

การสร้างรอยแตกร้าวดินเลนแบบโดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี
แล้วตามด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

นางสาวจิราวรรณ หม่อนกระโทก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**FABRICATION OF STAINLESS STEEL IMITATIVE
CRACK USING X-RAY LITHOGRAPHY WITH
SUSPENSION ELECTROPLATING TECHNIQUE**



Jirawan Monkrathok

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Industrial System and
Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การสร้างรอยแตก้าวดสเดนเลสลอกเลียนแบบโดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี
แล้วตามด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.นรา สมัตตภาพงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จงกล ศรีธร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.อิสรทัต พึ่งอัน)

กรรมการ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนดัธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จิราวรรณ หม่อนกระโทก : การสร้างรอยแตกร้าวสแตนเลสลอกเลียนแบบโดยใช้เทคนิค
เอกซเรย์ลิโธกราฟีแล้วตามด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (FABRICATION OF
STAINLESS STEEL IMITATIVE CRACK USING X-RAY LITHOGRAPHY WITH
SUSPENSION ELECTROPLATING TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร. จงกล ศรีธรรม, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบในก้อนโลหะสแตนเลสด้วย
กระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟีและเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานใน
การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย รูปแบบของรอยแตกร้าวที่สร้างจากกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี
สามารถสร้างรอยแตกร้าวที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตรได้ ในการทดลองใช้การชุบโลหะด้วย
ไฟฟ้าด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Suspension Electroplating ในการสร้างบล็อกวัสดุจากรูปแบบผงโลหะ
และซ่อนรอยแตกร้าวในภายในโลหะสแตนเลส โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 2 ปัจจัย ได้แก่
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและปริมาณผงโลหะสแตนเลส 316L และดีบุก โดยในงานวิจัยนี้มี
ผลตอบสนองคือค่ามุม θ ที่ได้จากการตรวจสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อ ECT ให้เข้าใกล้หรือ
ใกล้เคียงสแตนเลส ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นโดยใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
เท่ากับ 8 mA/cm^2 ปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L เท่ากับ 2.00 กรัม ปริมาณผงดีบุกเท่ากับ
3.00 กรัม มีคุณสมบัติที่ตอบสนอง ECT ใกล้เคียงหรือเหมือนสแตนเลสมาตรฐาน สามารถใช้เป็น
ชิ้นงานมาตรฐานในการสอบเทียบได้ เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูการกระจายตัวของผงโลหะ พบว่าผงโลหะมีการกระจายทั่วทั้ง
ชิ้นงาน และรูพรุนที่อยู่บนผิวชิ้นงานมีขนาดเล็กซึ่งต่ำกว่า sensitivity ของการตรวจสอบ ECT จึงไม่
นับว่าเป็นสิ่งแปลกปลอมหรือรอยแตกร้าวใด ๆ

JIRAWAN MONKRATHOK : FABRICATION OF STAINLESS STEEL
IMITATIVE CRACK USING X- RAY LITHOGRAPHY WITH SUSPENSION
ELECTROPLATING TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
JONGKOL SRITHORN, Ph.D.,110 PP.

LITHOGRAPHY/ELECTROPLATING/IMITATIVE CRACK/EDDY CURRENT

This research aims to study the fabricate of imitative Stress Corrosion Crack (SCC) into a block of stainless steel by the Synchrotron X-ray lithography (X-ray LIGA) and the suspension electroplating technique, which can be used as a reference specimen of electromagnetic NDT. The X-ray LIGA was used to fabricate the imitative SCC pattern with a small than 100 μm . The prepared pattern was inserted into a block of stainless steel formed by a suspension electroplating technique in the experiment. It was implemented to create a block of material from its powder form then hide an imitative SCC into a block of stainless steel. Two main factors, including 1. the current density, 2. the metal powder stainless steel 316L, and tin powder, have been varied in this study. This experiment's responses are the angle θ from the ECT response similar to the standard stainless steel. The suitable specimen can be achieved by using the current density of 8.00 mA / cm² and the powder of SUS316L powder of 2.00 g, the tin powder of 3.00 g to fabricate samples can lead to the relevant result. The results showed the specimen possibility similar to the standard stainless steel; it can be used as a reference specimen. The scanning electron microscope for dispersion of the metal powder showed that the metal powder is distributed evenly on the surface. The porosity on the sample's surface is

small and lower than the ECT's sensitivity, and these porosities are not identified as inclusion or crack.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature จิราภรณ์ นุ่มนาคะโท

Advisor's Signature จรูญ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและอนุเคราะห์ช่วยแนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงกล ศรีธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศรทัต พึ่งอัน รักษาการ หัวหน้าศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องรวมถึง แนวทางในการดำเนินงานที่ถูกต้อง ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ดร. พัฒนพงศ์ จันทร์พวง นักวิทยาศาสตร์ ระบบลำเลียงแสง และคณะทำงานประจำห้องปฏิบัติการทุกท่าน ณ ระบบลำเลียงแสงที่ 6 : Deep X-ray Lithography สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ที่คอยอำนวยความสะดวก เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงาน ให้การช่วยเหลือชี้แนะในเรื่องต่าง ๆ ตลอด ระยะเวลาที่ทำการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรศิริ จงกล คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และแนวทาง ข้อคิดต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน และสนับสนุนในการ ดำเนินงานวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงมาโดยตลอด

จิราวรรณ หม่อนกระโทก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การแตกร้างเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน.....	4
2.1.1 ลักษณะการแตกร้างเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน.....	5
2.2 LIGA (Lithographic, Galvanoformung, Abformung).....	6
2.3 กระบวนการลิโธกราฟี	6
2.4 หลักการเบื้องต้นในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	7
2.4.1 กฎการแยกสารด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์.....	9
2.4.2 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	10
2.4.3 ค่าของพีเอช.....	10
2.5 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย.....	11
2.5.1 วิธีการตรวจสอบด้วยสายตา.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	วิธีการตรวจสอบด้วยการแทรกซึม.....	11
2.5.3	วิธีการตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก.....	12
2.5.4	วิธีการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง.....	12
2.5.5	วิธีการตรวจสอบด้วยด้ายรังสี.....	12
2.5.6	วิธีการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน.....	13
2.6	ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย.....	14
2.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	18
2.8	การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ.....	19
2.9	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	26
3.1	เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.2	การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลองสำหรับการสร้าง ก่อนสแตนต์ด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	40
3.2.1	ปัจจัยที่สำคัญในการชุบโลหะ.....	40
3.3	การออกแบบและการสร้างหน้าปกกันรังสีเอกซ์ด้วยกระบวนการ ลิโธกราฟี.....	42
3.3.1	การออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor.....	42
3.3.2	การสร้างหน้าปกกันรังสีเอกซ์.....	43
3.4	การสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี.....	48
3.5	การชุบโลหะเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายใน ก่อนสแตนต์ด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	50
4	ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.1	ผลการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี.....	56
4.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก่อนสแตนต์ที่ได้จาก เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	ผลการกระจายตัวของผงโลหะบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM/ED.....	57
4.2.2	การศึกษาการเกิดรูพรุนบนผิวชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส.....	63
4.2.3	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุน.....	66
4.3	ผลการซ่อนรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลส ด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	68
4.4	ผลการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย.....	69
4.5.1	ผลการตรวจสอบคุณสมบัติตอบสนองต่อ Eddy Current ของชิ้นงาน.....	69
4.4.2	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	74
4.4.3	ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยวิธีกระแสไหลวน.....	76
4.5.4	ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยวิธีรังสี.....	77
5	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	78
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	78
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	79
	รายการอ้างอิง.....	80
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก รูปโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของผงโลหะ ของชิ้นงานจากเทคนิค SEM.....	84
	ภาคผนวก ข รูปพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานจากโปรแกรม Image J.....	91
	ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	100
	ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1	ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย.....	14
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของผงโลหะสเตนเลส เกรด 316L ผงคีนุก และน้ำยาชุบนิเกิล.....	29
3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	41
4.1	อัตราการกระจายตัวของผงโลหะต่อพื้นที่ในชิ้นงาน.....	62
4.2	ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงาน.....	64
4.3	แสดงค่ามุม θ ของชิ้นงานทดสอบชุบสเตนเลส.....	73
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการชุบสเตนเลสด้วยโปรแกรม Minitab 16.0.....	74



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของ Stress Corrosion Cracking.....	5
2.2 การเปรียบเทียบสารไวแสงด้วยกระบวนการลิโธกราฟี.....	7
2.3 โครงสร้างของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	9
2.4 สนามแม่เหล็กทฤษฎีที่สร้างจากกระแสไหลวน.....	13
2.5 การตรวจหารอยแตกในชิ้นงานโดยใช้กระแสไหลวน (www.thailandindustry.com).....	14
2.6 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของ SEM.....	18
2.7 แสดงการเกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์เฉพาะ.....	19
2.8 รอยแตกร้าวจากเทคนิคลิโธกราฟี (Noritaka Yusa et al. 2012).....	21
2.9 รอยแตกร้าวจำลองจากการพิมพ์แบบ 3D (Noritaka Yusa et al. 2016).....	21
2.10 รอยแตกจำลองจากเทคนิค X-ray LIGA (Cherdpong Jomdecha et al. 2018).....	22
3.1 แผนผังการดำเนินงาน.....	27
3.2 ผงสแตนเลส เกรด 316L.....	28
3.3 โครงสร้างจุลภาคของผงสแตนเลส เกรด 316L จาก SEM.....	28
3.4 ผงดีบุก.....	30
3.5 โครงสร้างจุลภาคของผงดีบุก จาก SEM.....	30
3.6 น้ำยาชุบโลหะนิกเกิล.....	31
3.7 เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง.....	31
3.8 เครื่องชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	32
3.9 เครื่อง hotplate stirrers IKA รุ่น C-MAG HS 7.....	32
3.10 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	33
3.11 เครื่องขัด รุ่น struers rotapol-25.....	33
3.12 ชุดมอเตอร์ดีดใบพัดสำหรับกวนสารละลาย.....	34
3.13 ปีกเกอร์สำหรับเตรียมสารละลาย.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	เครื่อง EVG aligner mask รุ่น mask aligner EVG 610.....35
3.15	เครื่อง Spin coater รุ่น WS-650MZ-23NPPB.....35
3.16	เครื่อง Optical surface profiler รุ่น Contour GT-K.....36
3.17	เครื่อง X-ray scanner.....36
3.18	กล้องจุลทรรศน์ รุ่น Olympus BX51.....37
3.19	เครื่อง Eddy current test systems รุ่น ELOTEST B300.....37
3.20	เครื่อง Energy Dispersive X-ray รุ่น QUANTA 250.....38
3.21	เครื่องอัลตราโซนิก.....38
3.22	สารละลายอะซิโตนและไอโซโพรพานอล.....39
3.23	สารเคมีสำหรับล้างสารไวแสง.....39
3.24	สารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ.....40
3.25	การกำหนดสัญลักษณ์ชื่อชิ้นงาน.....41
3.26	ลวดลายแตกร้าวที่ใช้ในการทดลอง.....42
3.27	หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีลวดลายจุลภาคนา 30 μm พิมพ์ลงบนฟิล์มใสด้วย แสงเลเซอร์.....43
3.28	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....44
3.29	แผ่นกราฟไฟต์ขนาด 1x1 นิ้ว ความหนา 250 μm45
3.30	แม่พิมพ์สารไวแสง AZP4620 บนแผ่นกราฟไฟต์.....46
3.31	การชุบโลหะทองคำด้วยไฟฟ้า.....47
3.32	หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ชุบด้วยทองคำ.....47
3.33	การสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยกระบวนการลิโธกราฟี.....48
3.34	องค์ประกอบของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน BL6 : DXL.....49
3.35	พลังงานส่วนต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง.....50
3.36	ชุดชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับชุบสแตนเลส.....51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.37	รอยแตกร้าวเลียนแบบสำหรับนำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....52
3.38	ชิ้นงานสำหรับชุบ โลหะเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบ.....53
3.39	การแบ่งตำแหน่งของชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDS.....54
4.1	รอยแตกร้าวเลียนแบบที่สร้างจากเทคนิคเอกซเรย์ลิโกราฟี.....56
4.2	ขนาดรอยแตกร้าวที่วัดจากโปรแกรม Stream Start.....57
4.3	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน.....58
4.4	แสดงสเปกตรัมจากการวิเคราะห์พื้นผิวแบบ point analysis ของชิ้นงานทดสอบการชุบสแตนเลส.....59
4.5	แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis ของชิ้นงานทดสอบการชุบสแตนเลส.....60
4.6	การกระจายตัวของผงสแตนเลสบนผิวชิ้นงาน.....61
4.7	พื้นที่รูพรุนบนผิวของชิ้นงานชุบสแตนเลส.....63
4.8	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส.....65
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนาของชิ้นงาน จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....66
4.10	รอยแตกร้าวลอกเลียนแบบที่อยู่บนก้อนสแตนเลส.....68
4.11	ก้อนสแตนเลสที่มีรอยแตกร้าวซ่อนอยู่ภายในจากกระบวนการชุบโลหะ ด้วยไฟฟ้า.....69
4.12	แสดงเส้นสัญญาณการตรวจสอบด้วย ECT ของชิ้นงาน.....71
4.13	การวัดค่ามุม θ ของเส้นสัญญาณ ECT.....72
4.14	กราฟแสดงส่วนตกค้างค่าผลตอบของมุม θ75
4.15	เส้นสัญญาณ ECT ในชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส.....76
4.16	แสดงรอยแตกร้าวในชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลสด้วยวิธี X-ray.....77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรม (National Physical Laboratory, National Corrosion Service) เนื่องจากมีความสำคัญต่อโครงสร้าง เพราะมีความแข็งแรง ความเหนียว และทนต่ออุณหภูมิสูง แต่ต้องเผชิญกับปัญหาการแตกร้าวจากอิทธิพลของความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking; SCC) (NACE International Headquarters) ซึ่ง SCC คือการแตกร้าวที่เกิดจากอิทธิพลของความเค้นแรงดึงและสภาวะที่มีฤทธิ์กัดกร่อน โดยความเค้นอาจจะอยู่ในรูปของแรงกดหรืออยู่ในรูปของความเค้นดกค้ำ ซึ่ง SCC เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดการพังทลายของโครงสร้าง เกิดการแตกร้าว หรือการรั่วซึมของสารเคมีจากภาชนะรับแรงดัน หรือระบบท่อส่งถ่ายได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งของโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ปิโตรเคมี ผลิตภัณฑ์เคมี รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า (NACE International Headquarters, 2002) ซึ่งในบางครั้งการกัดกร่อนอาจเกิดขึ้นจากจุดเล็ก ๆ ในระบบ ซึ่งทำให้ยากต่อการตรวจสอบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโรงงานอุตสาหกรรมและส่งผลกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจในระดับประเทศ จากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา ได้มีการสำรวจมูลค่าการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน ในปี ค.ศ. 2002 พบว่ามีการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกัดกร่อนประมาณ 276 พันล้านเหรียญสหรัฐ คิดเป็น 3.1% GDP (ผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ) ของสหรัฐอเมริกา (วนิดา พงศ์ศักดิ์สวัสดิ์, 2559) และจากการสำรวจความเสียหายจากการกัดกร่อนในประเทศไทยระหว่างปี 2552-2554 พบว่าการกัดกร่อนส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศมูลค่าประมาณ 466,600 ล้านบาท คิดเป็น 4.8% ของ GDP (เอกรัตน์ ไวยนิตย์, 2553)

จากปัญหา SCC ที่เกิดขึ้นทำให้มีการศึกษาและวิจัยการแตกร้าวจากอิทธิพลของความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งใช้วิธีการทั่วไปในการตรวจสอบ Stress Corrosion Cracking; SCC คือการใช้ (Non Destructive Testing-NDT) เช่น Liquid Penetrant Testing (PT) , Magnetic Particle Testing (MT) , Ultrasonic Testing (UT) และ Eddy Current (ECT) เป็นต้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบและการประเมินจุดบกพร่องในวัสดุต่าง ๆ เช่น รอยแตกร้าวหรือการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางโครงสร้าง ลักษณะสำคัญของการทดสอบแบบ NDT คือการทดสอบแบบไม่ทำ

ลายวัตถุหรือโครงสร้าง เป็นต้น ในการตรวจสอบโดยวิธี ECT จำเป็นต้องใช้ชิ้นงานมาตรฐานในการทดสอบวิธีการวัดและการพัฒนามาตรฐานการวัด มีหลายเทคนิคที่ใช้ในการผลิตรอยแตกลอกเลียนแบบ เช่น การใช้เครื่องจักรขนาดเล็ก และการพิมพ์สามมิติ เทคนิคเหล่านี้ไม่สามารถให้ความละเอียดของรอยแตกได้ดี

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า Noritaka Yusa et al. (2016) ได้ใช้การพิมพ์แบบ 3D ในการสร้างรอยแตกร้าวมีขนาดเล็กสุดเพียง 400 ไมโครเมตรเท่านั้น และรอยแตกร้าวที่ได้มีรูปร่างเป็นเส้นตรงไม่เหมือนรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง ทำให้ไม่สามารถใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานในการตรวจสอบ SCC ที่มีขนาดน้อยกว่า 100 ไมโครเมตรด้วยเทคนิค ECT ได้ เพื่อพัฒนารอยแตกร้าวลอกเลียนแบบให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบเพื่อใช้ตรวจสอบการแตกร้าวของชิ้นงานโดยเทคนิคการตรวจสอบ Eddy current ซึ่งศึกษาวิธีการสร้างชิ้นงานรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี (X-ray Lithography) ซึ่งจะให้ความละเอียดของรอยแตกร้าวที่ดีและมีความยืดหยุ่นของรูปทรงรอยแตกใกล้เคียงกับ SCC ที่เกิดขึ้น และใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ในการสร้างก้อนสแตนเลส ซึ่งจะส่งผลต่อเกณฑ์การควบคุมการทดลองว่าสมบัติที่ตอบสนอง Eddy current จะต้องใกล้เคียงกับสแตนเลส และทำการซ่อมรอยแตกร้าวในภายหลัง ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยจะได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบด้วยเทคนิค x-ray Lithography และ เทคนิค Electroplating ซึ่งสามารถใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานในการทดสอบวิธีการตรวจสอบ SCC ด้วยเทคนิค ECT

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบในสแตนเลสให้มีสมบัติที่ตอบสนอง Eddy current ใกล้เคียงหรือเหมือนสแตนเลส

1.2.2 เพื่อซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบได้ด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สร้างรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบที่มีรายละเอียดน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี (X-ray Lithography)

1.3.2 ซ่อมรอยแตกร้าวในก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Suspension Electroplating)

1.3.3 ตรวจสอบรอยแตกร้าวในสแตนเลสด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy current)

1.4 สถานที่ทำการวิจัย

1.4.1 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

1.4.2 ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ชิ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบเทคนิคการตรวจสอบ SCC ด้วยวิธี Eddy current และเป็นการพัฒนาวิธีการตรวจสอบ SCC ด้วยวิธี Eddy current

1.5.2 ได้กระบวนการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบของสแตนเลสโดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟีและเทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้า



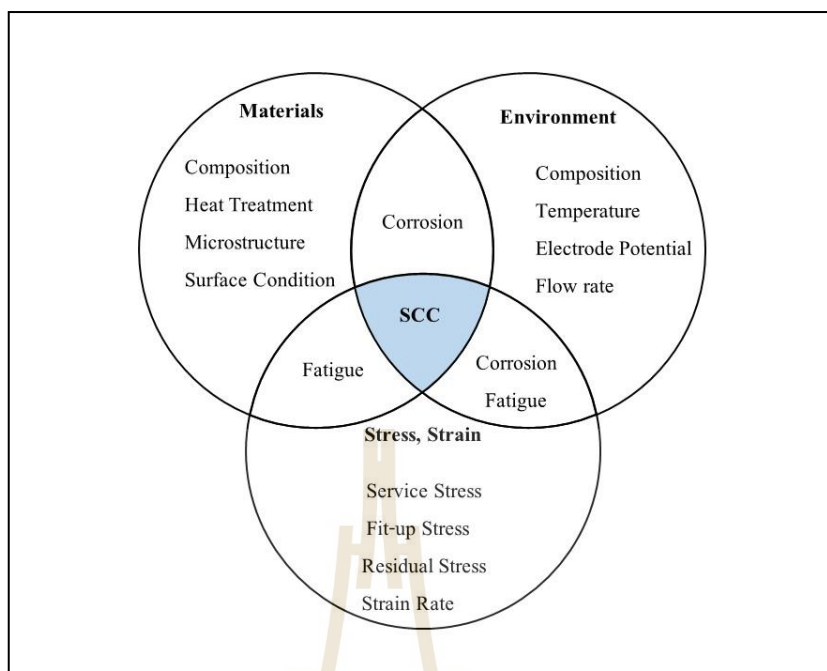
บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบโดยใช้เทคนิคลิโกราฟีและซ่อนรอยแตกร้าวด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และศึกษาการตรวจสอบรอยแตกร้าวในสแตนเลสด้วยเครื่อง Eddy current รวมทั้งศึกษาข้อมูลและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการที่จะนำไปประกอบการศึกษาจนบรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้ ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

2.1 การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน

การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking : SCC) เป็นการกัดกร่อนในโลหะ สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายรูปแบบตั้งแต่การกัดกร่อนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวไปจนถึงการกัดกร่อนที่รุนแรงที่เกิดขึ้นเฉพาะจุด (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2557) ซึ่งการเกิดความเสียหายด้วยกลไกการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นในสภาวะกัดกร่อน โดยเกิดจากการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งการเสียหายแบบ SCC ของโลหะทั่วไปจำเป็นต้องมีปัจจัย 3 อย่างเกิดขึ้นพร้อมกัน คือ ความเค้น อาจเป็นความเค้นตกค้างในวัสดุ ความเค้นจากภายนอกหรือความเค้นเนื่องจากความร้อน วัสดุที่ไวต่อการเกิด SCC และสภาวะแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (สยาม คำแก้วไสย, 2553) การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจจะไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะอาจมีรอยร้าวเล็ก ๆ เกิดขึ้นมากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองที่ไต้หวันต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมไม่ทนต่อคลอไรด์ไอออน ร่องรอยการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนที่มีความเค้นร่วมมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้ (Intergranular or Trans granular cracking) ขึ้นกับระดับความเค้น และความเข้มข้นของสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อน



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของ Stress Corrosion Cracking

2.1.1 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน

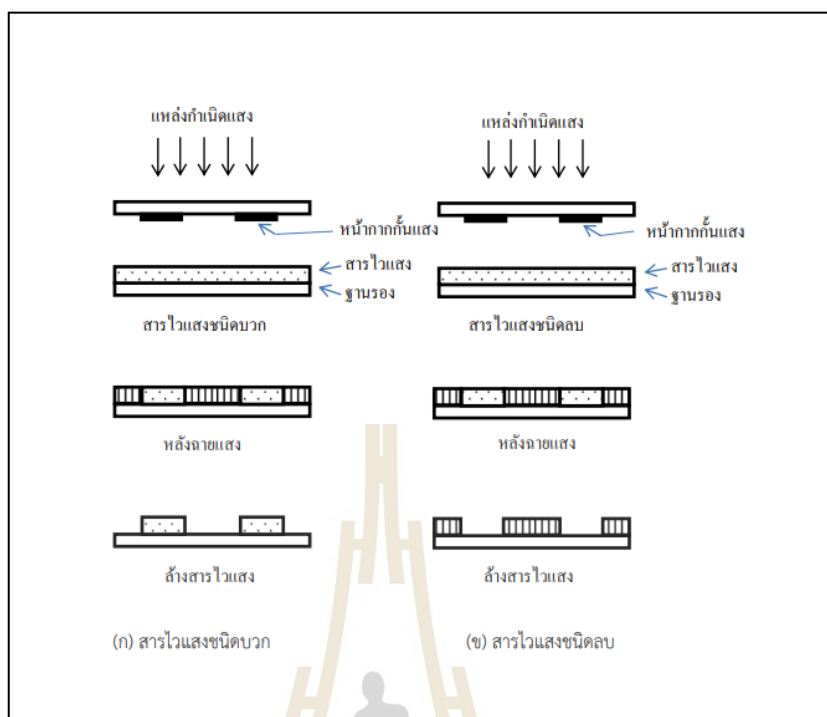
ความเค้นแรงดึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking : SCC) ซึ่งความเค้นแรงดึงที่กระทำต่อโลหะอาจเป็นความเค้นที่ให้กับโลหะในระหว่างใช้งาน หรือเป็นความเค้นตกค้างจากกระบวนการผลิต เช่น การอบชุบ การเชื่อม เป็นต้น โลหะ หรือโลหะผสมส่วนใหญ่ที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน มักมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนทั่วไปได้ดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมไทเทเนียม เป็นต้น ซึ่งสามารถพบได้ทั้งโลหะบริสุทธิ์ (Pure metal) และโลหะผสม (Alloys) แต่ความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของโลหะบริสุทธิ์สูงกว่าโลหะผสมมากจนอาจกล่าวได้ว่า SCC พบในโลหะบริสุทธิ์น้อยกว่าหรือแทบไม่เกิดเลย นอกจากนี้ในความเป็นจริงชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ทำจากโลหะส่วนใหญ่ต้องการสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) สมบัติดังกล่าวไม่สามารถพบได้ในโลหะบริสุทธิ์ แต่สามารถพบได้ในโลหะผสม ข้อด้อยของโลหะผสม คือ มีเฟสที่แตกต่างกัน การจัดเรียงตัวของเกรนในทิศทางต่างกัน ตลอดจนมีสารมลทิน หรือสารประกอบเชิงโลหะภายในโครงสร้างของโลหะผสม ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าโลหะบริสุทธิ์ (พรพสา วงศ์ปัญญา, 2557)

2.2 X-ray LIGA (Lithographic, Galvanoformung, Abformung)

LIGA เป็นภาษาเยอรมันแปลว่าการฉายแสง (Lithography) การชุบโลหะ (Electroplating) และการสร้างแม่พิมพ์ (Molding) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ผลิตโครงสร้างที่มีความสูงในระดับร้อยไมโครเมตร สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงมากกว่าความกว้าง (high aspect ratio) สิ่งที่ใช้เป็นแม่พิมพ์จะใช้สารไวแสง SU-8 พอลิอิไมด์ และ AZ ซึ่งขนาดและความสูงที่สามารถสร้างได้จะขึ้นอยู่กับแสงที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ ถ้าแสงมีพลังงานสูง (ความยาวคลื่นสั้น) จะสามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก และมีสัดส่วนความสูงต่อความกว้างมากขึ้น แสงที่นิยมใช้ เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต และรังสีเอกซ์ ซึ่งรังสีเอกซ์จะมีความยาวคลื่นในช่วง 10 nm ถึง 0.01 nm จึงสามารถสร้างโครงสร้างได้เล็ก และมีความคมมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นในช่วง 356 nm (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2560)

2.3 กระบวนการลิโธกราฟี

กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography) หมายถึงการใช้กระบวนการทางเคมีในการถอดแบบ ลวดลายต้นแบบที่เป็นลายเส้นทึบแสงลงบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งอาจเป็นการสร้างลวดลายลงบน กระดาษหรือวัสดุอื่น ๆ โดยวัสดุดังกล่าวต้องมีลักษณะพื้นผิวเรียบ ในการถอดแบบนี้จะใช้ สารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เรียกสารดังกล่าวว่า สารไวแสง (Photoresist) สารไวแสงสามารถจำแนกออกได้เป็นสองชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive-tone photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative-tone photoresist) ซึ่งสารไวแสงทั้งสองชนิดนั้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปในลักษณะที่แตกต่าง กัน โดยสารไวแสงชนิดบวก บริเวณที่มีแสงมาตกกระทบจะสามารถล้างออกได้ด้วยสารเคมี เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น ส่วนสารไวแสงชนิดลบ บริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบจะสามารถล้างออกได้ด้วยสารเคมี เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น ซึ่ง สารไวแสงที่ใช้เป็นแม่พิมพ์เปรียบเสมือนฉากรับภาพที่ฉายผ่านหน้ากากกันแสง ลวดลายที่ปรากฏจะเหมือนหน้ากากต้นแบบทุกประการ เมื่อนำสารไวแสงไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง จะได้พอลิเมอร์ โดยที่ความสูงที่สามารถสร้างได้ขึ้นอยู่กับความหนาของสารไวแสงที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของความสูงขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ด้วย โดยแสงที่มีพลังงานสูงกว่าสามารถใช้สร้างลวดลายที่มีความสูงมากกว่า ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟีโดยทั่วไปมีแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้แก่ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 365 ถึง 405 nm กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยสารไวแสงทั้งสองชนิด แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการใช้สารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบสารไวแสงด้วยกระบวนการลิโธกราฟี

นอกจากนี้ กระบวนการลิโธกราฟียังมีการพัฒนากระบวนการเพื่อให้สามารถสร้างลวดลายที่มีอัตราส่วนความสูงมากกว่าความกว้างมากขึ้น โดยใช้แสงที่มีพลังงานสูงในการฉายผ่านหน้ากากกันแสง กระบวนการนี้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีอัตราส่วนความสูงมากกว่าความกว้างถึง 10 เท่า และแม่พิมพ์ที่ได้จะมีลวดลายที่คมชัดมากกว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงที่ใช้ในกระบวนการนี้ได้แก่ รังสีเอกซ์ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1 nm ดังนั้นหน้ากากที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ไม่สามารถผ่านไปได้ โดยทั่วไปจะใช้โลหะที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ทอง และเงิน เป็นต้น หน้ากากกันรังสีเอกซ์นี้จะถูกสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ ดังนั้นฐานรองหน้ากากจึงต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ผ่านได้ดี (ศักดิ์ศรี สุภักษร)

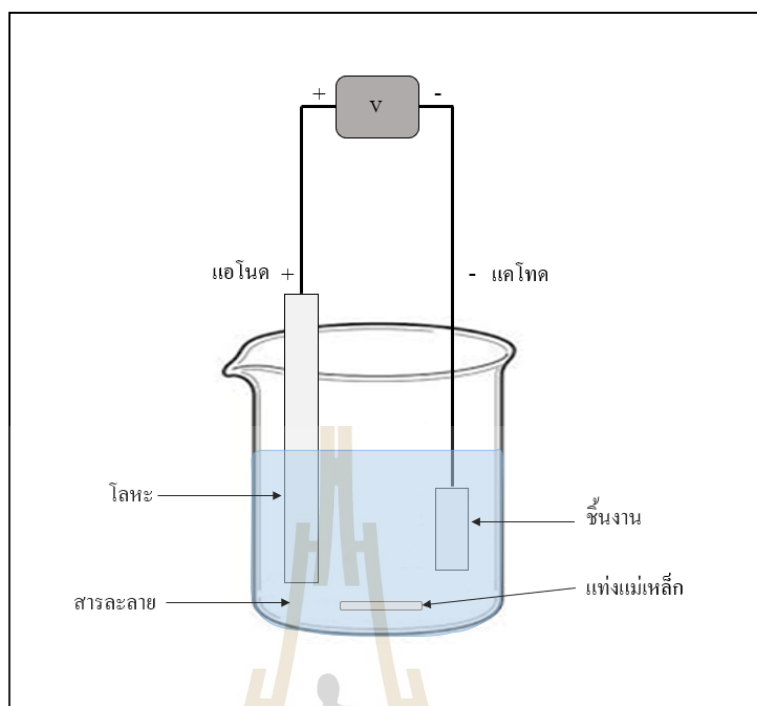
2.4 หลักการเบื้องต้นในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เป็นกระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเครื่องกำเนิดกระแสตรง (DC.) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ขั้วไฟฟ้า (Electrode) คือ แผ่นตัวนำที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วต่อกับเซลล์ไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ แบ่งเป็น ขั้วแอโนด (Anode) และ ขั้วแคโทด (Cathode) และสารละลาย

อิเล็กโทรไลต์ เมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว โดยผ่านสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของเกลือของโลหะที่ต้องการ โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านสารละลายในทิศทางของไอออนบวก (อิเล็กตรอนไหลใน ทิศทางตรงกันข้าม) โลหะที่ถูกทำให้ละลายอยู่ในรูปของไอออนที่มีประจุบวกจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบหรือแคโทดเกิดเป็นอะตอมของโลหะเคลือบติดอยู่ที่ผิวของชิ้นงาน เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถใช้อัตราการไหลดังกล่าวเพื่อวัดอัตราการเกิดของปฏิกิริยาได้ ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ ขั้วบวกจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้ไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลาย เพื่อชดเชยไอออนของโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นอะตอมของโลหะขณะชุบ



เมื่อ	M	คือ	วัสดุที่เกิดปฏิกิริยา
	M^{n+}	คือ	จำนวนไอออนของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา
	ne^-	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

2.4.1 กฎการแยกสารด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์

กฎการแยกสารด้วยไฟฟ้าของ ไมเคิล ฟาราเดย์ กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายเข้ามาในเซลล์ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงสมมูลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$Q = F \times \text{No. equivalents} \quad (2.1)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกพาเข้าสู่เซลล์ มีหน่วยเป็น C

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 96,485 คูลอมบ์ (C) หรือ 6.022×10^{23} อิเล็กตรอน

เมื่อการไหลของกระแส (i) คงที่ที่ 1 แอมแปร์ (A) ในเวลา (t) 1 วินาที จะได้ว่า

$$Q = i \times t \quad (2.2)$$

ซึ่งจากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$F \times \text{No. equivalents} = i \times t$$

$$F \times n \left\{ \frac{m(g)}{MW} \right\} = Q$$

$$\text{Mole} = \frac{Q}{nF}$$

เมื่อ n คือ จำนวนโมลของอิเล็กตรอน

ดังนั้นจากกฎข้อที่หนึ่งของฟาราเดย์สามารถนำมาใช้ในการควบคุมตัวแปรในการชุบโลหะได้ คือ กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการชุบโลหะ กล่าวคือเมื่อใช้กระแสไฟฟ้ามากแต่ใช้เวลาน้อย กับการใช้กระแสน้อยแต่ใช้เวลามาก จะทำให้ได้ปริมาณโลหะที่ต้องการชุบเหมือนกัน

2.4.2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density)

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบหรือแคโทด คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยปกติความหนาแน่นของกระแสที่ใช้จะเป็นหน่วยต่อพื้นที่ของชิ้นงานที่ต้องการชุบ (mA/cm^2) การคำนวณหาพื้นที่ของชิ้นงานที่ต้องการชุบเพื่อหาความหนาแน่นของกระแสที่ต้องจ่ายจะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นกระแสและพื้นที่จึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอ

2.4.3 ค่าของพีเอช (pH)

การควบคุมค่าพีเอช (pH values) เป็นสิ่งสำคัญมากในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยค่าพีเอชของน้ำยาชุบ ถู้อค่า พีเอช 7 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นกลาง ค่าพีเอชตั้งแต่ 7 ลงมาจนถึง 1 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นกรด และตั้งแต่ 7 จนถึง 13 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นด่าง ซึ่งค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบโลหะเป็นอย่างมาก กล่าวคือ ถ้าค่าของพีเอชน้อยแสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดน้อยลง และส่งผลต่อความเงาและแนวโน้มน้ำที่ จะเกิดรูพรุนขึ้น (รัญชน์ สงวนหนู, 2553) แต่ถ้าค่าของพีเอชมากแสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดน้อยลงเช่นเดียวกัน ในการชุบเคลือบสารละลายอิเล็กโทรไลต์มักจะมีค่า pH เป็นกรด ซึ่งค่า pH ที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการชุบเคลือบนิเกิลจะอยู่ในช่วง 3-5 และอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30-60 °C

2.5 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) คือ การใช้เทคนิคการตรวจสอบที่ไม่ทำลายวัสดุในการค้นหา วัด และวิเคราะห์สิ่งต่าง ๆ ในวัสดุ ส่วนประกอบ หรือโครงสร้าง การทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นที่นิยมใช้กันมาในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต และการตรวจสอบแบบไม่ทำลายยังมีประโยชน์อย่างมากเมื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายควบคู่ไปกับการตรวจสอบวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา การทดสอบทางกล และการทดสอบทางเคมี การใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายในการวิเคราะห์ความเสียหายจะช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถตรวจสอบชิ้นงานที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น โดยทั่วไปผู้วิเคราะห์ความเสียหายมักจะใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายควบคู่ไปกับการตรวจสอบด้วยสายตา ซึ่งเป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่รวดเร็วที่สุด แต่อย่างไรก็ตามรอยบกร่องหรือความไม่ต่อเนื่องใด ๆ อาจเกิดขึ้นในตำแหน่งหรือขนาดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย เพื่อช่วยให้สามารถตรวจสอบรอยบกร่องดังกล่าวได้ (สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์, 2556) วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสามารถตรวจสอบหาความผิดปกติหรือความบกพร่องในชิ้นงานได้ 3 ประเภท คือ ความเสียหายที่ผิว ความเสียหายใต้ผิว และสมบัติที่แตกต่างกันในวัสดุ การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยทั่วไปที่นิยมใช้แบ่งออกเป็น 6 วิธี ได้แก่

2.5.1 วิธีตรวจสอบด้วยสายตา

วิธีตรวจสอบด้วยสายตา (Visual testing : VT) เป็นการตรวจสอบชิ้นงานโดยใช้สายตาของผู้ทดสอบเป็นหลัก การตรวจสอบด้วยสายตาเป็นการทดสอบโดยไม่ทำลายเบื้องต้นที่สำคัญ และควรกระทำก่อนการทดสอบวิธีอื่น เนื่องจากการตรวจสอบที่ง่าย แต่ต้องใช้สายตาเป็นหลัก ซึ่งสายตาที่อ่อนล้าอาจทำให้การตรวจสอบหรือการตัดสินใจเกิดความผิดพลาดได้ จึงจำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้และความชำนาญสูง ซึ่งการตรวจด้วยสายตาสามารถตรวจสอบได้เฉพาะบริเวณผิวหน้าเท่านั้น ผู้ตรวจสอบอาจมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการตรวจสอบได้แก่ แว่นขยาย เครื่องมือวัดความยาว เป็นต้น นอกจากนี้ผู้ตรวจสอบยังต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อการตรวจสอบด้วย

2.5.2 วิธีตรวจสอบด้วยการแทรกซึม

วิธีตรวจสอบด้วยการแทรกซึม (Penetrant testing : PT) เป็นวิธีการหารอยบกร่องหรือความไม่ต่อเนื่อง สามารถทดสอบได้กับวัสดุทุกชนิดที่ไม่เป็นรูพรุน เช่น พลาสติก แก้ว โลหะเซรามิค เป็นต้น การทดสอบด้วยวิธีนี้จะอาศัยหลักของปฏิกิริยาแทรกซึม (Capillary action) ซึ่งเป็น

ปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ โดยการทาหรือฟ้นของเหลวที่มีคุณสมบัติแทรกซึมเข้าไปตามรอยร้าวหรือรูเล็ก ๆ ได้ดี จากนั้นใช้สารเคมีหรือสารละลายที่มีคุณลักษณะคล้ายกระดาษซับฟ้นหรือรอยตรงบริเวณที่ต้องการทดสอบ หากมีรอยแตกร้าว รอยบกรร่งหรือความไม่ต่อเนื่องใด ๆ บนผิวนงานจะเกิดเป็นเส้นหรือแนวของสารย้อมสีให้เห็น ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่จะไม่สามารถทราบความลึกของรอยแตกร้าวได้

2.5.3 วิธีตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก

วิธีตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic particle testing : MT) เป็นการทดสอบหารอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องบนพื้นผิวของวัตถุ โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการตรวจสอบความเสียหายแบบไม่ทำลายที่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีความสะดวก ให้ผลเร็ว สามารถปฏิบัติได้ที่หน้างานที่มีความเสียหายเกิดขึ้น ทำความสะอาดหลังการทดสอบได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายไม่สูง ในการตรวจสอบทำได้โดยโรยผงเหล็กย้อมสีขนาดเล็กลงบริเวณที่ทดสอบ หากพบรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานบริเวณดังกล่าวจะปรากฏเป็นผงเหล็กเกาะกันเป็นเส้นตามรอยแตกร้าว แต่ข้อจำกัดของวิธีอนุภาคแม่เหล็กจะไม่สามารถทดสอบในชิ้นงานที่มีความหนาได้ เนื่องจากอำนาจสนามแม่เหล็กส่งผ่านลงไปไม่ถึง

2.5.4 วิธีตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

วิธีคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic testing : UT) เป็นการตรวจสอบโดยใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz ในการตรวจหาการแตกร้าวที่พื้นผิวและความบกพร่องภายใน โดยใช้หลักการนำคลื่นเสียงความถี่สูงนี้ไปสะท้อนกับความบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องใด ๆ ในวัสดุ ซึ่งเป็นหัวตรวจสอบเพียโซอิเล็กทริก ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณทางกลหรือเปลี่ยนจากสัญญาณทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า วิธีคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถใช้กับชิ้นงานที่มีความหนาได้และไม่จำกัดชนิดของรอยบกรร่งหรือความไม่ต่อเนื่อง อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย และเครื่องทดสอบรุ่นใหม่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ แต่ในการตรวจสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงจำเป็นต้องปรับเทียบเครื่องมือก่อนการทดสอบทุกครั้ง และการแปลผลการทดสอบจากสัญญาณ ผู้ทดสอบต้องมีทักษะและความชำนาญสูง

2.5.5 วิธีตรวจสอบด้วยรังสี

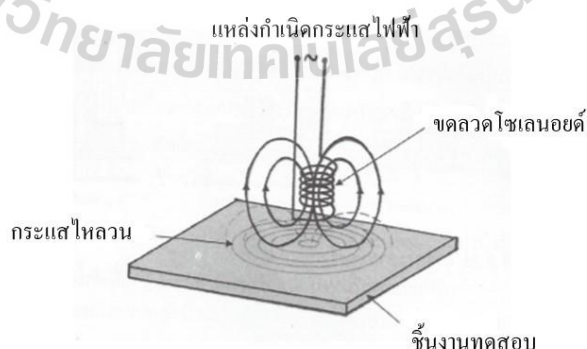
วิธีตรวจสอบด้วยรังสี (Radiographic testing : RT) เป็นวิธีที่นิยมในการตรวจสอบหาความบกพร่องในชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย หลักการตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะใช้แหล่งกำเนิดรังสีเพื่อปล่อยรังสีพลังงานสูงให้ผ่านชิ้นงานที่เกิดความเสียหายบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนที่เป็นรอยแตกในชิ้นงานจะทำให้รังสีไม่สามารถผ่านทะลุไปได้ และจะทิ้งภาพของรอยแตกไว้ในฉากรับรังสีด้านหลังชิ้นงาน ผู้วิเคราะห์ความเสียหายจะสามารถตรวจสอบขนาดและลักษณะของรอยแตก

ได้จากรูปที่เกิดขึ้น ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยรังสี จะต้องใช้รังสีที่มีพลังงานสูงเท่านั้น เช่น รังสีเอกซ์ (X-ray) หรือรังสีแกมมา (Gamma ray) รังสีที่มีพลังงานสูงเหล่านี้จะสามารถทะลุทะลวงผ่านชิ้นงานทดสอบได้ง่าย อำนาจในการทะลุทะลวงผ่านของรังสีจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความหนาของวัสดุ วัสดุที่มีความหนามากจะทำให้รังสีทะลุผ่านได้ยากกว่าวัสดุที่มีความหนาน้อย ผลของความแตกต่างในการทะลุทะลวงจะแสดงถึงความแตกต่างในโครงสร้างภายในของวัสดุ ซึ่งจะแสดงอยู่บนแผ่นฟิล์มหรือจอแสดงผล

2.5.6 วิธีตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน

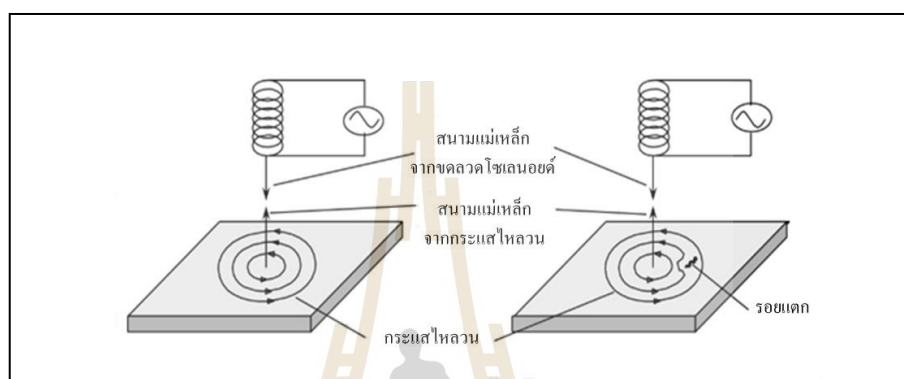
วิธีการตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy current testing : ECT) เป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ใช้หลักการของแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบหาความบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องใด ๆ ในชิ้นงานทดสอบ กระแสไหลวน (Eddy current) จะถูกสร้างผ่านกระบวนเหนี่ยวนำด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเริ่มจากการผ่านกระแสไฟฟ้าสลับในตัวนำไฟฟ้า เช่น ขดลวดทองแดงแล้วทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้า (Dacon Inspection Service, 2017)

ในการตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงาน จำเป็นจะต้องใช้หัวตรวจ (probe) ที่ประกอบด้วยขดลวดโซเลนอยด์ และเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสลับในขดลวดโซเลนอยด์แล้วจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการขยายตัวและหดตัวสลับกันไปตามลักษณะของกระแสไฟฟ้าสลับที่ใช้ เมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่นำไฟฟ้าไปวางไว้ในรัศมีของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและเกิดกระแสไหลวนขึ้นในชิ้นงานทดสอบ กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กทุติยภูมิ (secondary magnetic field) ซึ่งมีทิศตรงกันข้ามกับทิศของสนามแม่เหล็กปฐมภูมิในขดลวดโซเลนอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กทุติยภูมิที่สร้างจากกระแสไหลวน

การใช้กระแสไหลวนเพื่อตรวจสอบหาตำแหน่งของรอยแตกในชิ้นงานทดสอบสามารถทำได้โดยการตรวจหาความไม่ต่อเนื่องในการไหลแบบวงกลมของกระแสไหลวน รอยแตกในชิ้นงานจะทำให้กระแสไหลวนมีขนาดลดลง ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในขนาดของกระแสไหลวนที่ตำแหน่งใด ๆ บนชิ้นงานทดสอบ จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของรอยแตกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การตรวจสอบหารอยแตกในชิ้นงานโดยใช้กระแสไหลวน (www.thailandindustry.com)

2.6 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) ทั้งหมด 6 วิธี จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

วิธีตรวจสอบ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีตรวจสอบด้วยสายตา	• สามารถใช้ได้ง่ายสำหรับวัสดุเกือบทุกประเภท • ราคาถูก • ตรวจสอบได้อย่างรวดเร็ว • ข้อมูลที่ได้สามารถบันทึกได้อย่างถาวร • สามารถทำได้อย่างอัตโนมัติ	• การตรวจสอบทางตรงจำกัดอยู่บนผิวเท่านั้น • การตรวจสอบทางอ้อมต้องการผู้มีความรู้และเชี่ยวชาญสูง • การพึ่งพาของข้อมูลที่ได้จากการมองเห็นเท่านั้น • ไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (ต่อ)

วิธีตรวจสอบ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีตรวจสอบด้วยการแทรกซึม	• ง่ายในการใช้งาน • สามารถใช้ได้กับวัสดุหลาย ๆ ประเภท • สามารถตรวจสอบพื้นผิวขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วและมีค่าใช้จ่ายไม่แพง • สามารถตรวจสอบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ • สามารถเห็นความเสียหายได้โดยตรงบนผิวของชิ้นงาน • การลงทุนครั้งแรกสำหรับอุปกรณ์มีราคาไม่แพง • สามารถนำอุปกรณ์ไปตรวจสอบภาคสนามได้	• ตรวจสอบได้เฉพาะผิวที่แตกเท่านั้น • วัสดุต้องมีผิวเรียบ ไม่มีช่องว่าง • การทำความสะอาดผิวก่อนการทดสอบเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง • ต้องใช้กระบวนการหลายขั้นตอนภายใต้ภาวะควบคุม • Smearing ของโลหะอาจเกิดขึ้นได้จากการขัดชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ อาจต้องทำการกัดกรดก่อนที่จะตรวจสอบ • จำเป็นต้องทำความสะอาดชิ้นงานหลังการตรวจสอบ
วิธีตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก	• สามารถตรวจสอบได้ทั้งบนผิวและใต้ผิว • สามารถตรวจสอบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ • ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดอย่างดีก่อนการตรวจสอบเมื่อเทียบกับวิธีอื่น • สามารถตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วและเห็นผลได้ง่ายบนผิวของชิ้นงาน • ราคาไม่แพง • สามารถนำอุปกรณ์ไปตรวจสอบภาคสนามได้	• ไม่สามารถตรวจสอบวัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม หรือเหล็กกล้าไร้สนิม • ถ้าต้องการตรวจสอบชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีกำลังสูง • ชิ้นงานบางอย่างอาจต้องทำการกำจัดผิวเคลือบก่อนทำการตรวจสอบ • มีความสามารถจำกัดในการตรวจสอบรอยแตกใต้ผิว ความลึกที่มากที่สุดคือ 0.6 นิ้ว • การเรียงตัวของฟลักซ์แม่เหล็กและทิศทางของการตรวจสอบต้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (ต่อ)

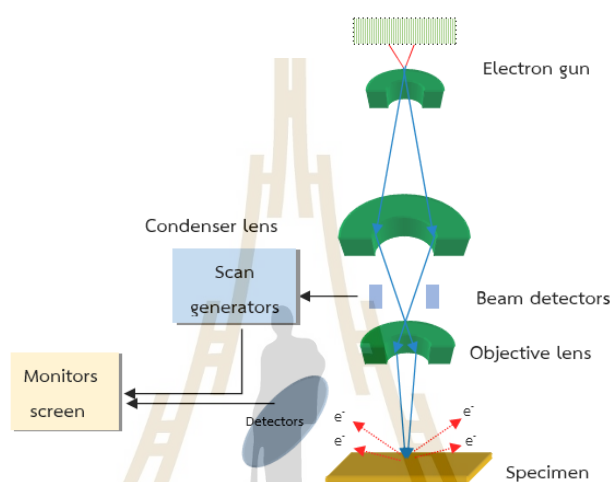
วิธีตรวจสอบ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีตรวจสอบด้วยรังสี	• สามารถตรวจสอบได้สำหรับวัสดุทุกชนิดและทุกความหนาแน่น • สามารถตรวจสอบอุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบย่อย ๆ • มีการเตรียมผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด • ไร้ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนา การกัดกร่อน รอยแตก และการเปลี่ยนความหนาแน่นของชิ้นงาน • สามารถตรวจสอบได้ทั้งบนผิวและใต้ผิว • สามารถบันทึกผลการตรวจสอบได้อย่างถาวร	• ต้องมีการอบรมและฝึกฝนเป็นอย่างดีก่อนใช้งาน • ต้องสามารถเข้าถึงชิ้นงานได้ทั้งสองด้าน • ต้องระวังทิศทางของการแผ่รังสีของอุปกรณ์ และทิศทางของรอยแตก • ไม่สามารถหาความลึกของรอยแตกได้จากการตรวจสอบเพียงมุมเดียว • การลงทุนในอุปกรณ์ครั้งแรกมีราคาสูง
วิธีการตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน	• ไร้ต่อรอยแตกขนาดเล็ก • สามารถตรวจสอบตำแหน่งทั้งบนผิวและใต้ผิวได้แต่ไม่ลึกมาก • สามารถรู้ผลการตรวจสอบทันที • อุปกรณ์ในการตรวจสอบสามารถขนย้ายได้ง่าย • สามารถใช้วิธีนี้กับการตรวจสอบอื่น ๆ ได้อีกนอกเหนือจากหาดำหนึในชิ้นงาน • ไม่จำเป็นต้องให้ห้วทดสอบของเครื่องสัมผัสกับผิวของชิ้นงาน • สามารถตรวจสอบวัสดุนำไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และรูปร่างซับซ้อนได้	• ต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้เท่านั้น • ต้องสามารถเข้าถึงผิวของชิ้นงานได้ • ต้องการความชำนาญและการฝึกฝนอย่างมากของผู้ทดสอบ • การแต่งผิวและความหยาบของผิวอาจทำให้ข้อมูลที่ได้รับผิดพลาดได้ • จำเป็นต้องมีมาตรฐานในการอ้างอิงเปรียบเทียบ • จำกัดความลึกของการตรวจสอบ • ไม่สามารถตรวจสอบรอยแตกที่ขนานไปกับทิศทางของกระแสไหลวน

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (ต่อ)

วิธีตรวจสอบ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	• สามารถตรวจสอบรอยแตกได้ทั้งบนผิวและใต้ผิวชิ้นงานทดสอบ • สามารถตรวจสอบรอยแตกได้ในระดับความลึกที่ลึกกว่าวิธีการตรวจสอบอื่น ๆ • สามารถตรวจสอบชิ้นงานได้จากด้านเดียว • มีความถูกต้องแม่นยำสูงในการหาตำแหน่งและขนาดของรอยแตก • มีความต้องการไม่มากในการเตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบ • สามารถได้ผลการทดสอบทันที • สามารถเห็นภาพรายละเอียดของรอยแตกได้ • สามารถใช้ในการวัดความหนาของชิ้นงานได้ด้วย	• คลื่นเสียงอัลตราโซนิกต้องสามารถเข้าถึงและผ่านผิวของชิ้นงานได้ • ต้องมีการอบรม และฝึกฝนเป็นอย่างดีก่อนการใช้งาน • โดยปกติต้องการวัสดุตัวกลางเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านคลื่นเสียงไปสู่ชิ้นงานทดสอบ • ไม่เหมาะสมที่จะใช้ตรวจสอบวัสดุที่มีผิวหยาบ รูปทรงไม่แน่นอน ชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่มีความบางและมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน • ไม่เหมาะสมที่จะใช้ตรวจสอบชิ้นงานเหล็กหล่อ และโลหะอื่นที่มีเกรนหยาบ เนื่องจากความสามารถในการส่งผ่านเสียงที่ต่ำ และสัญญาณรบกวนที่มาก • อาจไม่สามารถตรวจสอบรอยแตกที่ขนาดไปกับคลื่นเสียง • ต้องการชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงเพื่อทำการสอบเทียบ และเปรียบเทียบลักษณะของรอยแตก

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อัจฉราพร ศรีอ่อน (2559) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างภายนอกหรือพื้นผิวของตัวอย่าง ภาพที่ได้จากกล้อง SEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติ กำลังขยาย $2\times-1,000,000\times$ ทำให้สามารถระบุลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของ SEM

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของ SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน

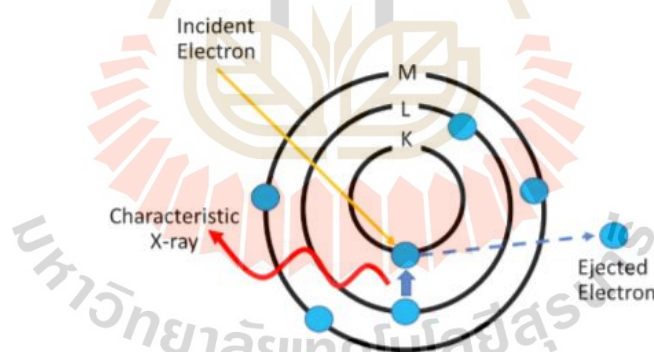
दन्य गिज्जन्गुल (2547) เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์สุดท้าย ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนพื้นผิวตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำ

อิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ซึ่งตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons : SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image : SEI) ส่วนอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons : BSE) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

จุดเด่นของ SEM คือ สามารถแยกแยะเชิงระยะได้มาถึง 0.2 นาโนเมตร และสามารถบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง

2.8 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ

การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (คณฤดี โตเย็น)



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ

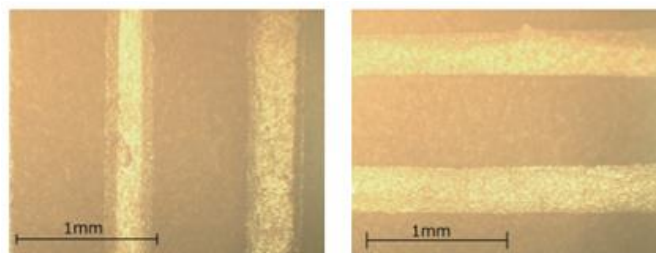
หลักการของ EDS คือ เมื่อดำอิเล็กตรอนชนกับตัวอย่างทดสอบจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) และผลักให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างหลุดออกมาจากอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นถัดไปจะเข้ามาแทนที่ และปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ เรียกว่า รังสีเอกซ์แบบ

แคแรกเทอริสติก (Characteristic X-ray) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัด Silicon drift detectors (SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ โดยสัญญาณจะถูกส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 แบบ คือ การวิเคราะห์แบบ Point analysis การวิเคราะห์แบบ Line scan analysis และการวิเคราะห์แบบ Mapping analysis ซึ่งเทคนิค EDS สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Element Analysis) เป็นการวิเคราะห์หาธาตุบนตัวอย่าง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ boron (B) ถึง uranium (U) แต่ไม่ได้บอกว่าแต่ละธาตุมีกี่เปอร์เซ็นต์ ส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Element Analysis)) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่าง สามารถบอกได้ว่าแต่ละธาตุมีกี่เปอร์เซ็นต์

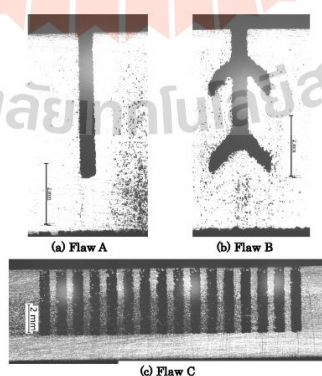
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Noritaka Yusa et al. (2012) ได้ศึกษาการสร้างรอยแตกร้าวที่ตอบสนองต่อการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคลิโธกราฟีในการฝังความต่อเนื่องของการปลอมแปลงภายในวัสดุ โดยใช้การเชื่อมแบบ solid state ซึ่งตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวถูกสร้างขึ้นโดยใช้สแตนเลส austenitic 316 แต่ละบล็อกมีขนาด $20 \times 50 \times 40$ mm ฟิล์มโลหะที่ใช้ทำจากฟิล์มสแตนเลส austenitic 316 ความหนาของฟิล์มเท่ากับ $50 \mu\text{m}$ โดยใช้ photomasks ติดบนพื้นผิวของฟิล์ม และใช้กระบวนการลิโธกราฟีโดยใช้แสง UV เพื่อถ่ายทอดลวดลายที่อยู่บน photomasks ลงบนฟิล์มใน Etchant ที่อุณหภูมิ 45°C เพื่อให้ฟิล์มมีลวดลายตามที่ต้องการไว้ แล้วใช้เตาสุญญากาศอุณหภูมิสูงในการเชื่อมลายขนาด $20 \times 7 \times 0.4$ mm โดยตั้งเตาเริ่มจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 1000°C ใช้อัตราการขึ้นของอุณหภูมิ 20°C ต่อนาที และค้างไว้ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงที่อุณหภูมิห้องโดยการระบายความร้อนด้วยเตา ซึ่งใช้ความดัน 4 MPa และต่ำกว่า 2 Pa ตามลำดับ เมื่อนำลายที่ได้ไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าความกว้างที่แท้จริงของลายมีขนาดใหญ่ถึง 0.7 mm และตรวจสอบ Eddy current พบว่าสัญญาณ Eddy current ที่ได้จากการวัดที่ความถี่ต่ำกับความถี่ที่สูงขึ้นมีการกระจายตัวของความต้านทานไฟฟ้าในทิศทางเชิงลึก เช่นเดียวกับการกักเก็บของความเครียดที่เกิดขึ้น



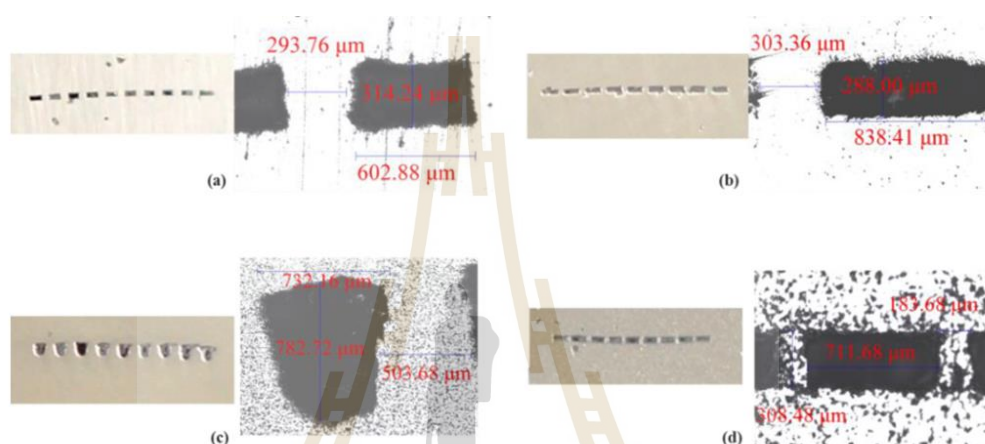
รูปที่ 2.8 รอยแตกร้าวจากเทคนิคลิโธกราฟี (Noritaka Yusa et al. 2012)

Noritaka Yusa et al. (2016) ได้ศึกษาการสร้างรอยแตกร้าวจำลองโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3D และมีสัญญาณการตอบสนอง Eddy Current คล้ายกับสแตนเลส 316L ในการศึกษาที่ใช้ผงสแตนเลส 316L มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 μm ละลายลงบนแผ่นสแตนเลสที่มีขนาด 70 x 45 x 7 mm โดยใช้เลเซอร์ที่มีความเข้มข้น 200 วัตต์ พบว่ารอยแตกมีขนาดประมาณ 0.48-0.53 mm พื้นผิวไม่เรียบ มีความโค้งเล็กน้อย และผงสแตนเลสละลายไม่สมบูรณ์ และได้รับการยืนยันจากเครื่อง Eddy current ในการตรวจสอบสมบัติ การตรวจสอบภาพ และการวิเคราะห์องค์ประกอบ ซึ่งความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 77 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (96% ของความหนาแน่นของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด austenitic 316) เห็นได้ชัดว่าตัวอย่างที่เตรียมได้ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก ข้อดีเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมที่จะพิจารณาว่าตัวอย่างนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด austenitic 316



รูปที่ 2.9 รอยแตกร้าวจำลองจากการพิมพ์แบบ 3D (Noritaka Yusa et al. 2016)

Cherdpong Jomdecha et al. (2018) ได้ศึกษาการใช้เทคนิค X-ray LIGA ในการสร้าง SCC เลียนแบบ เนื่องจากสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของ SCC ได้ ซึ่งรูปร่างของ SCC มีขนาดความยาวเท่ากับ 10 mm ความหนา 0.25 mm จากนั้นรูปแบบที่เตรียมไว้จะถูกแทรกเข้าไปในเหล็กกล้าผสมสแตนเลสและผง Sn โดยใช้เครื่องกวนเชิงกลเป็นเวลา 10 นาที ส่วนผสมทั้งหมดถูกเทลงในแม่พิมพ์ เเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 90 นาที ในเตาสัญญากาศ พบว่ารูปร่างและขนาดของ SCC ลอกเลียนแบบมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยหลังจากการเผา



รูปที่ 2.10 รอยแตกจำลองจากเทคนิค X-ray LIGA (Cherdpong Jomdecha et al. 2018)

Noritaka Yusa et al. (2007) ได้รวบรวมสัญญาณ Eddy current จากการกักตัวของความเครียดจำลอง โดยการเตรียมแผ่นเหล็กสแตนเลส 316 ที่มีรอยแตกยาวความเค้นกักกร่อน 3 แผ่น การศึกษานี้ใช้รอยแตกยาวเป็นจุดเริ่มต้นของการกักตัวของความเครียด โดยการแช่ในกรดโพลิที่ออน เพื่อให้เกิดการกักตัวของความเค้น ความยาวของรอยแตกประมาณ 15, 27 และ 13 mm แผ่นสแตนเลสมีขนาด 160 x 100 x 15 mm การตรวจสอบ Eddy current จะใช้หัววัดความถี่ต่ำ ถูกขับเคลื่อนด้วยความถี่ 10, 20 และ 50 kHz และความถี่สูงสุด คือ 50, 100 และ 400 kHz ตัวตรวจวัดยึดติดกับแกน xyz โดยใช้เครื่อง Eddy current รุ่น aect-2000s เพื่อกระตุ้นการตรวจสอบ หลังการตรวจสอบพบว่าการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง เพื่อให้เห็นรูปที่แท้จริงของการแตกยาว การทดสอบแบบทำลายตัวอย่างยืนยันว่าพบรอยร้าวปริมาตรน้อย ความลึกสูงสุดของการแตกยาวมีค่า 5.9, 7.4 และ 4.3 mm ตามลำดับ

Noritaka Yusa et al. (2007) และคณะ ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการแตกร้าวการกัดกร่อนของความเค้น โดยการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบจำนวน 10 ชิ้น ทำจากสแตนเลส 316 มีความหนา 10 mm รอยแตกร้าวถูกสร้างขึ้นด้วยการตัดโค้งแบบสี่จุด การกัดกร่อนของความเค้นเกิดจากการอัดแผ่นด้วยการดัดสามจุด และจุ่มลงในสารละลาย $MgCl_2$ 42% ที่เดือด และตรวจสอบด้วย Eddy current รุ่น aect2000s โดยใช้หัววัดชนิด Differential plus point เพื่อยืนยันความถูกต้องของรอยแตก และมีการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้สูตร FEM-BEM เพื่อประเมินค่าการนำไฟฟ้าและความกว้างของรอยแตก พบว่ารอยแตกร้าวสามารถจำลองเป็นพื้นที่ที่มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับหรือเข้าใกล้ศูนย์ และมีความกว้างเท่ากับ 0.2 mm

Wenlu Cai et al. (2017) ได้ศึกษาการกระจายตัวของการนำไฟฟ้าของรอยแตก SCC เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการประเมินผลแบบไม่ทำลายเชิงปริมาณในการวัดขนาดการกัดกร่อนของความเครียด (SCC) ด้วยเทคนิคการทดสอบ Eddy Current (ECT) ในการทดสอบนี้ได้สร้างรอยแตก SCC ขึ้นมา 2 ชิ้น โดยกำหนดให้เป็นชิ้นงานทดสอบหมายเลข 10 และหมายเลข 14 ชิ้นงานทดสอบถูกสร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และโรงงานเคมี ชิ้นงานทดสอบถูกตัดเนื้อด้วยไฟฟ้า (EDM) บริเวณกึ่งกลางของแผ่นสแตนเลส 316 โดยมีความลึก 0.5 mm ความกว้าง 0.3 mm และความยาว 10 mm แผ่นชิ้นงานทดสอบมีความยาว 200 mm ความกว้าง 100 mm และความหนา 10 mm จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในสารละลาย 42% $MgCl_2$ ที่อุณหภูมิ 145°C เป็นเวลา 42 ชั่วโมง และ 15 ชั่วโมงสำหรับชิ้นทดสอบหมายเลข 10 และ No.14 ตามลำดับ ตัวอย่าง SCC สองแผ่นถูกตัดออกและหั่นเป็นส่วนระนาบบาง ๆ ขัดอย่างระมัดระวังและฝังในกระบอกเรซิน

Donald W Johnson et al. (2012) ได้ศึกษาการใช้แผ่นฟิล์ม (Thick Dry Film Sheets: TDFS) ของ SUEX ในการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต และรังสีเอกซ์ โดยมุ่งเน้นไปที่การปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการให้เหมาะสม โดยเคลือบแผ่นฟิล์ม SUEX ลงบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งใช้เครื่องเคลือบบัตรสำนักงานที่เรียบง่าย ในการเคลือบจะถูกตั้งค่าความเร็วที่ 1 ft/นาที่ ที่อุณหภูมิ 65-75°C จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 65-70°C เป็นเวลา 10-15 นาที และอบต่อที่อุณหภูมิ 85-95°C เป็นเวลา 2-5 นาที ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3°C/นาที่ เพื่อให้พื้นผิวมีความเรียบและยึดเกาะกับแผ่นซิลิกอนได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตหรือรังสีเอกซ์เพื่อถ่ายทอดลวดลาย จากนั้นนำไปอบอีกครั้ง (hard bake) ที่อุณหภูมิ 85-95°C เป็นเวลา 2-5 นาที โดยโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความหนา 250 μm มีความสูงตั้งแต่ 100-1000 μm ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของวัสดุใหม่นี้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาคได้

Rungrueang Phattanakun et al. (2013) ได้ศึกษาการสร้างช่องทางไหลจุลภาคโดยใช้กระบวนการ X-ray LIGA และให้รังสีเอกซ์พลังงานสูงแทรกซึมเข้าไปใน SU-8 จะได้เป็นแม่พิมพ์ขึ้นมา จากนั้นแม่แบบแม่พิมพ์จะถูกเติมด้วยนิกเกิลโดยใช้เทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้าโดยใช้ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 60°C โครงสร้างนิกเกิลสามารถยึดติดกับพื้นผิวและใช้เป็นแม่พิมพ์โลหะในการจำลองแบบ PDMS สำหรับการใช้งาน microfluidic ได้

Ming Zhao et al (2020) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของชั้นความหนาในการชุบโลหะ ทดลองโดยใช้น้ำยาชุบนิกเกิลอุณหภูมิ 50°C ค่าพีเอช 3.8 และใช้ความหนาแน่นของพลังงาน megasonic ที่ 1.6 W/cm^2 และไม่ใช้ megasonic ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการทดลองคือ 1.5 A/dm^2 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลของการทดลองพบว่าชั้นความหนาในการชุบโลหะที่มีการใช้ megasonic จะมีความสม่ำเสมอและมีความหนาน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการปั่นโดยใช้ megasonic สามารถกำจัดฟองไฮโดรเจนที่ผิวของงานชุบได้

Xinyu Zhang et al (2016) ได้ศึกษาการประสานอิเล็กโทรดของ Ni-W และเพชร ทดลองในอ่างชุบ 200 มิลลิลิตร ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการชุบประกอบด้วย $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 18 g/L, $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 53 g/L, $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 168 g/L, NH_4Cl 31 g/L, NaBr 18 g/L, ผงเพชร 0, 1, 2, 5, 10 และ 20 g/L อนุภาคของเพชรมีขนาดเฉลี่ย 0.8 และ 3 ไมโครเมตร อุณหภูมิของสารละลายคือ 75°C ค่าพีเอชเท่ากับ 8.9 ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นแคโทด ก่อนการชุบพื้นผิวเหล็กจะถูกล้างทำความสะอาดด้วย NaOH, HCl และน้ำกลั่น และเปิดการใช้งานใน HCl 14% พื้นผิวเหล็กถูกปิดด้วยเทปฉนวนเพื่อให้มีพื้นที่สัมผัส 4 cm^2 พื้นผิวเหล็กและแผ่นคาบาชะเคลือบ Pt-Fe มีระยะห่าง 35 มิลลิเมตร ถูกแช่ในแนวนอนสูงจากพื้นอ่าง 200 มิลลิลิตร ความหนาแน่นของกระแสคงที่ ($0.05, 0.1, 0.15$ และ 0.2 A/cm^2) พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคเพชรเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ปริมาณของเพชรเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเพชรในอ่างตั้งแต่ 1-5 g/L ในขณะที่อนุภาคของเพชรที่มากกว่า 5 g/L ขึ้นไป ปริมาณของเพชรมีค่าคงที่ และเมื่อคุณภาพตัดขวางพบว่าความหนาของสารเคลือบเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแส ความหนาของสารเคลือบผิวประมาณ 25-70 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสะสมที่แตกต่างกัน

Narasimman et al. (2011) ได้แนะนำให้วางขั้วไฟฟ้าในแนวนอน โดยวางขั้วลบไว้ที่ขั้วบวก การจัดเรียงแบบนี้เรียกว่าเทคนิคการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เทคนิคนี้จะช่วยให้อนุภาคสามารถตกตะกอนได้ง่าย เนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำในแนวตั้งทิศทางเดียวกัน ในขณะที่เทคนิคการชุบทั่วไปแรงแม่เหล็กไฟฟ้าถูกรบกวนโดยแรงโน้มถ่วงในทิศตั้งฉาก เมื่อทำงานกับการเคลือบ Ni-Sic พบว่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาณ Sic ในการเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเทคนิคการชุบทั่วไป Nik et al. (2016) ได้ใช้เทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้าแบบกระแสตรงในการเคลือบ

Ni/Al₂O₃ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันมากที่สุด นอกจากนี้ Feng et al. (2008) ได้ทดสอบการเคลือบ Ni-Al₂O₃ โดยใช้เทคนิคดังกล่าว พบว่าความแข็งของอนุภาคไมโครดีขึ้นและอัตราการสึกหรอต่ำกว่าการชุบเคลือบด้วยเทคนิคทั่วไป

Zheng & An (2008) ได้ทำการเคลือบ Zn-Ni/Al₂O₃ โดยการใช้สอร์นอัลตราซาวด์ในอิเล็กโทรไลต์ เพื่อสร้างอัลตราโซนิกและฟองอากาศ พวกเขาพบว่าการเพิ่มพลังอัลตราโซนิกจาก 0 ถึง 0.7 W/cm² จะช่วยเพิ่มอนุภาคของ Al₂O₃ ในการเคลือบจาก 4.5 เป็น 8.9 wt% และสามารถลดการรวมตัวกันของอนุภาค Al₂O₃ ได้ โดยเชื่อว่าคลื่นอัลตราโซนิกเป็นตัวเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโน Al₂O₃ ที่มีต่อแคโทด

Wu et al. (2004) ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการชุบเคลือบ Ni-Co/Al₂O₃ เปอร์เซนต์สูงสุดของปริมาณ Al₂O₃ ได้รับที่ความหนาแน่นกระแส 3 A/dm² Z. Abdel-Hamid (1998) ได้ศึกษาการชุบเคลือบนิเกิลที่อุณหภูมิ 50-60 °C ใช้ค่า pH 7.5 พบว่าอนุภาคของนิเกิลมีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

จากการรวบรวมวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการจำลองรอยแตกทำได้ละเอียดเพียง 100 ไมโครเมตรขึ้นไปเท่านั้น เพื่อพัฒนารอยแตกจำลองเลียนแบบให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการสร้างรอยแตกจำลองเลียนแบบ โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี (X-ray Lithography) ซึ่งจะให้ความละเอียดของรอยแตกที่ละเอียดและมีความยืดหยุ่นของรูปทรงรอยแตกใกล้เคียงกับ SCC ที่เกิดขึ้น และใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ในการสร้างก้อนสแตนเลส ซึ่งจะส่งผลต่อเกณฑ์การควบคุมการทดลองว่าสมบัติที่ตอบสนอง Eddy current จะต้องใกล้เคียงกับสแตนเลส การตรวจสอบสมบัติการตอบสนองต่อ Eddy current ในการทดลองจะใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบกับชิ้นงาน เนื่องจากเป็นสแตนเลสกลุ่มเดียวกันกับสแตนเลสเกรด 316L คือ Austenitic stainless steel และมีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกันกับสแตนเลสเกรด 316L ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน แต่ในสแตนเลสเกรด 316L จะมีธาตุโมลิบดีนัมเพิ่มเข้าไป ซึ่งจะช่วยให้ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนได้สูงขึ้น เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกันจึงสามารถใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบกับชิ้นงานได้

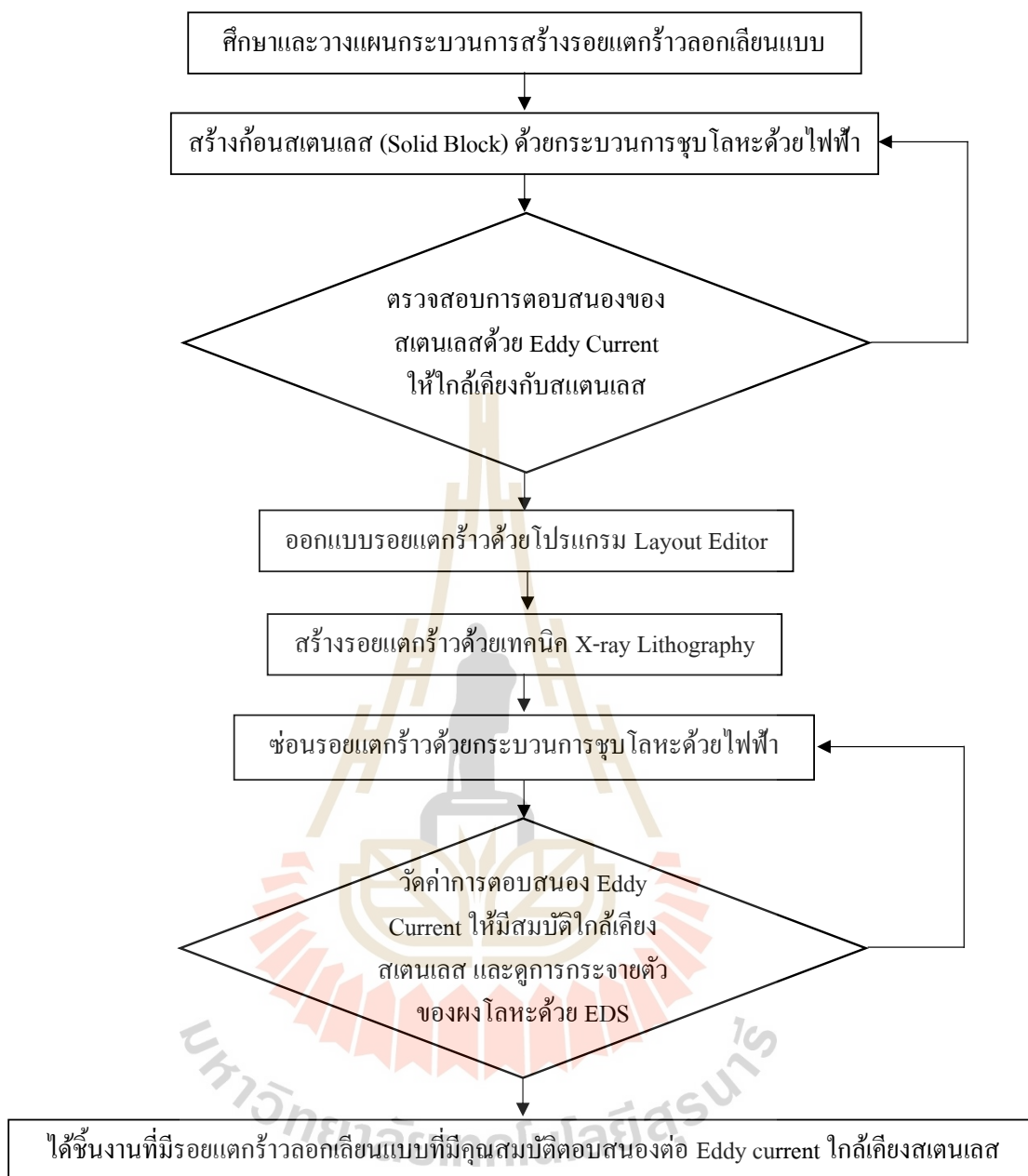
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบ เพื่อใช้ตรวจสอบการแตกร้าวของชิ้นงานโดยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งใช้กระบวนการลิโธกราฟีในการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบ เนื่องจากสามารถสร้างชิ้นส่วนที่มีอัตราส่วนความสูงมากกว่าความกว้าง (High-aspect ratio) กระบวนการสร้างรอยแตกร้าวในงานวิจัยนี้ มีกระบวนการหลักที่เกี่ยวข้อง คือ กระบวนการลิโธกราฟี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ และกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยกระบวนการลิโธกราฟี และการซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาและจัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
2. กำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลองสำหรับการสร้างก้อนสแตนเลสด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
3. การออกแบบและสร้างรอยแตกร้าวด้วยกระบวนการลิโธกราฟี
4. การชุบโลหะเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสำหรับการศึกษาการสร้างรอยแตกร้าวสแตนเลสเลียนแบบด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี

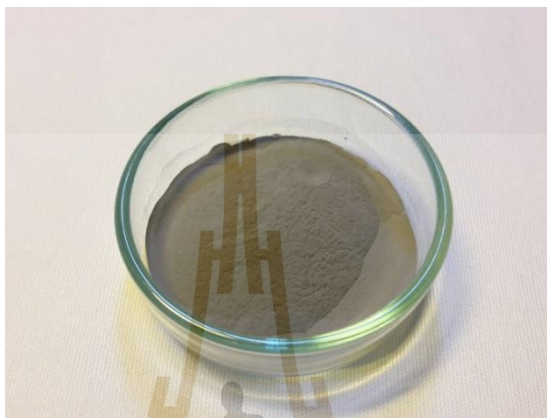


รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

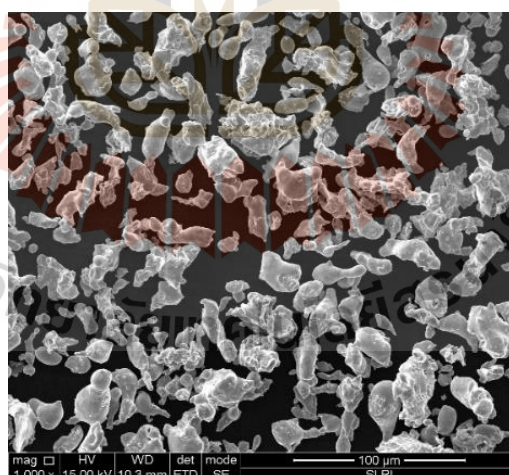
3.1 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

1) ผงโลหะสแตนเลส เกรด 316L

ผงสแตนเลส เกรด 316L (รูปที่ 3.2) มีขนาด 10-20 ไมโครเมตร โดยมีโครงสร้างจุลภาควัดรูปที่ 3.3 และมีส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไป ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ผงสแตนเลส เกรด 316L



รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของผงสแตนเลส เกรด 316L จาก SEM

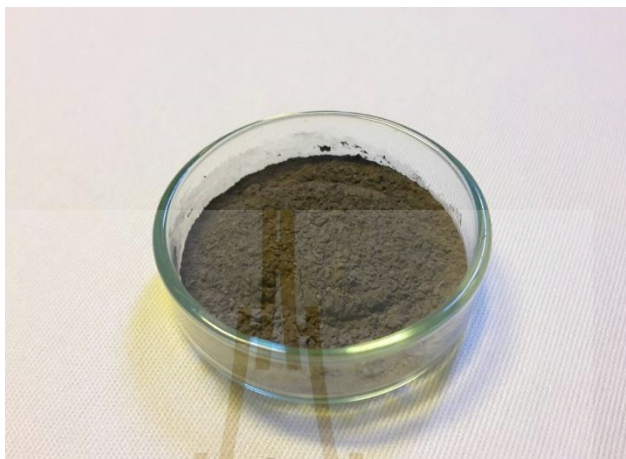
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผงโลหะสแตนเลส เกรด 316L ผงดีบุก และน้ำยาชุบนิกเกิล

Material	Composition	Element (wt-%)												
		Fe	Cr	Ni	C	Si	Mo	Mn	Al	P	S	Sn	O	Cl
SUS 316L	Nominal ⁽¹⁾	-	16-18	12-15	0.03	1	2-3	2	-	0.045	0.03	-	-	-
	Measured ⁽²⁾	61.7	18.5	12.0	2.7	2.2	2.1	-	0.8	-	-	-	-	-
Sn	Nominal ⁽³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
	Measured ⁽²⁾	-	-	-	2.3	-	-	-	0.5	-	-	91.0	6.1	-
Nickel Solusion	Nominal ⁽⁴⁾	-	-	18.1	6.2	-	-	-	0.1	-	11.7	-	61.1	2.7
	Measured ⁽²⁾	-	-	30.0	3.7	-	-	-	1.8	-	12.3	-	49.3	2.9

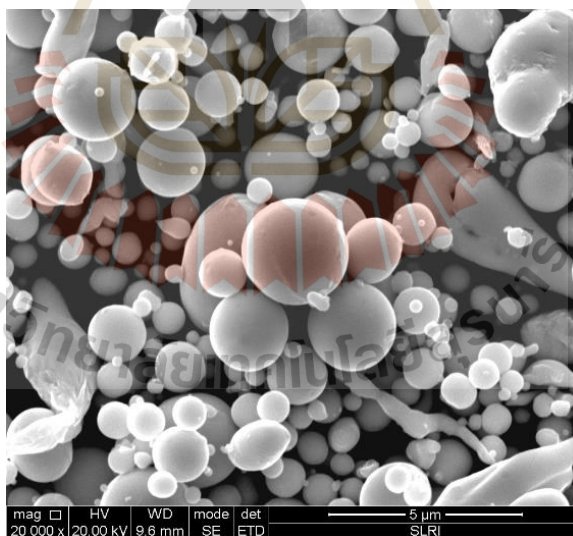
- *หมายเหตุ:
1. JISG4303 Standard
 2. จากเทคนิค SEM/EDS
 3. Data sheet Sn pure 100%
 4. Process data for MEMS fabrication

2) ผงดิบบุก

ผงดิบบุก (รูปที่ 3.4) มีขนาด 1-5 ไมโครเมตร โดยมีโครงสร้างจุลภากดังรูปที่ 3.5 และมีส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไป ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ผงดิบบุก



รูปที่ 3.5 โครงสร้างจุลภาคของผงดิบบุกจาก SEM

- 3) น้ำยาชุบโลหะนิกเกิล
เป็นน้ำยาชุบนิกเกิลเงาดังรูปที่ 3.6 ใช้สำหรับกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 น้ำยาชุบนิกเกิลเงา

- 4) เครื่องชั่งสารเคมี
เป็นเครื่องชั่งสารเคมีที่สามารถอ่านค่าทศนิยมได้สูงสุด 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง

- 5) เครื่องชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
เครื่องชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.8 ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 เครื่องชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

- 6) เครื่อง Hot plate
เป็นเครื่องกวนสารให้ความร้อนและมีแผ่นความร้อนเซรามิกซึ่งทนต่อสารเคมีได้อย่างดีเยี่ยม โดยสามารถปรับความร้อนได้ตั้งแต่ช่วง 50 - 500 °C มีหน้าจอ LED ดิจิตอลที่แสดงค่าอุณหภูมิที่ตั้ง และสามารถปรับ-หมุน ความเร็วรอบเพื่อใช้ในการกวนสารได้ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่อง Hot plate stirrers IKA รุ่น C-MAG HS 7

7) เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนกวนสารละลาย ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

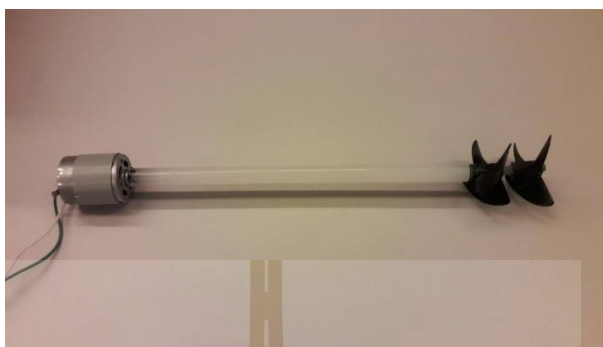
8) เครื่องขัดชิ้นงาน

เป็นเครื่องขัดผิวตัวอย่างที่มีหัวขัด 2 แบบ คือ หัวขัดอัตโนมัติและแบบ manual สามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนช่วยในการขัดผิวหน้าชิ้นงานได้ มีระบบน้ำไหลผ่านเพื่อล้างเศษของชิ้นงานที่หลุดออกในระหว่างการขัด และสามารถตั้งเวลาในการขัดได้ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องขัด รุ่น Struers Rotopol-25

- 9) ชุดมอเตอร์ติดใบพัด
เป็นมอเตอร์ติดใบพัด 3 ทาง ใช้สำหรับหมุนกวนสารละลาย ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ชุดมอเตอร์ติดใบพัดสำหรับกวนสารละลาย

- 10) บีกเกอร์
เป็นภาชนะสำหรับใส่สารละลาย ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 บีกเกอร์สำหรับเตรียมสารละลาย

11) เครื่อง EVG aligner mask

เป็นเครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต มีความยาวคลื่นในช่วง 365 ถึง 405 nm ใช้สำหรับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่อง EVG aligner mask รุ่น mask aligners EVG 610

12) เครื่อง Spin coater

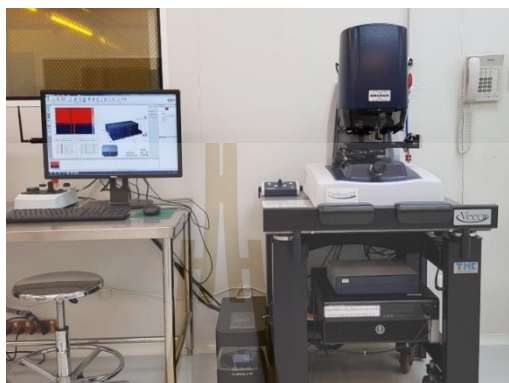
เป็นเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง โดยหมุนด้วยความเร็วรอบสูง พร้อมด้วยการ เคลือบผิวที่สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนได้ ทำให้ได้ฟิล์มบาง (thin film) หรือสารเคลือบผิวที่มีความเป็นเนื้อเดียว สามารถทำการปั่นเหวี่ยงได้ในช่วงความเร็วรอบ 100-6000 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่อง Spin coater รุ่น WS-650MZ-23NPPB

13) เครื่อง Optical Surface Profiler

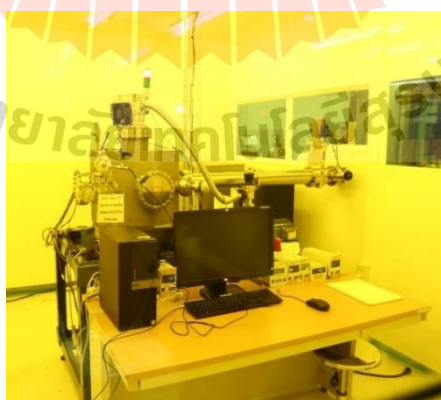
เป็นเครื่องวัดพื้นผิวแบบไม่สัมผัสที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการวิจัยในห้องปฏิบัติการและการควบคุมกระบวนการผลิต สามารถปรับแกน X, Y และ Z ได้ และสามารถวัดได้ทั้งแบบ 2D และ 3D ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่อง Optical Surface Profiler รุ่น Contour GT-K

14) เครื่อง X-ray scanner

เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับฉายรังสีเอกซ์โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี ติดตั้งอยู่ภายในระบบลำเลียงแสงที่ 6 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่อง X-ray scanner

15) กล้องจุลทรรศน์

เป็นกล้องที่ใช้สำหรับส่องชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบลวดลายขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า อีกทั้งเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับโปรแกรม Stream Start จะทำให้สามารถถ่ายภาพและวัดขนาดความกว้างของลวดลายได้ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์ รุ่น Olympus BX51

16) เครื่อง Eddy Current Test Systems

เป็นเครื่องทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยการทดสอบนี้จะใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าไหลวนถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการที่เรียกว่า การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่อง Eddy Current Test Systems รุ่น ELOTEST B300

17) เครื่อง Energy Dispersive X-ray

เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเคมี สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่อง Energy Dispersive X-ray รุ่น QUANTA 250

18) เครื่องอัลตราโซนิก

เป็นเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถปรับค่าความถี่ได้หลายช่วง ซึ่งในกระบวนการทำความสะอาดจะต้องอาศัยของเหลวเป็นตัวกลางในการทำมาสะอาด เช่น น้ำสะอาด สารละลายอะซิโตน ฯลฯ แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องอัลตราโซนิก

19) สารละลายอะซิโตนและไอโซโพรพานอล

สารละลายสารละลายอะซิโตน (Acetone) และไอโซโพรพานอล (Isopropanol: IPA) ใช้เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจําพวกคราบไขมันให้หลุดออกจากชิ้นงาน ดังในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 สารละลายอะซิโตนและไอโซโพรพานอล

20) สารเคมีสำหรับล้างสารไวแสง

ในงานวิจัยนี้ใช้สารเคมีสำหรับล้างสารไวแสง 2 ชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (AZ) จะใช้สารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารบอริก ส่วนสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) จะใช้สารเคมี SU-8 developer ซึ่งเป็นสารที่ใช้สำหรับล้าง SU-8 โดยเฉพาะ ดังในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 สารเคมีสำหรับล้างสารไวแสง (ก) สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) สารบอริก และ (ค) สาร SU-8 developer

21) สารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

สารไวแสงเป็นสารที่ไวต่อแสงสีขาว คือ เมื่ออยู่ในห้องที่มีแสงสีขาวจะทำให้สารเกิดการแข็งตัว ในการดำเนินงานวิจัยจึงจำเป็นต้องดำเนินการในห้องที่เป็นแสงสีเหลืองแทนแสงสีขาว ดังในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 สารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ

3.2 การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลองสำหรับการสร้างก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จุดประสงค์ของการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างรอยแตกร้าวลอกเลียนแบบในสแตนเลสให้มีสมบัติที่ตอบสนอง Eddy current ใกล้เคียงหรือเหมือนสแตนเลส รวมไปถึงการซ่อมรอยแตกร้าวได้ด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่สำคัญที่จะทำการศึกษา ดังนี้

3.2.1 ปัจจัยที่สำคัญในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

- 1) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
- 2) ปริมาณของผงโลหะ

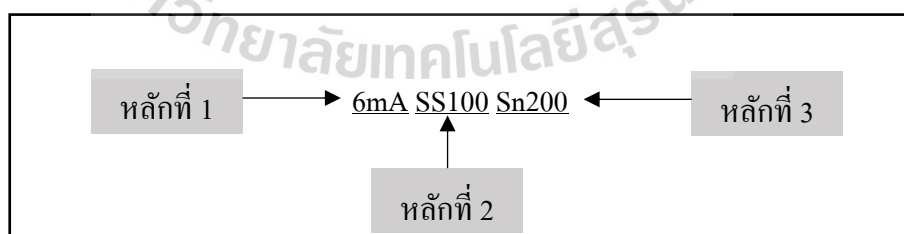
เพื่อควบคุมและการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปสแตนเลสอย่างมีนัยสำคัญด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าระดับปัจจัยไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สำหรับตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยนั้นผู้วิจัยกำหนดขอบเขตโดยอ้างอิงมาจากการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยสนใจศึกษา 2 ปัจจัยได้แก่ ความหนาแน่นของกระแส

ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 6, 7 และ 8 mA/cm² เพื่อศึกษาอัตราของความเร็วก่เกิดขึ้นจากการชุบ และปัจจัยที่ 2 คือปริมาณของผงโลหะสแตนเลส SUS316L และผงดีบุก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ที่จะส่งผลต่อการตรวจสอบคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อ Eddy Current ที่ใกล้เคียงหรือเหมือนสแตนเลสมาตรฐาน

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ปัจจัยในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	6, 7, 8	mA/cm ²
ปริมาณของผงโลหะ		
- SUS316L	1.0, 1.5, 2.0	กรัม
- Sn	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0	กรัม

กำหนดให้ปริมาตรของน้ำยาชุบนิกเกิลเท่ากับ 250 มิลลิลิตร และมีความเร็วรอบในการหมุนกวนสารละลายคือ 250 รอบต่อนาที ในการทดลองผู้วิจัยกำหนดสัญลักษณ์ของชื่อชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.25 โดยให้ตัวเลขในหลักที่ 1 แสดงถึงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mA/cm² ตัวเลขในหลักที่ 2 แสดงถึงปริมาณของผงโลหะ SUS316L ใช้ตัวย่อเป็น SS และตัวเลขในหลักที่ 3 แสดงถึงปริมาณของผงดีบุก (Sn) ยกตัวอย่าง เช่น 6mASS100Sn200 คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 6mA/cm² ปริมาณผงสแตนเลส SS100 เท่ากับ 1.00 กรัม และปริมาณผงดีบุก Sn200 เท่ากับ 2.00 กรัม เป็นต้น



รูปที่ 3.25 การกำหนดสัญลักษณ์ชื่อชิ้นงาน

3.3 การออกแบบและการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟี

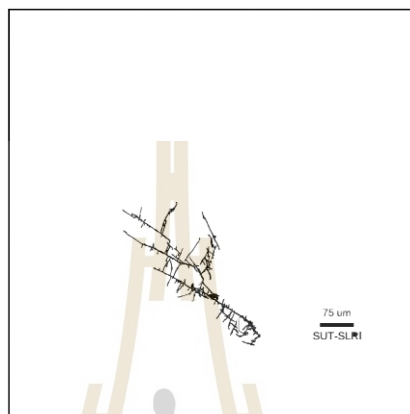
3.3.1 การออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor

ในขั้นตอนแรกต้องออกแบบลวดลาย หรือแปลงมาจากไฟล์ภาพเพื่อให้ได้ฟิล์มทึบแสง ในงานวิจัยนี้เลือกรอยแตกร้าวจากรูปถ่ายรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเลือกลวดลายที่มีขนาดเล็กตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.26 (ก) และใช้โปรแกรม Layout Editor ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับออกแบบลวดลายระดับไมโครเมตร และสามารถแปลงไฟล์ภาพให้ได้ลวดลายตรงตามต้นแบบ ซึ่งลวดลายดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.26 (ข)



รูปที่ 3.26 ลวดลายแตกร้าวที่ใช้ในการทดลอง (ก) รอยแตกร้าวจากรูปถ่าย
(ข) รอยแตกร้าวที่ได้จากการแปลงไฟล์ด้วยโปรแกรม Layout Editor

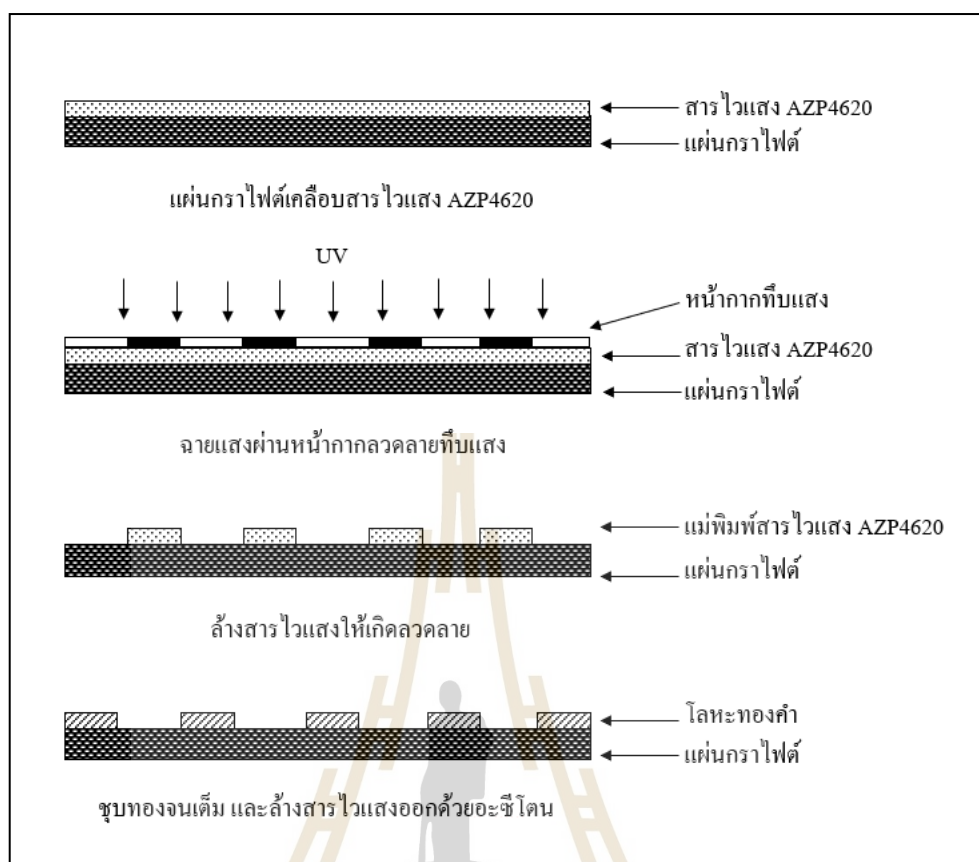
ลวดลายที่ออกแบบจะถูกนำไปพิมพ์ลงบนฟิล์มใสด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ สามารถออกแบบลวดลายได้เล็กที่สุดประมาณ $30\text{ }\mu\text{m}$ รูปที่ 3.27 แสดงหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งลวดลายทึบแสงบนแผ่นฟิล์มใส จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อสร้างแม่พิมพ์ที่มีความหนา $30\text{ }\mu\text{m}$ และชุบโลหะทองลงไปในช่วงว่าง



รูปที่ 3.27 หน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีลวดลายจุลภาคขนาด $30\text{ }\mu\text{m}$ พิมพ์ลงบนฟิล์มใสด้วยแสงเลเซอร์

3.3.2 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

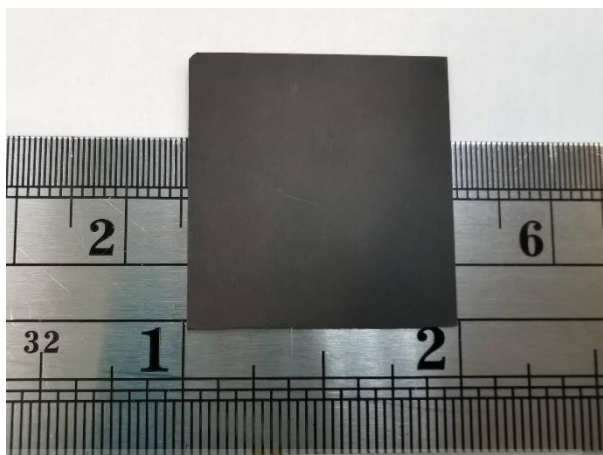
หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ เป็นส่วนที่มีความสำคัญในการสร้างโครงสร้างจุลภาค ใช้สำหรับกั้นรังสีเอกซ์เพื่อให้เกิดลวดลายขึ้นบนสารไวแสงสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์ โดยวัสดุที่ใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น เงิน ทอง ตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นบนแผ่นฐานซึ่งเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ผ่านได้ดี เช่น แผ่นกราฟไฟต์ แผ่นใสสำหรับถ่ายเอกสาร แผ่นโพลีไมด์ฟิล์ม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งกระบวนการสร้างหน้ากากทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 กระบวนการสร้างหน้ากักกันรังสีเอกซ์

3.3.2.1 การเตรียมส่วนฐานของหน้ากักกันรังสีเอกซ์

ส่วนฐานของหน้ากักกันรังสีเอกซ์ต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ผ่านได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นกราไฟต์ โดยใช้แผ่นกราไฟต์ขนาด 1x1 นิ้ว ความหนา 250 μm ดังรูปที่ 3.29 ทำความสะอาดแผ่นกราไฟต์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ใช้ความถี่ในการสั่น 132 Hz โดยการแช่แผ่นกราไฟต์ในเมทานอล 15 นาที (1 ครั้ง) และน้ำ RO 15 นาที (2 ครั้ง) จากนั้นเป่าด้วยไนโตรเจนให้แห้ง แล้วอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.29 แผ่นกราฟไฟต์ขนาด 1x1 นิ้ว ความหนา 250 μm

ขั้นตอนการเตรียมหน้ากากกันรังสีเอกซ์ เริ่มจากซังสารไวแสง AZP4620 น้ำหนัก 0.375 กรัม ลงบนแผ่นกราฟไฟต์ และหมุนเคลือบสารโดยใช้เครื่อง Spin coater ตั้งค่าการหมุนเคลือบสารไวแสง Step ที่ 1 หมุน 500 rpm 10 วินาที และ Step ที่ 2 หมุน 1000 rpm 20 วินาที จะให้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 30 μm และนำไปอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 นาที และรอให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราการขึ้นและลดลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ต่อนาที เมื่อชิ้นงานเย็นตัวจึงนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในขั้นตอนต่อไป

3.3.2.2 การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

เมื่อได้ชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสงและอบจนแห้งแล้ว ในขั้นตอนต่อไป เป็นการสร้างลวดลายลงบนสารไวแสง เพื่อสร้างแม่พิมพ์สำหรับชุบโลหะเพื่อใช้เป็นหน้ากากกันรังสีเอกซ์ กระบวนการสร้างเริ่มจากนำฟิล์มที่บดแสงวางทับลงบนชิ้นงาน โดยหันด้านที่มีหมึกเข้าหาชิ้นงานเพื่อให้ลวดลายแนบกับสารไวแสง จะช่วยให้ลวดลายมีความคมชัดมากยิ่งขึ้น

จากนั้นนำชิ้นงานไปถ่ายทอดลวดลายผ่านหน้ากากกัน UV โดยใช้เครื่อง UV aliment ตั้งค่าเวลาในการฉาย UV 40 วินาที (พลังงานหลอด UV เท่ากับ 8.75mJ/cm²) และนำหน้ากากออก จากนั้นเตรียมน้ำ Developer โดยใช้ Boric acid 1 กรัม : Potassium hydroxide 4 กรัม : น้ำ RO 250 มิลลิลิตร ผสมและคนให้ละลาย แล้วนำชิ้นงานจุ่มล้างสารไวแสงใช้เวลาประมาณ 1-3 นาที และล้างด้วยน้ำ RO เมื่อสารไวแสงที่ถูกแสงละลายจนหมด จะได้ก้อนของแม่พิมพ์ จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูลวดลาย และวัดความหนาของสารไวแสงด้วยเครื่อง Optical Surface Profiler ซึ่งมีความหนาประมาณ 30 μm

หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานปิดด้วยเทปกาวในบริเวณที่ไม่ต้องการชุบโลหะ เพื่อให้โลหะก่อตัวขึ้นในหลุมของแม่พิมพ์เท่านั้น ตัวอย่างหลังล้างสารไวแสง แสดงได้ดังรูปที่ 3.30



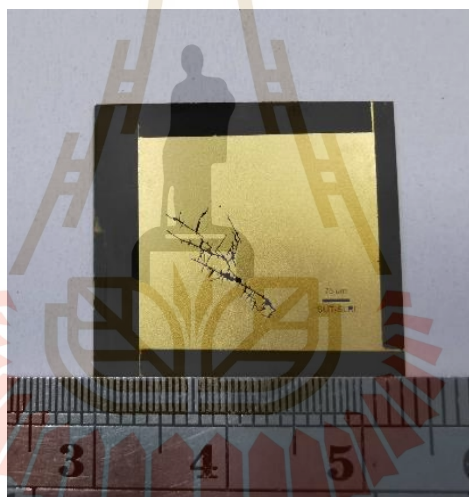
รูปที่ 3.30 แม่พิมพ์สารไวแสง AZP4620 บนแผ่นกราฟไฟต์

3.3.2.3 การชุบโลหะทองคำ

โลหะที่ใช้สำหรับกั้นรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้ ใช้โลหะทองคำ เนื่องจากมีเกรนที่ละเอียดกว่าเงิน และใช้ความหนาในการชุบโลหะน้อยกว่าเงิน ซึ่งจากการทดลองควรใช้โลหะทองคำหนา 30 μm ขึ้นไปจึงจะสามารถสร้างลวดลายที่มีความสูงถึง 1000 μm ได้ ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเริ่มจากการนำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกไป จากนั้นจึงนำสารละลายมาชุบด้วยไฟฟ้า โดยขั้วบวกเป็นตะแกรงโลหะไทเทเนียมชุบแพลทินัม และขั้วลบเป็นชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.31 ใช้ความหนาแน่นกระแสในการชุบเริ่มต้นที่ 0.25 mA/cm^2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มความหนาแน่นกระแสเป็น 0.5 mA/cm^2 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเพิ่มโลหะความหนาแน่นกระแสเป็น 1 mA/cm^2 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะได้ความหนาประมาณ 30 μm ซึ่งหลังจากชุบโลหะได้ความหนาตามที่ต้องการแล้ว จึงนำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงออกด้วยอะซิโตน และเป่าด้วยไนโตรเจนให้แห้ง จะได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.32



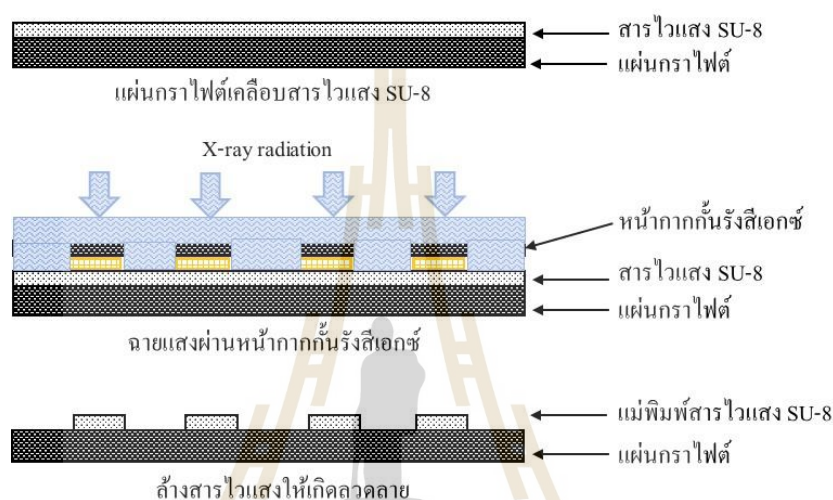
รูปที่ 3.31 การชุบโลหะทองคำด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.32 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่ชุบด้วยทองคำ

3.4 การสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโกราฟี

เมื่อได้หน้ากากกันรังสีเอกซ์แล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบลงบนสารไวแสง เพื่อสร้างแม่พิมพ์สำหรับซุบโลหะ สารไวแสงที่ใช้เป็นสารไวแสงชนิดลบ คือ SU-8 สารไวแสงนี้จะถูกเคลือบลงบนแผ่นกราฟต์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีพื้นผิวเรียบ และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี กระบวนการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.33



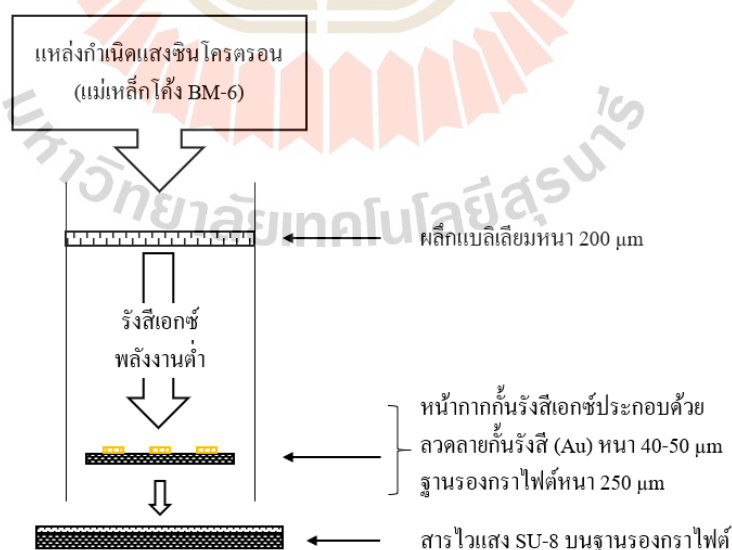
รูปที่ 3.33 การสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยกระบวนการลิโกราฟี

ในขั้นตอนแรก นำแผ่นกราฟต์ไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ใช้ความถี่ในการสั่น 132 Hz โดยแช่แผ่นกราฟต์ในเอทานอล 15 นาที (1 ครั้ง) และน้ำ RO 15 นาที (2 ครั้ง) จากนั้นเป่าด้วยไนโตรเจนให้แห้ง แล้วอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารไวแสง SU-8 ความหนา $500\text{ }\mu\text{m}$ เคลือบลงบนแผ่นกราฟต์ด้วยเครื่องรีด รุ่น lab LM-150 ปรับอุณหภูมิที่ $60\text{--}75^{\circ}\text{C}$ และนำไปอบด้วยอุณหภูมิ $85\text{--}95^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1-5 นาที เพื่อช่วยให้พื้นผิวของสารไวแสงเรียบ และสามารถยึดเกาะบนแผ่นกราฟต์ได้ดีขึ้น

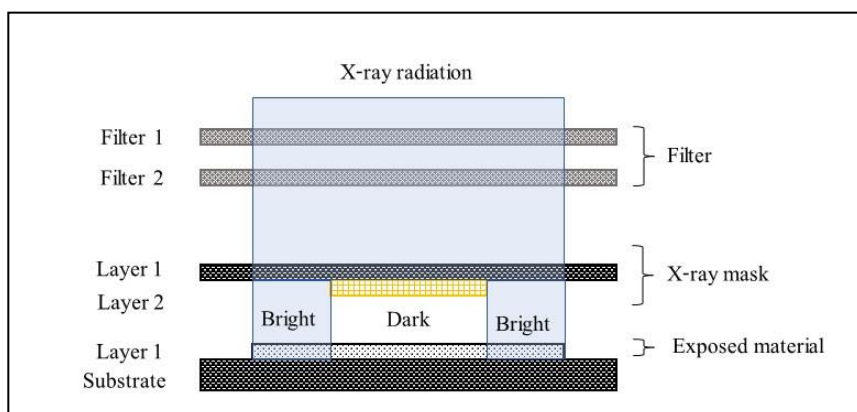
หลังจากเตรียมสารไวแสงสำหรับสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการฉายรังสีเอกซ์ลงบนชั้นงาน รังสีเอกซ์ที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้ มาจากเครื่องกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ซึ่งสามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงกว้างตั้งแต่อินฟราเรด จนถึงรังสีเอกซ์ แต่ในกระบวนการลิโกราฟีต้องการพลังงานแสงในช่วงรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft X-ray) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ดังนั้นต้องใช้วัสดุที่สามารถกรอง

ให้ได้แสงในช่วงที่ต้องการ ตัวกรองที่ใช้ คือ ฟลิทแบลลีย์มหนา 200 μm แสงที่ออกมาจึงมีความยาวคลื่นในช่วง 1 nm ซึ่งเป็น soft X-ray รูปที่ 3.34 แสดงลำดับชั้นของตัวกรองจนถึงชั้นงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนที่ใช้งานจริงในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของระบบลำเลียงแสง BL6a : Deep X-ray Lithography ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ในการฉายรังสีเอกซ์ลงบนชิ้นงาน ต้องมีการคำนวณปริมาณพลังงานที่สารไวแสงได้รับ เนื่องจากสารไวแสงต้องได้รับพลังงานที่พอเหมาะ หากฉายแสงด้วยพลังงานมากเกินไป เนื้อสารไวแสงจะแข็งตัวมากเกินไป ทำให้เกิดความเค้นขึ้นในเนื้อสารไวแสง ชิ้นงานจะแตกร้าวหรือหลุดจากฐาน หรือหากฉายน้อยเกินไป สารไวแสงจะไม่แข็งตัว ซึ่งอาจถูกล้างออกไปในขั้นตอนการล้างสารไวแสง รูปที่ 3.35 แสดงนิยามของพลังงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง ซึ่งแยกเป็นส่วนมืด (dark zone) คือ ส่วนที่มีวัสดุกันแสง และส่วนสว่าง (bright zone) คือบริเวณที่ได้รับรังสีโดยตรง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้บางบริเวณจะมีวัสดุกันแสง แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถกันแสงได้ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูป วัสดุกันแสงจะต้องมีความหนาเพียงพอเพื่อที่จะไม่ให้บริเวณ top dark ได้รับพลังงานสะสมจนเกิดการแข็งตัว และต้องฉายแสงด้วยพลังงานมากพอเพื่อให้บริเวณ bottom bright ได้รับพลังงานเพียงพอ หากได้รับพลังงานน้อยเกินไป แม้พิมพ์ก็จะหลุดออกในขั้นตอนการล้างสารไวแสงได้



รูปที่ 3.34 องค์ประกอบของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน BL6 : DXL

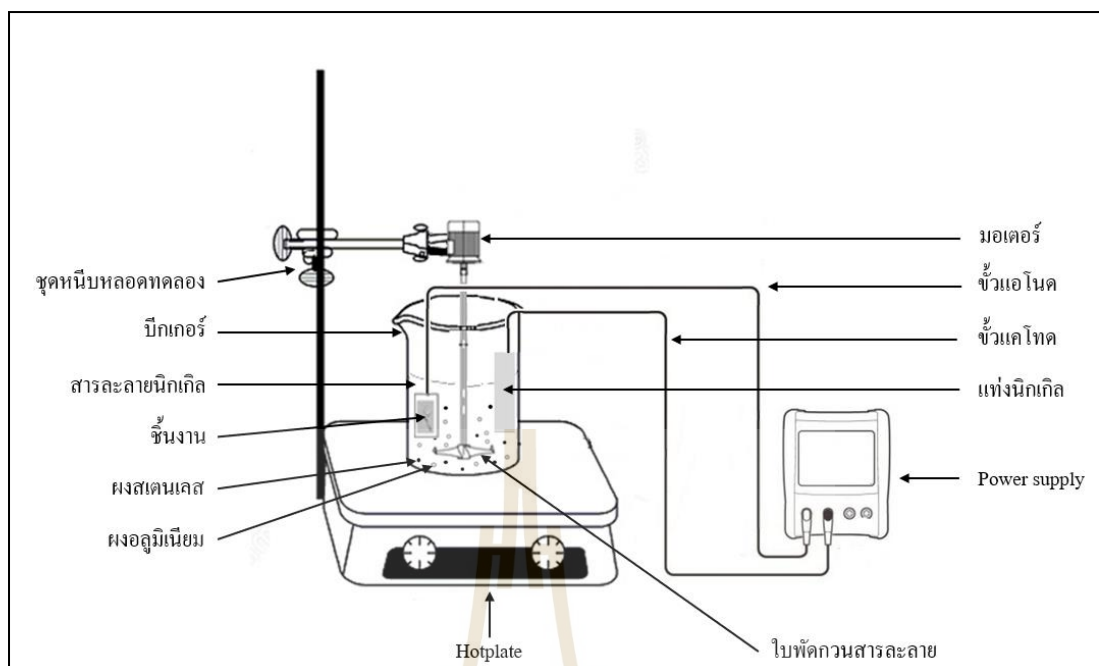


รูปที่ 3.35 แสดงพลังงานส่วนต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง

ในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานในการฉายรังสีเอกซ์ลงบนชั้นงาน 2-8 KeV ในปริมาณ $68,000 \text{ mJ/cm}^2$ สำหรับความหนาของสารไวแสง $500 \text{ }\mu\text{m}$ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 5 นาที แล้วตามด้วย 95°C เป็นเวลา 10 นาที ด้วยอัตราการขึ้นและลดลงของอุณหภูมิ 2°C/min เพื่อให้เกิดเชื่อมโยง (Crosslink) โมเลกุลของสารไวแสง รอให้ชั้นงานเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชั้นงานไป Develop โดยใช้สารเคมีที่เรียกว่า SU-8 Developer นำชั้นงานจุ่มล้างสารไวแสงใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที และล้างด้วย Isopropyl alcohol แล้วตามด้วยน้ำ RO เมื่อสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกแสงละลายจนหมด จะได้ก้อนของแม่พิมพ์ที่มีลวดลายรอยแตกร้าวดตามที่ได้ออกแบบไว้

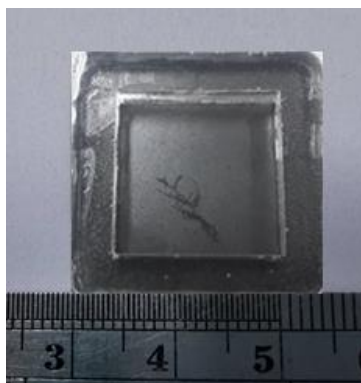
3.5 การชุบโลหะเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวดลายแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

เมื่อได้รอยแตกร้าวดลายแบบแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวดลายแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลส โดยใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าแบบแขวนลอย (Suspension Electroplating) ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบชุดชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.36 โดยติดตั้งใบพัดไว้สำหรับกวนสารละลายแทนการใช้แท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer bar) ซึ่งจะช่วยให้ผงโลหะมีการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น และใช้มอเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนกวนสารละลาย โดยติดตั้งชั้นงานในบีกเกอร์ 400 ml ระยะห่างระหว่างชั้นงานและแท่งนิกเกิล 5 เซนติเมตร และอยู่สูงจากก้นบีกเกอร์ 2 เซนติเมตร ใบพัดสำหรับกวนสารละลายติดตั้งตรงกลางบีกเกอร์ และอยู่สูงจากก้นบีกเกอร์ 1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.36 ชุดชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับชุบสแตนเลส

โดยขั้นตอนการชุบโลหะเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลส ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือการชุบโลหะปิดทับรอยแตกร้าวเลียนแบบ เมื่อขัดแผ่นกราฟไฟต์ออกจะได้รอยแตกร้าวเลียนแบบฝังอยู่บนก้อนสแตนเลส (open crack) และขั้นตอนที่สองคือการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าปิดทับรอยแตกเลียนแบบ เพื่อเป็นการซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลส (close crack) การทดลองเริ่มจากการติดกรอบ Polydimethylsiloxane (PDMS) ความหนา 5 มิลลิเมตร ลงบนแผ่นกราฟไฟต์ที่มีรอยแตกร้าวเลียนแบบ ซึ่งจะช่วยให้กำหนดขนาดและความหนาของโลหะที่ต้องการจะชุบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.37 และติดสายไฟไว้บริเวณด้านหลังแผ่นกราฟไฟต์เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน

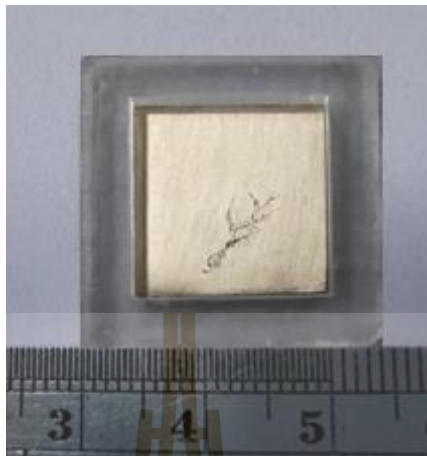


รูปที่ 3.37 รอยแตกร้าวเลียนแบบสำหรับนำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มลงไปในปีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายที่เตรียมไว้ ต่อชิ้นงานเข้ากับขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และต่อแท่งนิกเกิลที่ขั้วแคโทด (ขั้วบวก) ปรับความเร็วรอบในการกวนสารละลายไปที่ 250 รอบ/นาทิจ เพื่อให้ผงโลหะกระจายตัวได้ดี จากนั้นปรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตามเงื่อนไขการทดลอง เมื่อทำการชุบโลหะจนได้ความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ตามความสูงของกรอบ PDMS ดังแสดงในรูปที่ 3.37 ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องใช้ระยะเวลาในการชุบโลหะค่อนข้างนานประมาณ 50 วัน จึงจะได้ความหนา 5 มิลลิเมตร ขั้นตอนต่อไปนำชิ้นงานออกจากชุดชุบโลหะ เพื่อนำไปขัดพื้นผิวให้เรียบด้วยเครื่องขัด รุ่น Struers Rotapol-25 โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 100, 400, 800, 1200, 3000 และ 5000 ตามลำดับ และขัดเงาโดยใช้ผ้ากำมะหยี่ร่วมกับผงขัดอลูมินา $0.04\ \mu\text{m}$ จากนั้นขัดแผ่นกราฟไฟต์ออกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 800 1200 และ 3000 ตามลำดับ (ASTM, G108-94)

เมื่อได้รอยแตกร้าวเลียนแบบบนก้อนสแตนเลสแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เริ่มจากการติดกรอบ Polydimethylsiloxane (PDMS) ความหนา 5 มิลลิเมตร ลงบนชิ้นงานรอยแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 3.38 และต่อสายไฟไว้ด้านหลัง โดยใช้อัตราส่วนของผงโลหะกับสารละลายนิกเกิล ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบในการหมุนกวนสารละลายเหมือนกับเงื่อนไขการทดลองข้างต้น จากนั้นนำชิ้นงานไปใส่ในปีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายที่เตรียมไว้ ต่อชิ้นงานเข้ากับขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และต่อแท่งนิกเกิลที่ขั้วแคโทด (ขั้วบวก) เมื่อทำการชุบโลหะปิดทับรอยแตกร้าวเลียนแบบจนได้ความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ตามความสูงของกรอบ PDMS แล้ว ขั้นตอนต่อไปนำชิ้นงานออกจากชุดชุบโลหะ เพื่อนำไปขัดพื้นผิวให้เรียบด้วยเครื่องขัด รุ่น Struers Rotapol-25 โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 100, 400, 800, 1200, 3000 และ 5000 ตามลำดับ

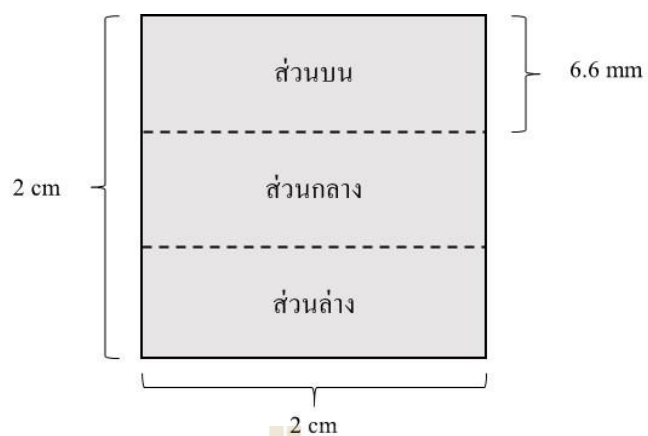
จากนั้นขัดเงาโดยใช้ผ้ากำมะหยี่ร่วมกับผงขัดอลูมินา $0.04\ \mu\text{m}$



รูปที่ 3.38 ชิ้นงานสำหรับชุบโลหะเพื่อซ่อนรอยแตกร้าวเลียนแบบ

จากกระบวนการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบที่ได้พัฒนาขึ้นในบทนี้ จะนำไปถ่ายภาพพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS/EDX) รวมถึงการตรวจสอบคุณสมบัติของชิ้นงานที่ตอบสนองต่อ Eddy current เพื่อให้ใกล้เคียงกับสแตนเลส

ในการวิเคราะห์ด้วย SEM/EDS ผู้วิจัยได้แบ่งชิ้นงานขนาด 2×2 เซนติเมตรออกเป็น 3 บริเวณ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของผงโลหะบนผิวชิ้นงาน คือ บริเวณส่วนบน บริเวณส่วนกลาง และบริเวณส่วนล่าง โดยแต่ละส่วนมีความกว้างประมาณ 6.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 การแบ่งตำแหน่งของชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDS



บทที่ 4

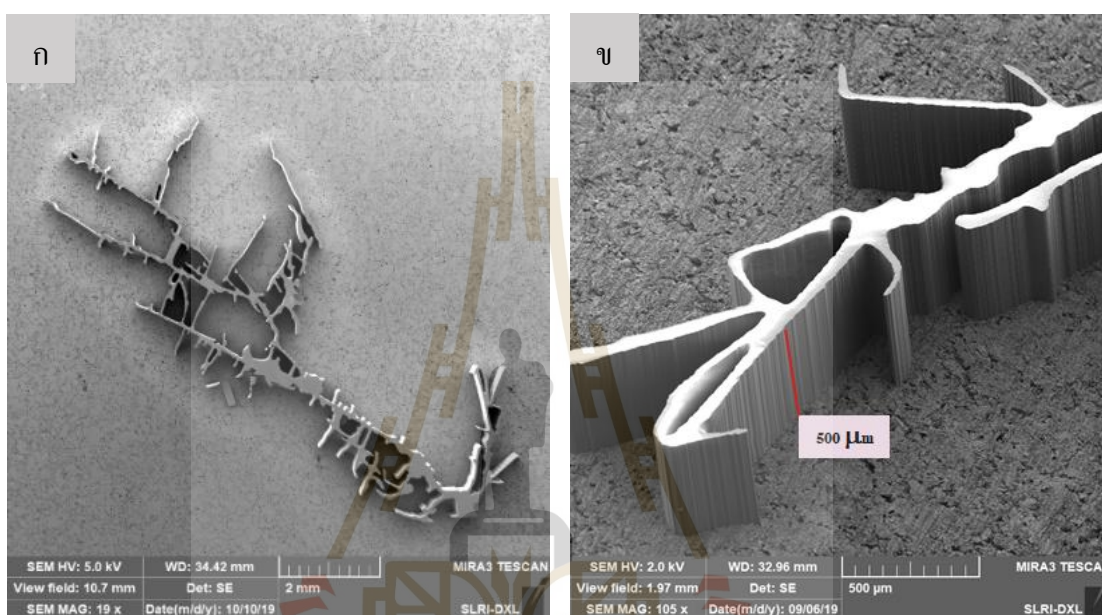
ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากได้กำหนดขั้นตอนวิธีการดำเนินงานในการศึกษาวิจัย และมีการดำเนินการตามขั้นตอนดังบทที่ 3 ในส่วนนี้จะป็นรายละเอียดของผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะแสดงถึงรายละเอียดของผลการศึกษาการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยเทคนิค X-ray Lithography และผลการซ่อมรอยแตกร้าวไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อใช้ตรวจสอบการแตกร้าวของชิ้นงาน โดยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy current) โดยทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาควรรวมถึงดูการกระจายตัวของผงโลหะและการหาพื้นที่รุกรบนบนพื้นผิวชิ้นงาน พร้อมทั้งใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลอง เพื่อใช้ในการหาพารามิเตอร์ของปัจจัยที่เหมาะสมที่ใช้ในการชุบสแตนเลส ซึ่งมีผลการตอบสนองต่อ ECT คือมุม θ ของสัญญาณ ECT ซึ่งรายละเอียดของผลของการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งหัวข้อได้ดังนี้

1. ผลการสร้างรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี
2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก้อนสแตนเลสที่ได้จากเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
 - 2.1 ผลการกระจายตัวของผงโลหะบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM/EDS
 - 2.2 ผลการหาพื้นที่รุกรบนบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยโปรแกรม ImageJ
3. ผลการซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
 4. ผลการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย
 - 4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อ ECT ของชิ้นงาน
 - 4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของปัจจัยที่มีส่งผลต่อการชุบสแตนเลส
 - 4.3 ผลการตรวจสอบหารอยแตกร้าวเลียนแบบด้วย ECT
 - 4.4 ผลการตรวจสอบหารอยแตกร้าวเลียนแบบด้วย X-ray

4.1 ผลการสร้างรอยแตกร้าวด้านแบบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี

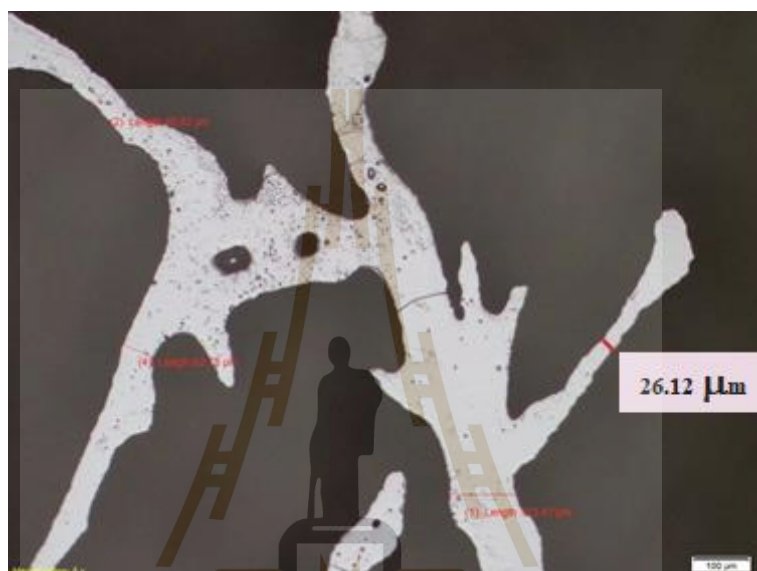
จากการสร้างรอยแตกร้าวด้านแบบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี ในระบบลำแสงที่ 6 ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จะได้ก่อนรอยแตกร้าวด้านแบบที่มีโครงสร้างของลวดลายที่สมบูรณ์เหมือนต้นแบบ (รูปที่ 3.26) และมีพื้นผิวด้านข้างที่เรียบและตั้งฉากกับฐานด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบของรอยแตกร้าวด้านแบบที่สร้างจากเทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี
(ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยของ Noritaka Yusa et al. (2012) ได้สร้างรอยแตกร้าวด้านแบบด้วยเทคนิคลิโธกราฟี และฝังรอยแตกร้าวด้านแบบไว้ในวัสดุด้วยการเชื่อมแบบ solid state พบว่ารอยแตกร้าวด้านแบบที่ได้มีขนาด 0.7 มิลลิเมตร หรือ 700 ไมโครเมตร และในปี 2016 Noritaka Yusa et al. ได้พัฒนาวิธีการสร้างรอยแตกร้าวด้านแบบขึ้นมาใหม่โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3D (3D print) พบว่ารอยแตกร้าวด้านแบบที่ได้จากการพิมพ์ 3D มีขนาดประมาณ 0.48-0.53 มิลลิเมตร หรือ 480-530 ไมโครเมตร และลวดลายของรอยแตกร้าวด้านแบบที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในการสร้างรอยแตกร้าวด้านแบบ เนื่องจากสามารถกำหนดขนาดและรูปร่างได้ และสามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงมากกว่าความกว้างได้ (high aspect ratio) และเมื่อนำรอยแตกร้าวด้านแบบไปตรวจสอบ

ขนาดความกว้างของรอยแตกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับโปรแกรม Stream Start เพื่อวัดขนาดรอยรอยแตกร้าวเลียนแบบที่ได้จากเทคนิคเอกซเรย์ลิโธกราฟี พบว่ารอยแตกร้าวเลียนแบบมีความสูง 500 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.1(ข) มีความกว้าง 26 – 1000 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถสร้างรอยแตกร้าวได้ขนาดเล็กและมีรูปร่างที่มีลักษณะคล้ายกับรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

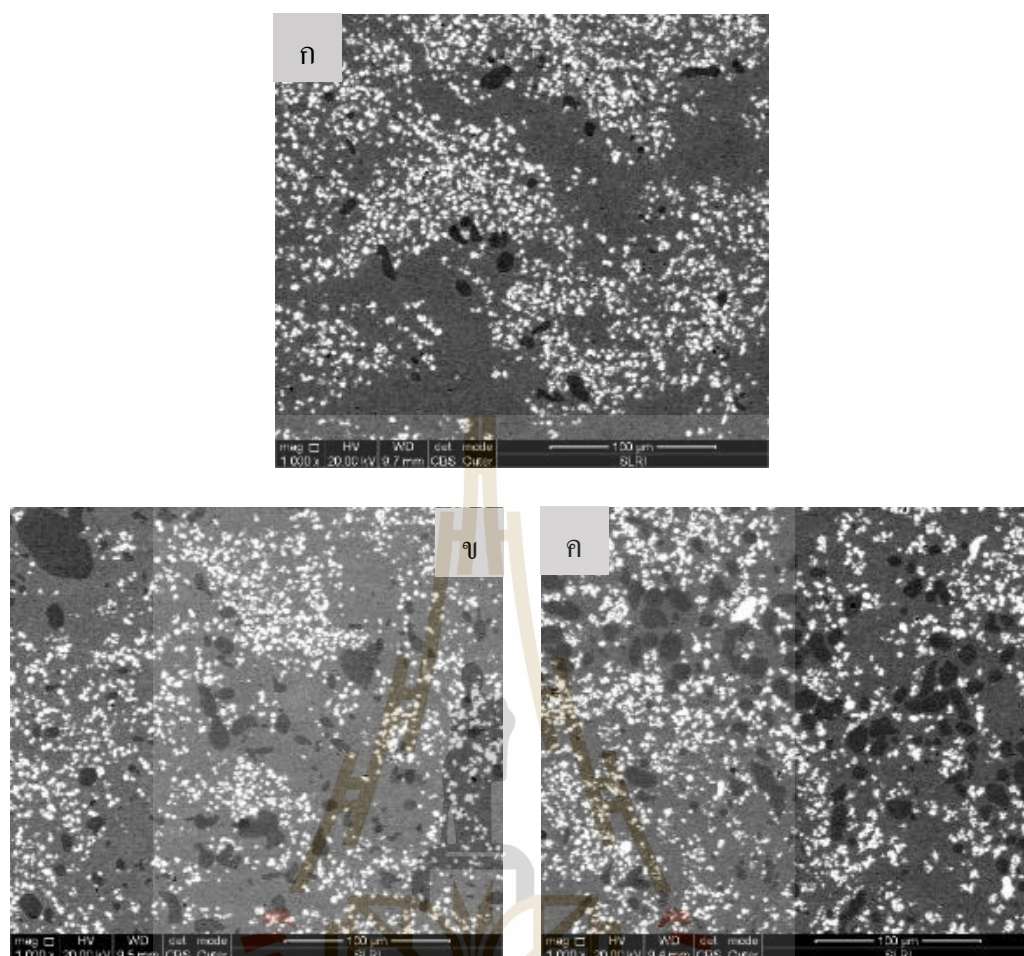


รูปที่ 4.2 ขนาดรอยแตกร้าวที่วัดจากโปรแกรม Stream Start

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก้อนสแตนเลสที่ได้จากเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

4.2.1 ผลการกระจายตัวของผงโลหะบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM/EDS

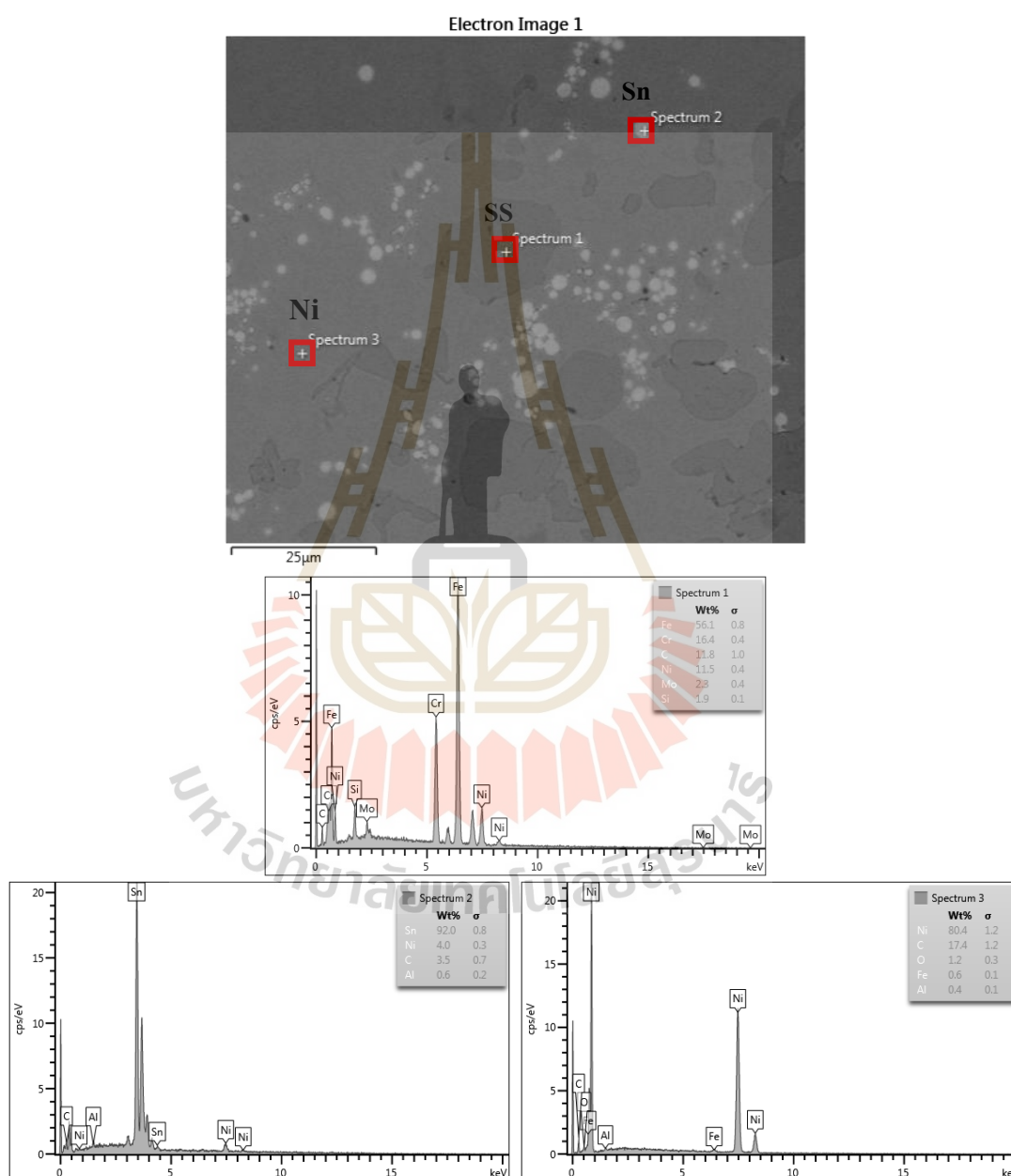
ในการทดสอบชุบสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในแต่ละชั้นจะมีอัตราส่วนของการชุบที่แตกต่างกัน ตามเงื่อนไขของการทดลอง โดยกำหนดให้ปริมาตรของน้ำยาชุบникเกิดเท่ากับ 250 มิลลิลิตร และมีความเร็วรอบในการหมุนกวนสารละลายคือ 250 รอบต่อนาที เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานชุบสแตนเลส โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานชุบสแตนเลสมีการกระจายตัวของผงโลหะทั่วชิ้นงานทั้งบริเวณส่วนบน บริเวณส่วนกลาง และบริเวณส่วนล่างของชิ้นงาน



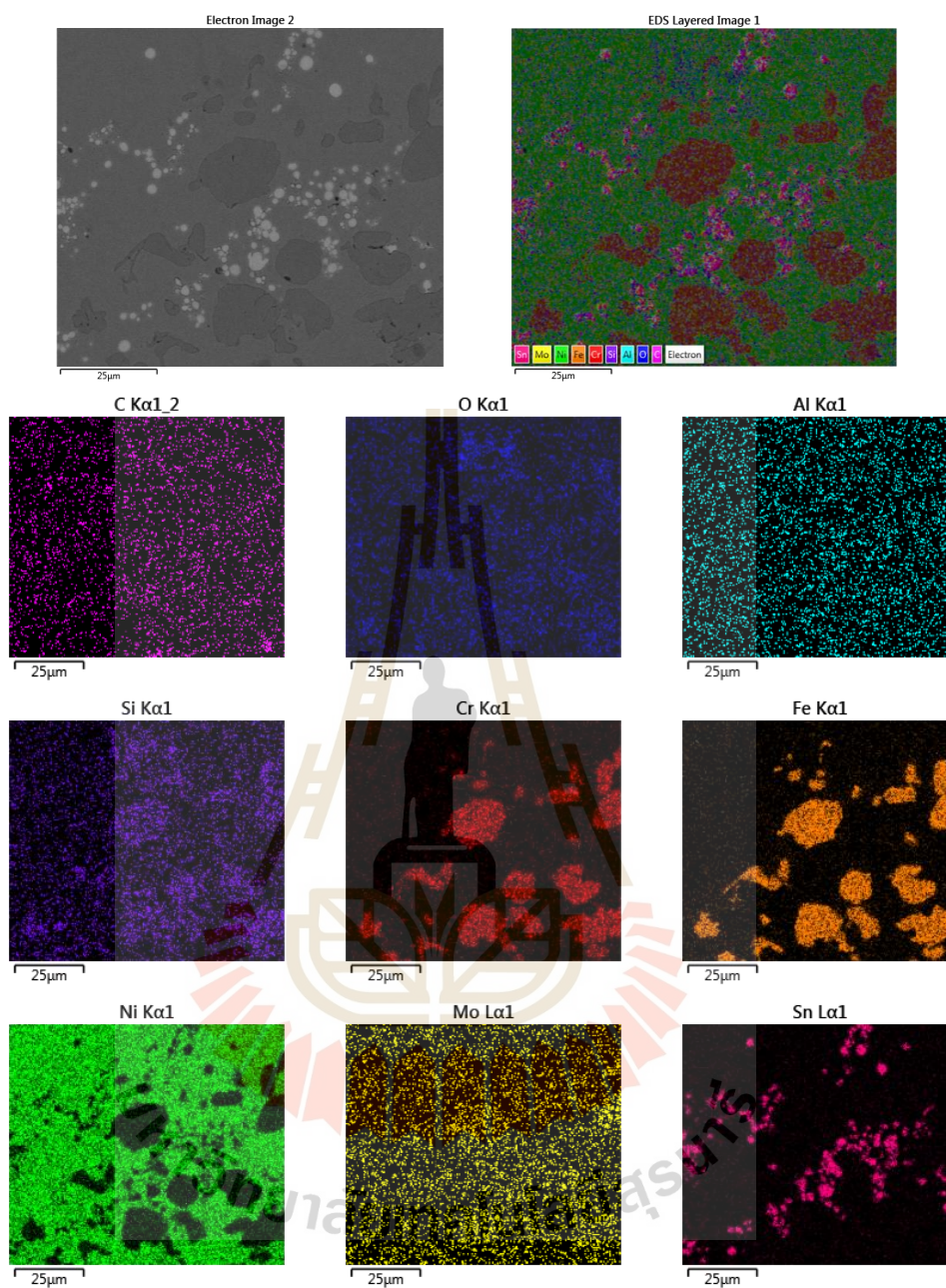
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (ก) บริเวณส่วนบน (ข)บริเวณส่วนกลาง
(ค) บริเวณส่วนล่าง

เมื่อนำไปวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิควิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS/EDX) วิเคราะห์พื้นผิวแบบ point analysis ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าชิ้นงานชุบสแตนเลสบริเวณสเปกตรัมที่ 1 (สีดำ) มีปริมาณเหล็กมากที่สุด เนื่องจากเป็นเกรนของสแตนเลส ซึ่งสแตนเลสเป็นโลหะผสมประกอบไปด้วยธาตุหลัก โครเมียม คาร์บอน นิกเกิล ซัลเฟอร์ และโมลิบดีนัม บริเวณสเปกตรัมที่ 2 (สีขาว) มีปริมาณดีบุกมากที่สุด และบริเวณสเปกตรัมที่ 3 (สีเทา) มีปริมาณนิกเกิลมากที่สุด

เมื่อนำชิ้นงานชุบสแตนเลสไปวิเคราะห์แบบ mapping analysis ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่ามีการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ อยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานชุบสแตนเลส เช่น คาร์บอน ออกซิเจน อลูมิเนียม ซิลิกอน โครเมียม เหล็ก นิกเกิล โมลิบดีนัม และดีบุก ซึ่งธาตุที่พบในชิ้นงานทดสอบเหมือนกันกับธาตุที่พบในสแตนเลสมาตรฐาน

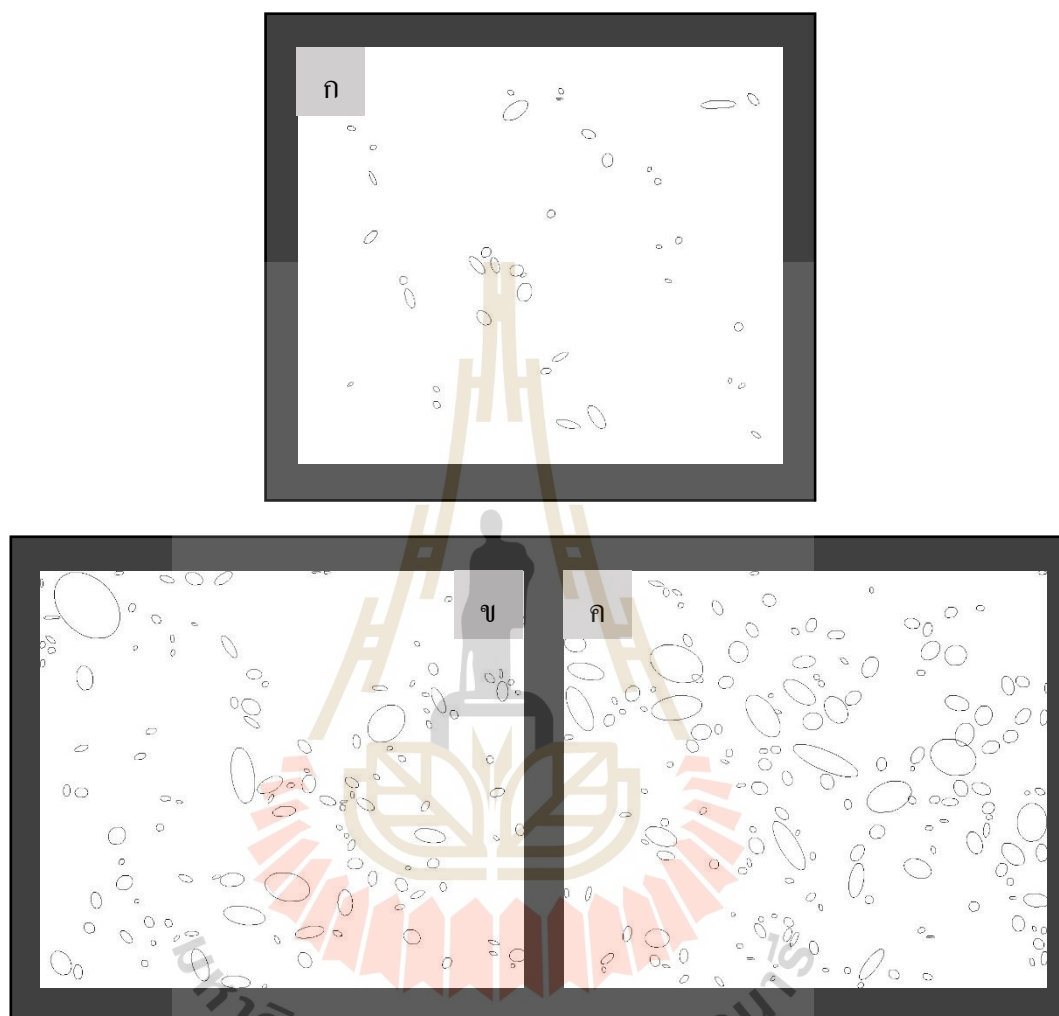


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมจากการวิเคราะห์พื้นผิวแบบ point analysis
ของชิ้นงานทดสอบการชุบสแตนเลส



รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis
ของชิ้นงานทดสอบการชุบสแตนเลส

เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์หาอัตราการกระจายตัวของผงโลหะโดยใช้โปรแกรม
Image J ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของผงสแตนเลสบนผิวชิ้นงาน (ก) บริเวณส่วนบน (ข)บริเวณส่วนกลาง
(ค) บริเวณส่วนกลาง

หมายเหตุ : พื้นที่สีขาวแสดงบริเวณผิวชิ้นงานร่วมกับผงดีบุก
พื้นที่วงกลมแสดงการกระจายตัวของผงสแตนเลส 316L

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 พบว่าบริเวณพื้นที่สีขาวคือบริเวณที่เกิดการกระจายตัวของ นิกเกิล-ผงดีบุก ซึ่งผงดีบุกจะกระจายได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับผงสแตนเลส เนื่องจากผงดีบุกที่ใช้ในการ ทดลองมีขนาดเล็กกว่าผงสแตนเลสจึงทำให้เกิดการกระจายได้ดี ส่วนบริเวณวงกลมคือผงสแตนเลส

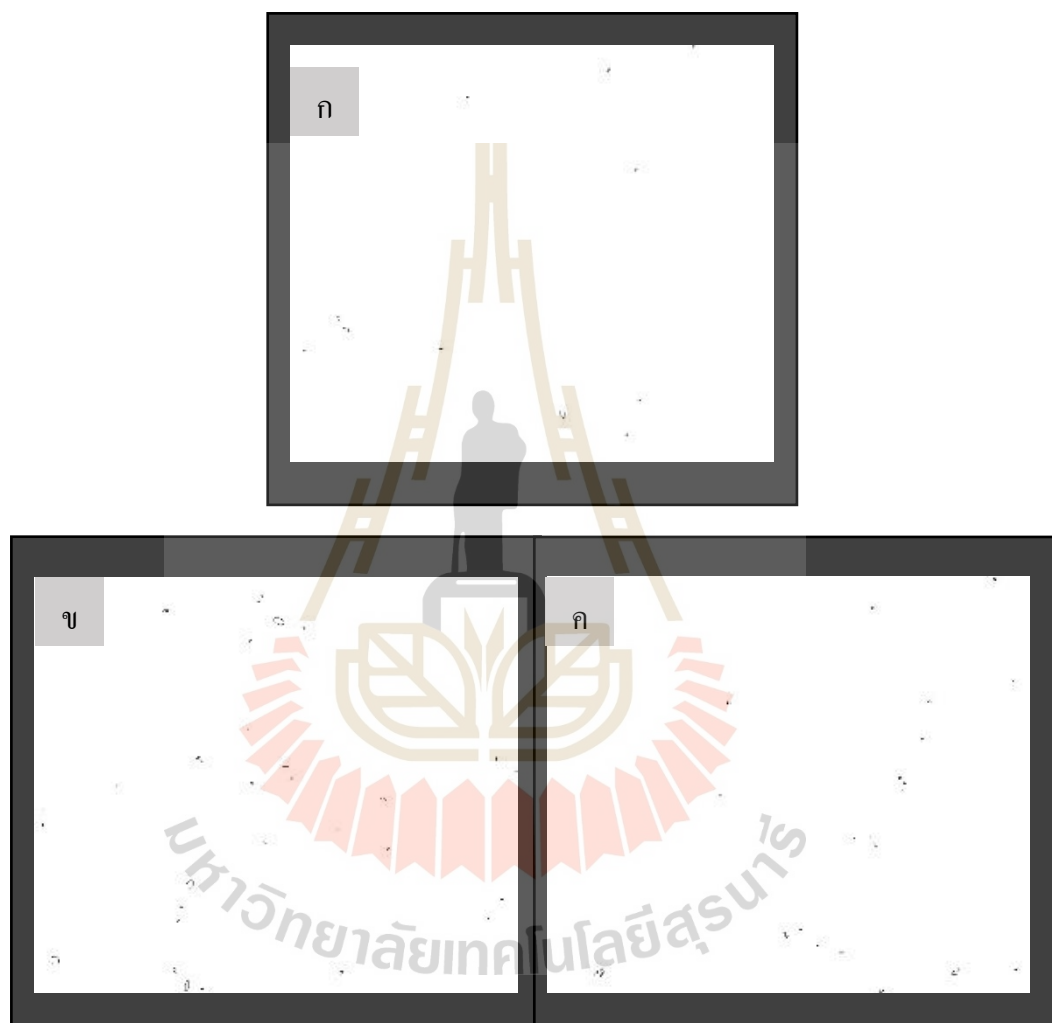
ตารางที่ 4.1 อัตราการกระจายตัวของผงโลหะสแตนเลสต่อพื้นที่ในชิ้นงาน

ชื่อชิ้นงาน	การกระจายของผงโลหะต่อพื้นที่			เฉลี่ย
	บริเวณส่วนบน	บริเวณส่วนกลาง	บริเวณส่วนล่าง	
6mASS100Sn050	50.64	100.20	71.12	73.99
6mASS100Sn100	46.18	67.39	83.20	65.59
6mASS100Sn150	26.45	38.46	79.18	48.03
6mASS100Sn200	59.88	49.11	57.44	55.48
7mASS100Sn150	37.18	93.60	99.59	76.79
7mASS100Sn200	29.16	52.51	59.62	47.10
7mASS100Sn250	73.03	98.62	84.26	85.30
7mASS100Sn300	23.90	30.72	70.31	41.64
7mASS100Sn400	107.07	50.76	109.61	89.15
7mASS100Sn500	48.44	83.60	74.78	68.94
8mASS100Sn400	45.77	75.86	60.02	60.55
8mASS100Sn500	103.99	86.58	94.76	95.11
8mASS150Sn300	30.29	21.98	36.42	29.56
8mASS200Sn300	64.33	49.76	48.13	54.07

จากตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงาน 8mASS100Sn500 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 8 mA/cm^2 ผงสแตนเลส 316L เท่ากับ 1.00 กรัม และผงดีบุกเท่ากับ 5.00 กรัม มีการกระจายตัวของผงสแตนเลสสูงที่สุด คือร้อยละ 95.11 และชิ้นงาน 8mASS150Sn300 มีการกระจายตัวของผงสแตนเลสต่ำที่สุดคือ 29.56 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของผงสแตนเลสของชิ้นงาน ทั้งหมดจากตารางที่ 4.1 พบว่าบริเวณส่วนล่างของชิ้นงานมีการกระจายตัวของผงสแตนเลสสูงที่สุด และบริเวณส่วนบนของชิ้นงานมีการกระจายตัวของผงสแตนเลสต่ำที่สุด เนื่องจากตำแหน่งในการ ติดตั้งชิ้นงานในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ทำให้บริเวณส่วนล่างมีโอกาสได้รับผงโลหะมากที่สุด

4.2.2 การศึกษาการเกิดรูพรุนบนผิวชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส

จากรูปถ่ายการกระจายตัวของผงโลหะบนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM (รูปที่ 4.3) ผู้วิจัยจึงนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่รูพรุนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม Image J ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 พื้นที่รูพรุนบนผิวของชิ้นงานชุบสแตนเลส (ก) บริเวณส่วนบน (ข)บริเวณส่วนกลาง
(ค) บริเวณส่วนกลาง

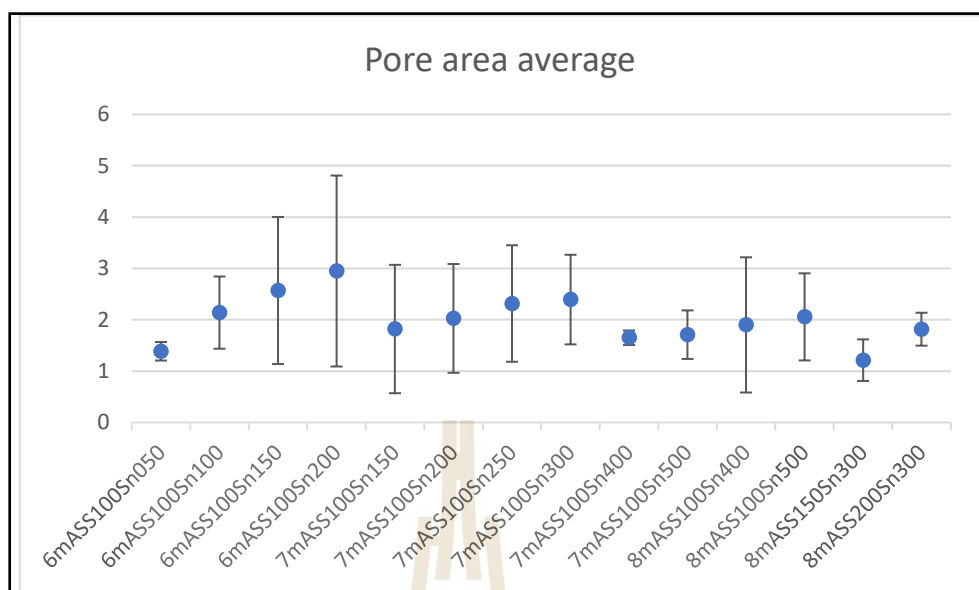
หมายเหตุ : พื้นที่สีขาวแสดงบริเวณผิวชิ้นงานชุบสแตนเลส

พื้นที่จุดวงกลมแสดงบริเวณรูพรุนที่เกิดบนผิวชิ้นงานชุบสแตนเลส

จากการหาค่าร้อยละการเกิดรูพรุนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานชุบสแตนเลสโดยใช้โปรแกรม Image J software ในรูปที่ 4.7 พบว่าบนพื้นผิวของชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั้งบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของชิ้นงาน รูพรุนที่เกิดขึ้นไม่ได้มีแนวโน้มการเกิดขึ้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของชิ้นงาน แต่เกิดการกระจายอยู่ทั้งชิ้นงาน เมื่อนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่เฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานชุบสแตนเลสในแต่ละชั้น จะได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟค่าเฉลี่ยของรูพรุนในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงาน

ชื่อชิ้นงาน	ร้อยละพื้นที่การเกิดรูพรุน			ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (Std Dev.)
	บริเวณ ส่วนบน	บริเวณ ส่วนกลาง	บริเวณ ส่วนล่าง		
6mASS100Sn050	1.30	1.37	1.49	1.38	0.18
6mASS100Sn100	1.89	2.44	2.09	2.14	0.70
6mASS100Sn150	1.85	3.46	2.40	2.57	1.43
6mASS100Sn200	2.79	4.02	2.04	2.95	1.85
7mASS100Sn150	0.98	1.44	3.04	1.82	1.25
7mASS100Sn200	1.46	2.00	2.62	2.02	1.05
7mASS100Sn250	1.53	3.44	1.98	2.31	1.13
7mASS100Sn300	1.80	2.72	2.66	2.39	0.97
7mASS100Sn400	1.65	1.67	1.63	1.65	0.14
7mASS100Sn500	1.59	1.60	1.94	1.71	0.47
8mASS100Sn400	1.59	2.26	1.85	1.90	1.31
8mASS100Sn500	2.06	2.13	1.98	2.05	0.84
8mASS150Sn300	0.85	1.14	1.65	1.21	0.40
8mASS200Sn300	1.58	2.10	1.77	1.81	0.31



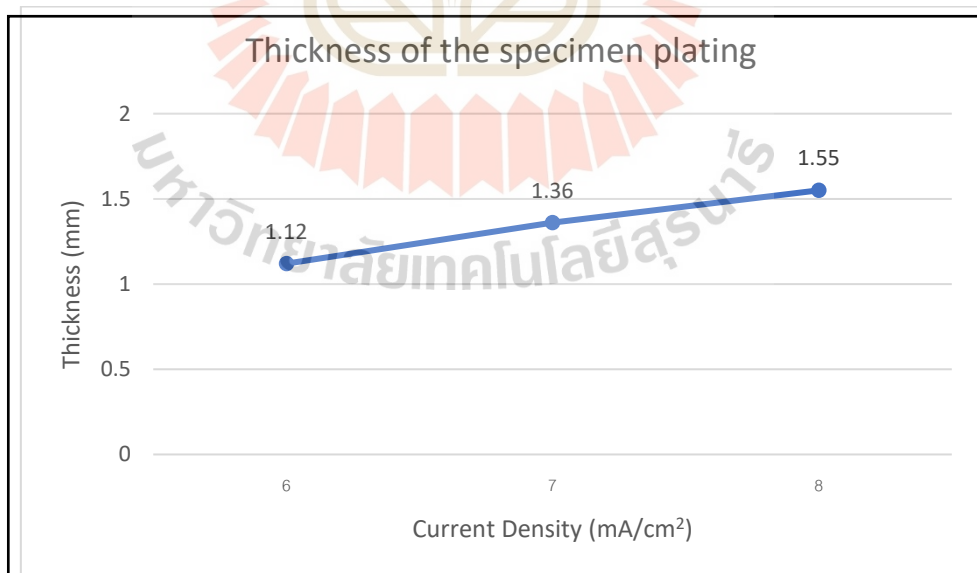
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 พบว่าชิ้นงาน 6mASS100Sn200 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นของกระแส 6 mA/cm^2 ผงสแตนเลส 316L 1.00 กรัม และผงดีบุก 2.00 กรัม มีค่าเฉลี่ยของรูพรุนสูงที่สุด คือ 2.98 และชิ้นงาน 8mASS150Sn300 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นของกระแส 8 mA/cm^2 ผงสแตนเลส 316L 1.50 กรัม และผงดีบุก 3.00 กรัม มีค่าเฉลี่ยของรูพรุนต่ำที่สุด คือ 1.21 โดยรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุน

ปัจจัยที่มีผลต่อรูพรุนแบ่งเป็น 2 ประการ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และปริมาณผงโลหะ (Metal powder) ถูกนำมาวิเคราะห์การเกิดรูพรุนบนผิวชิ้นงาน โดยกำหนดให้ปริมาตรของน้ำยาชุบนิกเกิลเท่ากับ 250 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการหมุนกวนสารละลายเท่ากับ 250 รอบ/นาที จากการทดลองในปัจจัยแรกกำหนดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่คือ 6, 7 และ 8 mA/cm² ทดลองชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ระยะเวลาเท่ากันคือ 15 วัน พบว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 6, 7 และ 8 mA/cm² มีโลหะมาเกาะที่ชิ้นงานวัดความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 1.12 มิลลิเมตร 1.36 มิลลิเมตร และ 1.55 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าน้อย ค่าความหนาของชิ้นงานก็จะน้อยในทางตรงกันข้าม เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาของชิ้นงานก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำ อัตราการชุบโลหะ (plating rate) จะเกิดขึ้นช้า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xinyu Zhang et al (2016) ที่ได้ทดสอบการชุบโลหะผสม Ni-W ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำอัตราการชุบก็จะช้าตามไปด้วย และ Goral et al. (2014) ได้ศึกษาการชุบเคลือบ Ni-Al₂O₃ พบว่าความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 6 A/dm² พารามิเตอร์นี้ยังให้การกระจายอนุภาคที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนาของชิ้นงานจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ปัจจัยที่สองคือปริมาณของผงโลหะ แบ่งออกเป็นผงโลหะสแตนเลส SUS316L และผงดีบุก (Sn) เมื่อทำการทดลองโดยกำหนดให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 6 mA/cm^2 ปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L เท่ากับ 1.00 กรัม และปรับปริมาณผงดีบุกจาก 0.50, 1.00, 1.50 และ 2.00 กรัม พบว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 6mASS100Sn050 มีพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ $1.38 \text{ }\mu\text{m}$ และชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 6mASS100Sn200 มีพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยมากที่สุดคือ $2.95 \text{ }\mu\text{m}$ จากการทดลองพบว่าเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 6 mA/cm^2 แต่ปริมาณผงโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการชุบโลหะเกิดขึ้นได้ช้า และผงโลหะจะเข้าไปเกาะติดบริเวณผิวชิ้นงานมากขึ้นทำให้ช่องว่างเกิดขึ้นที่ขอบเกรนของผงโลหะ

จากนั้นเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็น 7 mA/cm^2 ปริมาณผงสแตนเลสคงที่คือ 1.00 กรัม และเพิ่มปริมาณผงดีบุกจาก 1.50 กรัม 2.00 กรัม 2.50 กรัม 3.00 กรัม 4.00 กรัม และ 5.00 กรัม เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณผงโลหะที่เท่ากัน แต่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน ชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 7mASS100Sn150 มีพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 6mASS100Sn150 คือ $1.82 \text{ }\mu\text{m}$ และ $2.57 \text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเป็น 8 mA/cm^2 ปริมาณผงสแตนเลสคงที่คือ 1.00 กรัม และเพิ่มปริมาณผงดีบุกเข้าไปโดยเริ่มที่ 4.00 กรัม และ 5.00 กรัม จากการทดลองพบว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 7mASS100Sn400 และชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 8mASS100Sn400 มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน แต่มีปริมาณผงโลหะเท่ากัน ชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 7mASS100Sn400 มีพื้นที่รูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 8mASS100Sn400 คือ $1.65 \text{ }\mu\text{m}$ และ $1.90 \text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ และชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 7mASS100Sn500 มีพื้นที่รูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 8mASS100Sn500 คือ $1.71 \text{ }\mu\text{m}$ และ $2.05 \text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการชุบโลหะที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

เมื่อเพิ่มปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L เป็น 1.50 กรัม และ 2.00 กรัม แล้วลดปริมาณผงดีบุกลงเป็น 3.00 กรัม โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่คือ เป็น 8 mA/cm^2 เพื่อศึกษาการเกิดรูพรุน พบว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 8mASS200Sn300 มีพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 8mASS150Sn300 คือ $1.81 \text{ }\mu\text{m}$ และ $1.21 \text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบชุบสแตนเลสที่ทำให้เกิดรูพรุนน้อยที่สุดคือใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 8 mA/cm^2 ปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L เท่ากับ 1.50 กรัม และปริมาณผงดีบุกเท่ากับ 3.00 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hiromichi et al. (2003) ซึ่งศึกษาการชุบเคลือบ Ni โดยใช้ความหนาแน่นกระแสสูง (8.44 A/dm^2) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sun et al. (2014) ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสสูง (6.5 A/dm^2)

พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคมีความสม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้าม Bakhit et al. (2014) ได้ศึกษาการชุบเคลือบ Ni-SiC โดยใช้ความหนาแน่นกระแสต่ำ (3 A/dm^2) พบว่าอนุภาคของ Ni-SiC มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

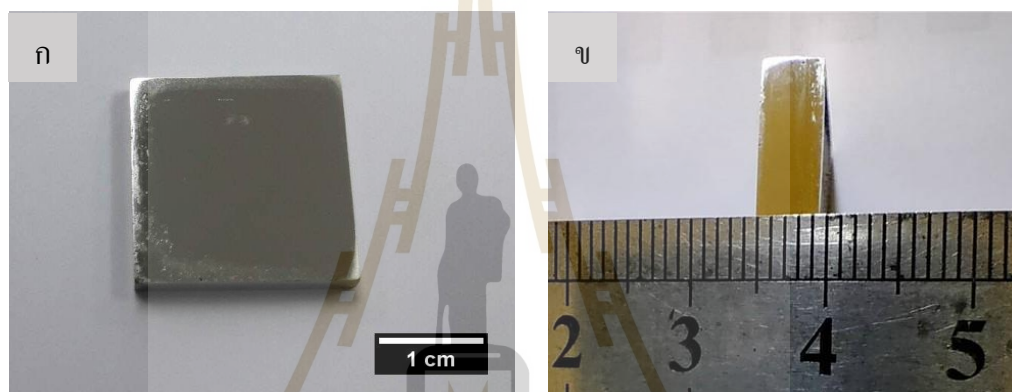
4.3 ผลการซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

เมื่อได้รอยแตกร้าวเลียนแบบจากเทคนิคเอกซเรย์ลิโกราฟีและนำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลส ตามพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองสร้างก้อนสแตนเลสในเบื้องต้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การชุบโลหะปิดทับรอยแตกร้าวเลียนแบบ เมื่อขัดแผ่นกราฟไฟต์ออกจะได้รอยแตกร้าวเลียนแบบฝังอยู่บนก้อนสแตนเลส (open crack) ที่มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 รอยแตกร้าวลอกเลียนแบบที่อยู่บนก้อนสแตนเลส

เมื่อนำรอยแตกร้าวเลียนแบบฝังอยู่บนก้อนสแตนเลสไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อเป็นการซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลส (close crack) ด้วยพารามิเตอร์เดียวกัน จะได้ก้อนสแตนเลสความหนาประมาณ 10 mm ที่มีรอยแตกร้าวซ่อนอยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในการชุบซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในก้อนสแตนเลสได้ ซึ่งการซ่อมรอยแตกร้าวไว้ภายในก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่ามีความยากในการเตรียมชิ้นงาน และใช้ระยะเวลาก่อนขึ้นงานประมาณ 3 – 4 เดือนต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้น และเมื่อตรวจสอบรอยต่อระหว่างชั้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ไม่พบรอยต่อระหว่างชั้นในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข)

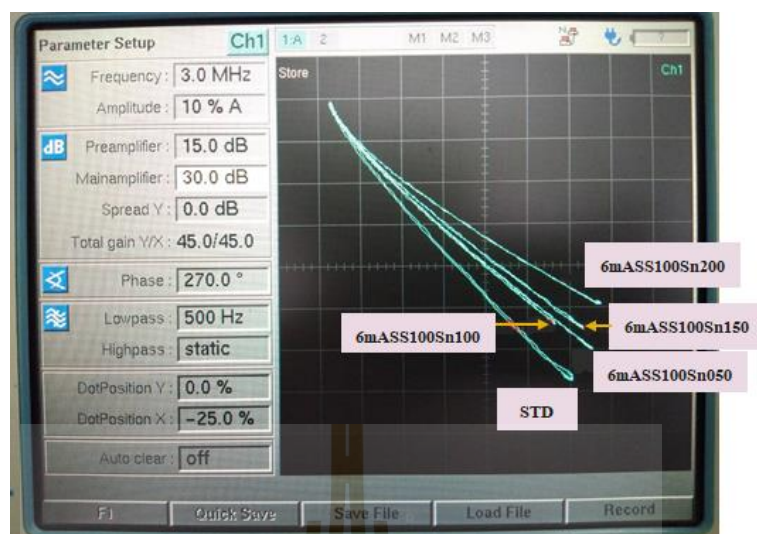


รูปที่ 4.11 ก้อนสแตนเลสที่มีรอยแตกร้าวซ่อนอยู่ภายในจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
(ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง

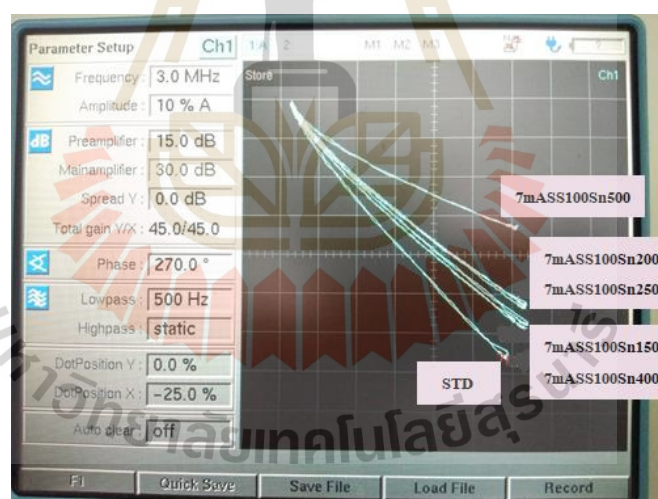
4.4 ผลการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

4.4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อ Eddy current ของชิ้นงาน

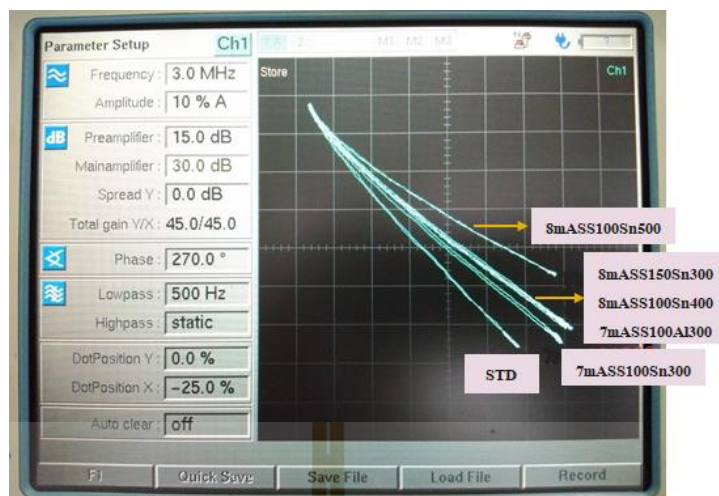
ชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลสทั้งหมดถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy Current) เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อ Eddy Current โกล้เคียงหรือเหมือนสแตนเลสมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.12



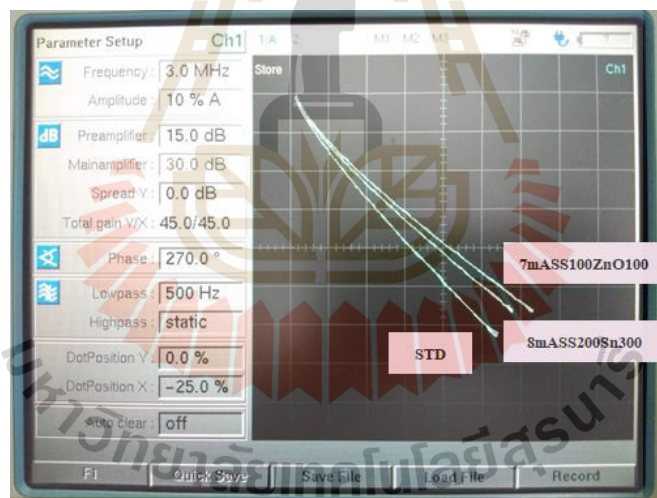
(ก) เส้นสัญญาณ ECT ของชิ้นงาน 6mASS100Sn050, 6mASS100Sn100, 6mASS100Sn150, 6mASS100Sn200 และ STD



(ข) เส้นสัญญาณ ECT ของชิ้นงาน 7mASS100Sn150, 7mASS100Sn200, 7mASS100Sn250, 7mASS100Sn400, 7mASS100Sn500 และ STD



(ค) เส้นสัญญาณ ECT ของชิ้นงาน 7mASS100Al300, 7mASS100Sn300, 8mASS150Sn300, 8mASS100Sn400, 8mASS100Sn500 และ STD

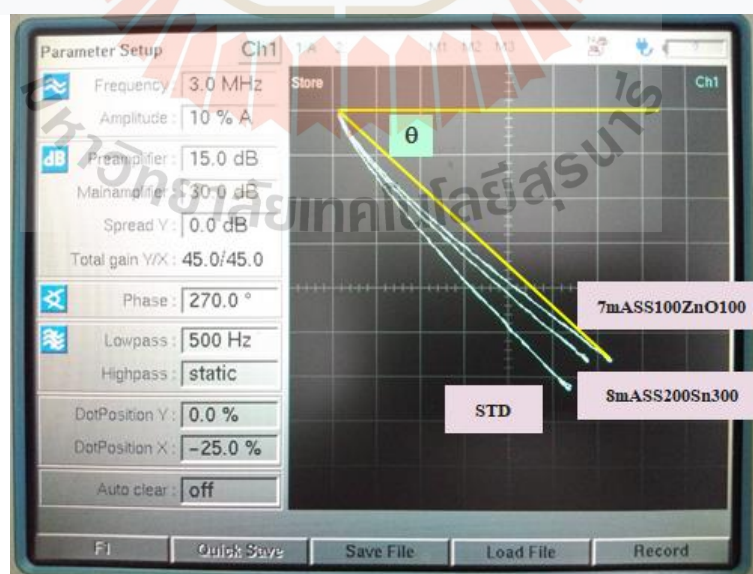


(ง) เส้นสัญญาณ ECT ของชิ้นงาน 7mASS100ZnO100, 8mASS200Sn300 และ STD

รูปที่ 4.12 แสดงเส้นสัญญาณการตรวจสอบด้วย ECT ของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.12 เป็นการตรวจหาคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส ด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current : ECT) ทดสอบที่ความถี่ (frequency) 3.0 MHz โดยใช้เครื่อง ECT รุ่น ELOTEST B300 โดยการวางหัววัด ECT บนพื้นผิวของชิ้นงาน จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส 6mASS100Sn100 (รูปที่ 4.12 ก) 7mASS100Sn400 (รูปที่ 4.12 ข) 7mASS100Sn300 (รูปที่ 4.12 8) และ 8mASS200Sn300 (รูปที่ 4.12 8) มีลักษณะของเส้นสัญญาณที่เข้าใกล้กับสแตนเลสมาตรฐาน (stainless standard : STD) มากที่สุด เนื่องจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistances) สูงกว่าชิ้นงานทดสอบชิ้นอื่น ๆ ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าของสแตนเลสและธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสแตนเลส พบว่า สแตนเลสมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.4×10^7 S/m เหล็ก นิกเกิล อลูมิเนียม และดีบุกมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1×10^7 S/m, 1.4×10^7 S/m, 3.8×10^7 S/m และ 9.1×10^7 S/m ตามลำดับ ในทางกลับกันผล ECT ของชิ้นงานทดสอบ 7mASS100Sn500 (รูปที่ 4.12 ข) และ 8mASS100Sn500 (รูปที่ 4.12 ค) มีเส้นสัญญาณอยู่ไกลจากเส้นสัญญาณของ STD มาก เนื่องจากการผสมผงดีบุกมากเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากองค์ประกอบของนิกเกิลใน SUS316L ละลายด้วยดีบุก ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง

เมื่อนำเส้นสัญญาณการตรวจสอบด้วย ECT ของชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลสมาวัดค่ามุม θ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อหาเส้นสัญญาณของชิ้นงานทดสอบที่เข้าใกล้เส้นสัญญาณของสแตนเลสมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.13 การวัดค่ามุม θ ของเส้นสัญญาณ ECT

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ามุม θ ของชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลส

ชื่อชิ้นงาน	การวัดค่ามุม θ
Stainless standard (STD)	49.38
6mASS100Sn050	43.14
6mASS100Sn100	44.87
6mASS100Sn150	41.44
6mASS100Sn200	36.67
7mASS100Sn150	42.98
7mASS100Sn200	40.52
7mASS100Sn250	40.92
7mASS100Sn300	43.44
7mASS100Sn400	43.88
7mASS100Sn500	29.05
8mASS100Sn400	40.63
8mASS100Sn500	34.72
8mASS150Sn300	40.55
8mASS200Sn300	44.88

จากตารางที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงค่ามุม θ ของชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลสและมาตรฐานสแตนเลส (STD) ซึ่งจากการวัดค่ามุม θ ของสแตนเลสมาตรฐานจะได้ค่ามุมเท่ากับ 49.38 และจากการทดลองพบว่าที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน คือ 6 และ 7 mA/cm² แต่มีปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L 1.00 กรัม ปริมาณผงดีบุก (Sn) 1.50 เท่ากัน พบว่ามีค่ามุม θ ใกล้เคียงกัน คือ 41.44 และ 42.98 ตามลำดับ เช่นเดียวกับชิ้นงาน 7mASS100Sn400 กับ 8mASS100Sn400 ที่มีปริมาณผงโลหะเท่ากัน แต่มีค่าความหนาแน่นกระแสต่างกัน พบว่ามีค่ามุม θ เท่ากับ 43.88 และ 40.63 ตามลำดับ แต่ชิ้นงาน 7mASS100Sn500 กับ 8mASS100Sn500 ที่มีเส้นสัญญาณไกลจากเส้นสัญญาณของ STD ซึ่งวัดค่ามุม θ ได้เท่ากับ 29.05 และ 34.72 ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานมีปริมาณผงดีบุกสูงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำลง

เมื่อทำการทดลองโดยการเพิ่มปริมาณผงสแตนเลส SUS316L และลดปริมาณผงดีบุกลงเหลือ 3.00 กรัม พบว่าที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 8 mA/cm^2 มีปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L 1.50 กรัม ปริมาณผงดีบุก 3.00 กรัม วัดค่ามุม θ ได้เท่ากับ 40.55 จากนั้นทำการทดลองปรับเพิ่มปริมาณผงสแตนเลส SUS316L เป็น 2.00 กรัม พบว่าค่ามุม θ ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 44.88 ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามุม θ ของชิ้นงาน 6mASS100Sn100 ที่มีค่ามุม θ เท่ากับ 44.87 ซึ่งมีเส้นสัญญาณเข้าใกล้เส้นสัญญาณของ STD ที่มีค่ามุม θ เท่ากับ 49.38 สามารถบ่งชี้ได้ว่าชิ้นงานทดสอบที่สร้างขึ้นด้วย SUS316L ผสมกับผงดีบุก (Sn) สามารถใช้เป็นชิ้นงานในการสอบเทียบได้ เนื่องจากมีวัสดุคล้ายกับชิ้นส่วนการตรวจสอบที่อ้างอิงมาตรฐาน JISG4303

4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากสัญญาณเส้นยกออก (Lift off) ระหว่างอากาศกับชิ้นงานทดสอบชุบสแตนเลสในรูปที่ 4.12 จึงนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการวัดขนาดมุม θ ของเส้นสัญญาณในแต่ละเส้น เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองต่อ ECT ใกล้เคียงหรือเหมือนสแตนเลส ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อชุบสแตนเลส ค่า P-Value ของค่าผลกระทบของปัจจัยตัวใดที่มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นจะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

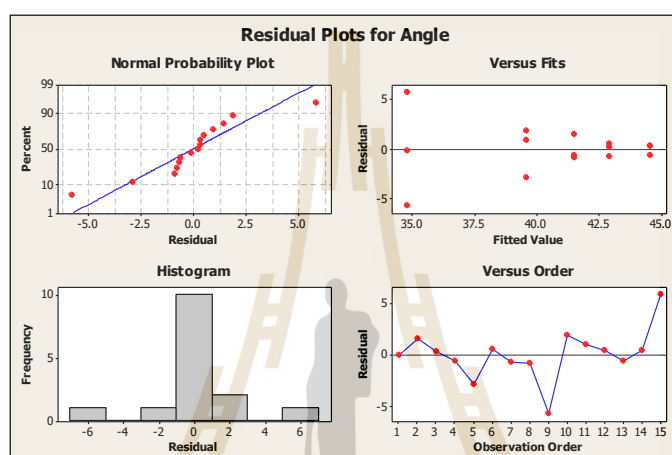
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการชุบสแตนเลส ด้วยโปรแกรม Minitab 16.0

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Main Effects	2	105.036	105.036	52.518	6.20	0.018
Current	1	2.193	2.193	2.193	0.26	0.622
Metal powder	1	102.843	102.843	102.843	12.14	0.006
2-Way Interactions	1	45.357	45.357	45.357	5.35	0.043
Current*Metal powder	1	45.357	45.357	45.357	5.35	0.043
Curvature	1	19.007	19.007	19.007	2.24	0.165
Residual Error	10	84.705	84.705	8.407		
Pure Error	10	84.705	84.705	8.407		
Total	14	254.105				

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการชุบสแตนเลส พบว่าเทอมของผงโลหะมีค่า P-Value เท่ากับ 0.006 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่าปัจจัยผงโลหะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามุม θ ของเส้นสัญญาณ ECT และเทอมความหนาแน่นของกระแส

ไฟฟ้ามีค่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.622 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามุม θ ของเส้นสัญญาณ ECT แต่เมื่อพิจารณาค่า P-Value ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าร่วมกับผงโลหะ พบว่ามีค่า P-Value เท่ากับ 0.043 นั้นหมายความว่าเมื่อใช้ปัจจัยทั้งสองร่วมกันในการหุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามุม θ ของเส้นสัญญาณ ECT

เมื่อทำการตรวจสอบปัจจัยที่มีนัยสำคัญแล้วจะทำการวิเคราะห์ค่าส่วนค้าง เพื่อตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง โดยจะทำการวิเคราะห์จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.14

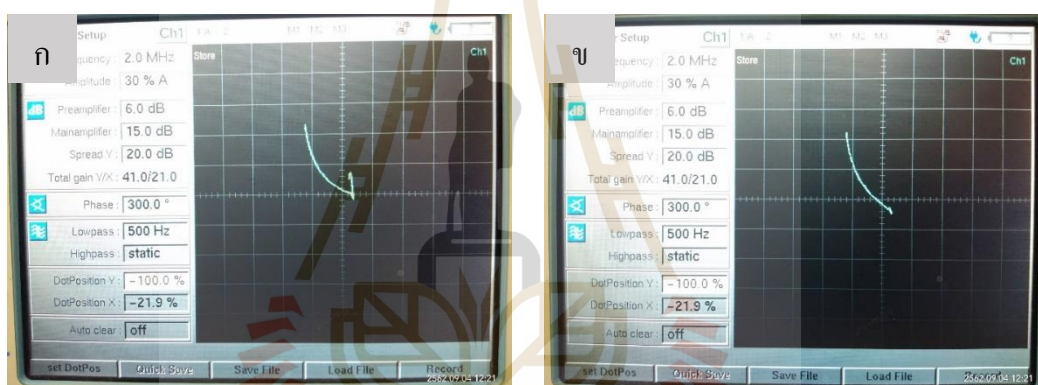


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงส่วนตกค้างค่าผลตอบของมุม θ

กราฟแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของส่วนค้างของมุม θ แสดงดังรูปที่ 4.14 จากกราฟแบบปกติของผลตอบมุม θ ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่บริเวณใกล้กับเส้นปกติ ซึ่งแสดงถึงส่วนค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ในส่วนของกราฟส่วนค้างกับลำดับการทดลอง (Versus Order) เป็นกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ความอิสระของข้อมูลว่าลำดับการทดลองไม่ส่งผลต่อการทดลอง จากกราฟส่วนค้างกับลำดับการทดลองของมุม θ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะพบว่าไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ ข้อมูลมีการกระจายตัว แสดงถึงลำดับการทดลองนี้ไม่มีผลต่อการทดลอง และจากกราฟส่วนค้างกับค่าทำนาย (Fitted Value) เป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความอิสระของข้อมูลที่ไม่ขึ้นกับค่าทำนายกราฟส่วนค้างกับค่าทำนายของมุมที่แสดงในรูปที่ 4.14 ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระ จากการวิเคราะห์กราฟส่วนค้างของมุมในแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลผลการทดลองของมุมไม่มีความผิดปกติใด ๆ

4.4.3 ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยวิธีกระแสไหลวน

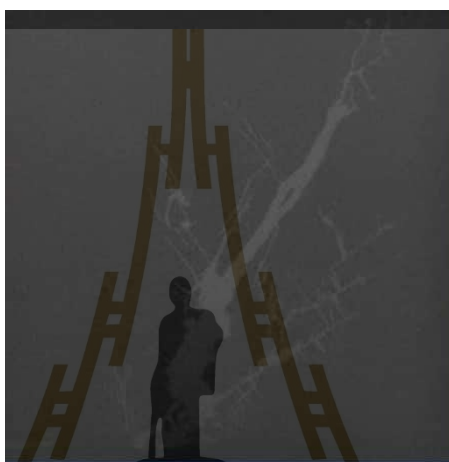
หลังจากที่ได้ทำการทดลองชุบโลหะสแตนเลสด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อมรอยแตกร้าวเลียนแบบไว้ภายในแล้ว จึงนำไปสู่การตรวจจับสัญญาณ ECT ของรอยแตกร้าวเลียนแบบที่ซ่อนอยู่ภายในก้อนสแตนเลส โดยการสแกนหัววัด ECT ผ่านรอยแตกร้าวเลียนแบบ กล่าวคือเมื่อหัววัด ECT สแกนผ่านจุดที่มีรอยแตกร้าว ECT จะตรวจจับสัญญาณแล้วแสดงออกมาดังรูปที่ 4.15 (ก) และเมื่อหัววัด ECT สแกนผ่านบริเวณที่ไม่มีรอยแตกร้าว แต่สแกนผ่านรูพูน จะแสดงเส้นสัญญาณระหว่างอากาศกับชิ้นงานดังรูปที่ 4.15 (ข) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ารูพูนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานไม่ตอบสนองต่อ ECT เนื่องจากรูพูนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กประมาณ 1-3 ไมโครเมตร ซึ่งต่ำกว่า sensitivity ของการตรวจสอบจึงทำให้ ECT ตรวจจับสัญญาณไม่ได้ ดังนั้นรูพูนเล็ก ๆ บนผิวชิ้นงานจึงไม่นับว่าเป็นสิ่งแปลกปลอมหรือรอยแตกร้าวใด ๆ



รูปที่ 4.15 เส้นสัญญาณ ECT ในชิ้นงาน (ก) สัญญาณ ECT ที่พบรอยแตกร้าว
(ข) สัญญาณ ECT ที่ไม่พบรอยแตกร้าว

4.4.4 ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวเลียนแบบด้วยวิธีรังสี

ในการตรวจสอบหารอยแตกร้าวในชิ้นงานทดสอบจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีพลังงานสูง ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้รังสีเอกซ์ (X-ray) เพื่อปล่อยรังสีพลังงานสูงให้ผ่านบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ รังสีจะไม่สามารถทะลุผ่านส่วนที่เป็นรอยแตกร้าวในชิ้นงานไปได้ และจะเกิดเป็นภาพของรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีรังสีจะเป็นวิธีที่ช่วยยืนยันได้ว่าภายในชิ้นงานทดสอบหุบสแตมเลสมีรอยแตกร้าวอยู่จริง



รูปที่ 4.16 แสดงรอยแตกร้าวในชิ้นงานทดสอบหุบสแตมเลสด้วยวิธี X-ray

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างรอยแตกร้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ลิโทกราฟี และซ่อนรอยแตกร้าวไว้ในก้อนสแตนเลสด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy Current) จากการทดลองพบว่า

5.1.1 เทคนิคเอกซเรย์ลิโทกราฟีสามารถนำไปใช้ในการสร้างรูปแบบของรอยแตกร้าวเลียนแบบที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตรได้ อีกทั้งยังสามารถกำหนดลักษณะรูปร่างและความสูงของรูปแบบได้

5.1.2 เมื่อนำรูปแบบของรอยแตกร้าวเลียนแบบไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อนรอยแตกร้าวไว้ในก้อนสแตนเลส พบว่าสามารถซ่อนรูปแบบของรอยแตกร้าวได้ด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยไม่พบรอยต่อระหว่างชั้นของการชุบซ่อนรอยแตกร้าว

5.1.3 เมื่อนำก้อนสแตนเลสที่ได้จากเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าไปตรวจสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อ ECT พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการชุบโลหะสแตนเลสคือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 8 mA/cm^2 ปริมาณผงโลหะสแตนเลส SUS316L เท่ากับ 2.00 กรัม ปริมาณผงดีบุก (Sn) เท่ากับ 3.00 กรัม ต่อปริมาตรของน้ำยาชุบนิกเกิล 250 มิลลิลิตร มีคุณสมบัติการตอบสนองต่อ ECT ที่เข้าใกล้หรือใกล้เคียงกับสแตนเลสมาตรฐาน สามารถใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานในการสอบเทียบได้

5.1.4 ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงส่งผลให้อัตราการชุบเกิดขึ้นได้เร็ว ในทางตรงข้ามค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำ อัตราการชุบก็จะเกิดขึ้นช้าตามไปด้วย

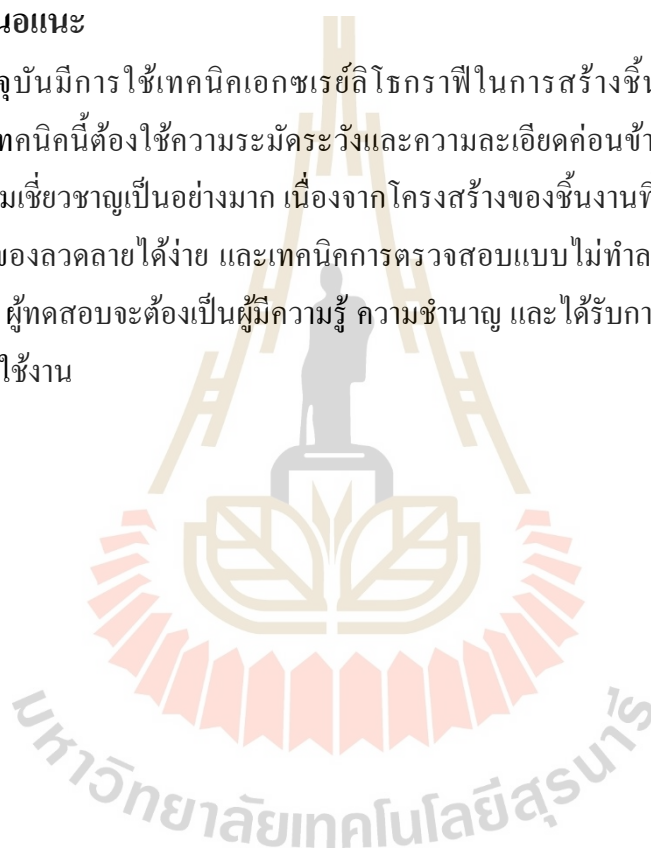
5.1.5 ปริมาณผงโลหะสแตนเลส 316L และผงดีบุก ที่ใช้ในการทดลองส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการชุบโลหะสแตนเลส และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดลอง เนื่องจากผู้วิจัยเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.6 จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าบริเวณด้านล่างของชิ้นงานผงสแตนเลสมีการกระจายตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณส่วนบนและส่วนกลางชิ้นงาน เนื่องจากตำแหน่งในการติดตั้งชิ้นงานในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ทำให้บริเวณส่วนล่างมีโอกาสได้รับผงโลหะมากที่สุด

5.1.7 รูพรุนขนาดเล็กมีการกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงานบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง ไม่มีแนวโน้มการเกิดรูพรุนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันมีการใช้เทคนิคเอกซเรย์ลิโกราฟีในการสร้างชิ้นงานขนาดเล็กกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเทคนิคนี้ต้องใช้ความระมัดระวังและความละเอียดค่อนข้างสูง ผู้ใช้จึงจำเป็นต้องมีความรู้และความเชี่ยวชาญเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของผลตายได้ง่าย และเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy Current) ผู้ทดสอบจะต้องเป็นผู้มีความรู้ ความชำนาญ และได้รับการฝึกอบรมและฝึกฝนเป็นอย่างดีก่อนการใช้งาน



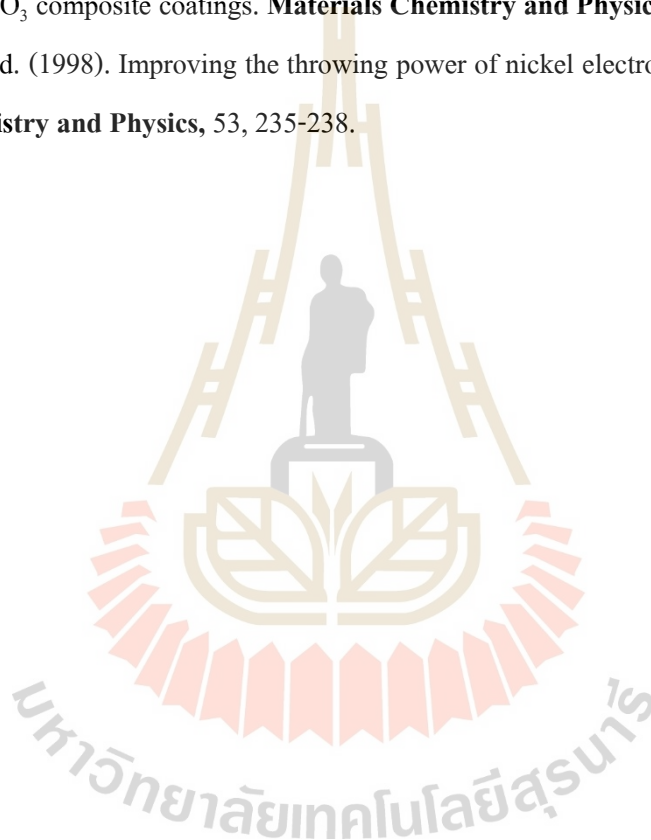
รายการอ้างอิง

- คณัฏ กิจชัยนุกูล (2547). เรื่อนำรู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM). *ฟิสิกส์ราชมงคล*.
- คลฤดี โตเย็น. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทัศพล บุญยรัตนสุนทร. เซลล์อิเล็กโตรไลต์. <http://119.46.166.126>
- พรวิสา วงศ์ปัญญา (2557). การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion testing). *เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.:151-159
- รัชชนิ์ สงวนหมู่ (2553). การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.:14-19.
- วนิดา พงศ์ศักดิ์สวัสดิ์, เอกรัตน์ ไวยนิตย์, อำนวยศักดิ์ เจียรไพโรจน์, และณมรธา พอลสัน (2559). มูลค่าการกัดกร่อนสำรวจในประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2552 – 2554. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ชิกมา กราฟฟิกส์.
- ศักดิ์ศรี สุภาธร. ไฟฟ้าเคมีเชิงบูรณาการ. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาลัยมหิดล. Li.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). X-ray LIGA Technology. (2560). <http://www.slri.or.th/bl6a/process/x-ray-liga.html>
- สยาม แก้วคำไสย์ (2553). การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stress Corrosion Cracking stainless steel). <http://siamkaewkumsai.blogspot.com>
- เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย (2557). การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหการ. *สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.:53-80
- สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์. (2556). โลหะวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- อัจฉราพร ศรีอ่อน (2559). หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. *Materials Characterization*.:77-80.
- เอกรัตน์ ไวยนิตย์ (2553). การกัดกร่อนและป้องกัน. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. www.most.go.th

- Anna Goral, Marek Nowak, Katarzyna Berent and Bogusz Kania. (2014). Influence of current density on microstructure and properties of electrodeposited nickel-alumina composite coatings. **Journal of Alloys and Compounds**, 615(S1), S406-S410.
- ASTM, Standard test method for electrochemical reactivation (EPR) for detecting sensitization of AISI type 304 and 304L stainless steels, **Designation:** G 108-94.
- Babak Bakhit, Alireza Akbari, Farzad Nasirpour and Mir Ghasem Hosseini. (2014). Corrosion resistance of Ni-Co alloy and Ni-Co/SiC nanocomposite coatings electrodeposited by sediment codeposition technique. **Applied Surface Science**, 307, 351-359.
- Cherdpong JOMDECHA, Wenlu CA, Shejuan XIE, Zhenmao CHEN, Isaratat PHUNG-ON, Rungrueang PATTANAKUL. (2018). Fabrication of imitative stress-corrosion crack for electromagnetic NDT using synchrotron deep x-ray lithography and powder metallurgy processing, **Electromagnetic Non-Destructive Evaluation**, pp. 80-87.
- Dacon Inspection Services. (2017). การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน. <https://www.dacon-inspection.com>
- Donald W Johnson, Jost Goettert, Varshni Singh, Dawit Yemane. (2012). A new Material for High Aspect Ratio Lithography. SUEx Dry Film Resist.
- Gang Wu, Ning Li, Derui Zhou and Kurachi Mitsuo. (2004). Electrodeposited Co-Ni-Al₂O₃ composite coatings. **Surface and Coatings Technology**, 176(2), 157-164.
- Hiromichi Onikura, Ryuichi Inoue, Keitaro Okuno and Osamu Ohnishi. (2003). Fabrication of Electroplated micro grinding wheels and manufacturing of microstructures with ultrasonic vibration. **Key Engineering Materials**, ISSN: 1662-9795, Vols. 238-239, pp 9-14.
- Huan-Yu Zheng and Mao-Zhong An. (2008). Electrodeposition of Zn-Ni-Al₂O₃ nanocomposite coatings under ultrasound conditions. **Journal of Alloy and Compounds**, 459(1-2), 548-552.
- JISG4303. (2005). ***Stainless Steel Chemical Composition***.
- Ming Zhao, Liqun Du, Zheng Xu, Xi Zhang, Qiang Gao, Xuechao Ji, Zhuangzhuang Wei and Junshan Liu (2020). Improving the thickness uniformity of micro electroforming layer by megasonic agitation and the application. **Materials Chemistry and Physics**, 239, 122331.

- National Physical Laboratory, National Corrosion Service, stress corrosion cracking.
- NACE International Headquarters, stress corrosion cracking, <http://www.nace.org>.
- NACE International Headquarters, 2002, “Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States”, http://events.nace.org/publicaffairs/images_cocorr/ccsupp.pdf
- Noritaka Yusa, Weixi Chen, Jing Wang, Hidetoshi Hashizume. (2016). Fabrication of imitative crack by 3D printing for electromagnetic nondestructive testing and evaluations. **Case Stud Nondestruct Test Eval.** 5 (2016), 9-14.
- Noritaka Yusa and Hidetoshi Hashizume. (2012). Fabrication of imitative stress corrosion cracking specimen using lithography and solid state bonding. **Int.J. Appl. Electromagnetics Mech.** 39 (2012), 291-296.
- Noritaka Yusa, Stephane Perrin, Kenzo Miya. (2007). Eddy current data for characterizing less volumetric stress corrosion cracking in nonmagnetic materials. **Materials Letters.** 61 (2007) 827–829.
- Noritaka Yusa, Stephane Perrin, Kenzo Miya, Kenzo Miya. (2007). Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations. **NDT&E International.** 40 (2007) 577-583.
- Nik Hassanuddin Nik Yusoff, Othman Mamat and Mahdi Che Isa. (2016). Electro Deposition of nickel-cobalt/alumina (Ni-Co/Al₂O₃) composite coatings: a current approach. **ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences**, ISSN: 1819-6608.
- P. Narasimman, Malathy Pushpavanam and V.M. Periasamy. (2011). Synthesis, characterization and comparison of sediment electro-codeposited nickel–micro and nano SiC composites. **Applied Surface Science**, 258(1), 590-598.
- Qiuyuan Feng, Tingju Li, Hongyun Yue, Kai Qi, Fudong and Junze Jin. (2008). Preparation and characterization of nickel nano-Al₂O₃ composite coatings by sediment co-deposition. **Applied Surface Science**, 258(8), 2262-2268.
- R. Phatthanakun, C. Yunphuttha, C. Pantong, C. Sriphung, N. Chomnawang, P. Viravathana. (2013). Fabrication of metallic microchannel mold using x-ray LIGA for microfluidic applications, **10th IEEE ECTI-CON**, 15-17.

- Wenlu Cai, shejuan Xie, Cherdpong Jomdecha, Xiaojuan Wang, Cuiang Pei, Yong Li, Zhenmao Chen, Noritaka Yusa. (2017). Assessment of local conductivity distribution in stress corrosion crack region using direct current potential drop method. **Corrosion**.
- Xinyu Zhang, Jiaqian Qin, Malay Kumar Das, Ruru Hao, Hau Zhong, Adisak Thueploy, Sarintorn Limpanart, Yuttanant Boonyongmaneerat, Mingzhen Ma and Riping Liu (2016). Co-electrodeposition of hard Ni-W/diamond nanocomposite coatings. **Scientific Reports**.
- Y. Sun, I. Flis-Kabulska and J. Flis. (2014). Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited NiAl_2O_3 composite coatings. **Materials Chemistry and Physics**, 145(3), 476-483.
- Z. Abdel-Hamid. (1998). Improving the throwing power of nickel electroplating baths. **Materials Chemistry and Physics**, 53, 235-238.



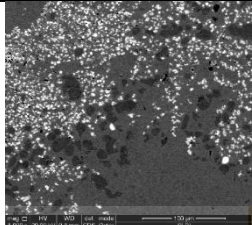
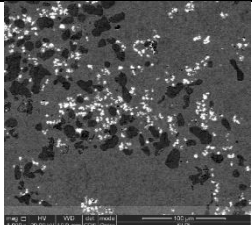
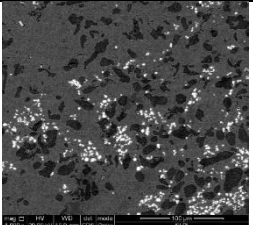
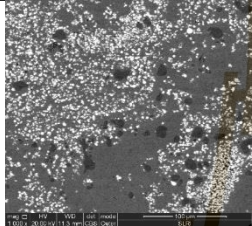
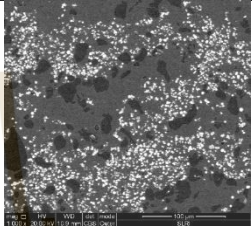
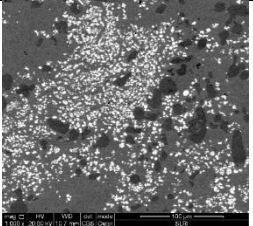
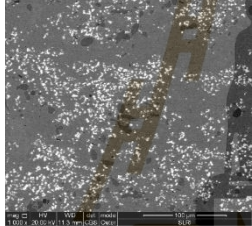
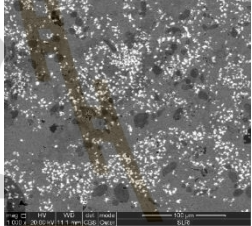
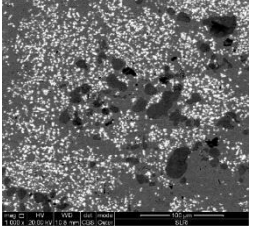
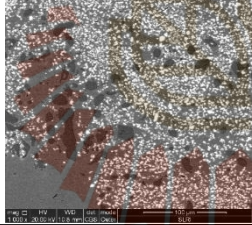
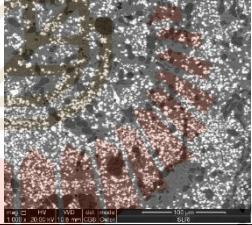
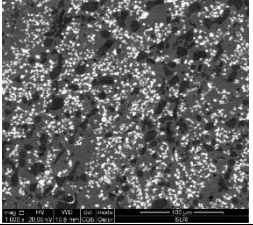
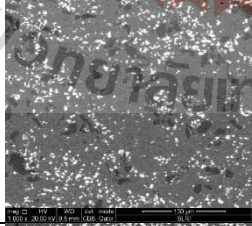
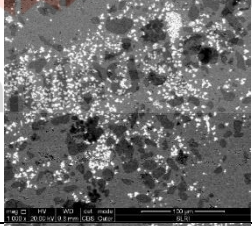
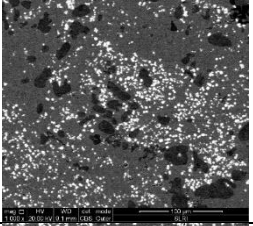
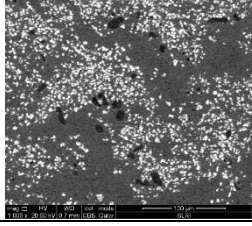
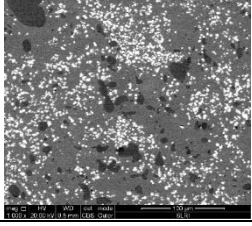
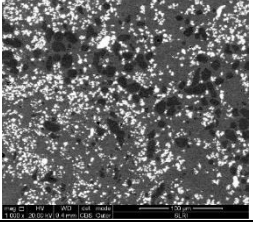
ภาคผนวก ก

รูปโครงสร้างจุดภาคและการกระจายตัวของผงโลหะของชิ้นงาน

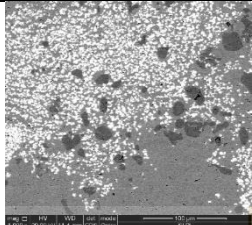
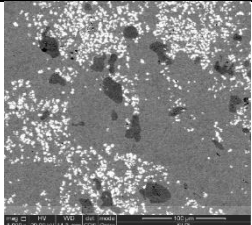
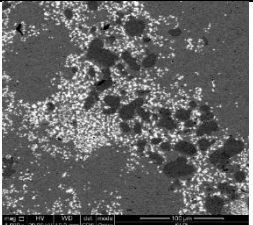
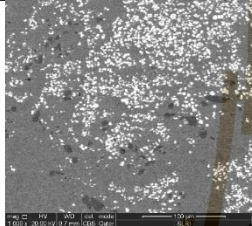
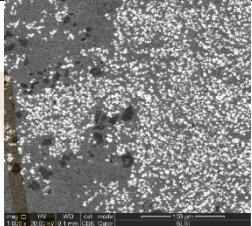
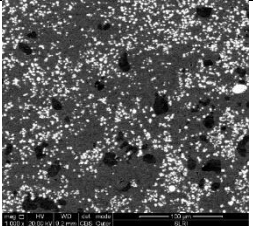
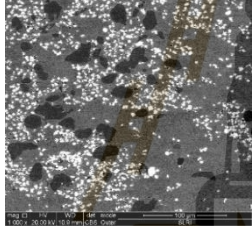
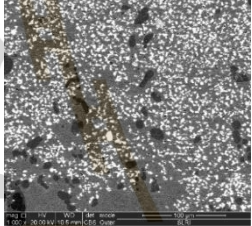
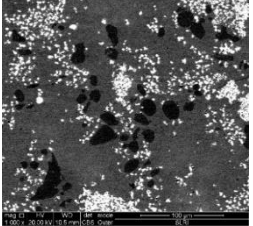
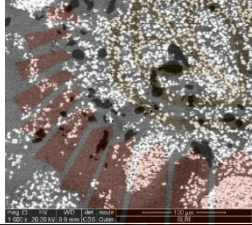
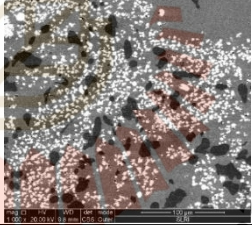
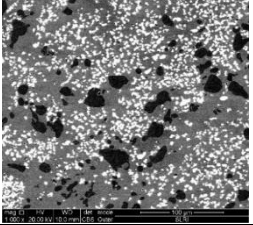
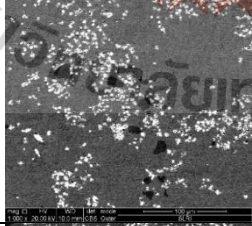
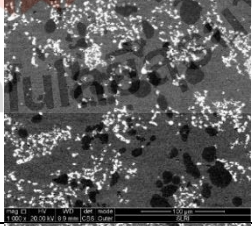
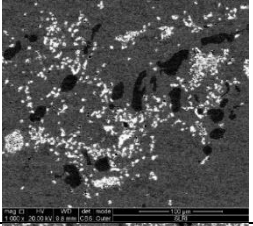
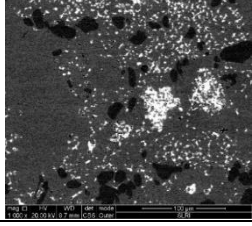
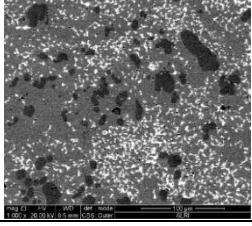
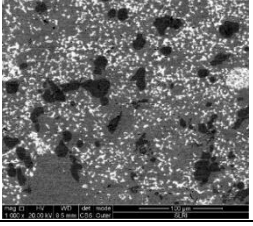
จากเทคนิค SEM



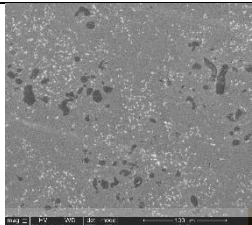
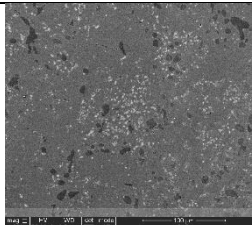
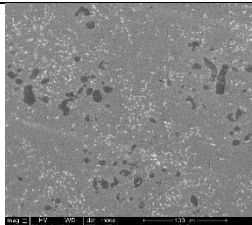
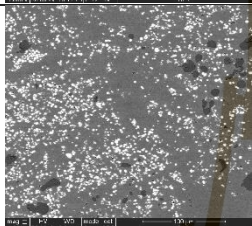
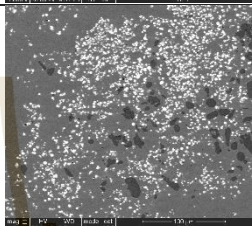
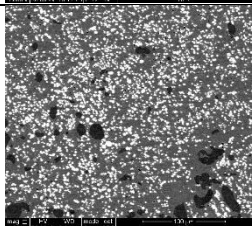
ตารางที่ ก.1 แสดงรูปชิ้นงานชุบสแตนเลสที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
กราด

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
6mASS100Sn050			
6mASS100Sn100			
6mASS100Sn150			
6mASS100Sn200			
7mASS100Sn150			
7mASS100Sn200			

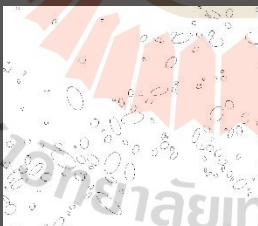
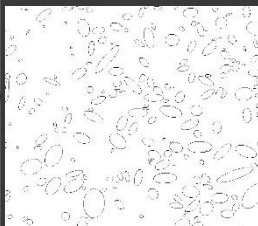
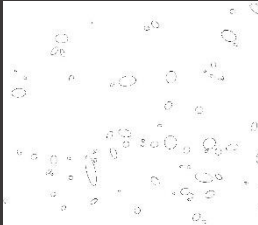
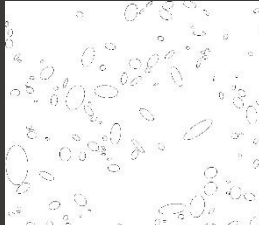
ตารางที่ ก.1 แสดงรูปชิ้นงานชุบสแตนเลสที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
ส่องกราด (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
7mASS100Sn250			
7mASS100Sn300			
7mASS100Sn400			
7mASS100Sn500			
8mASS100Sn400			
8mASS100Sn500			

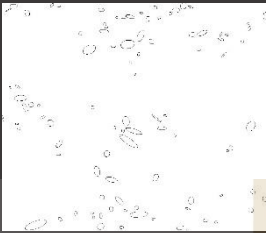
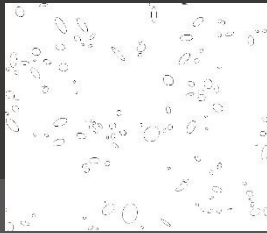
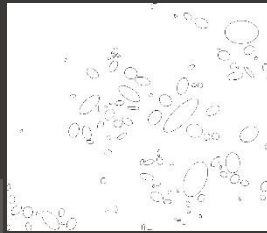
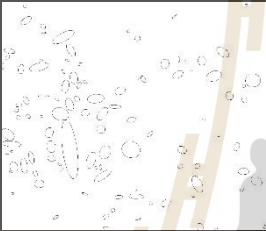
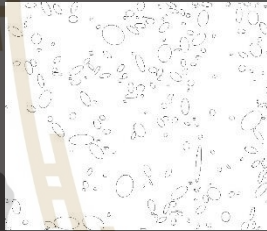
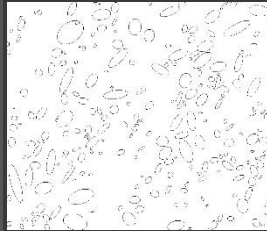
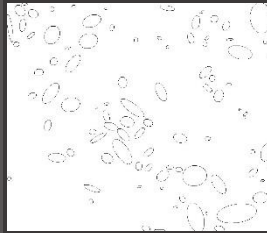
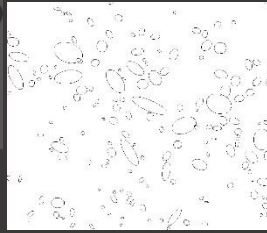
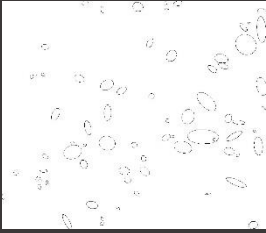
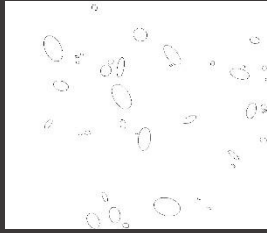
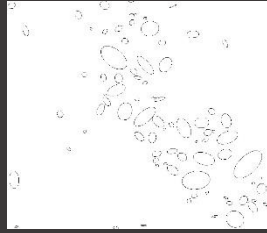
ตารางที่ ก.1 แสดงรูปชิ้นงานชุบสแตนเลสที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
8mASS150Sn300			
8mASS200Sn300			

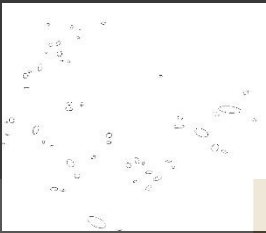
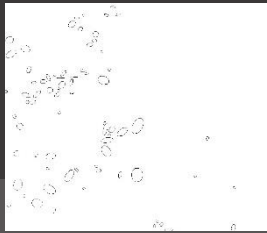
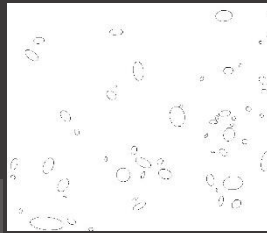
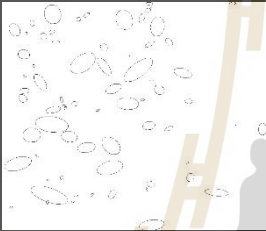
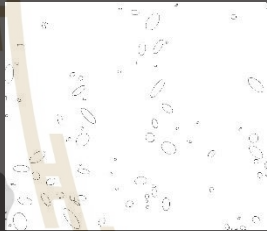
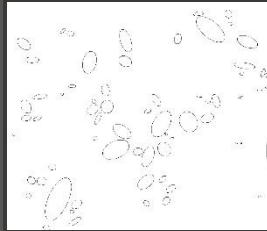
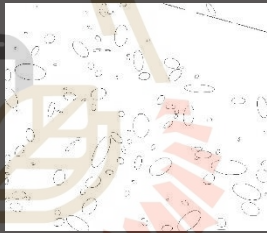
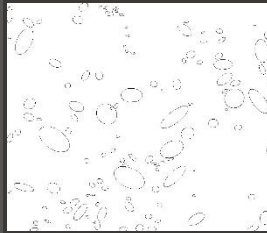
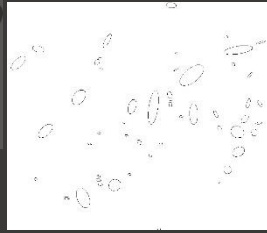
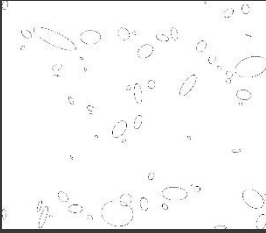
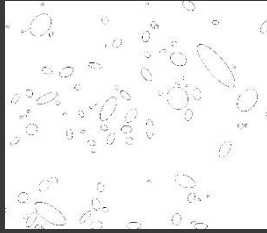
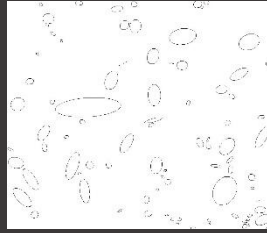
ตารางที่ ก.2 แสดงรูปการกระจายตัวของพองสแตนเลสบนผิวของชิ้นงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม Image J

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
6mASS100Sn050			
6mASS100Sn100			

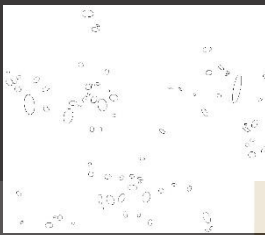
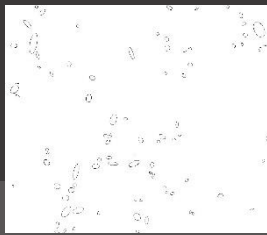
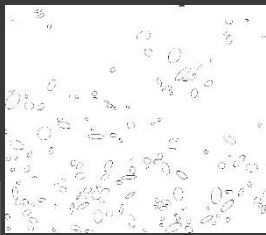
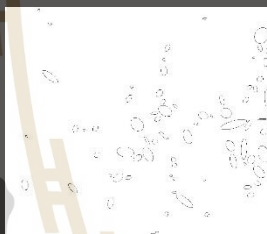
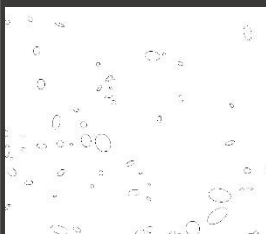
ตารางที่ ก.2 แสดงรูปการกระจายตัวของพองสเดนเลสบนผิวของชิ้นงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม Image J (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
6mASS100Sn150			
6mASS100Sn200			
7mASS100Sn150			
7mASS100Sn200			
7mASS100Sn250			

ตารางที่ ก.2 แสดงรูปการกระจายตัวของพองสเดนเลสบนผิวของชิ้นงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม Image J (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
7mASS100Sn300			
7mASS100Sn400			
7mASS100Sn500			
8mASS100Sn400			
8mASS100Sn500			

ตารางที่ ก.2 แสดงรูปการกระจายตัวของพองสเดนเลสบนผิวของชิ้นงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม Image J (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน ส่วนบน	ภาพชิ้นงาน ส่วนกลาง	ภาพชิ้นงาน ส่วนล่าง
8mASS150Sn300			
8mASS200Sn300			

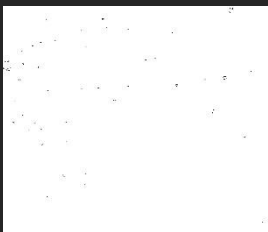
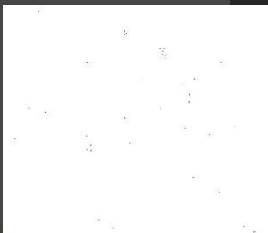
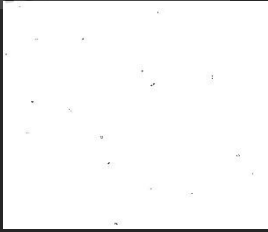


ภาคผนวก ข

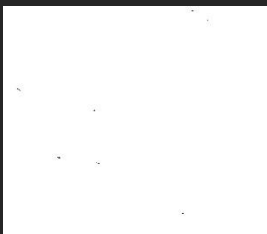
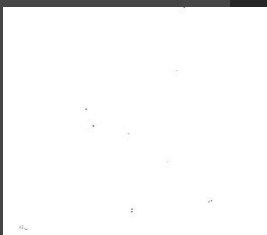
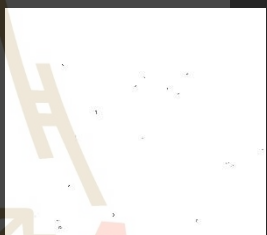
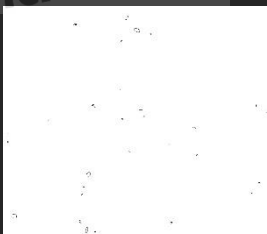
รูปพื้นที่รูปทรงของชิ้นงานจากโปรแกรม Image J



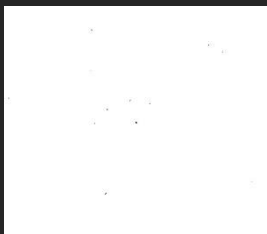
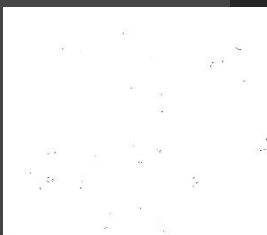
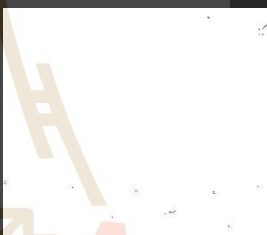
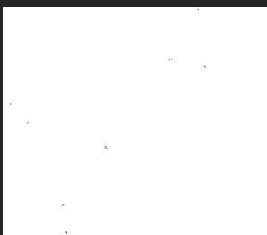
ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
6mASS100Sn050	ส่วนบน		1.3
	ส่วนกลาง		1.37
	ส่วนล่าง		1.49
6mASS100Sn100	ส่วนบน		1.89
	ส่วนกลาง		2.44
	ส่วนล่าง		2.09

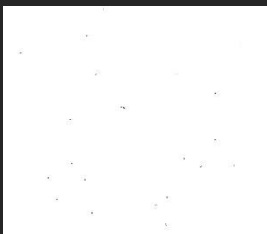
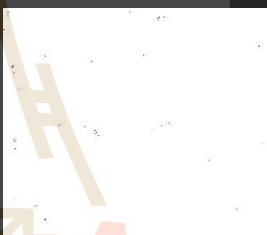
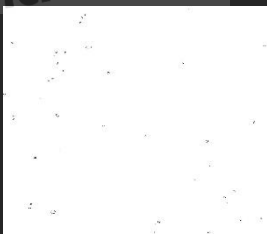
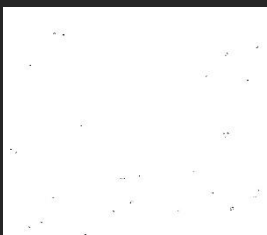
ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
6mASS100Sn150	ส่วนบน		1.85
	ส่วนกลาง		3.46
	ส่วนล่าง		2.40
6mASS100Sn200	ส่วนบน		2.79
	ส่วนกลาง		4.02
	ส่วนล่าง		2.04

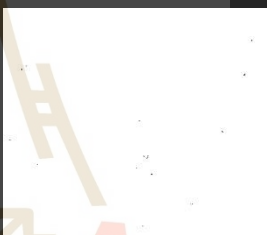
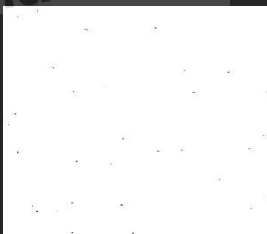
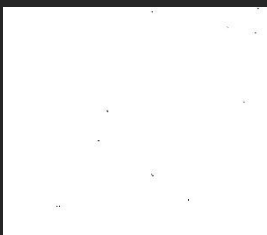
ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
7mASS100Sn150	ส่วนบน		0.98
	ส่วนกลาง		1.44
	ส่วนล่าง		3.04
7mASS100Sn200	ส่วนบน		1.46
	ส่วนกลาง		2.00
	ส่วนล่าง		2.62

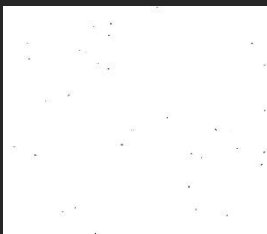
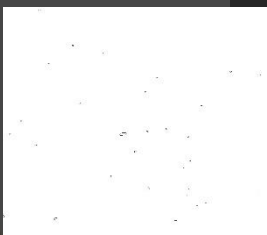
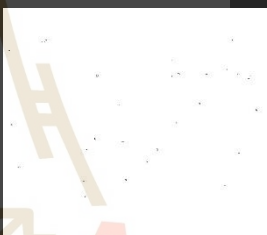
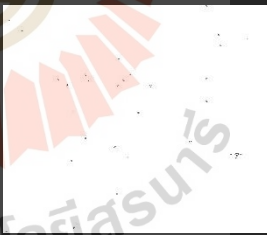
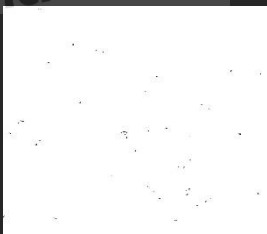
ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
7mASS100Sn250	ส่วนบน		1.53
	ส่วนกลาง		3.44
	ส่วนล่าง		1.98
7mASS100Sn300	ส่วนบน		1.80
	ส่วนกลาง		2.72
	ส่วนล่าง		2.66

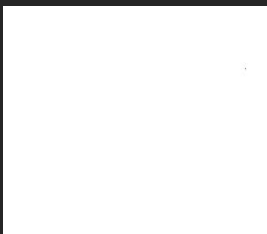
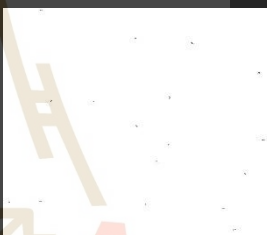
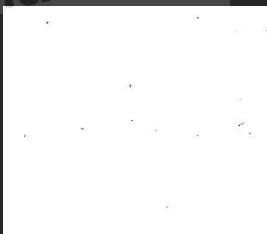
ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
7mASS100Sn400	ส่วนบน		1.65
	ส่วนกลาง		1.67
	ส่วนล่าง		1.63
7mASS100Sn500	ส่วนบน		1.59
	ส่วนกลาง		1.60
	ส่วนล่าง		1.94

ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
8mASS100Sn400	ส่วนบน		1.59
	ส่วนกลาง		2.26
	ส่วนล่าง		1.85
8mASS100Sn500	ส่วนบน		2.06
	ส่วนกลาง		2.13
	ส่วนล่าง		1.98

ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนของพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานชุบสแตนเลส (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	บริเวณของชิ้นงาน	ภาพชิ้นงานส่วนล่างจาก Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
8mASS150Sn300	ส่วนบน		0.85
	ส่วนกลาง		1.14
	ส่วนล่าง		1.65
8mASS200Sn300	ส่วนบน		1.58
	ส่วนกลาง		2.10
	ส่วนล่าง		1.77

หมายเหตุ : พื้นที่สีขาวแสดงบริเวณผิวชิ้นงานชุบสแตนเลส
พื้นที่จุดวงกลมแสดงบริเวณรูพูนที่เกิดบนผิวชิ้นงานชุบสแตนเลส



ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Jirawan Monkrathok, Jongkol Srithorn, Isaratat Phung-On, Rungrueang Phatthanakun (2019).
Fabrication of Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray Lithography with Suspension
Electroplating Technique. **The 19th International Symposium on Applied
Electromagnetics and Mechanics**, September 15-18, Nanjing, China.





The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics

September 15-18, 2019, Nanjing, China

Welcome

Committee

Sponsors

Abstracts

Hosted by:

State Key Laboratory of mechanics and Control of Mechanical Structure
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics






Abstracts

崇德致山
求是学海

Home

No.	Title
244	Optimal Design of Shear Vertical Wave Electromagnetic Acoustic Transducers in resonant mode
245	Fabrication of Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray Lithography with Suspension Electroplating Technique
246	A Wall-thinning Measuring Method Based on Magnetic Permeability Variation of Steel Pipes
247	Rapid Measurement of Dispersion Curve for Composite Plate by Reconstructing Group Velocities from Impacts
248	Transient Magnetic Field Formulation for Solid Source Conductors
250	Measurement and analysis of disturbing moment during the rotation of satellite antenna
251	A Compensation Method for Time Delay of Digital AC Drive System
252	Comparative study of thrust of U-shaped Ironless Permanent Magnet Synchronous Linear Motor based on analytical method and Finite Element Analysis
253	A Kriging Surrogate Model assisted Tabu Search Method for Electromagnetic Inverse Problems
254	Model Predictive Control Method with Common-Mode Voltage Suppression for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor
255-1	Controllable Reactor Integration and DC Bias Elimination in Single Transformer Based on Nanocomposite Semi-hard Magnets
255-2	Research on Core Vibration of Single-phase Power Transformer under DC bias
257	Multi-source Effect in Electric Current Perturbation Testing for Ferromagnetic conductor
258	Quantitative evaluation of natural crack using a multi-output support vector regression method from multi-frequency eddy current testing signals
260	Design and Performance Tests of a Wave Energy Converter Based on Halbach Permanent Magnetic Array

82% 20:39

→ Manuscript 19-245 (ISEM2019)
3 July 2020 20:01

G.Ricci@iospress.nl DETAILS

Dear Dr. Srithorn,

Congratulations on the acceptance of your paper for publication in IJAEM. In order to start the production of your article please provide a final version in editable format (latex or word) at your earliest convenience.

Please do not forget to include all authors names (without abbreviation) and affiliations.

Thank you in advance.

With best regards,
IJAEM Editorial Office

Manuscript Title:
Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray LIGA with Suspension Electroplating Technique

Reply Reply all Forward Delete Thread

mstracker.com/history2.php

ISEM2019

History of 19-245
"Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray LIGA with Suspension Electroplating Technique"

2020-07-14	Published (or in press)
2020-07-14	Accepted/Forms & Final Version Received/Publication Pending
2020-02-26	Thank-you Letter Resent to Reviewer 1
2020-02-19	Decision Letter Receipt Confirmed by Author
2020-02-19	Accepted/Forms & Final Version Pending
2020-02-19	Decision Letter Sent to Author view
2020-02-19	Decision Letter Approved
2020-02-19	Decision Letter Composed/Awaiting Editor Approval
2019-11-26	Reminder Sent to Assigned Editor
2019-11-12	Reviews Returned/Needs Decision Letter
2019-10-29	Out For Review
2019-10-29	Review Initiated
2019-10-27	Assigned to Editor (JI)
2019-10-27	Record Created/Needs Editor Assigned
2019-10-27	Acknowledgment Sent to Author
2019-10-27	Manuscript Accessioned
2019-10-18	Manuscript Submitted

Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray LIGA with Suspension Electroplating Technique

Jirawan Monkrathok^a, Jongkol Srithorn^{a,*}, Isaratat Phung-On^b and Rungrueang Phatthanakun^c

^a Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^b Institute for Scientific and Technological Research and Services, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok, 10140, Thailand

^c Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Abstract. In this research, the Synchrotron X-ray lithography (X-ray LIGA) was implemented to fabricate imitative Stress Corrosion Crack (SCC) for using as a reference specimen of electromagnetic NDT. A pattern of the imitative SCC was created by using X-ray LIGA with controllable shape and size in precise details. The pattern created had a high aspect ratio, which was formed on SU-8 polymer. As a preliminary experiment, the prepared pattern was inserted into a block of pure Nickel formed by an electroplating technique. To develop a reference comparable to stainless steel in terms of electromagnetic response, the technique called "Suspension Electroplating" was implemented to create a block of material from its powder form. A rough magnetic response was then measured by Eddy Current Testing (ECT). The results showed the possibility of creating the desired properties of stainless steel. The SCC pattern will be then inserted to become the reference specimen.

Keywords: imitative crack, lithography, electroplating, eddy current testing

1. Introduction

Stainless steel is an engineering material that is used for many industries due to its strength, toughness, and high-temperature resistance. However, it could experience the problem of Stress Corrosion Cracking (SCC), which could cause leakage and failure. It is difficult to detect the SCC due to its small size. Non Destructive Testing such as Eddy Current Testing (ECT) has been implemented for inspection effectively. The disadvantage of this technique is related to reference specimens that must be precise in size and shape as well as close to inspect the material in magnetic properties. There several studies to develop SCC reference specimens such as bounding and laser 3D printing to fabricate imitative SCC. However, the specimens were not identical to the actual SCCs as they were quite large, even though they could provide similar properties to stainless steel in terms of ECT signal [1-2]. There was also an attempt to fabricate the imitative SCC by using X-ray LIGA for the crack pattern and was then inserted into a mixture of stainless steel and Sn powders in a soft mold by using less pressure filling method. It could provide a similar response to the ECT signal, but the shape and size were difficult to control [3].

*Corresponding author: Jongkol Srithorn, Department of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand. Tel.: +66 44224670; E-mail: jongkol@sut.ac.th

In this research, the Synchrotron X-ray Lithography (X-ray LIGA) was implemented to produce the pattern of the imitative SCC. The pattern would be small with high resolution and high aspect ratio [4]. The pattern was then inserted into a block of material created from the electroplating technique. To archive the electromagnetic properties comparable to the actual stainless steel, another technique called "Suspension Electroplating" has been developed to be prepared for pattern insertion. A rough magnetic response was then measured by Eddy Current Testing (ECT), which then would be created as the reference specimen.

2. Materials and Methods

2.1. Metal powders

The small size of stainless steel (SUS 316L) powders with the average particle size of 10 μm as delivered by suppliers were employed in this research. The chemical compositions were shown in Table 1. Additionally, the 99.9% of aluminum (Al) powder with the particle size of 1 μm was also used in the solution mixed with stainless steel powder (SUS 316L) into the total weight of 2 g in nickel solution which was used for the suspension electroplating technique.

Table 1
Chemical composition of SUS 316L powders

SUS 316L particle size	Chemical composition					
	Fe	Cr	Ni	C	Si	Mo
10 μm	61.7	18.5	12.0	2.7	2.2	2.1
						0.8

2.2. Fabrication of imitative crack by synchrotron X-ray LIGA

A picture of SCC was selected from a micrograph of SCC. It was then used to transfer 2D with the Layout Editor Program. In preparation, a graphite plate as a substrate is thoroughly cleaned, and the AZP4620 photoresist was spin-coated on the graphite plate substrate into a thickness of 15 μm . Firstly, the pattern onto thick film photoresist using X-ray radiation, an X-ray mask absorber pattern must be fabricated by using UV lithography and electroplating technique [5]. Figure 1 shows the X-ray mask comprised of 2 parts, a graphite plate as a substrate and an absorber pattern. For the absorber pattern, the material must efficiently absorb X-ray irradiation to provide image contrast on the photoresist. Materials with a high atomic number and high density, such as gold (Au) silver (Ag) and tantalum (Ta), could be employed in this role.

The fabrication of patterns for imitative SCC in this research was based on the beamline 6a: Deep X-ray lithography (DXL) at the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Thailand. This beamline provides synchrotron light in low energy X-ray range in lithography of ultra-thick photoresists to fabricate high aspect ratio microstructures. In preparation, a graphite plate as a substrate was thoroughly cleaned and placed face up onto a 500 μm thick SU-8 photoresist dry sheet. The lamination is moved through the heated rollers at a speed of 1ft/min at 60–75°C. The graphite as a substrate with the SU-8 photoresist dry sheet were baked using a leveled hot plate, at 65°C for 5 min then at 95°C for 10 min and left them cool down to room temperature [7] resulting in very smooth surfaces to be used as a substrate as shown in Figure 2 (a). X-ray mask was placed on photoresist and set up in the X-ray scanning system at the BL6a, with the X-ray exposure dose at 68,000 mJ/cm² under the synchrotron beam current of 125.45 mA as shown in Figure 2 (b). The SU-8 pattern was then developed by the solvent washing, as shown in Figure 2 (c). Figure 3 shows the vertical sidewall of the SU-8 pattern SCC template with a high aspect ratio attached to the graphite substrate ready for suspension electroplating.

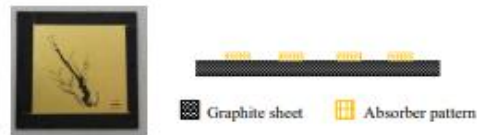


Fig. 1. X-ray mask for SU-8 photoresist exposure.

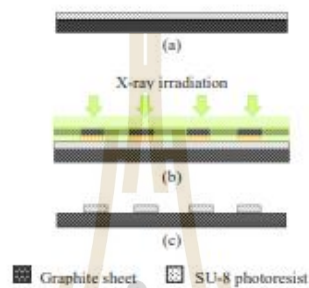


Fig. 2. Fabrication sequence of SCC by using X-ray lithography.

2.3 Fabrication stainless steel with a suspension electroplating technique

The pattern SCC was then placed on a graphite plate as a substrate for suspension electroplating (Figure 3). The suspension electroplating was a mixture of nickel solution and stainless-steel powder with the addition of aluminum powder into the total weight of 2 g.

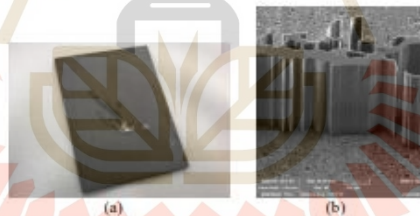


Fig. 3. The SU-8 pattern SCC template for electroplating. (a) top view, (b) side view.

The process was performed using the custom design stirrer with an agitator which was performed at 200 rpm, as shown in Figure 4. This caused the suspension of powders in the solution. The stainless steel layer was slowly grown with a current density of 6 mA/cm² with the temperature-controlled at 30°C until reaching the designate thickness of about 5 mm.

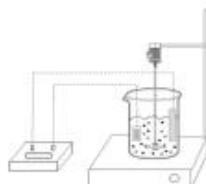


Fig. 4. Fabrication sequence of the SCC by using suspension electroplating.

3. Experimental Results

3.1 Characteristics of the imitative SCC

After the specimen fabricated by using the X-ray LIGA with suspension electroplating reached a thickness of more than 5 mm, the specimen was ground to get a flat surface on the top surface and graphite on the back was also removed to reveal the crack pattern as imitative SCC. Polishing was also followed to achieve the smooth surface of crack to 0.04 μm abrasive powder. This process was performed to prepare the surface in case that more thickness is required, which is adapted from the preparation of electrochemical testing specimens [6].

Figure 5 (a) showed the imitative SCC, which was the cracking pattern of SU-8 polymer. The imitative crack created could have the resolution or size as small as 30 μm , as shown in Figure 5 (b). Details of fine cracks could be imitated on the crack tip of SCC.

The imitative SCC was the cracking pattern of SU-8 polymer, and the imitative SCC in block stainless steel has equal size, as shown in Figure 6. However, with the X-ray lithography with suspension electroplating technique, there is accuracy in size and shape unchanged.



Fig. 5. The imitative SCC in block stainless steel, (a) the imitative SCC pattern of SU-8 polymer, (b) the small size of imitative SCC.



Fig. 6. The size and shape of the imitative SCC, (a) the SU-8 pattern of SCC, (b) Stainless Steel-Block with imitative crack.

3.2 Microstructures

The microstructures of the imitative crack specimen fabricated as shown in Figure 7. It consisted of a Nickel matrix with SUS316 powders dispersing around the specimen. The sizes of stainless powders were range between 10 – 20 μm approximately. There were also some porosities formed which could be formed the incompatible deposition rate between SUS316 powders and Nickel solution.

Energy Dispersive X-ray was also performed on the specimen, as shown in Figure 8. Both SUS316 and Ni matrix were confirmed respectively. The dark islands (spectrum 1) had compositions of Fe, Cr, Ni, and Mo, which were the main elements of SUS316. The nickel matrix had a majority of Ni in spectrum 2.

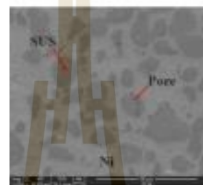


Fig. 7. The Microstructures of the specimens.

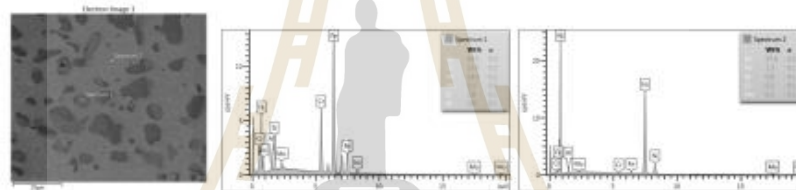


Fig. 8. The composition chemical analysis by using Energy Dispersive X-ray.

3.3 Microstructures

The imitative SCC was then placed to detect by scanning the eddy current probe across the imitative SCCs compared to the reference notch at depth (crack length) about 500 μm and width of 30-1000 μm . The results reveal indicating the existence of SCC could be detected of the measured ECT signals as shown in Figure 9. Nevertheless, in Figure 10, another SCC pattern was formed and the imitative crack was fabricated. ECT signal was also detected but form another side of the crack which imitates the sub-surface crack.

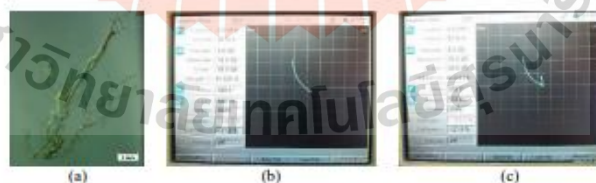


Fig. 9. Eddy Current Signals, (a) SCC pattern #1, (b) Stainless Steel-Block, (c) Stainless Steel-Block with imitative crack.

6 J. Monkrathok et al./Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray LIGA with Suspension Electroplating Technique

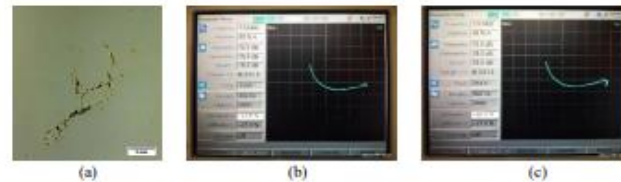


Fig. 10. Eddy Current Signals, (a) SCC pattern #2, (b) Stainless Steel-Block, (c) Stainless Steel-Block with imitative crack.

4. Conclusions

Synchrotron deep X-ray lithography with suspension electroplating could be utilized to fabricate complex shapes with high resolution and aspect ratio of the imitative SCC. Microstructure, EDS, and ECT signal of the specimen showed the possibility of creating a block of stainless steel. The imitative SCC fabricated could be detected by ECT, which gives the signal similar to the other standard specimens used for ECT measurement verification.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Thailand Science Research and Innovation (TSRI), Research and Researchers for Industries (RRI), and STP Advance Products co. Ltd for funding this study, and grateful to the Beamline 6a: Deep X-ray lithography (DXL) of the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) for the support in the processing of the X-ray LIGA technology, and grateful to the Institute for Scientific and Technological Research and Services, King Mongkut's University of Technology Thonburi for the support in the eddy current testing.

References

- [1] N.Yusa and H.Hashizume, Fabrication of imitative stress corrosion cracking specimen using lithography and solid state bonding, *Int.J. Appl. Electromagnetics Mech* **39** (2012), 291-296.
- [2] N.Yusa, et.al., Fabrication of imitative cracks by 3D printing for electromagnetic nondestructive testing and evaluations, *Case Stud Nondestruct Test Eval*, **5** (2016), 9-14.
- [3] C.Jomedechea, W. Cai, Shejuan XIE et. al., Fabrication of imitative stress-corrosion crack for electromagnetic NDT using synchrotron deep x-ray lithography and powder metallurgy processing, *Electromagnetic Non-Destructive Evaluation*, pp. 80-87.
- [4] R. Phatthanakun, C. Yunphutha, C. Pantong, et. al., Fabrication of metallic microchannel mold using x-ray LIGA for microfluidic applications, *10th IEEE ECTI-CON*, 15-17 May, 2013.
- [5] Y. Desta and J. Goettfert, X-ray mask for LIGA microfabrication, *Advanced Micro & Nanosystems*, Vol. 7 LIGA and its applications, ed., 2009, pp. 11-50.
- [6] ASTM, Standard test method for electrochemical reactivation (EPR) for detecting sensitization of AISI type 304 and 304L stainless steels, Designation: G 108-94.
- [7] D. Johnson, J. Goettfert, F. Dawan, et. al., Preliminary studies of thick SU-8 laminate for ultra-Deep X-ray Lithography, *Proc. HARMST 2007*, Besencon, June 2007.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิราวรรณ หม่อนกระโทก เกิดวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2535 ที่อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนบ้านท่าเยี่ยมวิทยา ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโชคชัยสามัคคี อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2558 โดยหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ตำแหน่งลูกจ้างโครงการวิจัย

ในปี พ.ศ. 2561 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโททางวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนจาก โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.)

ผลงานวิจัย : ได้นำเสนอบทความเรื่อง Fabrication of Stainless Steel Imitative Crack Using X-ray Lithography with Suspension Electroplating Technique ในการประชุมวิชาการ The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2019) ณ เมืองหนานจิง ประเทศจีน วันที่ 15-18 กันยายน 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี