

การศึกษาอิทธิพลของการรีดขึ้นรูปเย็นต่อการเปลี่ยนเฟสและ
พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียม

โมลิบดีนัมในสารละลายร่างกายเทียม

INFLUENCE OF COLD ROLLING ON PHASE
TRANSFORMATION AND CORROSION BEHAVIOR OF CO-CR-
MO ALLOYS IN SIMULATED BODY FLUID

นางสาวกัลยรัตน์ สุธีบรรเจิด

MS. KANYARAT SUTEEBUNCHERD

นางสาวญดาพร ไร่พุง

MS. YADAPORN AIPUNG

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF COLD ROLLING ON PHASE
TRANSFORMATION AND CORROSION BEHAVIOR OF CO-CR-
MO ALLOYS IN SIMULATED BODY FLUID



MS. KANYARAT SUTEEBUNCHERD

MS. YADAPORN AIPUNG

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของการรีดขึ้นรูปเย็นต่อพฤติกรรมการการเปลี่ยนเฟส
และการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในสารละลาย
ร่างกายเทียม

INFLUENCE OF COLD ROLLING ON PHASE TRANSFORMATION
AND CORROSION BEHAVIOR OF CO-CR-MO ALLOYS IN
SIMULATED BODY FLUID

นักศึกษา

นางสาวกัลยรัตน์ สุธีบรรเจิด รหัสประจำตัว 63010066
นางสาวญดาพร ไร่พุง รหัสประจำตัว 63010243

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(ผศ.ดร. พชรพล ตัณฑวิรุฬห์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของการรีดขึ้นรูปเย็นต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในสารละลายร่างกายเทียม
นักศึกษา	นางสาวกัลยรัตน์ สุธีบรรเจิด นางสาวญดาพร ไร่พุง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization heat treatment) และการรีดเย็น ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก สมบัติเชิงกล และพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม สำหรับอุณหภูมิในกระบวนการอบชุบให้เป็นเนื้อเดียวอ้างอิงจากแผนภาพเฟส โดยเลือกใช้อุณหภูมิ 1250 1200 และ 1150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ผลึกของโลหะผสมนี้ปรากฏเพียงชนิดเดียวคือ ผลึกแบบ FCC (γ -phase) ระยะเวลาในการอบในทุกอุณหภูมิกำหนดไว้เท่ากันคือ 3 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) พบว่าโครงสร้างผลึกมีแนวโน้มเปลี่ยนจากผลึกแบบ HCP (ϵ -phase) ไปเป็นผลึกแบบ FCC (γ -phase) เมื่ออุณหภูมิในการอบชุบลดลง ในการศึกษาอิทธิพลของการรีดเย็น ขึ้นงานแผ่นบางถูกรีดด้วยให้มีความหนาลดลง 10% 15% 20% และ 25% จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าปริมาณการรีดเย็นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างผลึกแบบผลึกแบบ FCC (γ -phase) ถูกแทนที่ด้วยโครงสร้างผลึกแบบ HCP (ϵ -phase) รวมทั้งขึ้นงานมีความความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย การทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมกระทำตามมาตรฐาน ISO 10993-15:2000(E) อุณหภูมิสารละลายในร่างกายเทียมถูกควบคุมขณะทดสอบที่ไว้ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบกระทำทั้งหมด 2 วิธี คือ Open Circuit Potential (OCP) และ Potentiodynamic Polarization โดยจากการทดสอบพบว่า การรีดเย็นทำให้ค่า OCP มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่า การกัดกร่อนมีแนวโน้มว่าจะเกิดช้าลง และจากการทดสอบ Potentiodynamic Polarization พบว่าปริมาณการลดความหนาจากการรีดที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้วัสดุเกิดปฏิกิริยากับสารละลายช้าลง ส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดได้ช้าตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Influence of Cold-Rolling Process on Phase Transformation and Corrosion Behavior of Co-Cr-Mo Alloys in Simulated Body Fluid
Student	Ms. Kanyarat Suteebuncherd Ms. Yadaporn Aipung
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

ABSTRACT

This research investigated the influence of homogenization temperature and amount of cold rolling on alterations in the crystal structure, mechanical characteristics, and corrosion behavior of cobalt-chromium-molybdenum alloys. The selection of temperatures for the heat treatment process is set at 1250°C, 1200°C, and 1150°C based on the Co-Cr-Mo phase diagram where the FCC (γ -phase) is presented. Each heat treatment temperature was maintained for 3 hours. Analysis of the crystal structure via X-ray diffractometry (XRD) revealed a tendency for the crystal structure to transition from hexagonal close-packed (HCP) (ϵ -phase) to face-centered cubic FCC (γ -phase) as the heat treatment temperature decreased. For investigation on the influence of cold rolling, thin-sheet samples were cold-rolled 10%, 15%, 20%, and 25%. XRD analysis indicated that increased cold rolling led to a shift from FCC crystal structure (γ -phase) to HCP crystal structure (ϵ -phase), accompanied by increased material hardness. Assessment of corrosion behavior was conducted in accordance with ISO 10993-15:2000(E) standards, with the solution temperature maintained at $37 \pm 1^\circ\text{C}$. The corrosion testing employed two methodologies: Open Circuit Potential (OCP) and Potentiodynamic Polarization. The OCP experiments revealed that OCP potential increased with increased cold rolling amount, indicating slower tendency to corrosion. Additionally, potentiodynamic polarization testing demonstrated that greater thickness reduction resulting from rolling attenuated the material's reactivity with the solution, thus retarding the corrosion process. Consequently, the findings suggest a correlation between cold rolling intensity, material reactivity, and corrosion inhibition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาอิทธิพลของการรีดขึ้นรูปเย็นต่อการเปลี่ยนเฟสและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในสารละลายร่างกายเทียม ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยจากความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.พชรพล ตันขวิรุฬห์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยฉบับนี้ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา คำแนะนำและแนวคิด เพื่อขั้นตอนของงานวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. กษม ศรีรัมย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ ที่คอยให้คำแนะนำ ความรู้ และการช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานรวมถึง เครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัยแก่ผู้จัดทำจนปริญญานิพนธ์สำเร็จ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ทั้งภายในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภายในคณะวิทยาศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบในการดำเนินขั้นตอนการวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกทรัพยากรอื่น ๆ เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุกๆ ท่านที่ผู้วิจัยได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามตามประกาศรายชื่อ ณ ที่นี้ ผู้จัดทำหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้นผู้จัดทำขอน้อมรับผิด และยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาต่อไป

นางสาวกัลยรัตน์ สุธีบรรเจิด

นางสาวญาดาพร ไฉ่พุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การปลูกถ่ายกระดูกและข้อในอุตสาหกรรมทางการแพทย์.....	4
2.2 วัสดุชีวภาพ.....	5
2.2.1 วัสดุเซรามิก.....	5
2.2.2 วัสดุพอลิเมอร์.....	6
2.2.3 วัสดุคอมโพสิต.....	6
2.2.4 วัสดุโลหะ.....	7
2.3 ทฤษฎีเฟสของโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม.....	10
2.4 กระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น.....	11
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....	12
2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	12
2.5.2 การวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	13
2.6 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.6.1 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Vicker	14
2.6.2 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Brinell	15
2.7 ทฤษฎีการกัดกร่อน.....	15
2.7.1 ประเภทของการกัดกร่อน.....	16
2.8 การทดสอบการกัดกร่อน	17
2.8.1 การทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด.....	18
2.8.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนทิโอดินามิก โพลาริเซชัน	18
2.8.3 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี	20
2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	21
2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว	21
2.9.2 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว	21
2.9.3 การเปรียบเทียบพหุคูณ.....	22
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	26
3.1.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	26
3.2 การรีดขึ้นรูปเย็น.....	28
3.3 การทดสอบการกัดกร่อน	29
3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน	29
3.3.2 การเตรียมสารละลาย	29
3.3.3 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด	31
3.3.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนทิโอดินามิก โพลาริเซชัน.....	31
3.3.5 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี.....	33
3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	34
3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย XRD	34
3.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความแข็ง.....	34
3.5.1 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Vicker	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
3.5.2 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Brinell.....	34
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	35
3.7 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและคุณสมบัติเชิงกล	45
4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการอบชุบต่อโครงสร้างผลึก.....	45
4.1.2 ผลกระทบของการรีดเย็นต่อโครงสร้างผลึก	46
4.1.3 ผลกระทบการรีดเย็นต่อสมบัติทางกล.....	46
4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อน.....	47
4.2.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด.....	47
4.2.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติก โพลาริเซชัน.....	48
4.2.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม.....	8
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม.....	9
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม.....	26
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนสารที่ใช้ในการทำสารละลายของเหลวเทียมในร่างกาย.....	29
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขของการใช้เครื่อง XRD.....	34
ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	39
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ.....	47
ตารางที่ 4.2 อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน.....	49
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานของชิ้นงาน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม.....	8
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตโลหะผสมที่มาตรฐาน ASTM F799	10
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม.....	11
รูปที่ 2.4 เครื่องที่ใช้ในการรีดขึ้นรูปเย็น	12
รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Olympus BX53M.....	12
รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	13
รูปที่ 2.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรูน MiniFlex.....	14
รูปที่ 2.8 ลักษณะหัตถ์คขึ้นงานสำหรับการทดสอบแบบวิกเกอร์	15
รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบ 2 อิเล็กโทรด	18
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบ 3 อิเล็กโทรด	19
รูปที่ 2.11 กราฟเส้นโค้งพลาโรเซชัน.....	20
รูปที่ 2.12 การทำงานด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี	21
รูปที่ 3.1 ก่อนการทำ Homogenizing Heat Treatment	27
รูปที่ 3.2 หลังการทำ Homogenizing Heat Treatment.....	27
รูปที่ 3.3 โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมหลักจากการตัด	27
รูปที่ 3.4 โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมหลังจากการขัด.....	28
รูปที่ 3.5 กระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น.....	28
รูปที่ 3.6 สารละลายที่ใช้ในการทำ SBF	30
รูปที่ 3.7 เครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็ก	30
รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งดิจิตอล.....	30
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด	31
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติก โพลาริเซชัน	32
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการเลือกจุดตัดหาความชัน E_{corr} และ I_{corr}	32
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี.....	33
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.14 การสร้างตัวแปรในโปรแกรม.....	35
รูปที่ 3.15 การใส่ข้อมูลในโปรแกรม.....	35
รูปที่ 3.16 การเลือกคำสั่งในการตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล.....	36
รูปที่ 3.17 การเลือกตัวแปรและคำสั่งวิเคราะห์การแจกแจงข้อมูล	36
รูปที่ 3.18 การเลือกคำสั่งวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล	37
รูปที่ 3.19 การเลือกคำสั่งวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล	37
รูปที่ 3.20 การเลือกวิธีการเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว	38
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว.....	38
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ที่อุณหภูมิ 1150 1200 และ 1250 C°	45
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD หลังจากการรีดขึ้นรูปเย็น	46
รูปที่ 4.3 ความแข็งบนพื้นที่ภาคตัดขวางของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม	47
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียม โมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%.....	48
รูปที่ 4.5 กราฟทาเฟล (Tafel Curve) ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%	49
รูปที่ 4.6 อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%	50
รูปที่ 4.7 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมอิมพีแดนซ์	50
รูปที่ 4.8 กราฟ Bode Phase ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%	51
รูปที่ 4.9 กราฟ Bode Zmod ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%	51
รูปที่ 4.10 กราฟ Nyquist ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%	52

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและขั้นตอนในการดำเนินงานของปริญญาโท เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของการรีดขึ้นรูปเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสและพฤติกรรม การกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในสารละลายร่างกายเทียม ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญ
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. ขอบเขตการศึกษา
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางการแพทย์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทั้งเพื่อการวินิจฉัยและการรักษาต่าง ๆ เช่น การพัฒนาอินซูลินสังเคราะห์สำหรับผู้ป่วยเบาหวาน การวินิจฉัยโรคโดยใช้เครื่องตรวจเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT Scan) และการผลิตอวัยวะเทียม สำหรับทดแทนอวัยวะให้ผู้ป่วยที่เกิดอุบัติเหตุ ความก้าวหน้าทางการแพทย์เหล่านี้ส่งผลให้ประชากรมนุษย์มีอายุขัยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอวัยวะเทียมภายในร่างกายอาจมีการเสื่อมสภาพไปตามอายุขัยที่เพิ่มมากขึ้น เทคโนโลยีการผลิตและพัฒนาอวัยวะเทียมด้วยวัสดุทดแทนในทางการแพทย์จึงมีความสำคัญเพิ่มขึ้นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ [1]

วัสดุที่ใช้ทดแทนในทางการแพทย์ (Biomedical Implant Material) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่ วัสดุกลุ่ม โลหะ เซรามิกซ์ พอลิเมอร์ และคอมโพสิต ซึ่งพอลิเมอร์ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทำอวัยวะปลูกฝังที่ต้องรับแรงโดยตรง แต่มักใช้แทนเนื้อเยื่อในการรักษาด้านศัลยกรรมตกแต่ง เนื่องจากมีคุณสมบัติยืดหยุ่นสูง แต่ความแข็งแรงต่ำและเสื่อมสภาพง่าย จึงไม่นิยมใช้สำหรับงานที่จำเป็นต้องรับแรงกระแทก เซรามิกซ์เป็นวัสดุที่ต้านทานการสึกหรอได้ดี แข็งแรง แต่การขึ้นรูปยากและซับซ้อน เช่นเดียวกับวัสดุกลุ่มคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปขึ้นงานได้ยาก ส่วนวัสดุกลุ่มโลหะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสี มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงและรับน้ำหนักได้ดี ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ง่ายกว่าวัสดุอื่น จึงเหมาะกับการนำมาทำเป็นอวัยวะปลูกฝังทางการแพทย์ เช่น ข้อเข่า ข้อสะโพกเทียม เป็นต้น [2]

โดยชนิดโลหะที่สามารถนำมาใช้ในทางการแพทย์มีหลากหลายชนิด การเลือกใช้จะแตกต่างกันตามความต้องการใช้งาน ซึ่งในงานที่ต้องใช้เพื่อการรับแรงกระแทกมักจะนิยมใช้โลหะ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ไทเทเนียม และโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม โดยเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มีคุณสมบัติคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นโลหะที่มีความแข็งแรง แต่มีความต้านทานการกัดกร่อนค่อนข้างต่ำ เพราะมีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่ภายนอก ทำให้อาจส่งผลให้เป็นพิษกับร่างกาย ไม่เหมาะกับการนำมาทำเป็นอวัยวะปลูกฝัง [3] ซึ่งหากเป็นการทำอวัยวะปลูกฝังภายในร่างกาย ที่ต้องมีคุณสมบัติรับแรงกระแทกร่วมด้วย ปัจจุบันมักนิยมใช้ไทเทเนียมหรือโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

เมื่อเปรียบเทียบโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมและไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียมมีค่าโมดูลัสใกล้เคียงกับกระดูกมนุษย์ ไม่ก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง ไม่เป็นสนิมและมีอายุการใช้งานยาวนาน ไทเทเนียมจึงเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน แต่มีข้อเสียคือทนการสึกหรอได้น้อยกว่าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม และมีราคาสูง ทำให้การรักษาด้วยการปลูกฝังอวัยวะที่ทำจากไทเทเนียมสามารถเข้าถึงได้ยาก ในขณะที่เดียวกันโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมก็เป็นวัสดุที่ไม่ทำให้เกิดพิษเวลาอยู่ในร่างกายมนุษย์และไม่เกิดสนิมเช่นกัน และยังสามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีที่สุด จึงเหมาะกับการใช้งานที่เกิดการเสียดสีและรับแรงกระแทก คุณสมบัติและราคาอยู่ระหว่างไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 316 L แต่มีข้อเสียคือโลหะชนิดนี้มีอายุการใช้งานได้เพียง 15 ปีเท่านั้น อาจไม่ส่งผลดีหากผู้ป่วยต้องผ่าตัดเปลี่ยนวัสดุปลูกฝังตามอายุการใช้งานอยู่ตลอดการรักษา [4]

ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาและยืดอายุการใช้งานของวัสดุ ในแง่ของการนำไปใช้ทำเป็นอวัยวะปลูกฝังซึ่งต้องต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารภายในร่างกายด้วย โดยเลือกศึกษาวิธีการรีดเย็นของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ว่าหลังจากโลหะถูกรีดแล้วโครงสร้างผลึก สมบัติทางกล และพฤติกรรมการกัดกร่อนมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างผลึกและสมบัติทางกลของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ที่ผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น
2. ศึกษาอิทธิพลการรีดขึ้นรูปเย็นต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในในสารละลายจำลองร่างกายมนุษย์ (Simulated Body Fluid)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 วัสดุ

1. โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม
2. โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่มีการรีดขึ้นรูปเย็น 10%
3. โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่มีการรีดขึ้นรูปเย็น 15%
4. โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่มีการรีดขึ้นรูปเย็น 20%
5. โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่มีการรีดขึ้นรูปเย็น 25%

1.3.2 ลักษณะพฤติกรรมการกัดกร่อน

1. Open Circuit Potential (OCP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Potentiodynamic Polarization
3. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

1.3.3 อุดหนุน

ที่อุดหนุนประมาณ 37.5 องศาเซลเซียส

1.3.4 ระยะเวลาในการศึกษา

ระหว่างเดือนกรกฎาคม 2566 ถึง เดือนมีนาคม 2567

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาค้นคว้าโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ทั้งก่อนและหลังอบชุบทางความร้อน รวมไปถึงก่อนและหลังรีดขึ้นรูปเย็น
2. เข้าใจพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม หลังผ่านการรีดขึ้นรูปเย็น ในอัตราการรีดที่แตกต่างกัน

1.5 แผนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อปริญญาโทที่ต้องการศึกษา
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลของโลหะผสมโคบอลต์ จากงานวิจัย และศึกษาค้นคว้าเรื่องพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยวิธีต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ก่อนวางแผนการทดลอง
3. เตรียมชิ้นงาน พร้อมออกแบบและวางแผนการทดลอง
4. เริ่มการทดลองตามแผนที่วางไว้ โดยมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการทดลองตามมาตรฐานที่ค้นคว้า
5. วิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
6. สรุปผลการดำเนินงานของงานวิจัย
7. รายงานผล จัดทำรูปเล่มปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโครบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมโดยใช้การรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ต่างกัน โดยมีการศึกษารายละเอียดของโลหะผสม ทฤษฎี และงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง มาประยุกต์ใช้ในการทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยหัวข้อดังแสดงต่อไปนี้

1. การปลูกถ่ายกระดูกและข้อในอุตสาหกรรมทางการแพทย์
2. วัสดุชีวภาพ
3. ทฤษฎีเฟสของโครบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม
4. กระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น
5. การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค
6. การตรวจสอบสมบัติเชิงกล
7. ทฤษฎีการกัดกร่อน
8. การทดสอบการกัดกร่อน
9. การวิเคราะห์ความแปรปรวน
10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปลูกถ่ายกระดูกและข้อในอุตสาหกรรมทางการแพทย์

อุตสาหกรรมทางการแพทย์และสาธารณสุขมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงมีการพัฒนาด้านการวินิจฉัยและการรักษาที่ดีขึ้นแก่ผู้ป่วย และด้วยเหตุนี้การศัลยกรรมข้อสะโพกและข้อเข่า (Orthopaedic Surgery) จึงมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดจาก 174% เป็น 673% [5]

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกถ่ายกระดูกและข้อ เนื่องจากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีต่าง ๆ ผู้คนสามารถเดินทางได้สะดวกยิ่งขึ้น และปัญหาอุบัติเหตุจราจรที่ตามมากรุนแรงเป็นพิเศษ จึงส่งผลให้การบาดเจ็บทางกระดูกและข้อในคนหนุ่มสาวและวัยกลางคนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ เมื่ออายุเฉลี่ยของประชากรเพิ่มมากขึ้น ปัญหาโรคข้ออักเสบและอาการปวดข้อในผู้สูงอายุก็เริ่มเป็นปัญหามากขึ้นตามมา

จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนข้อหรือปลูกถ่ายอวัยวะเทียมเพื่อรักษา ส่งผลให้ความต้องการวัสดุชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก [6] นับตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1990 ที่เกิดการพัฒนอย่างก้าวกระโดดของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุชีวภาพ สะท้อนให้วงการวิจัยเกิดความมีชีวิตชีวาสูงขึ้น จนเกิดการพัฒนาในวงกว้างอย่างแพร่หลาย [7], [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันมีวัสดุชีวภาพหลายประเภท [9] ซึ่งในการใช้งานปลูกถ่ายกระดูกและข้อ จำเป็นต้องมีข้อจำกัดสำคัญคือเรื่องของความแข็งแรงเชิงกล และ ความต้านทานการกัดกร่อนทางชีวภาพ (Biocorrosion Resistance) ซึ่งสามารถคาดหวังข้อจำกัดดังกล่าวได้จากวัสดุที่เป็นโลหะเท่านั้น ด้วยเหตุนี้โลหะจึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อฟื้นฟูการทำงานของส่วนต่าง ๆ ของโครงกระดูกในหลายส่วน [10]

2.2 วัสดุชีวภาพ

วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) เป็นสิ่งนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ในการทำหน้าที่ทดแทนหรือเสริมการทำงานของอวัยวะหรือ เนื้อเยื่อที่ไม่สามารถทำงานได้ปกติ วัสดุชีวภาพนอกจากจะต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลที่สามารถทำหน้าที่ทดแทนอวัยวะนั้น ๆ ได้แล้วยังต้องมีคุณลักษณะที่เหมาะสมคือ ไม่แสดงความเป็นพิษทั้งจากตัววัสดุชีวภาพเองรวมถึงสารที่เกิดจากย่อยของวัสดุชีวภาพ หรือสารในกระบวนการสร้างและสลายของวัสดุชีวภาพ (Metabolite) นั้น ๆ รวมถึงวัสดุชีวภาพจะต้องสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility) ได้ดีสามารถกระตุ้นให้เกิดกระบวนการอักเสบ (Inflammation) ซึ่ง

นำไปสู่กระบวนการหายหรือ ซ่อมแซมได้อย่างเหมาะสม โดยวัสดุชีวภาพจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่ วัสดุเซรามิก วัสดุพอลิเมอร์ วัสดุคอมโพสิตและวัสดุโลหะ [11]

2.2.1 วัสดุเซรามิก

เซรามิก (Ceramic) เป็นวัสดุอนินทรีย์ (Inorganic) ที่ประกอบด้วยธาตุโลหะและอโลหะยึดกันด้วยพันธะไอออนิก หรือพันธะโควาเลนต์ร่วมกัน องค์ประกอบทางเคมีของเซรามิกจะมีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบอย่างง่าย หรือเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยเฟสต่าง ๆ ที่สลับซับซ้อน โดยเกิดพันธะระหว่างกัน โดยทั่วไปโลหะที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุเซรามิก ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) แมกนีเซียม (Mg) ไททาเนียม (Ti) เบริลเลียม (Be) และโบรอน (B) ส่วนอโลหะที่รวมอยู่กับโลหะเหล่านี้ ได้แก่ ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxides) คาร์ไบด์ (Carbides) หรือไนไตรด์ (Nitride) เป็นต้น [12]

สมบัติทั่วไปของผลิตภัณฑ์เซรามิกมีความแข็งและเปราะ ความต้านแรงดึงและความเหนียวต่ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี มีจุดหลอมละลายสูง และมีความทนทานต่อสารเคมีได้ดี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์เซรามิกทนต่อแรงกดได้มากกว่าแรงดึง โดยจะมีความสามารถทนต่อแรงกดมากกว่าแรงดึง 5-10 เท่า

วัสดุเซรามิกมีโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกับโลหะ แต่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) มากเหมือนโลหะ ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมของเซรามิกอาจเป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือพันธะไอออนิกที่มีการรับและให้อิเล็กตรอน โดยพันธะไอออนิกจะทำให้วัสดุมีเสถียรภาพสูง นอกจากนี้พันธะที่เกิดขึ้นของวัสดุเซรามิกยังมีผลทำให้วัสดุเซรามิกมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะและพอลิเมอร์ แต่จากการที่วัสดุเซรามิกมีความแข็งสูงและเปราะ ไม่อ่อนเหนียว จึงมีความต้านทานแรงกระแทกต่ำ และยังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูงที่สุด โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากความต้านแรงดึงสูงถึง 0.3-0.4 MPa ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงกว่าวัสดุประเภทอื่น เมื่อเทียบกับเหล็กที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 0.2 MPa จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำชิ้นส่วนที่ต้องการความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) หรือใช้ทำเป็นวัสดุขัดถู (Abrasive) และเครื่องมือตัด (Cutting Tool) สำหรับในส่วนของความคงทนต่อสารเคมี วัสดุเซรามิกทุกชนิดทนต่อสารเคมีได้เป็นอย่างดี โดยจะเฉื่อยต่อสารเคมี หรือตัวทำละลายอินทรีย์ต่าง ๆ ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) และสารละลายด่างร้อน (Hot Caustic Solution) [13]

2.2.2 วัสดุพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) คือ เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยโซ่โมเลกุลขนาดยาว มีมวลโมเลกุลมาก ประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ของสาร (Repeating Unit) ที่อาจจะเหมือนกันหรือต่างกันมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมี เรียกว่า พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

คุณสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์แต่ละตัวอาจมีคุณสมบัติเฉพาะของตัวเอง อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่จะแยกแยะคุณสมบัติทางเคมีหลายประการของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของคุณสมบัติทั้งหมดได้ดังนี้

- ความต้านทานต่อสารเคมี ตัวอย่างเช่น พลาสติกที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่บรรจุอยู่ในนั้น
- ฉนวนไฟฟ้าและความร้อน พอลิเมอร์เป็นฉนวนที่ดี จากสิ่งเหล่านี้จึงมีการผลิตวัสดุที่ใช้สำหรับชั้นป้องกันบนสายเคเบิลหรือสำหรับเต้ารับไฟฟ้า คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานความร้อนทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในครัวเรือนได้ เช่น ที่จับหม้อ
- มีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรงพอประมาณในขณะที่มีน้ำหนักเบา พลาสติกบางชนิดยังสามารถลอยได้
- สามารถขึ้นรูปได้ง่าย พอลิเมอร์สามารถแปรรูปได้หลายวิธี โดยสามารถขึ้นรูปเป็นชั้นบาง ๆ เช่น เส้นใยสิ่งทอ และโครงสร้างกระดูกสันหลังที่เป็นของแข็ง สามารถขึ้นรูปได้ง่ายในรูปทรงเฉพาะ

จากคุณสมบัติข้างต้น พอลิเมอร์ยังไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนอีกด้วย จึงเหมาะกับการใช้แทนเนื้อเยื่อในการรักษาต้นศัลยกรรมตกแต่ง แต่พอลิเมอร์มีความแข็งแรงต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย จึงไม่นิยมใช้สำหรับงานที่จำเป็นต้องรับแรงกระแทก ทำให้พอลิเมอร์ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทำอวัยวะปลูกฝัง [14]

2.2.3 วัสดุคอมโพสิต

คอมโพสิต มีคำจำกัดความในเชิงวิศวกรรมที่หมายถึง วัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยไม่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ประกอบด้วยของผสมจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป หรือ เป็นการรวมกันของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและจะต้องไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจายหรือ ตัวเสริมแรง (Reinforcement) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษ หรือ ทำให้มีลักษณะที่สำคัญบางอย่างแตกต่างไปจากเดิม ตัวอย่างของวัสดุผสมในชีวิตประจำวันเช่น ยางรถยนต์ โดยทั่วไปจะประกอบไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวัสดุผสมระหว่างโพลีเมอร์ที่ให้ความยืดหยุ่นกับวัสดุเสริมแรงจำพวกท่อนานาโนคาร์บอน เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติด้านความเหนียว สามารถปรับรูปทรงไปมาได้แต่ขึ้นรูปขึ้นงานยาก มักจะถูกนำมาใช้ในงานที่ต้องการความสวยงามและความทนทาน จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในการเป็นวัสดุทดแทนที่ต้องรับแรงกระแทก โดยสามารถแบ่งคอมโพสิตได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

- วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced)
- วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced)
- วัสดุผสมโครงสร้าง (Structural) [15]

2.2.4 วัสดุโลหะ

วัสดุโลหะ (Metal) เป็นวัสดุปลูกฝังแบบรับแรงกดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการใช้งานปลูกถ่ายกระดูกและข้อ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยม เช่น ความแข็งแรงเชิงกลสูง ความต้านทานต่อการกัดกร่อน ทนต่อการเสียดสี มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงและรับน้ำหนักได้ดี สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ง่ายกว่าวัสดุอื่น ซึ่งมีการใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงในงานที่เป็นวัสดุปลูกถ่ายเพื่อรองรับแรง เช่น กระดูก ข้อต่อ และฟัน หรือจะใช้งานที่ไม่จำเป็นต้องรองรับแรงก็สามารถใช้ได้ เช่น เนื้อเยื่อหัวใจ วาล์วหัวใจ และหลอดเลือด [16]

การเลือกใช้ชนิดโลหะก็จะแตกต่างกันตาม การใช้งานที่ต้องการซึ่งในงานที่ต้องการใช้เพื่อรองรับแรงกระแทกมักจะนิยมใช้โลหะ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ไทเทเนียม และโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

2.2.4.1 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) หรือ สแตนเลส 316L จะมีคุณสมบัติเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง แต่มีความต้านทานการกัดกร่อนค่อนข้างต่ำ เพราะมีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่ภายนอกทำให้อาจส่งผลให้เป็นพิษกับร่างกาย จึงไม่เหมาะกับการนำมาทำเป็นอวัยวะปลูกฝังภายในร่างกายในระยะเวลานาน ๆ

2.2.4.2 ไทเทเนียม

ไทเทเนียม (Titanium) มีคุณสมบัติความแข็งแรงในระดับที่ใกล้เคียงกับกระดูกมนุษย์ ไม่ก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง ไม่เป็นสนิมและมีอายุการใช้งานยาวนาน ไทเทเนียมจึงเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน แต่มีข้อเสียคือ มีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอได้น้อยกว่าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม และมีราคาที่สูง ทำให้การรักษาด้วยการปลูกฝังอวัยวะที่ทำจากไทเทเนียมสามารถเข้าถึงได้ยาก [17]

2.2.4.3 โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

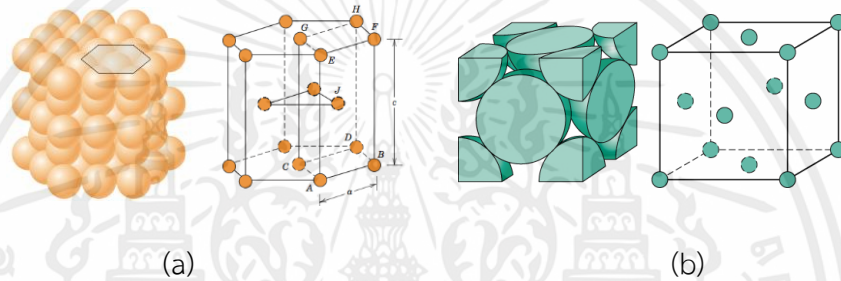
โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo Alloys) เป็นวัสดุที่ไม่ทำให้เกิดพิษเวลาอยู่ในร่างกายมนุษย์และไม่เกิดสนิม สามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีที่สุด จึงเหมาะกับการใช้งานที่เกิดการเสียดสีและรับแรงกระแทก คุณสมบัติและราคาอยู่ระหว่างไทเทเนียมและสแตนเลส 316L

- ลักษณะโครงสร้างของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม จะมีทั้งหมด 2 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Hexagonal Closed Pack Structure (HCP) จะเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 900 องศาเซลเซียส ซึ่งในโครงสร้างนี้จะมีการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าโครงสร้างแบบ FCC แต่มีคุณสมบัติด้านการยึดตัวที่ต่ำ ทำให้สามารถเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ง่ายเมื่อถูกทำการทดสอบแรงดึง จึงเป็นโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมสำหรับการนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.1 (a) [18]

2. Face Centered Cubic Structure (FCC) เป็นโครงสร้างนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900-1400 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 2.1 (b) แสดงรูปโครงสร้างแบบ FCC ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม จะเห็นว่าในโครงสร้างจะมีระบบการเลื่อน (Slip System) เยอะจึงทำให้โครงสร้างแบบ FCC มีความสามารถในการยึดได้ดี ไม่เกิดการแตกหักแบบเปราะได้ง่าย จึงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการทำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบเย็น [19]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

(a) Hexagonal Closed Pack Structure (HCP) (b) Face Centered Cubic Structure (FCC)

- มาตรฐานของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม จัดเป็นกลุ่มโลหะผสมที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก มีความแข็งแรงและความแกร่งที่สูง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่ดีมาก และที่อุณหภูมิสูงยังสามารถให้ความแข็งแรงที่สูงได้ โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้ความแข็งแรงเกิดขึ้นจากการรวมกันของการเพิ่มความแข็งแรงด้วยคาร์ไบด์และการทำสารละลายของแข็ง โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของโคบอลต์ในช่วง 35-60% มีการผสมโครเมียมในช่วง 20-30% มีนิกเกิลผสมได้สูงถึง 35% มีทั้งสแตนเลสและโมลิบดีนัมในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งจะแสดงส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.1 โดยโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่ใช้ศึกษาจะเป็นโลหะที่มาตรฐาน ASTM F75 คือ โลหะที่ผ่านการหล่อ (Cast Alloy) และมาตรฐาน ASTM F799 ซึ่งเป็นโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน (Thermomechanical Processed Alloy) และทั้งสองมาตรฐานจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงตามตารางที่ 2.2 [20]

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมแบบหล่อและแบบผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน [20]

ธาตุ	ASTM F75	ASTM F799
Co	58.9 - 69.5	58 - 59
Cr	27.0 - 30.0	26.0 - 30.0
Mo	5.0 - 7.0	5.0 - 7.0
W	0.2	-
Ni	2.5	1.0
Mn	1.0	1.0
Si	1.0	1.0
Fe	0.75	1.5
C	0.35	0.35
N	0.25	0.25
P	0.02	-
Ti	0.10	-
S	0.01	-

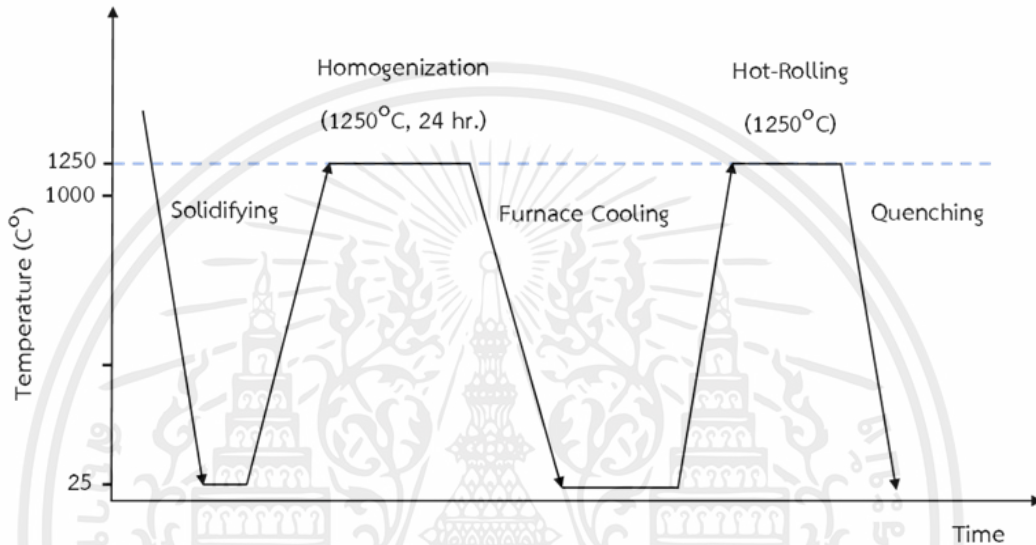
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมแบบหล่อและแบบผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน [20]

คุณสมบัติ (Property)	ASTM F75	ASTM F799
	As-Cast	Hot Forged
Elastic Modulus (GPa)	210	210
Yield Strength (MPa)	450	896-1200
Tensile Strength (MPa)	655	1399-1586

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระบวนการผลิต

โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่ใช้ในการทดสอบคือโลหะผสมที่มาตรฐาน ASTM F799 ซึ่งผ่านกระบวนการตามรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการสุดท้ายคือกระบวนการรีดร้อน (Hot Rolling) เป็นการทำให้เพิ่มความแข็งแรงและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค และหลังจากกระบวนการรีดร้อนแล้วก็ต้องทำการกระบวนการชุบแข็ง (Quenching) เพื่อทำการหยุดการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม และเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่เราต้องการ



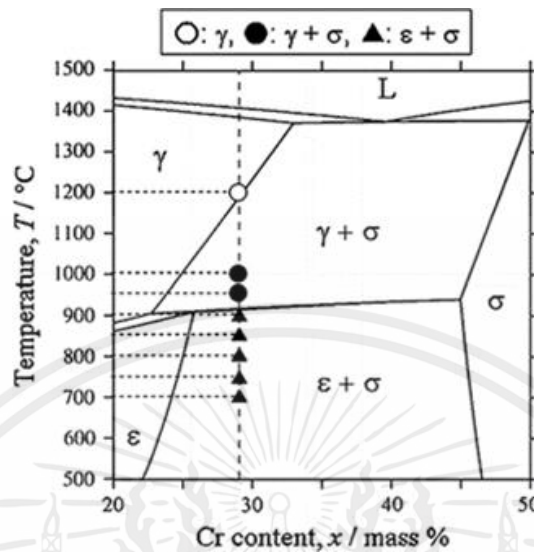
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตโลหะผสมที่มาตรฐาน ASTM F799

2.3 ทฤษฎีเฟสของโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

จากแผนภาพเฟสของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนหรือในระหว่างที่โลหะผสมเย็นตัวลง ยกตัวอย่างเช่น โลหะผสม Co28Cr6Mo จะทำการเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 2.3 ว่าจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบ HCP หรือเฟส ϵ + สารประกอบเชิงโลหะ σ ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบ FCC หรือเฟส γ + σ ที่ 920 °C และเปลี่ยนจากเฟส γ + σ ไปเป็นเฟส γ ที่ 1200 °C และจากเฟส γ ยังสามารถเปลี่ยนถึงเฟสของเหลว L ที่อุณหภูมิ 1380 °C ตามเส้นประดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเฟส γ จะมีโครงสร้าง FCC (Face Centered Cubic) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง มีรูปทรงเหลี่ยมและละเอียด ในขณะที่เดียวกัน ϵ -phase จะมีโครงสร้าง HCP (Hexagonal Closed Pack) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ [21] อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกสามารถแปลงเปลี่ยนได้โดยการเติมองค์ประกอบของธาตุลงในโลหะผสม โดยเฉพาะในทางการแพทย์ โลหะผสม Co-Cr ที่ถูกนำไปใช้งานมักจะมีองค์ประกอบ Cr มากกว่า 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนด้วยการสร้างชั้นพาสซีฟ (Passive Layer) ที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Cr ออกไซด์ได้ [22] และการเติม Cr จะทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เช่น จากแผนภาพเฟส สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงในโลหะผสมที่ Co-20% และ Co-30% โดยมวล Cr อยู่ที่ประมาณ 1,100 และ 1,200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [23]



รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม [24]

2.4 กระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น

กระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling) เป็นกระบวนการขึ้นรูปหรือแปรรูปโลหะให้เป็นชิ้นงานด้วยเครื่องรีดขึ้นรูปเย็นแสดงในรูปที่ 2.4 โดยกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นจะทำในขณะที่โลหะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) ในการขึ้นรูปเย็นโลหะส่วนใหญ่นิยมทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ได้ และในการทำงานขึ้นรูปเย็นโลหะจะต้องใช้แรงที่มากในการบังคับให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะที่เกิดขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร (Permanent Deformation) ที่เกิดขึ้นจากความเค้น (Stress) ที่กระทำต่อโลหะมีค่าเกินค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Point) ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีแรงต้านที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะ ซึ่งผลของแรงต้านนี้จะทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งจะเรียกว่า ความแข็งแรงเครียด (Strain Hardened) นอกจากนี้แรงต้านที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stresses) [25]



รูปที่ 2.4 เครื่องที่ใช้ในการรีดขึ้นรูปเย็น

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

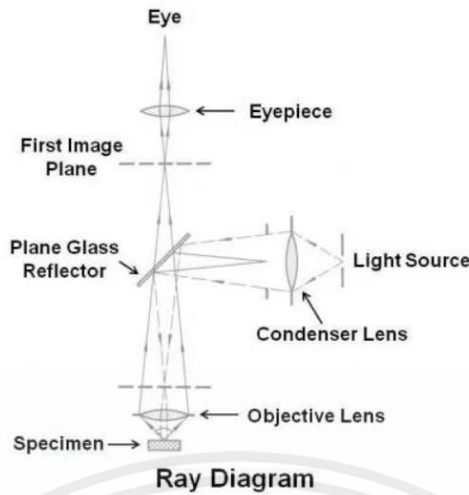
2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) จะประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ และเลนส์ใกล้ตา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 วัตถุที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถวางลงบนแท่นวางวัตถุได้ โดยชิ้นงานจะผ่านการเจียรนัย (Grinding) และ การขัดเงา (Polishing) ก่อนการนำมาวิเคราะห์โครงสร้าง โดยจะมีแหล่งกำเนิดแสงที่วิ่งผ่านระบบเลนส์ Eyepiece ซึ่งเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยที่แสงจะเดินทางไปยังแผ่นกระจกที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนแสง แสงจะสะท้อนลงมาสู่วัตถุตั้งแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะทำให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตามนุษย์ และด้วยการถูกสะท้อนกลับมาด้วยความยาวคลื่นที่ไม่เท่ากันซึ่งเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่าง ๆ การตรวจสอบโครงสร้างแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลยีคส์ (Metallography) การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จึงทำให้สามารถตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุ ความเท่ากันทุกทิศทาง (Isotopic) ของชิ้นงานบริเวณด้านหน้า และด้านข้างได้ แต่กล้องประเภทนี้จะมีเงื่อนไขคือ จะสามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะบริเวณผิวเท่านั้น [25]



รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Olympus BX53M [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [26]

2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) หรือการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron Diffraction) เมื่อรังสีเอกซ์ซึ่งมีความยาวคลื่นเดี่ยวกระทบวัสดุ มักเกิดการกระเจิงรังสีเอกซ์ในทุกทิศทาง อย่างไรก็ตาม รังสีเอกซ์ซึ่งตกกระทบบนระนาบของผลึกด้วยมุมที่กำหนด จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันมากกว่าแบบหักล้างซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลี้ยวเบน (Diffraction) ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ตามสมการที่ 1 เพื่อนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารที่ใช้ในการทดสอบ โดยการเลี้ยวเบนของรังสีที่แตกต่างกัน จะทำให้ทราบว่าจะด้วยวิธีนั้นๆ มีสารประกอบอะไรบ้างและผลึกรูปแบบใดและสามารถหาสัดส่วนของโครงสร้างผลึกได้จากสมการที่ 2 [27]

$$\sin\theta = \frac{1}{2d_{hkl}} \quad (1)$$

โดยที่ θ = มุมครึ่งหนึ่งของมุมระหว่างลำแสงที่เลี้ยวเบนกับทิศทางของลำแสงเริ่มต้น
 λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 hkl = ระยะทางระหว่างระนาบซึ่งเป็นสาเหตุของการแทรกสอดแบบเสริมกัน

$$F^{HCP}(\text{wt}\%) = \frac{I_{1011}^{HCP}}{I_{1011}^{HCP} + 1.5 I_{200}^{FCC}} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	F^{HCP}	=	ค่าสัดส่วนของโครงสร้างเฮกซาโกนัลโคลสแพค (HCP)
	I_{1011}^{HCP}	=	ค่าความเข้มข้นของโครงสร้างแบบเฮกซาโกนัลโคลสแพค (HCP)
	I_{200}^{FCC}	=	ค่าความเข้มข้นของโครงสร้างแบบลูกบาศก์กลางหน้า (FCC)



รูปที่ 2.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์รุ่น MiniFlex

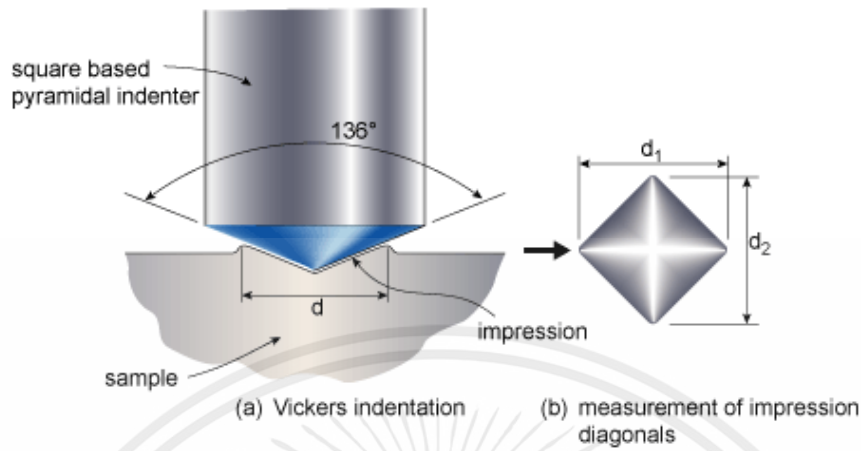
2.6 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบ ความแข็งแรง (Hardness Test) เป็นการทดสอบความแข็งของวัสดุเป็นการวัดค่าจากความสามารถในด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ในการวัดค่าความแข็งแรงถือว่าเป็นค่าพื้นฐานที่สามารถทำให้เห็นสมบัติโดยรวมของชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลมีหลายวิธี แต่เราจะเลือกใช้การทดสอบความแข็งแรงด้วยการใช้แรงกด คือการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบ Vickers Hardness Test สำหรับบริเวณ ผิวข้าง ของชิ้นงาน และวิธีการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบ Brinell Hardness Test สำหรับบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน

2.6.1 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Vicker

การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Vicker เป็นวิธีการทดสอบค่าความแข็งแรงด้วยการใช้แรงกด เพื่อวัดรอยยุบบนวัสดุ โดยในการทดสอบด้วยวิกเกอร์จะใช้หัวกดแบบทรงเพชรพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ซึ่งเมื่อทำการกดชิ้นงานแล้วจะสามารถนำรอยกดที่สามารถมองเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์มาวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2

จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) ตามรูปที่ 7 เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแข็งของวัสดุจาก แรงกดส่วนด้วยค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมยกกำลังสอง หรือพื้นที่ผิวของรอยกด [28]



รูปที่ 2.8 ลักษณะหัวกดชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [28]

2.6.2 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Brinell

การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Brinell จะเป็นวิธีการทดสอบค่าความแข็งแรงของวัสดุ โดยจะใช้หัวลูกบอลเหล็กกล้าชุบ (ลูกบอลคาร์ไบด์) ขนาด 10 มิลลิเมตรกดลงไปบนพื้นผิวหน้าของชิ้นงานที่ต้องการวัดค่าความแข็ง ทิ้งไว้ซักพักแล้วดึงเอาแรงกดออก จากนั้นใช้เครื่องวัดไมโครมิเตอร์ผ่านกล้องจุลภาคเพื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยที่ปรากฏบนพื้นผิว เพื่อนำไปคำนวณตามสูตรในสมการที่ 1 เพื่อวัดค่าความแข็งแรงของวัสดุ [28]

$$BHN = \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

โดยที่	BHN	=	ค่าความแข็งแรง Brinell (kg/mm ²)
	L	=	น้ำหนักกดที่กระทำ (kg)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)
	d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm)

2.7 ทฤษฎีการกัดกร่อน

การกัดกร่อน (Corrosion) จะเกิดจากการสูญเสียเนื้อโลหะเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสภาพแวดล้อมที่โลHENั้นสัมผัส ซึ่งอาจจะเป็นปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี โดยตัวอย่างการกัดกร่อนของโลหะที่อาจพบได้โดยทั่วไป เช่น การเป็นสนิม ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะถูกออกซิไดส์แล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศจนเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe₂O₃) สนิมทองแดง (CuO) หรือ สนิมอลูมิเนียม (Al₂O₃) และในการกัดกร่อนของโลหะอาจเกิดได้เมื่อมีเซลล์ของการกัดกร่อนครบ ได้แก่ แอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Anode) แคโทด (Cathode) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และตัวกลางถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron Transfer) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด [29]

2.7.1 ประเภทของการกัดกร่อน

2.7.1.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) จะเป็นการกัดกร่อนแบบกระจายเต็มผิวชิ้นงาน โดยที่เนื้อของโลหะจะค่อย ๆ บางลงจนไม่สามารถใช้งานได้ การกัดกร่อนแบบนี้เกิดได้ในโลหะสองชนิดที่สัมผัสกันโดยโลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะถูกกัดกร่อนไป โดยอัตราการกัดกร่อนจะเกิดจากปริมาณกระแสที่ไหลและพื้นที่แอโนด

2.7.1.2 การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์

การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion) จะเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด โดยวัสดุชนิดหนึ่งจะประพฤติตัวเป็นขั้วแอโนดและอีกวัสดุจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปแคโทดซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดหรือการกัดกร่อนนั่นเอง โดยระดับความรุนแรงของการกัดกร่อนประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด

2.7.1.3 การกัดกร่อนในที่อับ

การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเฉพาะพื้นที่ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อ รอยแยกของวัสดุ โดยรอยแยกเหล่านี้ อาจเป็นการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุสองชนิดหรือเป็นการสะสมของสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น ผุ่น โคลน โดยลักษณะเด่นของการกัดกร่อนประเภทนี้คือจะเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะเฉพาะบริเวณที่เป็นรอยต่อในขณะที่ผิวโลหะบริเวณข้างเคียงจะไม่ได้รับผลกระทบใดๆ โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนประเภทนี้คือน้ำหรือความชื้นที่สะสมบริเวณรอยแยกนี้ ซึ่งทำให้บริเวณดังกล่าวสูญเสียออกซิเจนและมีการเพิ่มขึ้นของประจุบวก ด้วยปัจจัยนี้เองทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจนส่งผลให้น้ำที่สะสมมีสภาพเป็นกรดและกัดกร่อนเนื้อโลหะ

2.7.1.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม

การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) จะเกิดการกัดกร่อนโดยการเกิดเป็นรูลึกเข้าไปในเนื้อโลหะ ซึ่งเป็นรูที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในการกัดกร่อนลักษณะนี้จะเกิดในบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องของชั้นฟิล์มหรือชั้นเคลือบโลหะ ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเกิดความเป็นขั้วแอโนด ในขณะที่บริเวณข้าง ๆ จะเป็นขั้วแคโทด ซึ่งเมื่อมีความชื้นในบริเวณแอโนดก็จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนบริเวณผิวของเนื้อโลหะ

2.7.1.5 การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น

การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (Stress Corrosion Cracking) เป็นการกัดกร่อนที่จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ โดยความเค้นนี้อาจจะเป็นความ

เค้นตักค้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากเกินไป และผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือเปลี่ยนแปลงเลยเมื่อมองด้วยตาเปล่า แต่ในเนื้อโลหะจะเกิดความเสียหายมีรอยร้าวเล็ก ๆ อยู่ภายในเนื้อโลหะ

2.7.1.6 การกัดกร่อนแบบสึกกร่อน

การกัดกร่อนแบบสึกกร่อน (Erosion Corrosion) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อโลหะในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ โดยการกัดกร่อนประเภทนี้จะเริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหลไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง ความเร็วในการเกิดการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับฤทธิ์กัดกร่อนของของไหล

2.7.1.7 การกัดกร่อนจากความล้า

การกัดกร่อนจากความล้า (Fatigue Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากความล้า หรือเกิดจากโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำ ๆ กันโดยแรงที่กระทำสามารถเป็นได้ทั้งแรงดึง (Tensile) และความเค้นอัด (Compressive Stress) จนโลหะเกิดความเสียหายแตกหัก (Fracture) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดแรงเค้นมีค่าต่ำกว่า ค่าอัตราการยึดตัวของเหล็ก (Yield Point)

2.8 การทดสอบการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion Test) จะใช้มาตรฐาน ISO 10993-15:2000 (E) ในการทดสอบการกัดกร่อนของวัสดุซึ่งเป็นมาตรฐานที่จะนำไปใช้งานในทางการแพทย์ โดยในการทดสอบเราจะเลือกใช้สารละลายของเหลวในร่างกายเทียม (Simulated Body Fluid, SBF) เนื่องจากวัสดุที่เราใช้จะนำไปใช้ในร่างกายของมนุษย์ โดยวิธีที่ใช้ในการกัดกร่อนจะมีหลายวิธี

1. การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการจุ่ม (Immersion Testing)

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการจุ่มเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้กันมากที่สุดเพื่อคำนวณอัตราการกัดกร่อนของโลหะต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน วิธีการทดสอบนี้เป็นการจุ่มโลหะหรือโลหะผสมทั้งหมดลงในสารละลายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบด้วยวิธีการจุ่มคือ ASTM G31 ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของอุปกรณ์ปลูกฝังทางการแพทย์ โดยการวัดผลของการทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการจุ่มตามมาตรฐานจะทำโดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบ วัดขนาดหลุมที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนและวัดสมบัติเชิงกล

2. การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นเกลือ (Cabinet Testing or Salt Spray Testing)

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นเกลือเป็นวิธีการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของโลหะและความต้านทานของสารเคลือบบางชนิดที่ใช้กับโลหะ ซึ่งการเคลือบผิวเป็นกระบวนการที่ใช้ในการป้องกันการเกิดสนิมเพื่อยืดอายุการใช้งานวัสดุ และเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งมาตรฐานการทดสอบการพ่นเกลือที่ใช้กันมากที่สุดคือ ASTM B117 โดยเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบมีลักษณะเป็นตู้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้พ่นน้ำเกลือ (Fog Chamber) ประกอบไปด้วย หัวพ่นน้ำเกลือ (Spray Nozzle) และที่วางชิ้นงานทดสอบ ส่วนที่เป็นห้องเครื่อง (Machine Chamber) ประกอบไปด้วยถังใส่น้ำเกลือ (Brine Tank) พร้อมอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำเกลือ เกจวัดความชื้น (Pressure Humidifier) และเครื่องวัดอัตราการพ่นของน้ำเกลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

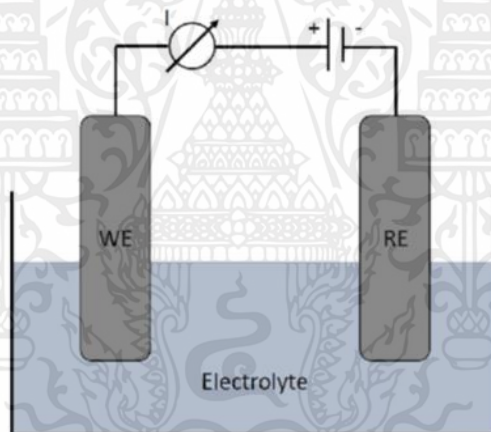
(Flow Rate Meter) นอกจากนี้ยังมีแผงควบคุมการทำงานของเครื่องที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลา และลักษณะการพ่นอย่างต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องตามมาตรฐาน

3. การทดสอบทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Test)

กระบวนการกัดกร่อนสามารถทำการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าเพื่อศึกษากลไกการกัดกร่อนของโลหะและโลหะผสมได้ซึ่งการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าเป็นการทดสอบเพื่อดูลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อน และความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอิเล็กโทรดและปริมาณของวัสดุที่ละลาย [30]

2.8.1 การทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด

การทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open Circuit Potential: OCP) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลา เป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่สนใจ โดยในการทดสอบ จะประกอบด้วยชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน Working Electrode: WE และ อิเล็กโทรด Ag/AgCl ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Reference Electrode: RE โดยไม่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า จะเป็นการทดสอบด้วยกัลวานิกเซลล์ ในการทดสอบจะจุ่มอิเล็กโทรดทั้ง 2 ลงในสารละลาย อิเล็กโทรดที่เตรียมไว้ จากนั้นจะได้กราฟ Open Circuit Potential ซึ่งเป็นกราฟที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา [31]

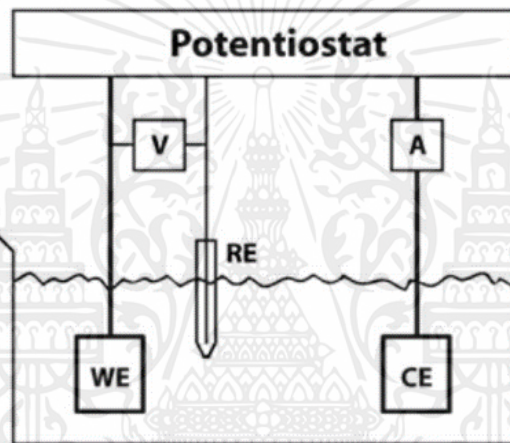


รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบ 2 อิเล็กโทรด [31]

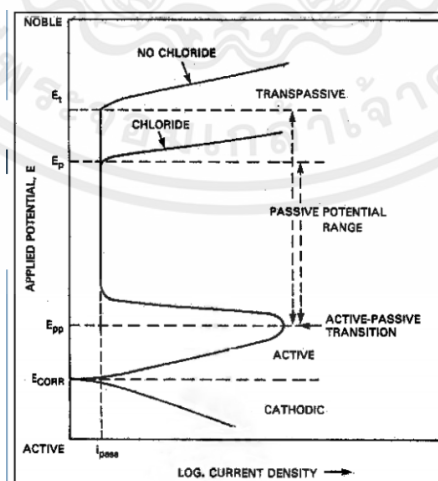
2.8.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนทิโอดนามิก โพลาริเซชัน

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนทิโอดนามิก โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พฤติกรรมของการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมที่กำหนด โดยเฉพาะโลหะหรือโลหะผสมที่มีสมบัติสภาวะกัดกร่อน-สภาวะป้องกัน (Active Passive) หรือฟิล์มบางที่มีสมบัติปกป้อง (Passive Film) โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว ประกอบด้วยชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode: WE) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการกัดกร่อนอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะของความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย ตามกำหนดขั้วอ้างอิงมาตรฐาน และมีอิเล็กโทรด Ag/AgCl ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode: RE) ที่ใช้เพื่อ

สร้างความเสถียรให้กับการวัดค่าความต่างศักย์ในระบบเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน จะเกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วทั้งสองทำให้การวัดค่าความต่างศักย์บริเวณนี้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงวัดความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยขั้วไฟฟ้านี้ต้องไม่มีกระแสที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าใช้งานไหลผ่านจากนั้นต่อให้ครบวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน และจะมีแท่งแพลทินัม (Platinum) จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดกระแส (Counter Electrode: CE) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร โดยขั้วไฟฟ้านี้จะถูกออกแบบให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่าน ได้โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อเร่งการกัดกร่อน และติดตามกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส หรือกราฟโพลาไรเซชัน ซึ่งแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ [32]



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบ 3 อิเล็กโทรด [32]



รูปที่ 2.11 กราฟเส้นโค้งพอลาไรเซชัน [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

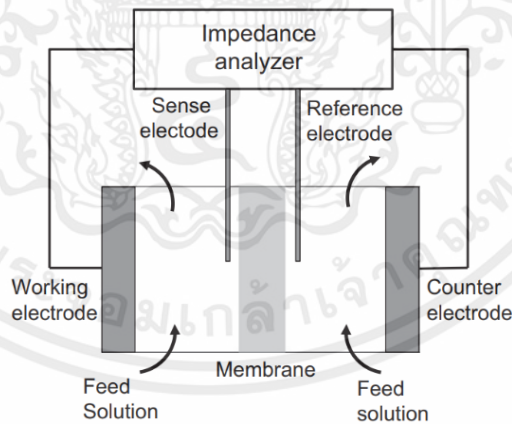
เมื่อเราทราบค่าต่าง ๆ สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการที่ 4

$$CR = K_1 \times \frac{i_{corr}}{\rho} \times EW \quad (4)$$

โดยที่	CR	=	อัตราการกัดกร่อน (mm/year)
	K_1	=	ค่าคงที่ 0.00327 (mm g/ μ A cm year)
	ρ	=	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm ³)
	i_{corr}	=	ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในการกัดกร่อน (μ A /cm ²)

2.8.3 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี

วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) เป็นวิธีการที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับหรือ รูปไซน์ในระดับมิลลิโวลต์ เพื่อรบกวนไอออนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าให้มีการสั่น แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้ารูปไซน์ที่ตอบสนองกลับมา การที่ค่ากระแสไฟฟ้ามีขนาดที่เปลี่ยนแปลง และมีเฟสที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากอุปสรรคหรือลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานโลหะที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า (Working Electrode: WE) สามารถตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะชิ้นงานโลหะที่มีการปรับปรุงผิวหน้า สามารถใช้วิธีการดังกล่าวตรวจสอบพื้นผิวแต่ละชั้น ตลอดจนหาพื้นที่ที่แต่ละชั้นปกคลุมไปบนขั้วไฟฟ้าได้ [33]



รูปที่ 2.12 การทำงานด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของชิ้นงาน และตัวสถิติทดสอบที่ใช้คือ Z หรือ T โดยการเลือกใช้ตัวสถิติทดสอบใดขึ้นอยู่กับว่าทราบความแปรปรวนของตัวอย่างงานนั้นหรือไม่ แต่ในกรณีที่ทำการศึกษาตัวอย่างชิ้นงานมากกว่า 2 กลุ่ม โดยจะทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว เช่นกรณีประชากร 3 กลุ่ม สมมติฐานเชิงสถิติเป็นดังนี้ [34]

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

ถ้าผลการทดสอบสมมติฐานปฏิเสธ H_0 จะหมายความว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะเป็น $\mu_1 = \mu_2$ หรือ $\mu_1 = \mu_3$ หรือ $\mu_2 = \mu_3$ หรือ $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ ก็ได้ ซึ่งในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของชิ้นงานกลุ่มใดไม่เท่ากันนั้นเรียกว่าการเปรียบเทียบเชิงพหุ (Multiple Comparison) และในการวิเคราะห์เราจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA)

เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้ข้อมูลแตกต่างกัน เนื่องจากการที่ข้อมูลต่างกันเพียงปัจจัยเดียวก็อาจจะส่งผลกับชิ้นงานอื่น ๆ โดยปัจจัยจะมีหลายระดับ จะเรียกว่าระดับของปัจจัยว่า ทรีทเมนต์ (Treatment) และข้อมูลจะเรียกว่า ค่าสังเกต และหน่วยแฉงนั้บที่ให้ข้อมูลจะเรียกว่า หน่วยทดลอง (Experimental Unit)

2.9.2 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA)

หลักเกณฑ์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือ แบ่งความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดออกตามสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกัน คือความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Group) และความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between Group) โดยที่ความแปรปรวนทั้งหมดจะเท่ากับผลบวกของความแปรปรวนภายในกลุ่มและความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม

โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นการศึกษาปัจจัยหรือแฟคเตอร์ (Factor) ที่มีผลทำให้ข้อมูลเกิดความแตกต่างกัน ซึ่งหากแตกต่างกันเพียงปัจจัยเดียวก็ถือว่าเกิดความแปรปรวน โดยที่ปัจจัยนั้นอาจมีหลายระดับ โดยจะเรียกระดับต่าง ๆ ของปัจจัยว่า ทรีทเมนต์ (Treatment) ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลในระดับต่าง ๆ ของปัจจัยโดยจะเรียกว่าค่าสังเกต และหน่วยแฉงนั้บที่ให้ข้อมูลว่าหน่วยทดลอง (Experimental Unit)

2.9.3 การเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison)

เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบว่าจะมีค่าเฉลี่ยของประชากร K กลุ่มแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant) ก็จะบอกเพียงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกัน แต่จะไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นคู่ไหน ต้องทำการทดสอบภายหลังการวิเคราะห์ (Post Hoc Test) โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison) ซึ่งจะมีหลากหลายวิธี

2.9.3.1 วิธี Least -Significant Different (LSD)

วิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบ LSD หรือ Fisher's Least – Significant Different เป็นเทคนิคที่ R.A. Fisher ได้พัฒนาขึ้นหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรครั้งละหลายคู่โดยใช้สูตร

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{MSE} \sqrt{\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}}$$

เมื่อ MSE = ค่าความแปรปรวนจาก One Way ANOVA
 n_i = จำนวนข้อมูลกลุ่มที่ i
 n_j = แทนจำนวนข้อมูลกลุ่มที่ j

วิธี LSD มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า LSD
2. คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย
3. นำค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ เปรียบเทียบกับ ค่า LSD
 - ถ้าค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| >$ ค่า LSD แสดงว่า $\mu_i \neq \mu_j$
 - ถ้าค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \leq$ ค่า LSD แสดงว่า $\mu_i = \mu_j$

2.9.3.2 วิธี Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

วิธี Turkey's Honestly Significant Different (HSD) จะเป็นวิธีการเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่ว่า จำนวนกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดเท่ากัน โดยมีสูตรของ Diekhoff ดังนี้

$$HSD = q_{(\alpha, df, k)} \sqrt{\frac{MSE}{n}}$$

เมื่อ q = ค่าวิกฤตของ Studentized Rough Statistic โดย $df = n - k$
 MSE = ค่าความแปรปรวน One Way ANOVA
 n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

วิธี HSD มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า HSD
2. คำนวณค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$
3. เปรียบเทียบค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ เปรียบเทียบกับ ค่า HSD
 - ถ้าค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_i \neq \mu_j$
 - ถ้าค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_i = \mu_j$

2.9.3.3 วิธี The Sheffe's Post Hoc Comparison (Sheffe's)

การเปรียบเทียบพหุคูณโดยวิธี Sheffe นั้นสามารถใช้ได้กับกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากันหรือเท่ากันก็ได้ โดยการใช้สูตรของ Byrkit

$$CV_d = \sqrt{(k-1)(F^*)(MSE) \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

- เมื่อ F^* = ค่าวิกฤตจากตาราง F โดยมี $df_1 = k-1$, $df_2 = n-k$
 MSE = ได้จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวน One Way ANOVA
 n_i = จำนวนข้อมูลกลุ่มที่ i
 n_j = จำนวนข้อมูลกลุ่มที่ j

วิธีของ Sheffe มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า CV_d
2. คำนวณค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$
3. เปรียบเทียบค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ เปรียบเทียบกับ ค่า CV_d
 - ถ้าค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \geq$ ค่า CV_d แสดงว่า $\mu_i \neq \mu_j$
 - ถ้าค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| <$ ค่า CV_d แสดงว่า $\mu_i = \mu_j$

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการรีดขึ้นรูปเย็นต่อพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงเฟสและการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในสารละลายร่างกายเทียม โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

D. Bombac และคณะ (2007) ได้กล่าวว่าโลหะที่เป็นวัสดุชีวภาพและสามารถนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ปลูกฝังทางการแพทย์ได้ จำเป็นต้องมีคุณสมบัติ ด้านทานการกัดกร่อน ด้านทานการสึกหรอ ด้านทานการเกิดออกซิเดชัน ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ไม่เป็นพิษเวลาอยู่ในร่างกายมนุษย์ และมีความแข็งแรงสูง ซึ่งโลหะที่นิยมนำมาผลิตอุปกรณ์ปลูกฝังทางการแพทย์ ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม และโลหะผสมไทเทเนียม โดยส่วนใหญ่มักถูกนำมาผลิตเป็นรากฟันเทียม ข้อเข่าเทียม และสะโพกเทียม เป็นต้น [35]

L. Liu และคณะ (2022) ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 14Cr10Mn ในสารละลาย NaCl ที่เป็นกรด 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (EBSD) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอน (XPS) และการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคการวัดอิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) จะเห็นได้ว่ากระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นจะเพิ่มปริมาณของมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปลี่ยนอัตราเสียรูปด้วยการรีดเย็นจาก 0% เป็น 20% อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น 55% และการเกิดรูพรุนจะลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้ทั้งนั้น เฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นด้วยการเสียรูปจากการรีดขึ้นรูปเย็น จะละลายได้ดีกว่าเนื่องจากมีศักยภาพต่ำกว่าเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การเสียรูปจากกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นจะ

ช่วยส่งผลให้การละลายของ Fe และ Cr เกิดได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน Cu ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวโลหะ ในกระบวนการกัดกร่อน [36]

Y. Bao และคณะ (2023) ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุชีวการแพทย์ในร่างกายมนุษย์ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ ก่อนมีการนำไปใช้ในขั้นตอนการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเทียมต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม และโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในของเหลวไขข้อของมนุษย์ (Human Synovial Fluids) ที่ใช้ตัวอย่างโดยตรงจากผู้ป่วย และมีการทดสอบด้วยวิธีการทดลองทางเคมีไฟฟ้า ได้แก่ การทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (OCP) การทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) และการวัดโพลาริเซชันโพเทนชิโอไดนามิก ผลการวิจัยพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุทั้งสองส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับตัวผู้ป่วยเอง โดยอัตราการกัดกร่อนของวัสดุทั้งสองนั้นสอดคล้องกับไอออนของโลหะที่ตรวจพบในคนไข้ที่มีการปลูกถ่ายข้อต่อ จากผลวิจัยยังพบอีกว่า ไม่เกิดความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญต่อการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) ของโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมในของเหลวไขข้อของมนุษย์ สาเหตุหลักมาจากโลหะทั้งสองแสดงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่คล้ายคลึงกันมาก หลังผ่านการทดสอบในของเหลวไขข้อของมนุษย์แล้ว โดยสรุปแล้ว กล่าวได้ว่า อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมและโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมสอดคล้องกับอัตราการปลดปล่อยไอออนของโลหะตามที่วิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้ป่วยที่มีการผ่าตัดข้อสะโพกเทียมและข้อเข่าเทียม แสดงให้เห็นว่าการวัดที่ดำเนินการวิจัยในช่วงเวลาสั้น ๆ สามารถใช้คาดการณ์พฤติกรรมระยะยาวได้ [37]

A. Igual และคณะ (2010) ได้กล่าวถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม โดยทำการศึกษาในสารละลายร่างกาย และทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนชิโอไดนามิก โพลาริเซชัน โดยศึกษาพฤติกรรมเคมีไฟฟ้าของตัวอย่างในอิเล็กโทรไลต์ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน ($-1 V_{Ag/AgCl}$, $-0.5 V_{Ag/AgCl}$, $+0.05 V_{Ag/AgCl}$, $+0.5 V_{Ag/AgCl}$ และ $+0.75 V_{Ag/AgCl}$) และมีการศึกษาด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (EIS) เพื่อศึกษาผลกระทบทางเคมีของสารละลาย และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อปริมาตรการสึกหรอ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการสึกหรอของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนผ่านจากแคโทดไปยังแอโนด (Cathodic–Anodic Transition) แต่การสึกหรอจะขึ้นอยู่กับผิวของชิ้นงาน สารละลาย และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ [38]

S. Gurel และคณะ (2022) ได้นำเสนองานวิจัยที่การทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมอย่างละเอียด เพื่อประเมินศักยภาพของตัวโลหะผสมในการนำไปใช้ในงานศัลยกรรมกระดูกและรากฟันเทียม และจากการที่มีการนำโลหะผสมไปใช้ในด้านต่าง ๆ จึงมีการทดลองเกิดขึ้นอย่างหลากหลาย เช่น การแช่แบบคงที่ (Static Immersion) การเพาะเลี้ยงเซลล์ (Cell Culture) และการฉายรังสี (Radiation Experiments) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทดลองความเข้ากันได้ทางชีวภาพทางเคมีและพฤติกรรมการปลดปล่อยไอออนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการศึกษาด้วยการทดลองการแช่แบบคงที่ในน้ำลายเทียม (Artificial Saliva: AS) ของเหลวในร่างกายจำลอง (Simulated Body Fluid: SBF) และซีรัมตัวอ่อนลูกวัว (Fetal Bovine Serum: FBS) ผลการวิเคราะห์โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียดบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทดสอบแสดงให้เห็นว่าชั้นพาสซีฟออกไซด์ (Passive Oxide Layer) และตัวไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวอย่างโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ที่แช่อยู่ใน AS SBF และ FBS เป็นเวลา 28 วัน การตอบสนองของเซลล์ที่มีชีวิตต่อโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมได้ถูกทดสอบโดยใช้การทดลองเพาะเลี้ยงเซลล์ โดยหลักฐานการมีชีวิตและการแพร่กระจายของเซลล์สามารถสนับสนุนผลการทดลองความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพของโลหะผสม ทั้งนี้ทั้งนั้น ผลลัพธ์ของการทดลองสามประเภทที่แตกต่างกันดังที่รายงาน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่ตรวจสอบในการศึกษานี้มีศักยภาพสำคัญมากที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุปลูกถ่ายที่ปลอดภัย ในการปลูกถ่ายหรือศัลยกรรม ไม่ว่าจะเป็นทางทันตกรรมหรือทางกระดูกและข้อ (Orthopedic) [39]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมโดยการใช้การรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ต่างกัน

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
2. การรีดขึ้นรูปเย็น
3. การทดสอบการกัดกร่อน
4. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
5. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความแข็ง
6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ
7. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนเป็นโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมซึ่งเป็นโลหะผสมตามมาตรฐาน ASTM F799 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo Alloys) ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

องค์ประกอบของโลหะผสม	Co	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	Fe	C	N
Co-Cr-Mo	59	30	5.9	1	1	1	1.5	0.35	0.25

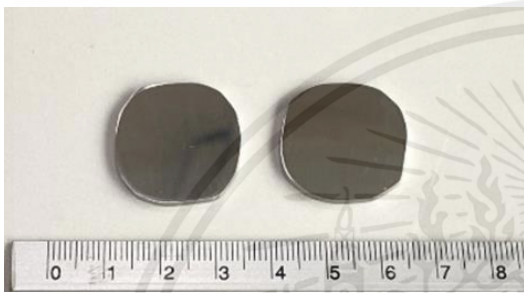
3.1.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบจะเริ่มจากการ นำโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo Alloys) ตามมาตรฐาน ASTM F799 ไปทำการตรึงเฟสเพื่อแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมให้อยู่ที่เฟสแกรมมา ด้วยการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizing Heat Treatment) จากนั้นนำชิ้นงานไปตัดและนำชิ้นงานไปขัดเพื่อให้ออกไซด์ออกไปจากชิ้นงาน เพื่อเตรียมชิ้นงานให้พร้อมกับการรีดขึ้นรูปเย็น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1.1 การอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizing Heat Treatment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 26 ศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization Heat Treatment) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่เราต้องการจากแผนภาพเฟส จะเห็นได้ว่า ในการผลิตโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิห้องถึง 900 องศาเซลเซียส จะทำให้โลหะผสมมีโครงสร้างเป็น Hexagonal Closed Pack (HCP) และที่อุณหภูมิ 900-1400 องศาเซลเซียส จะทำให้โลหะผสมจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Face Centered Cubic (FCC) ซึ่งเราต้องการให้โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมมีโครงสร้างเป็น Face Centered Cubic (FCC) โดยเราจะนำชิ้นงานไปอบที่ 1150 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และมีก๊าซ Ar ไหลผ่านตลอด เพื่อไม่ให้ออกไซด์เกิดกับอากาศภายนอก หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการชุบแข็งเป็นการแช่ในน้ำที่เย็นอยู่ เพื่อเป็นการหยุดเฟสของชิ้นงานให้อยู่ที่เฟสเกรนมา



รูปที่ 3.1 ก่อนการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน

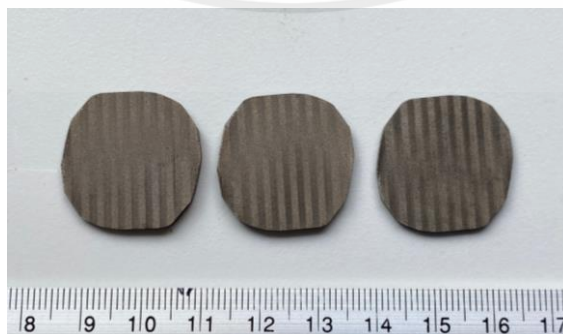


รูปที่ 3.2 หลังการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานก่อนนำไปอบจะมีความใสและค่อนข้างมีความวาว แต่เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizing Heat Treatment) ชิ้นงานจะเปลี่ยนเป็นสีที่มีความเข้มขึ้นและความมันวาวของชิ้นงานก็หายไปเกิดจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง

3.1.1.2 การตัดชิ้นงานทดสอบ

การตัดชิ้นงานจะตัดชิ้นงานด้วยวิธี Wire Cut ด้วยเครื่อง Wire EDM Machining โดยจะตัดชิ้นงานที่ไม่ต้องผ่านการรีดที่ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร และตัดชิ้นงานที่ต้องนำไปด้วยความหนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3

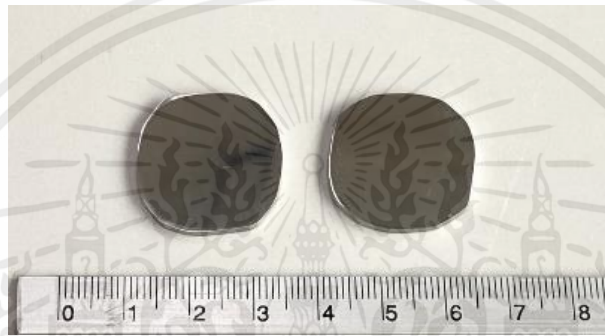


รูปที่ 3.3 โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมหลังจากการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 การขัดชิ้นงานทดสอบ

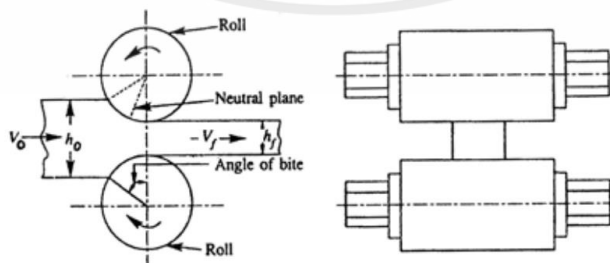
สำหรับการขัดชิ้นงานจะเริ่มจากการขัดเพื่อให้ออกไซด์ออกไปจากชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 และเริ่มขัดเพื่อให้เห็นโครงสร้างที่ชัดเจนด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 1200 และ 2500 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาขัดต่อด้วยผงขัดอลูมินาขนาด $1\ \mu\text{m}$ และ $3\ \mu\text{m}$ จากนั้นก็นำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยเอทานอลแล้วเป่าให้แห้งตามรูปที่ 3.4 จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการรีดขึ้นรูปเย็น โดยในการรีดขึ้นรูปแบบเย็นจะทำให้คุณสมบัติต่ำ เนื่องจากไม่ต้องการให้ชิ้นงานเกิดผลึกใหม่ ส่วนใหญ่จะเป็นการแปรรูปที่อุณหภูมิห้อง หรือสูงเล็กน้อยแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation Temperature) เพื่อให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation)



รูปที่ 3.4 โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมหลังจากการขัด

3.2 การรีดขึ้นรูปเย็น

การรีดขึ้นรูปเย็นจะต้องวัดขนาดชิ้นงานก่อนการรีด และคำนวณหาความหนาของชิ้นงานหลังจากการรีดและนำชิ้นงานเข้าไปสัมผัสกับชุดลูกกลิ้งและชิ้นงานจะถูกดึงเข้าไปยังชุดลูกกลิ้งโดยอาศัยความเสียดทานตามรูปที่ 3.5 และจะทำการหยอดน้ำมันเมื่อมีแรงเสียดทานด้านมากเกินไป จากนั้นชิ้นงานจะถูกกดเพื่อให้ได้ขนาดสุดท้ายที่ต้องการ โดยความหนาของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความหยาบของลูกกลิ้ง ถ้าลูกกลิ้งมีความหยาบจะสามารถลดขนาดได้มากกว่าลูกกลิ้งที่มีผิวละเอียด



รูปที่ 3.5 กระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนจะใช้มาตรฐาน ISO 10993-15:2000 (E) ที่เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของวัสดุที่นิยมใช้งานในทางชีวการแพทย์ ในมาตรฐานจะระบุถึง การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการกัดกร่อน การเตรียมสารละลายรวมถึงบอกวิธีการทดสอบการกัดกร่อน

3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ก่อนทำการทดสอบการกัดกร่อน จะนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยการจุ่มเอทานอล 15 นาที และกำหนดพื้นผิวชิ้นงานสำหรับการทดสอบให้มีขนาดพื้นที่ผิวสำหรับทดสอบ 1 ตารางเซนติเมตร

3.3.2 การเตรียมสารละลาย

ทำการเตรียมสารละลายของเหลวในร่างกายเทียม Simulated Body Fluid (SBF) โดยจะทำการเตรียมทั้งหมด 4 ลิตร ซึ่งในการทำสารละลายจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 37.5 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO 23317 ในการเตรียมสารละลายจะเริ่มจากการตวงน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) ที่ปริมาตร 3844 มิลลิลิตร และชั่งสารต่าง ๆ ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลในรูปที่ 3.8 และใช้สารละลายตามรูปที่ 3.6 ด้วยปริมาณตามตารางที่ 3.2 เมื่อเตรียมส่วนผสมเรียบร้อยแล้ว นำน้ำปราศจากไอออนที่ตวงไว้มาเขย่าผสมกับสารทีละชนิดตามลำดับโดยต้อง เขย่าให้ละลายเข้ากันดีถึงจะใส่สารต่อไปโดยใช้เครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็กตามรูปที่ 3.7 ใส่สารประกอบให้ครบตามตาราง จากนั้นทำการปรับ PH ให้เป็น 7.4 ด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนสารที่ใช้ในการทำสารละลายของเหลวเทียมในร่างกาย

Order	Regent	Name	Amount
1	NaCl	Sodium Chloride	33.40 g
2	NaHCO ₃	Sodium Bicarbonate	1.42 g
3	KCL	Potassium Chloride	0.90 g
4	K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	Potassium Phosphate Dibasic Trihydrate	0.92 g
5	MgCl ₂ ·6H ₂ O	Magnesium Chloride Hexahydrate	1.24 g
6	1.0MHCL	1 M Hydrochloric Acid	156 ml
7	CaCl ₂	Calcium Chloride	1.168 g
8	Na ₂ SO ₄	Sodium Sulfate	0.288 g
9	Tris	Tris(hydroxymethyl) Aminomethane	24.47 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 สารละลายที่ใช้ในการทำ SBF



รูปที่ 3.7 เครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็ก

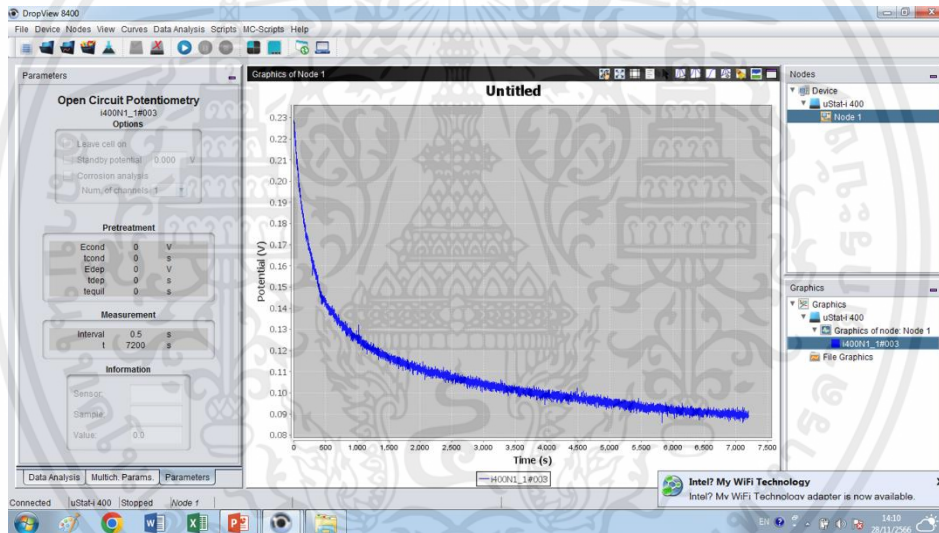


รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 30 วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open Circuit Potential: OCP) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่สนใจกับ อิเล็กโทรดอ้างอิง โดยไม่มีการใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานแช่เอทานอลเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นซับให้ชิ้นงานแห้ง และนำชิ้นงานไปใส่ในที่ยึดชิ้นงานจากนั้นนำสารละลายของเหลวในร่างกายเทียม (Simulated Body Fluid, SBF) ใส่ในบีกเกอร์เพื่อปรับอุณหภูมิให้ถึง 37 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในร่างกายมนุษย์จากนั้นเปิดเครื่องโพเทนทิโอดนามิก เลือกโหมด Open Circuit Potentiometry และตั้งค่าเวลาเป็น 7200 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบลงในบีกเกอร์โดยให้ชิ้นงานอยู่ระหว่าง อิเล็กโทรดอ้างอิง และ อิเล็กโทรดกระแส ตรวจสอบว่าชิ้นงานอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จากนั้นกดให้โปรแกรมเริ่มการเก็บข้อมูลหลังจากโปรแกรมทำงานเสร็จจะได้ข้อมูลตามรูปที่ 3.9

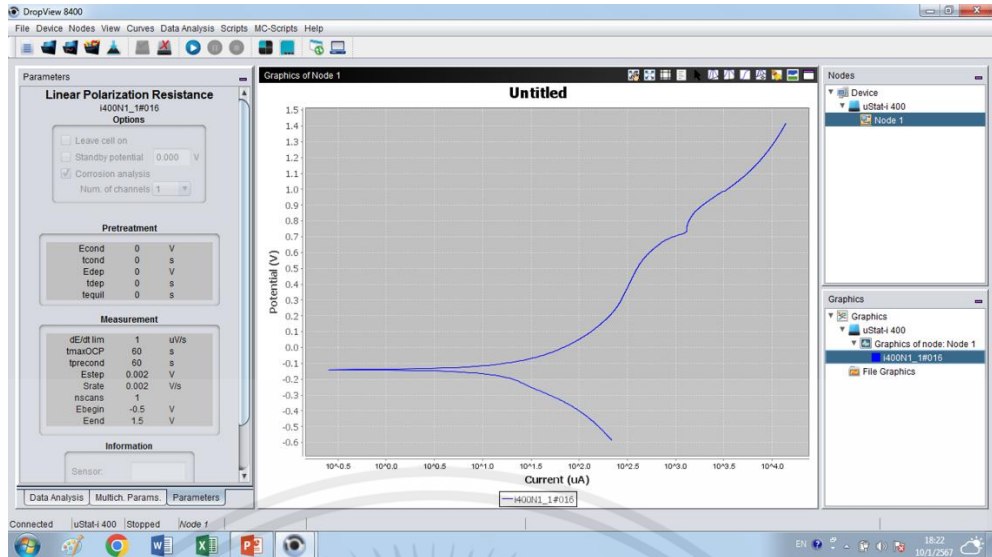


รูปที่ 3.9 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด

3.3.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิก โพลาริเซชัน

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิก โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่ทำต่อจากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open Circuit Potential) โดยเริ่มจากการเลือกโหมด Linear Polarization Resistance และตั้งค่าช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential Range) ให้เริ่มจาก -0.5 จนถึง 1.5 $V_{Ag/AgCl}$ จากนั้นกดให้โปรแกรมเริ่มเก็บข้อมูลหลังจากโปรแกรมทำงานเสร็จจะได้ข้อมูลตามรูปที่ 3.10

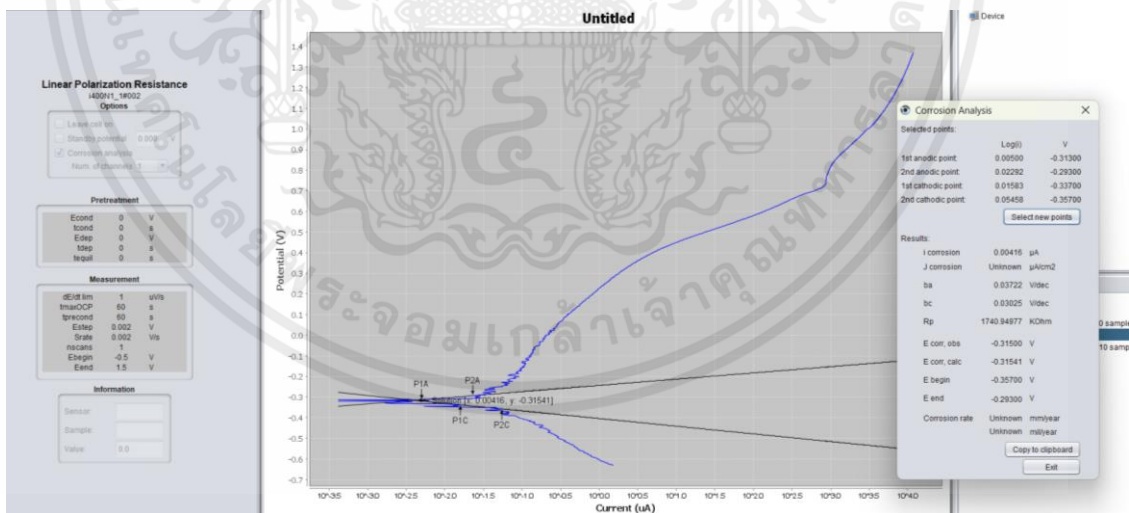
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิก โพลาริเซชัน

3.3.4.1 การตัดกราฟ Tafel Curves

หลังจากการได้ Tafel curves จากการทำโพเทนทีโอไดนามิก โพลาริเซชันแล้วเราจะทำการเลือกจุดทั้งหมด 4 จุดเพื่อเป็นการตัดสโลปหาค่า E_{corr} และ I_{corr} โดยจะทำการเลือกจุดให้ได้ค่า E_{corr} และ I_{corr} ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่โปรแกรมคำนวณให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการเลือกจุดตัดหาค่าความชัน E_{corr} และ I_{corr}

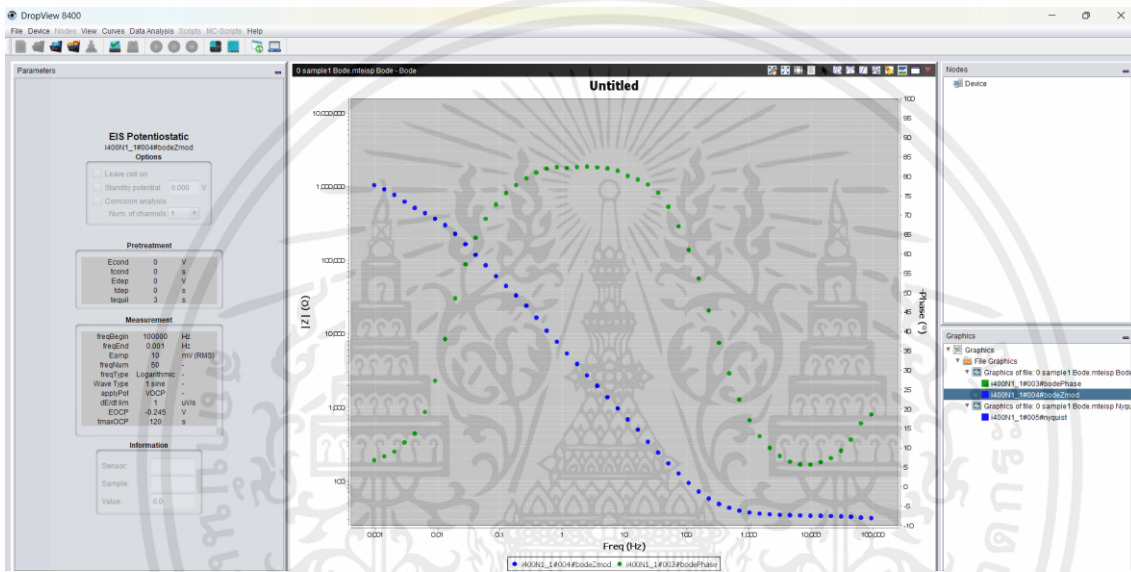
3.3.4.2 การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน

เมื่อทราบค่าที่ต้องการเรียบร้อยแล้วจะนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน ซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ 4 และนำค่าอัตราการกัดกร่อนมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อหาการกัดกร่อนของชิ้นงาน

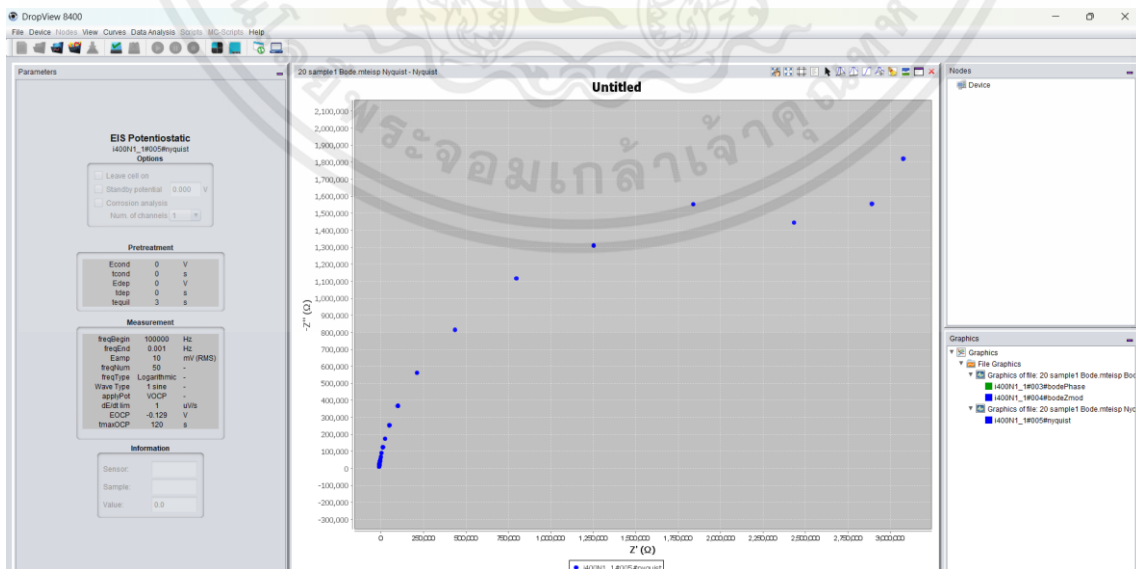
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) เป็นเทคนิคการวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากการส่งผ่านอิเล็กตรอน ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่ทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open Circuit Potential) โดยเริ่มจากการเลือกโหมด EIS และตั้งค่าช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential Range) ให้เริ่มจาก -1.5 จนถึง 1.5 $V_{Ag/AgCl}$ และช่วงความถี่ (Frequency) ให้เริ่มจาก 0.01 จนถึง 10^5 Hz และใช้ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ที่ ± 0.01 V จากนั้นกดโปรแกรมให้เริ่มการเก็บข้อมูลหลังจากโปรแกรมทำงานเสร็จจะได้ข้อมูลตามรูปที่ 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างโปรแกรมขณะทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย XRD (X-Ray Diffractometer)

นำตัวอย่างชิ้นงานล้างทำความสะอาดด้วยการเขย่าเอทานอลเป็นเวลา 10 นาทีและเช็ดชิ้นงานให้แห้ง จากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานใส่ในแท่นบรรจุตัวอย่าง (Sample Holder) แล้วใช้แท่นโลหะกดตัวอย่างให้แน่นกับแท่นบรรจุ จากนั้นทำแท่นบรรจุตัวอย่างไปวางที่แท่นวางตัวอย่างของเครื่อง XRD โดยเราจะกำหนดเงื่อนไขตามตารางที่ 3.3 โดยจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม EVA12 จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลในแฟ้ม JCPDS-PDF เพื่อเป็นการตรวจสอบฟิสิกของชิ้นงานตัวอย่างว่ามีเฟสอะไรเป็นส่วนประกอบบ้าง

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขของการใช้เครื่อง XRD

X-Ray	40 kV , 15 mA
Target Source	Cu ($k\alpha$)
Duration Time	10 deg/min
Step Width	0.02 deg
Scan Range	10 - 90 deg

3.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของวัสดุเป็นการวัดค่าจากความสามารถในด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ในการวัดค่าความแข็งแรงถือว่าเป็นค่าพื้นฐานที่สามารถทำให้เห็นคุณสมบัติโดยรวมของชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลมีหลายวิธีแต่เราจะใช้ทั้งหมดสองวิธีคือการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบ Vickers Hardness Test สำหรับบริเวณ ผิวข้าง ของชิ้นงาน และวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบ Brinell Hardness Test สำหรับบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน

3.5.1 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Vickers

เป็นการทดสอบความแข็งด้วยหัวกดเพชร ฐานเป็นพีระมิดสี่เหลี่ยม ปลายกดทำมุม 136 องศา ทำการทดสอบน้ำหนักกดที่ 1 กิโลกรัม กดค้างไว้เป็นเวลา 10 วินาที ทำการกดเพื่อวัดค่าชิ้นงานบนพื้นที่ภาคตัดขวาง การรีด โดยแต่ละจุดจะห่างกัน 10 ไมโครเมตรต่อจุด ซึ่งค่าความแข็งแรงจะสามารถคำนวณได้จากแรงกดของค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิว

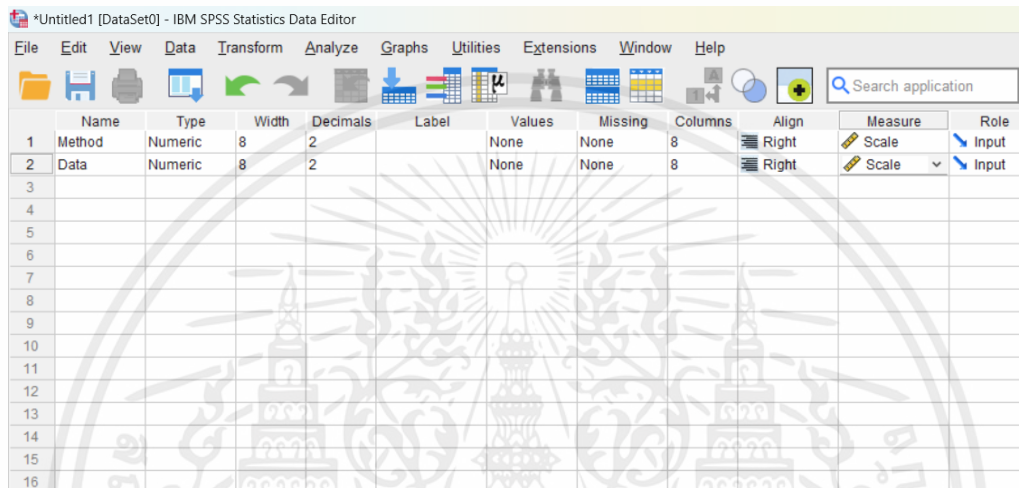
3.5.2 การวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Brinell

เป็นการทดสอบความแข็ง โดยอาศัยการกดของหัวกดทรงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ลงบนบนพื้นที่ภาคตัดขวางการรีดด้วยแรงกด 62.5 kgf โดยจะทำการกดค้างไว้เป็นเวลา 10 วินาที ชิ้นงานแต่ละเปอเซ็นต์การรีดจะทำการกดบริเวณผิวทั้งหมด 3 จุด ซึ่งที่ค่าความแข็งสามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของแรงกดส่วนด้วยพื้นที่ของแรงกดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

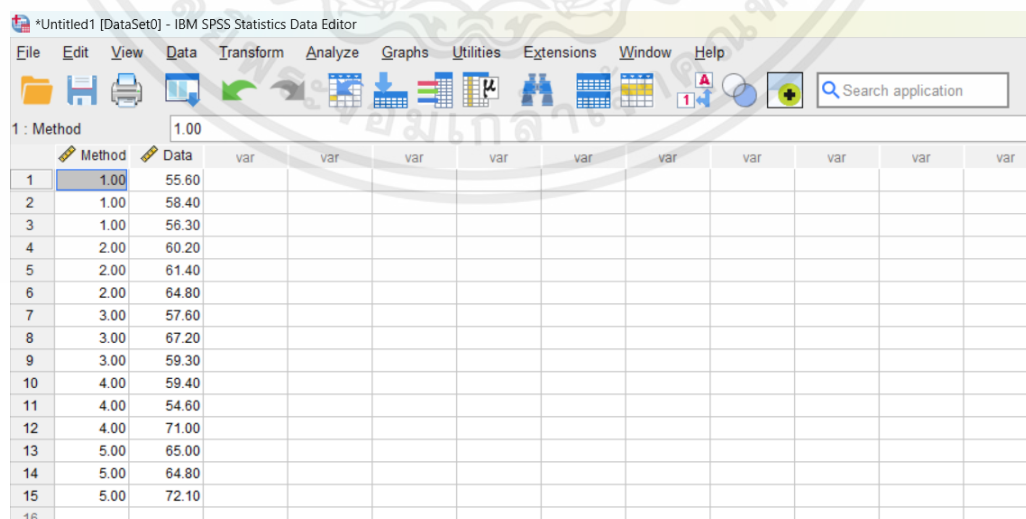
การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ ด้วยโปรแกรม Statistical Package Science (SPSS) เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลทั้งหมด ขั้นตอนของโปรแกรมมีดังนี้

1. เมื่อเริ่มเข้าสู่การทำงาน โปรแกรม SPSS จะแสดงหน้าต่างดังรูปภาพที่ จากนั้นกดที่ Variable View เป็นการสร้างตัวแปร Method เพื่อเก็บข้อมูล และตัวแปร Data ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การสร้างตัวแปรในโปรแกรม

2. จากนั้นนำ Data ที่ได้จากการสร้างตัวแปรไปจัดใน Data View โดยที่จะเรียงข้อมูลที่ช่อง Method ดังแสดงในรูปที่ 3.15

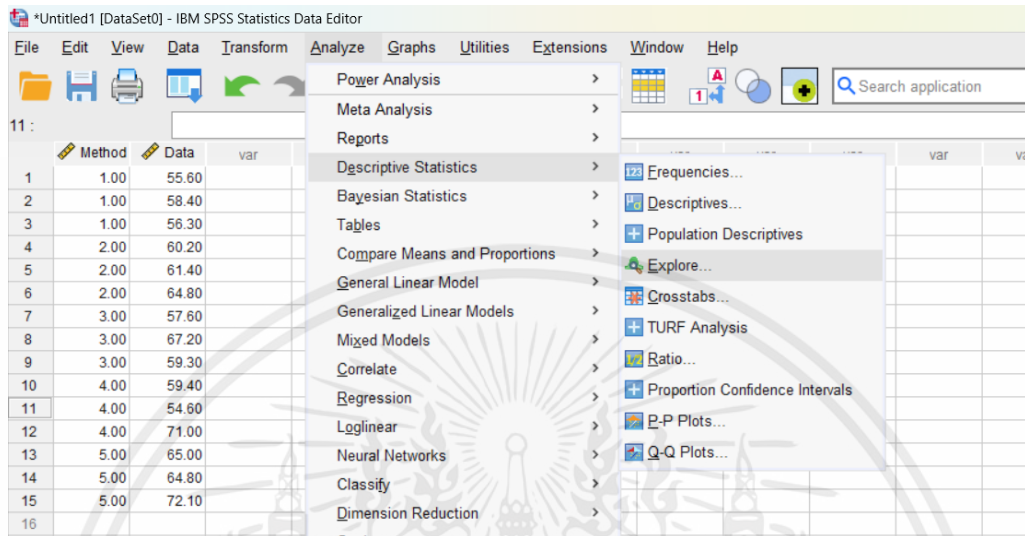


	Method	Data	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1	1.00	55.60												
2	1.00	58.40												
3	1.00	56.30												
4	2.00	60.20												
5	2.00	61.40												
6	2.00	64.80												
7	3.00	57.60												
8	3.00	67.20												
9	3.00	59.30												
10	4.00	59.40												
11	4.00	54.60												
12	4.00	71.00												
13	5.00	65.00												
14	5.00	64.80												
15	5.00	72.10												
16														

รูปที่ 3.15 การใส่ข้อมูลในโปรแกรม

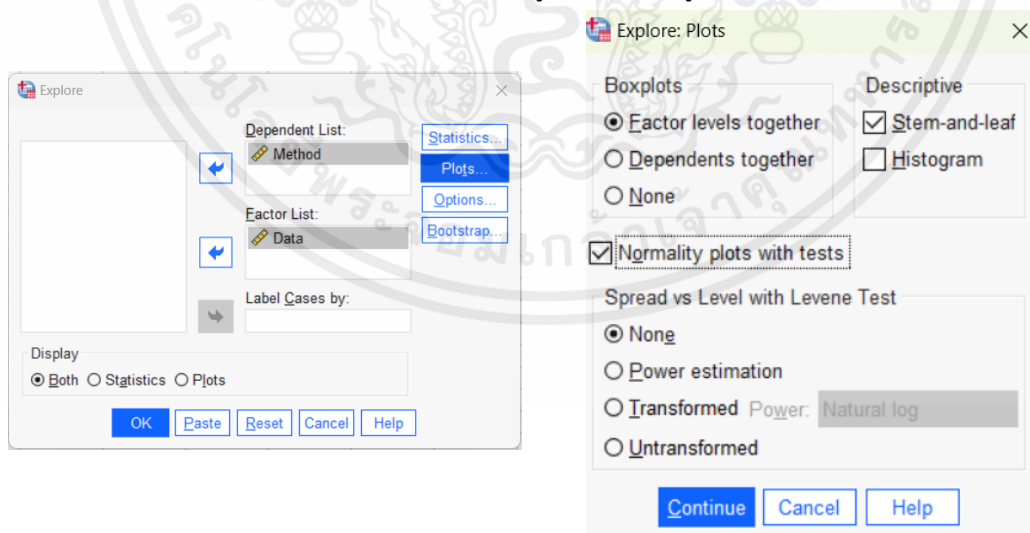
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 35 ศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการวิเคราะห์ลักษณะการแจกแจงข้อมูล โดยกดที่ Analyze เลือกฟังก์ชัน Descriptive Statistic และ Explore ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเลือกคำสั่งในการตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล

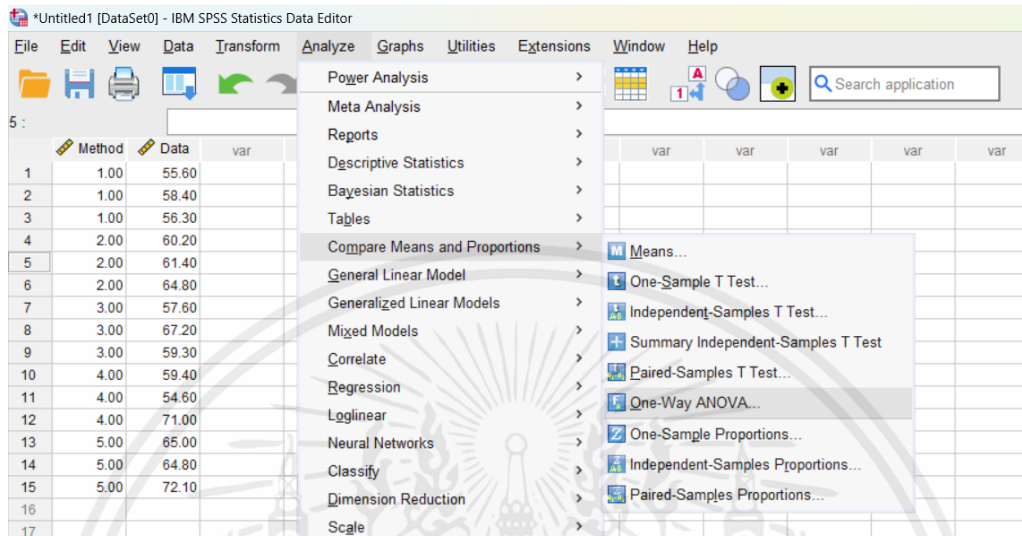
4. เลือกตัวแปร Data เป็น Dependent List และตัวแปร Method เป็น Factor List จากนั้นกด Plots และเลือก Normality Plots with Test จากนั้นทำการตกลงโดยการกด Continue และกด OK เพื่อเป็นการวิเคราะห์ลักษณะการแจกแจงของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเลือกตัวแปรและคำสั่งวิเคราะห์การแจกแจงข้อมูล

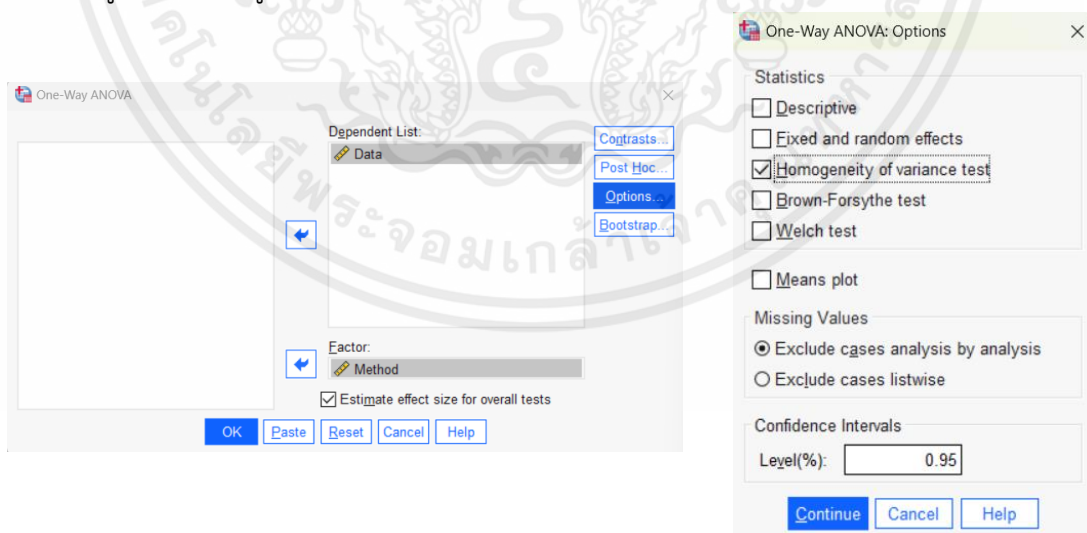
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 36 ศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากนั้นจะเริ่มทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยการกดที่คำสั่ง Analyze เลือก Compare Means and Proportions และเลือกการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ One Way ANOVA ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การเลือกคำสั่งวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

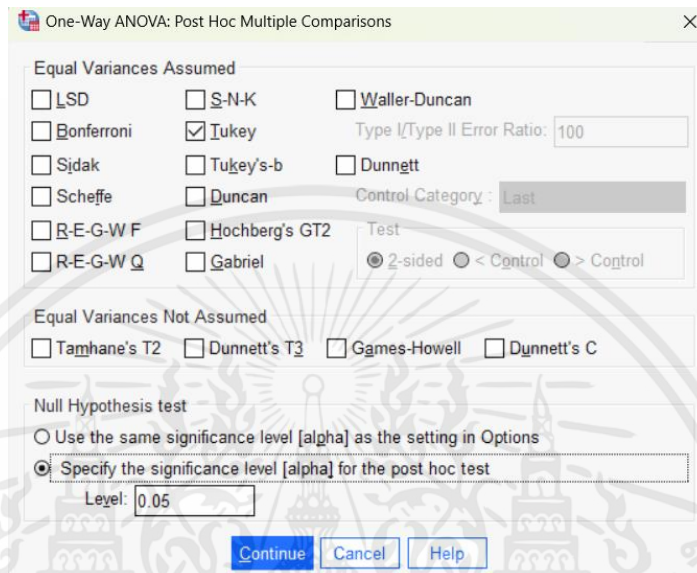
6. ทำการเลือกตัวแปร Data ให้เป็น Dependent List และตัวแปร Method ให้เป็น Factor List และทำการเลือก Options เป็น Homogeneity of Variance Test เพื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การเลือกคำสั่งวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One Way ANOVA) โดยทำการเลือกเมนู Analyze เลือก Compare Mean และเลือก One Way ANOVA ทำการกำหนดวิธีการเทียบพหุคูณ (Multiple Comparisons) โดยทำการกด Post และเลือกวิธีการวิเคราะห์แบบ Tukey ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จากนั้นทำการตกลงโดยการคลิก Continue และ OK ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 การเลือกวิธีการเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

Multiple Comparisons						
Dependent Variable: Data						
Tukey HSD						
(I) Method	(J) Method	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	2.00	-.536667	4.04052	.682	-18.6643	7.9310
	3.00	-4.600000	4.04052	.784	-17.8977	8.6977
	4.00	-4.900000	4.04052	.745	-18.1977	8.3977
	5.00	-10.533333	4.04052	.142	-23.8310	2.7643
2.00	1.00	.536667	4.04052	.682	-7.9310	18.8643
	3.00	.766667	4.04052	1.000	-12.5310	14.0643
	4.00	.466667	4.04052	1.000	-12.8310	13.7643
	5.00	-5.166667	4.04052	.709	-18.4643	8.1310
3.00	1.00	4.600000	4.04052	.784	-8.6977	17.8977
	2.00	-.766667	4.04052	1.000	-14.0643	12.5310
	4.00	-.300000	4.04052	1.000	-13.5977	12.9977
	5.00	-5.933333	4.04052	.602	-19.2310	7.3643
4.00	1.00	4.900000	4.04052	.745	-8.3977	18.1977
	2.00	-.466667	4.04052	1.000	-13.7643	12.8310
	3.00	.300000	4.04052	1.000	-12.9977	13.5977
	5.00	-5.633333	4.04052	.644	-18.9310	7.6643
5.00	1.00	10.533333	4.04052	.142	-2.7643	23.8310
	2.00	5.166667	4.04052	.709	-8.1310	18.4643
	3.00	5.933333	4.04052	.602	-7.3643	19.2310
	4.00	5.633333	4.04052	.644	-7.6643	18.9310

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 38 ศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาในการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมโดยใช้การรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ต่างกันของปริญาณิพนธ์ฉบับนี้ แสดงดังตารางที่ 3.4


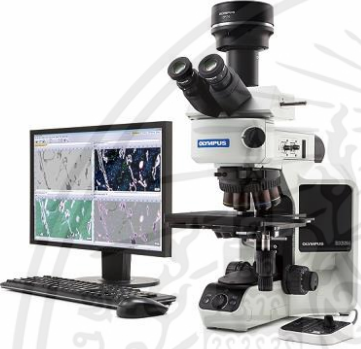
ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
	โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ASTM F799
	โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ASTM F799 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น 10%
	โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ASTM F799 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น 15%




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
	<p>โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ASTM F799 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น 20%</p>
	<p>โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ASTM F799 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น 25%</p>
	<p>เครื่องขัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Struers รุ่น Labpol-1</p>
	<p>กระดาษทราย</p>





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
	<p>ผงอลูมินา (Aluminum Oxide) ขนาด 0.1 และ 0.3 ไมครอน</p>
	<p>กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical Microscope รุ่น Olympus BX53M</p>
	<p>เครื่อง X-Ray Diffractometer ยี่ห้อ Rigaku รุ่น MiniFlex</p>





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
	<p>เครื่อง Micro Vicker Hardness ยี่ห้อ Mitutovo รุ่น HM Series</p>
	<p>เครื่อง Brinell Hardness</p>
	<p>เครื่องโพเทนทีโอไดนามิก ยี่ห้อ Metrohm dropSens รุ่น UStat-I 400</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
	<p>เครื่องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์ (3D Measuring Laser Microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น LEXTOLS5000</p>
	<p>บีกเกอร์</p>
	<p>ไมโครมิเตอร์ดิจิทัล (Micrometer Digital)</p>
	<p>เครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ STRTOURIUS รุ่น BSA2245-CW</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
	<p>ขวดแก้วใสสำหรับบรรจุสารเคมี</p>
	<p>เครื่องวัดค่า PH</p>
	<p>อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Cryste Water Bath Puribath)</p>
	<p>เครื่องรีดเย็น</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

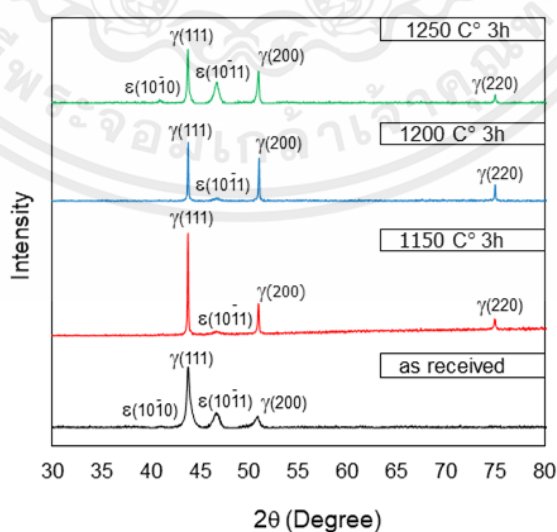
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมโดยการใช้การรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ต่างกัน ซึ่งผลของการดำเนินงานมีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเชิงกลของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน
2. ผลการวิเคราะห์การกัดกร่อน

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสมบัติเชิงกล

4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการอบชุบต่อโครงสร้างผลึก

จากการนำชิ้นงานทดสอบไปวิเคราะห์โครงสร้างของพื้นผิววัสดุก่อนการรีดด้วยเทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม โดยจะใช้ตัวอย่างด้านหน้าของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 1150 1200 และ 1250 °C พิกของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบอยู่ตำแหน่งเดียวกัน และเมื่อนำพิกไปวิเคราะห์จะทำให้ทราบว่า พิกที่ 1 และ พิกที่ 3 เป็นพิกของเฟสออสเทนไนต์ และมีรูปแบบผลึกแบบ FCC ส่วนพิกที่ 2 พิกที่ 4 และพิกที่ 5 เป็นพิกของเฟสเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะมีรูปแบบผลึกแบบ BCC และเมื่อนำพิกที่ 3 และพิกที่ 4 ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ HCP จากการคำนวณอุณหภูมิที่เหลือเฟส HCP น้อยที่สุดคือ 1150 °C เหลือเพียง 9.17% ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1

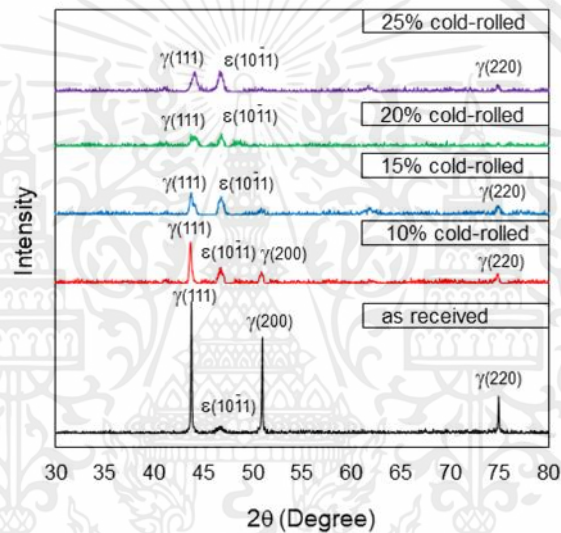


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ที่อุณหภูมิ 1150 1200 และ 1250 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลกระทบของการรีดเย็นต่อโครงสร้างผลึก

จากการนำชิ้นงานทดสอบไปวิเคราะห์โครงสร้างของพื้นผิววัสดุหลังจากการรีดขึ้นรูปเย็นด้วยเทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม โดยจะใช้ตัวอย่างด้านหน้าของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 1150 °C และนำไปรีดที่อัตราการรีด 10% 15% 20% และ 25% มาทำการตรวจสอบ จะพบว่า พีคที่ 2 4 และพีคที่ 5 เป็นพีคของเฟสแกมมา ซึ่งจะมีรูปแบบผลึกแบบ FCC จะมีความเข้มข้นของพีคลดลง และในพีคที่ 2 ตั้งแต่ 15% ขึ้นไป จะพบพีคของเฟสเอปไซลอนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการลดความหนา เนื่องจากเกิดการเสีรูปร่างจากความเครียด (Strain-Induced Martensitic Transformation) ในระหว่างการรีด ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.2

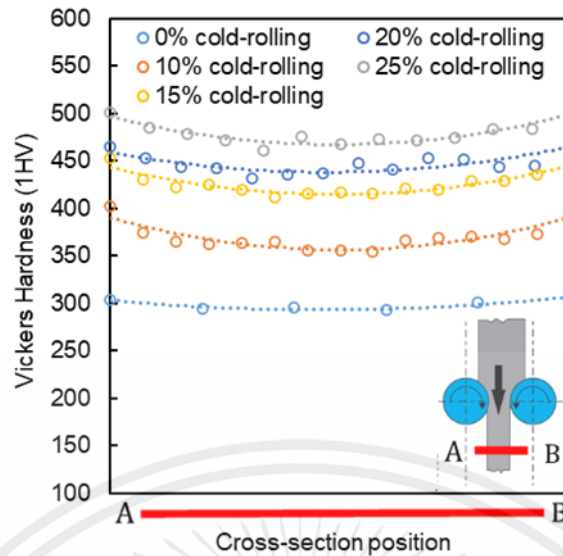


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD หลังจากการรีดขึ้นรูปเย็น

4.1.3 ผลกระทบของการรีดเย็นต่อสมบัติทางกล

4.1.3.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Vickers

ค่าความแข็งของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมบริเวณผิวข้างที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดจะมีความแข็งน้อยที่สุดและเมื่อทำการรีดเย็นด้วยเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่เพิ่มขึ้นก็จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความแข็งบนพื้นที่ภาคตัดขวางของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม

4.1.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งด้วยวิธี Brinell

ค่าความแข็งของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมบริเวณผิวหน้าที่ไม่ผ่านกระบวนการรีดจะมีค่าความแข็งน้อยที่สุดและเมื่อทำการรีดเย็นด้วยเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่เพิ่มขึ้นก็จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ

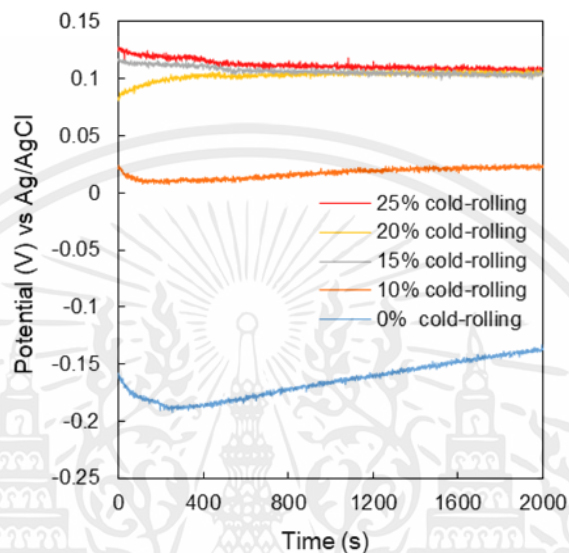
	ค่าความแข็ง (HV)				
	0%	10%	15%	20%	25%
ชั้นที่ 1	271.5	296.1	339.6	345.2	349.6
ชั้นที่ 2	263.2	313.4	325.6	340.2	359.5
ชั้นที่ 3	254.6	286.2	320.3	333.6	359.5
ค่าความแข็งเฉลี่ย	263.1	298.6	328.5	339.7	356.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.5	13.7	10.0	5.8	5.7

4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อน

4.2.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด

เมื่อทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open Circuit Potential) เป็นเวลา 7200 วินาทีหรือ 2 ชั่วโมงโดยที่ 1 ชิ้นงานทดสอบจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งจากนั้นจะได้ข้อมูลเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาของชิ้นงาน โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่แตกต่างกัน ที่ 0% 10% 15% 20% และ 25% ตามรูปที่ 4.4 ซึ่งเมื่อนำกราฟของชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถวิเคราะห์ค่า OCP ของกราฟได้ซึ่งกราฟทั้ง 5 เส้น ค่อนข้างที่จะมีความเสถียร ในช่วง 500 วินาทีสุดท้าย โดยค่า OCP ของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดจะมีค่า -0.13834 ค่า OCP ของชิ้นงานที่รีด 10% จะมีค่า 0.022825 ค่า OCP ของชิ้นงานที่รีด 15% จะมีค่า 0.10372 ค่า OCP ของชิ้นงานที่รีด 20% จะมีค่า 0.104937 ค่า OCP ของชิ้นงานที่รีด 25% จะมีค่า 0.10811 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์การรีดเพิ่มขึ้นค่า OCP ของชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดขึ้นรูปชิ้นงานแบบเย็นสูงขึ้น แนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนจะมีค่าน้อยลง

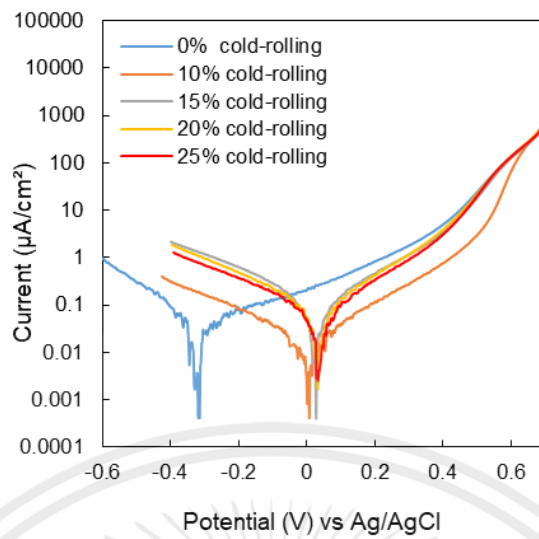


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%

4.2.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน

จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) จะได้ข้อมูลที่เป็นกราฟเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะนำกราฟของชิ้นงานทดสอบโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่แตกต่างกัน มาซ้อนทับกัน จากนั้นนำค่าจากกราฟไปพล็อตด้วยลอการิทึมสเกลจะทำให้ได้กราฟทาเฟล (Tafel Curve) ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในช่วงรับอิเล็กตรอนฝั่งแคโทด (Cathode) และ ช่วงที่เสียอิเล็กตรอนในฝั่งแอโนด (Anode) ได้ง่ายขึ้น จะเห็นได้ว่าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีดจะเกิดการเสีย อิเล็กตรอนหรือเข้าสู่ช่วงแอโนด (Anode) เร็วที่สุด และในเปอร์เซ็นต์รีดที่เพิ่มขึ้นจะเกิดช่วงแอโนด (Anode) ได้ช้าลงตามลำดับ จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) จากกราฟทาเฟล โดยการตัดกราฟจากการทำโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชันแล้วทำการเลือกจุด 4 จุดเพื่อตัดสโลปหาค่า E_{corr} และ I_{corr} โดยการหาค่าให้ใกล้เคียงที่สุดจากนั้นจะสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนจะเป็นไปดังสมการที่ 4 โดยอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์รีดที่ต่างกัน จะถูกแสดงค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานไว้ในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

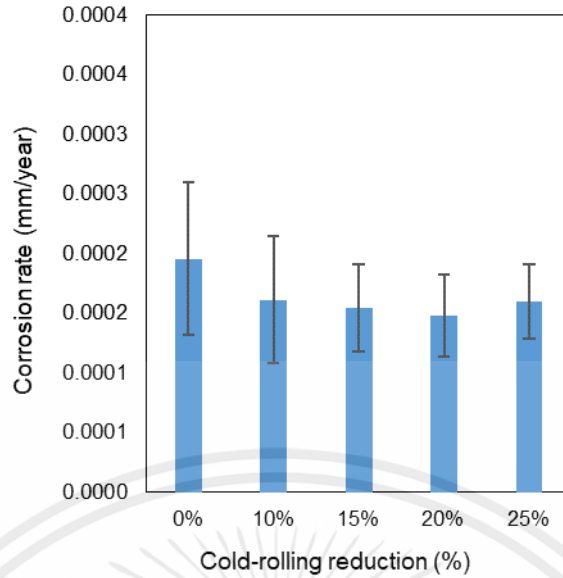


รูปที่ 4.5 กราฟทาเฟล (Tafel Curve) ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%

ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน

	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	EW (g)	Density (g/cm^3)	CR (mm/year)
0%	0.01468	33.77	8.29	0.000196
10%	0.01212	33.77	8.29	0.000161
15%	0.59038	33.77	8.29	0.000154
20%	0.01113	33.77	8.29	0.000148
25%	0.01201	33.77	8.29	0.000159

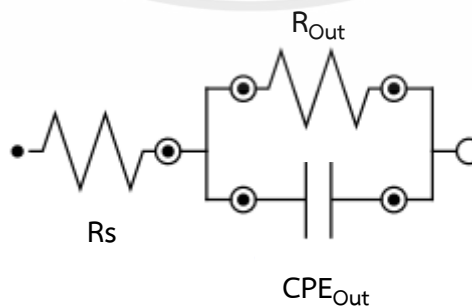
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



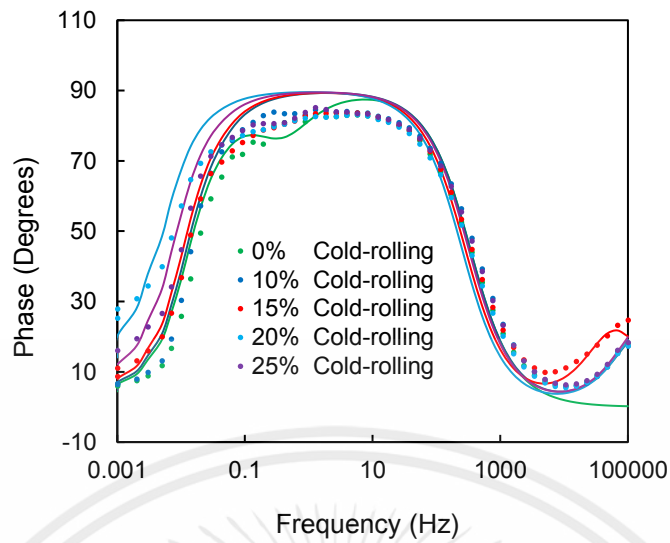
รูปที่ 4.6 อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%

4.2.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี

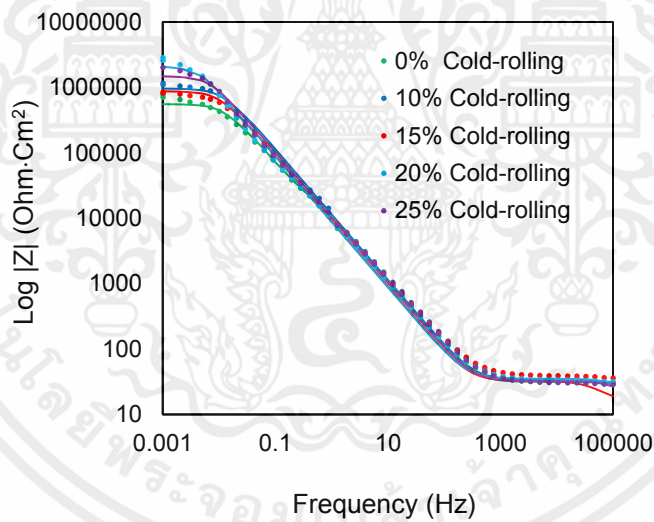
จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy) จะได้ข้อมูลที่เป็นกราฟเส้นโค้ง Bode Phase Bode Zmod และ Nyquist หลังจากนั้นจะนำกราฟของชิ้นงานทดสอบโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัม ที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่แตกต่างกัน มาซ้อนทับกัน และนำวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 4.7 มาทำการฟิตกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นกราฟ Nyquist จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเพิ่มขึ้น จุดตัดวงกลมก็เกิดไกลขึ้น ซึ่งจะหมายความว่าความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) จะดีขึ้น จนเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดที่ 25% จะพบว่าจุดตัดวงกลมจะตัดได้ใกล้กว่าการรีดที่ 20% ซึ่งจะหมายความว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดมากเกินไปจะส่งผลให้การต้านทานการกัดกร่อนแยลง



รูปที่ 4.7 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมอิมพีแดนซ์

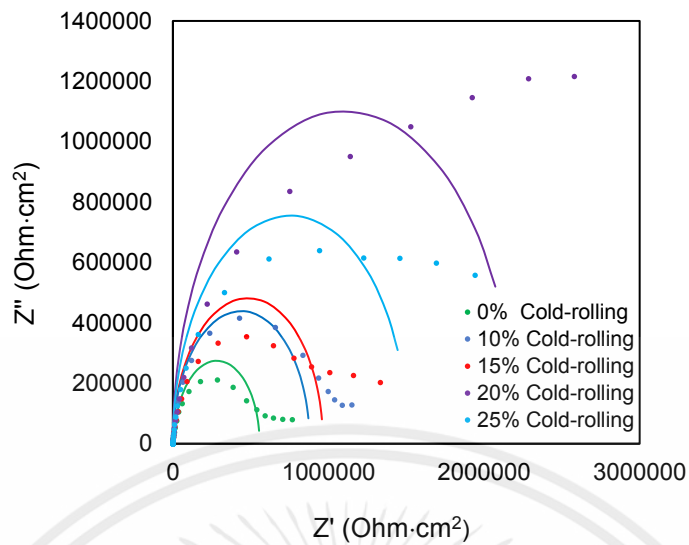


รูปที่ 4.8 กราฟ Bode Phase ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%



รูปที่ 4.9 กราฟ Bode Zmod ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟ Nyquist ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมที่เปอร์เซ็นต์การรีด 0% 10% 15% 20% และ 25%

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานของชิ้นงาน

%Cold-Rolling	R_s (Ω)	R_{out} (Ω)	CPE_{out} (μF)
0%	31.562	528160	1.765E-5
10%	32.956	964500	1.386E-5
15%	27.818	878500	1.744E-5
20%	33.948	2202700	1.810E-5
25%	31.064	1510900	1.549E-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะของการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมโดยใช้การรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ต่างกัน

1. สรุปผลการทดลอง
2. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการอบชุบด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน การอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนจะวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค XRD (X-Ray Diffractometer) ทั้งก่อนและหลังอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งตรวจพบเฟส γ -Phase ในปริมาณที่มากขึ้นหลังโลหะผสมถูกอบชุบด้วยความร้อน และแทบไม่มี ϵ -Phase หลงเหลืออยู่เลยหรือหลงเหลือในปริมาณที่น้อยมากซึ่งเป็นเฟสที่เหมาะสมกับการนำไปรีดขึ้นรูปเย็น

หลังจากการรีดขึ้นรูปเย็นใน วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness Test) พบว่าในอัตราการรีดขึ้นรูปเย็นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย

ในการทดสอบความสามารถการกัดกร่อนจะมีการทดสอบทั้งหมด 3 กระบวนการ โดยในกระบวนการทดสอบการกัดกร่อนแบบ Open Circuit Potential (OCP) พบว่าการรีดเย็นทำให้ค่า OCP ที่ทดสอบออกมามีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าอัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มว่าจะเกิดช้าลง และในการทดสอบการทดสอบการกัดกร่อนแบบ Potentiodynamic Polarization จะพบว่าการที่เปอร์เซ็นต์รีดเพิ่มมากขึ้น โลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมจะเข้าสู่ช่วงแอโนด (Anode) ได้ช้าลง ซึ่งจะแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์การรีด และสุดท้ายเป็นการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy) ซึ่งจากกราฟ Nyquist จะพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเพิ่มมากขึ้น จุดตัดของวงกลมก็จะตัดแกน X ในตำแหน่งที่ไกลขึ้น ซึ่งจะหมายความว่าค่าการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) มีแนวโน้มดีขึ้น ทั้งนี้ทั้งนี้ โลหะผสมในเปอร์เซ็นต์การรีดที่ 25% พบว่าจุดตัดวงกลมจะตัดในตำแหน่งที่ไกลกว่าการรีดที่ 20% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ในการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี การรีดเย็นสามารถเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่ในอัตราการรีดเย็นที่มากเกินไปนั้นสามารถส่งผลตรงกันข้าม ทำให้การต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมแยลง จึงกล่าวได้ว่า การรีดเย็นในเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมสามารถเปลี่ยนแปลงตามหลายปัจจัย ซึ่งอาจจะไม่ได้เปลี่ยนแปลงจากการรีดขึ้นรูปแบบเย็นเพียงเท่านั้น อาจเปลี่ยนแปลงจากตัวแปรอื่นร่วมด้วย โดยสามารถเสนอแนะเป็นข้อติชมในการทำปริญญานิพนธ์ต่อไปคือ

1. การขัดชิ้นงานด้วยความเร็ว น้ำหนัก และเวลาที่เท่ากันในทุก ๆ ชิ้นงาน อาจมีการใช้เครื่องทุ่นแรงเพิ่มในการขัด เพื่อประโยชน์ในการควบคุมปัจจัยของชิ้นงานให้ไปในทิศทางเดียวกัน ด้วย รวมถึงป้องกันฟิล์มออกไซด์บริเวณผิวของชิ้นงานที่อาจเกิดจากการขัดชิ้นงาน และทิ้งไว้เพื่อรอทดสอบในระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน หรือหากไม่สามารถป้องกันการเกิดฟิล์มได้ ก็ควรมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการทดลองของทุกชิ้นงานให้เหมือนกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
2. สารละลายควรถูกผสมในปริมาณมาก เพื่อให้เพียงพอกับการทำการกัดกร่อนในทุกชิ้นงาน ทดสอบ หรืออาจต้องมีการผสมในปริมาณที่เผื่อมากกว่าที่วางแผน ร่วมกับการวางแผนสำหรับการทดลองซ้ำร่วมด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Chiba, K. Kumagai, N. Nomura, S. Miyakawa, Pin-on-disk wear behavior in a like-on-like configuration in a biological environment of high carbon cast and low carbon forged Co-29Cr-6Mo alloys. *Acta Mater.*, 2007, 55, 1309-1318
- [2] S. Ramakrishna, J. Mayer, Biomedical applications of polymer-composite materials: a review. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore., 2001, 61, 1189-1224
- [3] M. Niinomi, Recent Metallic Materials for Biomedical Applications. Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology., 2002, 33, 477-486
- [4] D. Bombac Miha Brojan, P. Fajfar, K. Franc and T. Rado, Review of materials in medical applications. Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana., 2007, 54, 471-499
- [5] K. A. Kravanja, A review of techniques for the application of bioactive coatings on metal-based implants to achieve controlled release of active ingredients. University of Maribor, Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Slovenia., 2022, 217:11063
- [6] S. Amin Yavari, S. Ahmadi, Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials. Faculty of Mechanical, Maritime, and Materials Engineering, Delft University of Technology (TU Delft), The Netherlands., 2015, 43, 91-100
- [7] K. Glenske, Applications of metals for bone regeneration. Botiss Biomaterials, Berlin, Germany., 2018, 25: 100932
- [8] M. Javaid, A. Haleem, Sustaining the healthcare systems through the conceptual of biomedical engineering: A study with recent and future potentials. Department of Mechanical Engineering, Jamia Millia Islamia, New Delhi, India., 2023, 1, 39-47
- [9] K. Chua, I. Khan, R. Malhotra, D. Zhu, Additive manufacturing and 3D printing of metallic biomaterials. Department of Biomedical Engineering, Stony Brook University, Stony Brook, NY, United States., 2021, 2, 288-299
- [10] I. Milošev, CoCrMo alloy for biomedical applications. *Biomedical Applications: Springer. Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia.*, 2012, 1, 1-72

- [11] P. Aramwit, Biomaterials for Wound-Healing Applications. Chulalongkorn University., 2016, 11: 1136077
- [12] G. Malegowd Raghavendra, K. Varaprasad and T. Jayaramudu, Design, Development and biomedical applications. Department of Materials Engineering, University of Concepcion., 2015, 1, 21-44
- [13] T. Sarkar, P. K. Roy, Preparation of high-strength waste-derived eco-friendly ceramic foam as face brick and its estimation of building energy consumption for thermal insulation. Department of Ceramic Engineering, Indian Institute of Technology (BHU), Varanasi, India., 2024, 88: 109043
- [14] A. Ershad-Langroudi, F. Alizadegan, Polymers for implantable devices. Department of Colour and Surface Coatings, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran., 2024, 2, 1-20
- [15] V. Uddin Siddiqui, S. Sapuan, Advancements in multiscale oil palm fiber composites: Manufacturing techniques, performance evaluation, and industrial applications. Advanced Engineering Materials and Composite Research Centre (AEMC), Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University Putra Malaysia, UPM, Serdang, Selangor 43400, Malaysia., 2024, 213: 118399
- [16] ศักดิ์ดิพล เทียมเสมอ, การทดสอบและวิเคราะห์ทางเซรามิกส์ 1. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2007, 1, 5-15
- [17] D. Bombač, M. Brojan, P. Fajfar, F. Kosel and R. Turk. Review of materials in medical applications. Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana., 2007, 4, 471-499
- [18] A. Batal, R. Sammons, S. Dimov, Response of Saos-2 osteoblast-like cells to laser surface texturing, sandblasting and hydroxyapatite coating on CoCrMo alloy surfaces. Department of Mechanical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, UK., 2019, 98, 1005-1013
- [19] C. Paul Emerson, The microstructure and the electrochemical behavior of Cobalt Chromium Molybdenum alloys from retrieved hip implants. A thesis of Material Science and Engineering, Florida International University., 2015, 1, 13-17
- [20] W. Wang, M. Wangzhong, High corrosion resistance duplex fcc + hcp cobalt based entropic alloys: An experimental and theoretical investigation. Department of Chemical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China. Luiz., 2022, 223: 111166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] M. Mori, K. Yamanaka, A. Chiba, Cold-rolling behavior of biomedical Ni-free Co–Cr–Mo alloys: Role of strain-induced ϵ martensite and its intersecting phenomena. Institute for Materials Research, Tohoku University., 2015.
- [22] H. Baker, ASM handbook, vol 3, Alloy phase diagrams. ASM International, Materials Park., 1992, 55, 201-214
- [23] T. Narushima, K. Ueda, A. Rano, Co-Cr Alloys as Effective Metallic Biomaterials. Institute for Materials Research, Tohoku University., 2015, 1, 157-178
- [24] G. Zhang, L. Junxin, X. Zhou, L. Jin and A. Wang, Effect of Heat Treatment on the Properties of CoCrMo Alloy Manufactured by Selective Laser Melting. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhoukou Normal University., 2018, 27, 2281-2287
- [25] B. Terence, Cold Working Strengthens Metal. Retrieved September 25, 2023, from <https://www.thoughtco.com/what-is-cold-working-2340011.>, 2019, 10, 234011
- [26] A. Chiba, Cold-rolling behavior of biomedical Ni-free Co–Cr–Mo alloys: Role of strain-induced epsilon martensite and its intersecting phenomena. Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan., 2016, 55, 201-241
- [27] <https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm> (รูปภาพพื้นธ, 2565)
- [28] A. Chiba, Pin-on-disk wear behavior in a like-on-like configuration in a biological environment of high carbon cast and low carbon forged Co–29Cr–6Mo alloys. Department of Welfare Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka 020-8551, Japan., 2007, 4, 1309-1318
- [29] อภิชาติ พานิชกุล, การอบชุบทางความแข็ง (heat treatment) ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี., 2011.
- [30] A. Durán, Y. Castro, A. Conde, J. José de Damborenea, Sol-Gel protective coatings for metals. Institute of Ceramics and Glass., 2018, 64, 327-338
- [31] K. Badran, J. De Souza, J. Morales and E. Plante, Quantitative corrosion evaluation and damage modeling in ferrous materials. Department of Science, Worcester Polytechnic Institute., 2014, 73, 2709-2714
- [32] N. Anita, Electrochemical and Analytical Techniques for sustainable corrosion monitoring. St. Antony's, India., 2023., 1, 467-475
- [33] S. Park, Surface characteristics of titanium anodized in the four different types of electrolyte. Chonbuk, South Korea., 2007., 53, 863-870

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] A. Igual Munoz, Influence of electrochemical potential on the tribocorrosion behavior of high carbon CoCrMo biomedical alloy in simulated body fluids by electrochemical impedance spectroscopy. *Politécnica de Valencia, Spain.*, 2023., 55, 5428-5439
- [35] D. Bombač, M. Brojan, P. Fajfar, F. Kosel and R. Turk, Review of materials in medical applications. Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana., 2007., 54, 471-499
- [36] L. Liu, H. Zhang, Corrosion behavior of cold-rolled metastable Cr-Mn-Ni-N austenitic stainless steel in acidic NaCl solution. Institute of Materials, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, China., 2022., 19, 278-288
- [37] Y. Bao, A. Igual, Assessment of in-vivo corrosion of Ti and CoCrMo joint implants by electrochemical measurements in human synovial liquids. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne CH-1015, Switzerland.*, 2023., 15: 1726
- [38] A. Igual, L. Casabán Julián, Influence of electrochemical potential on the tribocorrosion behaviour of high carbon CoCrMo biomedical alloy in simulated body fluids by electrochemical impedance spectroscopy. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, E.T.S.I. Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain., 2010., 55, 5428-5439
- [39] S. Gerel, A. Nazarahari, D. Canadinc, From corrosion behavior to radiation response: A comprehensive biocompatibility assessment of a CoCrMo medium entropy alloy for utility in orthopedic and dental implants. Koc University, Advanced Materials Group (AMG), Department of Mechanical Engineering, Istanbul, 34450, Turkey., 2022., 149: 107680