

พฤติกรรมความล้าและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดง  
เซอร์โคเนียมภายใต้กระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง  
FATIGUE BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE OF Cu-Zr ALLOY  
PROCESSED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESSING



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมความล้าและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดง  
เซอร์โคเนียมภายใต้กระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง  
FATIGUE BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE OF Cu-Zr ALLOY  
PROCESSED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESSING



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FATIGUE BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE OF Cu-Zr ALLOY  
PROCESSED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESSING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

ภาควิชาเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง พฤติกรรมความล้าและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมภายใต้  
กระบวนการอิคवलแชนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง

FATIGUE BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE OF Cu-Zr ALLOY PROCESSED BY  
EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESSING

ผู้จัดทำ

1. นางสาวดวงหทัยทิพย์ แก่งอินทร์ รหัสประจำตัว 63010353
2. นายพีรจักร สุขสีเสน รหัสประจำตัว 63010697
3. นางสาวสุพิชญา บุญศรีบาดาล รหัสประจำตัว 63011008



(ผศ.ดร.จิตราภรณ์ วงศาางาม)

อาจารย์ที่ปรึกษา

พฤติกรรมการความล้มและความต้านทานการกัดกร่อนวัสดุของโลหะทองแดงเซอร์โคเนียมภายใต้  
กระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง

นางสาวดวงหทัยทิพย์	แก่งอินทร์	63010353
นายพีรจักร	สุขสีเสน	63010697
นางสาวสุพิชญา	บุญศรีบาดาล	63011008
ผศ.ดร.จิตรภรณ์	วงศางาม	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2566

### บทคัดย่อ

โครงสร้างของวัสดุส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ ขนาดเกรนเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญสำหรับการกำหนดสมบัติ  
ของวัสดุ โดยวัสดุเกรนละเอียดสามารถผลิตได้ด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง อาทิเช่น กระบวน  
การอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้กับโลหะผสมทองแดงซึ่งมีความนิยมใน  
การนำไปใช้เป็นลวดส่งกระแสไฟฟ้า และชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการใช้งานภายใต้การรับภาระแรง  
กระทำแบบรอบหรือแบบวัฏจักร ทำให้อาจเกิดการล้าของวัสดุได้ อีกทั้งทองแดงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็น  
วัสดุที่สัมผัสกับสารละลายที่มีออกซิเจนผสมเช่น น้ำ หรืออากาศ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้บริเวณผิวของวัสดุ  
เกิดการกัดกร่อนในรูปแบบที่แตกต่างกันตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นโลหะผสมทองแดงจึงจำเป็นต้องพัฒนาสมบัติ  
ในด้านความต้านทานการล้าและความต้านทานการกัดกร่อนอย่างมาก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมาก  
ที่สุด จากที่กล่าวมาจึงเลือกศึกษาสมบัติของวัสดุด้วยการทดสอบความต้านทานการล้า และความต้านทานการ  
กัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง

FATIGUE BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE OF Cu-Zr ALLOY PROCESSED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESSING

Dunghataitip	Kaeng-in	63010353
Peerajuck	Suksrisen	63010697
Supichaya	Boonsribadarn	63011008
Asst.Prof.Dr.Jittraporn	Wongsa-ngam	Advisor
		Year 2023

**Abstract**

The structure of a material has a significant impact on its properties. The grain size is an important variable for determining the properties of a material. Ultrafine-grained materials can be produced by severe plastic deformation techniques (SPD), such as equal-channel angular pressing (ECAP), which is applied to Cu-0.1Zr. This material is widely used in electrical conductors and electronic components operating under cyclic loading, which can result in material fatigue. Additionally, copper, which is commonly used in industries, comes into contact with oxygen-containing solutions such as water or air, causing corrosion in different of environment. It is necessary to develop properties related to fatigue resistance and corrosion resistance for copper and copper alloys to maximize their efficiency in practical applications. Therefore, the properties of the materials should be studied by testing their resistance to fatigue and corrosion, both before and after the equal-channel angular pressing process.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ความเอาใจใส่ การแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา นิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้ คำแนะนำเพิ่มเติม และให้ความรู้จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณนางสาวพิมพ์ภรณ์ มั่นพิริยะกุล ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

ขอขอบคุณผศ.ดร.วันพุทธ แซ่ฉั่ว ที่ให้คำแนะนำ และสนับสนุนอุปกรณ์ในการขัดชั้นทดสอบ

ขอขอบคุณนายกำธร สุขพิมาย ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทดสอบแรงดึง

ขอขอบคุณวิทยาลัยวิศวกรรมการผลิตขั้นสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบการกัดกร่อน

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ การสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ในการขัดชั้นทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบความ ต้านทานการกัดกร่อน และการทดสอบแรงดึง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ได้แก่ บิดา และมารดา อันเป็นที่ เคารพรักยิ่ง ที่ได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสทางการศึกษาอย่าง เต็มที่ รวมถึงคอยช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาวดวงหทัยทิพย์ แก่งอินทร์ 63010353

นายพีรจักร สุขสีเสน 63010697

นางสาวสุพิชญา บุญศรีบาดาล 63011008

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป .....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา .....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4.1 การศึกษาพฤติกรรมความกล้า.....	3
1.4.2 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน .....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปร่างอย่างรุนแรง.....	4
2.2 กระบวนการอิคवलแลนเนลแองกูลาร์เพลสซิง .....	6
2.3 สมบัติวัสดุ.....	7
2.3.1 ความกล้า .....	7
2.3.2 การทดสอบความกล้า .....	11
2.3.3 การกัดกร่อน .....	12
2.3.3.1 รูปแบบของการกัดกร่อน.....	13

2.3.3.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้าและประมวลผล .....	17
2.3.3.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบบนพื้นผิว .....	24
2.4 ทองแดงและโลหะผสมทองแดง .....	25
2.4.1 โลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม .....	26
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	26
2.5.1 กระบวนการอิคवलเซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง .....	26
2.5.2 การทดสอบความล้า .....	28
2.5.3 การทดสอบการกัดกร่อน .....	29
2.5.4 ปัจจัยทางโลหะวิทยาที่มีผลต่อการกัดกร่อน .....	30
2.5.4.1 ผลของข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกและเฟสต่อการกัดกร่อน .....	30
2.5.4.2 ผลของการอบชุบต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน .....	30
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	32
3.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิคवलเซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง .....	33
3.2 การทดสอบความล้า .....	34
3.2.1 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ .....	34
3.2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบความล้า .....	35
3.2.3 การกำหนดความเค้นสูงสุด และความถี่สำหรับการทดสอบความล้า .....	36
3.2.4 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบความล้า .....	36
3.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน .....	37
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน .....	37
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน .....	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	43
4.1 ผลการทดสอบความล้า .....	43
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ .....	43
4.1.2 การทดสอบความล้าของวัสดุ .....	45
4.2 การทดสอบการกัดกร่อน .....	48
4.2.1 กราฟโพลาริเซชัน .....	48
4.2.2 วิเคราะห์ค่าสำคัญจากกราฟโพลาริเซชัน .....	51

4.2.3 วิเคราะห์พื้นผิวชั้นทดสอบก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน.....	57
4.2.4 วิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวของชั้นทดสอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy ....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	66
เอกสารอ้างอิง .....	67



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของกระบวนการ ECAP.....	6
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงวัฏจักรความล้า .....	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะของอัตราส่วนภาระความเค้น .....	9
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเส้นโค้ง S-N.....	10
รูปที่ 2.5 เส้นโค้ง S-N ที่ความเค้นเฉลี่ยต่างกัน .....	10
รูปที่ 2.6 ลักษณะความเสียหายจากการล้าแบบ LCF .....	11
รูปที่ 2.7 ลักษณะความเสียหายจากการล้าแบบ HCF .....	12
รูปที่ 2.8 ลักษณะการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท .....	18
รูปที่ 2.9 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน.....	19
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นโค้งโพลาริเซชัน .....	21
รูปที่ 2.11 วงจรที่ไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นทางไฟฟ้าที่สมบูรณ์.....	23
รูปที่ 2.12 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากเทคนิค EDS .....	24
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	32
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนทดสอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलเซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง.....	33
รูปที่ 3.3 แสดงแบบขั้นตอนทดสอบสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM standards E8 .....	34
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X .....	35
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนทดสอบความล้า .....	35
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความล้าระบบไฮดรอลิค Instron : 8802 .....	37
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนทดสอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलเซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง.....	38
รูปที่ 3.8 เครื่องตัดละเอียด ยี่ห้อ Struers รุ่น Accutom-50.....	38
รูปที่ 3.9 แบบขั้นตอนทดสอบก่อนการทดสอบการกัดกร่อน .....	38
รูปที่ 3.10 เครื่องขัดผิวขั้นตอนแบบจานหมุน ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น MetaServ 250.....	39
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์สำหรับการ polishing.....	39
รูปที่ 3.12 แสดงชุดเครื่องมือทดสอบการกัดกร่อน AUTOLAB รุ่น PGSTAT302N .....	40
รูปที่ 3.13 การชั่งตวงเกลือเคมี 35 กรัม สำหรับเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% .....	41

รูปที่ 3.14 Flat Cell Kit .....	41
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด .....	44
รูปที่ 4.2 ขึ้นทดสอบเมื่อผ่านการทดสอบการดึง .....	44
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง S-N .....	46
รูปที่ 4.4 ลักษณะการขาดของขึ้นทดสอบบ่อนก่อนผ่านกระบวนการ ECAP .....	48
รูปที่ 4.5 กราฟโพลาริเซชันจากผลการทดสอบการกัดกร่อนทั้ง 4 ชุด .....	49
รูปที่ 4.6 เส้นโค้งโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบในแต่ละเงื่อนไขในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% .....	50
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบ .....	52
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานโพลาริเซชันกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่าน กระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 1 2 และ 8 รอบ .....	54
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการ อิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 1 2 และ 8 รอบ .....	54
รูปที่ 4.10 การกระจาย Equivalent plastic strain ของขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP .....	55
รูปที่ 4.11 TEM micrographs ขึ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ECAP .....	56
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของสีที่พบบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบหลังการทดสอบการกัดกร่อน .....	57
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายพื้นผิวขึ้นทดสอบ .....	58
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบก่อนกระบวนการ ECAP ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS .....	60
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบหลัง ECAP 1 รอบ ที่ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS .....	61
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบหลัง ECAP 2 รอบ ที่ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS .....	62
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบหลัง ECAP 8 รอบ ที่ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS .....	63

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง .....	25
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของโลหะทองแดงเซอร์โคเนียมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 973 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมง .....	26
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมจากการทดสอบแรงดึง.....	44
ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขและจำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบทองแดง เซอร์โคเนียมก่อนผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง .....	45
ตารางที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขและจำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบทองแดง เซอร์โคเนียมหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 8 รอบ .....	45
ตารางที่ 4.4 ค่าสำคัญจากเส้นโค้งโพลารไรเซชันจากผลการทดสอบกั๊ดกร่อนชิ้นทดสอบ.....	53
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงปริมาณธาตุบนพื้นผิวชิ้นทดสอบ .....	64

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุที่ใช้สำหรับอุปกรณ์หรือโครงสร้างทางวิศวกรรมมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นในการเลือกใช้วัสดุให้เกิดความเหมาะสมตามความต้องการนั้น ๆ โดยคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบ (Composition) ของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งถูกกำหนดด้วยกระบวนการผลิต (Processing) ที่มีหลากหลายวิธี จึงทำให้วัสดุแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นควรเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดมาใช้ โดยในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานและเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

โครงสร้างของวัสดุส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ ซึ่งสามารถกำหนดได้จากกระบวนการผลิตที่นำเอาเทคโนโลยีด้านการผลิตมาใช้ในการพัฒนาวัสดุให้ได้สมบัติตามต้องการ ซึ่งขนาดเกรน (Grain size) จึงเป็นหนึ่งตัวแปรสำคัญสำหรับการกำหนดสมบัติของวัสดุ โดยจากความสัมพันธ์ของ Hall-Petch [1] ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเกรนของโลหะเล็กลงจะส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) สูงขึ้น จึงทำให้การผลิตวัสดุเกรนละเอียด (Ultrafine-grained, UFG) เป็นที่นิยมมากขึ้น โดยวัสดุเกรนละเอียดสามารถผลิตได้หลายวิธี หนึ่งในนั้นได้แก่เทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง (Severe plastic deformation, SPD) โดยการใช้กระบวนการอิคवलแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง (Equal-channel angular pressing, ECAP) หลักการ SPD คือทำให้วัสดุมีความเครียดสูง เพื่อให้ได้ขนาดเกรนที่มีความละเอียดและขนาดของวัสดุไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก พร้อมคุณสมบัติของวัสดุที่ดีกว่าวัสดุเกรนหยาบ (Coarse-grained materials) อย่างเห็นได้ชัด [2, 3]

ทองแดงและโลหะผสมทองแดง (Copper and copper alloys) เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลายประเภท คือ มีคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าสูง (Electrical conductivity) มีความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) มีความเหนียว (Ductility) และสามารถแปรรูปได้ง่าย ดังนั้นทองแดงและโลหะผสมทองแดงจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เช่น เครื่องจักรในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตหม้อต้มน้ำ การเคลือบผิวโลหะ นอกจากนี้ทองแดงและโลหะผสมทองแดงยังมีความนิยมในการนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนอุตสาหกรรมไฟฟ้าและการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ลวดส่งกระแสไฟฟ้า ชิ้นส่วน

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติของโลหะกลุ่มนี้ให้ตรงตามความต้องการของผู้ผลิตอย่างต่อเนื่อง ลวดส่งกระแสไฟฟ้าเป็นวัสดุที่มีการใช้งานภายใต้การรับภาระแรงกระทำแบบรอบหรือแบบวัฏจักร (Cyclic load) ทำให้อาจเกิดการล้า (Fatigue) ของวัสดุได้ ส่วนวัสดุทองแดงที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นวัสดุที่สัมผัสกับสารละลายที่มีออกซิเจนผสมเช่น น้ำ หรืออากาศ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้บริเวณผิวของวัสดุเกิดสนิม การสึกหรอ หรือเกิดการกัดกร่อนในรูปแบบที่แตกต่างกันตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นทองแดงและโลหะผสมทองแดงจึงจำเป็นต้องพัฒนาสมบัติในด้านความต้านทานการล้าและความต้านทานการกัดกร่อนอย่างมาก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดเกรนละเอียดซึ่งจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงเป็นที่มาของการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะนำเทคโนโลยีการผลิตวัสดุเกรนละเอียดโดยวิธีการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรงมาประยุกต์ใช้กับโลหะผสมทองแดง ซึ่งคือ Cu-0.1Zr เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุชนิดนี้ระหว่างกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซิ่ง และเพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุด้วยการทดสอบความต้านทานความล้า และความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซิ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมความล้าของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซิ่ง
2. เพื่อศึกษาคูณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซิ่ง

## 1.3 สมมติฐานการศึกษา

วัสดุที่ถูกนำไปผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซิ่ง จะมีขนาดของเกรนที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และมีคุณสมบัติของความต้านทานการล้าและความต้านทานการกัดกร่อนที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุก่อนนำไปผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซิ่ง

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

### 1.4.1 การศึกษาพฤติกรรมความล้า

1. ผลิตชิ้นทดสอบผ่านกระบวนการอิคवलแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 8 รอบ เส้นทาง Bc
2. ทดสอบพฤติกรรมความล้าแบบ Axial load

### 1.4.2 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

1. ผลิตชิ้นทดสอบผ่านกระบวนการอิคवलแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 1, 2, และ 8 รอบ เส้นทาง Bc
2. ทดสอบจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท-กัลวานอสแตท โดยมีค่า scan rate อยู่ที่ 0.0033 โวลต์ต่อวินาที

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง พฤติกรรมความล้าและการกัดกร่อนของวัสดุภายใต้กระบวนการอิคवलแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง (Equal-channel angular pressing, ECAP)
2. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต และวางแผนการศึกษา
3. ศึกษาวิธีการและฝึกการใช้โปรแกรมและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องในการทำวิจัย
4. เตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบพฤติกรรมความล้าและการกัดกร่อน ตามที่กำหนดไว้ในขอบเขต การศึกษา
5. ทดสอบพฤติกรรมความล้าและการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบ
6. บันทึกและวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบ
7. สรุปผลการศึกษา

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูป และสมบัติของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง จำเป็นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในเรื่องของเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง การทดสอบสมบัติและข้อมูลของวัสดุ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

### 2.1 กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง

วัสดุเกรนละเอียด (Ultrafine-grained materials, UFG) เป็นวัสดุที่มีขนาดเกรนอยู่ในระดับไมครอน (Submicron structure; 100 nm ถึง 1000 nm) และระดับนาโน (Nano-structure; เล็กกว่า 100 nm) เทคนิคการผลิตวัสดุเกรนละเอียดสามารถแบ่งเป็นสองประเภท ได้แก่ การผลิตจากเล็กไปใหญ่ (Bottom-up) และ การผลิตแบบใหญ่ไปเล็ก (Top-down) [4] โดยมีรายละเอียดดังนี้

Bottom-up เป็นวิธีสำหรับวัสดุอนุภาคเล็กมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียม และผลิตขึ้นทดสอบ เช่น วิธี High-energy ball milling และ Inert gas condensation เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถผลิตวัสดุเกรนละเอียดที่มีขนาดเกรนเล็กมาก ๆ ได้ถึงระดับนาโน แต่วิธีการนี้อาจทำให้ขึ้นทดสอบเกิดการเจือปนของอนุภาคอื่น และอาจทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในระหว่างการผลิตเนื่องจากขึ้นทดสอบมีขนาดเล็ก รวมทั้งมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์

Top-down เป็นวิธีที่วัสดุเกรนหยาบจะถูกทำให้เป็นวัสดุเกรนละเอียดด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นแนวทางที่เพิ่มความเครียดให้กับวัสดุโดยการใส่แรงกระทำเพื่อให้อัตราการเสียรูปถาวรเป็นผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุถูกเปลี่ยนแปลง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากส่วนใหญ่เทคนิคนี้มีการใส่แรงที่ค่อนข้างสูงให้กับขึ้นทดสอบ ทำให้วิธีนี้ถูกเรียกว่า Severe Plastic Deformation (SPD) และขึ้นทดสอบที่ผลิตด้วยวิธี Top-down จะไม่ถูกเจือปนด้วยอนุภาคอื่นรวมทั้งไม่มีปัญหาเรื่องการเกิดรูพรุนเหมือนที่เกิดในวิธี Bottom-up

การเสียรูปถาวร (Plastic deformation) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปโลหะ (Metal forming) ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal forming process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อน (Bulk metal forming process)

Bulk deformation process เป็นกระบวนการที่ทำให้ขึ้นทดสอบมีการเสียรูปและเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การรีด (Rolling processes), การตีขึ้นรูป (Forging processes), การอัดขึ้นรูป (Extrusion processes) และการดึงขึ้นรูป (Wire and bar drawing) ซึ่งวิธี

เหล่านี้เรียกว่า วิธี Conventional bulk deformation process การขึ้นรูปด้วยวิธีเหล่านี้จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของวัสดุทำให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation) เพิ่มขึ้นและขนาดเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มที่ลดลง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถผลิตวัสดุเกรนละเอียดระดับไมครอนหรือนาโนเมตรได้ เนื่องจากขนาดของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่เปลี่ยนไปในแต่ละรอบของการผลิตเป็นข้อจำกัดในการเพิ่มขนาดความเครียดในขั้นทดสอบ ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาวิธีการผลิตที่จะสามารถผลิตวัสดุเกรนละเอียดระดับไมครอนหรือนาโนเมตรด้วยหลักการทำให้วัสดุเสียรูปแบบถาวร ซึ่งจะแก้ไขปัญหาเรื่องขนาดความเครียดเนื่องจากขนาดหน้าตัดของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนไปได้ โดยวิธีนี้คือการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (Severe plastic deformation, SPD)

Vinogradov และ Estrin [2] ได้ทำการสรุปเนื้อหาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการคำนวณของกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ความเครียดสูงโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทำให้เกิด Hydrostatic pressure ส่งผลต่อโครงสร้างภายในของวัสดุ เกิดกลไกที่ทำให้ขนาดเกรนเล็กลง (Grain refinement) และเกิดเป็นวัสดุเกรนละเอียดขนาดระดับไมครอนและนาโนเมตร เทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรงสามารถทำให้วัสดุเกรนละเอียดมีความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ดังสมการที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าความเค้นครากเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเกรนลดลง ทำให้วัสดุจะมีความต้านแรง (Strength) ที่เพิ่มขึ้นด้วย [1]

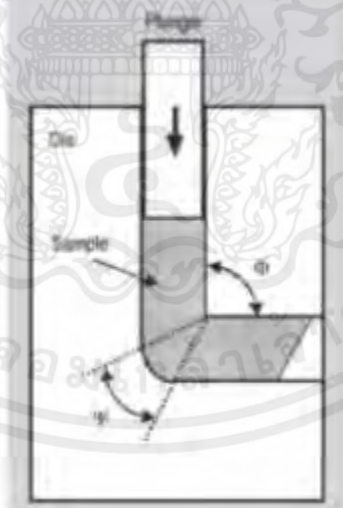
$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $\sigma_y$  คือ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength)  
 $\sigma_0$  คือ ค่าคงที่ของวัสดุเป็นความแข็งแรงเริ่มต้นสำหรับการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด  
 $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ย

ปัจจุบันมีวิธีการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรงจำนวนมาก ซึ่งวิธีอีควอลแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง (Equal-channel angular pressing, ECAP) เป็นกระบวนการหนึ่งของการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง

## 2.2 กระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่ง

กระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรง (Severe plastic deformation, SPD) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย กระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่งเป็นกระบวนการสำหรับปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซึ่งทำให้เกรนหยาบของโลหะและโลหะผสมมีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีความเค้น ณ จุดครากและความแข็งมากขึ้น ในกระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่งชิ้นทดสอบจะถูกกดด้วย Plunger ผ่านช่องงอภายในแม่พิมพ์ (Die) ที่มีหน้าตัดคงที่ โดยช่องงอมีมุมภายในหรือมุมตาย (Die angle) คือ  $\Phi$  และมุมโค้งด้านนอกคือ  $\Psi$  ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการนี้ขนาดหน้าตัดขวางของชิ้นทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ เพื่อให้สามารถกดชิ้นทดสอบซ้ำได้หลายครั้งจนกระทั่งได้ระดับความเครียดตามที่ต้องการ [5] หลังจากชิ้นทดสอบผ่านกระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) มากขึ้น และในบางกรณีพบว่าความยืดหยุ่น (Ductility) ไม่เปลี่ยนแปลงหรือลดลง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะทั่วไป (Conventional metal forming) ที่เมื่อวัสดุมีความแข็งหรือความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่าความยืดหยุ่นจะลดลงทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น ดังนั้นกระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่งมีศักยภาพในการทำให้ชิ้นทดสอบมีขนาดเกรนละเอียดขึ้น [25] และให้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของกระบวนการ ECAP [6]

ข้อดีที่สำคัญของกระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่ง คือ สามารถนำชิ้นทดสอบผ่านกระบวนการได้หลาย ๆ รอบโดยชิ้นทดสอบจะไม่มี การเปลี่ยนรูปทรง และสามารถเพิ่มขนาดของความเครียดในวัสดุได้ตามความต้องการ แต่กระบวนการอีควอลแซนเนลแองกูลาร์เพลสซิ่งยังมีข้อจำกัดใน

เรื่องขนาด และรูปทรงของวัสดุในบางกรณีที่ไม่สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของวัสดุได้ รวมถึงเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการต้องมีความชำนาญในการปรับแต่งให้เหมาะสมกับขั้นตอนสอบ การควบคุม และการดูแลรักษาเครื่องจักรให้พร้อมใช้งานอยู่เสมอ ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มต้นทุนการผลิตที่มากขึ้น [20]

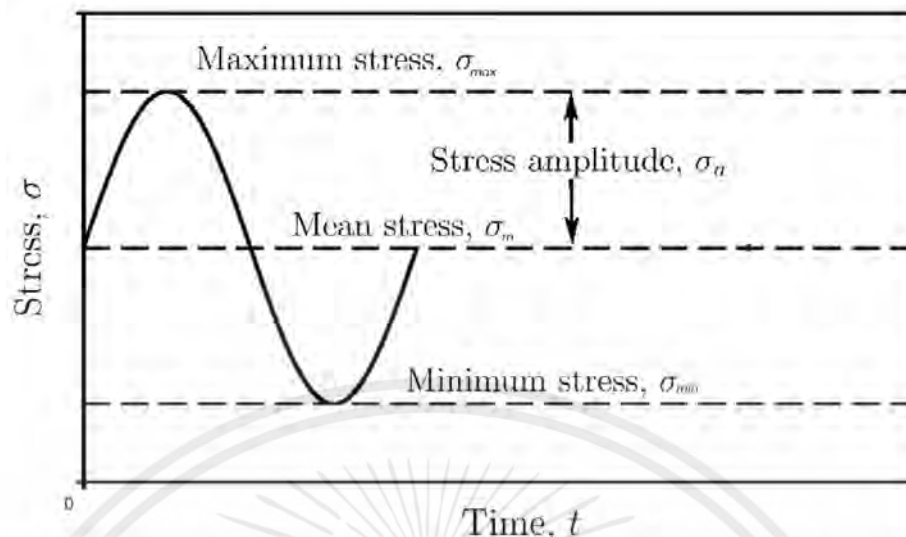
กระบวนการอิคवलแลนเนลแองกูลาร์เพลสซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาค โดยไม่ใช้ความร้อน และสามารถควบคุมขนาดของความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุได้ตามความต้องการ ซึ่งเป็นปัจจัยควบคุมที่สำคัญ ทำให้เกิดความเสถียรภาพของสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุจากการลดขนาดเกรนให้เป็นวัสดุเกรนละเอียด ทางผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านกระบวนการอิคवलแลนเนลแองกูลาร์เพลสซึ่ง

## 2.3 สมบัติวัสดุ (Mechanical properties)

สมบัติของวัสดุคือ ลักษณะเฉพาะของวัสดุ โดยสมบัติทางกล (Mechanical properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุที่แสดงออกมาหลังจากมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ความต้านทานแรงหรือความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) ความสามารถในการยืดตัว (Ductility) หรือความล้า (Fatigue) เป็นต้น ส่วนสมบัติทางเคมี (Chemical properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ เช่น ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ความทนทานต่ออุณหภูมิ (Thermal resistance) เป็นต้น สมบัติวัสดุที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความล้า และความต้านทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ความล้า (Fatigue)

ความล้า (Fatigue) เป็นสาเหตุของการเสียหายในวัสดุโลหะมากถึงร้อยละ 90 เนื่องจากเป็นรูปแบบการเสียหายภายใต้แรงที่กระทำนั้นจะมีค่าต่ำกว่าแรงที่กระทำให้วัสดุวิบัติในทันทีทันใด เช่น แรง ณ จุดคราก (Yield strength) หรือแรง ณ จุดแตกหัก กระทำที่บริเวณเฉพาะอย่างต่อเนื่องและถาวร ภายใต้แรงกระทำแบบรอบหรือแบบวัฏจักร (Cyclic fatigue) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จนโครงสร้างเริ่มเสียรูปถาวรในระดับจุลภาค ความเสียหายเริ่มเกิดจากบริเวณที่เป็นจุดบกพร่อง (Defect) ของขั้นตอนสอบ ซึ่งจะได้รับวัฏจักรความล้า และเกิดการสะสมของความเค้นจนเกินขีดจำกัดความแข็งแรง ทำให้เกิดรอยร้าว ณ จุดนั้นและเติบโตขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ส่งผลให้พื้นที่รับแรงเหลือน้อยลง จนเกิดการแตกหัก ปัจจุบันมีการศึกษาหลักการวิเคราะห์เพื่อป้องกันความเสียหายจากความล้ามากมาย เช่น วิธี Stress-Life วิธี Strain-life และวิธี Fracture crack growth สำหรับวิธี Stress-Life จะสนใจที่ความล้ารอบสูง ซึ่งสามารถหาอายุความล้าได้จากการทดสอบความแข็งแรงล้า (Fatigue strength) โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง S-N [21]



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงวัฏจักรความล้า [22]

วัฏจักรความล้าของวัสดุโดยทั่วไปสามารถคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรสำหรับการกำหนดความเค้นที่ใช้ในการทดสอบความล้าดังภาพที่ 2.2 โดยประกอบไปด้วยความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{max}$ ) ความเค้นต่ำสุด ( $\sigma_{min}$ ) ความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ ) และแอมพลิจูดความเค้น ( $\sigma_a$ )

ความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ ) สามารถคำนวณได้จากความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.2

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

โดยหากค่าความเค้นเฉลี่ยมีค่ามาก จะเป็นตัวบ่งบอกว่าวัสดุนั้นจะเกิดความเสียหายจากความล้าเร็วขึ้น

แอมพลิจูดความเค้น ( $\sigma_a$ ) สามารถคำนวณได้จากความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.3

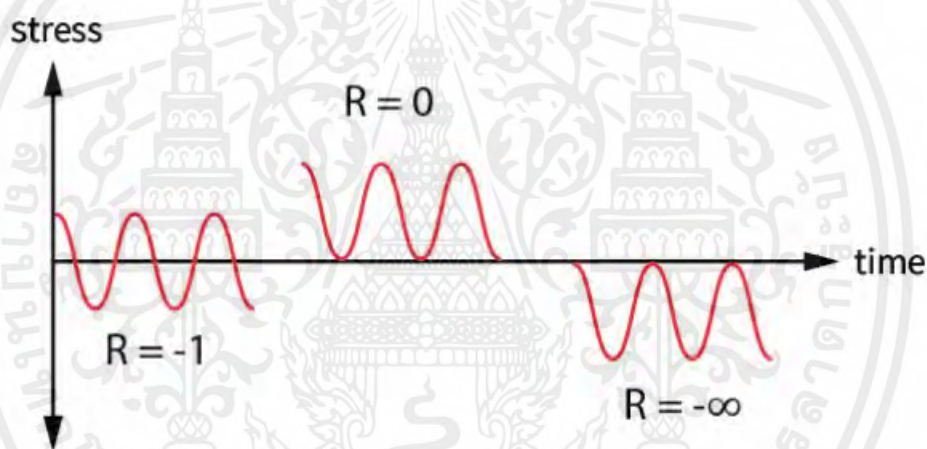
$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (2.3)$$

อัตราส่วนภาวะความเค้น ( $R$ ) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุด และความเค้นสูงสุด ในแต่ละรอบความเค้น ดังสมการที่ 2.4

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

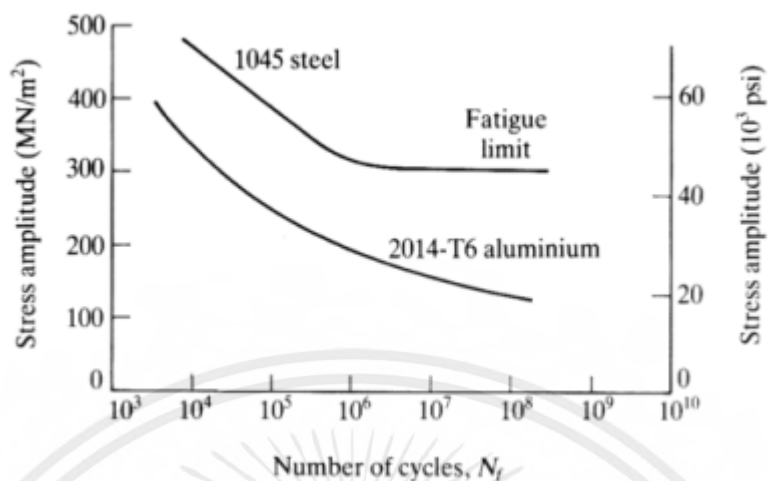
วัฏจักรความล้า มีลักษณะการให้ภาระแบบซ้ำไปซ้ำมาที่มีแอมพลิจูดคงที่ (Constant amplitude) วัฏจักรความล้าสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราส่วนภาระความเค้น (Stress ratio,  $R$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าภาระความเค้นต่ำสุดหารด้วยค่าภาระความเค้นสูงสุดของวัฏจักรมี 3 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3 ได้แก่

1.  $R = -1$  หมายถึงค่าความเค้นต่ำสุดและสูงสุดมีค่าเท่ากัน แต่เครื่องหมายตรงข้ามกัน หรือค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นศูนย์ เรียกลักษณะนี้ว่า Fully reverse
2.  $R = 0$  หมายถึงค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นเฉลี่ยมีค่าเป็นบวก ส่วนค่าความเค้นต่ำสุดเป็นศูนย์ทำให้วัฏจักรนี้เป็น Tension ทั้งหมด เรียกลักษณะนี้ว่า Pulsating tension
3.  $R = -\infty$  หมายถึงค่าความเค้นต่ำสุดและความเค้นเฉลี่ยมีค่าเป็นลบ ส่วนค่าความเค้นสูงสุดเป็นศูนย์ ทำให้วัฏจักรนี้เป็น Compression ทั้งหมด

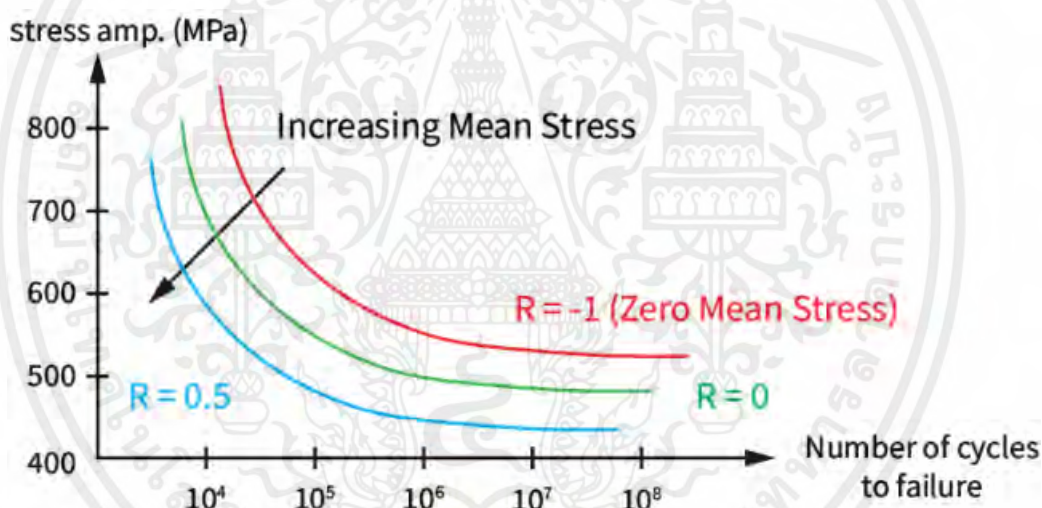


รูปที่ 2.3 ลักษณะของอัตราส่วนภาระความเค้น

เส้นโค้ง S-N มักจะใช้ในการอธิบายสมบัติความล้าของวัสดุ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเค้น ( $\sigma_a$ ) กับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งชิ้นทดสอบเสียหาย ( $N$ ) ที่ได้มาจากการทดสอบความล้า ซึ่งทดสอบที่แอมพลิจูดคงที่จนกว่าชิ้นทดสอบจะเสียหาย ดังรูปที่ 2.4 แต่ในบางกรณีการทดสอบจะหยุดหลังจากผ่านไปตามจำนวนรอบที่กำหนด เช่น  $N > 10^6$  รอบ วัสดุจะถูกตีความว่ามีอายุการใช้งานไม่จำกัด เรียกจุดนี้ว่าขีดจำกัดความทนทาน (Fatigue limit, Endurance limit) หมายความว่าหากวัสดุได้รับความเค้นน้อยกว่าความเค้นนี้จะไม่เกิดความเสียหาย โดยหากอัตราส่วนภาระความเค้นมีค่าเป็นบวกมากขึ้นจะทำให้เส้นโค้ง S-N ชยับลงมาเรื่อย ๆ ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุมีอายุสั้นลง เนื่องจากความเค้นเฉลี่ยส่งผลต่อพฤติกรรมความล้า ดังรูปที่ 2.5 [21]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเส้นโค้ง S-N [9]



รูปที่ 2.5 เส้นโค้ง S-N ที่ความเค้นเฉลี่ยต่างกัน

โดยทั่วไปโลหะกลุ่มเหล็กหรือโลหะเหล็กผสมเป็นวัสดุที่มีขีดจำกัดความล้า (Fatigue limit หรือ Endurance limit) ซึ่งหากวัสดุได้รับความเค้นน้อยกว่าความเค้นนี้จะไม่เกิดความเสียหาย แต่ถ้าเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม จะไม่มีค่าขีดจำกัดความทนทาน โลหะจะเสียหายเมื่อรับแรงแบบคาบที่เกินจำนวนรอบที่เหมาะสมกับวัสดุนั้น ๆ [7]

ความต้านทานความล้าของวัสดุขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แอมพลิจูดและความถี่ของความเค้นแบบรอบ ลักษณะผิวของชิ้นทดสอบ ความเค้นตกค้าง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ และสภาพแวดล้อม ในระหว่างการทดสอบ การทดสอบความล้าเป็นการทดสอบที่ต้องใช้ระยะเวลา เนื่องจากต้องใช้เวลา

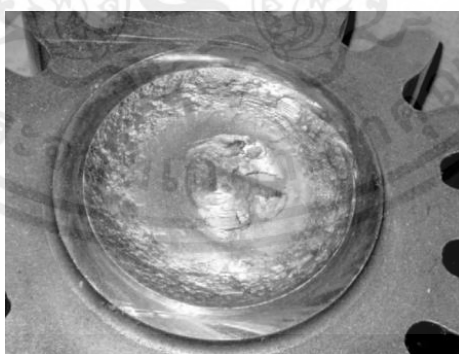
ในการจัดเก็บข้อมูลที่จำเป็น โดยในการทดสอบความล้ามีเครื่องมือหลายชนิด แต่ทุกชนิดมีสิ่งที่เหมือนกัน คือ สามารถนับจำนวนรอบการหมุนได้อย่างถูกต้องจนกระทั่งขึ้นทดสอบแตกหัก และสามารถบันทึกความเค้นในการทดสอบได้

### 2.3.2 การทดสอบความล้า (Fatigue test) [8, 22]

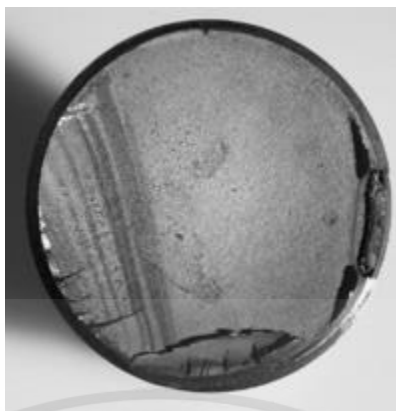
การทดสอบความล้าสามารถทดสอบได้หลายชนิด เช่น ทดสอบความล้าตามแนวแกน (Axial fatigue testing) ทดสอบความล้าด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic fatigue testing) และทดสอบความล้าจากการดัดงอ (Rotating bending fatigue testing) เป็นต้น การทดสอบความล้าสามารถทดสอบได้ โดยการให้ขึ้นทดสอบรับภาระความเค้นคงที่จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดการแตกหัก โดยการทดสอบจะดำเนินไปในลักษณะของการลดความเค้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกว่าความเค้นที่กระทำมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการล้าของวัสดุซึ่งวัสดุจะไม่เกิดการแตกหัก หรือครบตามจำนวนรอบที่มาตรฐานกำหนดไว้ การทดสอบความล้าจะมี 2 ลักษณะ ได้แก่

1. การล้าแบบรอบต่ำ (Low cycle fatigue : LCF) จะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นที่กระทำกับวัสดุมีค่ามากกว่าความเค้น ณ จุดครากของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งจะทำให้ขึ้นทดสอบแตกหักเร็วและมีจำนวนรอบต่ำ โดยทั่วไปจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายจะน้อยกว่า  $10^4$  รอบความเค้น และเกิดลักษณะความเสียหายจากการล้าดังรูปที่ 2.6

2. การล้าแบบรอบสูง (High cycle fatigue : HCF) จะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นที่กระทำกับวัสดุมีค่าน้อยกว่าความเค้น ณ จุดครากของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งขึ้นทดสอบแตกหักเร็วจะมีจำนวนรอบสูง โดยทั่วไปจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายจะอยู่ที่ประมาณ  $10^6$  รอบความเค้น และเกิดลักษณะความเสียหายจากการล้า ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ลักษณะความเสียหายจากการล้าแบบ LCF



รูปที่ 2.7 ลักษณะความเสียหายจากการล้าแบบ HCF

สำหรับลวดส่งกระแสไฟฟ้า หรือชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการใช้งานภายใต้การรับความเค้นต่ำ จึงทำการทดสอบความล้าแบบ High cycle fatigue เพื่อศึกษาพฤติกรรมความล้าของโลหะผสมทองแดงในงานวิจัยนี้

### 2.3.3 การกัดกร่อน (Corrosion) [10,11]

การกัดกร่อน (Corrosion) เป็นการเสื่อมสภาพของวัสดุหรือการที่วัสดุถูกทำลายจากการอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป และเนื่องจากการกัดกร่อนเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นอัตราเร็วในการกัดกร่อนของวัสดุจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยส่วนอื่น อาทิเช่น ความเค้นทางกลศาสตร์ (Mechanical stress) และการกัดเซาะ (Erosion) ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของวัสดุ

การกัดกร่อนของวัสดุส่วนใหญ่เกิดจากการที่โลหะมีการสัมผัสกับสารเคมี ซึ่งจะทำให้มีกลไกทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical mechanism) เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ จึงทำให้เกิดเป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีขึ้นได้ อีกทั้งยังสามารถเกิดการกัดกร่อนได้เมื่อสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับสิ่งแวดล้อมอย่างน้ำหรืออากาศ รวมถึงสามารถเกิดการกัดกร่อนได้แม้จะอยู่ในสภาพของของเหลว

ในทางวิศวกรรม การกัดกร่อนหมายถึงการทำปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) หรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ระหว่างผิวของวัสดุกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่วนใหญ่วัสดุที่เกิดการกัดกร่อนแบบปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะเป็นโลหะ เนื่องจากโลหะสามารถทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมได้ดี รวมถึงมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะส่วนใหญ่จะเกิดการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น โดยทั่วไปมีการแบ่งประเภทของการกัดกร่อนเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

1. การกัดกร่อนแบบชื้น (Wet/aqueous corrosion) จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยความชื้น หรือ สารละลายเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบครบวงจร โดยทั่วไปการกัดกร่อนของโลหะจะเป็นการกัดกร่อนแบบชื้นเท่านั้น
2. การกัดกร่อนแบบแห้ง (Dry corrosion) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างโลหะกับ แก๊ส จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยความชื้นหรือสารละลายในการเป็นตัวกลาง อาจเรียกการกัดกร่อนแบบแห้งว่าเป็นการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation)

### 2.3.3.1 รูปแบบของการกัดกร่อน [11]

- 1) การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่พบเห็นได้ทั่วไป ซึ่งโลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของโลหะ โดยปกติจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือเคมีไฟฟ้าที่ทำให้โลหะถูกกัดกร่อนในขณะที่เกิดออกไซด์ (Oxide) หรือสารประกอบอื่น ๆ บนพื้นผิวบริเวณกว้าง ปฏิกิริยาเหล่านี้มีผลให้โลหะบางลงหรือมีน้ำหนักรวมที่เบาลงเมื่อเวลาผ่านไปและสามารถดำเนินต่อไปได้จนกว่าโลหะจะถูกกัดกร่อนจนหมด การกัดกร่อนประเภทนี้จึงไม่สร้างปัญหามากนักเนื่องจากสามารถคาดการณ์และหาทางป้องกันหรือแก้ไขได้ง่าย [12]

- 2) การกัดกร่อนแบบไบเมทัลลิกหรือแกลแวนิก (Galvanic corrosion)

เกิดจากการที่โลหะหรือโลหะผสมสองชนิดที่มีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันมาสัมผัสโดยตรงหรือโดยอ้อม ซึ่งการกัดกร่อนประเภทนี้เป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าล้วน ๆ ที่เกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะทั้งสอง เมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โลหะทั้งสองจะเกิดการก่อตัวเป็นเซลล์ชนิดหนึ่งเรียกว่า Bimetallic couple โดยที่โลหะชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวก (Anode) และอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ที่ขั้วบวก จะทำให้เกิดการกัดกร่อน [12]

- 3) การกัดกร่อนแบบรอยแยก (Crevice corrosion)

เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized corrosion) แบบหนึ่ง มักเกิดขึ้นบริเวณช่องแคบหรือรอยแยกบนพื้นผิวของโลหะ ซึ่งรอยแยกเหล่านี้อาจเป็นผลมาจากการเชื่อมต่อระหว่างสองพื้นผิว (โลหะกับโลหะ หรือ โลหะกับอโลหะ) หรือ จากการสะสมของสิ่งสกปรก เช่น ผุ่น โคลน และคราบจุลินทรีย์ เป็นต้น การกัดกร่อนประเภทนี้จะมีการเสื่อมสภาพในบริเวณรอยแยก

ในขณะที่บริเวณโดยรอบของพื้นผิวโลหะยังไม่ได้รับผลกระทบ โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนประเภทนี้คือ การมีน้ำหรือความชื้นที่สะสมบริเวณรอยแยก ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียออกซิเจนที่ละลายในน้ำและมีการเพิ่มขึ้นของประจุบวก ด้วยปัจจัยดังกล่าวจะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของของเหลวจนทำให้ของเหลวมีสภาพเป็นกรด ซึ่งของเหลวที่เป็นกรดจะไปทำลายชั้นฟิล์มเฉื่อยของโลหะ ทำให้เสี่ยงต่อการกัดกร่อน [12]

#### 4) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion)

เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized corrosion) อีกแบบหนึ่ง โดยจะมีทิศทางการกัดกร่อนที่ลึกลงตามแนวตั้งและจะเกิดบริเวณที่เป็นรู โพรงหรือช่องว่างขนาดเล็กในขณะที่บริเวณโดยรอบไม่ได้รับผลกระทบ และรูเข็มมักเกิดขึ้นบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องของชั้นฟิล์มหรือชั้นเคลือบของโลหะ เช่น บริเวณที่ฟิล์มได้รับความเสียหาย บริเวณที่มีการเคลือบไม่ได้มาตรฐาน หรือมีคราบแปลกปลอมที่เคลือบบนผิวโลหะ ซึ่งจะทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดความไม่เป็นแอโนด ในขณะที่บริเวณโดยรอบเป็นแคโทด และเมื่อมีความชื้นหรือน้ำบริเวณแอโนดมาสะสมจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนอย่างสมบูรณ์และทำให้เกิดการกัดกร่อนของเนื้อโลหะ

การกัดกร่อนประเภทนี้แทรกซึมได้สูงและถือเป็นการกัดกร่อนที่มีความอันตรายอย่างยิ่ง เนื่องจากเกิดการกัดกร่อนในแนวตั้งตามความหนาของวัสดุ เป็นการยากที่จะคาดการณ์และมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างกะทันหันและรุนแรง [12,13]

#### 5) การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลวผ่านผิวโลหะอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการกัดเซาะขึ้นบนผิวของโลหะ เช่น การไหลของของเหลวในท่อส่งน้ำ และทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นบนผิวที่ถูกกระทบ หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างของเหลวกับโลหะ และแรงทางกลของของไหลที่กระทำต่อผิวโลหะ ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดการกัดเซาะของของเหลวด้วยอัตราเร็วสูงทำให้เกิดเป็นคลื่น ร่อง หลุม หรือแอ่ง ซึ่งจะเกิดในทิศทางการเสียดสีหรือการกระทบ นอกจากนี้การที่ของเหลวไหลผ่านผิวโลหะด้วยความเร็วสูงจะทำให้ฟิล์มออกไซด์ที่ปกป้องผิวของโลหะถูกทำลายและถูกชะล้างไป ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนมากจะพบการกัดกร่อนประเภทนี้ในระบบท่อที่มีการออกแบบไม่เหมาะสม เช่น ท่อที่มีมุมแคบหรือมีการหักมุมอย่างทันที และท่อที่มีการลดขนาดอย่างรวดเร็ว รวมถึงการมีแรงดันภายในของเหลวที่สูงเกินไป

#### 6) การกัดกร่อนแบบตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนในโครงสร้างจุลภาคของโลหะมีแนวโน้มที่จะถูกกัดกร่อนได้มากกว่าเนื้อโลหะ และอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรูปร่างของเกรน เช่น การขึ้นรูปทางกล การอบชุบ และการเชื่อม เป็นต้น โดยทั่วไป ขอบเกรนของโลหะจะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมได้ง่ายกว่าเนื้อโลหะ จึงมีสภาพเป็นแอโนด ส่วนเกรนของโลหะมีสภาพเป็นแคโทด การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายหากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่นปะปนอยู่ และจะเกิดขึ้นที่ขอบเกรนของโลหะผสมบางชนิด ในสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น จึงส่งผลให้โครงสร้างเกรนของชิ้นทดสอบถูกแยกออกจากกันและหากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่ หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

#### 7) การแตกหักแบบกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress corrosion cracking, SCC)

เกิดขึ้นเมื่อโลหะผสมมีความเค้นดึงตกค้าง (Residual tensile stresses) หรือได้รับความเค้นภายนอก (Applied stresses) มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเฉพาะที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ในการที่จะเกิดการกัดกร่อนประเภทนี้ จะต้องประกอบไปด้วยปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัยดังนี้

- ต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน
- โลหะผสมต้องไวต่อการเกิดการแตกหักแบบกัดกร่อนร่วมกับความเค้น
- ต้องมีความเค้นดึงกระทำในชิ้นทดสอบโลหะผสม

โลหะผสมบางชนิดมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนทั่วไป แต่อาจไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีความเค้นเกิดขึ้นร่วมกันได้ ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นรูเข็มหรือหลุมบนผิวของโลหะผสม และจะมีการขยายตัวใหญ่ขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับทิศของแรงดึง ส่งผลให้เกิดความเสียหายและเกิดการแตกหักในโลหะผสม ซึ่งจะมีลักษณะความเสียหายแบบวิบัติเปราะแม้ว่าโลหะผสมจะมีสมบัติเหนียวก็ตาม และหากมีขนาดความเค้นเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้อายุการใช้งานของโลหะผสมจะสั้นลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วทำให้มีการหดตัวของโลหะผสมที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ แก๊สหรืออนุภาคของแข็งที่เกิดจากการกัดกร่อนและตกค้างอยู่ในเนื้อโลหะผสมสามารถสร้างความเค้นตกค้างได้เช่นกัน

#### 8) การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion fatigue)

เป็นความเสียหายจากการที่ชิ้นทดสอบต้องรับความเค้นหรือแรงกระทำทางกลแบบรอบ ร่วมกับการกัดกร่อน ทำให้ความล้าเกิดขึ้นในชิ้นทดสอบ ส่งผลให้ฟิล์มออกไซด์ที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนเกิดการแตกและหลุดออก จึงเกิดการกัดกร่อนขึ้นในเนื้อโลหะ ดังนั้นการที่ชิ้นทดสอบ ได้รับความเค้นแบบรอบและอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนจะเป็นตัวเร่งให้ความเสียหายมี ความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ผิวรอยแตกที่เกิดจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า จะมีลักษณะผิวที่ หยาบและไม่สะท้อนแสง ซึ่งเป็นผลจากการเกิดผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนผิวโลหะ และมีปัจจัยที่ สำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางโลหะวิทยาและปัจจัยทางสภาพแวดล้อม เป็นต้น

#### 9) การเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen embrittlement)

เป็นการกัดกร่อนแบบหนึ่ง ที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีแก๊สไฮโดรเจนหรือ สารประกอบไฮโดรเจนอยู่ เป็นผลให้โลหะมีความเหนียวและความแข็งแรงลดลง เนื่องจากมี อะตอมของไฮโดรเจนแทรกซึมอยู่ในเนื้อโลหะ และแม้ว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่อยู่ใน โครงสร้างผลึกของโลหะจะมีเพียง 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ก็สามารถทำให้เกิดการแตกหักใน โลหะได้ เพราะว่าอะตอมของไฮโดรเจนที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อโลหะเกิดการรวมตัวเป็นแก๊ส ไฮโดรเจนที่บริเวณช่องว่างขนาดเล็กในเนื้อโลหะ ทำให้เกิดความดันสูงจนสามารถดันเนื้อโลหะให้ แตกออก การเสียหายในรูปแบบนี้จำเป็นต้องใช้เวลาสำหรับการเคลื่อนที่ของอะตอมไฮโดรเจน พอสมควรและสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะทุกชนิด

#### 10) การกัดกร่อนแบบเฟรตติง (Fretting corrosion)

เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนร่วมกับการสึกหรอแบบถูครูด (Fretting) โดยจะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือมีการสั่น ซึ่งจะทำให้ผิวหน้าของโลหะเกิด ความเสียหาย หากในกรณีที่โลหะมีฟิล์มออกไซด์ที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนการถูครูดจะทำให้ ฟิล์มออกไซด์เกิดความเสียหายและทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะลดลง

#### 11) การกัดกร่อนแบบการซึมชะละลายเฉพาะที่ (Selective leaching)

เป็นการกัดกร่อนที่มีการสูญเสียธาตุผสมบางตัวจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม มัก เกิดในโลหะผสมที่มีธาตุผสมมากกว่าหนึ่งธาตุ ซึ่งมีเฟสมากกว่าหนึ่งเฟสในโครงสร้างจุลภาคของ วัสดุ โดยเฟสของธาตุผสมที่ต่างกันจะมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่แตกต่างกันและเมื่อโลหะ ผสมอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน จะทำให้เฟสหนึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด และอีกเฟสที่มี ปริมาณมากกว่าทำหน้าที่เป็นแอโนด โดยเฟสที่เป็นแอโนดจะถูกกัดกร่อนและสูญหายไป ทำให้

เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ ขึ้นทดสอบโลหะผสมที่เกิดการกัดกร่อนประเภทนี้จะมีรูปร่างเหมือนเดิมแต่คุณสมบัติทางกลจะลดลง โดยเฉพาะความเหนียวของวัสดุ อีกทั้งเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่อันตรายเป็นอย่างมาก เนื่องจากไม่สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนรูปหรือการเปลี่ยนแปลงใด ๆ บนผิวของวัสดุ ทำให้ไม่ทราบถึงการกัดกร่อนเกิดขึ้น

#### 12) การกัดกร่อนแบบใต้ชั้นเคลือบ (Filiform corrosion)

เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ที่เกิดขึ้นที่ใต้ชั้นเคลือบ ซึ่งจะทำให้ผิวของวัสดุเสียไปเท่านั้น แต่จะไม่ทำให้โครงสร้างภายในวัสดุเสียหายหรือเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ แต่ทั้งนี้การกัดกร่อนประเภทแบบใต้ชั้นเคลือบ จะสร้างความไม่สวยงามให้แก่ชิ้นทดสอบและอาจเป็นต้นเหตุของการกัดกร่อนประเภทอื่นต่อไป

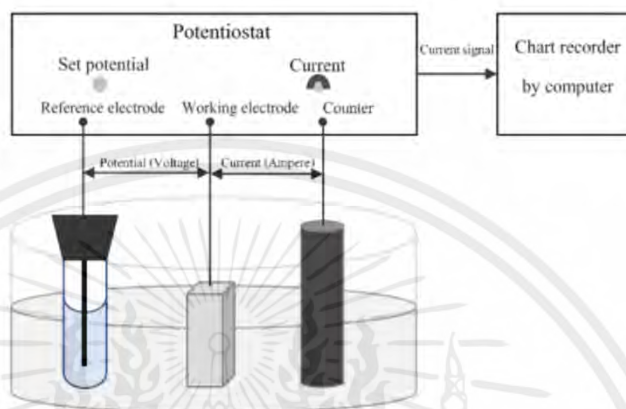
#### 2.3.3.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้าและประมวลผล [14]

การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical technique) เป็นหนึ่งวิธีที่สามารถช่วยในการประเมินอัตราการกัดกร่อนได้ดีและรวดเร็ว ทั้งยังเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการกัดกร่อนของโลหะ โดยหลักการทดสอบจะเป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะที่เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน สามารถทำได้โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat analyzer) ดังรูปที่ 2.8

จากรูปที่ 2.8 แสดงเครื่องมือวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด เพื่อใช้สำหรับจัดเตรียมเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion cell) แบบสามขั้วไฟฟ้า (Three electrode cell) ได้แก่

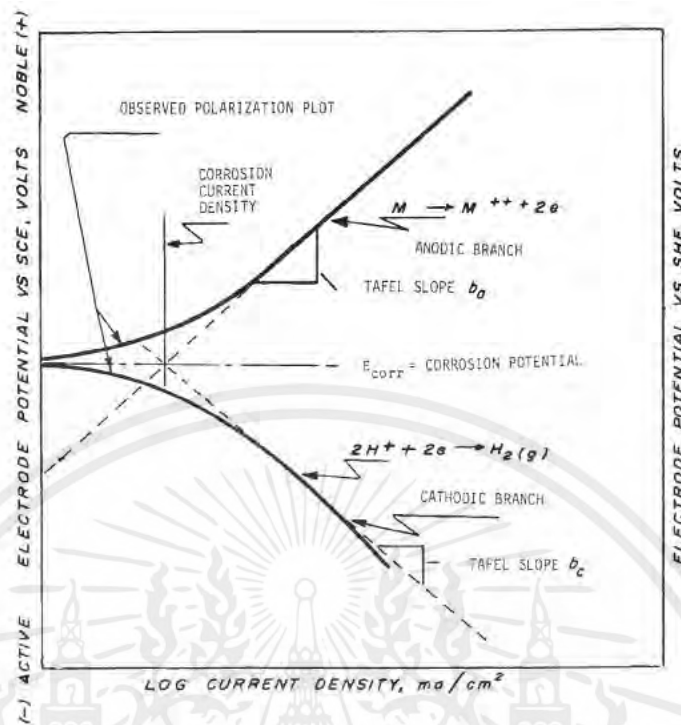
- 1) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) เป็นวัสดุโลหะที่ต้องการทดสอบการกัดกร่อน
- 2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ที่แน่นอน และเป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เทียบกับขั้วไฟฟ้าทำงาน เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งชนิดที่ห้องปฏิบัติการใช้ คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode, SCE) เป็นขั้วทุติยภูมิที่นิยมใช้ในการทดสอบทางเคมีไฟฟ้า เพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของชิ้นทดสอบ โดย SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ +0.24 V. เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจนซึ่งเป็นขั้วปฐมภูมิ

- 3) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode, CE) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและเป็นขั้วที่รับพลังงานจากขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยวัสดุที่ใช้ทำขั้วชนิดนี้ ได้แก่ ลวดแพลทินัม แผ่นแพลทินัม กลาสีคาร์บอน และกราไฟต์



รูปที่ 2.8 ลักษณะการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท [14]

จากค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองค่าจะได้กราฟที่เรียกว่า เส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังรูปที่ 2.9 จากเส้นโค้งโพลาริเซชันสามารถนำมาหาค่าสำคัญ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential,  $E_{corr}$ ) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density,  $i_{corr}$ ) นอกจากนี้ ยังแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยา แอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกบนพื้นผิวของโลหะที่มีการกัดกร่อนและเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าบนผิว จะทำให้ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ความต่างศักย์ของแอโนดจะเปลี่ยนไปในทางบวก ส่วนความต่างศักย์ของแคโทดจะเปลี่ยนไปในทางลบ ดังเส้นโค้งแอโนดิก (Anodic curve) และเส้นโค้งแคโทดิก (Cathodic curve) ตามลำดับ ในลักษณะนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดโพลาริเซชันของขั้วทั้งสอง จึงสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้นความชันของเส้นกราฟแอโนดและเส้นกราฟแคโทดดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [15]

เมื่อทราบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จึงสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate,  $CR$ ) ได้จากสมการที่ 2.5 [16]

$$CR = \frac{(3.27 \times 10^{-3}) \times EW \times i_{corr}}{\rho} \quad (2.5)$$

โดยที่

$CR$	คือ	อัตราการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี ( $mm/yr$ )
$i_{corr}$	คือ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\mu A/cm^2$ )
$EW$	คือ	น้ำหนักสมมูล มีหน่วยเป็น กรัมต่อโมล ( $g/mol$ )
$\rho$	คือ	ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $g/cm^3$ )

สมการที่ 2.5 เรียกว่ากฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองและอัตราการกัดกร่อน (ในหน่วยของความลึกของวัสดุที่สูญหายต่อหนึ่งหน่วยเวลา)

ในการคำนวณน้ำหนักสมมูลของโลหะผสม สามารถใช้วิธีการดังต่อไปนี้ พิจารณามวลต่อหน่วยโลหะผสมที่ออกซิไดซ์ และอิเล็กตรอนเทียบเท่ากับโลหะผสม 1 กรัม จึงได้สมการ  $Q$  มาดังนี้

$$Q = \sum \frac{n_i f_i}{W_i} \quad (2.6)$$

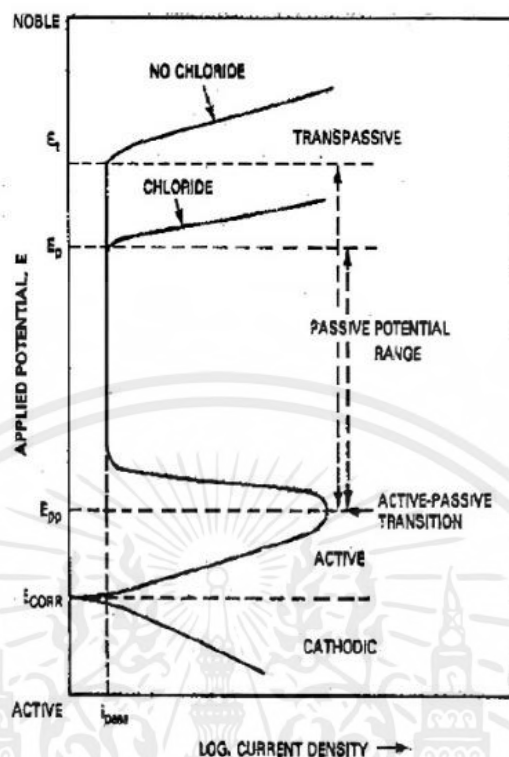
โดยที่

$f_i$	คือ	สัดส่วนน้ำหนักของแต่ละธาตุในวัสดุ
$n_i$	คือ	จำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละธาตุในวัสดุ
$W_i$	คือ	น้ำหนักอะตอมของแต่ละธาตุในวัสดุ

ดังนั้น น้ำหนักสมมูล ( $EW$ ) ของโลหะผสม จึงเป็นส่วนกลับของประจุไฟฟ้า ( $Q$ ) ดังสมการที่ 2.7

$$EW = \frac{1}{Q} = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (2.7)$$

โดยปกติ จะมีเพียงองค์ประกอบที่มีมวลมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ในโลหะผสมเท่านั้นที่จะรวมอยู่ในการคำนวณ ในกรณีนี้ไม่สามารถวิเคราะห์โลหะผสมได้จริง ซึ่งเป็นเรื่องปกติที่จะใช้ช่วงกลางของข้อกำหนดองค์ประกอบสำหรับแต่ละองค์ประกอบ [17]



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นโค้งโพลาริเซชัน [18]

จากกราฟแสดงรูปที่ 2.10 ทราบจุดตัดของเส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิก คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือ  $E_{corr}$  ในแนวแกน Y และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือ  $i_{corr}$  ในแนวแกน X เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปจนถึงจุดหนึ่ง กระแสจะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มพาสซีฟบน (Passive film) ผิวโลหะ เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดว่าเป็นจุดการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟ-พาสซีฟ (Active-passive transition) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าพาสซีฟเวชันปฐมภูมิ (Primarily passive potentials) ใช้สัญลักษณ์  $E_{pp}$  เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปค่ากระแสเริ่มลดลงจนคงที่ ณ ค่าหนึ่งแม้จะเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ต่อไปความหนาแน่นของกระแสก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงช่วงกราฟที่แสดงนี้เรียกว่า ช่วงพาสซีฟ (Passive zone) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่แสดงถึงความทนทานของฟิล์มบนผิวโลหะ ถ้าเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกจนกระทั่งถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ชั้นพาสซีฟเกิดการแตกหรือร้าวจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงที่เลยจุดนี้ว่า ช่วงทรานพาสซีฟ (Transpassive zone) และเรียกศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ใช้สัญลักษณ์  $E_t$  ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เป็นค่าที่โลหะเริ่มกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized corrosion) คือการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (Pitting corrosion) ซึ่งหากป้อนศักย์ไฟฟ้าเกินค่า  $E_t$  จะเกิดการแตกของชั้นฟิล์มพาสซีฟจุดใหม่เพิ่มขึ้นและชั้นฟิล์มจุดที่แตกเดิมจะมีการขยายตัวของรูเข็มหรือหลุมใหญ่ขึ้น สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโพลาริเซชันได้แก่ ปริมาณออกซิเจน

ในสารละลาย อัตราการสแกน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลายและอัตราการกวาดโดยทางอ้อมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของตัวอย่างดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรดังกล่าว

นอกจากจะหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากจุดตัดของเส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิกแล้ว เส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิกยังแสดงค่าความชัน (Tafel slope,  $b_a$  และ  $b_c$ ) ดังรูปที่ 2.9 จากนั้นนำค่า  $b_a$  และ  $b_c$  ไปคำนวณค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน (Polarization resistance,  $R_p$ ) ตามที่แสดงในสมการที่ 2.8 ค่าความต้านทานโพลาไรเซชันบ่งชี้ถึงความต้านทานการกัดกร่อนแบบทั่วไป (General corrosion) ของวัสดุได้เช่นเดียวกับค่า  $i_{corr}$  และ  $E_{corr}$

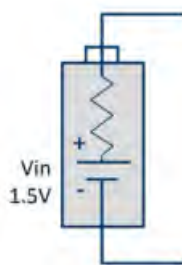
$$R_p = \frac{(b_a \times b_c)}{(2.303 \times (b_a + b_c) \times i_{corr}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $R_p$  คือ ค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน มีหน่วยเป็น โอห์มตารางเซนติเมตร ( $\Omega \cdot cm^2$ )  
 $b_a$  คือ ค่าความชันเส้นกราฟแอโนดิก Tafel slope โวลต์ต่อเดกเดท ( $V/decade$ )  
 $b_c$  คือ ค่าความชันเส้นกราฟแคโทดิก Tafel slope โวลต์ต่อเดกเดท ( $V/decade$ )  
 $i_{corr}$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ( $A/cm^2$ )

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมีและการประมวลผลยังมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

- 1) การวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด [19]

ศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด หรือ Open-circuit potential (OCP) เป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อถอดขั้วปลายของวงจรถัดออกและไม่มีโหลดภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.11 รูปวงจรถัดไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นทางไฟฟ้าที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.11 วงจรที่ไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นทางไฟฟ้าที่สมบูรณ์

เมื่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดทำให้แบตเตอรี่มีศักย์ภาพเต็มที่ แนวคิดในทางเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้กับขั้วอิเล็กโทรดในวงจรเคมีไฟฟ้าได้ โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการทำงานจะวัดระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) และอิเล็กโทรดทำงาน (Working electrode) เมื่อจุ่มอิเล็กโทรดลงในอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรดจะทำงานในรูปแบบของศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด และจะกำหนดความสามารถในการออกซิไดซ์ ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั่วไปโลหะสองชนิดที่ถูกแช่อยู่ในสารอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้ทั้งคู่มีศักย์ภาพในการทำปฏิกิริยาแบบวงจรเปิด และถ้าหากโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดทั้งสองจะสามารถวัดค่าความต่างศักย์ได้ แต่หากโลหะทั้งสองเชื่อมต่อกันด้วยไฟฟ้า เช่น สายเคเบิล ความต่างศักย์ที่มีอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหล เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไปยังโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า โดยวัสดุที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำจะกลายเป็นขั้วบวก ในขณะที่วัสดุที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะกลายเป็นขั้วลบ จากความเข้าใจเกี่ยวกับศักย์ไฟฟ้าของวงจรเปิดมีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการกัดกร่อน เนื่องจากช่วยคาดการณ์ว่าวัสดุโลหะจะมีปฏิกิริยาการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าหรือไม่ และศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเรียกอีกอย่างว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit voltage, OCP)

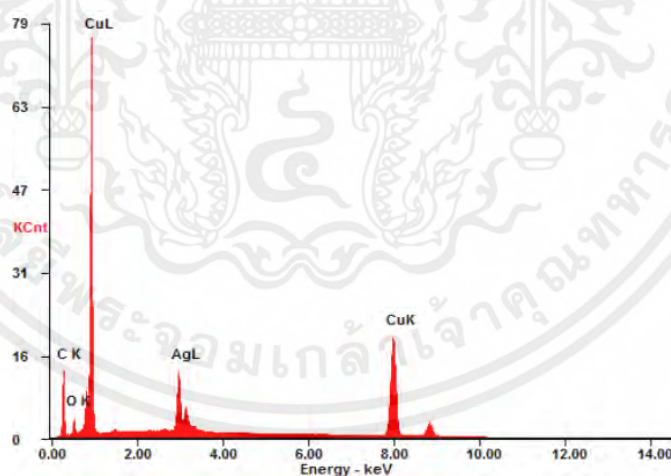
## 2) วิธีการประมาณค่านอกช่วงจากเส้นทาเฟล [23]

ในทางปฏิบัติกราฟที่เราได้จากการทดลอง คือ กราฟเส้นโค้งโพลาร์ไรเซชัน เราสามารถพิจารณาย้อนกลับเพื่อหาเส้นทาเฟลแอโนดิกและเส้นทาเฟลแคโทดิกได้ โดยการลากเส้นตรงสัมผัสกราฟในช่วงศักย์เปลี่ยนเบนไปทางแอโนดิกและแคโทดิกมาก ๆ จากนั้นทำการลากเส้นทั้งสองต่อออกมาให้ตัดกัน ซึ่งจะได้ค่าในแกนตั้งของจุดตัดระหว่างเส้นทาเฟลแอโนดิกและเส้นทาเฟลแคโทดิกคือศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ส่วนค่าในแกนนอนของจุดตัดระหว่างเส้นแอโนดิกและแคโทดิก คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อนเมื่อทราบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะสามารถหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้โดยใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งเรียกวิธีการหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนแบบนี้ว่าการประมาณค่านอกช่วงจากเส้นทาเฟล (Tafel extrapolation)

### 2.3.3.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบบนพื้นผิว [34]

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบบนพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อน โดยการวิจัยครั้งนี้ ใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันใช้มีบทบาทสำคัญทั้งในด้านการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก

หลักการทำงานของเทคนิค EDS คือ ชี้นทดสอบที่ต้องการศึกษาจะถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยผลิกอิเล็กตรอนของชี้นทดสอบให้หลุดออกจากอะตอม และเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพ อิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะเข้ามาแทนที่ รวมถึงปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์แบบแคแรกเทอริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัด หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ และนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ ส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แกน X คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ และ แกน Y คือ จำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ ซึ่งจุดพีคที่เกิดขึ้นสามารถบอกได้ถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชี้นทดสอบที่ต้องการศึกษา ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากเทคนิค EDS

นอกจากนี้ เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) สามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพของชี้นทดสอบที่ศึกษาว่ามีธาตุชนิดใดประกอบอยู่บ้าง รวมถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณซึ่งบ่งบอกถึงเปอร์เซ็นต์ของธาตุได้ 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. Point analysis เป็นการวิเคราะห์โดยให้ลำของอิเล็กตรอนกระทบบนพื้นผิวของชั้นทดสอบตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์ตามจุดที่ต้องการ

2. Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำของอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวนอนชั้นทดสอบตรงตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์ ใช้สำหรับหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. Mapping analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำของอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวของชั้นทดสอบตรงตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์ โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นภาพลักษณะการกระจายตัวของธาตุที่มีอยู่

สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการใช้เทคนิค EDS เพื่อวิเคราะห์ธาตุ และสารประกอบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชั้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์เนียมหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชั้นทดสอบทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง

## 2.4 ทองแดงและโลหะผสมทองแดง [24]

ทองแดง เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นโลหะอ่อน จึงแปรรูปได้ง่ายและสามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี โดยคุณสมบัติทั่วไปทางกายภาพของทองแดงมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง

คุณสมบัติทางกายภาพ	
มวลอะตอม	63.54 amu
ความหนาแน่น	8.94 g/cc ที่ 20 °C
จุดหลอมเหลว	1083 °C
จุดเดือด (โดยประมาณ)	2582 °C
ความร้อนจำเพาะ	24.440 J/(mol·K)
เลขออกซิเดชันสามัญ	+1, +2

โลหะทองแดงมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การทำอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ลวดไฟฟ้าและสายสัญญาณต่าง ๆ เป็นชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล เครื่องยนต์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง รวมถึงทำโลหะผสมทองแดง

โลหะผสมทองแดงหมายถึงโลหะผสมที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบหลักและส่วนประกอบของโลหะอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวัน โลหะผสมทองแดงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจาก

สมบัติเชิงกลที่ดี ความต้านทานการกัดกร่อน การนำไฟฟ้า การนำความร้อน และมีส่วนสำคัญต่องานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย โลหะผสมทองแดงมีหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (Cu-Zn) และทองสัมฤทธิ์ (Cu-Sn) นอกจากนี้ยังมีโลหะผสมทองแดง-อะลูมิเนียม (Cu-Al) โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล (Cu-Ni) และโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม (Cu-Zr) เป็นต้น

#### 2.4.1 โลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม [5]

ทองแดง และเซอร์โคเนียมสามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันเกิดเป็นโลหะผสมทองแดง-เซอร์โคเนียม C15100 มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง มักใช้งานในเบรกเกอร์วงจร คอมมิวเตเตอร์ และปลายการเชื่อมบัดกรี โดยมีสารประกอบ Cu 99.9%wt และ Zr 0.1%wt คุณสมบัติของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ตารางแสดงคุณสมบัติของโลหะทองแดงเซอร์โคเนียมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 973 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สมบัติของวัสดุ	ค่าที่ได้
Elastic modulus	100 GPa
Yield strength	300 MPa
Ultimate tensile strength	351.86 MPa
Elongation	6.88 %

## 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 กระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง

Wongsa-Ngam et al. [5] ได้ทำการศึกษาความเป็นเนื้อเดียวกันของความเครียด (Plastic strain homogeneity) ในระหว่างการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการศึกษาพบว่าในช่วงแรกของการเสียรูปมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneity) เกิดขึ้นที่ช่องว่างที่เกิดจากมุมโค้งด้านนอก และพบว่ามีวิวัฒนาการของความเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมนี้ความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดหน้าตัดขวางเห็นได้ชัดเมื่อผ่านกระบวนการไปจำนวนอย่างน้อย 4 รอบ ด้วยเส้นทาง  $B_C$  และเมื่อวิเคราะห์ความเป็นเนื้อเดียวกันตามแนวยาวของชิ้นทดสอบพบว่าความสม่ำเสมอเกิดขึ้นบริเวณส่วนกลางระยะความยาว 40 มิลลิเมตร (ความยาวชิ้นทดสอบในการศึกษา 70 มิลลิเมตร)

Wongsa-Ngam et al. [26] ได้ทำการศึกษาวิวัฒนาการความเป็นเนื้อเดียว (Homogeneity) ของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมระหว่างกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง โดยการวัดค่าการกระจายความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP มีค่ามากกว่าชิ้นทดสอบบอบอ่อนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ ECAP นอกจากนี้พบว่าช่วงแรกของการเสียรูป ค่าการกระจายความแข็งแรงบนหน้าตัดไม่สม่ำเสมอโดยพบค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่าบริเวณด้านที่ติดกับโค้งด้านนอกของตาย แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบพบว่าความแข็งแรงมีความเป็นเนื้อเดียวเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น และหลังจาก 8 รอบความแข็งแรงมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดหน้าตัดของชิ้นทดสอบ

Wongsa-Ngam et al. [28] ได้ทำการสังเกตวิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมในกระบวนการ ECAP ผลการศึกษาพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น โดยช่วงแรกของการเสียรูปเกรนมีลักษณะเป็นเกรนตามยาว (elongated grain) แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบโดยใช้เส้นทาง BC ลักษณะของเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนที่มีลักษณะเท่ากันทุกทิศทาง (equiaxed grain) Wongsa-Ngam et al. [28] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมหลังจากกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope, TEM) ผลการศึกษาพบว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงแบบจุลภาคเพิ่มขึ้น จนถึงจุดอิ่มตัวค่าความแข็งแรงแบบจุลภาคจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง และเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นทดสอบ และจำนวนรอบที่ต่างกัน แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนในโครงสร้างระดับจุลภาคที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การเคลื่อนที่ของ dislocation จะถูกแทนที่ด้วยขนาดเกรนที่เล็กลงหลังผ่านกระบวนการ 4 และ 8 รอบ โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ย 425 nm และ 330 nm ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง ทำให้ทราบถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมเมื่อผ่านกระบวนการไปจำนวนอย่างน้อย 4 รอบ ด้วยเส้นทาง BC และเมื่อวิเคราะห์ความเป็นเนื้อเดียวกันตามแนวยาวของชิ้นทดสอบพบว่าความสม่ำเสมอเกิดขึ้นบริเวณส่วนกลางระยะความยาว 40 มิลลิเมตร (ความยาวชิ้นทดสอบในการศึกษา 70 มิลลิเมตร) และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบพบว่าความแข็งแรงมีความเป็นเนื้อเดียวเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น หลังจากผ่านกระบวนการ 8 รอบความแข็งแรงมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดหน้าตัดของชิ้นทดสอบ ซึ่งสามารถปรับใช้ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบการกัดกร่อน และสามารถนำมาประกอบการอธิบายผลการทดสอบการกัดกร่อนได้

## 2.5.2 การทดสอบความล้า

Maier et al. [27] ได้ทำการศึกษาของตงแดงบริสุทธิ์เกรนละเอียด ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ซึ่งคือการอัดผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เอ็กซ์ทรูชั่นจำนวน 8 และ 16 รอบ เส้นทาง A, C และ E พบว่ากระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับอนุภาคของวัสดุกลายเป็นเกรนละเอียด จากนั้นทำการทดสอบความล้าของวัสดุโดยใช้เครื่องทดสอบความล้าผ่านการดึงอัดแบบจำนวนรอบต่ำ (LCF) โดยกำหนดแอมพลิจูดความเครียดรวมสูงสุดที่ 0.3% และอัตราความเครียดคงที่  $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  ผลลัพธ์จากการทดสอบความล้าคือกราฟ S-N ของตงแดงซึ่งผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เอ็กซ์ทรูชั่น เส้นทาง 8A ใช้แอมพลิจูดความเค้นระหว่าง 450-520 MPa ทำให้ชิ้นทดสอบมีจำนวนรอบก่อนแตกหักน้อยกว่า 3500 รอบ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบก่อนแตกหักและแอมพลิจูดความเค้น

Djavanroodi et al. [31] ได้ทำการศึกษาของตงแดงบริสุทธิ์ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ได้แก่กระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งจำนวน 1, 2, 4, 8 รอบ เส้นทาง Bc จากนั้นทำการทดสอบความล้าของวัสดุโดยใช้เครื่องทดสอบความล้าผ่านการดึงอัด โดยกำหนดความถี่ 74 Hz, ชิ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm,  $R=-1$ , ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E466 ผลลัพธ์จากการทดสอบความล้าคือกราฟ S-N ของตงแดงซึ่งผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง เส้นทาง 8 Bc ใช้แอมพลิจูดความเค้นระหว่าง 130-480 MPa ทำให้ชิ้นทดสอบมีจำนวนรอบก่อนแตกหักน้อยกว่า 6 ล้านรอบ ซึ่งสามารถทราบถึงขีดจำกัดความทนทานและการรับโหลดช่วงความเค้นต่ำเมื่อเทียบกับตงแดงบริสุทธิ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งได้อย่างชัดเจน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบก่อนแตกหักและขนาดแอมพลิจูดความเค้น รวมถึงขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความล้าจากที่กล่าวมา ทำให้ทราบถึงผลการทดสอบของตงแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เอ็กซ์ทรูชั่นจำนวน 8 รอบ เส้นทาง A และตงแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งจำนวน 8 รอบ เส้นทาง Bc ซึ่งมีแนวทางการทดสอบใกล้เคียงกับการทดสอบความล้าที่ผู้วิจัยคาดไว้ จึงนำผลการทดสอบจากวิจัยข้างต้นมาเปรียบเทียบ และกำหนดเงื่อนไขของการทดสอบความล้า

### 2.5.3 การทดสอบการกัดกร่อน

Sadawy et al. [29] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงแบบทั้งก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งในจำนวนรอบที่ต่างกัน สูงสุดถึง 5 รอบ ในการทดสอบการกัดกร่อนมีการเตรียมวัสดุโดยการนำแท่งโลหะผสมทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตัดให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร และได้ทำทดสอบด้วยหลักการไฟฟ้าเคมีในสารละลาย NaCl 3.5% โดยดำเนินการที่ค่า scan rate 0.5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ผลจากการวิจัยพบว่าเมื่อขึ้นทดสอบถูกนำไปผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งที่จำนวนครั้งที่มากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะมีค่าสูงขึ้น ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าลดลง มีอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการ เนื่องจากไม่มีเฟสที่สองในขึ้นทดสอบที่ถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน มีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ รวมถึงขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็กลง

Alateyah et al. [30] ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนและค่าความแข็งของ AZ31 Mg alloy ทั้งก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งที่อุณหภูมิ 250 °C และศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้ทั้งส่วนที่ตัดขวางและตั้งฉากกับทิศทางการอัดขึ้นรูป หลังจากผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งส่งผลให้บริเวณส่วนกลางมีรูปร่างผิดปกติเป็นอย่างมาก โดยมีเกรนเรียงตัวขนานกับทิศทางการอัดขึ้นรูปในขณะที่บริเวณรอบนอกจะมีโครงสร้างการตกผลึกใหม่ของเกรนที่ละเอียดเป็นพิเศษ และพบว่าอนุภาคทุติยภูมิขนาดเล็กกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน การทดสอบในด้านคุณสมบัติการกัดกร่อนจะทดสอบในสารละลายริงเกอร์ อะซิเตทที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่อง Potentiostat โดยดำเนินการที่ค่า scan rate สำหรับเทคนิคโพลาไรซ์เซชัน เท่ากับ 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที พบว่าหลังจากผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 และ 2 รอบในเส้นทาง Bc ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนลดลงเหลือ 67.7% และ 78.3% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับก่อนผ่านกระบวนการ ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่ผ่านกระบวนการ เนื่องจากขนาดเกรนของแมกนีเซียมและเฟสทุติยภูมิมีขนาดเล็กลงจนมีขนาดเกรนที่ละเอียดมาก ซึ่งเกิดจากการสะสมของความเครียดในระหว่างกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการกัดกร่อนพบว่า สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนส่วนใหญ่ใช้หลักการทดสอบด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้า ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้นำวิธีการทดสอบด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat) มาใช้สำหรับทดสอบการกัดกร่อนเนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้และสามารถช่วยในการประเมินความต้านทานการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว

## 2.5.4 ปัจจัยทางโลหะวิทยาที่มีผลต่อการกัดกร่อน [33]

โครงสร้างของโลหะและโลหะผสมมีความสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดลักษณะการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีรูปร่างผิดปกติอย่างมากจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีผลอย่างมากต่อความต้านทานของวัสดุ

ในโลหะที่มีรูพรุนผิดปกติสูง เกรนจะมีรูปร่างผิดปกติและโครงสร้างของเกรนมีการกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ โดยปกติวัสดุจะมีปฏิกิริยาก่อนข้างมากขึ้นในสภาพแวดล้อมทางเคมีไฟฟ้า นอกจากนี้ อิทธิพลของสิ่งเจือปน การรวมตัว ขอบเกรน และความแตกต่างในการวางแนวเกรน อาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในโลหะและโลหะผสมหลายชนิด ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนสูง

### 2.5.4.1 ผลของข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกและเฟสต่อการกัดกร่อน

ความแตกต่างในลักษณะระดับจุลภาคของโลหะจะต้องได้รับการพิจารณา โครงสร้างผลึกถือว่าเป็นสมบูรณ์แบบในสามมิติ แต่ในความเป็นจริงแล้ว มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องของผลึก โดยข้อบกพร่องเหล่านี้อาจเป็นช่องว่างที่เกิดจากการไม่มีอะตอมในผลึก อะตอมเจือปนที่มีขนาดต่างกัน อะตอมคั่นระหว่างหน้า และการรบกวนของโครงตาข่ายขนาดใหญ่ที่เรียกว่าดิสโลเคชัน (Dislocation) ข้อบกพร่องแต่ละประการที่กล่าวมา สามารถสร้างความแตกต่างเฉพาะจุดในพฤติกรรมเคมีไฟฟ้าและความต้านทานของวัสดุได้เช่นกัน โดยช่องว่างอะตอมเจือปนและอะตอมคั่นระหว่างหน้าเป็นข้อบกพร่องเฉพาะจุดในขณะที่ดิสโลเคชัน เป็นข้อบกพร่องของเส้นที่ส่งผลต่อปริมาตรของผลึกที่มากขึ้น ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมหรืออุตสาหกรรมเคมี พื้นที่เหล่านี้มักจะมีขั้วบวก (Anodic) มากกว่าพื้นที่อื่นโดยรอบ หลุมกัดกร่อนรูปลามเหลียม เป็นผลมาจากการโจมตีทางเคมีไฟฟ้าเนื่องจากสนามความเครียดรอบดิสโลเคชัน รูปร่างของหลุมสัมพันธ์กับการวางแนวของเกรนกับพื้นผิวที่สึกกร่อน คุณสมบัติของเหล็กหรือวัสดุหลายเฟส ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างที่สัมพันธ์กันอย่างมาก ได้แก่ ปริมาณ การกระจาย ขนาด รูปร่าง ความแข็งแรง ของเฟสต่าง ๆ ในโลหะผสมในหลายกรณีวัสดุที่มีหลายเฟสจะมีปัญหาจากการกัดกร่อน เนื่องจากทั้งสองเฟสอาจมีความแตกต่างในลักษณะทางเคมีไฟฟ้า

### 2.5.4.2 ผลของการอบชุบ (Heat treatment) ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

คุณสมบัติทางกลขั้นสุดท้ายหลายประการและความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุอาจเกี่ยวข้องกับการอบชุบ นั่นคือ การประมวลผลทางโลหะวิทยาโดยใช้การอบชุบเพื่อเปลี่ยนหรืออบอ่อนโครงสร้างของโลหะหรือโลหะผสม โดยการอบอ่อนเป็นกระบวนการอบชุบที่สำคัญมาก ซึ่งทำเพื่อสร้างหนึ่งในสองผลกระทบที่ส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ ประการแรก คือ การทำให้โลหะผสมมีสมบัติสม่ำเสมอ (Homogeneity) ซึ่งอาจมีความไม่สม่ำเสมอกันทางเคมี (Chemical inhomogeneity)

ประการสอง คือ ขจัดความเค้นตึงและผลกระทบจากการขึ้นรูปเย็น (Cold work) ในโลหะที่มีรูปร่างผิดปกติ สำหรับการอบอ่อน จะช่วยลดแนวโน้มการกัดกร่อนของวัสดุและโลหะผสม

ความไม่สม่ำเสมอทางเคมีของโลหะผสมทำให้คุณสมบัติทางกลจะลดลง นอกจากนี้ยังลดความต้านทานการกัดกร่อนเช่นกัน การอบอ่อนที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นสิ่งสำคัญสำหรับความสม่ำเสมอทางเคมีของโลหะผสมโดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะของแข็ง ความเค้นตึงและการขึ้นรูปเย็น (Cold work) ในโลหะที่มีรูปร่างผิดปกติจะช่วยลดความต้านทานต่อการกัดกร่อนทั่วไป

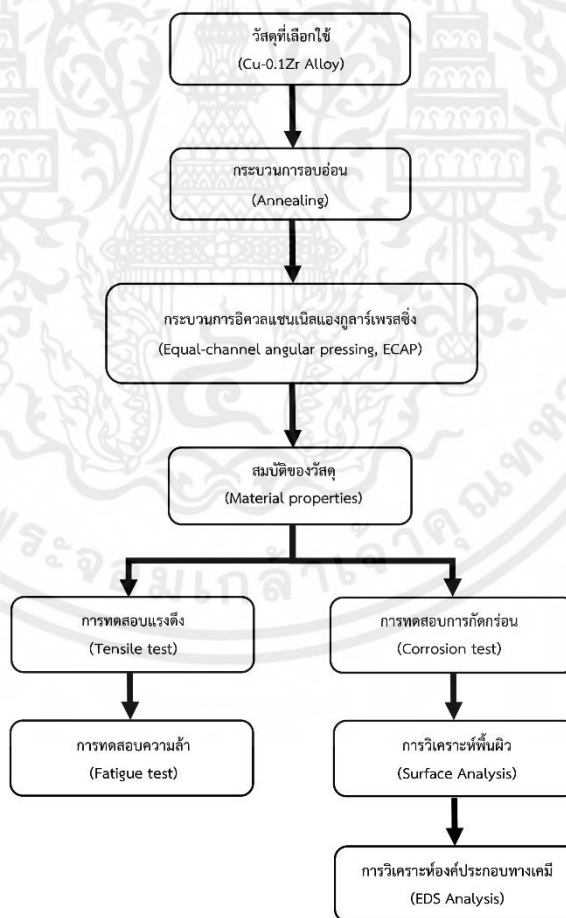
การเสีรูปจะช่วยลดความต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Dislocation ในโลหะที่เปลี่ยนรูปเย็น พื้นที่ที่มีความหนาแน่นของ Dislocation สูงมักจะถูกกัดกร่อนแบบรูพรุน บ่อยครั้งที่สิ่งเจือปนหรืออะตอมของโลหะจะเคลื่อนตัวไปยังจุดบกพร่องเหล่านี้ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของข้อบกพร่องเหล่านี้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการอบอ่อนอาจส่งผลต่อ Dislocation ที่ลดลง และการปรับปรุงที่สำคัญในด้านความต้านทานการกัดกร่อน เช่นเดียวกับที่จำเป็นต้องมีการอบอ่อนเพื่อสร้างองค์ประกอบทางเคมีที่มีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ในการอบอ่อนมีแนวโน้มที่จะสร้างโครงสร้างผลึกที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยมีข้อบกพร่องน้อยลงซึ่งนำไปสู่การกัดกร่อนที่ลดลง

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงาน เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ มีขั้นตอนการดำเนินงานสำหรับการเตรียมวัสดุดังต่อไปนี้

สำหรับการทดสอบหาสมบัติของวัสดุทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง โดยเริ่มต้นจากการเตรียมชิ้นทดสอบทองแดงเซอร์โคเนียม Cu-0.1Zr ให้อยู่ในขนาดที่เหมาะสมแล้วนำไปผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง จากนั้นจึงทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งโครงการวิจัยเลือกการทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ การทดสอบพฤติกรรมการล้าตามแนวแกนของวัสดุใน (Axial load fatigue testing) และการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุด้วยวิธี Polarization ซึ่งแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 3.1 โดยรายละเอียดการทดลองจะถูกกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง

ในการทดสอบใช้ชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดง (C151 alloy) มีส่วนผสมโดยน้ำหนักเท่ากับ Cu-0.1%wt. Zr ในรูปของแผ่นเพลทความหนา 15 มม. มากถึงเป็นแท่งรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm และมีความยาว 70 mm จากนั้นนำไปอบอ่อน (Anneal) ที่อุณหภูมิ 973 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งวัดขนาดของเกรนเฉลี่ยได้ประมาณ  $30 \mu\text{m}$  และมีค่าความแข็ง 60 HV

ชิ้นทดสอบผ่านการอบอ่อนถูกนำมาผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งครบ 8 รอบ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีมุมตายภายใน ( $\Phi$ ) 110 องศา และมุมโค้งด้านนอก ( $\Psi$ ) 20 องศา ซึ่งทำให้เกิดความเครียดในการเสียรูป 0.8 ต่อรอบ โดยความเครียดสูงสุดเมื่อครบ 8 รอบเท่ากับ 6.4 ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เส้นทาง Bc โดยทำการหมุนชิ้นทดสอบในแนวตามยาว 90 องศาในทิศทางเดียวกันระหว่างแต่ละรอบที่ขึ้นรูป รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นทดสอบอบอ่อนและชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งจำนวน 1 2 และ 8 รอบ



รูปที่ 3.2 ชิ้นทดสอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง

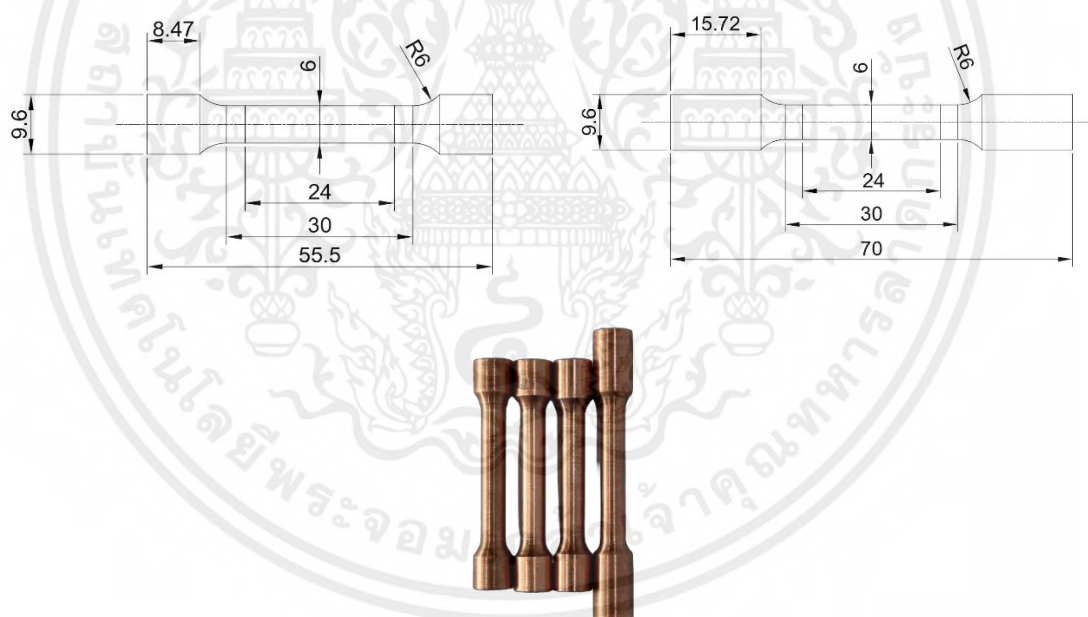
(a) ชิ้นทดสอบอบอ่อน และ (b, c และ d) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งที่จำนวน 1 2 และ 8 รอบ ตามลำดับ

## 3.2 การทดสอบความล้า (Fatigue test)

ขั้นทดสอบก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งนำมาทดสอบความล้าเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความล้า การทดสอบพฤติกรรมความล้าตามแนวแกนของวัสดุ (Axial load fatigue testing) จำเป็นต้องทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง เพื่อใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบความล้า

### 3.2.1 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ

ทำการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบโดยขนาดของขั้นทดสอบแรงดึง (Tensile test) อ้างอิงตามมาตรฐานสำหรับชิ้นโลหะทดสอบแรงดึง ASTM standard E8 โดยวัสดุที่ใช้ ในงานวิจัยนี้เป็นโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งที่มีลักษณะเป็นแท่งตามมาตรฐาน ASTM E466-15 ดังรูปที่ 3.3 โดยทำการทดสอบแรงดึงที่ความเร็ว 10 mm/min ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X ดังรูปที่ 3.4



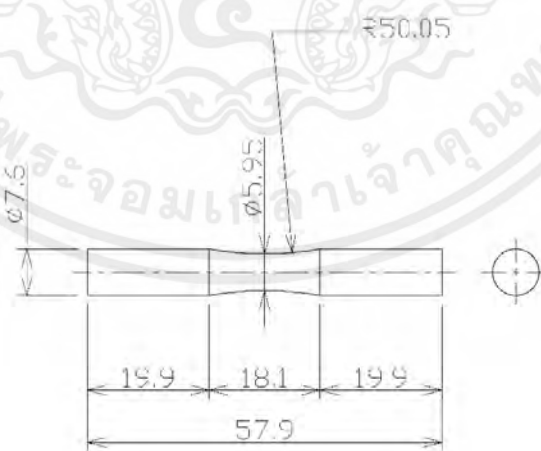
รูปที่ 3.3 แสดงแบบชิ้นทดสอบสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM standards E8



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X

### 3.2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบความล้า

จากมาตรฐานการทดสอบความล้าในแนวแกน ASTM E466 [32] ชิ้นทดสอบที่มีโค้งรัศมีต่อเนื่องระหว่างจุดปลายใช้สำหรับการทดสอบความล้า โดยใช้เครื่อง CNC เพื่อควบคุมระบบหล่อเย็น แท่งโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแลนเนลแอนกูลาร์เพรสซิ่ง ซึ่งผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ขั้นตอนเหลือ 8 mm ต่อมาเจียร 0.1 mm รอบส่วนของความยาวเกจออกเรื่อย ๆ เพื่อให้ได้ซึ่งรูปร่างที่ต้องการคือโค้งรัศมีต่อเนื่องมีขนาดรัศมี 48 mm โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดที่ 6 mm จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1500 จนมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ 1  $\mu\text{m}$  รูปที่ 3.5 แสดงขนาดและตัวอย่างชิ้นทดสอบความล้า



รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบความล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การกำหนดความเค้นสูงสุด และความถี่สำหรับการทดสอบความล้า

จากสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบมีความเค้น ณ จุดครากที่ 300 MPa และ 420 MPa ตามลำดับ เนื่องจากเงื่อนไขในการทดลองต้องการศึกษาพฤติกรรมความล้าในรูปแบบ HCF (High cycle fatigue) จึงเลือกความเค้นสำหรับการทดสอบที่มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้น ณ จุดคราก โดยกำหนดให้จำนวนรอบทดสอบหากเกิน  $2 \times 10^6$  รอบถือว่าถึงขีดจำกัดความล้า (Fatigue limit) ของวัสดุและดำเนินการภายใต้มาตรฐานการทดสอบความล้าแบบตามแนวแกนที่ขนาดของความเค้นคงที่ของชิ้นทดสอบโลหะ E466-15

การกำหนดความเค้นสูงสุดของการทดสอบความล้าสำหรับชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง เริ่มทดสอบความเค้นสูงสุดที่ 80% ของความเค้น ณ จุดคราก และกำหนดความเค้นสูงสุดสำหรับการทดสอบครั้งต่อไปลดลงประมาณที่ละ 20 MPa ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แนวโน้มของผลการทดสอบก่อนหน้า

การกำหนดความถี่สำหรับการทดสอบความล้าสามารถกำหนดได้จากการทดลองการกำหนดความถี่จากโปรแกรมก่อนการทดสอบความล้าโดยเริ่มทดลองที่ 1 Hz และทดลองเพิ่มขึ้นที่ 1 Hz พบว่าหากความถี่โหลดเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 Hz จะส่งผลให้แอมพลิจูดความเค้นมีค่าคลาดเคลื่อนจากที่กำหนด  $\pm 20$  MPa ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่มาก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความถี่ที่ 5 Hz ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดที่ทำให้โหลดมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

### 3.2.4 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบความล้า (Fatigue test)

การทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E466-15 ด้วยเครื่องทดสอบความล้ารุ่น Instron : 8802 ดังรูปที่ 3.6 การทดสอบความล้าจะได้เส้นโค้ง S-N ในรูปไซนูซอยดอล ที่ความถี่ 5 Hz อัตราส่วนภาระความเค้น  $R = 0.1$  อุณหภูมิ  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ที่  $70 \pm 5\%$  โดยอายุการใช้งานของชิ้นทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนรอบที่ความเค้นกระทำก่อนวัสดุแตกหัก อย่างไรก็ตามหากชิ้นทดสอบไม่เสียหายหลังจาก  $2 \times 10^6$  รอบ ถือว่าวัสดุไม่มีการแตกหัก



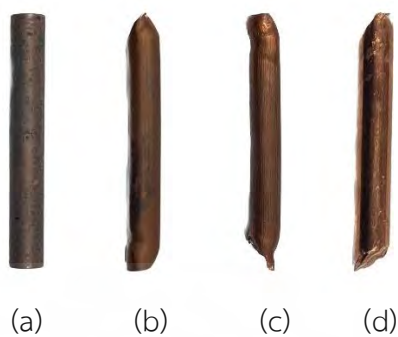
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความล้าระบบไฮดรอลิค Instron : 8802

### 3.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion test)

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนถูกดำเนินการเพื่อศึกษาผลของกระบวนการอีควอลแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง (Equal-channel angular pressing, ECAP) ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมโดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าและกราฟโพลาริเซชัน ซึ่งจะถูกใช้เพื่อแสดงสมบัติการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบบอบอ่อนเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอีควอลแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งจำนวน 1 2 และ 8 รอบ (รูปที่ 3.7) โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบดังนี้

- 1) นำชิ้นทดสอบบอบอ่อนและชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอีควอลแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง มาตัดตามขวางด้วยเครื่องตัดละเอียด ยี่ห้อ Struers รุ่น Accutom-50 (รูปที่ 3.8) จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าความเครียดพลาสติก (Equivalent plastic strain) มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) บริเวณตรงกลางความยาว 40 mm ตามแนวแกน [5] ฉะนั้นจึงเริ่มตัดชิ้นทดสอบจากตรงกลางชิ้นทดสอบไปด้านซ้ายและขวาเป็นระยะ 20 mm โดยมีความหนาแต่ละชิ้นทดสอบ 5 mm (รูปที่ 3.9) จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 3.7 ชิ้นทดสอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง  
(a) ชิ้นทดสอบบอบอ่อน และ (b, c และ d) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง  
ที่จำนวน 1 2 และ 8 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 เครื่องตัดละเอียด ยี่ห้อ Struers รุ่น Accutom-50



รูปที่ 3.9 แบบชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

- 2) นำชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดละเอียดมาขัดผิวชิ้นทดสอบด้วยเครื่องขัดผิวแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น MetaServ 250 โดยขัดเพียงด้านเดียว ซึ่งจะขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 180, 400, 800, 1200 และ 2500 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 เครื่องขัดผิวชิ้นทดสอบแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น MetaServ 250

- 3) นำไปล้างด้วยเอทานอลและเป่าด้วยลมให้แห้ง ก่อนที่จะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูลักษณะผิวเบื้องต้นของชิ้นทดสอบว่าเรียงตามที่ต้องการหรือไม่
- 4) เมื่อทำการขัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 2500 จากนั้นทำการขัดละเอียดบนผ้าสักกะหลาดด้วย diamond polishing paste ขนาด 6 และผงอะลูมินา 1  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์สำหรับการ polishing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เมื่อขัดขั้นทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำขั้นทดสอบไปส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูผิวขั้นทดสอบในแต่ละเงื่อนไข ที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอิควลแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง เพื่อดูว่าผิวมีความเรียบพอที่จะนำไปทดสอบการกัดกร่อนหรือไม่

ในการทดสอบการกัดกร่อนของขั้นทดสอบก่อนและหลังกระบวนการอิควลแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง จะนำไปทดสอบกับเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat/Galvanostat) รุ่น PGSTAT302N ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นเครื่องที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี โดยการใช้งานของเครื่องนั้น เริ่มจากเครื่องจะบ่อนกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้นทดสอบ เพื่อเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า จากนั้นจะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น นำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนและค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.12 แสดงชุดเครื่องมือทดสอบการกัดกร่อน AUTOLAB รุ่น PGSTAT302N

### 3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

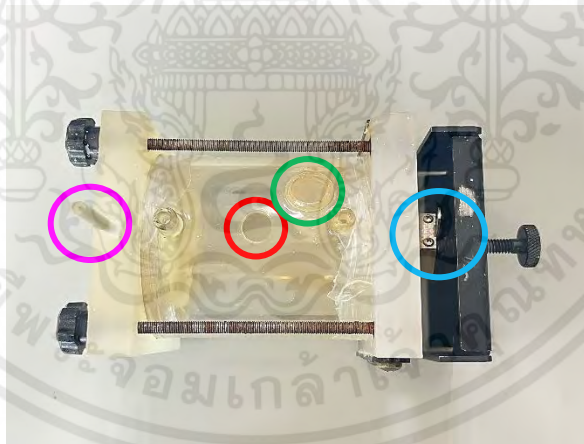
ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) 3.5% โดยการผสมเกลือเคมี 35 กรัม ลงในน้ำปริมาณ 1000 มิลลิลิตร โดยน้ำที่ใช้จะมีการผ่านกระบวนการผลิตจากระบบ Reverse Osmosis (RO)



รูปที่ 3.13 การชั่งตวงเกลือเคมี 35 กรัม สำหรับเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5%

- 2) จากรูปที่ 3.14 นำโอรังใส่ลงตรงบริเวณวงกลมสีฟ้า จากนั้นวางชิ้นทดสอบบนโอรังอีกรอบหนึ่ง แล้วทำการหมุนเกลียวลงมาปิดชิ้นทดสอบให้แน่นพอสมควร เพื่อไม่ให้ชิ้นทดสอบเลื่อนจากตำแหน่งเดิมขณะทำการทดสอบ และป้องกันไม่ให้สารละลายซึมออกมาด้วย
- 3) วาง Flat Cell Kit ลงแนวนอน โดยจากรูปที่ 3.14 บริเวณวงกลมสีเขียวเราจะทำการค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทีละน้อยไปก่อนเพื่อไล่อากาศของท่อด้านใน และบริเวณวงกลมสีแดงจะทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ลงไปให้เกือบเต็มหรือให้โดนผิวชิ้นทดสอบทั่วทั้งผิว



รูปที่ 3.14 Flat Cell Kit

- 4) จากนั้นทำการหนีบขั้วเซลล์เคมีไฟฟ้า ตามในรูปที่ 3.14 โดยบริเวณวงกลมสีเขียวจะนำขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ชนิด SCE ใส่ลงในช่องที่เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ลงไปทีแรกซึ่งจะสัมผัสกับสารละลายจากนั้นหนีบขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) บริเวณวงกลมสีฟ้าที่เชื่อมกับขั้วทดสอบโดยตรง ส่วนขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) หนีบกับเสาบริเวณวงกลมสีม่วง
- 5) กดปุ่ม CELL ON ที่ตัวเครื่อง AUTOLAB จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นมา 1 ค่า ซึ่งเป็นค่า voltage ในขณะที่กระแสไฟฟ้าของเครื่องเป็นศูนย์อยู่ หรือเรียกกันว่าค่า OCP ( Open-circuit potential) ซึ่งสารละลายเริ่มทำปฏิกิริยากับขั้วทดสอบแล้ว
- 6) ทำการป้อนค่าหรือตัวแปรลงในคอมพิวเตอร์ โดยค่าที่เราป้อนลงไปนั้นคือ เวลา OCP และช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าตามความเหมาะสม ซึ่งเวลาที่ป้อนคือ 60 วินาที ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าจะอิงตามค่าที่ได้จากเครื่อง AUTOLAB ในตอนแรก ซึ่งใช้ช่วง -0.5 ถึง 0.75 โวลต์ และป้อนค่า scan rate อยู่ที่ 0.0033 โวลต์ต่อวินาที
- 7) จากนั้นกด start ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ เพื่อเริ่มดำเนินการของกราฟผลการทดสอบ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าก็จะเริ่มกระบวนการตามค่าที่เราป้อนเข้าไป
- 8) ได้กราฟโพลาริเซชันออกมาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ NOVA เวอร์ชัน 1.11.2 ซึ่งจะได้กราฟ 2 แบบ คือ Linear scale และ Logarithmic scale

เมื่อทำการทดสอบการกัดกร่อนเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะได้ผลการทดสอบที่เป็นกราฟโพลาริเซชันในรูปแบบของ Linear scale และ Logarithmic scale โดยจะนำกราฟ Logarithmic scale มาประเมินนอกช่วงทาเฟล (Tafel) เพื่อให้ได้ค่าสำคัญต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณ รวมถึงการวิเคราะห์ผลในบทถัดไป

## บทที่ 4

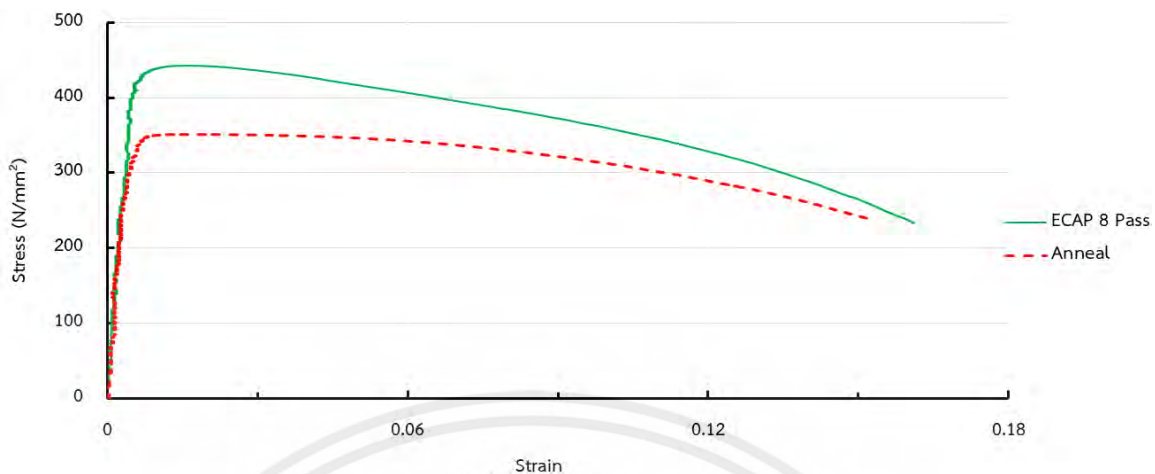
# ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 4.1 ผลการทดสอบความล้า (Fatigue test)

สำหรับการทดสอบพฤติกรรมความล้าตามแนวแกนของวัสดุ (Axial load fatigue testing) จำเป็นต้องทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง เนื่องจากการทดสอบความล้าจำเป็นต้องใช้สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

#### 4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุมาใช้ในการกำหนดความเค้นสำหรับการทดสอบความล้า ความเร็วการดึงในการทดสอบเท่ากับ 10 mm/min ทำการทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด พบว่าวัสดุแสดงพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงดึงที่มากกระทำตามรูปแบบวัสดุเหนียว เนื่องจากมีช่วงการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) ที่เห็นได้ชัดก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 สมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบจะแสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elastic) ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress, 0.2% offset) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของ  
ชิ้นทดสอบทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบเมื่อผ่านการทดสอบการดึง

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมจากการทดสอบแรงดึง

Properties	Alloy	
	Annealed	ECAP 8 passed
Modulus of elasticity (GPa)	100	77.5
Yield stress (MPa)	300	420
Ultimate tensile strength (MPa)	352	443
Elongation (%)	19.2	18.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การทดสอบความล้าของวัสดุ

ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงเงื่อนไขและผลการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบบอบอ่อนก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซึ่งตามลำดับ การทดสอบความล้าได้ดำเนินการทดสอบความล้าแบบดิ่ง-ดิ่ง อัตราส่วนความเค้น  $R = 0.1$  ที่ความถี่ 5 Hz ผลการทดลองที่ได้นำมาสร้างเส้นโค้ง S-N เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้ความล้า

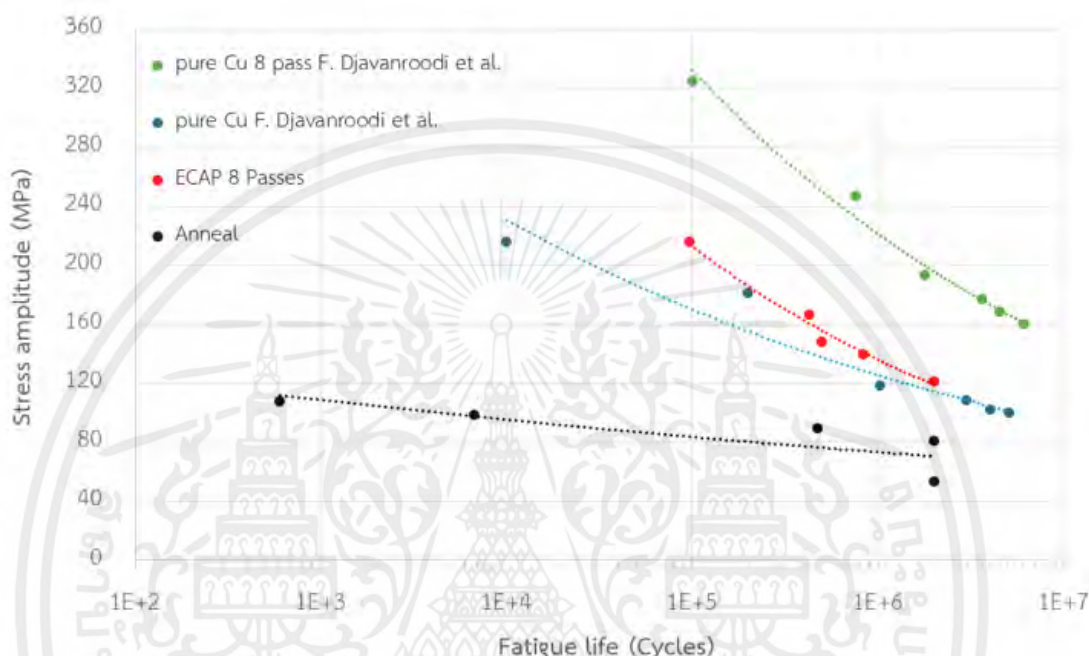
ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขและจำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบทองแดง เซอร์โคเนียมก่อนผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซึ่ง

ชิ้นทดสอบ	ความเค้นสูงสุด (MPa)	ความเค้นต่ำสุด (MPa)	แอมพลิจูดความเค้น (MPa)	ความเค้นเฉลี่ย (MPa)	จำนวนรอบ (Cycles)
Anneal 1	240	24	108	132	604
Anneal 2	220	22	99	121	6,657
Anneal 3	200	20	90	110	470,173
Anneal 4	180	18	81	99	2,000,000
Anneal 5	120	12	54	66	2,000,000

ตารางที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขและจำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบทองแดง เซอร์โคเนียมหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลเองกูลาร์เพรสซึ่ง 8 รอบ

ชิ้นทดสอบ	ความเค้นสูงสุด (MPa)	ความเค้นต่ำสุด (MPa)	แอมพลิจูดความเค้น (MPa)	ความเค้นเฉลี่ย (MPa)	จำนวนรอบ (Cycles)
ECAP 1	480	48	216	264	97,176
ECAP 2	370	37	166.5	203.5	424,040
ECAP 3	330	33	148.5	181.5	498,129
ECAP 4	310	31	139.5	170.5	833,876
ECAP 5	270	27	121.5	148.5	2,000,000

จากผลการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบบออ่อนก่อนและหลังผ่านกระบวนการอีควลแซนเนิล แองกูลาร์เพรสซึ่ง นำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดสอบความล้าในรูปของเส้นโค้ง S-N และเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อดูแนวโน้มความถูกต้องของชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ได้ผลลัพธ์เป็นไปตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง S-N

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง S-N พบว่าพฤติกรรมความล้าของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอีควลแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่งแสดงพฤติกรรมความล้าทั่วไป คืออายุการใช้งานของวัสดุ (Fatigue life) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเค้นที่กระทำกับวัสดุมีค่าลดลง และจากลักษณะของกราฟผลการทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการ ECAP ไม่พบ Endurance limit ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาของงานวิจัยของ Djavanroodi et al. [31] ที่กล่าวว่า โลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม จัดเป็นวัสดุที่ไม่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ (Nonferrous Material) พบว่า S-N Curve จะลดลงเรื่อย ๆ โดยไม่เข้าสู่แนวระดับ ดังนั้นวัสดุประเภทนี้จึงไม่มีค่า Fatigue Limit ที่แท้จริง และสามารถเปรียบเทียบความแข็งแรงการล้าของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการ ECAP ได้จากเส้นโค้ง S-N ที่จำนวนรอบ  $10^5$  รอบ พบว่าชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมบออ่อนก่อนและหลังผ่าน ECAP มีค่าแอมพลิจูดความเค้นประมาณ 84 MPa และ 216 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังผ่านกระบวนการ

ECAP โลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมมีค่าความแข็งแรงการล้าที่จำนวนรอบ  $10^5$  รอบเพิ่มขึ้น 1.57 เท่า เมื่อเทียบกับขึ้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP

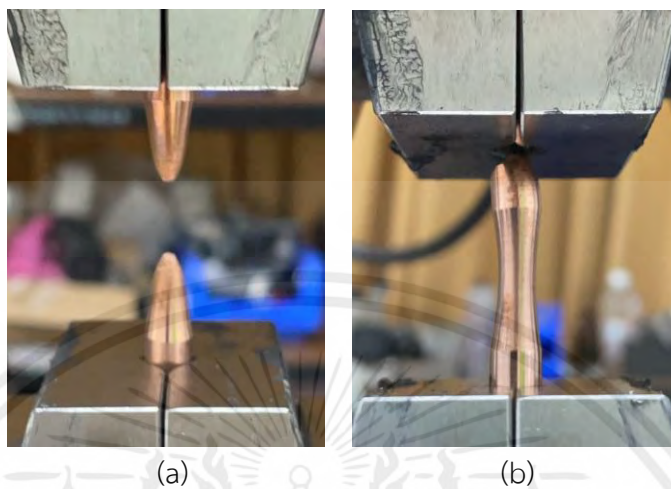
เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้ง S-N ของขึ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการ ECAP ซึ่งดำเนินการทดสอบที่ภาระความเค้นเท่ากับ 0.1 กับเส้นโค้ง S-N ของโลหะทองแดงที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการ ECAP จากงานวิจัยของ Djavanroodi et al. [31] ซึ่งดำเนินการทดสอบที่ภาระความเค้นเท่ากับ -1 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะพบว่าอัตราส่วนภาระความเค้นมีค่าเป็นบวกมากขึ้นจะทำให้เส้นโค้ง S-N ชยับลงมาเรื่อย ๆ ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุมีอายุสั้นลง เนื่องจากความเค้นเฉื่อยส่งผลต่อพฤติกรรมความล้า และขึ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ECAP มีค่าความแข็งแรงการล้าที่จำนวนรอบ  $10^5$  รอบเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับขึ้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP

#### อุปสรรคและแนวทางปฏิบัติ

จากผลการทดสอบเบื้องต้น ทำให้ทราบถึงปัญหาและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบสาเหตุที่ทำให้การทดสอบความล้าเกิดความล่าช้ามีหลายปัจจัย ได้แก่ ทางผู้วิจัยต้องทำการทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลในการกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดสอบความล้า และทำการทดสอบแรงจับของเครื่องทดสอบความล้าเพื่อหาแรงจับขึ้นทดสอบที่เหมาะสม รวมถึงการทดสอบหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความล้าอีกด้วย อีกปัจจัยหนึ่งคือระยะเวลาในการทดสอบความล้าแต่ละขั้นต้องใช้เวลาานาน

ข้อผิดพลาดในระหว่างการทดสอบคือ การทดสอบขึ้นทดสอบ Anneal 4 ที่ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 180 MPa ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทดสอบขึ้นทดสอบที่ความเค้นสูงสุด 240 220 และ 120 MPa โดยจากผลการทดสอบมีแนวโน้มที่ทำให้คาดว่าขึ้นทดสอบ Anneal 4 ที่ทดสอบด้วยความเค้นสูงสุด 180 MPa มีโอกาสที่ขึ้นทดสอบจะขาดก่อนจำนวนรอบเกิน  $2 \times 10^6$  รอบ ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดความทนทานที่กำหนดไว้ แต่เมื่อทดสอบแล้วพบว่าขึ้นทดสอบขาดที่จำนวนรอบเท่ากับ 4,039,791 รอบ ซึ่งเกินกว่าค่าขีดจำกัดความทนทานที่กำหนดไว้ และขึ้นทดสอบขาดที่บริเวณที่จับขึ้นทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (b) จากการตรวจสอบ พบว่าแรงจับขึ้นทดสอบของเครื่องทดสอบไฮดรอลิกที่มีแรงจับขึ้นทดสอบเท่ากับ 120 bar จับขึ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมในบริเวณปลายขึ้นทดสอบ ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดร่องลึกบริเวณที่จับขึ้นทดสอบ ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างบริเวณร่องลึก ความเค้นที่ทดสอบจึงกระทำกับพื้นที่บริเวณร่องลึกแทนระยะช่วงทดสอบ โดยมักเกิดกับขึ้นทดสอบที่

จำนวนรอบสูง ส่งผลให้ในการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบ Anneal 4 ใช้ระยะทั้งสิ้นรวม 14 วัน ทำให้การทดสอบเกิดความล่าช้า



รูปที่ 4.4 ลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP

(a) เกิดการขาดบนระยะทดสอบ (b) เกิดการขาดบริเวณที่จับชิ้นทดสอบ

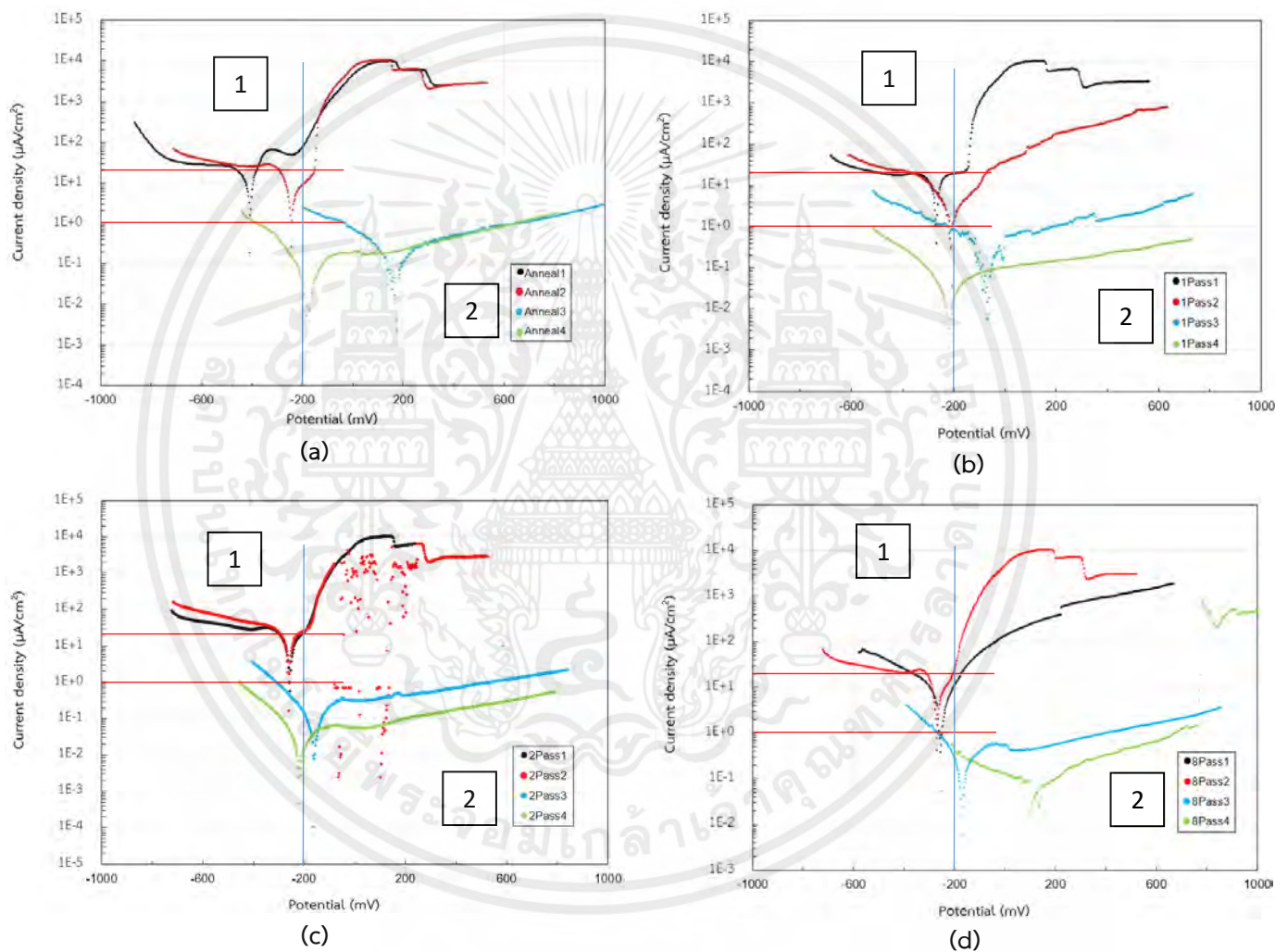
## 4.2 การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion test)

### 4.2.1 กราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve)

การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม (Cu-Zr) โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ผลจากกราฟโพลาริเซชัน เพื่อแสดงลักษณะคุณสมบัติการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl 3.5%) โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดสอบชิ้นทดสอบก่อนและหลังกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่งในแต่ละจำนวนรอบที่แตกต่างกันจากกราฟโพลาริเซชัน

กราฟโพลาริเซชันแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl 3.5%) ที่อุณหภูมิห้อง และค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกสถานะความช้า-เร็วของการเกิดการกัดกร่อน โดยหากวัสดุมีค่า  $E_{corr}$  มากบ่งบอกถึงวัสดุนั้นจะเกิดการกัดกร่อนช้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) บ่งบอกถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกผลิตในเซลล์เคมีไฟฟ้า ขณะที่เกิดการกัดกร่อน ค่าความชันเส้นกราฟ แอนโนดิก ( $b_a$ ) ค่าความชันเส้นกราฟแคโทดิก ( $b_c$ ) ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน ( $R_p$ ) และอัตราการกัดกร่อน ( $CR$ ) ของแต่ละชิ้นทดสอบ

การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์เนียมใน 1 ชุดจะประกอบด้วย 4 เงื่อนไข ได้แก่ ชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลต์แอโนดิกเพอร์ซิง และผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลต์แอโนดิกเพอร์ซิง 1 , 2 และ 8 รอบ โดยทดสอบทั้งหมด 4 ชุดทดสอบ เพื่อดูแนวโน้มและจัดกลุ่มชุดข้อมูลที่น่าเชื่อถือด้วยการวิเคราะห์ชุดข้อมูลจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) ตามลำดับ

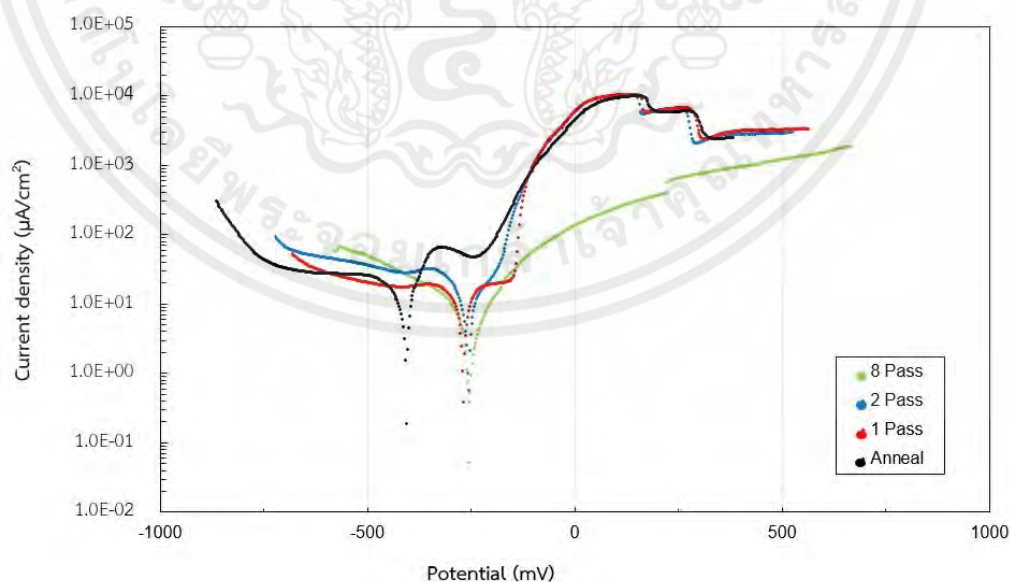


รูปที่ 4.5 กราฟโพลาร์ไรเซชันจากผลการทดสอบการกัดกร่อนทั้ง 4 ชุด (a) ชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการ ECAP (b, c และ d) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 1, 2 และ 8 รอบตามลำดับ

การเลือกกลุ่มกราฟผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ค่า  $E_{corr}$  และ  $i_{corr}$  จากรูปที่ 4.5 (a) และ (d) จะพบว่าค่า  $E_{corr}$  ของชิ้นทดสอบมีกลุ่มข้อมูลทั้งหมด 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 มีค่า  $E_{corr}$  น้อยกว่า -200 mV ได้แก่ ชุดทดสอบที่ 1 และ 2 , กลุ่มที่ 2 มีค่า  $E_{corr}$  มากกว่า -200 mV ได้แก่ ชุดทดสอบที่ 3

และ 4 ส่วนรูปที่ 4.5 (b) และ (c) พบค่า  $E_{corr}$  ของชิ้นทดสอบมีกลุ่มข้อมูลทั้งหมด 2 กลุ่มเช่นกัน โดยกลุ่มที่ 1 มีค่า  $E_{corr}$  น้อยกว่า  $-200$  mV ได้แก่ ชุดทดสอบที่ 1, 2 และ 4, กลุ่มที่ 2 มีค่า  $E_{corr}$  มากกว่า  $-200$  mV ได้แก่ ชุดทดสอบที่ 3 ซึ่งกลุ่มที่ 1 มีความใกล้เคียงกันของกลุ่มข้อมูลมากกว่ากลุ่มที่ 2 ที่มีความกระจายของข้อมูล เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่า  $i_{corr}$  จากรูปที่ 4.5 (a), (b), (c) และ (d) จะพบกลุ่มข้อมูลทั้งหมด 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 มีค่า  $i_{corr}$  อยู่ในช่วง  $1-11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ได้แก่ ชุดทดสอบที่ 1 และ 2 และค่า  $i_{corr}$  ของกลุ่มที่ 2 ได้แก่ ชุดทดสอบที่ 3 และ 4 มีความกระจายของข้อมูลมาก ดังนั้นกลุ่มข้อมูลที่ 1 มีความแม่นยำกว่ากลุ่มข้อมูลที่ 2 พิจารณาผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะทองแดงเซอร์เนียมระหว่างชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าที่กราฟโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการ ECAP 2 รอบในชุดทดสอบที่ 2 มีความผิดพลาดของการทดสอบหลังจากผ่านช่วงการกัดกร่อน (Uniform corrosion) แล้ว เนื่องจากมีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไหลซึมออกมาที่ผิวชิ้นทดสอบทำให้เกิดการกระจายของข้อมูล ดังนั้นเพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลผลการทดสอบจึงเลือกชุดการทดสอบที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์ค่าสำคัญในศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน

สร้างกราฟเส้นโค้งโพลาริเซชันของชุดทดสอบที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบค่า  $E_{corr}$  ดังรูปที่ 4.6 จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแลนซ์แอนนูลาร์เพรสซึ่งจะมีค่า  $E_{corr}$  น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่า  $E_{corr}$  ของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแลนซ์แอนนูลาร์เพรสซึ่ง ซึ่งหมายถึงชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแลนซ์แอนนูลาร์เพรสซึ่งจะเกิดการกัดกร่อนช้ากว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแลนซ์แอนนูลาร์เพรสซึ่ง

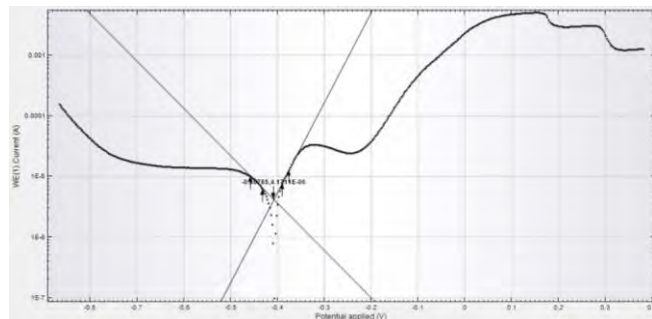


รูปที่ 4.6 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบในแต่ละเงื่อนไขในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5%

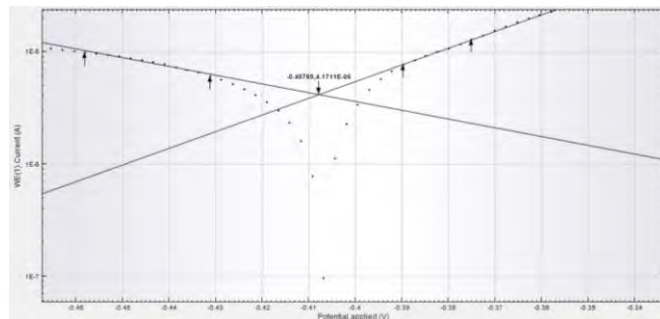
#### 4.2.2 วิเคราะห์ค่าสำคัญจากกราฟโพลาไรเซชัน (Polarization curve)

ค่าสำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟโพลาไรเซชันประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ), ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ), ค่าความชันเส้นกราฟแอนอดิก ( $b_a$ ), ค่าความชันเส้นกราฟแคโทดิก ( $b_c$ ) ซึ่งได้จากการประมาณค่านอกช่วงจากเส้นทาเฟล (Tafel extrapolation) โดยใช้โปรแกรม NOVA 1.11.2

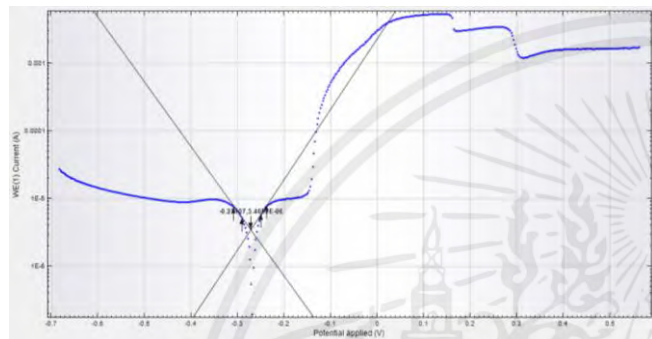
การประมาณค่านอกช่วงจากเส้นทาเฟลสามารถทำได้โดยการกำหนดตำแหน่งจุด 2 จุดบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันทั้งฝั่งเส้นโค้งแอนอดิกและเส้นโค้งแคโทดิก โดยกำหนดจุดให้อยู่ในช่วงที่มีลักษณะเป็นส่วนของเส้นตรงหลังจากช่วงกราฟรูปตัววี เมื่อกำหนดจุดเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะทำการสร้างเส้นความชันและคำนวณหาค่าของเส้นความชัน ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเส้นความชันของเส้นโค้งแคโทดิกตัดกับเส้นความชันของเส้นโค้งแอนอดิก โดยจุดตัดนี้จะแสดงถึงค่าของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบ



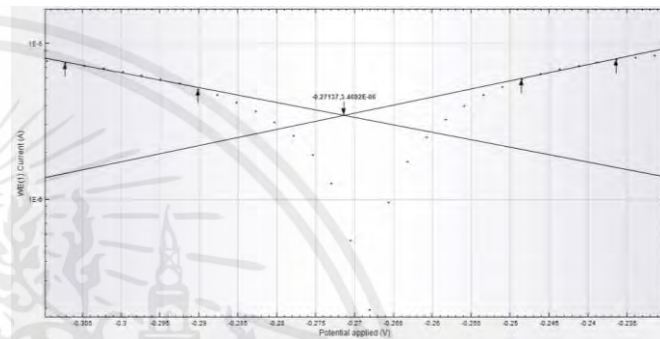
(a)



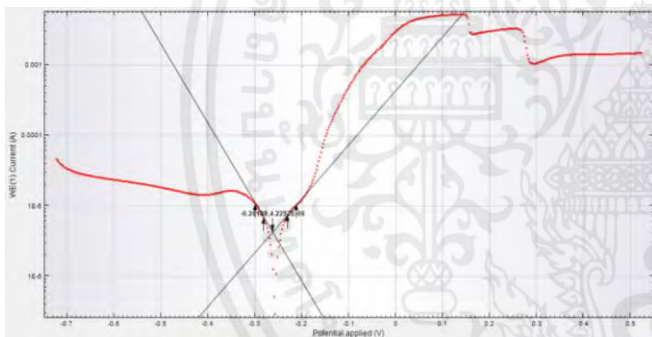
(b)



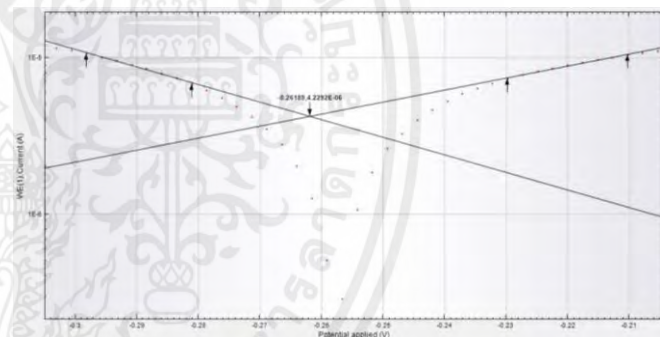
(c)



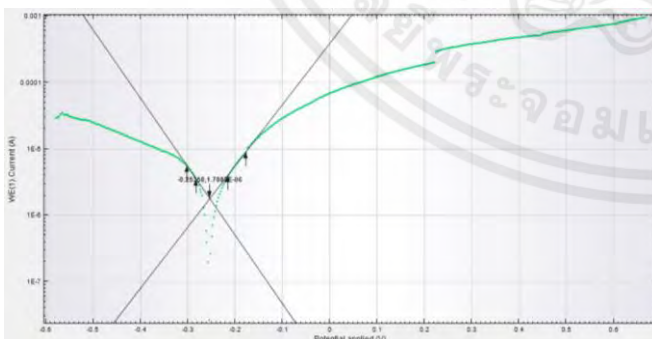
(d)



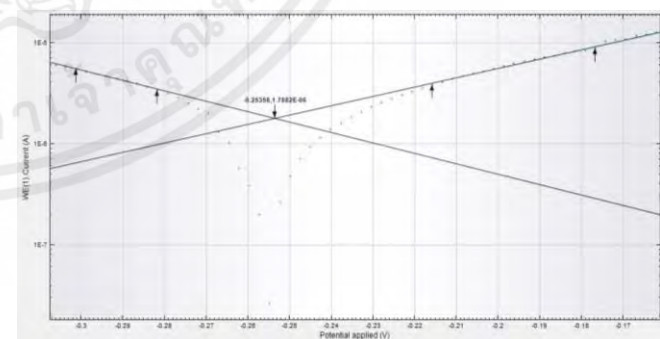
(e)



(f)



(g)



(h)

รูปที่ 4.7 เส้นโค้งโพลาริเซชันของขั้วทดสอบ (a, c, e และ g) กราฟโพลาริเซชันของขั้วทดสอบก่อนและหลังกระบวนการ 1 2 และ 8 รอบตามลำดับ (b, d, f และ h) ภาพขยายของกราฟโพลาริเซชันของขั้วทดสอบก่อนและหลังกระบวนการ 1 2 และ 8 รอบตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการกัดกร่อน และความต้านทานโพลาไรเซชันสามารถคำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความชันเส้นกราฟแอนอดิก และค่าความชันเส้นกราฟแคโทดิก ที่ได้จากการประมาณค่าออกช่วงจากเส้นทาเพลตามสมการที่ 2.5 และ 2.8 ตามลำดับ

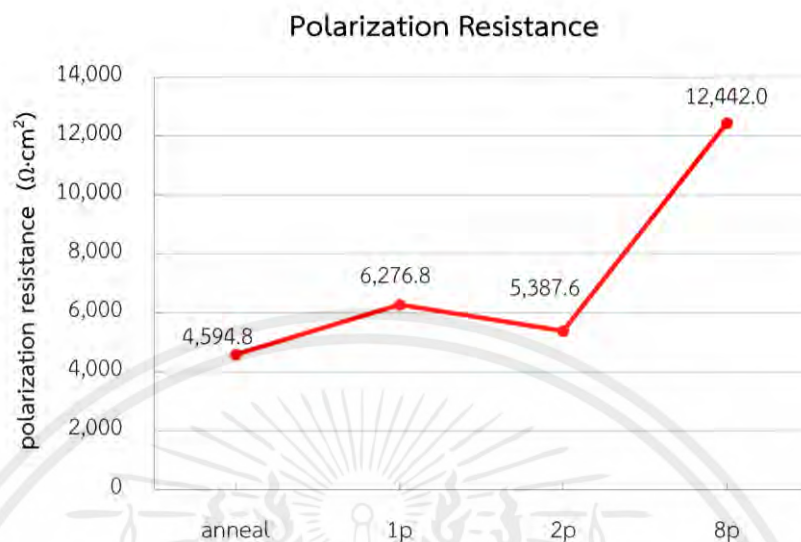
$$CR = \frac{(3.27 \times 10^{-3}) \times EW \times i_{corr}}{\rho} \quad (2.5)$$

$$R_p = \frac{(b_a \times b_c)}{(2.303 \times (b_a + b_c) \times i_{corr}} \quad (2.8)$$

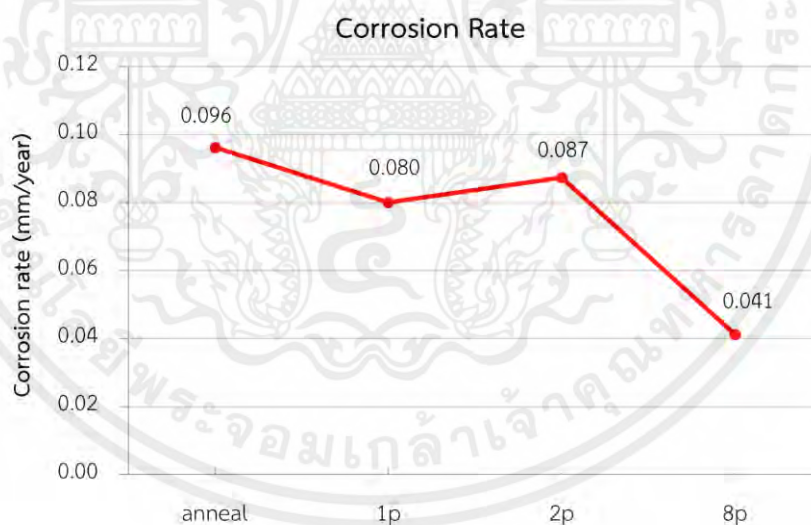
ค่าสำคัญที่ได้จากการประมาณค่าออกช่วงจากเส้นทาเพล อัตราการกัดกร่อน และค่าความต้านทานโพลาไรเซชันจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.4 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานโพลาไรเซชันกับขั้นตอนทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 2 และ 8 รอบ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับขั้นตอนทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 2 และ 8 รอบ ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าสำคัญจากเส้นโค้งโพลาไรเซชันจากผลการทดสอบกัดกร่อนขึ้นทดสอบ

condition	$b_a$ (mV/dec)	$b_c$ (mV/dec)	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	CR (mm/yr)	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )
anneal	128.1	67.3	-407.07	8.30	0.096	4,594.8
1p	96.3	104.7	-268.74	6.90	0.080	6,276.8
2p	92.5	95.5	-257.54	7.54	0.087	5,387.6
8p	97.0	108.5	-255.11	3.56	0.041	12,442.0



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานโพลาไรเซชันกับขั้นตอนทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอีควิลแลนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 2 และ 8 รอบ

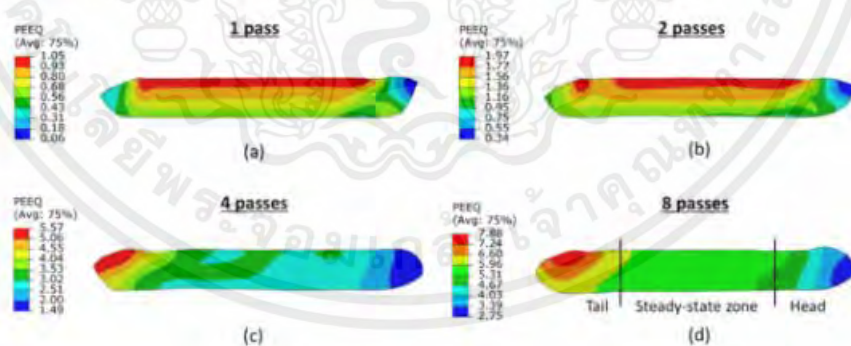


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับขั้นตอนทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอีควิลแลนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 2 และ 8 รอบ

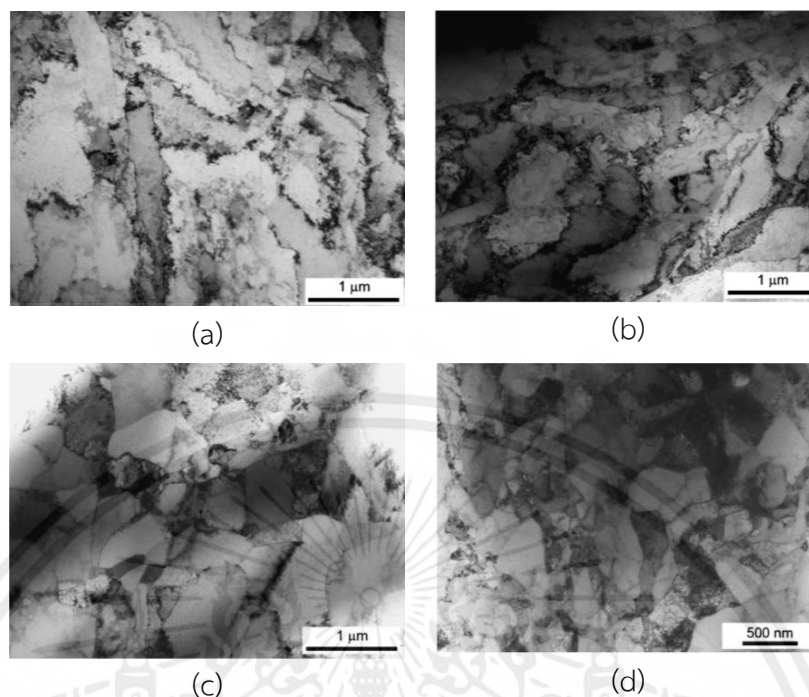
จากกราฟเส้นตรงเปรียบเทียบค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน (Polarization resistance,  $R_p$ ) กับขั้นตอนทดสอบก่อนและหลังกระบวนการอีควิลแลนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 2 และ 8 รอบ ในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่งมีค่า  $R_p$  เท่ากับ  $4594.8 \Omega \cdot cm^2$  ซึ่งเป็นค่า  $R_p$  ที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบทั้งหมด เมื่อพิจารณาชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 1 2 และ 8 รอบ พบว่าค่า  $R_p$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของกระบวนการ สำหรับชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่งที่ 2 รอบ มีค่า  $R_p$  ต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ 1 รอบ อาจมีปัจจัยของรูปร่างของเกรน และความสม่ำเสมอ (homogeneous) ของเกรนมาเกี่ยวข้อง [33] ดังรูปที่ 4.10 เมื่อวิเคราะห์ชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่งจะพบว่าความเครียดตลอดชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่งในช่วงแรกมีความไม่สม่ำเสมอ หากผ่านจำนวนรอบมากกว่า 4 รอบจะทำให้คุณสมบัติสม่ำเสมอตลอดชั้นทดสอบมากขึ้น [5] และจากผลงานวิจัยของ Wongsang-Ngarm et al. [28] พบว่าชั้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ 2 รอบ มีโครงสร้างจุลภาคคล้ายกับชั้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ 1 รอบ แต่มีโครงสร้างเกรนย่อย (Subgrains) กลับมายาวขึ้นอีกครั้ง และมีความหนาแน่นของ dislocation สูง ดังรูปที่ 4.11 ทำให้มีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 1 รอบ และมีค่า  $R_p$  น้อยกว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 1 รอบ แต่ค่า  $R_p$  ของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 2 รอบเทียบกับชั้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง พบว่าค่า  $R_p$  ของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 2 รอบมีค่ามากกว่าชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง แสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมมีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซึ่ง



รูปที่ 4.10 การกระจาย Equivalent plastic strain ตามความยาวของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP (a, b, c และ d) ชั้นทดสอบที่ผ่าน ECAP 1, 2, 4 และ 8 รอบตามลำดับ [5]



รูปที่ 4.11 TEM micrographs ชั้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ECAP (a, b, c และ d) 1, 2, 4 และ 8 รอบตามลำดับ [28]

จากกราฟเส้นตรงเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR) กับชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 1 2 และ 8 รอบ ในรูปที่ 4.9 พบว่าค่า CR ของชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่งมีค่าเท่ากับ 0.096 mm/yr ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบอื่น เมื่อพิจารณาชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 1 2 และ 8 รอบ พบว่าค่า CR มีแนวโน้มลดลงตามจำนวนรอบของกระบวนการ สำหรับชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่งที่ 2 รอบมีค่า CR มากกว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ 1 รอบ ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $R_p$  แต่เมื่อเทียบค่า CR ของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง 2 รอบกับชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการจะพบว่าค่า CR ของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ 2 รอบมีค่าต่ำกว่าค่า CR ของชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการ แสดงให้เห็นถึงอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงหลังจากผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sadawy et al. [29] ที่กล่าวว่าเมื่อชั้นทดสอบถูกนำไปผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่งที่จำนวนครั้งที่มากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะมีค่าสูงขึ้น ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าลดลง มีอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงและมีความต้านทานการกัดกร่อนมากขึ้น เมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่ไม่

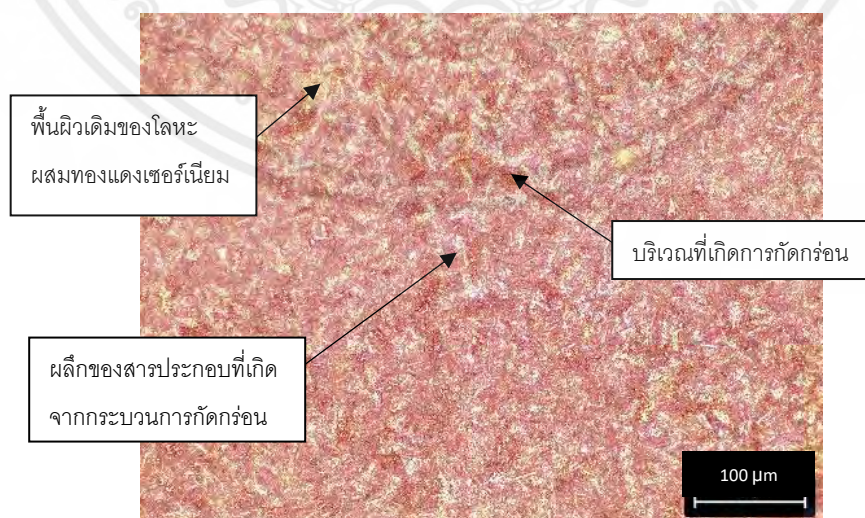
ผ่านกระบวนการ เนื่องจากขนาดของเกรนมีขนาดเล็กและละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย

ความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ตามสมการที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงขนาดเกรนที่เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เมื่อขนาดเกรนที่ลดลงจะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น และจากผลการทดสอบทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงสมบัติของวัสดุที่ดีขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการ อีควิลแลนเนลเอนกูลาร์เพรสซึ่งที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการอีควิลแลนเนลเอนกูลาร์เพรสซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ขนาดเกรนของวัสดุมีขนาดเล็กและละเอียดขึ้น

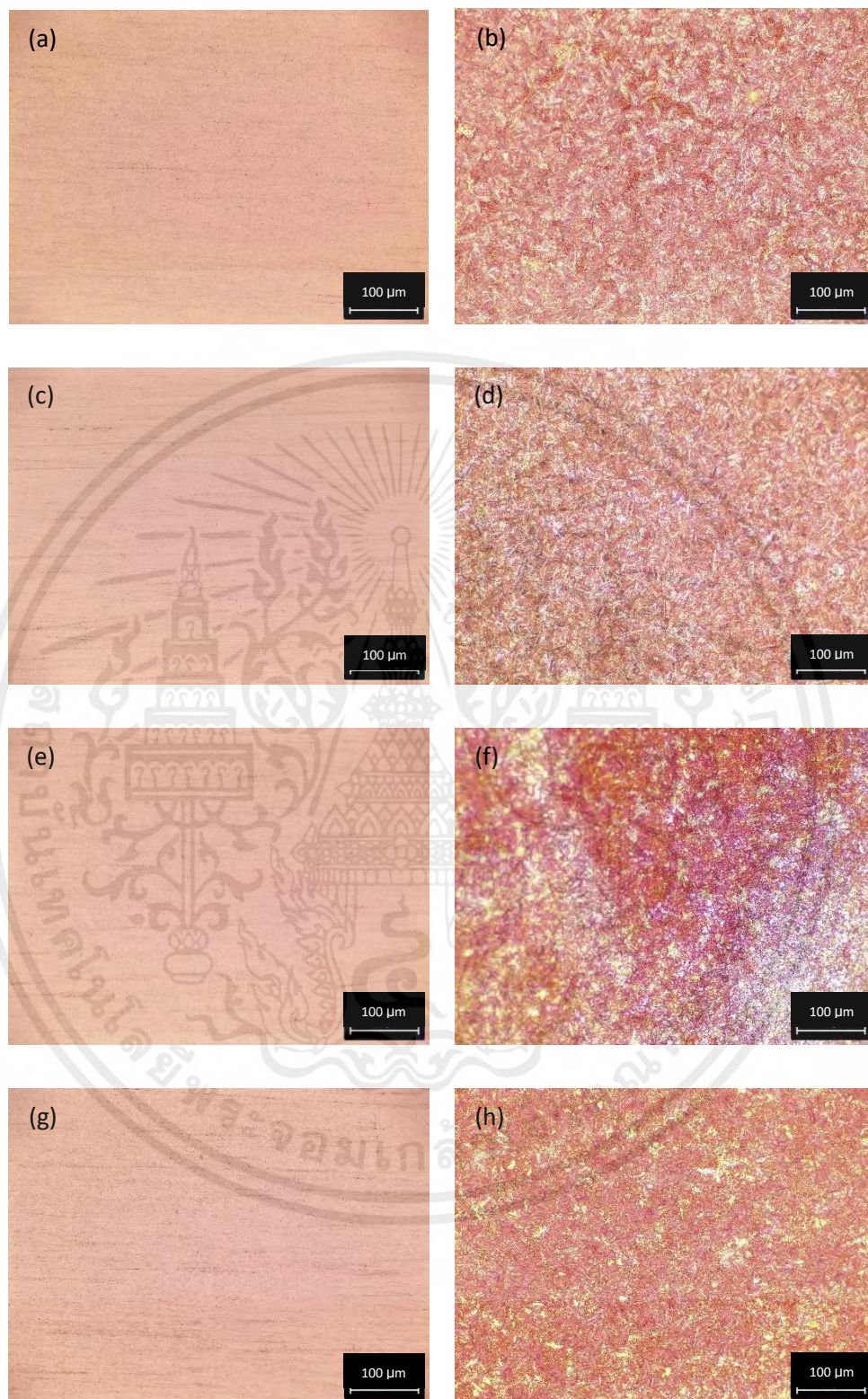
#### 4.2.3 วิเคราะห์พื้นผิวขั้นทดสอบก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นทดสอบก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของพื้นผิวทั้งก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน โดยการวิเคราะห์ผ่านภาพถ่ายพื้นผิวจากการบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 200 เท่า

จากรูปที่ 4.13 พบว่าพื้นผิวขั้นทดสอบก่อนการทดสอบการกัดกร่อนมีความเรียบ และมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวขั้นทดสอบหลังการทดสอบการกัดกร่อนที่พบว่าพื้นผิวมีความหยาบ และมีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยกว่าพื้นผิวขั้นทดสอบก่อนการทดสอบอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบสีของพื้นผิว พบว่าสีของพื้นผิวหลังการทดสอบเปลี่ยนไป โดยจะมีสีพื้นผิวเดิม คือ สีเหลืองทองสว่างของสีทองแดง , บริเวณสีเข้ม คือ บริเวณที่เกิดการกัดกร่อน และสีขาว คือ ผลึกสารประกอบที่เกิดจากการกัดกร่อน ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของสีที่พบบนพื้นผิวของขั้นทดสอบหลังการทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นทดสอบ (a, b) Anneal (c, d) ECAP 1 รอบ (e, f) ECAP 2 รอบ (g, h) ECAP 8 รอบ (a, c, e และ g) ชิ้นทดสอบก่อนทดสอบ (b, d, f และ h) ชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ

จากรูปที่ 4.13 (b) (d) (f) และ (h) แสดงพื้นผิวชั้นทดสอบหลังการทดสอบการกัดกร่อน จะสังเกตเห็นว่าบนพื้นผิวของชั้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP มีขนาดผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นบนผิวชั้นทดสอบใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนที่พบระหว่างผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังการทดสอบเทียบกับพื้นผิวเดิมของชั้นทดสอบ พบว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 8 รอบพบอัตราส่วนผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นเทียบพื้นผิวเดิมน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบอื่น ซึ่งหมายความว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ ECAP 8 รอบเกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุด

จากรูปที่ 4.13 (f) จะเห็นว่าภาพมีสีและแสงที่เข้มแตกต่างจากภาพอื่นมาก เนื่องจากชั้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมที่ผ่านกระบวนการ ECAP 2 รอบได้ทำการบันทึกภาพหลังจากการทดสอบการกัดกร่อนเป็นเวลาประมาณ 1 สัปดาห์ ทำให้เกิดการออกซิเดชันของอากาศกับชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น แต่ยังสามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบพื้นผิวชั้นทดสอบหลังผ่านการทดสอบการกัดกร่อนได้ ทั้งนี้เป็นความผิดพลาดของทางผู้วิจัย

#### 4.2.4 วิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวของชั้นทดสอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

หลังการทดสอบการกัดกร่อนของชั้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง ได้ทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพบนพื้นผิวชั้นทดสอบหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) เพื่อวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ผิวชั้นทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพบนพื้นผิวของชั้นทดสอบพบว่าบนพื้นผิวของชั้นทดสอบทั้งก่อนและหลังกระบวนการ ECAP ประกอบไปด้วยธาตุคอปเปอร์ (Cu) ธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) ธาตุคลอไรด์ (Cl) และธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งธาตุคอปเปอร์ (Cu) ธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) เป็นธาตุหลักของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียม และธาตุคลอไรด์ (Cl) และธาตุออกซิเจน (O) ที่พบบนพื้นผิวทดสอบเกิดจากกระบวนการการกัดกร่อน ดังสมการต่อไปนี้

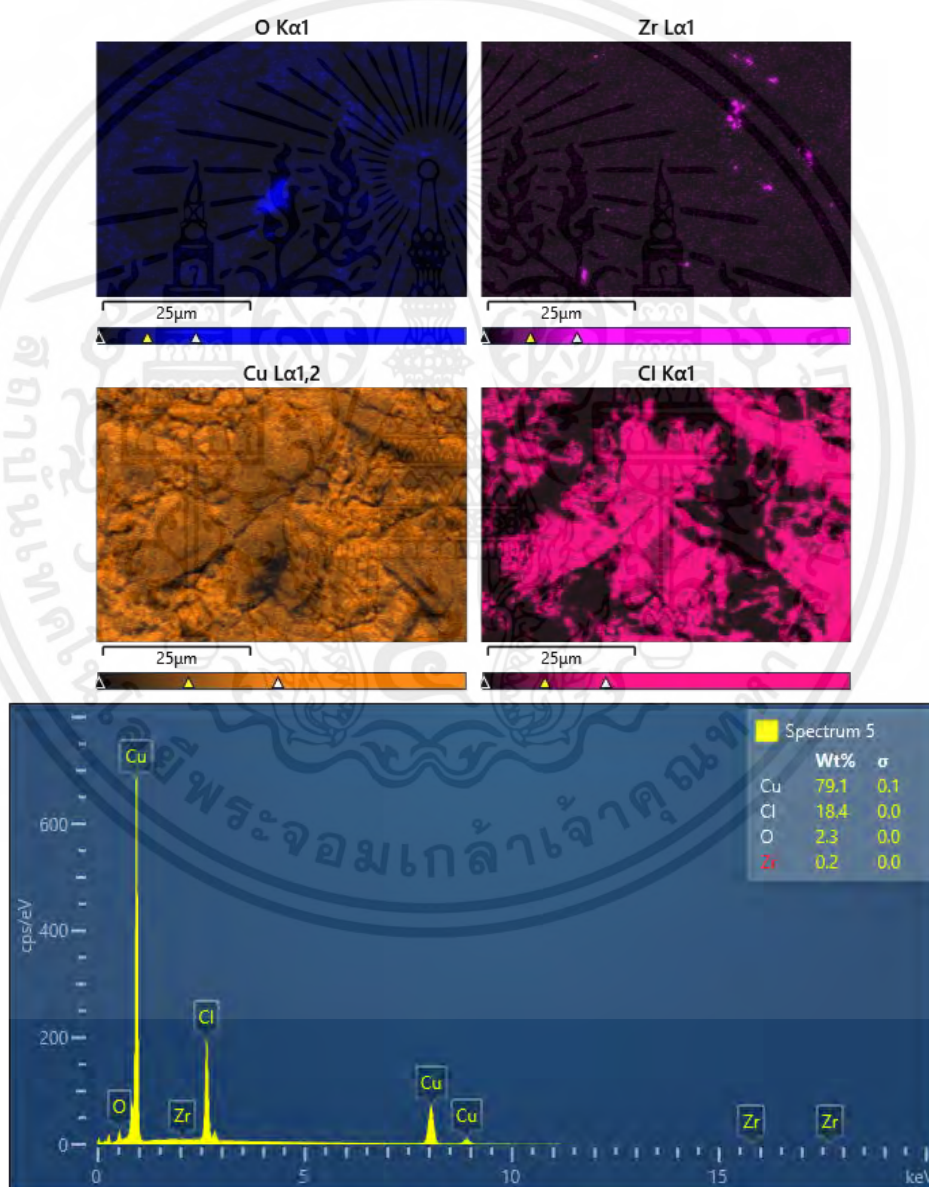
สมการปฏิกิริยาออกซิเดชัน



สมการปฏิกิริยารีดักชัน

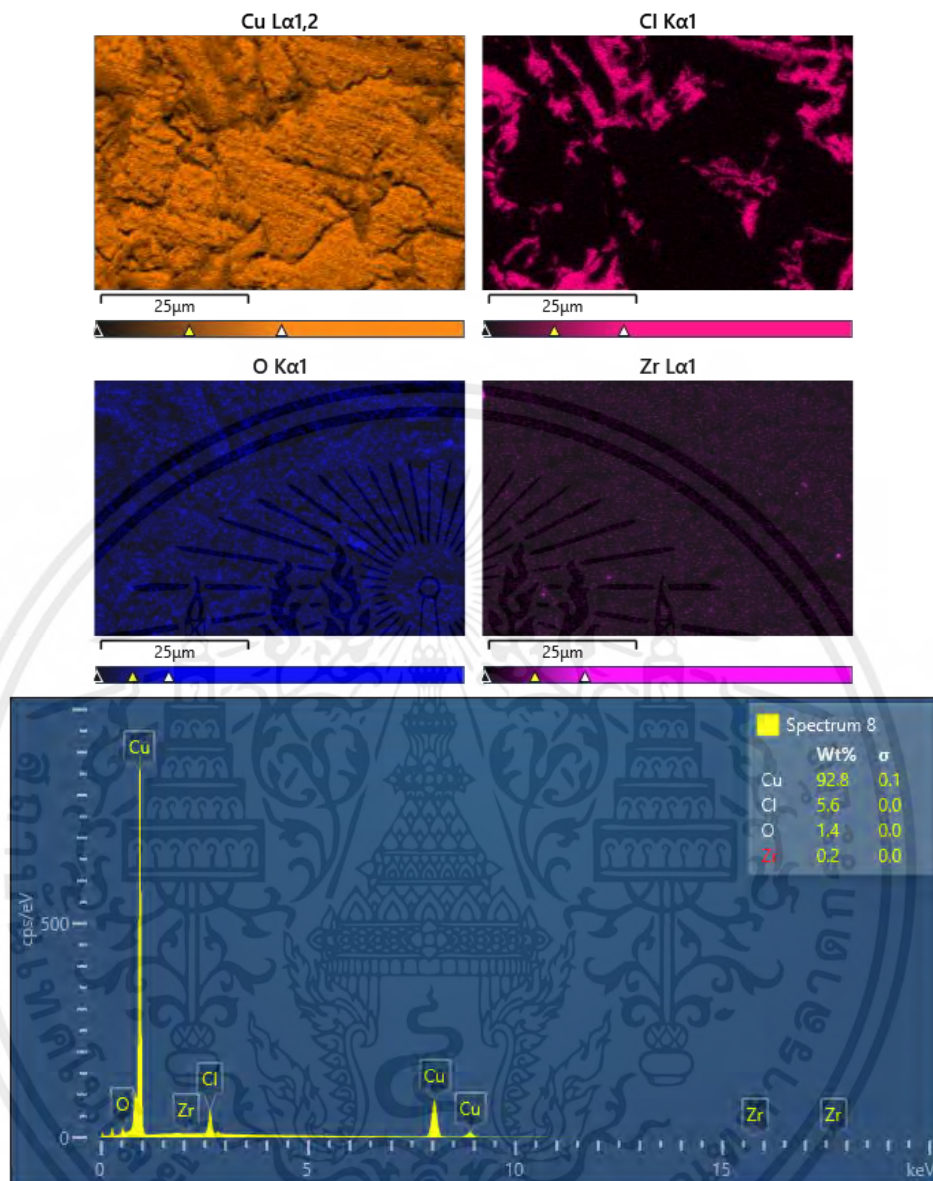


จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าหากขึ้นทดสอบเกิดการกัดกร่อนจะพบธาตุคลอไรด์ (Cl) และธาตุออกซิเจน (O) บนพื้นผิวขึ้นทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.14 4.15 4.16 และ 4.17

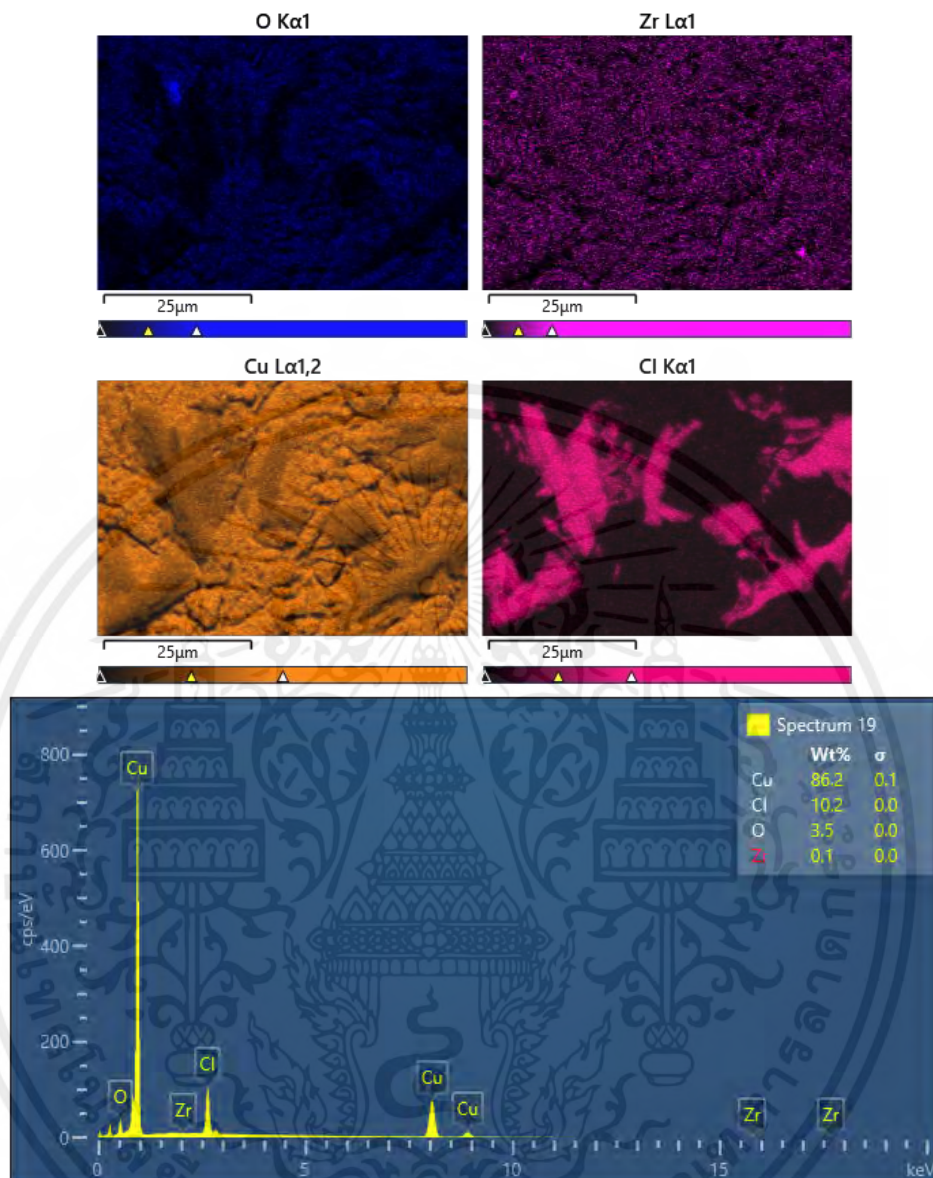


รูปที่ 4.14 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุนบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบก่อนกระบวนการ ECAP ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

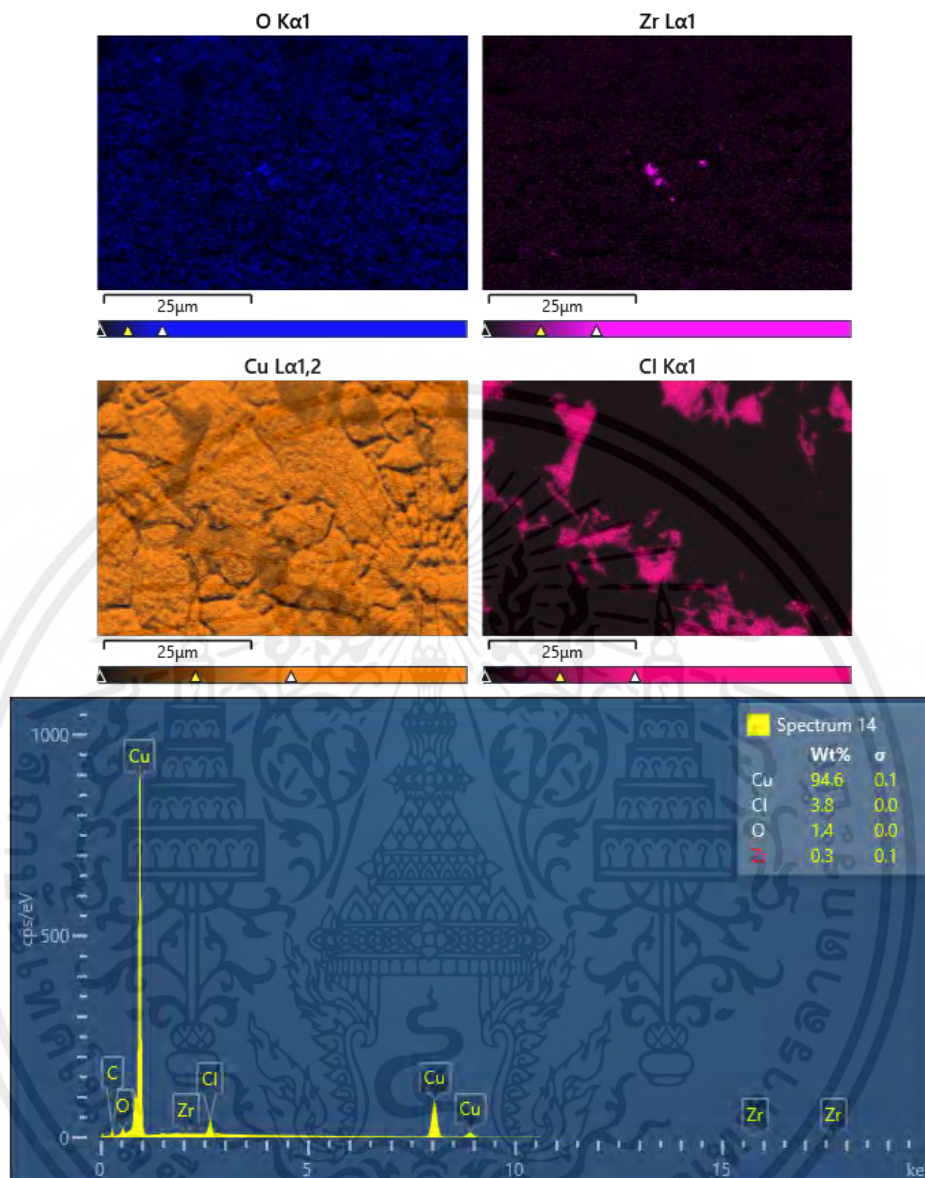


รูปที่ 4.15 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบหลัง ECAP 1 รอบ  
ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบหลัง ECAP 2 รอบ  
ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมและภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบหลัง ECAP 8 รอบ  
ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณบนพื้นผิวชิ้นทดสอบด้วยเทคนิค EDS พบว่าการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบของโลหะผสมทองแดงเซอร์เรเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการ ECAP ได้แก่ ธาตุคอปเปอร์ (Cu) ธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) ธาตุคลอไรด์ (Cl) และธาตุออกซิเจน (O) แต่ไม่พบธาตุไฮโดรเจน (H) เนื่องจากธาตุไฮโดรเจนมีน้ำหนักเบาไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค EDS ซึ่งข้อมูลเชิงปริมาณของธาตุในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงปริมาณธาตุบนพื้นผิวชั้นทดสอบ

Element	%น้ำหนักของธาตุ (%wt)			
	Anneal	ECAP 1 P	ECAP 2 P	ECAP 8 P
Cu	79.1	92.8	86.2	94.6
Zr	0.2	0.2	0.1	0.3
Cl	18.4	5.6	10.2	3.8
O	2.3	1.4	3.5	1.4

จากตารางที่ 4.5 พบว่าธาตุคลอไรด์ (Cl) ถูกพบบนพื้นผิวของชั้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP มากที่สุด แสดงถึงชั้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด และชั้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ECAP 8 รอบพบธาตุคลอไรด์น้อยที่สุด นั่นคือชั้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ECAP 8 รอบมีความต้านทานการกัดกร่อนมากที่สุด ซึ่งผลการวิเคราะห์ธาตุที่พบบนพื้นผิวของชั้นทดสอบสอดคล้องและมีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดสอบการกัดกร่อน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความต้านทานการกัดกร่อนจะมากขึ้น เมื่อชั้นทดสอบผ่านกระบวนการ ECAP ในจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของเกรนมีขนาดเล็กลงและละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องพฤติกรรมความล้าและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมภายใต้กระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งด้วยการทดสอบความล้า และการทดสอบการกัดกร่อนสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกลของวัสดุโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมสำหรับการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบความล้า พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง 8 รอบมีค่าความเค้น ณ จุดคราก และความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น 40% และ 30% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดครากจะใช้ในการกำหนดความเค้นสูงสุดในการทดสอบความล้า

การทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง พบว่าพฤติกรรมการล้าของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งแสดงพฤติกรรมการล้าทั่วไป คืออายุการใช้งานของวัสดุ (Fatigue life) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเค้นที่กระทำกับวัสดุมีค่าลดลง และจากลักษณะของกราฟผลการทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการ ECAP ไม่พบ Endurance limit แต่สามารถเปรียบเทียบความแข็งแรงการล้าของชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการ ECAP ได้จากเส้นโค้ง S-N ที่จำนวนรอบ  $10^5$  รอบ พบว่าชิ้นทดสอบโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมก่อนและหลังผ่าน ECAP มีค่าแอมพลิจูดความเค้นประมาณ 84 MPa และ 216 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังผ่านกระบวนการ ECAP โลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมมีค่าความแข็งแรงการล้าที่จำนวนรอบ  $10^5$  รอบเพิ่มขึ้น 1.57 เท่าเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบก่อนผ่านกระบวนการ ECAP

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากกราฟโพลาริเซชันแสดงให้เห็นอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งมีค่ามากที่สุด และความต้านทานการกัดกร่อนน้อยที่สุด ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ

อิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งจะมีค่าอัตราการกัดกร่อนลดลง และความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่ผ่านกระบวนการที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการทำให้เกรนละเอียดขึ้นของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่พบบนพื้นผิวชั้นทดสอบด้วยเทคนิค EDS

โลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมเมื่อถูกนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรงด้วยเทคนิควิธีอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งที่จำนวนรอบต่างกันแสดงให้เห็นถึงขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ เมื่อวัสดุมีจำนวนรอบที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งมากขึ้นจะทำให้ความแข็ง ความต้านทานความล้า และความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของลวดส่งกระแสไฟฟ้า ท่อทองแดง และหม้อไอน้ำ จึงสรุปได้ว่ากระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งสามารถพัฒนาสมบัติของวัสดุ เนื่องจากกระบวนการอิคवलแซนเนลแองกูลาร์เพรสซึ่งเป็นการทำให้วัสดุเสียรูปอย่างรุนแรงจากการเพิ่มความเครียดที่กระทำกับโครงสร้างภายในวัสดุ ทำให้เกิดขอบเกรนใหม่ที่ขนาดเล็กลงและมีความละเอียดขึ้น ส่งผลให้สมบัติของวัสดุดีขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับโลหะผสมทองแดงเซอร์โคเนียมซึ่งเป็นทางเลือกในการพัฒนาสมบัติของวัสดุ โดยสามารถปรับใช้กับวัสดุอื่น ๆ ที่ต้องการได้ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมนั้น ๆ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป ได้แก่ การศึกษาสมบัติของวัสดุเพิ่มเติมในด้านอื่นที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การศึกษาการขยายตัวจากความร้อนของท่อทองแดง และหม้อไอน้ำ การทดสอบด้วยเทคนิคอื่น ๆ ที่สามารถศึกษาสารประกอบบนพื้นผิวที่ละเอียดขึ้น เช่น เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) หรือการศึกษาความหยาบของพื้นผิว (Surface roughness testing) การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคที่ทำให้เห็นโครงสร้างของเกรนที่ละเอียดมากขึ้น เช่น เทคนิคอิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION (Transmission electron microscope, TEM) หรือ เทคนิคอิเล็กตรอนแบคสแกตเตอร์ดิฟแฟรกชัน (Electron backscatter diffraction, EBSD) เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุเพิ่มเติม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hall, E., The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society*. Section B, vol. 64(9), 1951, pp. 747.
- [2] Vinogradov, A. and Y. Estrin, Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, vol. 95, 2018, pp. 172-242.
- [3] Valiev, R., Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. *Nature materials*, vol. 3(8), 2004, pp. 511-516.
- [4] Zhu, Y.T. and T.G. Langdon, The fundamentals of nanostructured materials processed by severe plastic deformation. *Jom*, vol. 56(10), 2004, pp. 58-63.
- [5] Wongsang-ngam, J., et al., Numerical Investigation of Plastic Strain Homogeneity during Equal-Channel Angular Pressing of a Cu-Zr Alloy. *Crystals*, vol. 11(12), 2021, pp. 1505.
- [6] Valiev, R.Z., et al., Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *Jom*, vol. 58(4), 2006, pp. 33-39.
- [7] สยาม แก้วคำไสย์ (2553). *Metallurgical Failure Analysis*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <https://siamkaewkumsai.blogspot.com>, สืบค้นวันที่ 05/10/2566
- [8] ประเสริฐ วิโรจน์ชิววัน (2563). รายงานวิจัยเรื่อง การทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C แบบหมุนปลาย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, หน้า 3 – 16.
- [9] Jawel (2023). *Fatigue strength diagram*, URL: <https://engineering.stackexchange.com> access on 05/03/2024
- [10] แม้น อมรสิทธิ์ สมชัย อัครทิวา และธรรมณูญ อุดมมัน (2551). วัสดุวิศวกรรม, กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล
- [11] เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย (2557). การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหการ, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] Nanan Krystal, (2018). *The 8 Most Common Forms of Metal Corrosion*, URL: <https://www.corrosionpedia.com>, access on 05/10/2023
- [13] Empower Steel, (2023). *การกัดกร่อน (Corrosion) คืออะไร*, แหล่งที่มา <https://empowersteel.com>, สืบค้นวันที่ 05/10/2023

- [14] ณัฐพล พินิตรรดิบดี (2564). พฤติกรรมการกัดกร่อนและความเข้ากันได้ทางชีวภาพของชั้นเคลือบคาร์บอน คัลายเพชรบนเหล็กกล้าไร้สนิม 316L สำหรับวัสดุข้อเข้าเทียม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 19 – 24. .
- [15] ASTM G3 – 89. *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [16] ASTM G59 – 97. *Assessment of microstructural and electrochemical behavior of severely deformed pure copper through equal channel angular pressing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- [17] ASTM G102 – 89. *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- [18] Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of Stainless steels*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, New York:
- [19] Corrosionpedia, (2023). *Open Circuit Potential (OCP)*, URL: <https://www.corrosionpedia.com>, access on 19/10/2023.
- [20] Kazeem O. Sanusi, Oluwole D. Makinde, Graeme J. Oliver (2012). *South African Journal of Science, Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures*, vol.108, Jan 2012, pp. 9-10.
- [21] นันทประทีป ณัฒพล (2022). การประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมหน้าตัดแบบต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*, หน้า 41-43.
- [22] ThailandIndustry.com (2012). *การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุ (ตอนที่ 1)*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.thailandindustry.com>, เข้าดูเมื่อวันที่ 18/03/2567.
- [23] สมฤกษ์ จันทระอัมพร (2554). หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [24] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2000). *Copper (Cu) ทองแดง*, แหล่งที่มา <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Cu.html>, สืบค้นวันที่ 19/10/2566.
- [25] Lule Senoz, G. M. and T. A. Yilmaz (2020). Optimization of Equal Channel Angular

- Pressing Parameters for Improving the Hardness and Microstructure Properties of Al–Zn–Mg Alloy by Using Taguchi Method. *Metals and Materials International*, vol. 27(3), March 2021, pp. 436-448.
- [26] Wongsangam, Kawasaki Megumi and Langdon G. Terence. (2012). The development of hardness homogeneity in Cu-Zr alloy processed by equal-channel angular pressing, *Materials Science & Engineering A*, vol. 556, July 2012, pp. 526-532.
- [27] H.J. Maier, P. Gabor, N. Gupta, I. Karaman, M. Haouaoui. (2006). International Journal of Fatigue, *Cyclic stress-strain response of ultrafine grained copper*, vol. 28, July 2005, pp. 243-250.
- [28] Wongsangam Jittraporn, Wen Haiming and Langdon G. Terence. (2013), Microstructural evolution in a Cu–Zr alloy processed by a combination of ECAP and HPT. *Materials Science & Engineering A*, vol. 579, May 2013, pp. 126 – 135.
- [29] M.M. SADAWEY, M. GHANEM (2016), Grain refinement of bronze alloy by equal-channel angular pressing (ECAP) and its effect on corrosion behavior. *Defence Technology*, vol. 12, January 2016, pp. 316 – 323.
- [30] A.I. Alateyah et al. (2021), Improved Corrosion Behavior of AZ31 Alloy through ECAP Processing. *Metals*, vol. 11, February 2021, pp. 363.
- [31] F. Djavanroodi, M. Ebrahimi, B. Rajabifar, S. Akramizadeh. (2010). *Materials Science and Engineering A, Fatigue design factors for ECAPed materials*, vol. 528, September 2010, pp. 745-750.
- [32] ASTM E466. *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996.
- [33] L. L. Shreir, R. A. Jarman and G. T. Burstein. (1994). *CORROSION Metal/Environment Reactions third edition*, ISBN 0-7506-1077-8, Butterworth-Heinemann, Great Britain.

- [34] โตเย็น ดลฤดี (2562). การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)*, สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www3.rdi.ku.ac.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 18/03/2567.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้