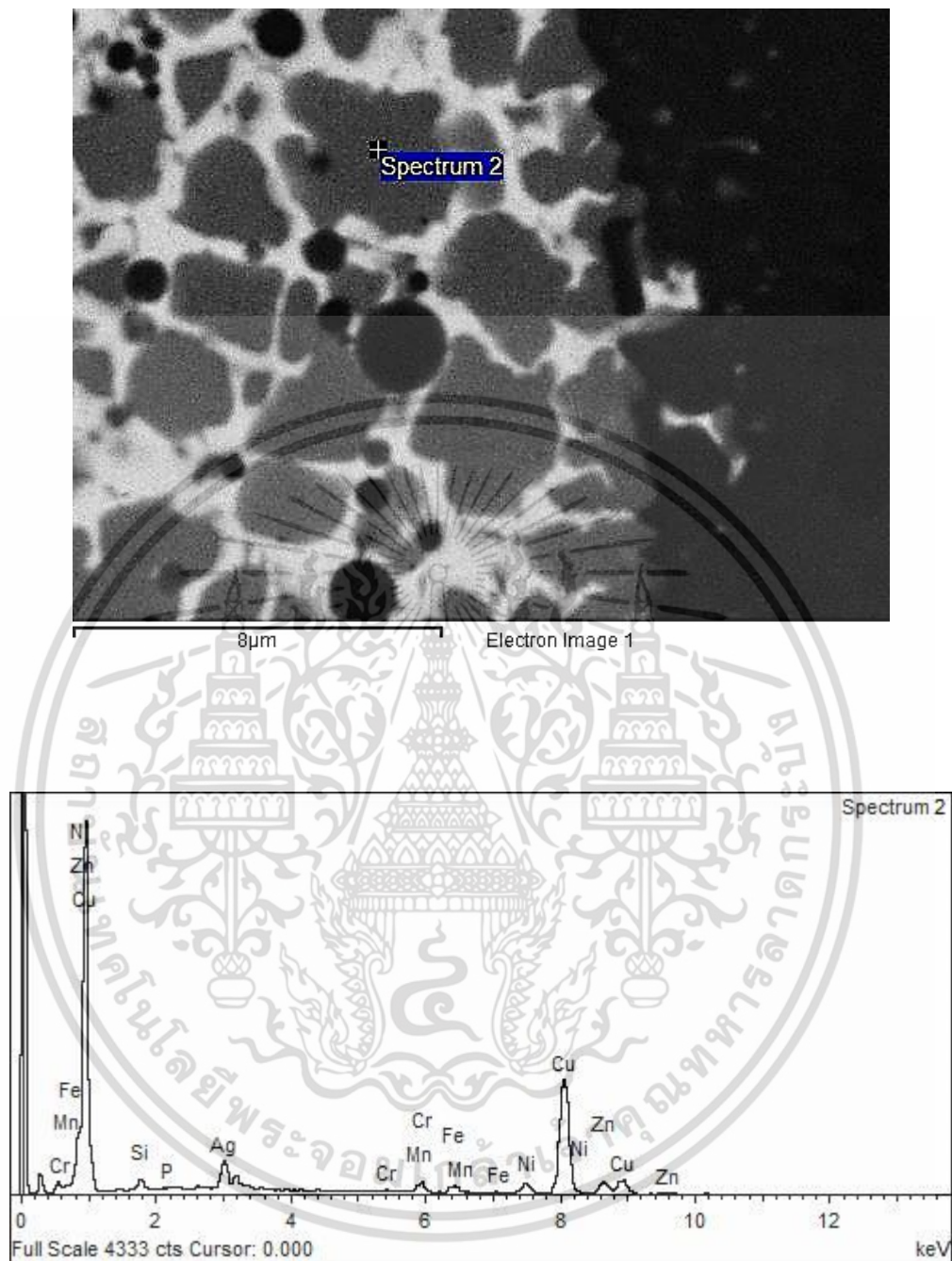
รูปที่ ค.32 ผลวิเคราะห์ EDS เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s สเปกตรัมที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



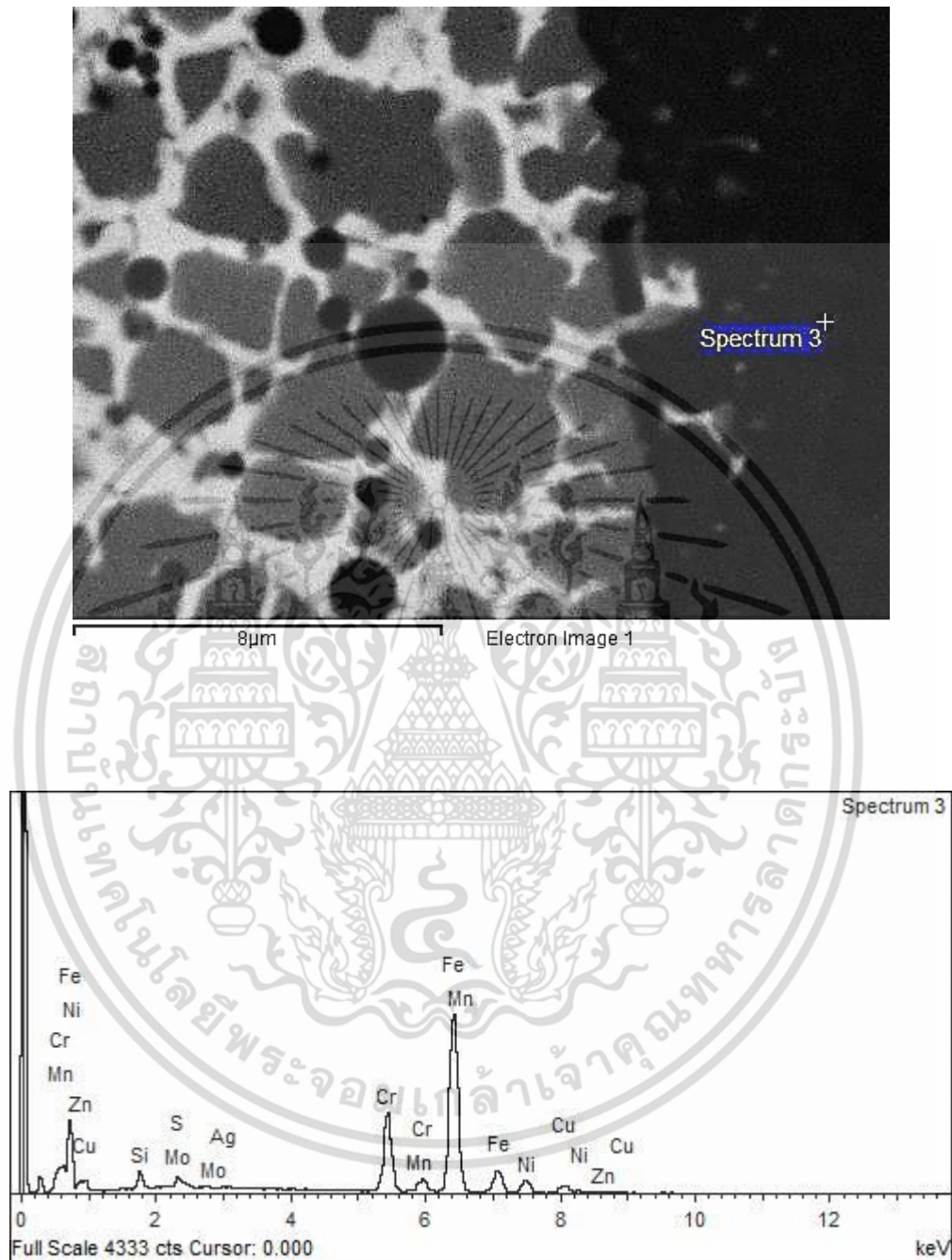
รูปที่ ค.33 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



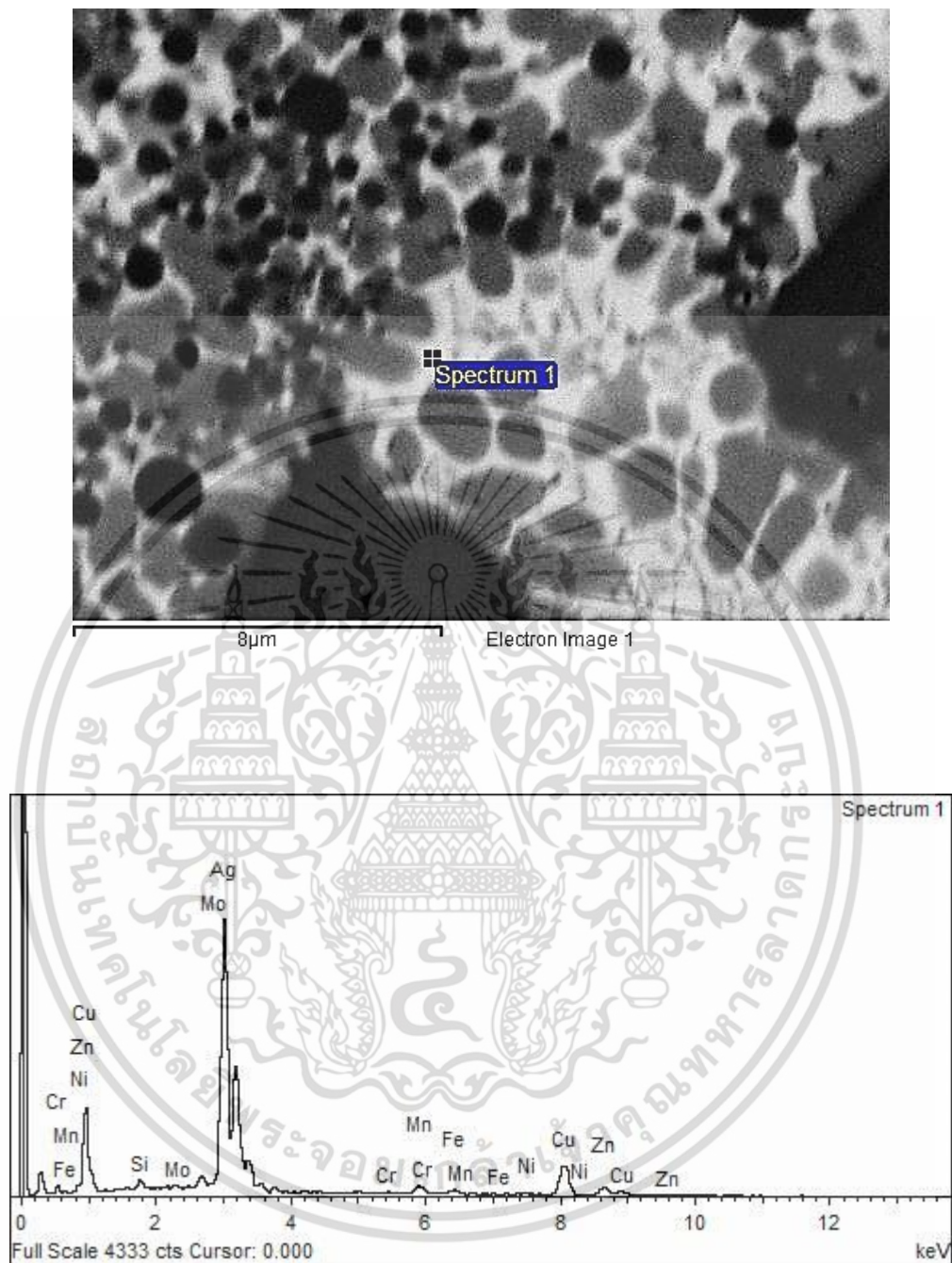
รูปที่ ค.34 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโตรด 0.3 MPa สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



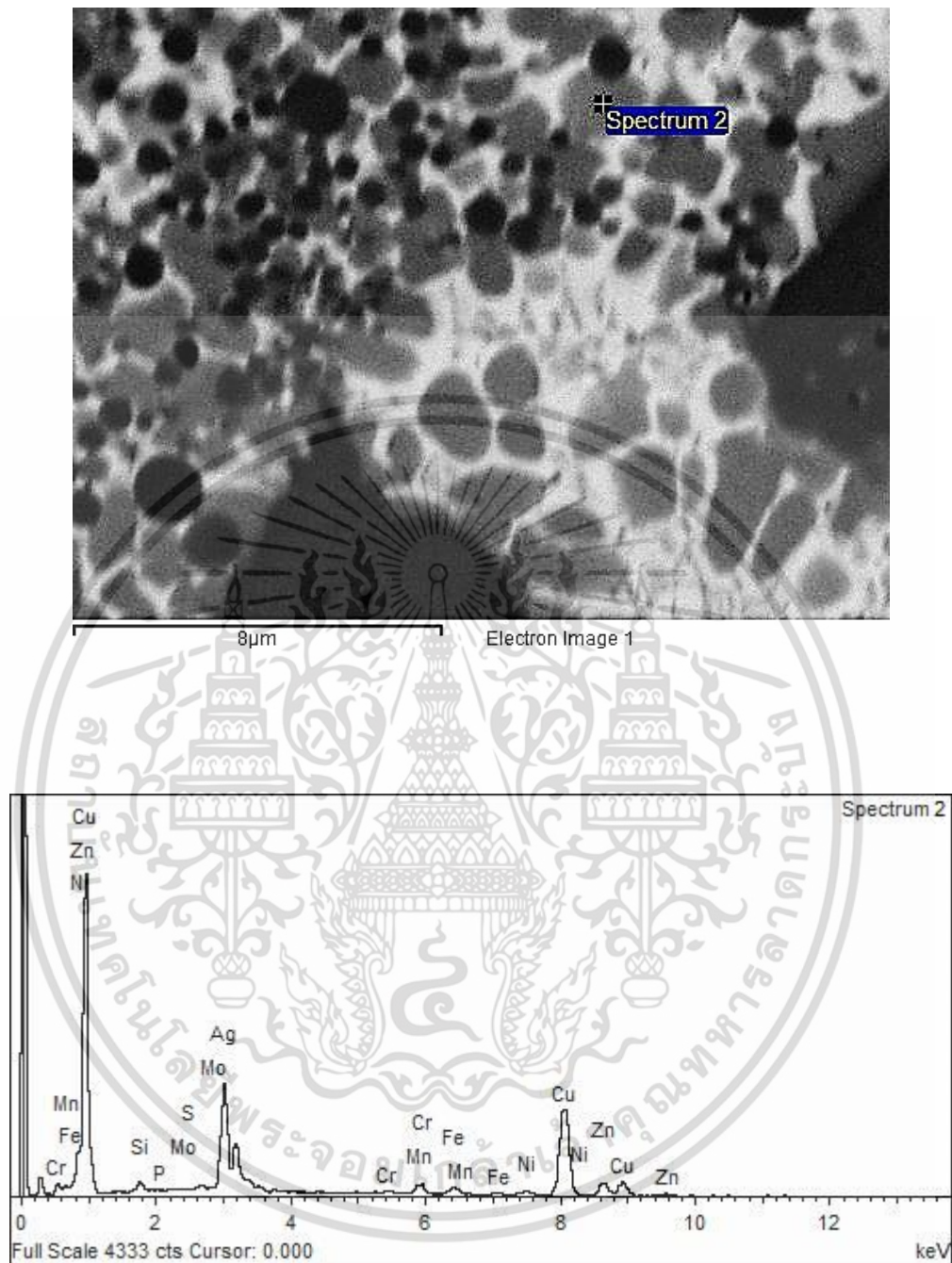
รูปที่ ค.35 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



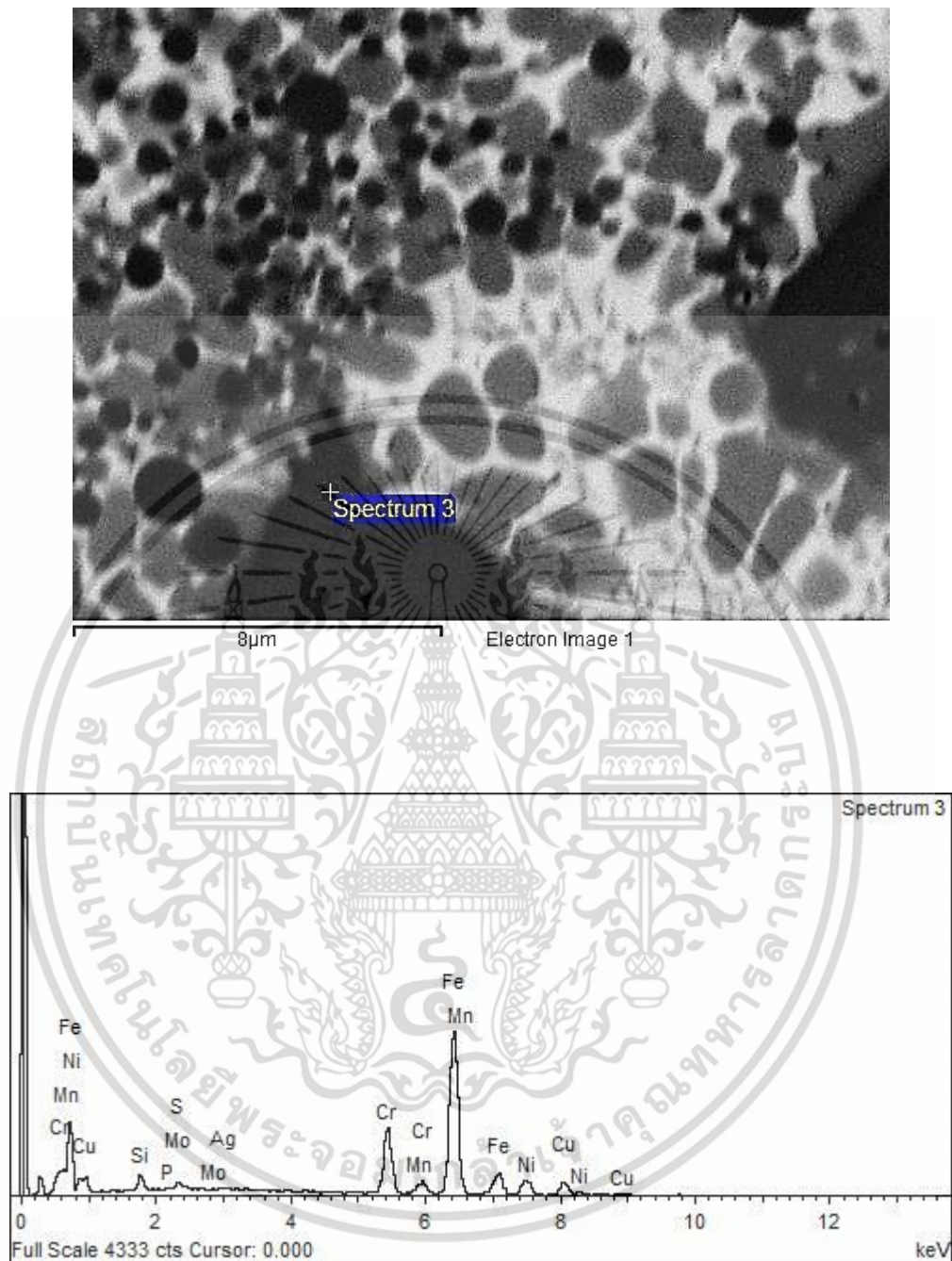
รูปที่ ค.36 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.35 MPa สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



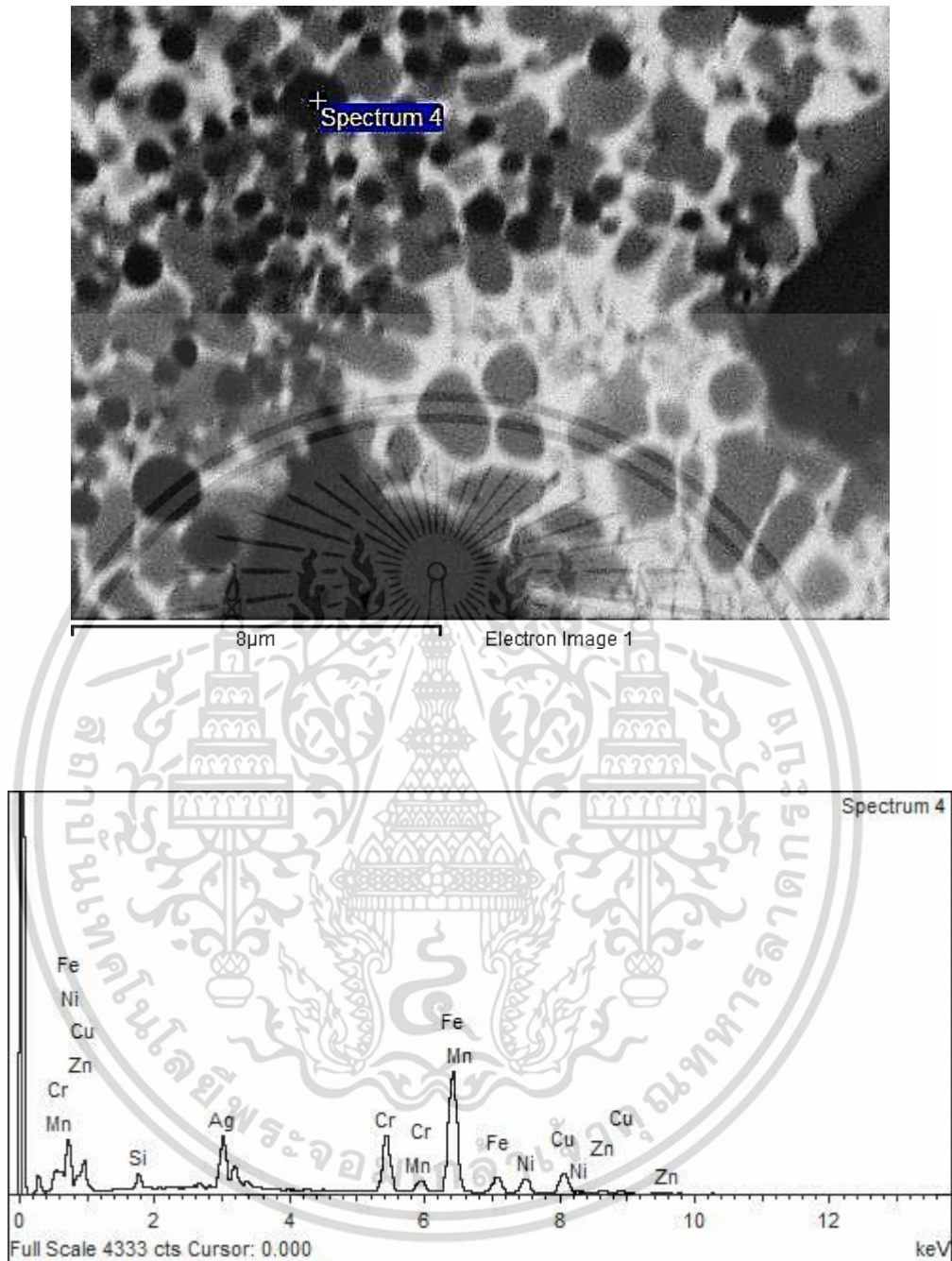
รูปที่ ค.37 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโตรด 0.35 MPa สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



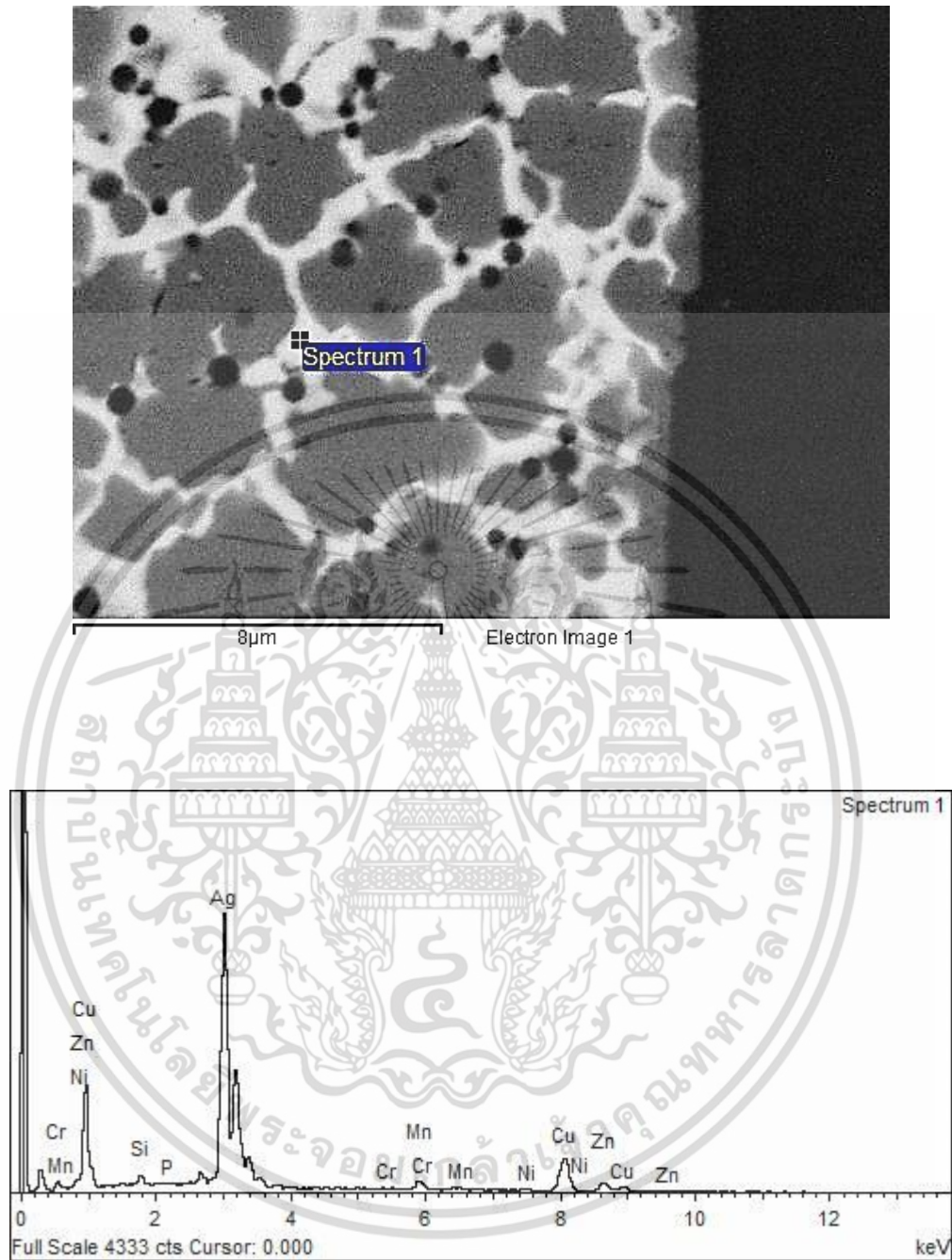
รูปที่ ค.38 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.35 MPa สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



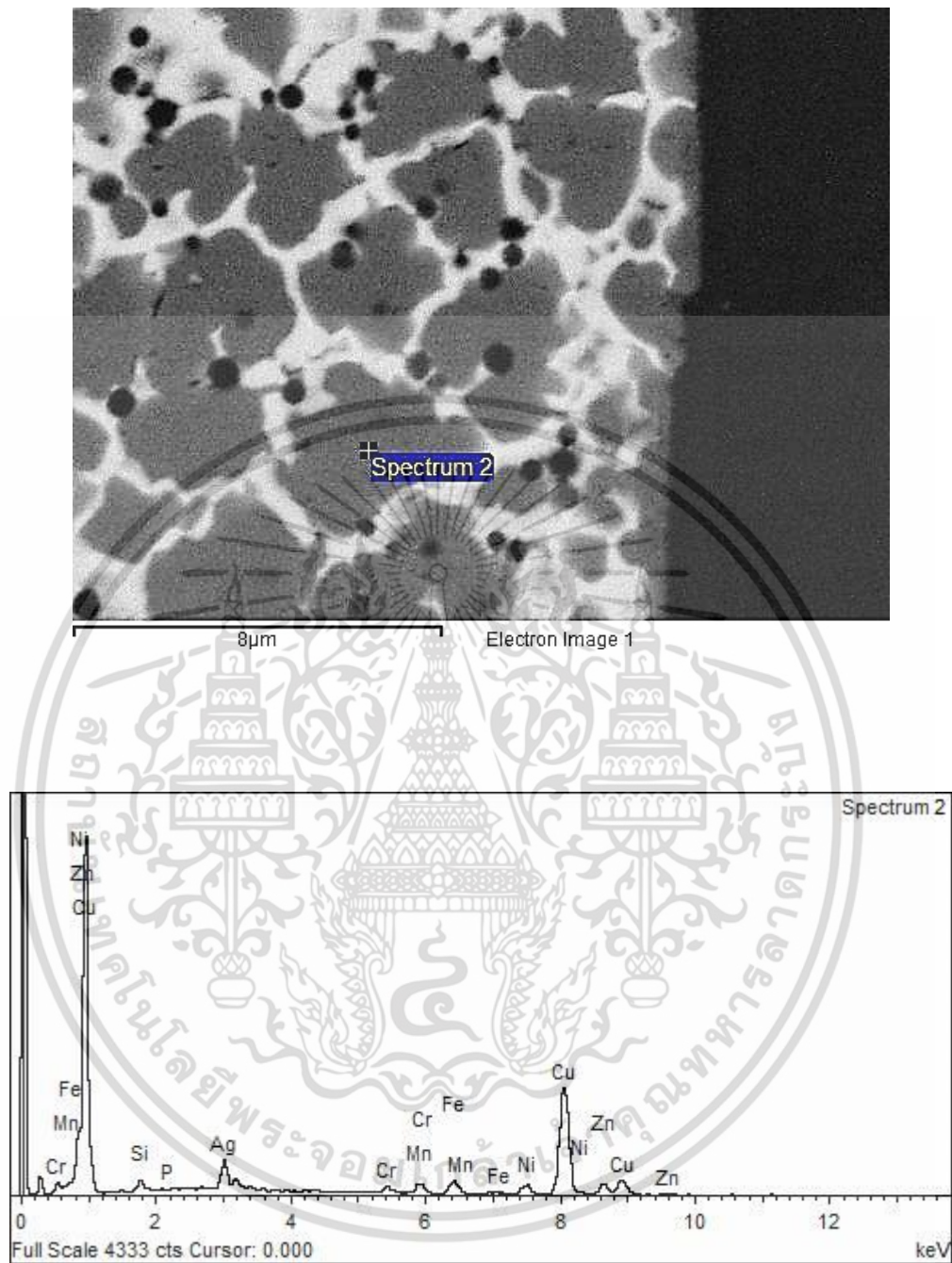
รูปที่ ค.39 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโตรด 0.35 MPa สเปกตรัมที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



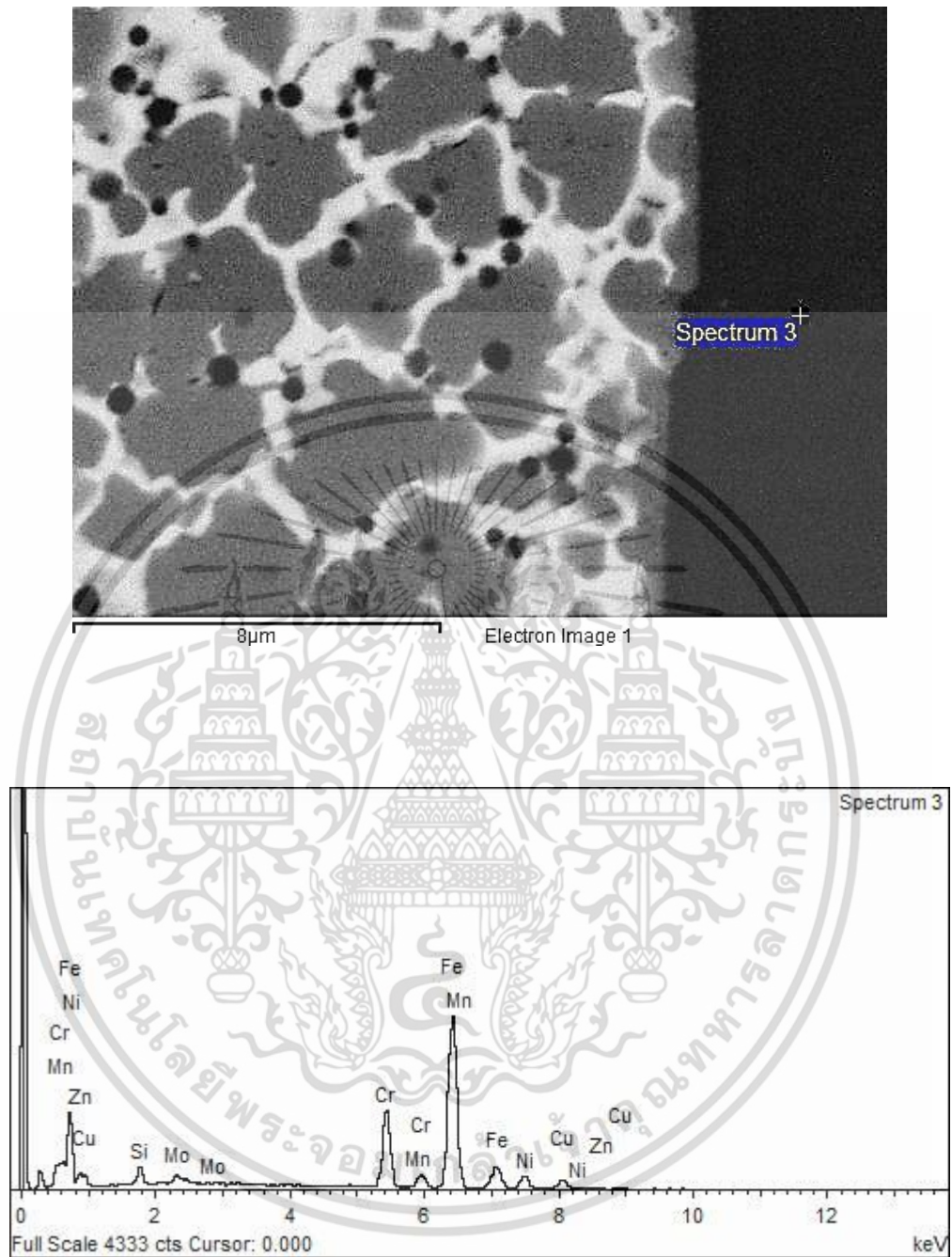
รูปที่ ค.40 ผลวิเคราะห์ EDS แรกกดจากอิเล็กโทรด 0.4 MPa สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



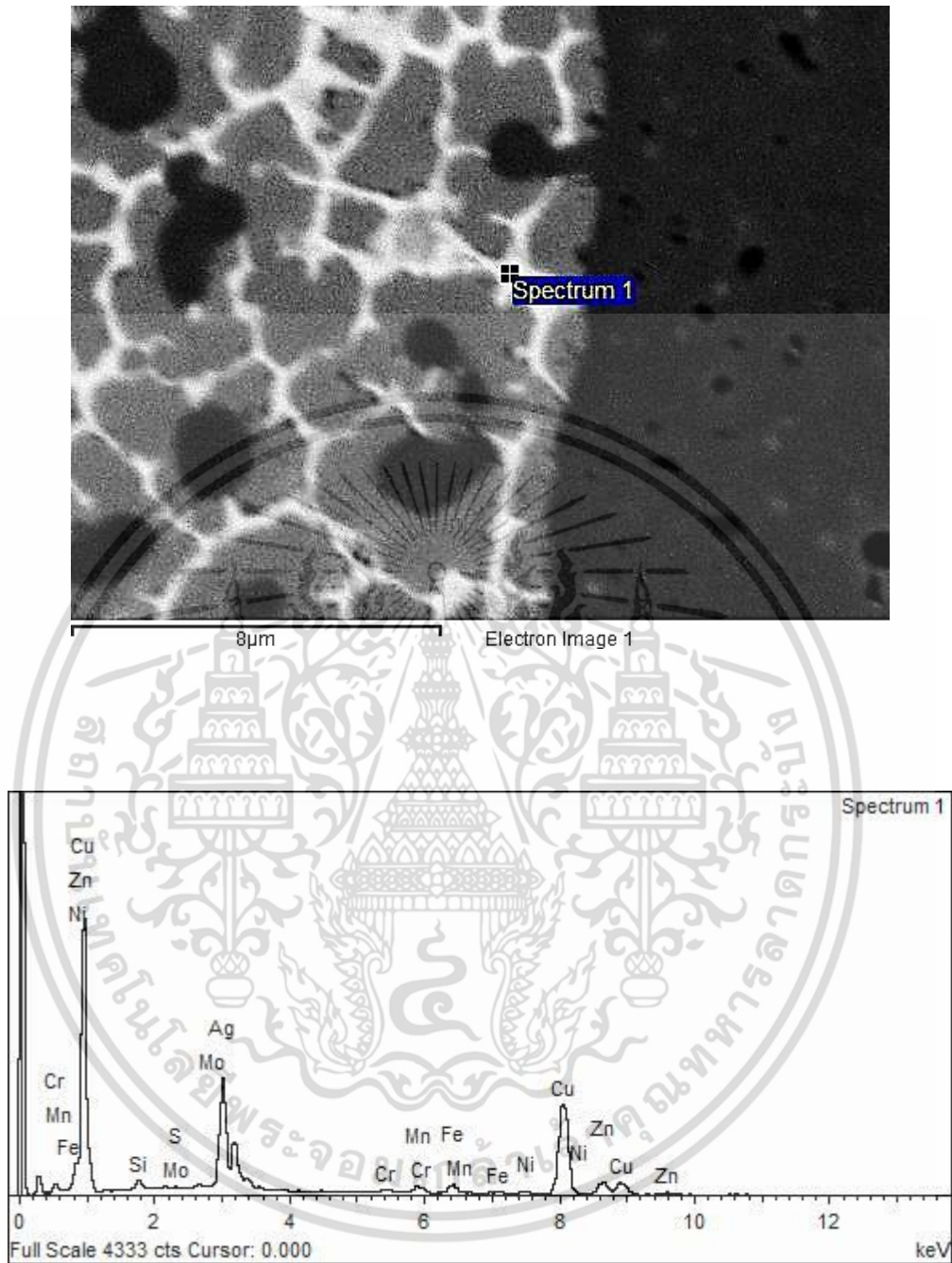
รูปที่ ค.41 ผลวิเคราะห์ EDS แรกกดจากอิเล็กโตรด 0.4 MPa สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



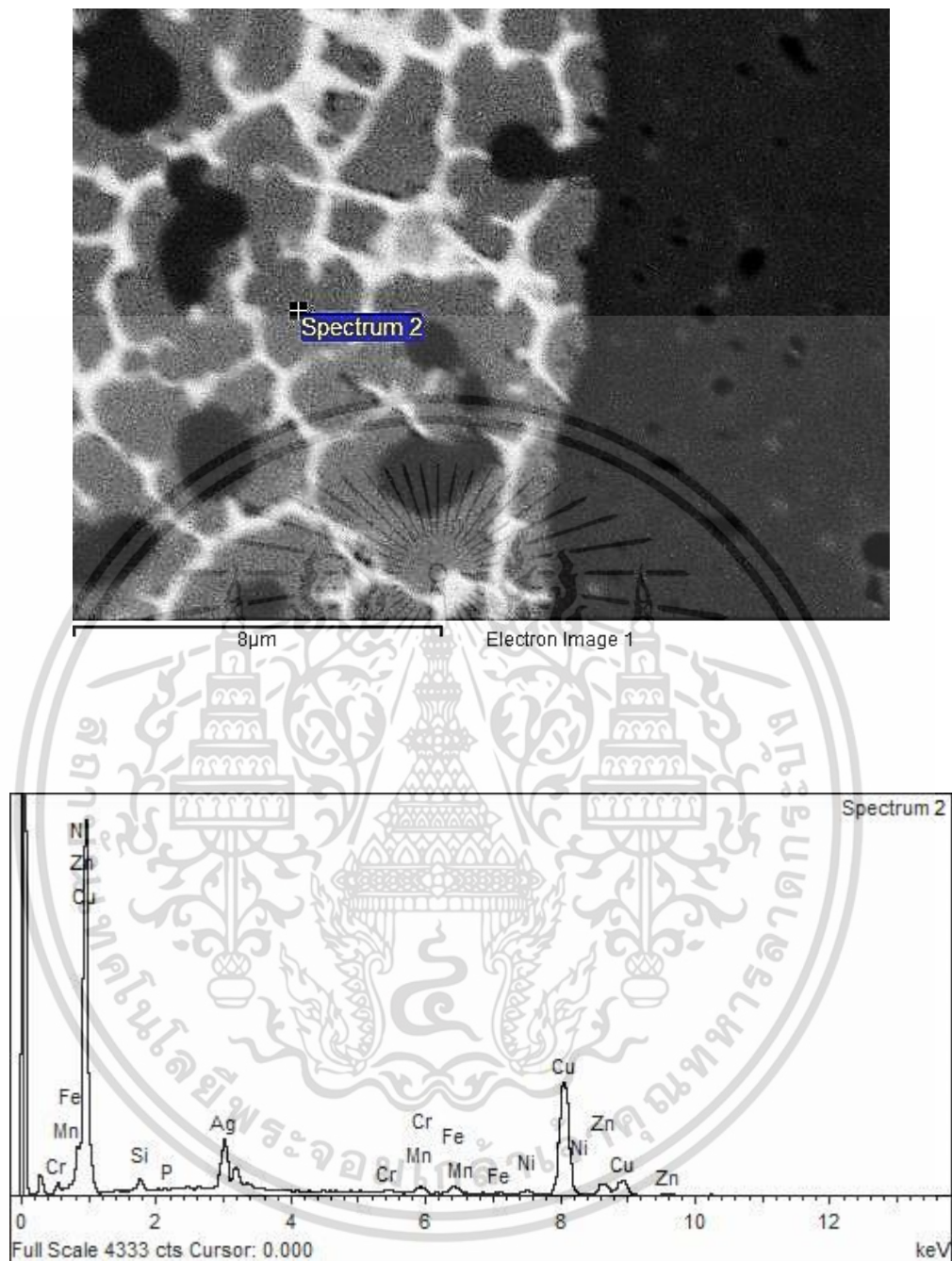
รูปที่ ค.42 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กทรอนิกส์ 0.4 MPa สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



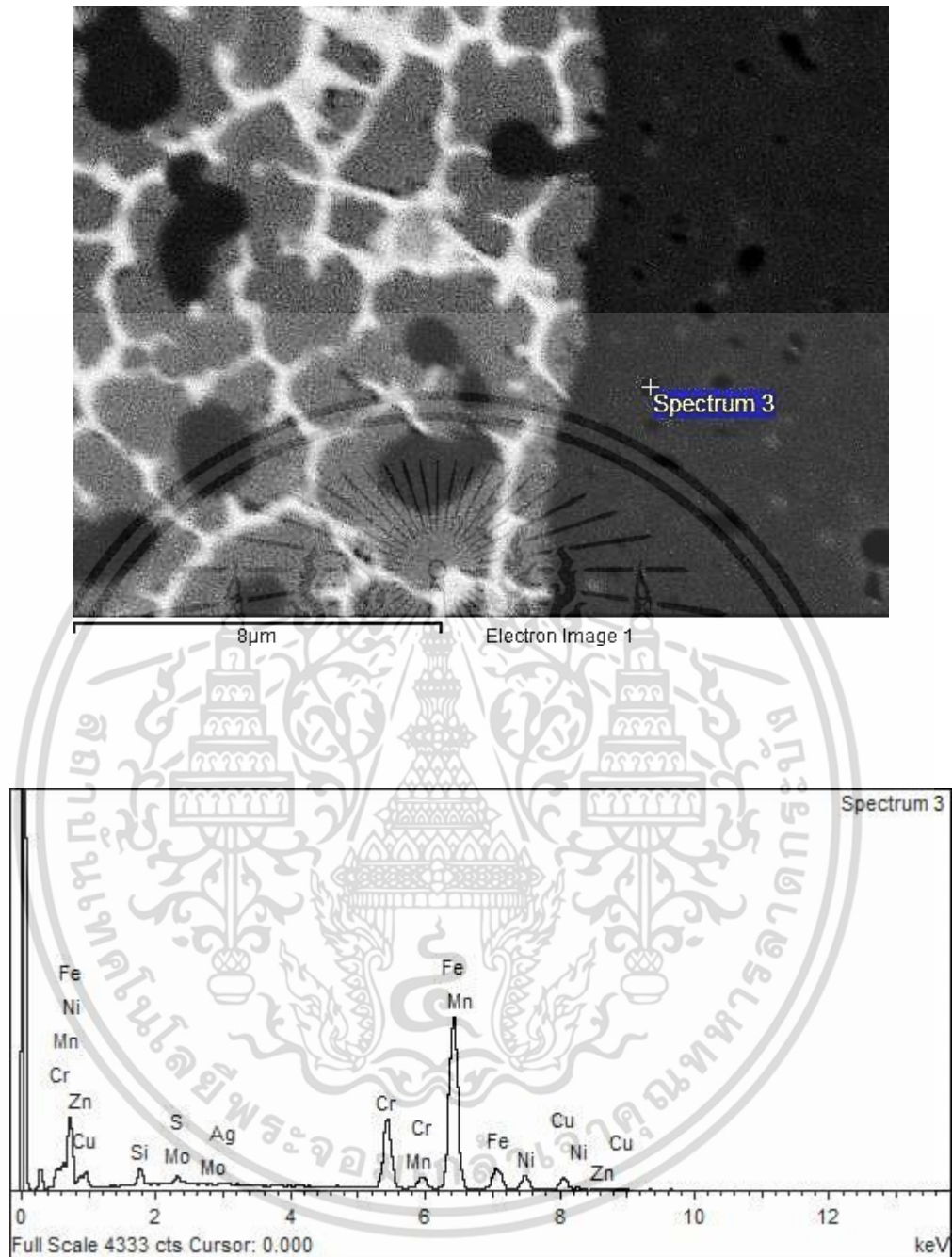
รูปที่ ค.43 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.45 MPa สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



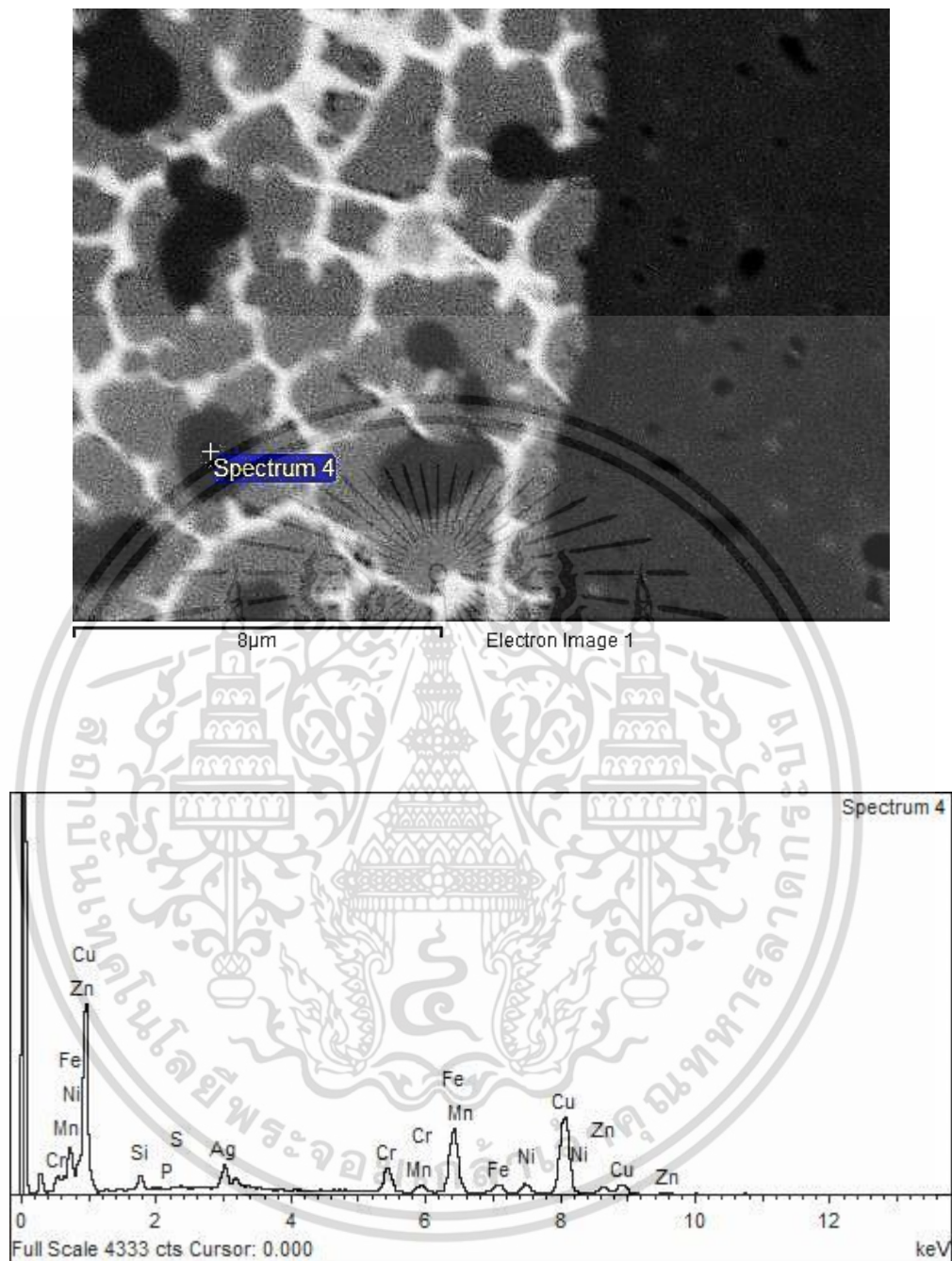
รูปที่ ค.44 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.45 MPa สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



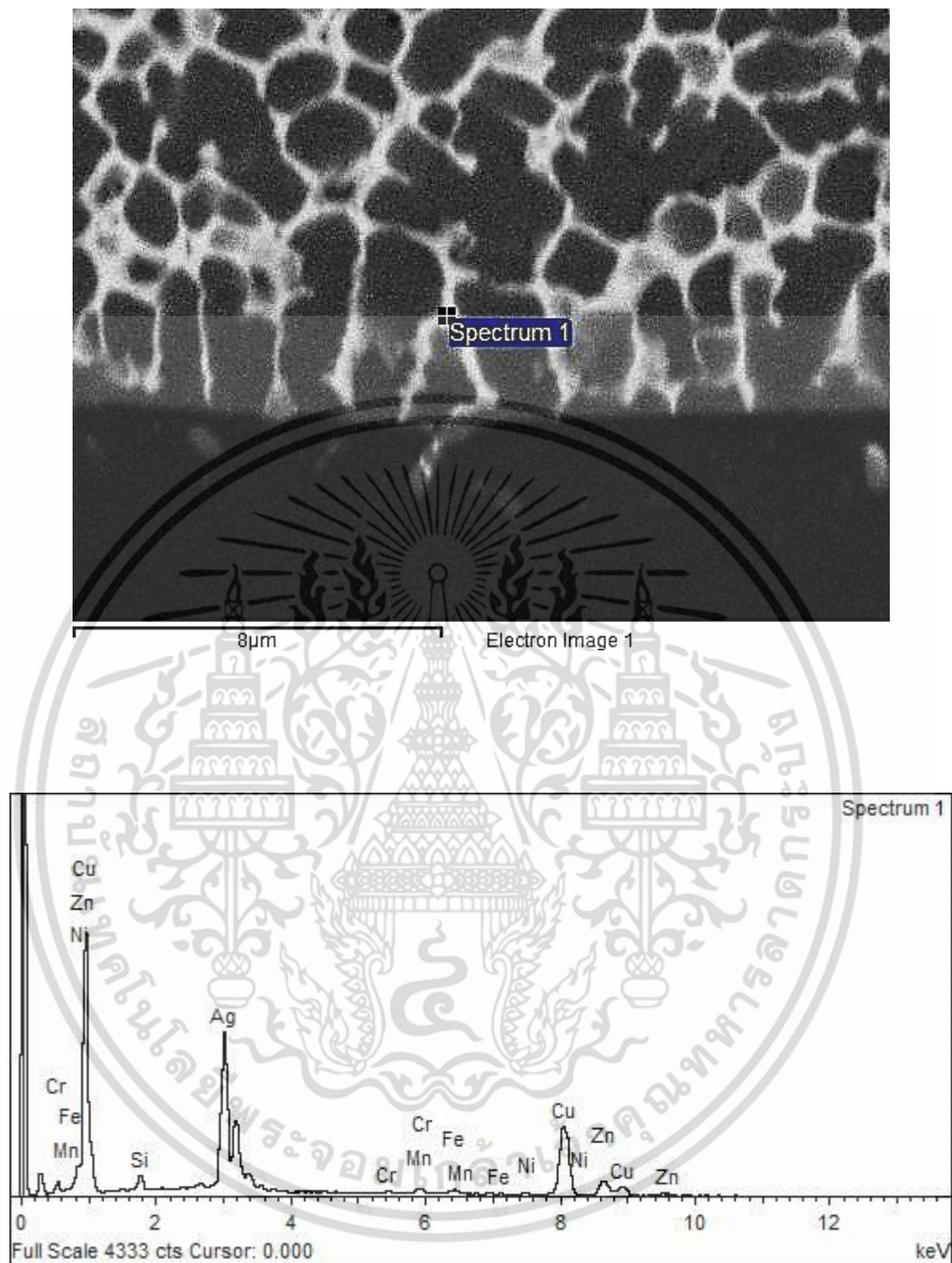
รูปที่ ค.45 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.45 MPa สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



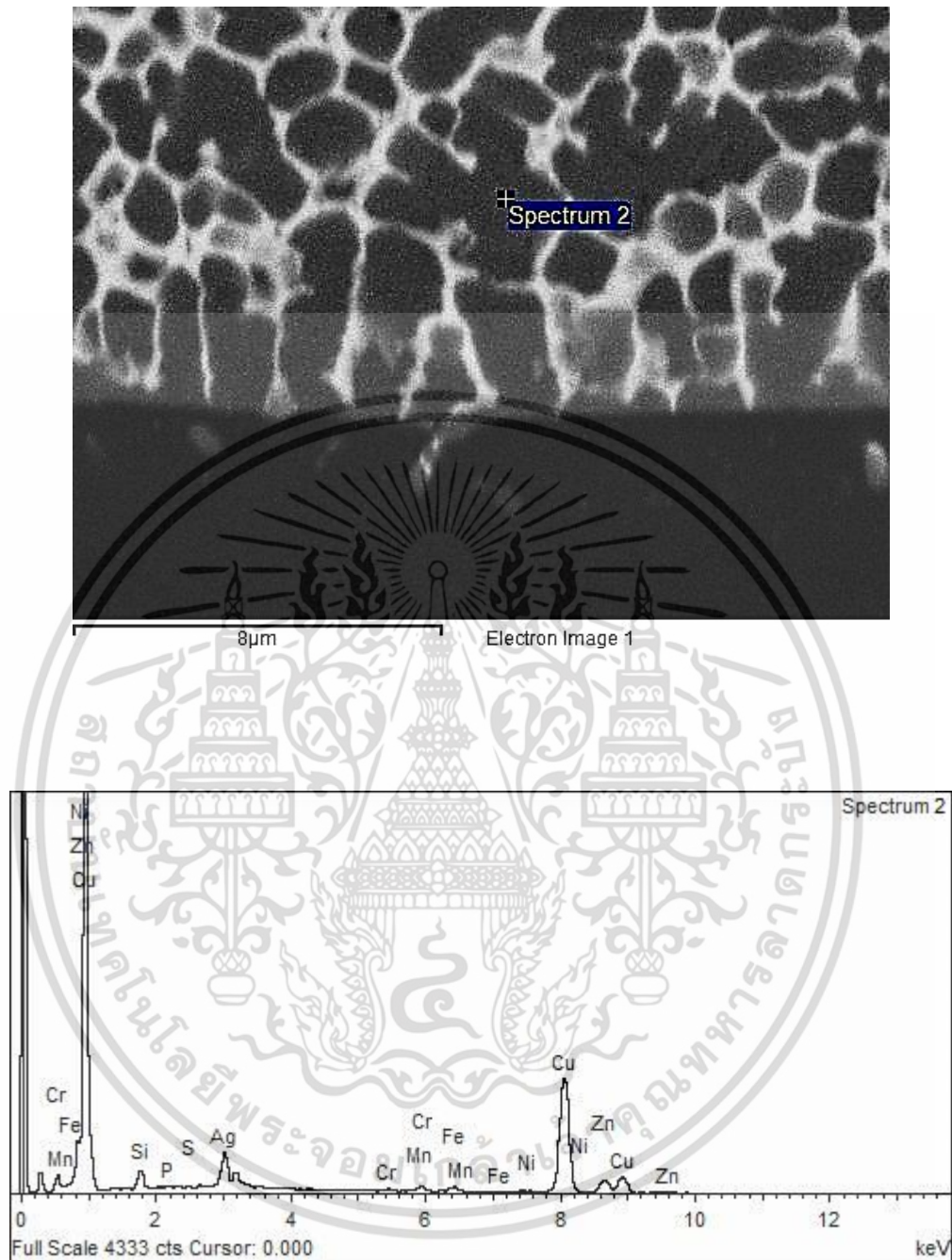
รูปที่ ค.46 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.45 MPa สเปกตรัมที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



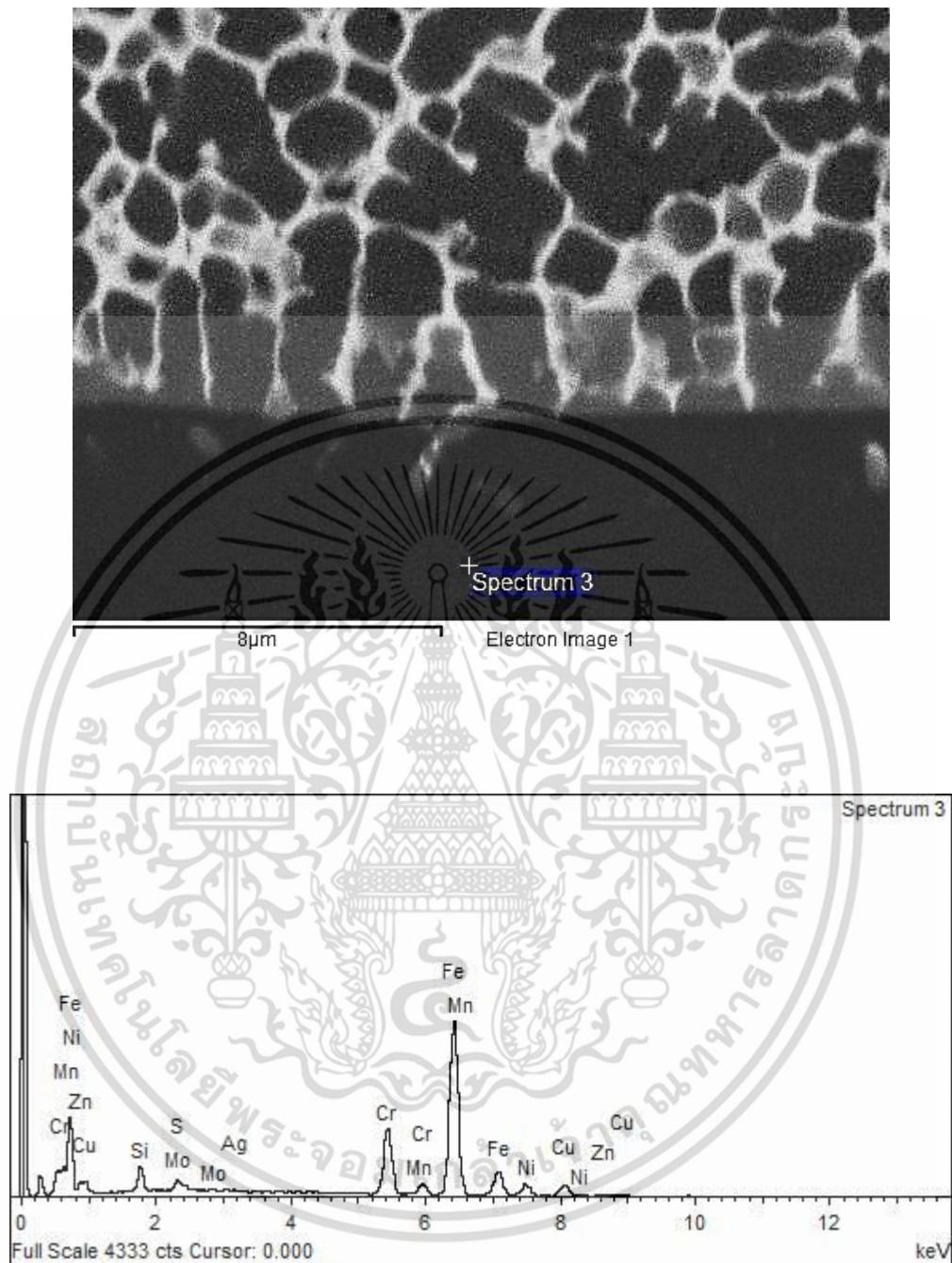
รูปที่ ค.47 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโตรด 0.5 MPa สเปกตรัมที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.48 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.5 MPa สเปกตรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.49 ผลวิเคราะห์ EDS แรงกดจากอิเล็กโทรด 0.5 MPa สเปกตรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายภูเมศวร์ แสงระยับ
วัน เดือน ปีเกิด	6 กรกฎาคม 2532 ที่จังหวัดตรัง
ที่อยู่	61 หมู่ 5 ตำบลควนปริง อำเภอเมืองตรัง จังหวัดตรัง 92000
ประวัติการศึกษา	2556 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ผลงานวิจัย	ภูเมศวร์ แสงระยับ กำธร สุขพิมาย กรรณชัย กัลยาศิริ. “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, กันยายน 2558. หน้า 25-30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้