

อิทธิพลของซิลิกอนต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อน
ของโลหะผสม Co-Cr-Mo
EFFECTS OF Si ON MICROSTRUCTURE AND CORROSION BEHAVIOR
OF Co-Cr-Mo ALLOY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2565
KMITL-2023-EN-M-217-115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF Si ON MICROSTRUCTURE AND CORROSION BEHAVIOR
OF Co-Cr-Mo ALLOY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022

KMITL-2023-EN-M-217-115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของซิลิกอนต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo
นักศึกษา	ชลวิทย์ ผิวบัวเผื่อน
รหัสประจำตัว	59601274
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของธาตุ Si ปริมาณ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึงและพฤติกรรมการกัดกร่อนโลหะผสม Co-Cr-Mo โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุ Si มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo เพียงเล็กน้อย และศึกษาความต้านทานแรงดึงด้วยการใช้วิธีการทดสอบแรงดึง พบว่าเมื่อปริมาณธาตุ Si เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ในเรื่องการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมในน้ำเกลือ วิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนจากค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อน ทดสอบด้วยวิธีการโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) เพื่อมาประเมินหา ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (i_{corr}) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และพารามิเตอร์การกัดกร่อน พบว่าปริมาณของธาตุ Si มากขึ้นมีอิทธิพลต่อความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo เพิ่มขึ้น ในส่วนสุดท้ายคือการศึกษาปริมาณของธาตุหลุดออกจากพื้นผิวโลหะผสมหลังจากการทดสอบโพลาริเซชัน ด้วยเทคนิควิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma optical emission spectrometer) พบว่าค่า pH มีอิทธิพลต่อปริมาณการหลุดออกของธาตุในโลหะผสม Co-Cr-Mo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title	Effects of Si on microstructure and corrosion behavior of Co-Cr-Mo alloy
Student	Mr. Chonlawit Peaubuapuan
Student ID.	59601274
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst.prof. Dr. Phacharaphon Tunthawiroon.

ABSTRACT

This thesis aims to investigate the effect of silicon (Si) on the microstructure, tensile strength, and corrosion behavior of Co-Cr-Mo alloys. The four concentrations of Si added in Co-Cr-Mo alloys are 0.1, 0.5, and 1 wt %. The microstructure of these alloys was investigated by using X-ray diffraction (XRD) and optical microscope (OM). The results indicated that the increase in Si slightly changed the microstructure of Co-Cr-Mo alloys. The addition of Silicon increased its effect on the tensile strength of Co-Cr-Mo. To study the corrosion behavior of Co-Cr-Mo alloys in normal saline solution. The corrosion behavior of the experimental of these alloys are investigated using Potentiodynamic polarization measurements. Polarization curves obtained from the polarization test were evaluated in terms of corrosion current density (i_{corr}), corrosion potential (E_{corr}), and corrosion parameters, therefore the summary reveals an increase in Si content impact on the corrosion resistance is better. The final section is a result release of metal ions after Potentiodynamic polarization measurements by Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) is an analytical technique then found that pH influences the released metal ions on elements in Co-Cr-Mo alloy.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้นั้น ทางผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พชรพล ตันขวิรุฬห์ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ ผศ.ดร. ชุมพล ยวงใย และอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งเป็นผู้มอบโอกาสให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้านเสมอมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ในการปฏิบัติงาน ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกๆ ท่านสำหรับความช่วยเหลือในงานวิจัย ทั้งการให้คำแนะนำ แสดงความคิดเห็น แลกเปลี่ยนประสบการณ์ ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัว คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้ทั้งกำลังใจ คำชี้แนะสั่งสอนและกำลังใจ ทรัพย์ ในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการให้แก่ท่านผู้อ่านทุกๆ ท่านในภายภาคหน้าสืบไป

ชลวิชัย ผิวบัวเฟื่อน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 โลหะผสม.....	5
2.1.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 316L).....	5
2.1.1.2 โลหะผสมโคบอลต์ โครเมียม โมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo alloy).....	5
2.1.1.3 โลหะผสมไทเทเนียม (Ti alloy).....	5
2.1.2 ของเหลวในร่างกายมนุษย์.....	9
2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	9
2.1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	9
2.1.3.2 การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	12
2.1.3.3 ผลกระทบของ Si ต่อโลหะผสมต่างๆ.....	23
2.1.3.4 ผลกระทบของ Si ต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม.....	24
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค.....	27
2.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope).....	27
2.2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	28
2.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	29
2.3 สมบัติทางกล.....	30
2.4 การกัดกร่อนในโลหะผสม.....	35
2.4.1 กระบวนการและสมการการกัดกร่อน.....	35
2.5 รูปแบบทั่วไปของการกัดกร่อน.....	36
2.5.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion).....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion).....	36
2.5.2.1 แบบมหภาค (Macroscopic scale).....	36
2.5.2.2 แบบจุลภาค (Microscopic scale).....	38
2.6 ความต้านทานการกัดกร่อน (การสร้างฟิล์มพาสซีฟของโลหะผสม Co-Cr-Mo)..	38
2.7 เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อน.....	39
2.7.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open circuit potential, OCP).....	39
2.7.2 โพลเทนซิโอดนามิค โพลลาไรเซชัน (Potentiodynamic polarization)....	39
2.8 เครื่อง ICP-OES.....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	44
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	44
3.2 การเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	45
3.2.1 การตัดชิ้นงานทดลอง.....	45
3.2.2 การเตรียมพื้นผิวสัมผัสของชิ้นงาน.....	46
3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	48
3.2.4 การทดสอบแรงดึง.....	49
3.2.5 การเตรียมสารละลาย NaCl และการปรับค่า pH.....	50
3.3 ขั้นตอนการทำการวิจัย.....	50
3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	50
3.3.2 การทดสอบแรงดึง.....	52
3.3.3 การทดลองของการกัดกร่อน.....	53
3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	55
4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม.....	55
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-(28-26)Cr-(6-5)Mo-(0.1-1.0)Si.....	55
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo-Si.....	61
4.2 ความต้านทานแรงดึง.....	68
4.3 อิทธิพลของซิลิกอนต่อพฤติกรรมกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	75
4.4 อิทธิพลของ pH ต่อพฤติกรรมกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	83
4.5 อิทธิพลของธาตุต่อพฤติกรรมกัดกร่อน.....	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	99
เอกสารอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	164



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้ามอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมทางด้านชีวภาพกับกระดูก.....	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Co-Cr ทั้ง 4 ชนิดในด้านการแพทย์.....	7
2.3 คุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-Cr ทั้ง 4 ชนิดในด้านการแพทย์.....	7
2.4 พารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr ในสารละลายน้ำลายเทียมมีค่า pH แตกต่างกัน.....	21
2.5 พารามิเตอร์การกัดกร่อนจากกราฟโพลาไรเซชันในกรดสารละลายซัลฟิวริก ความ เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	22
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	45
4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si.....	74
4.2 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo- 0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 7.2.....	76
4.3 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo- 0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0.....	79
4.4 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo- 0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 10.0.....	81
4.5 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si.....	84
4.6 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si.....	86
4.7 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si.....	88
4.8 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si.....	90
4.9 ปริมาณธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวโลหะผสมหลังจากการกัดกร่อน.....	92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-xCr-6Mo.....	10
2.2 เฟสไดอะแกรมสามองค์ประกอบในระบบของโลหะผสม Co-Cr-Mo (1) 1473 K (2) 1200 K.....	11
2.3 กราฟความเค้น-ความเครียด ของ (1) ไม่มี N เป็นส่วนประกอบใน (20-33)Cr และ (2) มี N เป็นส่วนประกอบใน (20-33)Cr.....	11
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับสัดส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ	12
2.5 กราฟโพลาไรเซชันของโลหะผสม Co-Cr-Mo และธาตุ Co Cr และ Mo ใน สารละลาย NaCl (pH 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส).....	13
2.6 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของออกไซด์ฟิล์มของโลหะของ Cr-Cr-Mo.....	14
2.7 กราฟโพลาไรเซชันของโลหะผสม Co-Cr-Mo ในการจำลองสารละลายภายในร่างกาย มนุษย์ (pH 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส).....	16
2.8 ค่า OCP ในสารละลาย Artificial saliva ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส.....	16
2.9 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) กับ ค่า pH	17
2.10 กราฟโพลาไรเซชันของโครงสร้าง FCC และ HCP ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความ เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	18
2.11 SEM ของโครงสร้าง HCP หลังโพลาไรเซชันที่ศักย์ไฟฟ้า 1.2V ในสารละลายกรด ซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	18
2.12 SEM ของโครงสร้าง FCC หลังโพลาไรเซชันที่ศักย์ไฟฟ้า 1.2V ในสารละลายกรด ซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	19
2.13 EDX ของพื้นผิวโครงสร้าง FCC หลังการทำโพลาไรเซชัน ในสารละลายกรด ซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	19
2.14 EDX ของพื้นผิวโครงสร้าง HCP หลังการทำโพลาไรเซชัน ในสารละลายกรด ซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	20
2.15 กราฟโพเทนเชียลไดนามิกโพลาไรเซชันของโลหะผสม Co-Cr ในสารละลายน้ำลาย เทียมมีค่า pH แตกต่างกัน.....	21
2.16 กราฟโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกรดสารละลายซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	22
2.17 กราฟความหนาของออกไซด์ฟิล์มกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันใน โลหะผสม Co-Cr-Mo.....	23
2.18 Schematic diagrams ของจุดเริ่มต้น (1) (2) (3) และ (4) กระบวนการ ออกซิเดชันของเหล็กส่วนผสม Cr 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับ (3) และ (4) โดยไม่มี (1) และ (2) ที่มีส่วนผสมของ Si.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ผลกระทบของปริมาณ Si ต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดในโลหะผสม A	25
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณธาตุ Si ที่ 0.1Si 0.5Si 1.0Si 3.0Si และ 5.0Si.....	26
2.21 กราฟความเค้นและความเครียดของโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	26
2.22 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	28
2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	29
2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบผลึก.....	30
2.25 แผนภาพแสดงรายละเอียดของเครื่องวัดการเลี้ยวเบน.....	30
2.26 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง (1) ชิ้นงานทรงกระบอก (2) ชิ้นงานที่มีลักษณะแผ่น..	31
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ Stress strain ภายใต้แรงดึง.....	32
2.28 เส้นโค้งความเค้น ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก.....	32
2.29 เส้นโค้งความเค้น ความเครียด (Stress-strain curve) แบบไม่มีจุดคราก.....	33
2.30 ขั้นตอนของปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการกัดกร่อนของโลหะในสภาวะแวดล้อมเป็นของเหลว.....	36
2.31 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันและค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อน.....	40
2.32 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในรูปแบบของสารละลาย.....	42
2.33 แผนภาพระดับพลังงานเมื่อมีการรับและปล่อยคลื่นพลังงาน.....	43
3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.2 เครื่องตัดโลหะแบบละเอียด.....	46
3.3 ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ทดลอง (1) ชิ้นงานก่อนการขัด (2) ชิ้นงานหลังการขัด.....	47
3.4 เครื่องขัดชิ้นงาน.....	47
3.5 เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	48
3.6 เครื่องเตรียมสภาพพื้นผิวสัมผัส.....	49
3.7 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....	49
3.8 เครื่อง pH meter.....	50
3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM).....	51
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	51
3.11 เครื่อง X-ray diffractometer.....	52
3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	52
3.13 เครื่องวัดการกัดกร่อนโพเทนชิโอสแตท.....	53
3.14 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-xSi.....	56
4.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi.....	57
4.3 สัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si.....	58
4.4 กราฟ XRD ของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si.....	60
4.5 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si จากกล้อง OM.....	61
4.6 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si จากกล้อง SEM.....	62
4.7 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si จากกล้อง OM.....	63
4.8 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si จากกล้อง SEM.....	64
4.9 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si จากกล้อง OM.....	65
4.10 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si จากกล้อง SEM.....	66
4.11 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si จากกล้อง OM.....	67
4.12 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si จากกล้อง SEM.....	68
4.13 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si.....	69
4.14 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si.....	70
4.15 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si.....	71
4.16 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si.....	72
4.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงคราก ความต้านทานแรงดึง และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแต่ละโลหะผสม.....	73
4.18 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2.....	75
4.19 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 4.0.....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH เท่ากับ 10.0....	80
4.21 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมที่ปริมาณของ Si แตกต่างกันของ โลหะผสม Co-Cr-Mo ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0.....	82
4.22 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0.....	83
4.23 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0.....	85
4.24 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0.....	87
4.25 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0.....	89
4.26 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของค่า pH แตกต่างกันกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo.....	91
4.27 เปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2 (1) Co (2) Cr (3) Mo (4) Si.....	93
4.28 เปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 4.0 (1) Co (2) Cr (3) Mo (4) Si.....	95
4.29 เปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 10.0 (1) Co (2) Cr (3) Mo (4) Si.....	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่องานทางด้านทางการแพทย์ จะเห็นได้ว่าตั้งแต่ก่อนที่จะมีการพัฒนาทางด้านวัสดุทางการแพทย์อย่างจริงจัง โลหะมักเป็นตัวเลือกอันดับต้น ๆ ที่นำมาใช้ในการรักษาหรือประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโลหะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง มีความเหนียว และแตกหักเสียหายยาก แต่ในความเป็นจริงแล้ว ไม่ใช่โลหะทุกประเภทสามารถนำมาใช้งานทางการแพทย์ได้ ปัญหาสำคัญของการใช้โลหะทางการแพทย์ นั่นคือความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) และปัญหาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมาจากสภาพแวดล้อมภายในร่างกายซึ่งถือได้ว่ารุนแรงมาก ดังนั้น โลหะที่สามารถนำมาใช้งานได้นั้น จะต้องทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีด้วย ในปัจจุบันโลหะที่ถูกนำมาใช้งานในทางการแพทย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ โลหะมีค่าและโลหะทั่วไป โลหะมีค่าได้แก่ โลหะในกลุ่มของทองคำ เงิน และแพลทินัม ส่วนโลหะทั่วไปได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) โลหะผสมของโคบอลต์ (Cobalt alloy) ไทเทเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสมของไทเทเนียม (Titanium alloy) ซึ่งโลหะแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันและนำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันตามจุดประสงค์ โดยโลหะมีค่า (Noble metals) มักนำไปใช้งานทางด้านทันตกรรม เนื่องจากมีราคาแพง ในขณะที่โลหะทั่วไป มีทั้งความแข็งแรงที่มากกว่า และราคาที่ย่อมเยา ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายกว่า ไม่ว่าจะเป็นทางด้านทันตกรรม ออร์โทพีดิกส์ ศัลยกรรมต่าง ๆ และมักจะถูกนำไปใช้เป็นตัวถ่วงในด้านการผลิตอุปกรณ์การแพทย์ต่าง ๆ [1]

โลหะที่สามารถนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 คือโลหะมีค่า ซึ่งโลหะเหล่านี้จะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงมาก โดยตัวอย่างของกลุ่มโลหะมีค่าเหล่านี้ได้แก่ ทอง (Au) เงิน (Ag) และแพลทินัม (Pt) อย่างไรก็ตาม แม้โลหะกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่โลหะกลุ่มนี้ยังคงมีราคาสูง ทั้งยังมีคุณสมบัติทางกลต่ำ จึงทำให้ไม่นิยมนำมาผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องมีการรับแรง การทนต่อการเสียดสีหรือทำเป็นโครงสร้างหลัก ยกเว้นการใช้งานทางด้านทันตกรรม ขณะที่กลุ่มที่ 2 คือโลหะที่มีความสามารถในการสร้างฟิล์มปกป้องพื้นผิวหรือออกไซด์ได้ (Passivated metals) ซึ่งโลหะกลุ่มนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและพบเห็นได้ง่ายในทางการแพทย์ โดยธาตุในกลุ่มที่สามารถสร้างฟิล์มได้ดีได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) โครเมียม (Cr) และไทเทเนียม (Ti) ซึ่งอะลูมิเนียมไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจากส่งผลต่อการเป็นพิษกับร่างกายมนุษย์ โครเมียมไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงหากแต่ใช้ในการผสมกับโลหะอื่น ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะผสมของโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr alloy) แต่จะต้องมีปริมาณโครเมียม อย่างต่ำ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จะทำให้โลหะผสมสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีและต้องมีปริมาณโครเมียมอย่างต่ำ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จะทำให้โลหะผสมต้านทานการกัดกร่อนได้อย่างดีเยี่ยม ในกรณีของไทเทเนียมสามารถนำมาใช้งานได้ทั้งในรูปของโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม [2] เป็นที่ทราบกันดีว่า เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมไทเทเนียมและโลหะผสมของโคบอลต์ ใช้สำหรับทางด้านทางการแพทย์ โลหะผสมไทเทเนียมจะมีความต้านทานต่อการกัด

กร่อนดีที่สุด เนื่องจากชั้นฟิล์มหรือออกไซด์ของโลหะผสม (ไทเทเนียมไดออกไซด์ Ti_2) ของไทเทเนียม มีความเสถียรและมีความสามารถในการเกิดขึ้นใหม่เพื่อซ่อมแซมความเสียหายได้อย่างรวดเร็วแต่ในทางเชิงพาณิชย์ ไทเทเนียมหรือโลหะผสมไทเทเนียมนั้นมีราคาสูง ในขณะที่โลหะผสมของโคบอลต์จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนรองลงมา ซึ่งมักจะไม่เกิดการกัดกร่อนแบบจุดแต่อาจเกิดการกัดกร่อนในที่อับได้ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม จะมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำที่สุดและมักเกิดการกัดกร่อนแบบจุดและแบบในที่อับได้ง่าย [2]

โลหะผสมโคบอลต์ โครเมียม โมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo alloy) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ข้อเข่าและสะโพกเทียมเพราะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมทั้งมีความทนทานต่อการเสียดสีและมีความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตที่ดี โลหะผสม Co-Cr-Mo ตามมาตรฐาน ASTM (American society testing and materials) เป็นโลหะผสมที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูง ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและมีความต้านทานการเสียดสี มักเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมด้านการแพทย์ และถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการศัลยกรรมกระดูกและทันตกรรม เช่น รากฟันเทียม ข้อสะโพกและปลายกระดูกเข่า [3] ในโลหะผสม Co-Cr-Mo มีส่วนประกอบของธาตุโคบอลต์เป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีธาตุโครเมียมและธาตุโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมรองลงมา ซึ่งคุณสมบัติของโครเมียมจะทำให้โลหะผสมของโคบอลต์นี้มีความแข็งแรงและมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ขณะที่คุณสมบัติของโมลิบดีนัมคือเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสมนี้เช่นกัน สำหรับธาตุอื่น ๆ ที่มีการนำมาผสมในโลหะผสมของโคบอลต์มีหลายธาตุด้วยกันแต่ธาตุซิลิกอนนั้น ยังไม่พบอย่างแพร่หลายสำหรับการนำมาผสมเข้ากับโลหะผสมของโคบอลต์ แต่สำหรับโลหะผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมมีความนิยมที่จะนำธาตุซิลิกอนเข้าไปผสมด้วย ซึ่งซิลิกอนทำให้คุณสมบัติของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมในด้านคุณสมบัติทางกลและมีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น [4] จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในการศึกษาธาตุซิลิกอนที่จะเข้ามาผสมกับโลหะผสมของโคบอลต์ต่อไป

การนำวัสดุมาใช้ในทางการแพทย์ต้องคำนึงถึงสภาวะของร่างกายมนุษย์ โดยทั่วไปร่างกายของมนุษย์เรา มีระดับของของเหลวหรือสารละลายในร่างกาย ซึ่งมีความเป็นกรดและด่างอยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยสภาวะสมดุลของเหลวในร่างกายมนุษย์จะถูกวัดด้วยค่า pH (Potential hydrogen) และระดับค่า pH มีความแตกต่างกันจาก 0 ถึง 14 หากของเหลวในร่างกายมีระดับค่า pH สูง หมายความว่ามีความเป็นเบสมากขึ้น ตรงกันข้ามหากของเหลวในร่างกายมีค่า pH ลดลง หมายความว่ามีความเป็นกรดมากขึ้น ในกรณีที่ระดับของค่า pH ปกติคือ 7.0 ถือว่าเป็นระดับที่เป็นกลาง ส่วนระดับค่า pH ที่เหมาะสมของของเหลวในร่างกาย เช่น น้ำลาย (Saliva) pH อยู่ในช่วง 7.0 ถึง 7.5 เลือด (Blood) pH อยู่ในช่วง 7.35 ถึง 7.45 และปัสสาวะ (Urine) pH อยู่ในช่วง 4.6 ถึง 8.0 โดยสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในร่างกายนั้น เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น การรับประทานอาหารหรือดื่มเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูง ความเครียดที่ร่างกายสะสมเอาไว้หรือการนอนหลับพักผ่อนอย่างไม่เพียงพอก็อาจจะก่อให้เกิดสภาวะการสูญเสียสมดุลความเป็นกรด-เบสในร่างกาย ซึ่งโดยปกติแล้วสภาวะของคนเราจะเป็นเบสอ่อน ๆ และค่า pH ในเลือดจะอยู่ที่ประมาณ 7.35 ถึง 7.45 ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากระดับปกติจะทำให้เกิดภาวะกรดหรือด่างเกินได้ ในขณะที่ร่างกายของคนเราในชีวิตประจำวัน มีการรับประทานอาหาร เครื่องดื่ม ซึ่งมีความหลากหลายของระดับ pH หรือความเป็นกรด

แตกต่างกันและหากสภาวะที่ร่างกายมีการเจ็บป่วยก็ส่งผลให้ความสมดุลของกรด-ด่างในเลือดเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่จะศึกษาอิทธิพลของค่า pH ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo

จุดประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของ Si ต่อคุณสมบัติของโลหะผสม Co-Cr-Mo ในโครงสร้างจุลภาค ด้านความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการกัดกร่อน ภายใต้เงื่อนไขทดลองในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่ 4.0 7.0 และ 10.0

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของซิลิกอนต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อมีการเติมธาตุซิลิกอนที่ปริมาณ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของซิลิกอนต่อความต้านทานแรงดึงของโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อมีการเติมธาตุซิลิกอนที่ปริมาณ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของซิลิกอนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อมีการเติมธาตุซิลิกอนที่ปริมาณ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของค่า pH ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo โดยทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมธาตุซิลิกอนที่ปริมาณ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.3 สมมติฐานการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลในอดีตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ สามารถตั้งสมมติฐานเพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษาได้ดังนี้

1. ปริมาณของธาตุซิลิกอนที่แตกต่างมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานแรงดึง
2. ปริมาณของธาตุซิลิกอนที่แตกต่างมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. ปริมาณของธาตุซิลิกอนที่แตกต่างมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีระดับค่า pH แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะปริมาณของซิลิกอน (Si) ที่ปริมาณ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. ศึกษาเฉพาะสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. ศึกษาเฉพาะสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ทำการปรับค่า pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสม Co-Cr-Mo เช่น คุณสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค ความต้านทานการกัดกร่อน
2. ศึกษาวิธีการและขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง
3. เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบการทดลอง
4. ทำการทดลองโดยการเตรียมโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่มีปริมาณของธาตุซิลิกอนแตกต่างกัน เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม
5. วิเคราะห์ผลการทดลองด้านโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อน
6. สรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาและวิจัยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยซึ่งได้นำมาสรุปและนำเสนอเป็นลำดับดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โลหะผสม

วัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ด้านการแพทย์หรือทางชีวการแพทย์ เช่น ทางด้านออร์โทพีดิกส์ ทางด้านทันตกรรมและกระดูก) สามารถแบ่งได้เป็น กลุ่มวัสดุโลหะบริสุทธิ์ กลุ่มวัสดุโลหะผสม โดยกลุ่มของวัสดุโลหะบริสุทธิ์มีข้อบกพร่องบางประการ เช่น การปล่อยไอออนของโลหะและการสึกหรอสูงแต่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวและความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตที่ดี [5] ขณะที่วัสดุโลหะผสมหลายประเภทถูกนำมาใช้ในด้านทางการแพทย์ โดยมีคุณสมบัติและลักษณะต่าง ๆ เหมาะสมสำหรับใช้งานในด้านการแพทย์ [6] โดยทั่วไปโลหะผสมมีประโยชน์หลากหลายด้านมากกว่าโลหะบริสุทธิ์ เช่น ด้านความแข็งแรง ด้านความต้านทานการกัดกร่อน ด้านความต้านทานการสึกหรอและด้านความเข้ากันได้ในร่างกายมนุษย์ จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้เลือกโลหะผสมมาใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นข้อต่อ ด้านกระดูก ด้านทันตกรรม เป็นต้น สิ่งที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงอันดับแรก คือวัสดุชนิดนั้นจะต้องมีคุณสมบัติด้านความต้านทานการกัดกร่อนที่มีค่าสูง ส่วนใหญ่แล้วจึงนิยมโลหะผสม 3 กลุ่มคือ กลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มของโลหะผสม Co-Cr-Mo และกลุ่มของโลหะผสมของไทเทเนียม

2.1.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 316L)

เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนิติก (Austenitic stainless steel) ชนิด 316L หรือเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นทางเลือกสำหรับนำมาใช้ทางด้านการแพทย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงสูง มีคุณสมบัติความเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) และด้านความต้านทานการกัดกร่อนดี รวมไปถึงราคาต่ำกว่าโลหะผสมกลุ่มอื่น [7]

2.1.1.2 โลหะผสมโคบอลต์ โครเมียม โมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo alloy)

โลหะผสม Co-Cr-Mo นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางทางวัสดุทางการแพทย์เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี มีความแข็งแรงสูง ความต้านทานการกัดกร่อนสูง ความต้านทานการสึกหรอสูงมาก และความเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์ โดยความสามารถในด้านการป้องกันการกัดกร่อนเกิดจากพาสซีฟฟิล์มออกไซด์ที่มีความแข็งแรงมาก ซึ่งสาเหตุมาจากพฤติกรรมการก่อตัวของโครเมียมออกไซด์เพื่อปกป้องพื้นผิวโลหะผสมนี้จากการกัดกร่อนโดยสภาพแวดล้อมภายนอก [8]

2.1.1.3 โลหะผสมไทเทเนียม (Ti alloy)

ไทเทเนียม มีจุดเด่นคือมีน้ำหนักเบาความหนาแน่น 4.5 g/cm^3 เมื่อเทียบกับสแตนเลสสตีลชนิด 316L ที่มีความหนาแน่น 7.9 g/cm^3 และโลหะผสมของ Co-Cr-Mo ที่มีความหนาแน่น 8.3 g/cm^3 [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะผสมไทเทเนียม เช่น Ti-6Al-4V มีความต้านทานแรงดึงสูงและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง แต่มีค่า Young's modulus ต่ำและไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก [7] มีคุณสมบัติด้านความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์สูง ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมถูกนำมาใช้ในการแพทย์และด้านทันตกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมเพราะพฤติกรรมของชั้นออกไซด์ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) อย่างไรก็ตามโลหะผสมไทเทเนียมมีคุณสมบัติทางโทรโพลีหรือต้านทานการสึกหรอที่ต่ำ [5]

โลหะผสม Co-Cr-Mo มีความแข็งแรง ความเหนียวและความต้านทานการสึกสูงกว่าโลหะผสม Ti และ Stainless steel จึงนิยมนำมาใช้ในด้านข้อต่อ กระดูก หรือในด้านที่จะต้องรองรับการเสียดสีที่มีค่าสูง เนื่องจากโลหะผสมของ Co-Cr-Mo มีความต้านทานการเสียดสี คุณสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนที่มีค่าสูง (ความต้านทานการกัดกร่อนมีค่าสูงในสารละลายของคลอไรด์) ซึ่งคุณสมบัติของพาสซีฟฟิล์มออกไซด์ของโลหะผสมชนิดนี้สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอกได้ดีและมีความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ที่ดีและสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมเหล่านี้ในด้านชีวภาพดังแสดงได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมทางด้านชีวภาพกับกระดูก [9]

Material	Young's Modulus, E (MPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Fatigue Limit (MPa)
Stainless	190	221-1213	586-1351	241-820
Co-Cr	210-253	448-1606	655-1896	207-950
Titanium	110	485	760	300
Ti-6Al-	116	896-1034	965-1103	620
Cortical	15-30	30-70	70-150	-

โลหะผสมโคบอลต์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามกระบวนการขึ้นรูป คือประเภทที่ 1: โลหะผสมหล่อและประเภทที่ 2 คือโลหะผสมทุบขึ้นรูปทางความร้อน และสามารถแยกชนิดของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ออกได้เป็น 4 ชนิดสำหรับการใช้งานด้านชีวการแพทย์ [10]

- (1) ASTM F75 องค์ประกอบคือ Co-28Cr-6Mo เป็นโลหะผสมหล่อ
 - (2) ASTM F799 องค์ประกอบคือ Co-28Cr-6Mo เป็นโลหะผสมที่หล่อที่ผ่านกระบวนการทางอุณหภูมิศาสตร์
 - (3) ASTM F90 องค์ประกอบคือ Co-20Cr-15W-10Ni เป็นโลหะผสมทุบขึ้นรูปทางความร้อน
 - (4) ASTM F562 องค์ประกอบคือ Co-35Ni-20Cr-10Mo เป็นโลหะผสมทุบขึ้นรูปทางความร้อน องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมเหล่านี้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 และ 2.3
- โดยโลหะผสม ASTM75 และ ASTM799 จะมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน แต่วิธีสร้างโลหะผสมมีความ

แตกต่างกัน จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน สามารถแสดงองค์ประกอบทางเคมีได้ดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ ปริมาณโคบอลต์ใน ASTM F90 และ ASTM F562 ยังต่ำกว่าใน ASTM75 และ ASTM799 ในทางตรงกันข้าม ASTM F562 มีนิกเกิลมากกว่า และ ASMT มีทังสแตนมากกว่า สามารถแสดงองค์ประกอบทางเคมีได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Co-Cr ทั้ง 4 ชนิดในด้านการแพทย์

Elements	ASTM F75	ASTM F799	ASTM F90	ASTM F562
Co	58.9–69.5	58–59	45.5–56.2	29.0–38.8
Cr	27.0–30.0	26.0–30.0	19.0–21.0	19.0–21.0
Mo	5.0–7.0	5.0–7.0	–	9.0–10.5
W	0.2	–	14.0–16.0	–
Ni	2.5	1	9.0–11.0	33.0–37.0
Mn	1	1	2	0.15
Si	1	1	0.4	0.15
Fe	0.75	1.5	3	1
C	0.35	0.35	0.15	0.025
N	0.25	0.25	–	–
P	0.02	–	0.04	0.015
Ti	0.1	–	–	1
S	0.01	–	0.03	0.01

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-Cr ทั้ง 4 ชนิดในด้านการแพทย์

Property	ASTM F75 As-Cast/ Powder Metallurgy/ Hot Isostatic Pressing	ASTM F799 Hot Forged	ASTM F90 Annealed	ASTM F562 Cold Hot Forged Worked, Aged
Elastic modulus (GPa)	210	253	210	210
Yield strength (MPa)	450	841	448–648	1606
Tensile strength (MPa)	655	1277	1399–1586	951–1220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของโลหะผสมของโคบอลต์ ประกอบด้วยไม่มีความเป็นแม่เหล็ก ทนทานต่อการสึกหรอ การกัดกร่อนและมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีออกไซด์ของ Cr_2O_3 (โครเมียมออกไซด์) ที่ช่วยปกป้องการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม ในองค์ประกอบพื้นฐานของโลหะผสม Co-Cr-Mo ประกอบด้วยธาตุปริมาณธาตุ Co (โคบอลต์) มีปริมาณถึง 65% ธาตุ Cr (โครเมียม) ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนรวมทั้งช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับสารละลายที่เป็นของแข็งของโลหะผสม ธาตุโมลิบดีนัม (Mo) ถูกเติมเข้ามาเพื่อซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นหลังจากการหล่อหรือการตีขึ้นรูป โดยคุณสมบัติของโลหะผสม Co-Cr ทั้งสี่ประเภทสามารถอธิบายโดยสังเขปพร้อมกับการใช้งานในด้านชีวการแพทย์

1. โลหะผสม ASTM F75 เป็นโลหะผสมหล่อ Co-28Cr-6Mo โลหะผสม F75 มีประวัติอันยาวนานทั้งในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศและการปลูกถ่ายชีวการแพทย์ คุณสมบัติหลักของโลหะผสมนี้คือความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม แม้ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ โดยออกไซด์ของพื้นผิวซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณโครเมียม เมื่อ F75 ถูกหล่อขึ้นรูป โดยหลอมที่อุณหภูมิ 1,350 ถึง 1,450°C จากนั้นจึงเทหรืออัดแรงดันลงในแม่พิมพ์เซรามิกที่มีรูปร่างตามต้องการ (เช่น ก้านต้นขาเทียม สะโพก รากฟันเทียม งานสะพานฟันบางส่วน) คุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันสามารถสังเกตได้ขึ้นอยู่กับสภาพการหล่อของโลหะผสม และอาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสม F75 โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดเกรนที่ใหญ่ ทำให้ความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมลดลง ยิ่งไปกว่านั้นในข้อบกพร่องระหว่างกระบวนการหล่อ อาจทำให้เกิดการแตกหักและล้าของวัสดุที่สร้างขึ้นภายใต้สภาวะของสภาวะแวดล้อม

2. โลหะผสม ASTM F799 เป็นที่รู้จักกันในชื่อโลหะผสม Co-28Cr-6Mo ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน โดยมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับโลหะผสม F75 แต่ผ่านกระบวนการตีขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 800°C หลังจากการหล่อ ขั้นตอนถัดมาคือขึ้นรูป โดยจะใช้อุณหภูมิสูงเพื่อการตีขึ้นรูปให้ง่าย (เพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนรูป) ต่อมาในขั้นตอนสุดท้ายจะใช้อุณหภูมิต่ำในขั้นตอนการรีดขึ้นรูปเพื่อให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง รูปร่างชนิดถาวรในที่ ๆ อุณหภูมิต่ำ ๆ ทั้งนี้โดยไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้นและจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นรูปร่างสุดท้ายของวัสดุหรือโลหะผสมจึงมีค่าความเค้นจุดครากและความเค้นแรงดึงสูงเป็นสองเท่าของโลหะผสม F75 ที่หล่อขึ้นรูป

3. โลหะผสม ASTM F90 เป็นโลหะผสมทุบขึ้นรูป มีองค์ประกอบคือ Co-20Cr-15W-10Ni มีธาตุ Ni และ W เป็นองค์ประกอบในโลหะผสมช่วยให้สามารถผลิตขึ้นรูปได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบอ่อนและคุณสมบัติของโลหะผสมจะตรงกับโลหะผสม F75 ถ้าผลิตขึ้นรูปด้วยการขึ้นรูปแบบเย็นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ (จากตารางที่ 2.2) ความล้า ความเค้นจุดครากและความเค้นดึงจะเป็นสองเท่าของ F75

4. โลหะผสม ASTM F562 เป็นโลหะผสม Co-35Ni-20Cr-10Mo โลหะผสมนี้มีการผสมผสานระหว่างความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความแข็งแรงที่ยืดหยุ่นส่วนใหญ่เกิดจากเทคนิคที่หลากหลาย เช่น การขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ASTM F562 มีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1,795 MPa ซึ่งสูงที่สุดในบรรดาโลหะที่ใช้สำหรับการใช้งานด้านชีวการแพทย์ และมีค่าความเหนียวประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

ปัจจุบันเราพบว่าในกลุ่ม F90 กับ F562 มีธาตุ Ni เป็นส่วนผสม ซึ่งตัว Ni ถ้ามีปริมาณที่สูง ถูกพบว่าเป็นพิษต่อร่างกาย จึงไม่นิยมนำมาใช้ทางการแพทย์ ดังนั้นกลุ่มของโลหะผสมของ Co-Cr-Mo ที่ปัจจุบันนิยมใช้กัน คือ F75 และ F799 ครับ

2.1.2 ของเหลวในร่างกายมนุษย์

การนำวัสดุหรือโลหะผสมมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ในร่างกายของมนุษย์ ซึ่งประกอบไปด้วยของเหลวต่าง ๆ เช่น เลือด พลาสมา เป็นต้น และวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องให้ความสำคัญกับสภาพแวดล้อมหรือของเหลวในร่างกายมนุษย์ เพื่อศึกษาหาอายุการใช้งานของวัสดุนั้นเพื่อที่จะนำไปทดแทนโครงสร้างกระดูก และข้อต่อ ซึ่งสภาพแวดล้อมภายในร่างกายมนุษย์ประกอบด้วยลักษณะทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพที่มีเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามในทางด้านเคมี ธาตุโลหะเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งโลหะนี้จะเหนี่ยวนำปฏิกิริยาทางเคมีหรือเรียกว่าพาสซีฟต่อปฏิกิริยาทางเคมี แต่จะมีผลรุนแรงในด้านการกัดกร่อนต่อสารละลายในร่างกายมนุษย์ และความสามารถในด้านการกัดกร่อนของโลหะจะถูกนำมาพิจารณาเป็นสำคัญ เพื่อทำนายอายุการใช้งานของโลหะนั้นๆ อีกทั้งปัจจัยทางความแตกต่างของค่า pH ส่งผลต่ออายุการใช้งานของโลหะเช่นกัน

สารละลายในร่างกายมนุษย์ส่วนใหญ่เป็นสารละลายชนิด 0.9% Normal saline หรือ NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วยธาตุ Na⁺ และ Cl⁻ เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีค่า pH อยู่ระหว่าง 7.2 ถึง 7.4 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าค่า pH เปลี่ยนแปลงไปจากระดับ pH กลางไปมาก (pH 3 ถึง 4 หรือ 10 ถึง 12) อาจส่งผลให้ร่างกายมีความผิดปกติหรือเกิดความเสียหายขึ้นต่อร่างกายตามมา เช่น การเจ็บป่วย สารละลาย NaCl มีความสำคัญต่อร่างกายสำหรับการรักษาสมดุลของแรงดึงออสโมติกของหลอดเลือดและเนื้อเยื่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณ NaCl ทำให้แรงดึงออสโมติกมีเปลี่ยนแปลงจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของของเหลวและการแพร่กระจายของเกลือชนิดต่างๆในเซลล์เนื้อเยื่อ การนำ NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดแทนเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ (เช่นการให้น้ำเกลือของทางโรงพยาบาล) เพื่อเป็นการทดแทนในสภาวะที่ร่างกายมนุษย์สูญเสียของเหลว ซึ่งผู้ป่วยที่สูญเสีย NaCl จะมีผลให้สารละลายในร่างกายมีความเป็นด่าง (เบส) มากขึ้น อันเนื่องมาจากสาเหตุที่ร่างกายมีคลอไรด์ในเลือดน้อยกว่าปกติ และ NaCl 0.9% ใช้ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร หรือตามแพทย์สั่ง

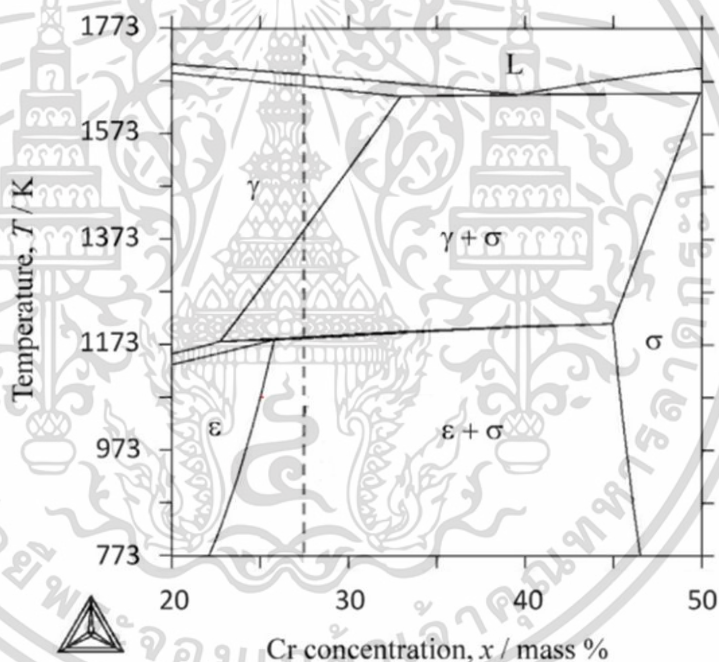
หน้าที่ของ NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือสารอาหารชนิดหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อร่างกายโดยทำหน้าที่ควบคุมความสมดุลของของเหลวในร่างกาย รักษาความดันโลหิตให้อยู่ในระดับปกติ ช่วยให้การทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อต่างๆ พร้อมทั้งรักษาสมดุลของกรด ด่าง (ระดับค่า pH) ของร่างกายมิให้สูงหรือต่ำลงไป รักษาปริมาตรของน้ำเลือดทั้งระบบให้มีความสมดุลเป็นต้น

2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของโลหะผสม Co-Cr-Mo

2.1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ พบว่ากลุ่มโลหะผสมของ Co เป็นกลุ่มโลหะผสมที่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความแกร่งสูง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการเกิด

ออกซิเดชันที่ตีมาก นอกเหนือจากนั้นที่อุณหภูมิสูงโลหะผสมกลุ่มนี้ยังคงความแข็งแรงไว้ได้ดี ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นผลมาจาก โครงสร้างผลึกของโลหะผสมเอง ตามในงานวิจัยของ Zhang และคณะ [11] แผนภาพจำลองเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-xCr-6Mo แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรม Thermo-Calc จากเฟสไดอะแกรม พบว่ามีเฟสประกอบด้วย 3 เฟส คือ 1. เฟส γ หรือ FCC (Face centered cubic) 2. เฟส ϵ หรือ HCP (Hexagonal close packed) และ 3. เฟส σ หรือ สารประกอบเชิงโลหะ σ โดยการเกิดเฟส γ เกิดขึ้นตั้งแต่ประมาณ 1150 ถึง 100 องศาเซลเซียส การเกิดเฟส ϵ เกิดช่วงอุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ลงมาและเป็นการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการเย็นตัวเกิดขึ้น และเฟส σ เกิดขึ้นได้ทั้งอุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีปริมาณของ Cr เป็นปัจจัย โดยถ้าปริมาณของ Cr ประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์เป็นต้นไป ทำให้มีโอกาสก่อให้เกิดเฟส σ ในด้านของคุณสมบัติของเฟสในโลหะผสม Co-Cr-Mo นั้นโครงสร้าง FCC มีความเหนียวมากกว่าโครงสร้าง HCP แต่ความ ความต้านทานการสึกต่ำกว่าโครงสร้าง HCP และในด้านการกัดกร่อนโครงสร้าง FCC มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าโครงสร้าง HCP ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์

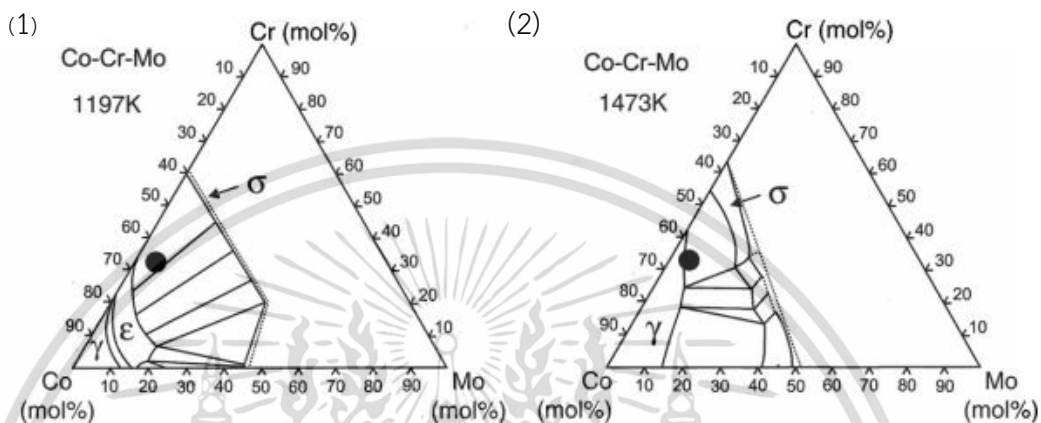


รูปที่ 2.1 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-xCr-6Mo

ในงานวิจัยของ Chiba และคณะ [12] โครงสร้างจุลภาคและการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ σ แสดงในเฟสไดอะแกรมสามองค์ประกอบ (Ternary phase diagram) ของโลหะผสม Co-(27-30)Cr-(5-7)Mo ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.2 1) 1197 K รูปที่ 2.3 ปรากฏโครงสร้างจุลภาค 3 แบบ คือ 1) โครงสร้างผลึกแบบ FCC หรือเฟส γ เกิดขึ้นที่ปริมาณของ Cr ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณและปริมาณของ Mo ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ 2) โครงสร้างผลึกแบบ HCP หรือเฟส ϵ เกิดขึ้นที่ปริมาณของ Cr ระหว่าง 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณและปริมาณของ Mo ระหว่าง 12 ถึง 22

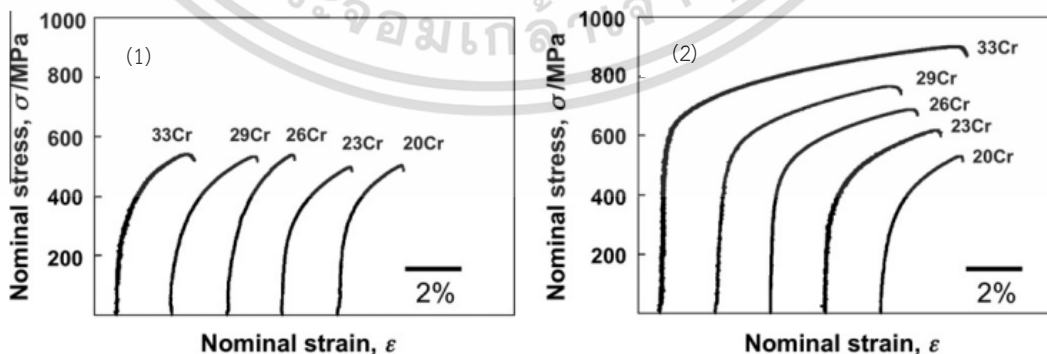
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์โดยประมาณและ 3) สารประกอบเชิงโลหะ σ เกิดขึ้นที่ปริมาณของ Cr ระหว่าง 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ รูปที่ 2.2 2) 1473 K ในระบบของโลหะผสม Co-Cr-Mo มีโครงสร้างอยู่ 2 แบบ คือ 1) เฟส γ และ 2) สารประกอบเชิงโลหะ σ โดยจะเห็นว่าเฟส γ มีความเสถียรที่อุณหภูมิ 1473 K และปริมาณของ Cr 40 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณและปริมาณของ Mo 15 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ



รูปที่ 2.2 เฟสไดอะแกรมสามองค์ประกอบในระบบของโลหะผสม Co-Cr-Mo (1) 1473 K (2) 1200 K

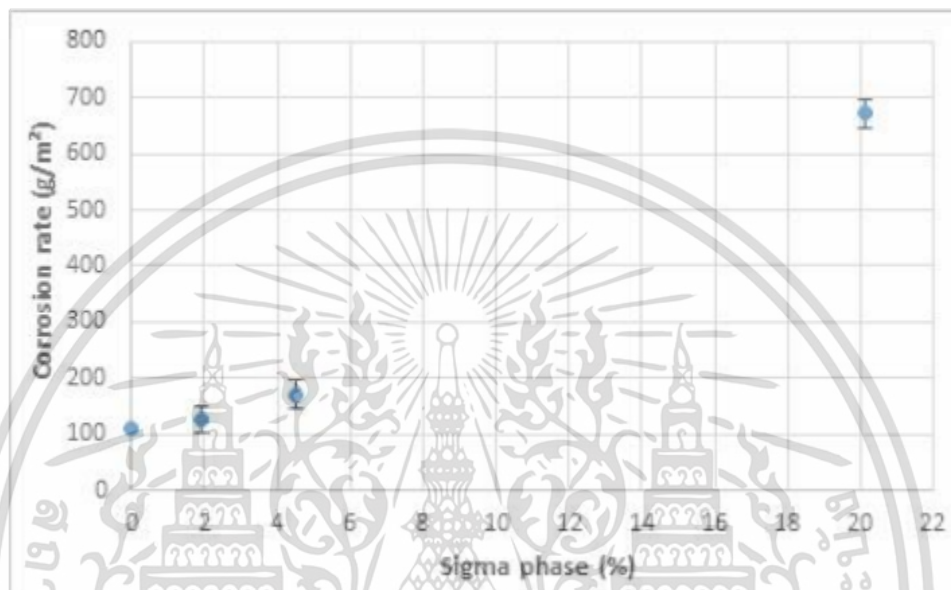
ในงานวิจัยของ Yoda และคณะ [13] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Cr ต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในโลหะผสม Co-(20-33)Cr-5Mo-N แสดงในรูปที่ 2.3 พบว่าเมื่อปริมาณ Cr เพิ่มขึ้น จะทำให้แลตทิซพารามิเตอร์ของเฟส γ เพิ่มขึ้น และทำให้เฟส γ มีความเสถียร ซึ่งการที่ Cr เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ คุณสมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกับงานวิจัยของของ Lee และคณะ [20] ศึกษาอิทธิพล การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุ Cr ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อปริมาณ ของธาตุ Cr เพิ่มขึ้น จาก 29 จนถึง 34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลทำให้เฟส γ มีความเสถียรและไม่มี การตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะ σ เนื่องจากผลของธาตุ Cr คือทำให้เฟส γ มีความเสถียร ช่วย ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้โลหะผสม Co-Cr-Mo สูงขึ้น



รูปที่ 2.3 กราฟความเค้น-ความเครียด ของ (1) ไม่มี N เป็นส่วนประกอบใน (20-33)Cr และ (2) มี N เป็นส่วนประกอบใน (20-33)Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยของ Cavalcanti และคณะ [14] ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels) โดยสรุปออกเป็นกราฟดังรูปที่ 2.4 แสดงเป็นความสัมพันธ์ของ อัตราการกัดกร่อนกับสัดส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ จากกราฟพบว่าเมื่อปริมาณของสัดส่วน สารประกอบเชิงโลหะ σ เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น



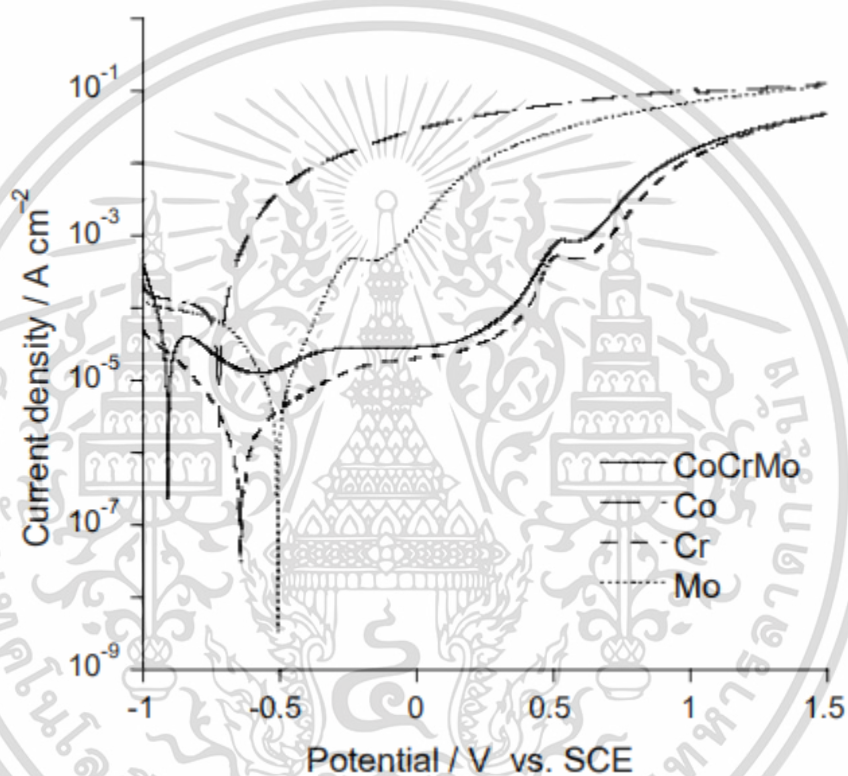
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับสัดส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นบ่งชี้ว่าโครงสร้างจุลภาคของเฟส γ (FCC) มีความเสถียรมากกว่าเมื่อเทียบกับเฟส ϵ (HCP) และการเพิ่มปริมาณของธาตุ Cr ยังช่วยลดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ σ ส่งผลให้คุณสมบัติด้านการกัดกร่อนต่ำลงและโครเมียมจะทำให้เฟส γ มีความเสถียรสูง

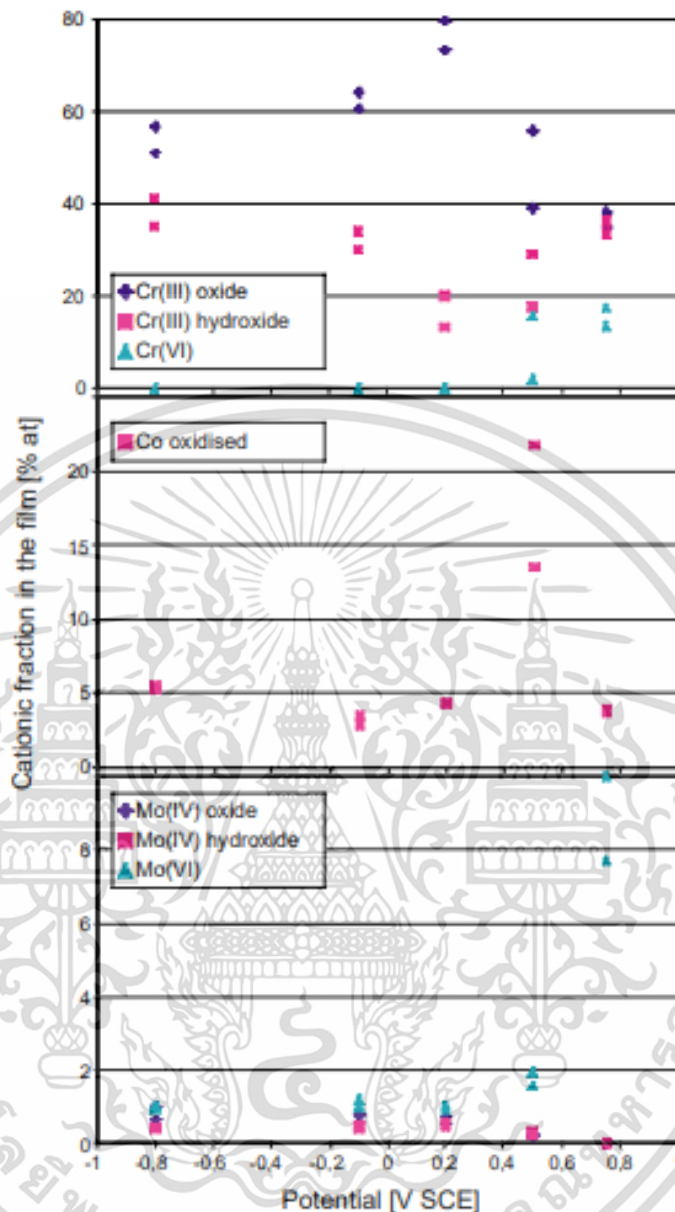
2.1.3.2 การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo

การกัดกร่อนคือปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับสภาวะแวดล้อมภายนอก ผลที่ได้จะทำให้โลหะนั้นเสื่อมสภาพลงและส่งผลให้โลหะผสมเกิดการเสื่อมด้านความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อน โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าหรือปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น ขณะที่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะผสม Co-Cr-Mo ลักษณะเป็นการเกิดสนิมหรือเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นแนวทางในการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกให้ต่ำที่สุดต่อโลหะผสมชนิดนี้สามารถเลือกใช้ชนิดของโลหะผสมเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในด้านการกัดกร่อนต่อโลหะผสม จากในงานวิจัยของ Hodgson และคณะ [15] ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของโลหะผสม Co-Cr-Mo ด้วยการจำลองสารละลายที่มีอยู่ในร่างกายขึ้นมา กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันในรูปที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบองค์ประกอบโลหะบริสุทธิ์ Co Cr และ Mo กับโลหะผสม Co-Cr-Mo เพื่อศึกษาผลกระทบแต่ละองค์ประกอบ จากกราฟโพลาริเซชันสำหรับโลหะ Co Cr และ Mo และโลหะผสม Co-Cr-Mo เห็นได้

ชัดว่ามีเพียงโลหะ Cr กับโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่มีช่วงการแสดงความเฉื่อยต่อการกัดกร่อนหรือแสดงช่วงพาสซีฟ เกิดระหว่างช่วง -0.4 ถึง 0 V vs SCE ซึ่งช่วงพาสซีฟฟิล์มหรือออกไซด์เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของโลหะผสม ทำหน้าที่ในการปกป้องพื้นผิวของโลหะผสมจากการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมภายนอกและใช้เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวโลหะผสมมีปริมาณโครเมียมออกไซด์มากกว่า 90% บนพื้นผิวของโลหะผสม ประกอบไปด้วย Cr(III) ออกไซด์ Cr(III) ไฮดรอกไซด์ และ Cr (VI) ออกไซด์และพบออกไซด์ของ Co กับ ออกไซด์ของ Mo ด้วยเช่นกันแต่พบในปริมาณต่ำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



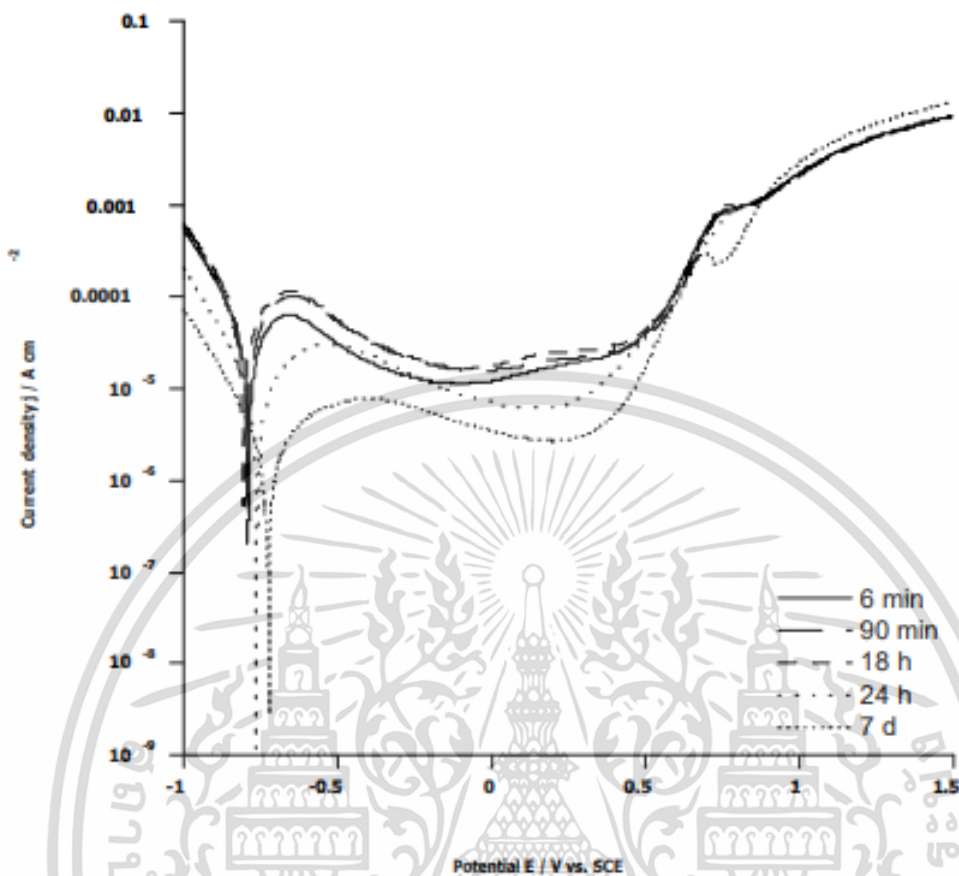
รูปที่ 2.5 กราฟโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-Cr-Mo และธาตุ Co Cr และ Mo ในสารละลาย NaCl (pH 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 2.6 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของออกไซด์ฟิล์มของโลหะของ Cr-Cr-Mo

ในงานวิจัยของ Kurz และคณะ [16] ได้ศึกษาพฤติกรรมการก่อตัวของออกไซด์ฟิล์มในโลหะผสม Co-Cr-Mo ด้วยการจำลองสารละลายที่มีอยู่ในร่างกายมนุษย์ (Simulated body fluid หรือ SBF) สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.14 M ที่ pH 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทำการทดลองที่ระยะ 5 ช่วงเวลา คือเวลา 6 9 นาที 18 24 ชั่วโมง และสุดท้ายเป็นเวลา 7 วัน โดยใช้ โฟเทนซิโอดนามิคโพลาริเซชัน แสดงในรูปที่ 2.7 ช่วงศักย์ไฟฟ้าแบบพาสซีฟหรือช่วงการสร้างพาสซีฟฟิล์ม มีค่าระหว่างช่วง 0 ถึง 0.5 V vs SCE ซึ่งพฤติกรรมในการสร้างออกไซด์ฟิล์มของโลหะผสมคือการปกป้องพื้นผิวของโลหะผสมจากการถูกทำลายจากสภาพแวดล้อมภายนอก และองค์ประกอบทางเคมีเกิดขึ้นบนพื้นผิวประกอบไปด้วย Cr_2O_3 (โครเมียมออกไซด์) และออกไซด์ของ Co กับ Mo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



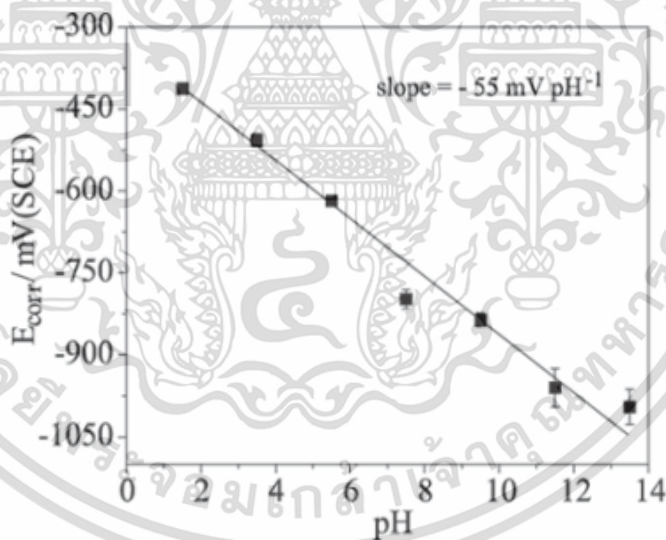
รูปที่ 2.7 กราฟโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-Cr-Mo ในการจำลองสารละลายภายในร่างกายมนุษย์ (pH 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส)

ในงานวิจัยของ Bellefontaine [17] ได้ศึกษาการก่อตัวของออกไซด์ฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่เกิดขึ้นในโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งโครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้มีคุณสมบัติทำให้โลหะผสมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง โดยโครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดมาจากองค์ประกอบของโลหะผสม ลักษณะของโครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นคือมีความหนาเกิดขึ้นมาบริเวณบนพื้นผิวของโลหะผสม ซึ่งโครเมียมออกไซด์ทำหน้าที่ในการปกป้องเนื้อของโลหะผสมที่จะถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกกับ pH ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Co-28Cr-(5-7)Mo เมื่อปริมาณของโครเมียมมีปริมาณมาก จะส่งผลให้เกิดการสร้างชั้นออกไซด์บนหน้าผิวสัมผัสของโลหะผสม และช่วยต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ขณะที่ปริมาณของ Mo เท่ากับ 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล เช่น การเพิ่มความแข็งแรงโดยเกิดสารละลายของแข็งและเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะบริเวณ

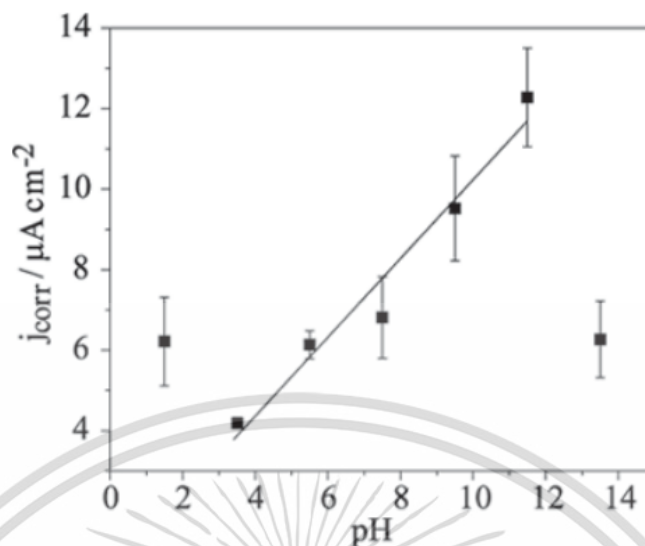
ในงานวิจัยของ Banu และคณะ [18] ได้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo-W ในกรดแลคติก (Lactic acid) โดยทำการทดลองทั้งหมดเวลา 168 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันในการวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อน ใช้เทคนิค X-ray

photoelectron spectroscopy (XPS) ในการวิเคราะห์ธาตุและใช้เทคนิค Inductively coupled plasma optical spectroscopy (ICP-OES) ในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในชั้นฟิล์มออกไซด์และปริมาณของธาตุที่ละลายออกมาในสารละลายหลังจากการทดลองกัดกร่อน จากการศึกษาพบว่าโลหะผสม Co-Cr-Mo มีความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นของ พาสซีฟฟิล์มของ Cr_2O_3 (โครเมียมออกไซด์) โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นมาเพื่อ มีคุณสมบัติในการปกป้องพื้นผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนโดยสารละลายกรดแลคติก ซึ่งชั้นออกไซด์จะช่วยเพิ่มความต้านทานให้กับโลหะผสม

ในงานวิจัยของ Giacomelli และคณะ [19] ศึกษาพฤติกรรมไฟฟ้าเคมีของโลหะผสม Co-Cr-Mo ด้วยวิธีการ Open circuit potential และ โพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันในสารละลาย น้ำลายเทียมหรือสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยทำการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 7 ถึง 47 องศาเซลเซียส และในช่วงของค่า pH อยู่ระหว่าง 1.4-13.4 จากการศึกษาพบว่าค่า pH มีอิทธิพลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ดังรูปที่ 2.8 กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงและรูปที่ 2.9 กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันของ Co และ Cr ที่ก่อตัวเป็นชั้นของออกไซด์หรือที่เรียกว่าพาสซีฟฟิล์ม สรุปได้ว่าค่า pH และค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน แต่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo

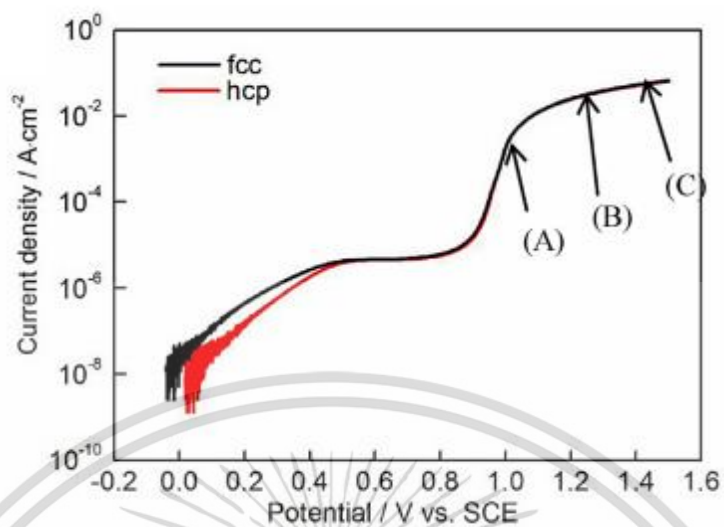


รูปที่ 2.8 ค่า OCP ในสารละลาย Artificial saliva ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) กับ ค่า pH

ในงานวิจัยของ Zhang และคณะ [11] ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่ประกอบด้วยเฟส γ และเฟส δ ในสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดนามิคโพลาริเซชันและทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนแสดงในรูปที่ 2.10 โพลาริเซชันของโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมการกัดกร่อนของโครงสร้างผลึก FCC และโครงสร้างผลึก HCP ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ในรูปที่ 2.11 จากกราฟพบว่า E_{ocp} (Open circuit potential) ของโครงสร้าง FCC มีค่าต่ำกว่า E_{ocp} ของโครงสร้าง HCP และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการ Scanning electron microscope (SEM) รูปที่ 2.12 เพื่อเปรียบเทียบการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างใดมากกว่ากัน และวิเคราะห์ธาตุปริมาณธาตุด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) เพื่อตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่ละลายออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมหลังจากการทำการกัดกร่อนในสารละลาย H_2SO_4 แสดงรูปที่ 2.13 และ 2.14

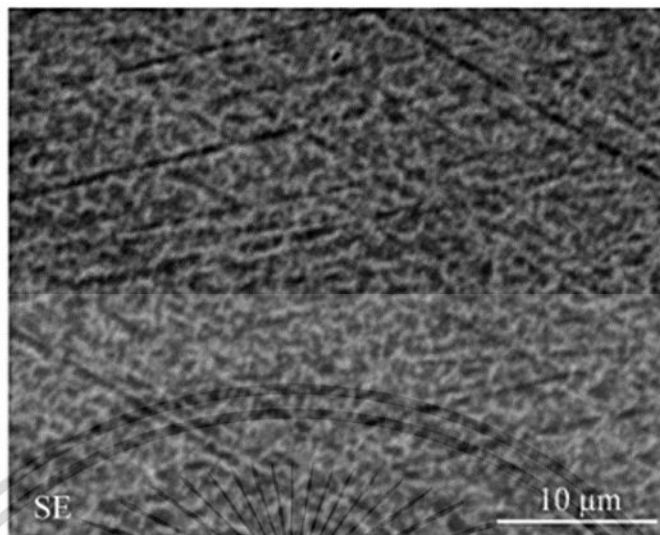


รูปที่ 2.10 กราฟโพลาริเซชันของโครงสร้าง FCC และ HCP ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



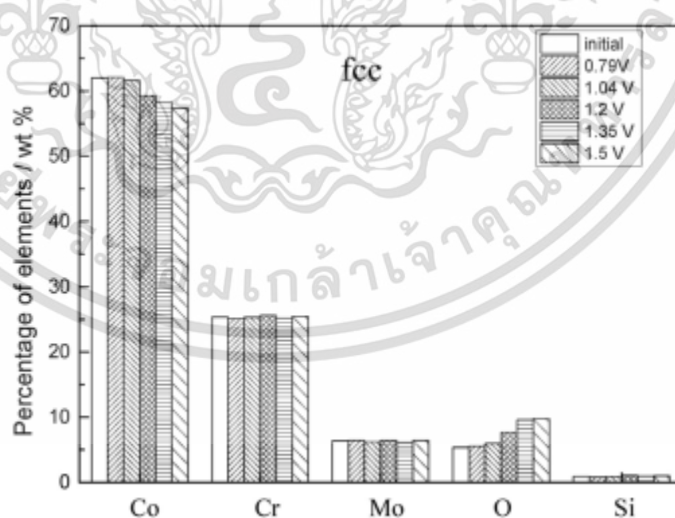
รูปที่ 2.11 SEM ของโครงสร้าง HCP หลังโพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้า 1.2V ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

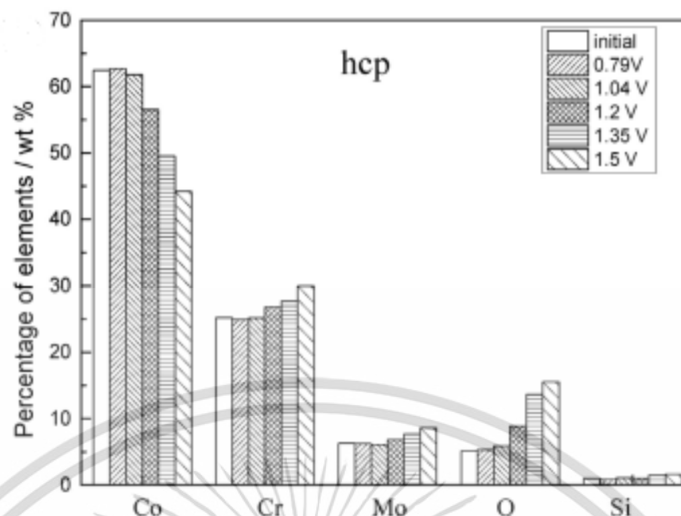


รูปที่ 2.12 SEM ของโครงสร้าง FCC หลังโพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้า 1.2V ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โครงสร้างจุลภาคของโครงสร้าง HCP ที่เกิดขึ้นหลังการทำการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้า 1.2 V จากการตรวจสอบด้วย SEM แสดงในรูปที่ 2.11 แสดงพบว่าโครงสร้างมีการเฟส σ เกิดขึ้นมากมายในหลายจุดในโครงสร้างนี้ ซึ่งเป็นส่วนทำให้โลหะผสมเกิดการกัดกร่อนสูงกว่าโครงสร้าง FCC ในขณะที่รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้าง FCC ที่เกิดขึ้นหลังการทำการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้า 1.2 V จากการตรวจสอบด้วย SEM พบว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและการกัดกร่อนเกิดขึ้นเล็กน้อย



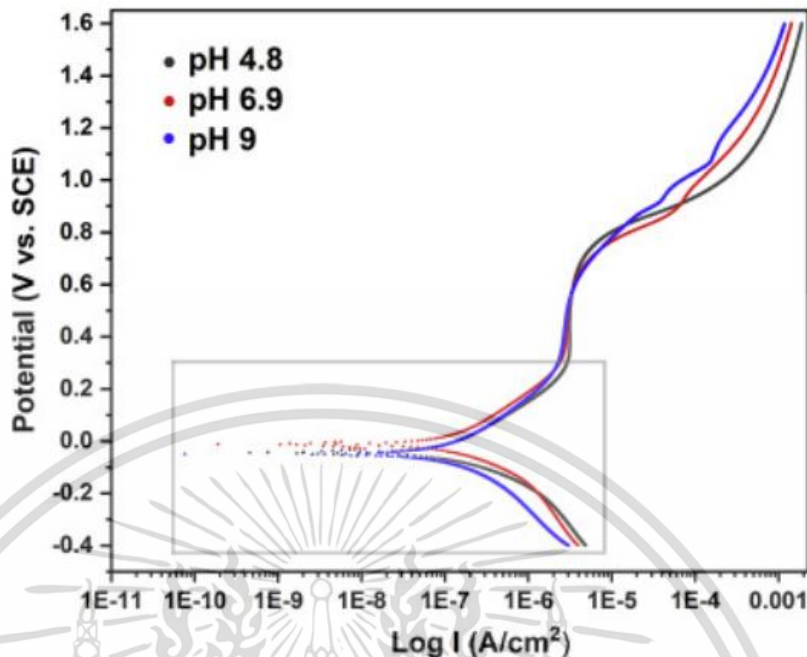
รูปที่ 2.13 EDX ของพื้นผิวโครงสร้าง FCC หลังการทำโพลาริเซชัน ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.14 EDX ของพื้นผิวโครงสร้าง HCP หลังการทำโพลาริเซชัน ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่หลุดออกจากโลหะผสม Co-Cr-Mo หลังจากการทำการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของโครงสร้าง FCC และโครงสร้าง HCP ด้วยเทคนิควิเคราะห์ EDX ในรูปที่ 2.13 และ 2.14 สำหรับโครงสร้างทั้งสอง พบว่าปริมาณ Co หลุดออกมามากกว่าธาตุ Cr Mo O และ Si ซึ่งบ่งชี้ว่า Co เป็นส่วนประกอบที่มีความเสถียรน้อยที่สุดและง่ายต่อการสึกกร่อนในสถานะเหล่านี้ ในขณะที่เมื่อศักย์ไฟฟ้ากัดสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณธาตุ Cr Mo O และ Si มีแนวโน้มหลุดออกมาสูงขึ้นในโครงสร้าง HCP เมื่อเปรียบเทียบกับ FCC ดังนั้นโครงสร้าง HCP มีแนวโน้มการกัดกร่อนสูงกว่าโครงสร้าง FCC

ในงานวิจัยของ Saha และคณะ [20] ศึกษาการทดสอบโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-Cr ในสารละลายน้ำลายเทียมที่มีค่า pH ต่างกัน ในรูปที่ 2.15 จากกราฟทั้ง 3 ชนิดของค่า pH ณ มีลักษณะใกล้เคียงกัน มีช่วงโพลาริเซชันตั้งแต่ค่าศักย์ไฟฟ้า -400 ถึง 1600 mV vs. SCE ในช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและค่าความหนาแน่นกระแสคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการก่อตัวของชั้นออกไซด์ของพื้นผิวโลหะผสมซึ่งเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้า +300mV และสามารถหาค่าออกเป็นพารามิเตอร์การกัดกร่อน แสดงได้ดังตารางที่ 2.4 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงบ่งชี้ถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้น โดยค่าศักย์ไฟฟ้าในการกัดกร่อน (E_{corr}) ที่ pH 4.8 pH 6.9 และ pH 9 คือ -44.5 -12 และ -49.5 mV ตามลำดับ โดยทั่วไปการบ่งชี้ถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้น สามารถดูจากค่ากระแสการกัดกร่อน (I_{corr}) ถ้าค่า I_{corr} สูงแสดงถึงอัตราการกัดกร่อนสูงหรือความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ โดยพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr ในสารละลาย pH 4.8 มีค่ากระแสการกัดกร่อนที่สูงกว่า 1.11×10^{-7} A/cm² ค่ากระแสการกัดกร่อนในสารละลาย pH 6.9 และ pH 9 มีค่า 9.48×10^{-8} A/cm² และ 9.31×10^{-8} A/cm² ตามลำดับสรุปว่าในสารละลาย pH 4.8 หรือมีความเป็นกรด จะมีค่ากระแสการกัดกร่อนสูงหรือความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ

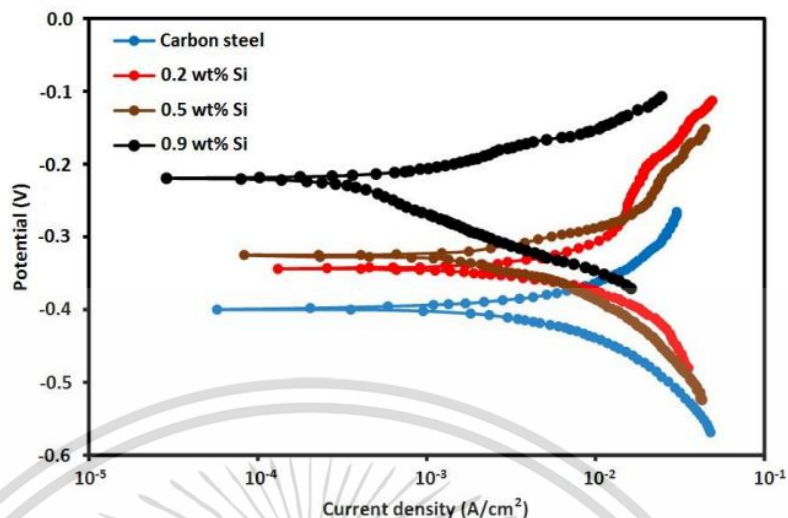


รูปที่ 2.15 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-Cr ในสารละลายน้ำลายเทียมมีค่า pH แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr ในสารละลายน้ำลายเทียมมีค่า pH แตกต่างกัน

pH	พารามิเตอร์การกัดกร่อน			
	E _{corr} (mV)	I _{corr} (A/cm ²)	B _a (mV)	B _c (mV)
4.8	-44.5	1.11E-07	201.91	126.28
6.9	-12	9.48E-08	179.57	129.91
9	-49.5	9.31E-08	196.78	167.04

ในงานวิจัยของ Zhou และคณะ[21] ศึกษาผลกระทบของการเพิ่มธาตุ Si ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนในกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถศึกษาได้จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 2.16 จากกราฟแสดงจุดความหนาแน่นกระแส Anodic ต่ำลงเมื่อปริมาณของธาตุ Si สูงขึ้นในเหล็กกล้าผสมคาร์บอน แสดงค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนได้ดังตารางที่ 2.5 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสลดลงเมื่อปริมาณของธาตุ Si สูงขึ้นและอัตราการกัดกร่อนสามารถวัดได้จากความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน กล่าวคือเมื่อเพิ่มธาตุ Si เข้าไปจะทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลง ซึ่งบ่งชี้ถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นด้วยการเติม Si



รูปที่ 2.16 กราฟโพล่าไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกรดสารละลายซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์การกัดกร่อนจากกราฟโพล่าไรเซชันในกรดสารละลายซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

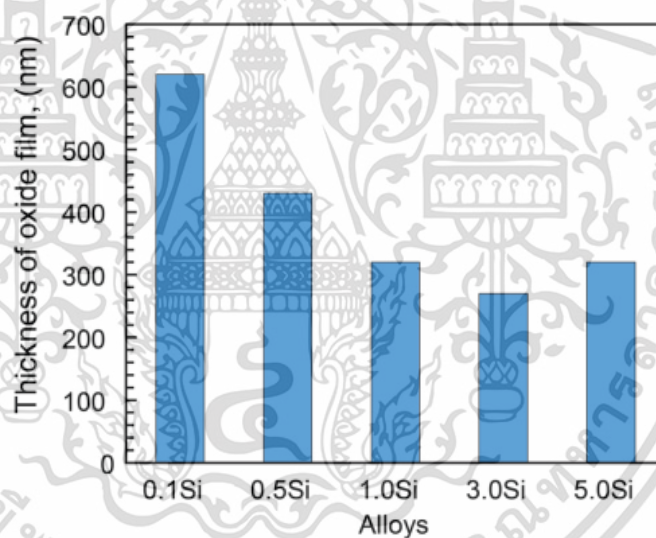
Alloys	Corrosion current density (A/cm^2)	Corrosion potential (v)	-Ba (mV/dec^{-1})	-Bc (mV/dec^{-1})	Corrosion rate (mm/year)
Carbon steel	0.00827	-0.395	22	52	7.6
0.2 wt% Si	0.00754	-0.346	25	59	5.2
0.5 wt% Si	0.00562	-0.328	28	56	4.3
0.9 wt% Si	0.00089	-0.218	33	54	2.1

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo จะใช้เทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพล่าไรเซชัน เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อน เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) จะถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราการการกัดกร่อนต่อไป ในพฤติกรรมการศึกษาการกัดกร่อนระหว่างเฟส γ (FCC) กับเฟส ϵ (HCP) สรุปได้ว่าเฟส γ มีอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าเฟส ϵ ในขณะที่พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายที่มี pH แตกต่างกันเมื่อค่า pH ต่ำจะให้อัตราการกัดกร่อนสูงกว่าค่า pH สูงและการเกิดขึ้นมาของพาสซีฟฟิล์มหรือออกไซด์จะสร้างความหนาขึ้นมาบนพื้นผิวของโลหะผสมเพื่อปกป้องเนื้อของโลหะที่จะถูกกัดกร่อนจากสารละลายหรือสภาพแวดล้อมภายนอกส่งผลทำให้โลหะผสมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3. ผลกระทบของ Si ต่อโลหะผสมต่างๆ

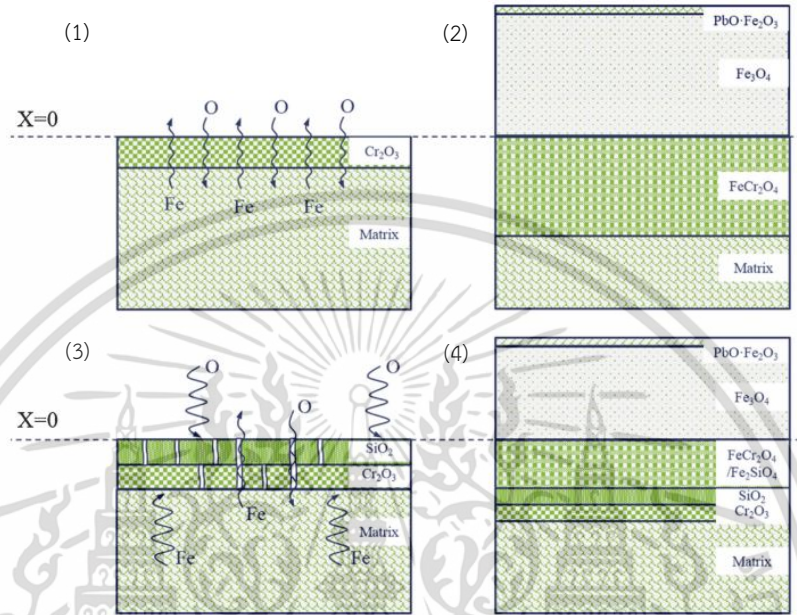
กลุ่มโลหะผสมของโคบอลต์เป็นกลุ่มโลหะผสมที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรงและความแกร่งที่สูง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำมาก การเพิ่มธาตุ Si เป็นที่นิยมกันแพร่หลายในการนำมาเติมเพื่อเป็นส่วนผสมของโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งสามารถเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการกัดกร่อนหรือการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง จากในงานวิจัยของ Tunthawiroon และคณะ [22] การศึกษาอิทธิพลของปริมาณของ Si แตกต่างกัน 0.1Si 0.5Si 1.0Si 3.0Si และโลหะผสม 5.0Si ในโลหะผสม Co-Cr-Mo ต่อการก่อตัวของฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Cr-Mo หลังการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.17 จากกราฟข้อมูลเหล่านี้บ่งชี้ว่าความหนาลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นของ Si เพิ่มขึ้น มีความเป็นไปได้ว่าการลดความหนาของฟิล์มออกไซด์นั้นเกิดจากการก่อตัวของ Cr_2O_3 ที่เสถียรกว่าและการก่อตัวของ Si_2O ภายใน ดังนั้น การแพร่กระจายของธาตุโลหะจากโลหะผสมและการแพร่กระจายของออกซิเจนเข้าสู่ภายนอกจึงถูกชะลอลงอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการเพิ่มธาตุ Si ในโลหะผสม ทำให้ความหนาของฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวลดลงที่การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.17 กราฟความหนาของออกไซด์ฟิล์มกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo

ในงานวิจัยของ Wang และคณะ [23] ได้ศึกษาผลกระทบของ Si ต่อความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของ Cr ที่มีปริมาณ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังจากการทำออกซิเดชันแสดงในรูปที่ 2.18 จากการศึกษาพบว่าในชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้น อีออนของ Fe แพร่กระจายออกสู่ภายนอกและก่อตัวเป็นออกไซด์ของ Fe โดยสัมพันธ์การแพร่ของธาตุ Fe นั้นมีค่ามากกว่าธาตุ Cr จึงพบว่าด้านนอกองค์ประกอบของออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงเต็มไปด้วยอีออนของธาตุ Fe ส่วนด้านภายในนั้นประกอบไปด้วยอีออนธาตุ Cr และในเมทริกซ์มีการตกตะกอนออกไซด์ของธาตุ Fe และธาตุ Cr ในส่วนอิทธิพลของการเพิ่มธาตุ Si เข้าไปในโลหะผสมจะส่งผลทำให้ความหนาของชั้นออกไซด์บางกว่าเมื่อเทียบ

กับการไม่เพิ่มธาตุ Si เข้าไป ซึ่ง Si จะทำหน้าที่ขัดขวางและช่วยลดการเกิดออกซิเดชันและสร้างออกไซด์ของ SiO_2 กับออกไซด์ของ Cr_2O_3 ทำหน้าที่ในการเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ดังนั้นธาตุ Cr และการเติมธาตุ Si เข้าไปจะทำให้โลหะผสมนั้นมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.18 Schematic diagrams ของจุดเริ่มต้น (1) (2) (3) และ (4) กระบวนการออกซิเดชันของเหล็ก ส่วนผสม Cr 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับ (3) และ (4) โดยไม่มี (1) และ (2) ที่มีส่วนผสมของ Si

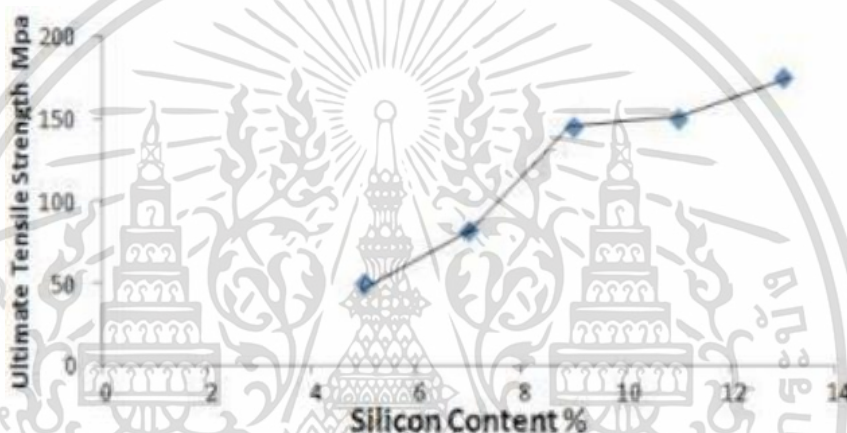
จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นด้านอิทธิพลของ Si ต่อความต้านทานโลหะผสมพบว่า ปฏิกริยาของธาตุ Si ช่วยปรับปรุงการยึดติดและสร้างชั้นของออกไซด์ฟิล์ม Cr_2O_3 ซึ่งสภาพของออกไซด์ของ Cr_2O_3 นี้มีความเสถียรมากกว่าออกไซด์ของ CoO ในโลหะผสม Co-Cr-Mo อนุภาคของออกไซด์ SiO_2 ถูกพบในระหว่างชั้นออกไซด์และเมทริกซ์ของโลหะผสม Co-Cr-Mo และยังคงพบว่ายู่ตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งจะทำหน้าที่ยับยั้งการแพร่ของออกซิเจน และลดอัตราการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงและมีส่วนช่วยปรับปรุงออกไซด์ของ Cr_2O_3 ส่งผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo สูงขึ้น

2.1.3.4 ผลกระทบของ Si ต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม

ในงานวิจัยของ Mathai และคณะ [24] ทำการศึกษาผลกระทบของ Si ต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Al-Si โดยทำการศึกษาปริมาณของ Si ที่ปริมาณ 4.0 6.0 8.0 10.0 14.0 และ 16.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะผสม ซึ่งได้แก่ความต้านทานแรงดึงและความแข็ง จากผลการศึกษาพบว่าในการเพิ่มปริมาณของธาตุ Si เข้าไปในโลหะผสม Al-Si เมื่อปริมาณธาตุ Si มากขึ้นจะทำให้คุณสมบัติทางกล ซึ่งได้แก่ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานการสึกหรอและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น แต่ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าต่ำลง

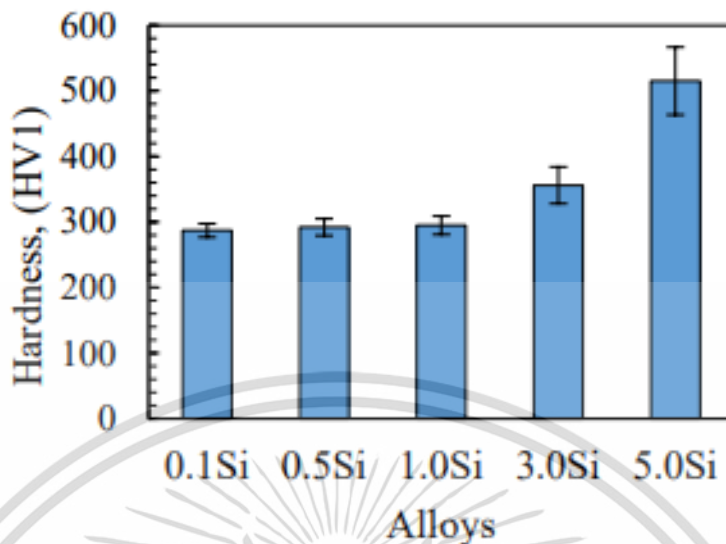
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัย Kalhapure และคณะ [25] ทำการศึกษาอิทธิพลของธาตุ Si ต่อคุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม ศึกษาปริมาณของธาตุ Si คือ 5.0 7.0 9.0 12.5 และ 14.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำและวัดคุณสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness testing) เพื่อหาค่าของความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) ความแกร่ง (Toughness) ความเหนียว (Ductility) และ ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มมากขึ้นไปจนถึง 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดคือ 175 MPa แสดงในรูปที่ 2.19 และการเพิ่มปริมาณของ Si จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็งแรงจุดครากมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของโลหะผสมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ขณะที่ค่าของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณของ Si มีค่ามากขึ้น

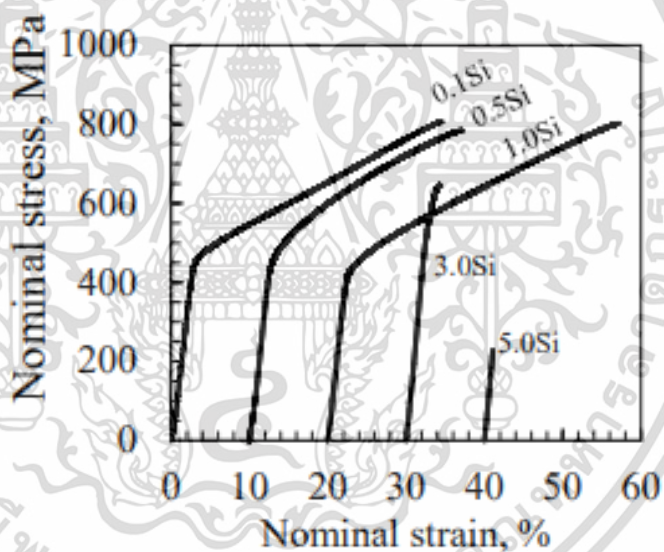


รูปที่ 2.19 ผลกระทบของปริมาณ Si ต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดในโลหะผสม Al

ในงานวิจัยของ Tunthawiroon และคณะ [26] ศึกษาผลกระทบของ Si ต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-Cr-Mo จากกราฟความแข็งและปริมาณของ Si ที่แตกต่างกัน Co-Cr-Mo 0.1Si 0.5Si 1.0Si 3.0Si และ 5.0Si ในโลหะผสม Co-Cr-Mo รูปที่ 2.20 พบว่าความแข็งของโลหะผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะผสม 0.1Si 0.5Si 1.0Si 3.0Si และ 5.0Si คือ 287 292 295 356 และ 515 HV ตามลำดับ ซึ่งความแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากสารประกอบเชิงโลหะมีความแข็งแรงสูงกว่าเมทริกซ์โดยรอบ และทดสอบแรงดึงพร้อมแสดงกราฟความเค้นกับความเครียดของโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่ปริมาณของ Si ต่างกัน ในรูปที่ 2.21 จากกราฟผลการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงของ 0.1Si 0.5Si 1.0Si 3.0Si และ 5.0Si พบความต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.1Si ถึง 1.0Si อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ Si ที่สูงกว่า 3.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะลดความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวลง ดังที่เห็นในกราฟความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม 3.0Si และ 5.0Si



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณธาตุ Si ที่ 0.1Si 0.5Si 1.0Si 3.0Si และ 5.0Si



รูปที่ 2.21 กราฟความเค้นและความเครียดของโลหะผสม Co-Cr-Mo

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสามารถสรุปในด้านโครงสร้าง เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo ประกอบด้วย เฟส γ เฟส ϵ และสารประกอบเชิงโลหะ σ โดยเฟส γ มีความเหนียวและความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเฟส ϵ ขณะที่การเกิดสารประกอบเชิงโลหะ σ จะทำให้มีอัตราการกัดกร่อนสูงหรือความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง ในด้านคุณสมบัติทางกลนั้น โลหะผสม Co-28Cr-6Mo มาตรฐาน ASTM F799 มีความแข็งแรงสูงกว่า ASTM F75 ส่วนในด้านการกัดกร่อน โลหะผสม Co-28Cr-6Mo มีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง เนื่องจากองค์ประกอบของออกไซด์ฟิล์มคือ Cr ออกไซด์ ซึ่งมีส่วนช่วยปกป้องพื้นผิวของโลหะผสมจากการกัดกร่อน ขณะที่การกัดกร่อนในสารละลายที่มีค่า pH ต่ำหรือ

เป็นกรดสูง จะส่งผลทำให้โลหะผสมมีการกัดกร่อนสูงขึ้น สำหรับคุณสมบัติของธาตุ Si ต่อโลหะผสม Co-Cr-Mo คือจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงให้สูงขึ้นและธาตุ Si จะช่วยทำให้โลหะผสมมีความต้านทานการกร่อนที่อุณหภูมิสูงให้สูงขึ้น และการเติมธาตุ Si ให้มากขึ้นในเหล็กกล้าผสมคาร์บอนนั้น จะทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลง และในปัจจุบันยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับธาตุ Si ที่ผสมเข้ากับโลหะผสม Co-Cr-Mo นี้อย่างมากมายนัก โดยเฉพาะในงานที่เป็นวัสดุปลูกฝังหรือวัสดุที่ใช้กับร่างกายมนุษย์ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาอิทธิพลของ Si ต่อโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo

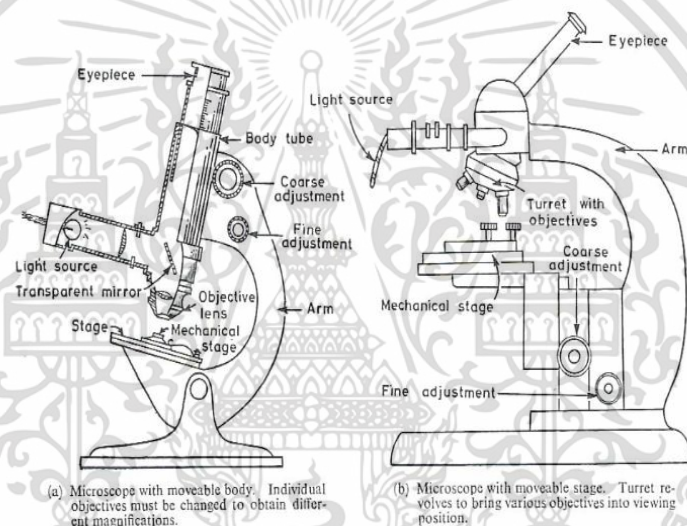
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

การศึกษาและการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะ (Physical properties) เป็นขั้นตอนพื้นฐานและเป็นการวิเคราะห์ตรวจสอบเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของอะตอมในโลหะ ดังนั้นในการศึกษาโครงสร้างของโลหะสามารถแบ่งออกได้เป็น การตรวจสอบขนาดใหญ่หรือในระดับมหภาค (Macroscopic examination) ซึ่งเป็นการตรวจสอบด้วยกำลังขยายขนาดต่ำหรือสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และการตรวจสอบในระดับที่สายตามองไม่เห็นหรือในระดับจุลภาค (Microscopic examination) คือ มีขนาดระดับไมโครเมตร (Micrometer) ในการศึกษารายละเอียดของวัสดุในระดับไมโครเมตรหรือไมครอน จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย ซึ่งเป็นการศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุ ในส่วนขั้นตอนการตรวจสอบในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นก่อนอื่นวัสดุหรือชิ้นงานจะต้องมีการเตรียมผิวของชิ้นงานทดสอบก่อน โดยการนำไปขัดกับกระดาษทรายจากขนาดหยาบไปจนถึงขนาดละเอียด (ตั้งแต่เบอร์ 100 300 600 800 1000 1500 2000 และ 4000) และใช้ผงขัดที่มีขนาดเล็กมาก (ผงอลูมินา Al_2O_3 ขนาด 1 และ $0.3 \mu m$) ขัดต่ออีกครั้งเพื่อให้ได้พื้นผิวที่มีความมันเงา และทำความสะอาดด้วยเอทานอล หลังจากนั้นทำการกัดผิวด้วยสารละลายกรด (Etching) เพื่อให้สามารถจำแนกแยกแยะ และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคได้ ในการศึกษาลักษณะรูปร่าง ขนาดของสารประกอบเชิงโลหะ และโครงสร้างของชิ้นงานได้อย่างง่ายขึ้น หรือชิ้นงานมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ที่ระดับกำลังขยายตั้งแต่ 10 ถึง 100 เท่า จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูงอย่างกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำอิเล็กตรอน

2.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน จะทำให้เห็นภาพวัตถุได้โดยมีการสะท้อนแสงจากวัตถุเข้าสู่เลนส์ประกอบด้วย เลนส์ 2 ชุด คือเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และเลนส์ใกล้ตา (Ocular lens หรือ Eyepiece) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยที่เลนส์ใกล้วัตถุเป็นเลนส์ใกล้กับตัวอย่างหรือชิ้นงานที่คอยเป็นเลนส์แรกที่ทำหน้าที่ขยายภาพตัวอย่างให้ใหญ่ขึ้นจากปกติ โดยเลนส์ใกล้วัตถุจะสร้างภาพเป็นแบบภาพจริงหัวกลับที่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นจากความเป็นจริง โดยตำแหน่งของภาพจะตกไปที่เลนส์ใกล้ตาทำให้เกิดภาพเสมือนหัวกลับที่มีขนาดขยายทำให้ตามองเห็นภาพได้ชัดเจน ทำให้สามารถมองเห็นวัตถุตัวอย่างที่มี

ขนาดเล็กได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุได้แต่เฉพาะที่ผิวเท่านั้น โดยใช้หลักการสะท้อนของแสง ขณะที่วัสดุที่บ่งแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิกและพอลิเมอร์บางชนิด จะได้ภาพแตกต่างกัน เนื่องจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ วัสดุหรือชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนขึ้นเงาหรือเรียบสามารถสะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากการกัดด้วยสารละลายกรดหรือสารเคมี จะทำให้มองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้เพราะเกรนของวัสดุมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนจะขึ้นอยู่กับการสะท้อนของแสงของเกรนนั้นๆ หลังการกัดผิวในบริเวณของขอบเกรนจะเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจากการถูกกัดด้วยสารละลายกรดหรือสารเคมีมากกว่าบริเวณอื่น จึงถูกกัดออกไปมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณภายในเกรน จึงสามารถมองเห็นบริเวณของขอบเกรนได้เนื่องจากการสะท้อนของแสงที่แตกต่างจากบริเวณของพื้นเกรน [27]

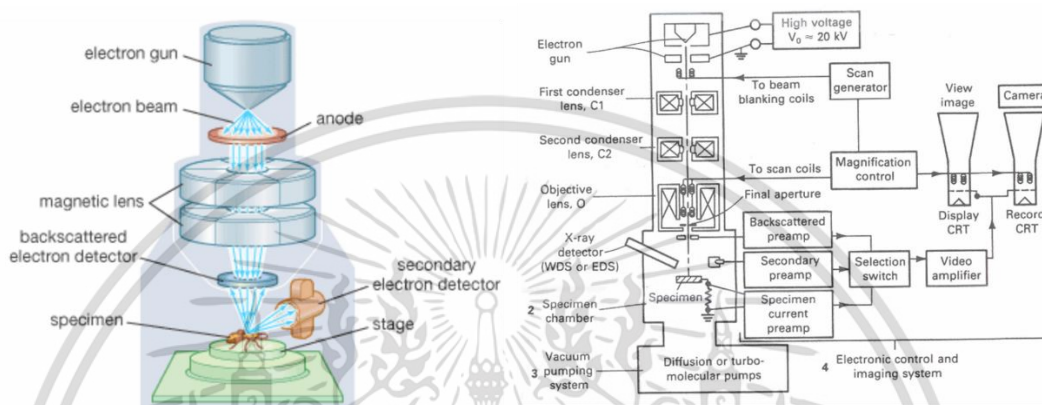


รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์เครื่องมือที่ยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าที่เป็นชิ้นงานหรือวัสดุตัวอย่าง โดยจะทำการรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ออกมา ชิ้นงานหรือวัสดุที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิวให้เรียบหรือมันเงา แต่จะต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น ทองคำ หรือคาร์บอน หลักการสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในการตรวจสอบวัสดุหรือชิ้นตัวอย่าง คือ การพิจารณาผลของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับพื้นผิวของวัสดุ แล้วทำให้อิเล็กตรอนที่พื้นผิวของชิ้นตัวอย่างหรือที่เรียกว่าอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electrons) หลุดออกมา ซึ่งมีตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) คอยทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่หลุดจากพื้นผิวของวัสดุหรือชิ้นตัวอย่างในบริเวณนั้น รูปที่ 2.23 แสดงรายละเอียดและหลักการทำงาน โดยปืนอิเล็กตรอนจะทำหน้าที่ผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และควบคุมให้อิเล็กตรอนพุ่งมาตกกระทบกับจุดเล็กๆ บน

เป้าตัวอย่างได้ โดย Scanning coils จะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพบนพื้นผิววัสดุหรือชิ้นงานตัวอย่าง และลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆ (Low angle back scattered electrons) จะทำอันตรกริยากับส่วนที่นูนของพื้นผิว และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่สอง (Secondary back scattered electrons) เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดภาพขึ้นมาโดยจะสามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่า [28]

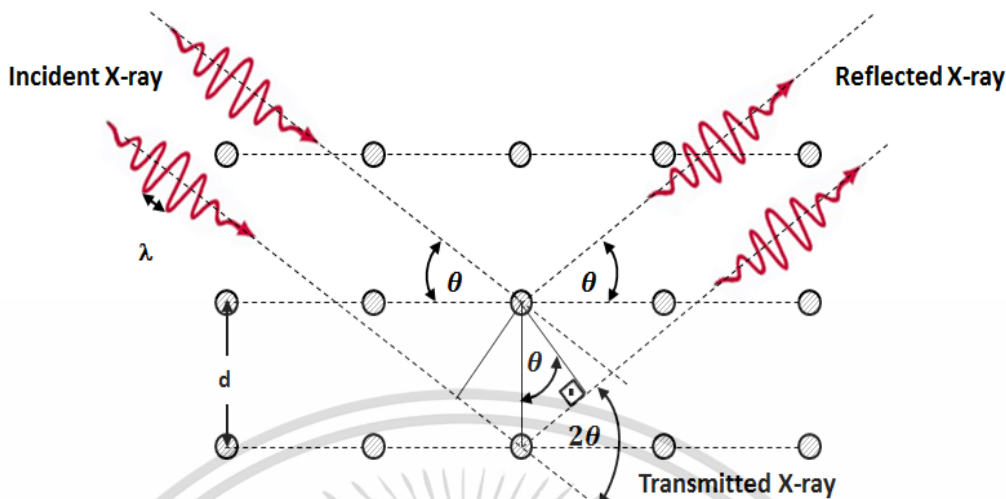


รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

2.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

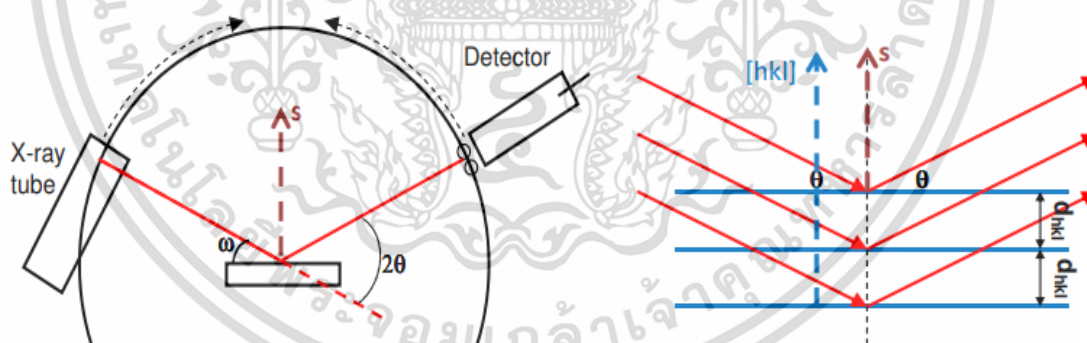
เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบไม่ทำลาย (Nondestructive analysis) เพื่อศึกษาระบบโครงสร้างของผลึกของธาตุ สารประกอบ ค่าแลคทิซพารามิเตอร์ ในเชิงปริมาณและคุณภาพ ด้วยการอาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) โดยทั่วไปจะนิยมใช้หลอดรังสีเอกซ์ที่เกิดจาก Cu ที่มีทั้ง $K\alpha$ และ $K\beta$ การนำเทคนิค X-ray diffraction มาใช้ในการวิเคราะห์ในส่วนที่เป็นผลึก ลำแสงของ X-ray เมื่อตกกระทบกับผิวของผลึกที่มุมตกกระทบที่เหมาะสม รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) และรังสีบางส่วนจะกระจัดกระจายทะลุลงไปยังผิวชั้นที่สองของผลึกที่ต่ำลงไปซึ่งจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อีกครั้งและรังสีเอกซ์บางส่วนก็จะทะลุลงไปยังผิวลึกลงที่สามโดยจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.24 สามารถอธิบายและเขียนเป็นสมการตามกฎของแบรกก์ [29]

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้รังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีที่รับการแผ่รังสี ซึ่งรูปแบบของการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกและพล็อตค่าความเข้มของการเลี้ยวเบน ในขณะที่ตัวรับรังสีเคลื่อนที่ไปบนเครื่องวัดมุมของผลึก โดยแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (Intensity) กับมุมที่ทำกรวัด (2-theta) แสดงได้ในรูปที่ 2.25 และนำข้อมูลที่ได้นี้เทียบกับตำแหน่งมุมของฟีกที่รวบรวมเป็นฐานข้อมูลไว้อยู่แล้ว ซึ่งทำให้สามารถบ่งชี้ได้ว่าเป็นธาตุ สารประกอบหรือโครงสร้างผลึกแบบใด [30]



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงรายละเอียดของเครื่องวัดการเลี้ยวเบน

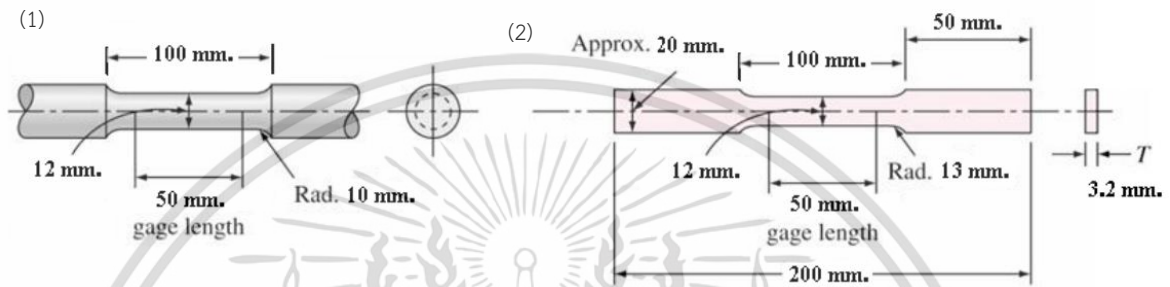
2.3 สมบัติทางกล

การทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรม เพื่อหาสมบัติของวัสดุทางด้านความแข็งแรง และการทดสอบด้วยแรงดึงนี้จะช่วยให้ทราบค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ความแข็งแรงจคราก (Yield strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงสุดโดยไม่เสียรูป ความแข็งแรงดึงหรือความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงดึงสูงสุดหรือความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือ จุดที่วัสดุรับแรงสูงสุด (Ultimate strength) เเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) และอัตราส่วนการหดตัวสัมพัทธ์ของหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Poisson ratio) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อวัสดุเพราะจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบและเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ต่อไป

การทดสอบด้วยแรงดึงโดยทั่วไปเป็นการให้แรงในแนวแกนเดียว (Uniaxial tensile test) แก่ชิ้นงานทดสอบ โดยแรงดึงนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งชิ้นงานทดสอบอาจจะเป็นทรงกระบอกหรือเป็นแผ่น แสดงดังรูป 2.26 ซึ่งขนาดความยาวของเกจ (Gauge length, L_0) จะแปรผันสอดคล้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_0) หรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (A_0) [31]



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง (1) ชิ้นงานทรงกระบอก (2) ชิ้นงานที่มีลักษณะแผ่น

เมื่อโลหะหรือวัสดุได้รับแรงดึงจะเกิดการเสียรูปในแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติก (Elastic and plastic deformation) ในช่วงแรกเมื่อโลหะหรือวัสดุได้รับแรงดึงก็จะเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่นหรืออิลาสติกก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่กระทำกับชิ้นงานและการยืดตัวของชิ้นงานเป็นเส้นตรง (Linear relationship) จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดึงขึ้นเรื่อยๆจนโลหะหรือวัสดุเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกหรือการเสียรูปแบบถาวรนั้นเอง ให้นำขนาดของแรงดึงกล่าวหาด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึงนั้นจะทำให้ได้ค่าความเค้น (Stress, σ หน่วยคือ N/m^2 หรือ Pa) ในขณะที่สัดส่วนระหว่างระยะยืดตัวต่อความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบคือ ความเครียด (Strain, ϵ ไม่มีหน่วย) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

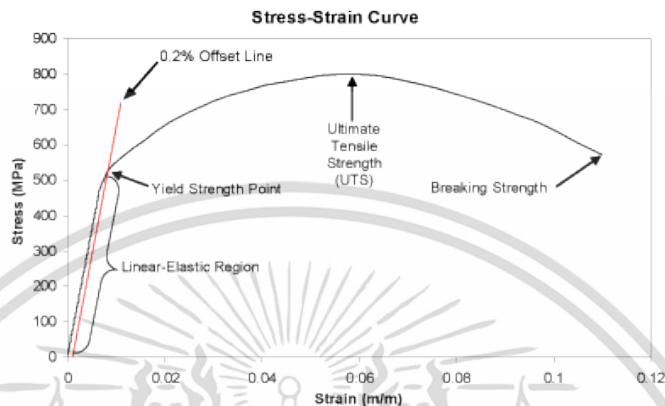
$$\sigma = F / A \quad (2.2)$$

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad (2.3)$$

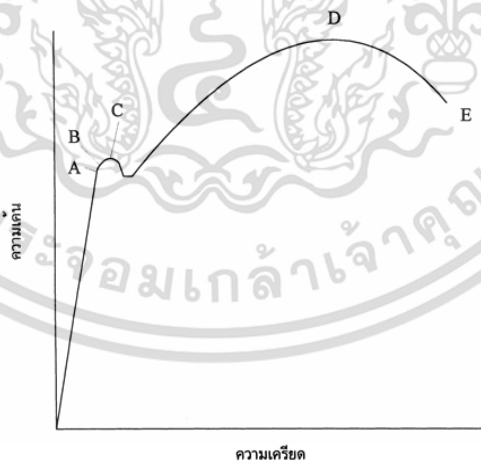
$$E = \sigma / \epsilon \quad (2.4)$$

เมื่อ E คือค่ามอดูลัสของยังค์ σ คือความเค้นทางวิศวกรรม ϵ คือความเครียดทางวิศวกรรม F คือแรงที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัด A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ΔL คือความยาวที่เปลี่ยนไปจากความยาวเดิม L_0 คือความยาวเริ่มต้น ในการพิจารณาความเค้นสามารถทำได้ 2 แบบ ได้แก่ 1 คือความเค้นแบบวิศวกรรม (Engineering stress) เป็นการพิจารณาความเค้นบนพื้นฐานพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานคงที่ และ 2 คือความเค้นจริง (True stress) เป็นการพิจารณาความเค้นบนพื้นฐานพื้นที่หน้าตัดจริงที่เปลี่ยนขนาดไปในขณะนั้น ดังนั้นความเค้นจริงจะมีค่าสูงกว่าความเค้นแบบวิศวกรรม ในการหาค่าความแข็งแรงของโลหะหรือวัสดุสามารถทำได้ด้วยการดึงวัสดุชิ้นนั้น โดยแรงที่กระทำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นกระทั่งวัสดุไม่สามารถ

ต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นต่อไปได้ จึงทำให้เกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.27 ในทางปฏิบัติ จะนิยามความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัวหรือที่เรียกว่า กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress strain curve) แสดงได้ในรูปที่ 2.28 [32]



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ Stress strain ภายใต้แรงดึง



รูปที่ 2.28 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก

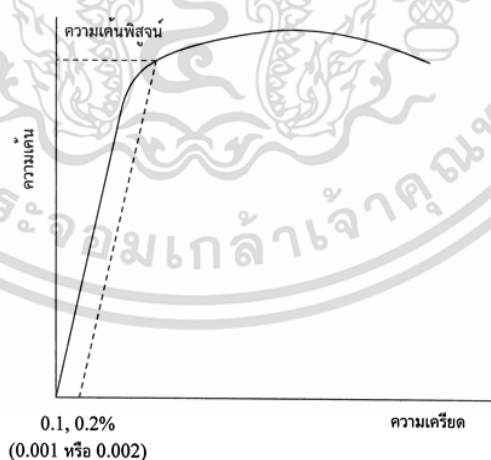
จากกราฟหรือเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดในรูปที่ 2.11 [33] เมื่อแรงดึงเริ่มกระทำต่อชิ้นทดสอบ ทำให้ชิ้นงานทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก จนถึงจุด A ซึ่งมีลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรงในช่วงนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ตามกฎของฮุก (Hook's law) หรือเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic behavior) หมายถึงเมื่อปล่อยแรงดึงที่กระทำชิ้นงานทดสอบและจะทำให้ชิ้นทดสอบกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเพิ่มแรงดึงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบต่อไปจนถึงพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลากหลายชนิดจะยังสามารถแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด B และเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) เพิ่มแรงดึงจนถึงจุด C ในจุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield point) หรือค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือ ค่าความแข็งแรงคราก ค่าความแข็งแรงจุดครากนี้เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ยังคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายหรือแตกหัก หลังจากเพิ่มแรงถึงจนเลยจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปเป็นแบบพลาสติกอย่างถาวร แล้วเพิ่มจนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดสูงสุดในจุด D นี้ก็คือค่าความเค้นความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) ที่จุด E

ในการหาค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) ของโลหะเหล็กหรือเหล็กกล้า ตามรูปที่ 2.29 สามารถสังเกตจุดคราก (จุด C) ได้อย่างชัดเจนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ขณะที่โลหะหรือวัสดุอีกหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดไปที่ค่าของความเครียดที่ 0.10 ถึง 0.20% จากนั้นทำการลากเส้นขนานกับกราฟในช่วงแรกไปจนถึงตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.32 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้เรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) หรือความเค้น 0.2% offset ซึ่งจะสามารถนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้



รูปที่ 2.29 เส้นโค้งความเค้น ความเครียด (Stress-strain curve) แบบไม่มีจุดคราก

กราฟหรือเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด นอกจากจะบอกค่าความเค้นจุดคราก ค่าความเค้นแรงดึงหรือความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดแตกหัก (Fracture strength) แล้วสามารถบ่งบอกค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ได้อีกดังนี้

(1) ความเหนียว (Ductility) ของวัสดุสามารถหาได้จากการวัดเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation) ดังสมการ 2.5 หรือเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of area) ดังสมการ 2.6

$$\%EL = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ L_f คือความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด

L_0 คือความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

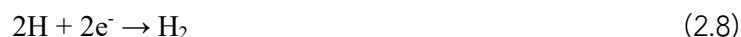
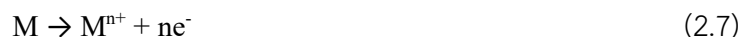
A_f คือพื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

โดยทั่วไปนิยมใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง เนื่องจากง่ายต่อการวัดค่า และความเหนียวของโลหะหรือวัสดุจะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปอีกด้วย โดยถ้าหากวัสดุมีความเหนียวสูงหรือค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงจะสามารถนำเอาวัสดุนั้นไปขึ้นรูปได้ง่าย ดังเช่น การรีด การตีขึ้นรูป การดึงเป็นลวด แต่ถ้ามีวัสดุมีความเหนียวต่ำหรือมีความเปราะสูง ก็จะนำวัสดุนั้นไปขึ้นรูปได้ยากหรือไม่สามารถทำได้เลย

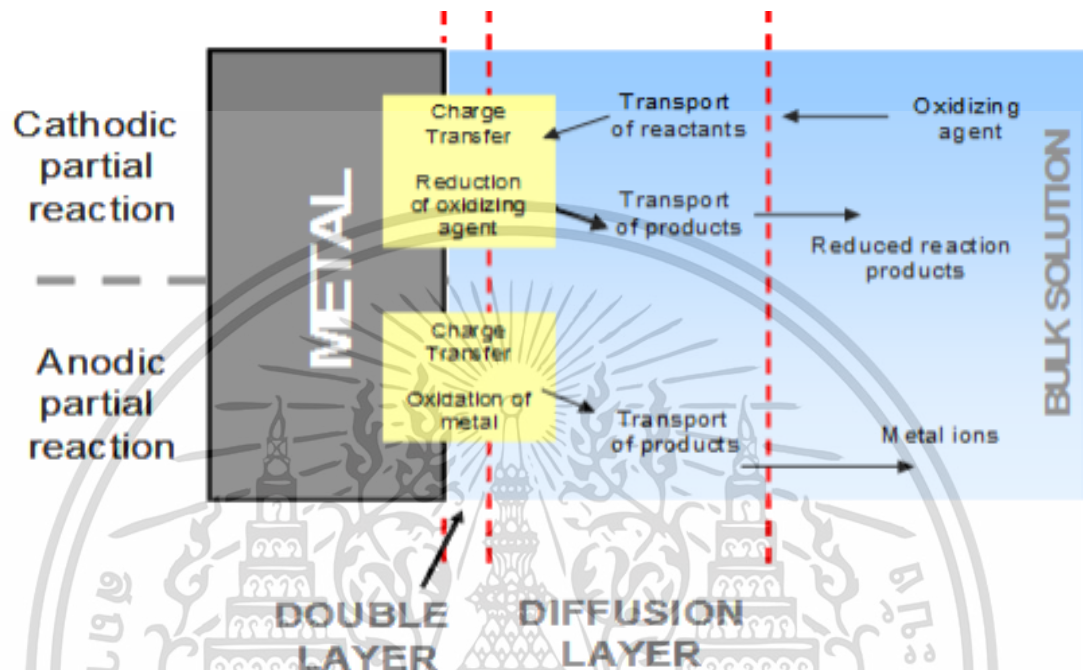
2.4 การกัดกร่อนในโลหะผสม

2.4.1 กระบวนการและสมการการกัดกร่อน

กระบวนการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม โดยธรรมชาติเมื่อเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมจะส่งผลให้วัสดุนั้นเสื่อมสภาพหรือถูกละลายด้วยตัวทำละลายจากสภาพแวดล้อมของตัววัสดุหรือโลหะ ขั้นตอนของปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการกัดกร่อนของโลหะในสภาวะแวดล้อมที่เป็นของเหลว ดังรูปที่ 2.30 [34] ตัวอย่างเช่น การเกิดออกซิเดชันของโลหะตามดังแสดงตามสมการที่ (2.7) โลหะถูกออกซิไดซ์จากสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นการที่โลหะสูญเสียอิเล็กตรอนหรือคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามสมการที่ (2.8) และ (2.9) แสดงถึงปฏิกิริยาการลดลงของสภาวะที่เป็นกรด ขณะที่สมการ (2.10) และ (2.11) แสดงอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง [35]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ขั้นตอนของปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการกัดกร่อนของโลหะในสภาวะแวดล้อมเป็นของเหลว

2.5 รูปแบบทั่วไปของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนสามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้หลายลักษณะ โดยใช้เกณฑ์ต่าง ๆ กัน เช่น จำแนกตามกลไกของการกัดกร่อน ตามลักษณะทางกายภาพของการกัดกร่อนหรือตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน [48]

2.5.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)

โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของโลหะนั้นโดยปกติจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาไฟฟ้า การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนผิวหรือเป็นบริเวณกว้าง มีผลทำให้โลหะบางเรื่อยๆ หรือมีน้ำหนักหายไปคือ เบาลงเรื่อยๆ การกัดกร่อนประเภทนี้ในแง่ของเทคนิคไม่ค่อยเป็นปัญหาและไม่ก่อให้เกิดอันตรายรุนแรงเท่าใดนัก เนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนและออกแบบเพื่อพร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้ และสามารถเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงเวลาอันควร

2.5.2 การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion)

2.5.2.1 แบบมหภาค (Macroscopic scale)

(1) การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2 ชนิด สัมผัสกันอยู่และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์และส่วนโลหะเชื่อมต่อนำไฟฟ้า หรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไปโลหะที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (Anode) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (Cathode) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสอง ยิ่งมากเท่าไร ความรุนแรงก็มากเท่านั้น ความต่างศักย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยและจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานมากกว่า โดยปกติแล้ว โลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ

(2) การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion)

การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือการกัดกร่อนแบบหลุม เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือหรือชิ้นส่วน เกิดความเสียหายเนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้าง เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์ม ป้องกันการกัดกร่อนแบบผิวหน้าได้แล้วแต่เมื่อมีผิวบางลงเฉพาะที่ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่และกัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปมักจะเกิดทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลก การกัดกร่อนที่เกิดในแนวอื่นอาจเกิดขึ้นได้น้อย โดยที่ลักษณะของรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายออกห่างกันหรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ

(3) การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice corrosion)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนพื้นผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอก บริเวณแคบๆ ที่มีสารละลายเข้าไปซึ่งอยู่ได้เป็นเวลานานโดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการครบเซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนดคือการสูญเสียเนื้อโลหะ

(4) การกัดเซาะ (Erosion corrosion)

การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหล ไหลผ่านโลหะและไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น หากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิว การไหลของของไหลอาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วนแต่ถ้าฟิล์มสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้รวดเร็วการกัดกร่อนนี้จะไม่รุนแรง ถ้าฟิล์มเกิดขึ้นใหม่ได้ช้าจะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและรวดเร็ว

(5) การกัดกร่อนจากการถูครูด (Fretting corrosion)

การกัดกร่อนที่เกิดในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ เมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ มีการสั่นสะเทือนบริเวณผิวหน้าสัมผัส ผิวด้านหนึ่งกระทบหรือถูกับ

ผิวอีกด้านหนึ่ง Fretting corrosion ทำให้เกิดการหลวมแล้วก็จะเกิดความเครียดมากเกินไป (Excessive strain) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดร่องซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าวและเป็น Fatigue fracture ในที่สุด

2.5.2.2 แบบจุลภาค (Microscopic scale)

(1) การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)

ขอบเกรนมักเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรน โดยขอบเกรนเป็นข้อแอโนด (สลายตัวของเนื้อโลหะ) ภายในเกรนมักจะแสดงตัวเป็นขั้วแคโทด หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่นๆ มาตกตะกอนอยู่หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่ง บริเวณที่เป็นขั้วแอโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนจะเกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform attack กัดเซาะทั้งก้อน แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนเป็นแอโนดตลอดเวลา การกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลาเป็นการกัดกร่อนตามขอบเกรน

(2) การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking)

การกัดกร่อนชนิดนี้เกิดขึ้นกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจจะเป็นความเค้นตกค้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจจะไม่ถูกกัดกร่อนหรือเปลี่ยนแปลงไปเลยแต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมายจากการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้จะเกิดขึ้นตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนเลยก็ได้

(3) การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Fatigue corrosion)

ความล้าเป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ ซ้ำแล้วซ้ำเล่า จนในที่สุดโลหะนั้นเกิดการแตกหักเสียหาย การกัดกร่อนลักษณะนี้ เกิดตามขนาดของแรงเค้นโดยต่ำกว่าความแข็งแรงจุดครากและเมื่อถูกแรงกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่งและในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วยแล้ว จะส่งผลทำให้ปลดความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย

2.6 ความต้านทานการกัดกร่อน (การสร้างฟิล์มพาสซีฟของโลหะผสม Co-Cr-Mo)

การสร้างชั้นฟิล์ม (Passive oxide) ที่มีองค์ประกอบของโครเมียมไดออกไซด์สูง (Cr_2O_3) ในโลหะผสม Co-Cr-Mo จะส่งผลทำให้โลหะผสมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง [48] เมื่อโลหะอยู่ในสภาวะพาสซีฟ จะทำให้เข้าสู่สภาวะของการการกัดกร่อนช้าลงและสภาวะเกิดขึ้นเมื่อชั้นพาสซีฟฟิล์มหรือออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะผสมในช่วงเดียวกับเกิดการกัดกร่อนกับโลหะผสม โดยที่ความหนาของชั้นพาสซีฟฟิล์มเกิดขึ้นได้มาจะแปรผันตามเงื่อนไขจากองค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้า สภาวะการออกซิเดชันและผลกระทบจากอีกหลายปัจจัยรวมถึงค่า pH องค์ประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [36, 37] อย่างไรก็ตามหากการสลายตัวของไอออนของโลหะผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้ไปเร่งอัตราการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้น [38]

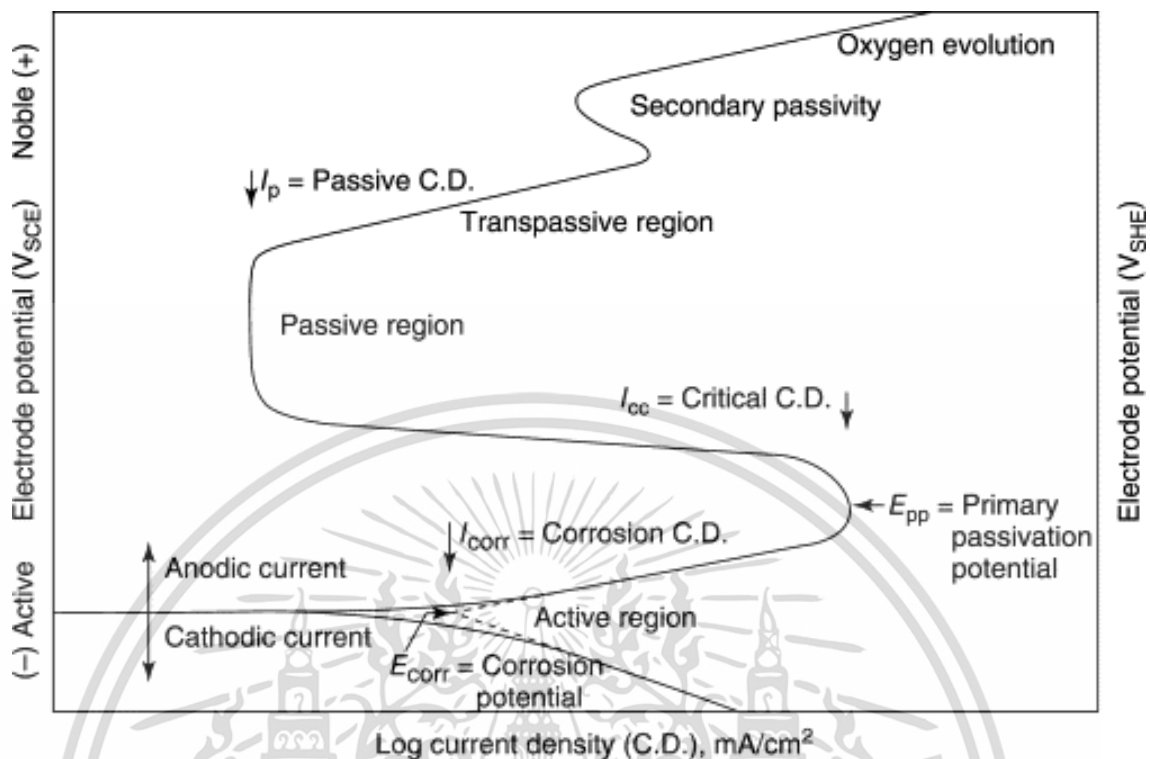
2.7 เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อน

2.7.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open circuit potential, OCP)

ศักย์ไฟฟ้าของวงจรเปิด คือศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองโดยขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าภายนอก ดังนั้นที่ศักย์ไฟฟ้าของวงจรเปิดมีการเกิดขึ้นของปฏิกิริยาของ Anodic และ Cathodic ที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันและในอัตราเดียวกัน จะส่งผลให้กระแสการไหลทั้งหมดเป็นศูนย์และไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยในระบบไฟฟ้าเคมี OCP นั้นสามารถทำการวัดได้ในเวลาหนึ่งเพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพของเงื่อนไขทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในสภาวะของชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะผสม หรือในกระบวนการสร้างฟิล์มออกไซด์นั้น เมื่อโลหะผสมสร้างชั้นพาสซีฟฟิล์มอย่างอัตโนมัติ ค่า OCP จะเปลี่ยนไปสู่ศักย์ไฟฟ้า Anodic มากขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงค่าที่เสถียร [34, 36]

2.7.2. โพลเทนซิโอดนามิก โพลลาไรเซชัน (Potentiodynamic polarization)

องค์ประกอบของเทคนิคโพลเทนซิโอดนามิกโพลลาไรเซชัน คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และค่าศักย์ไฟฟ้า (Potential) เริ่มต้นจากศักย์ไฟฟ้าถูกป้อนมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโพลเทนซิโอสแตท (Potentiostat) ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานการกัดกร่อนคือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในกราฟโพลเทนซิโอดนามิกโพลลาไรเซชันจะเป็นแนวทางในการศึกษาการกัดกร่อน โดยสามารถตรวจสอบได้จากผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์และอุณหภูมิ วิธีทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการวัดความต้านทานโพลลาไรเซชันแบบโพลเทนซิโอดนามิก (ASTM G59 - 97) [39] สำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์จากกราฟโพลเทนซิโอดนามิกโพลลาไรเซชันทำได้โดยการกำหนดเงื่อนไขในการทดลอง เช่น การระบุอัตราการสแกนและช่วงของศักย์ไฟฟ้า อัตราการสแกนของศักย์ไฟฟ้าจะต้องช้าพอที่จะทำให้ทั้งหมดเข้าสู่สภาวะคงที่ ในส่วนการอธิบายส่วนประกอบของกราฟโพลเทนซิโอดนามิกโพลลาไรเซชัน [34] แสดงได้ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันและค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อน

การอธิบายส่วนประกอบของกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันประกอบด้วย Anodic current มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและ Cathodic current มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ จุดตัดของกราฟโพลาริเซชันระหว่างเส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิก คือค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (i_{corr}) และเมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มจนถึงค่าค่าหนึ่ง กระแสการกัดกร่อนกลับมีค่าลดลง เนื่องจากบริเวณนี้โลหะผสมเกิดการสร้างชั้นฟิล์ม เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดว่า แอคทีฟพาสซีฟ (Active passive transition) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปฐมภูมิ (Primarily passive potentials หรือ E_{pp}) เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต่อไป จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มลดลงจนเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ถึงแม้จะป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มให้แก่เซลล์และความหนาแน่นของกระแสก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงกราฟที่กระแสคงที่นี้เรียกว่าช่วงพาสซีฟ (Passive region) คือพื้นผิวของโลหะผสมจะถูกปกคลุมและป้องกันด้วยชั้นออกไซด์บางๆ ซึ่งสามารถชะลอการสลายตัวของโลหะและทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีค่าลดลงอย่างมาก ถ้าเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปจนถึงค่าหนึ่งที่ชั้นฟิล์มแตกกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกช่วงที่เลยจุดนี้ว่า ช่วงทรานพาสซีฟ (Transpassive region) เป็นช่วงที่โลหะผสมกลับมาเกิดการสลายตัวของพื้นผิวโลหะอย่างสม่ำเสมออีกครั้ง ขณะที่การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม

ในการทดสอบโพเทนชิโอสเตทหรือเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า คือเทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าหรือสารละลาย โดยการให้สัญญาณทางไฟฟ้ากับสารตัวอย่าง โดยในการใช้งานเครื่องจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า ให้แก่สารตัวอย่างเพื่อเร่งให้

เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า จากนั้นก็จะนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และตรวจจบการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแปรผันตามกระแสที่จ่ายให้กับระบบ มาคำนวณหาค่า ปริมาณสาร ค่าอัตราการกัดกร่อนและอายุการใช้งานของสารตัวอย่าง โดยการนำไปประยุกต์ใช้จะช่วยให้ สามารถหาค่าจลนศาสตร์ทางไฟฟ้าเคมีของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องได้ กระแสที่วัดได้ในระหว่างการทำการ ทดสอบโพเทนชิโอสแตทจะสอดคล้องกับผลรวมของกระแสไฟฟ้า Anodic และ Cathodic ที่เกี่ยวข้อง กับ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอิเล็กโทรด k คือค่าดัชนี ตามที่อธิบายไว้ในสมการที่ 2.12

$$i_{\text{measured}} = \sum i_{a,k} + \sum i_{c,k} \quad (2.12)$$

เมื่อมีการใช้ศักย์ไฟฟ้าแคโทดิก อัตราการสลายตัวของโลหะจะน้อยมากและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะ ถูกกำหนดด้วยจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแคโทดิก ในทางตรงกันข้ามสำหรับศักย์ไฟฟ้าแอโนดิก อัตรา การเกิดของปฏิกิริยาแคโทดิกจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ในกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียมวลของ โลหะและกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ อธิบายตามสมการของ Faraday's law ในสมการที่ 2.13

$$M = \frac{IM_r t}{nF} \quad (2.13)$$

m คือ มวลของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในช่วงเวลา t I คือค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิก F คือค่าคงที่ ของฟาราเดย์ (เท่ากับ 96485 C/mol) n คือ Oxidation valence และ M_r คือมวลอะตอมของโลหะ สามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14 [40]

$$R_{\text{mpy}} = \frac{0.13 \times i_{\text{corr}} \times e}{\rho} \quad (2.14)$$

R_{mpy} คืออัตราการกัดกร่อน (mm/year)

i_{corr} คือค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

e คือน้ำหนักสมมูลของโลหะ (g)

ρ คือความหนาแน่นของโลหะ (g/cm^3)

2.8 เครื่อง ICP-OES

เครื่อง Inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) ใช้ในการ วิเคราะห์หาปริมาณธาตุ แสดงได้ในรูปที่ 2.32 ในรูปแบบของสารละลายด้วยการใช้หลักการที่ว่า เมื่อ อะตอมได้รับพลังงานความร้อนก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นอะตอมในสภาวะกระตุ้นหรือ Excited stated ซึ่ง อะตอมในสภาวะนี้จะยังไม่มีเสถียร แต่เมื่อเวลาจะกลับไปเป็นอะตอมในสภาวะปกติ (Ground states) และจะปล่อยพลังงานแสงออกมา โดยที่พลังงานแสงนี้จะเข้าไปยังเครื่องแยกแสงและตรวจหา สัญญาณเพื่อทำการแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการวิเคราะห์ผลออกมา พลังงานที่ปล่อยออกมา จากการเปลี่ยนสถานะอาจอยู่ในรูปของการแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างระดับ

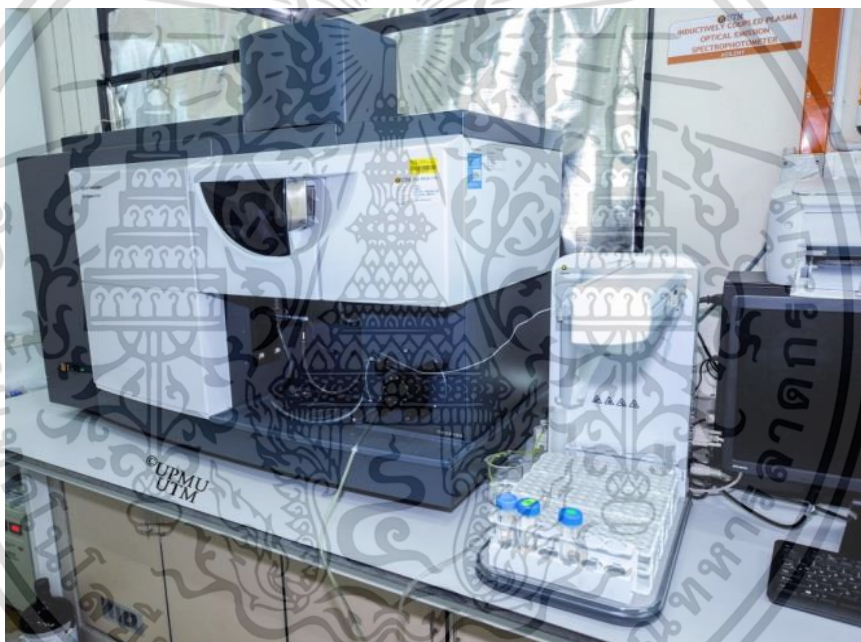
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานสูงหรือระดับพลังงานต่ำในการเปลี่ยนแปลงสถานะ จะทำให้ทราบค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 2.33 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและความยาวคลื่น ตามสมการของพลังค์ (Plank's' equation)

$$E = hf \quad (2.15)$$

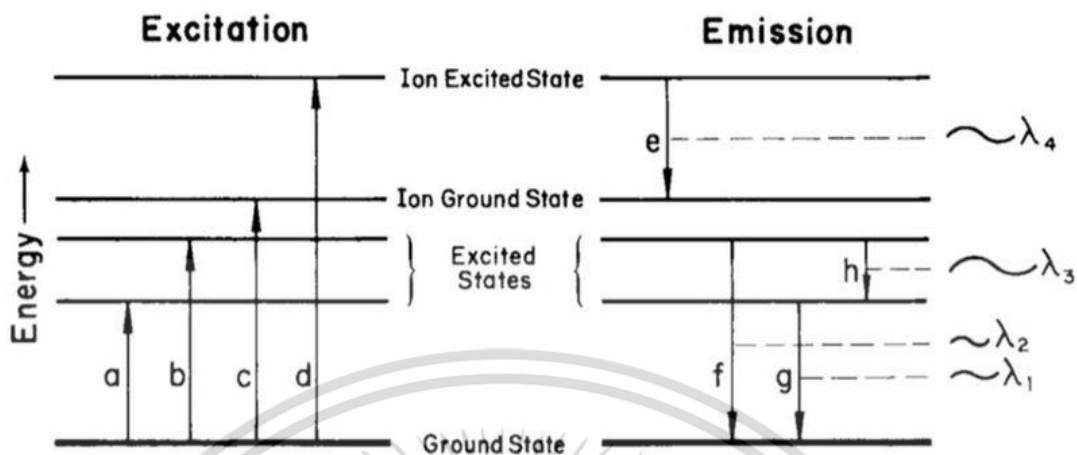
$$f = \frac{C}{\lambda} \quad (2.16)$$

เมื่อ E คือค่าพลังงาน h คือค่าคงที่พลังค์ f คือค่าความถี่ C คือค่าความเร็วแสง และ λ คือค่าความยาวคลื่น โดยสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานของทุกๆธาตุนั้น จะมีค่าระดับพลังงาน ซึ่งธาตุนั้นๆ จะมีชุดความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นมาจากการดูดกลืนพลังงานและการปล่อยพลังงานเฉพาะตัว [55]



รูปที่ 2.32 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในรูปแบบของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 แผนภาพระดับพลังงานเมื่อมีการรับและปล่อยคลื่นพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาผลกระทบของซิลิกอนต่อโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งคุณสมบัติโลหะผสม Co-Cr-Mo มีความต้านทานการกัดกร่อนและมีความต้านทานการสึกหรอสูงรวมถึงมีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น Young's Modulus ความแข็งแรงคราก ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เป็นต้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้โลหะผสม Co-Cr-Mo และเริ่มต้นจากการศึกษาการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสม Co-Cr-Mo และเตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลอง ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบแรงดึง ทดสอบการกัดกร่อนและวิเคราะห์ปริมาณธาตุหลุดออกจากพื้นผิว

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวข้องกับปริมาณธาตุซิลิกอน ที่มีปริมาณเท่ากับ 0.1 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งจะออกมาเป็นโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si ขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มาจากการลดปริมาณของโครเมียมและโมลิบดีนัมลงจาก 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น 26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ยังคงปริมาณของซิลิกอนไว้ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่าเดิม ซึ่งสามารถแสดงองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Co-Cr-Mo เหล่านี้ได้ดังตารางที่ 3.1

ในกระบวนการผลิตโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดเหล่านี้ขึ้นมา นั้น เริ่มจากหลอมโลหะผสมในเตาหลอมสุญญากาศและปล่อยให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติ จากนั้นนำโลหะผสมมาอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization treatment) ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส (1523 K) เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจุ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที (25 องศาเซลเซียส) หลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (1473 K) ด้วยกระบวนการรีดร้อนให้เป็นแท่งกลม ต่อมาต้องทำการจุ่มลงในน้ำอุณหภูมิห้องทันที คือเพื่อให้โลหะผสมลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว จึงได้โลหะผสมมีลักษณะเป็นแท่งขนาด 30x20x150 mm ไว้สำหรับทดลองต่อไป

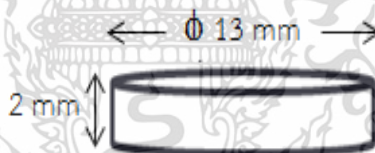
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Co-Cr-Mo

องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	Co	Cr	Mo	Si	Mn	C	N
Co-28Cr-6Mo-0.1Si	Bal.	27.500	6.100	0.156	0.614	0.056	0.135
Co-28Cr-6Mo-0.5Si	Bal.	28.100	6.150	0.466	0.521	0.054	0.148
Co-28Cr-6Mo-1.0Si	Bal.	28.200	6.170	0.966	0.593	0.054	0.128
Co-26Cr-6Mo-1.0Si	Bal.	26.500	5.500	1.000	0.750	0.065	0.100

3.2 การเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 การตัดชิ้นงานทดลอง

นำโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด คือ Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si เป็นแท่งกลม นำมาตัดให้ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.1 โดยใช้เครื่องตัดโลหะแบบละเอียดยี่ห้อ Heiwa technica รุ่น SS-33 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 เครื่องตัดโลหะแบบละเอียด

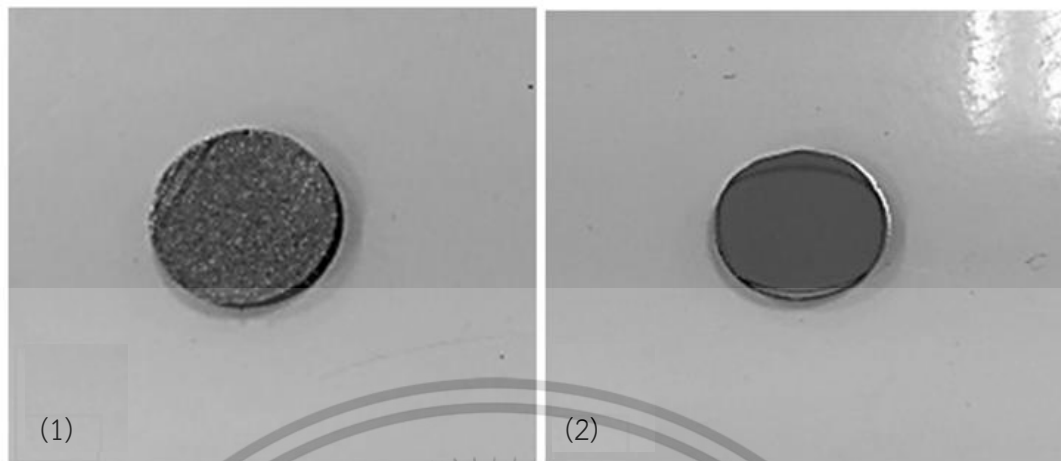
3.2.2 การเตรียมพื้นผิวสัมผัสของชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานให้หน้าพื้นผิวสัมผัสมีความมันเงาก่อนทำการกัดกร่อนด้วยวิธีการขัดชิ้นงาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงรูปชิ้นงานก่อนขัดดังรูปที่ 3.3 (1)

(1) ขัดหยาบด้วยการขัดพื้นผิวของโลหะผสมด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 500 600 800 1,000 1,500 2,000 และ 4,000 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานดังรูปที่ 3.4

(2) ขัดละเอียดด้วยการขัดพื้นผิวของโลหะผสมให้มีความมันเงา โดยการขัดมัน (Polishing) จะต้องใช้ผงขัดอลูมินา (AP-A suspension struers ballerup denmark) ทำการขัดทั้งหมด 2 รอบ ด้วยขนาด 1 ไมครอนในรอบแรกและ 0.3 ไมครอนในรอบสอง จากนั้นนำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยเอทานอล (Ethanol)

(3) ทำการขจัดสิ่งสกปรกบนหน้าพื้นผิวสัมผัส หลังจากการขัดผิวของชิ้นงานเสร็จโดยเครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกยี่ห้อ Elma elmasonic รุ่น E ดังรูปที่ 3.5 โดยใส่ชิ้นงานลงในบีกเกอร์ที่มีเอทานอลแล้วนำไปในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นระยะเวลาทั้งหมด 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาเป่าลมให้แห้ง แสดงรูปชิ้นงานหลังขัดได้ดังรูปที่ 3.3 (2)



รูปที่ 3.3 ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ทดลอง (1) ชิ้นงานก่อนการขัด (2) ชิ้นงานหลังการขัด



รูปที่ 3.4 เครื่องขัดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo ขั้นตอนแรกจะต้องนำชิ้นงานไปขัดเพื่อให้พื้นผิวสัมผัสมีความมันเงา จากนั้นนำชิ้นงานมากัดด้วยกรด เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

(1) ขัดหยาบด้วยการขัดพื้นผิวของโลหะผสมด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 500 600 800 1000 1500 2000 และ 4000 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานดังรูปที่ 3.4

(2) ขัดละเอียดด้วยการขัดพื้นผิวของโลหะผสมให้มีความมันเงา โดยการขัดมัน (Polishing) จะต้องใช้ผงขัดอลูมินา (AP-A suspension struers ballerup denmark) ทำการขัดทั้งหมด 2 รอบ ด้วยขนาด 1 ไมครอนในรอบแรกและ 0.3 ไมครอนในรอบสอง จากนั้นนำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยเอทานอล (Ethanol)

(3) ทำการขจัดสิ่งสกปรกบนหน้าพื้นผิวสัมผัส หลังจากการขัดผิวของชิ้นงานเสร็จโดยเครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ยี่ห้อ Elma elmasonic รุ่น E ดังรูปที่ 3.5 โดยใส่ชิ้นงานลงในบีกเกอร์ที่มีเอทานอลแล้วนำไปใส่ลงในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นระยะเวลาทั้งหมด 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาเป่าลมให้แห้ง แสดงรูปชิ้นงานหลังขัดได้ดังรูปที่ 3.3 2)

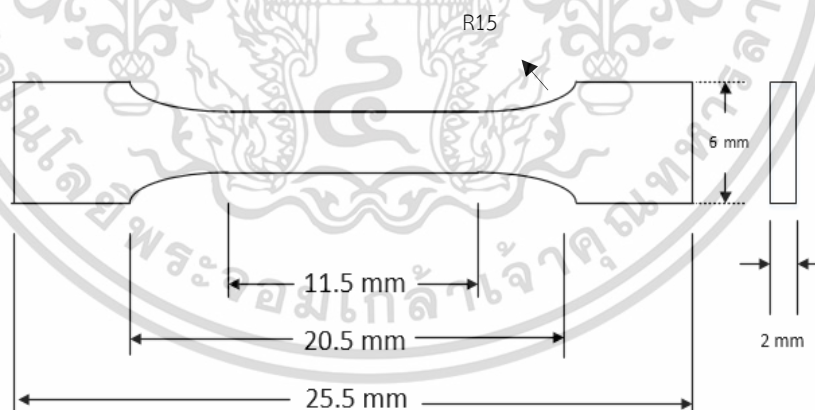
(4) ทำการกัดกรด (Etching) ด้วยเครื่องเตรียมสภาพพื้นผิวสัมผัส ยี่ห้อ Struers รุ่น Lectropol 5 ดังรูปที่ 3.6 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก-เมทานอล (H_2SO_4 -methanol) ในอัตราส่วน 9:1 ที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นระยะเวลา 10-30 วินาที เมื่อกัดด้วยกรดเสร็จ ต้องนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำสะอาด โดยใช้น้ำสะอาดไหลผ่านพื้นผิวหน้าสัมผัส จากนั้นนำชิ้นงานมาล้างพื้นผิวหน้าสัมผัสด้วยเอทานอลอีกครั้งและเป่าลมร้อนให้แห้ง



รูปที่ 3.6 เครื่องเตรียมสภาพพื้นผิวสัมผัส

3.2.4 การทดสอบแรงดึง

การใช้วิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile test) เพื่อหาคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับโลหะผสมชนิดนี้คือ ค่าความแข็งแรงคราก ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยได้ทำการเตรียมขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบให้มีขนาดเป็นดังรูปที่ 3.7 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ISO 22674 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับทดสอบวัสดุทางการแพทย์หรือทางด้านทันตกรรม



รูปที่ 3.7 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง

3.2.5 การเตรียมสารละลาย NaCl และการปรับค่า pH

การเตรียมสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ค่า pH เท่ากับ 7.2) ด้วยการใช้ NaCl หรือโซเดียมคลอไรด์ ปริมาณ 9 กรัม ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ ปริมาณ 1 ลิตร และในการเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้มีค่า pH เท่ากับ 4.0 โดยสามารถทำได้ด้วยวิธีการใส่สารละลาย Hydrochloric acid 37% ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิลิตร ไปจนถึงค่าที่เครื่อง pH meter (รูปที่ 3.8) วัดค่า pH ได้เท่ากับ 4.0 ซึ่งจะทำให้สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า pH เท่ากับ 4.0 ขณะที่การปรับค่า pH ให้เท่ากับ 10.0 ทำได้ด้วยการใส่สารละลาย Sodium hydroxide ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิลิตร ไปจนถึงค่าที่เครื่อง pH meter วัดค่า pH ได้เท่ากับ 10.0 ซึ่งจะทำให้สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า pH เท่ากับ 10.0



รูปที่ 3.8 เครื่อง pH meter

3.3 ขั้นตอนการทำการวิจัย

3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axiolab โดยมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV [41] ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกหรือตรวจสอบสารประกอบเชิงโลหะของโลหะผสมด้วยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารประกอบ โครงสร้างผลึกหรือสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ศึกษาโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray diffractometer (XRD) ด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น LabX Xrd-6100 [42] ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยใช้ Scan Range 20-80 องศา และ Step Size 0.02 องศา/วินาที



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่อง X-ray diffractometer

3.3.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานการ (ASTM E646-98) ISO22674 โดยใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X แสดงดังรูปที่ 3.12 และอัตราเร็วของแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตร/นาที่

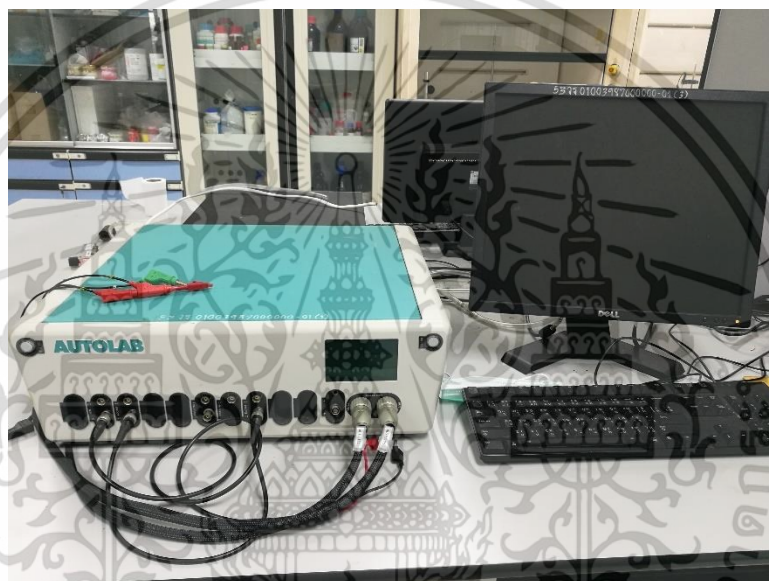


รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดลองของการกัดกร่อน

ศึกษาการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ด้วยการนำชิ้นงานโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มาทำการทดลองการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระดับค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 ใช้อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตทรุ่น Autolab PGSTAT302N ดังรูปที่ 3.13 และใช้โปรแกรม NOVA 1.11 ในการพล็อตกราฟโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น รวมถึงสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อน ซึ่งประกอบไปด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดการกัดกร่อนโพเทนชิโอสแตท

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย

การหาปริมาณของธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมหลังจากทำการทดลองการกัดกร่อนด้วยการเก็บสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระดับค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 ซึ่งหลังจากทำการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด ที่ระดับค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 เสร็จสิ้น จากนั้นจะนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือยี่ห้อ Perkin elmer รุ่น AVIO 500 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 หาปริมาณธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมด้วยหลักการ Inductively couple plasma-optical emission spectrometer (ICP – OES) [43]



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุ Si ต่อโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติความต้านทานของแรงดึงและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระดับ pH 4.0 7.2 10.0 โดยเป็นการศึกษาหาปริมาณของธาตุ Si ที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณสมบัติด้านโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติความต้านทานของแรงดึงและความต้านทานการกัดกร่อนให้กับโลหะผสม Co-Cr-Mo

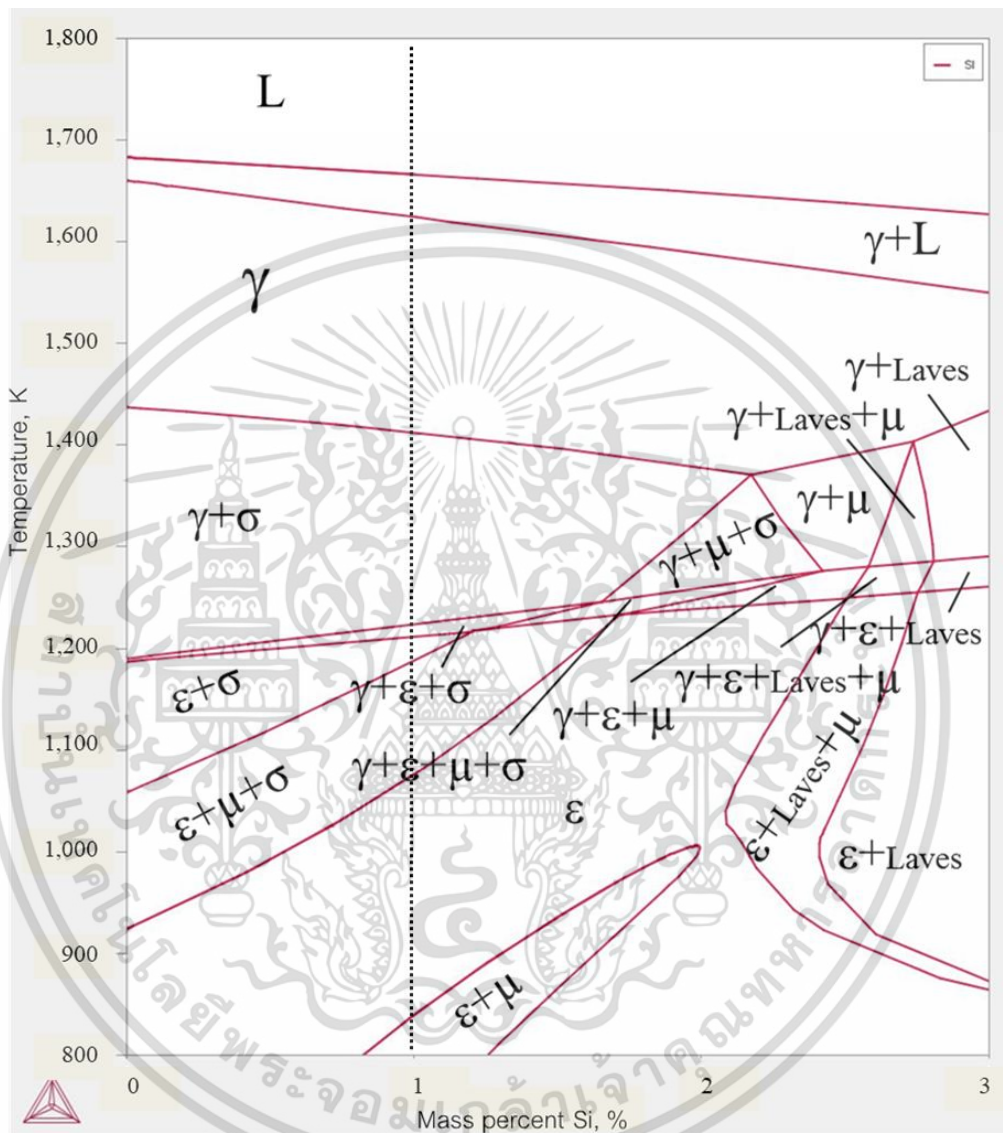
4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-(28-26)Cr-(6-5)Mo-(0.1-1.0)Si

สารประกอบเชิงโลหะและโครงสร้างจุลภาคเกิดขึ้นในโลหะผสม Co-Cr-Mo ศึกษาได้จากเฟสไดอะแกรมโลหะผสม Co-Cr-Mo ในงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-xSi และ Co-26Cr-5Mo-xSi อ้างอิงจากขั้นตอนการสร้างโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดในงานวิจัยฉบับนี้ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งเริ่มจากการหล่อโลหะผสมในเตาสู่ญญากาศ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวตามธรรมชาติและนำโลหะผสมไปอบ Homogenization Treatment ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสหรือ 1523 เคลวิน เป็นเวลา 24 ชม และลดอุณหภูมิด้วยการจุ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง ต่อมานำแท่งโลหะผสมไปรีดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสหรือ 1473 เคลวิน จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยการจุ่มน้ำทันที โดยการคาดการณ์หรือทำนายการปรากฏของเฟสที่จะเกิดขึ้นสำหรับโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si สามารถแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 เป็นแผนภาพเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-xSi ที่มีปริมาณของ Si แตกต่างกันไปและโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ซึ่งลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลงและแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi ที่มีปริมาณของ Si แตกต่างกันไป ในงานวิจัยนี้มีปริมาณของ Si สูงสุดที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงพิจารณาเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-xSi กับโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi ในช่วงที่ Si ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

แผนภาพจำลองเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-xSi แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยเป็นการทำนายจากโปรแกรม Thermo calc จากรูปในช่วงที่ปริมาณของ Si ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเฟสที่จะปรากฏกับโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si ได้แก่ เฟส γ (FCC) เฟส ϵ (HCP) สารประกอบเชิงโลหะ σ และ สารประกอบเชิงโลหะ μ โดยเฟส γ ปรากฏที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1430 ถึง 1650 เคลวิน ซึ่งจากขั้นตอนโลหะผสมไปรีดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสหรือ 1473 เคลวิน เป็นช่วงที่โลหะผสมมีเฟส γ ปรากฏเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ขณะที่เฟส ϵ สารประกอบเชิงโลหะ σ และ μ จะปรากฏขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 1430 เคลวินลงไป โดยอาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการบวนการเย็นตัวจากขั้นตอนนำโลหะผสมไปจุ่มน้ำอุณหภูมิห้องหลังจากการรีดขึ้นรูป

ร้อนเสร็จและจากเฟสไดอะแกรมนี้จะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น (ด้านขวามือของกราฟในแกน X) พื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ σ มีแนวโน้มลดลง

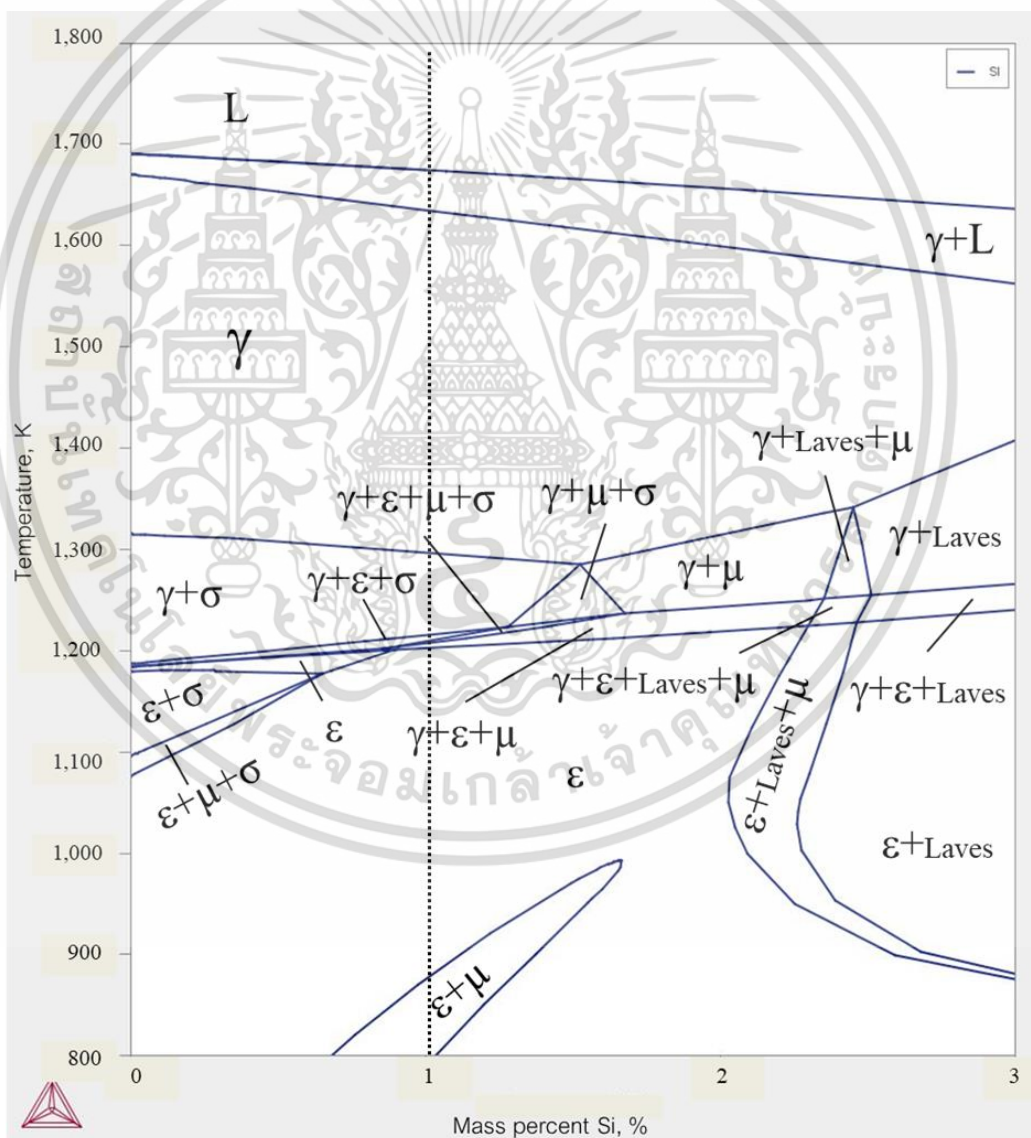


รูปที่ 4.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-xSi

แผนภาพจำลองเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยเป็นการทำนายจากโปรแกรม Thermo calc จากรูปในช่วงที่ปริมาณของ Si ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าเฟสที่จะปรากฏกับโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ซึ่งเป็นโลหะผสมที่ปริมาณของ Cr กับ Mo ลดต่ำลง ได้แก่ เฟส γ เฟส ϵ สารประกอบเชิงโลหะ σ และ สารประกอบเชิงโลหะ μ โดยเฟส γ ปรากฏที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1320 ถึง 1670 เคลวิน ซึ่งจากขั้นตอนโลหะผสมไปรีดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสหรือ 1473 เคลวิน เป็นช่วงที่โลหะผสมมีเฟส γ ปรากฏเพียงเฟสเดียวเท่านั้นและเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

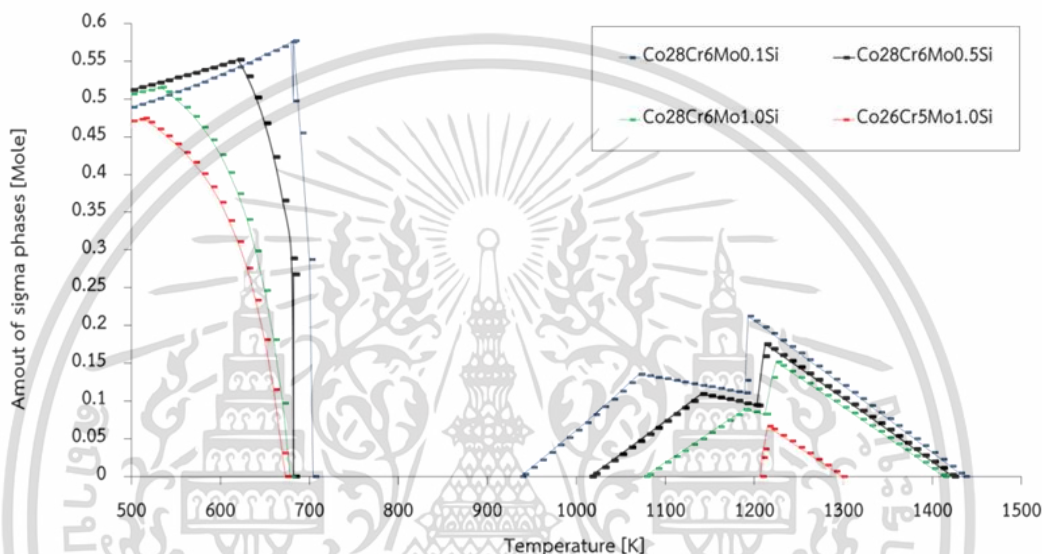
พื้นที่ของเฟส γ มีความใหญ่กว่าพื้นที่เฟส γ ในแผนภาพจำลองเฟสไดอะแกรม Co-28Cr-6Mo-xSi ขณะที่เฟส ϵ ส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ และ μ จะปรากฏขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 1320 เคลวินลงไป โดยอาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการบวนการเย็นตัวจากขั้นตอนนำโลหะผสมไปจุ่มน้ำอุณหภูมิห้องหลังจากการรีดขึ้นรูปร้อนเสร็จและพื้นที่ของเฟส ϵ ส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ และ μ เหล่านี้มีความแคบหรือเล็กกว่าเมื่อเทียบกับแผนภาพจำลองเฟสไดอะแกรม Co-28Cr-6Mo-xSi จากเฟสไดอะแกรมนี้ทำให้ทราบว่าเมื่อลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลงมีผลทำให้พื้นที่เฟส γ กว้างขึ้นและพื้นที่พื้นที่ของเฟส ϵ ส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ และ μ แคบลง สุดท้ายจะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มสูงขึ้น (ด้านขวามือของกราฟในแกน X) พื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ σ มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเฟสไดอะแกรมรูปที่ 4.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi และรูปที่ 4.2 ของเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-xSi แสดงถึงการคาดการณ์ของโอกาสในการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะ σ ซึ่งจะมีโอกาสปรากฏขึ้นได้ในทั้งสองเฟสไดอะแกรม ดังนั้นในการแสดงปริมาณของสารประกอบเชิงโลหะ σ จะมีโอกาสเกิดขึ้นนี้ว่าจะมีปริมาณเท่าใด สามารถแสดงออกมาในรูปแบบการทำนายปริมาณสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ได้ดังรูปที่ 4.3



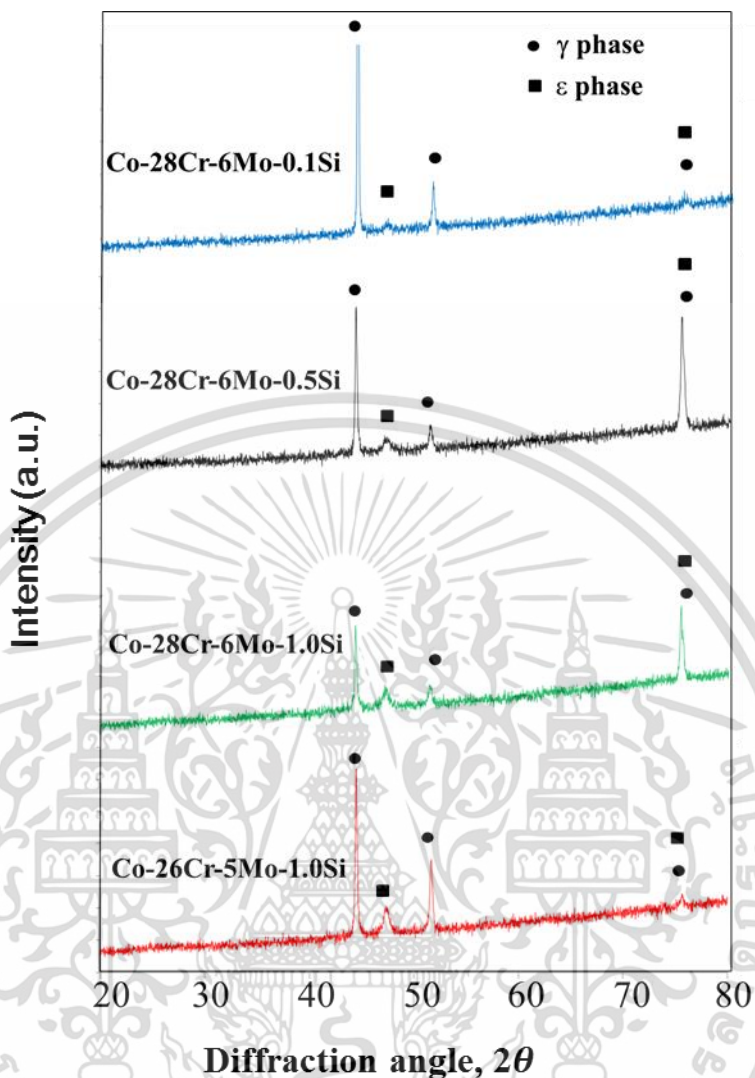
รูปที่ 4.3 สัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si

การทำนายหรือการคาดการณ์สัดส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ จากรูปที่ 4.3 ที่จะปรากฏในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ผ่านโปรแกรม Thermo calc จากรูปที่ 4.3 พิจารณาในช่วงอุณหภูมิ 950 ถึง 1400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่โลหะผสมอยู่ในขั้นตอนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization treatment) ในกระบวนการสร้างโลหะผสมเหล่านี้และเป็นช่วงที่สารประกอบเชิงโลหะ σ มีโอกาสเกิดขึ้นได้ จากกราฟพบว่าลักษณะแนวโน้มของกราฟสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ลดต่ำลง เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้นจาก 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเรียงลำดับจากปริมาณสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ จากสูงไปต่ำ คือโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si ขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ซึ่งมีปริมาณของ Cr และ Mo ลดลง นั้นพบว่ามีสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ต่ำที่สุด จากบรรดาโลหะผสมทั้งหมด และในส่วนการพิจารณาในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นขั้นตอนการผลิตโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.3 แสดงการคาดการณ์ของโอกาสในการเกิดขึ้น

ของสารประกอบเชิงโลหะ σ ต่ำลง เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุ Si เพิ่มขึ้นจาก 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มสูงขึ้นจาก 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลทำให้ ปริมาณสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ลดต่ำลงในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si อย่างเรียงลำดับและในโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ซึ่งมีปริมาณของ Cr และ Mo ลดลง นั้นพบว่ามีส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ต่ำที่สุด ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณธาตุของ Si เข้าไปในโลหะผสม Co-Cr-Mo สามารถช่วยลดการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะ σ ต่ำลง ในขณะที่การลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลงในโลหะผสม Co-Cr-Mo สามารถลดการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะ σ ต่ำลงอีก

การอธิบายผลกระทบของสารประกอบเชิงโลหะ σ มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si เมื่อปริมาณของสารประกอบเชิงโลหะ σ สูงในโลหะผสม Co-Cr-Mo จะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นหรือลดความต้านทานการกัดกร่อนลง จากสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ในโลหะผสมสารประกอบเชิงโลหะ σ ดังรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ส่งผลทำให้ปริมาณของสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ลดต่ำลง ในขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ซึ่งได้ลดปริมาณของ Cr และ Mo ลงเท่ากับ 26 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณของ Si เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ต่ำที่สุดจากในบรรดาโลหะผสมทั้งหมด ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของธาตุ Si ให้มากขึ้นในโลหะผสมของ Co-Cr-Mo จะส่งผลทำให้ปริมาณของสัดส่วนสารประกอบเชิงโลหะ σ ลดต่ำลง และส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงด้วยหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดียิ่งขึ้น

การตรวจสอบและยืนยันโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบเชิงโลหะและโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si สามารถใช้หลักการ XRD แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โครงสร้างผลึกและสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นแสดงได้ในกราฟ XRD ของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si จากกราฟพบว่ามีโครงสร้างผลึกปรากฏขึ้นเพียง 2 แบบคือ เฟส γ (โครงสร้างผลึกแบบ FCC) และเฟส ϵ (โครงสร้างผลึกแบบ HCP) แต่ไม่พบการปรากฏของสารประกอบเชิงโลหะ σ และ μ เกิดขึ้นจากโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดเหล่านี้ (จากการประเมินการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะในเฟสไดอะแกรมของรูปที่ 4.1 และ 4.2 บ่งบอกว่ามีโอกาสปรากฏขึ้น) จากผลลัพธ์ด้วยการวิเคราะห์ XRD พบว่าปริมาณของเฟส γ มีมากกว่าเฟส ϵ ในโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด (ยอดพีคสูงกว่า) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดที่ได้ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 1523 เคลวิน (1250 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นส่วนที่มีเฟส γ เกิดขึ้นทั้งหมด และต่อมาได้ทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจากอุณหภูมิ 1523 เคลวิน มาถึง 298 เคลวิน (25 องศาเซลเซียส) จึงอาจจะทำให้เฟส ϵ เกิดขึ้น โดยในกระบวนการเย็นตัว โลหะผสมทั้ง 4 ชนิดจะเย็นตัวผ่านช่วงที่เฟส ϵ เกิดขึ้นและคาดว่าปริมาณน้อย จากกราฟ XRD พบความสูงของพีคเฟส ϵ ต่ำกว่าเฟส γ



รูปที่ 4.4 กราฟ XRD ของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si

เฟสไดอะแกรมที่ปรากฏกับโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดได้แก่โลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีปริมาณเฟส γ (โครงสร้างผลึก FCC) มากกว่าเฟส ϵ (โครงสร้างผลึกแบบ HCP) ขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีปริมาณของเฟส ϵ สูงกว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si เนื่องจากปริมาณของ Cr กับ Mo ลดลงและปริมาณของ Si สูง ส่งผลทำให้มีการเกิดขึ้นของเฟส ϵ มากที่สุด (จากรูปที่ 4.2 เฟสไดอะแกรม เมื่อปริมาณของ Si สูงขึ้นส่งผลทำให้เฟส ϵ มีโอกาสเกิดขึ้นได้สูง) เนื่องจากเฟส γ มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าเฟส ϵ และการเพิ่มธาตุ Si เข้าไปผสมกับโลหะผสม Co-Cr-Mo จะสามารถลดการตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ซึ่งทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo-Si

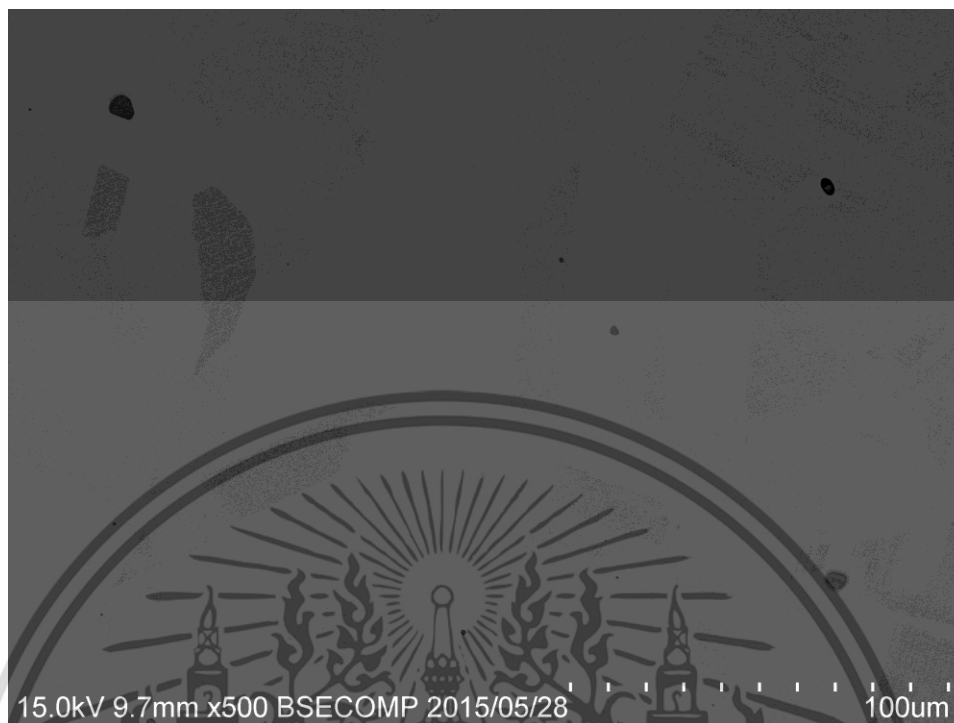
4.1.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-Cr-Mo-Si ก่อนทำการกัดกร่อน

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อตรวจสอบลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นก่อนทำการกัดกร่อน



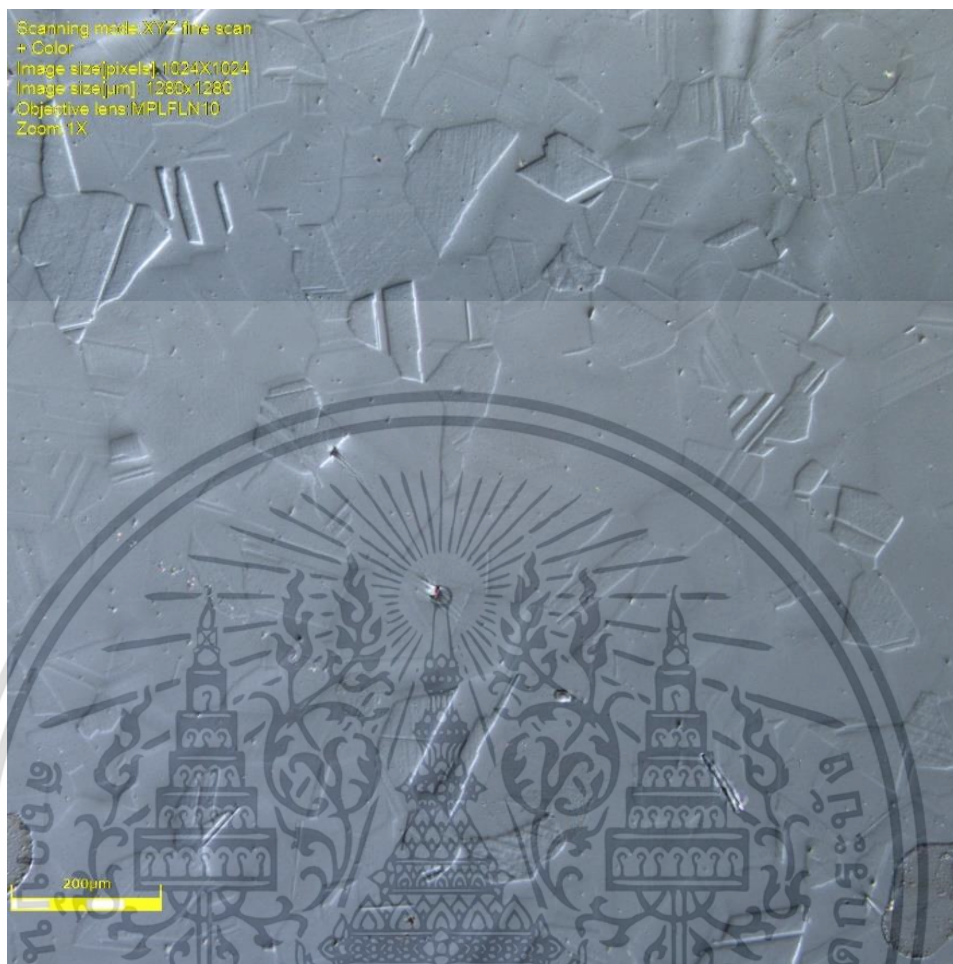
รูปที่ 4.5 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si จากกล้อง OM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



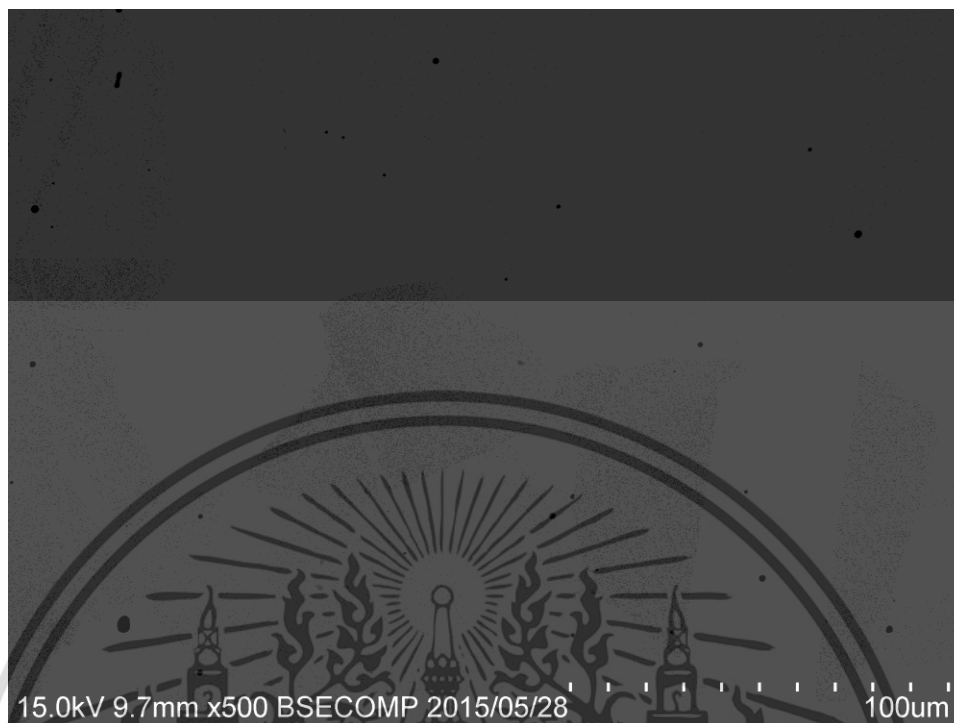
รูปที่ 4.6 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si จากกล้อง SEM

ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ตรวจสอบด้วยกล้อง OM ในรูปที่ 4.5 และตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ในรูปที่ 4.6 พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมขนาดเท่ากันและมีขนาดใหญ่



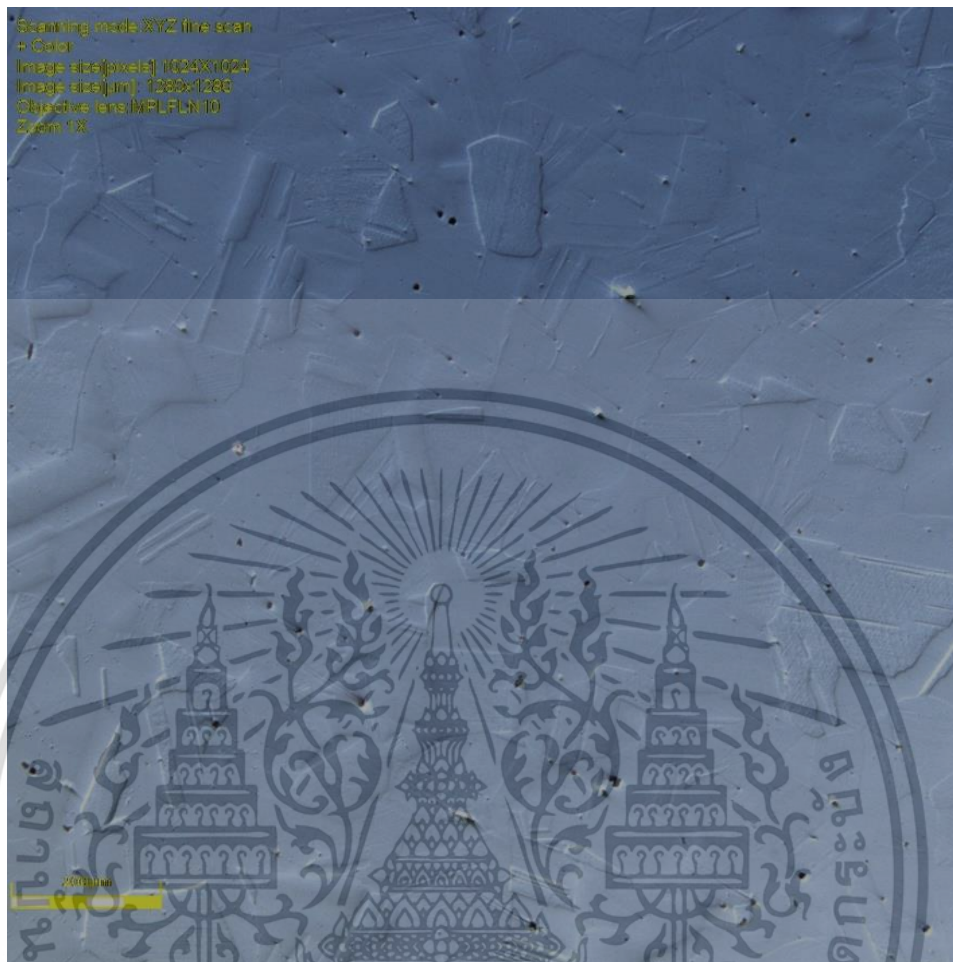
รูปที่ 4.7 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si จากกล้อง OM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



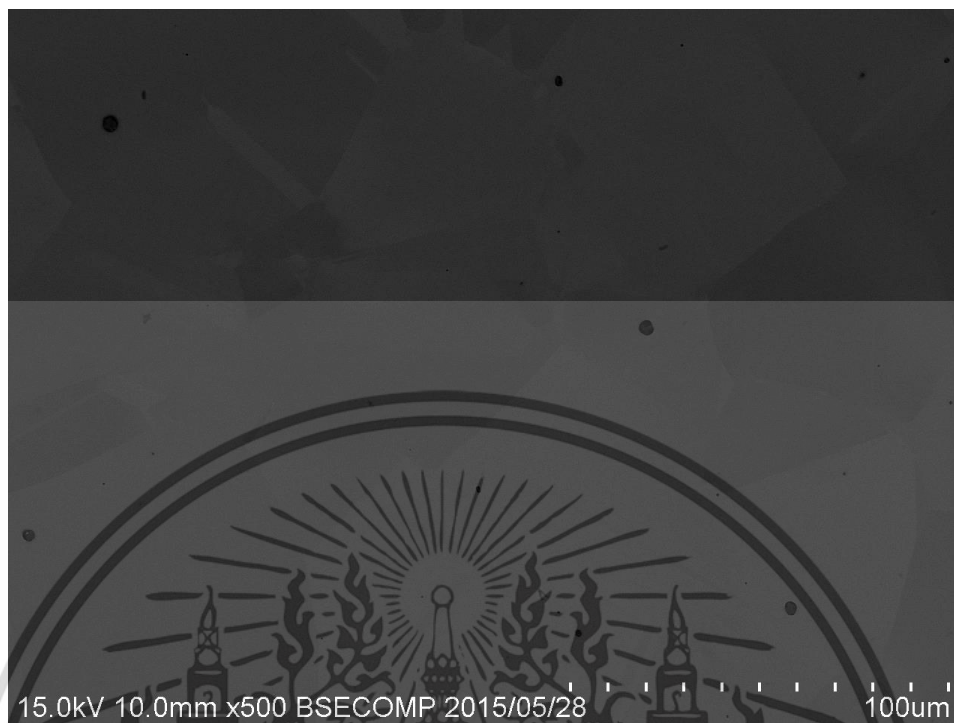
รูปที่ 4.8 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si จากกล้อง SEM

ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si ตรวจสอบด้วยกล้อง OM ในรูปที่ 4.7 และตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ในรูปที่ 4.8 พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมขนาดเท่ากันและมีขนาดใหญ่



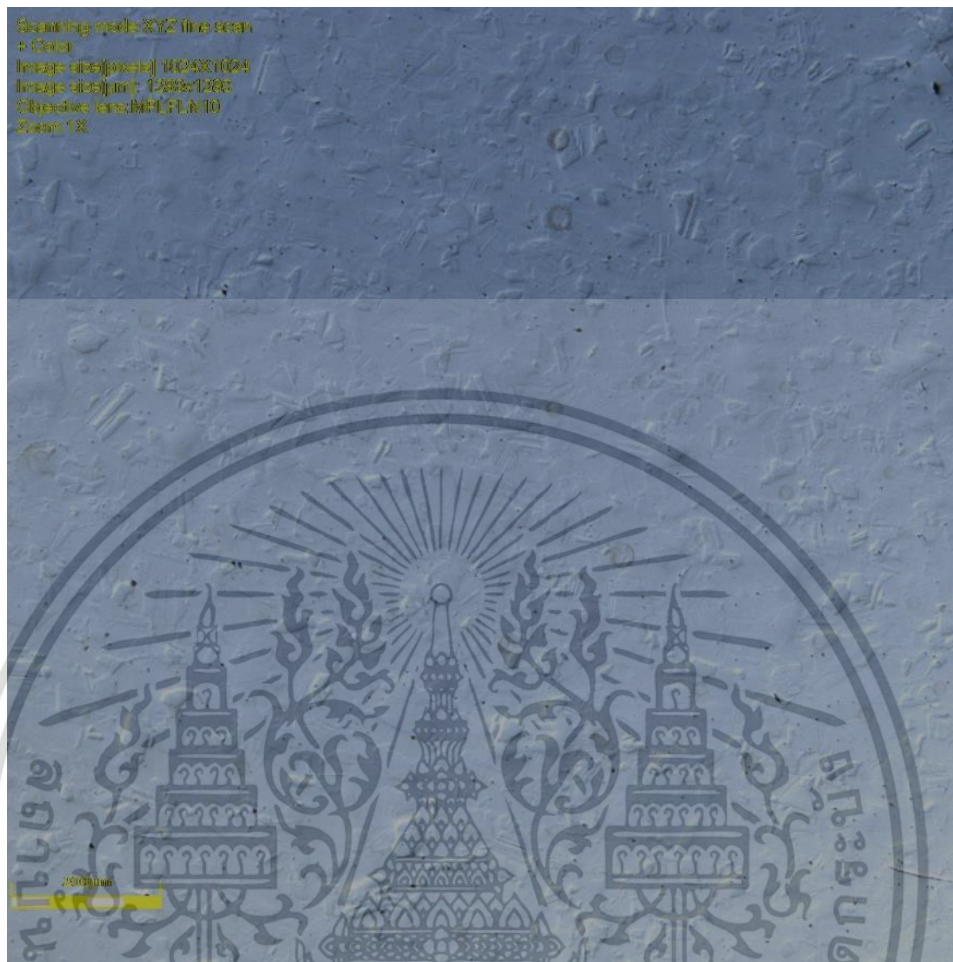
รูปที่ 4.9 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si จากกล้อง OM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si จากกล้อง SEM

ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ตรวจสอบด้วยกล้อง OM ในรูปที่ 4.9 และตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ในรูปที่ 4.10 พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมขนาดเท่ากันและมีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.11 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si จากถ้อย OM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si จากกล้อง SEM

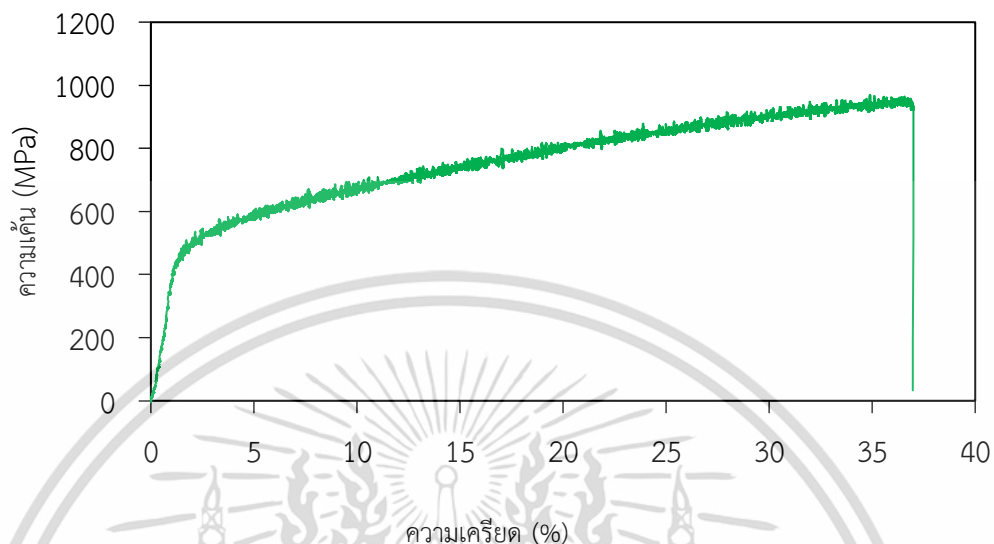
ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ตรวจสอบด้วยกล้อง OM ในรูปที่ 4.11 และตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ในรูปที่ 4.12 พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมขนาดเท่ากันและมีขนาดใหญ่

การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะของเกรนมีหลายเหลี่ยมรูปหลายเหลี่ยมขนาดเท่ากันและมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกโลหะผสม ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณธาตุ Si ให้มากขึ้น ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในโลหะผสม Co-Cr-Mo ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคอย่างเห็นได้ชัด

4.2 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

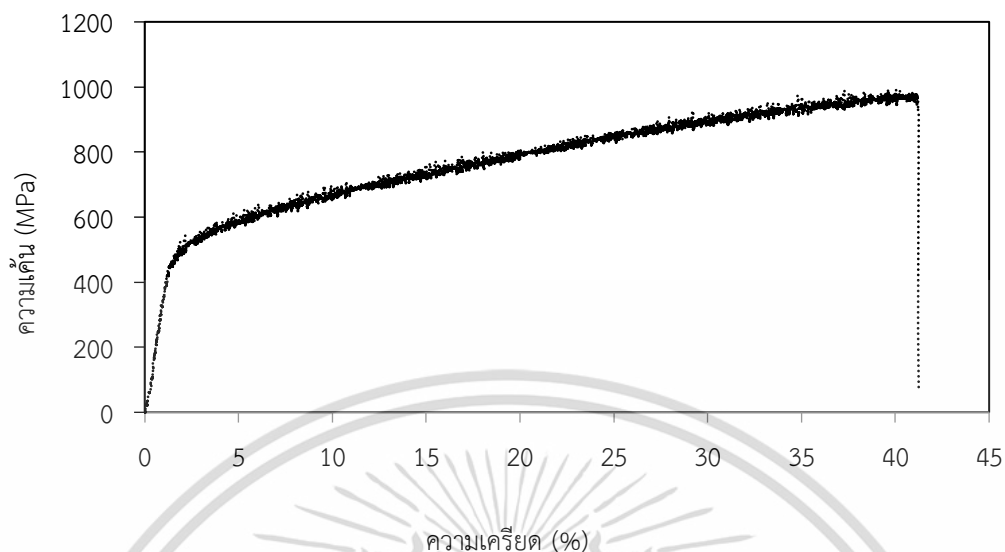
การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่มีส่วนผสมของธาตุ Si ปริมาณตั้งแต่ 0.1 0.5 ในและ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งประกอบด้วย ค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) เมื่อทดสอบแรงดึงเสร็จ นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดและทำการเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด ซึ่งมี

ปริมาณของ Si เป็นส่วนประกอบที่แตกต่างกันในแต่ละโลหะผสมและผลการทดสอบสามารถแสดงรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.16



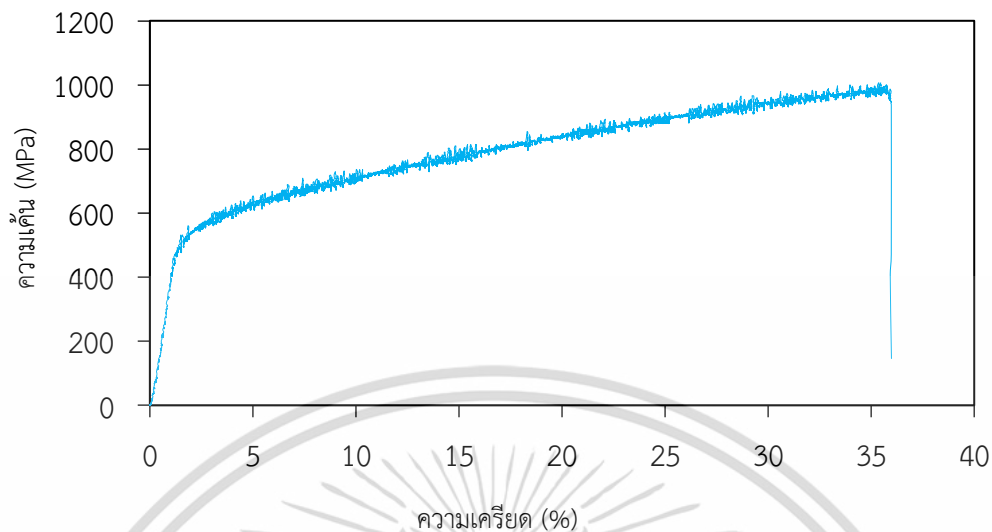
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si

ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si แสดงดังรูป 4.13 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนถึงจุดค่า Proportional limit หรือค่า Proof stress 0.2% offset ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 506 MPa ถึง 605 MPa และความเค้นจุดคราก (Yield point) มีค่าเท่ากับ 410 MPa เมื่อเพิ่มแรงดึงมากขึ้นจนถึงค่าความต้านทานแรงดึงที่มีค่าอยู่ระหว่างช่วง 940 ถึง 1040 MPa และทำการเพิ่มแรงดึงให้มากขึ้นไปจนถึงจุดแตกหัก (Fracture) ของโลหะผสมนี้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 950 ถึง 1200 MPa ขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 43% ถึง 53%



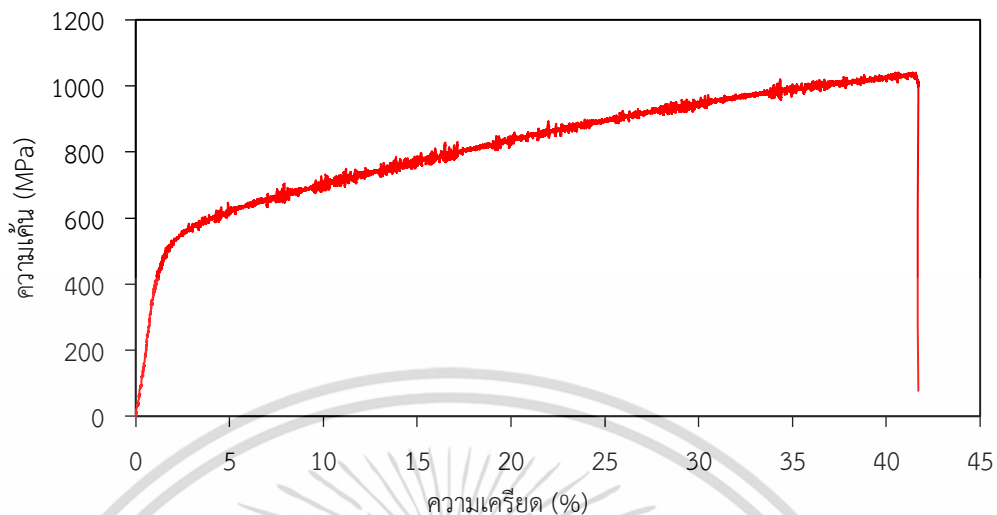
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si

ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si แสดงดังรูป 4.14 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนถึงจุดค่า Proportional limit หรือค่า Proof stress 0.2% offset มีค่าอยู่ระหว่าง 506 MPa ถึง 605 MPa และความเค้นจุดคราก (Yield point) มีค่าเท่ากับ 440 MPa เมื่อเพิ่มแรงดึงมากขึ้นจนถึงค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ระหว่างช่วง 940 ถึง 1040 MPa ทำให้การเพิ่มแรงดึงให้มากขึ้นไปจนถึงจุดแตกหัก (Fracture) ของโลหะผสมนี้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 950 ถึง 1200 MPa ขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 43% ถึง 53%



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si

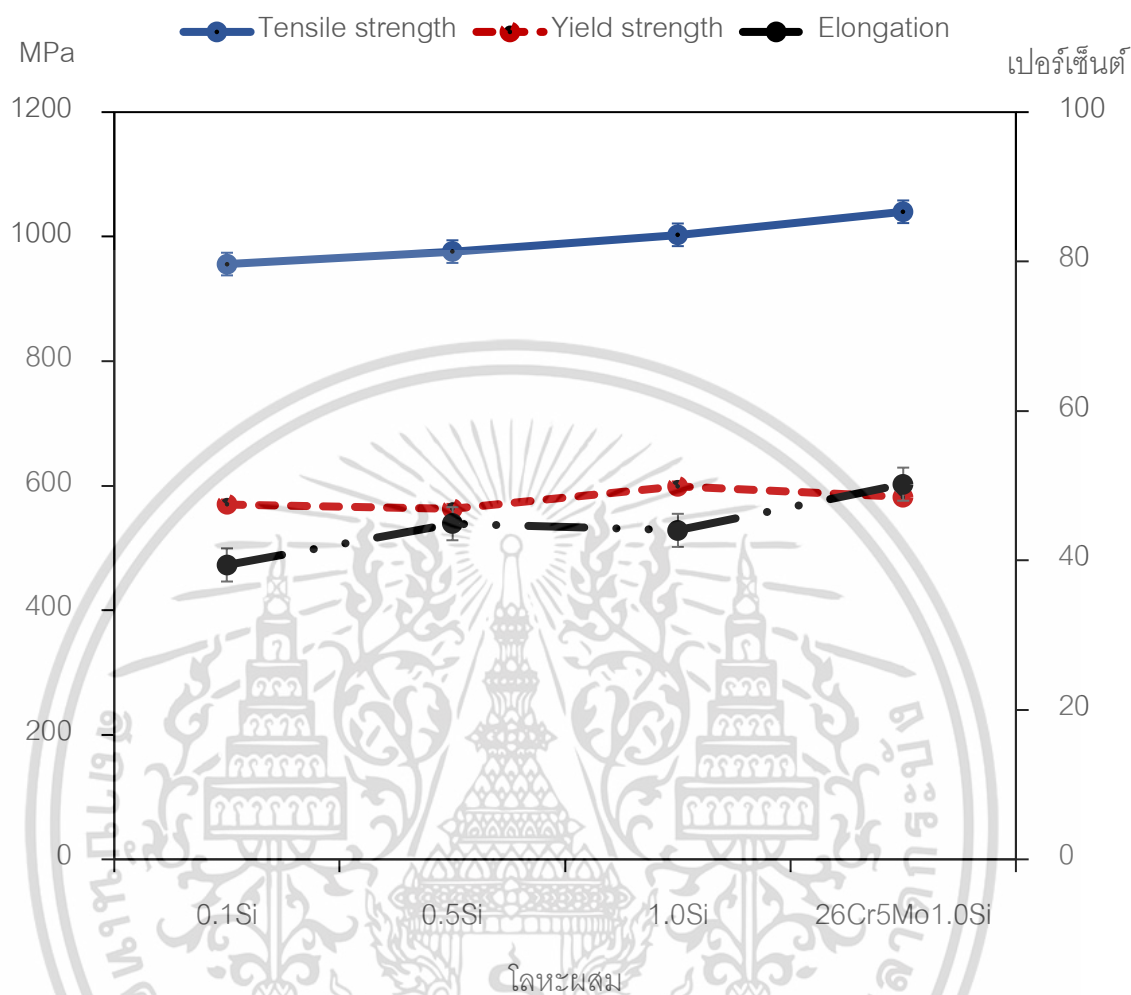
ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si แสดงดังรูป 4.15 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนถึงจุดค่า Proportional limit หรือค่า Proof stress 0.2% offset มีค่าอยู่ระหว่าง 506 ถึง 605 และความเค้นจุดคราก (Yield point) มีค่าเท่ากับ 480 MPa เมื่อเพิ่มแรงดึงมากขึ้นจนถึงค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ระหว่างช่วง 940 ถึง 1040 MPa ทำการเพิ่มแรงดึงให้มากขึ้นไปจนถึงจุดแตกหัก (Fracture) ของโลหะผสมนี้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 950 ถึง 1200 MPa ขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 43% ถึง 53%



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si

ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si แสดงดังรูป 4.16 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนถึงจุดค่า Proportional limit หรือค่า Proof stress 0.2% offset มีค่าอยู่ระหว่าง 506 MPa ถึง 605 MPa และความเค้นจุดคราก (Yield point) มีค่าเท่ากับ 490 MPa เมื่อเพิ่มแรงดึงมากขึ้นจนถึงค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ระหว่างช่วง 940 ถึง 1040 MPa ทำให้การเพิ่มแรงดึงให้มากขึ้นไปจนถึงจุดแตกหัก (Fracture) ของโลหะผสมนี้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 950 ถึง 1200 MPa ขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 43% ถึง 53%

สรุปความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดมีค่าขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit) อยู่ระหว่างช่วง 0 ถึง 540 MPa ค่า Proof stress 0.2% offset อยู่ระหว่าง 506 ถึง 605 MPa ความเค้นจุดครากมีค่าในช่วง 410 ถึง 490 MPa ต่อมาโลหะผสมเริ่มมีการเสียรูปหรือถึงจุดค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 940 ถึง 1040 MPa จนสุดท้ายโลหะผสมแตกหักซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 950 ถึง 1200 MPa ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเท่ากับ 43% ถึง 53% สามารถทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงคราก ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si Co-26Cr-5Mo-1.0Si ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงคราก ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแต่ละโลหะผสม

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงคราก ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแต่ละโลหะผสม จากรูปที่ 4.17 พบว่าลักษณะแนวโน้มของกราฟค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อโลหะผสมมีปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si กับ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีค่าความต้านทานแรงดึงและความแข็งแรงครากสูงกว่าโลหะผสมชนิดอื่นซึ่งมีปริมาณของ Si มากกว่าโลหะผสมอื่นนั่นคือเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถแสดงค่าต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si

โลหะผสม	ความแข็งแรงคราก	ความต้านทานแรงดึง	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
Co-28Cr-6Mo-0.1Si	564	956	39.40
Co-28Cr-6Mo-0.5Si	581	990	44.92
Co-28Cr-6Mo-1.0Si	602	1042	44.03
Co-26Cr-5Mo-1.0Si	604	1046	50.21

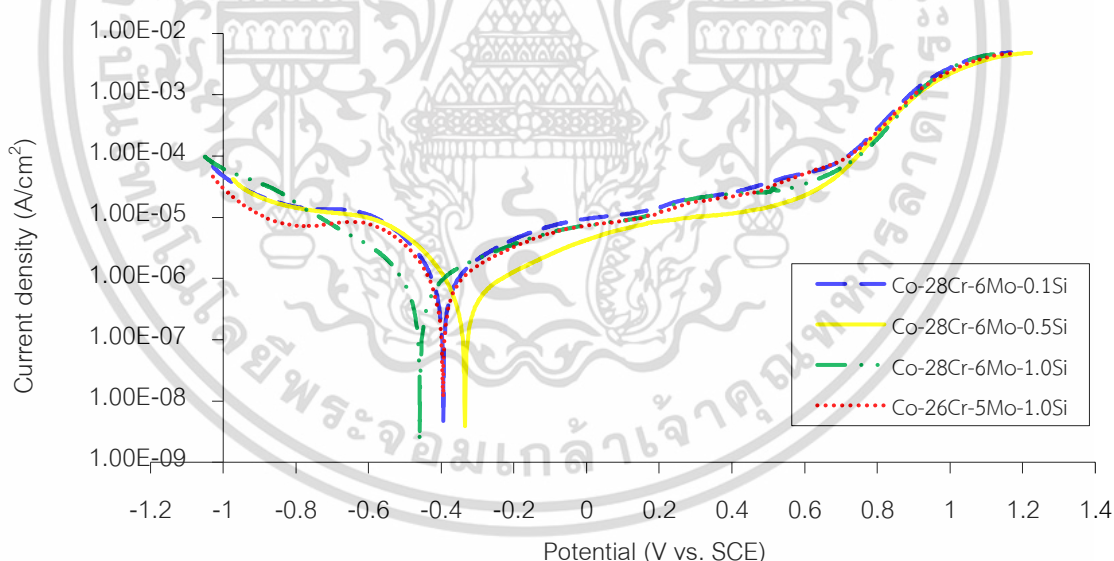
การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมจากตารางที่ 4.1 โดยเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงคราก ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si Co-26Cr-5Mo-1.0Si ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมพบว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 602 604 MPa และ 1042 1046 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si และ Co-28Cr-6Mo-0.5Si ที่มีค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 564 581 MPa และ 956 990 MPa ตามลำดับ โดยโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ทั้งสองชนิดมีปริมาณของ Si เท่ากันและเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะเดียวกันโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si และ Co-28Cr-6Mo-0.5Si มีปริมาณของ Si แตกต่างกัน โดยโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si มีปริมาณของธาตุ Si มากกว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si และค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงมากกว่าเช่นกัน

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0S เหล่านี้ซึ่งมีปริมาณของธาตุ Si มีค่าเท่ากับ 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจากตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบปริมาณธาตุ Si เท่ากันและต่างกันโลหะผสม 4 ชนิด โดยปริมาณธาตุ Si เพิ่มขึ้นจาก 0.1 จนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณของธาตุ Si เท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้โลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงกว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si และ Co-28Cr-6Mo-0.5Si ที่มีปริมาณของ Si คือ 0.1 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างเห็นได้ชัด (ค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงมีค่ามากกว่า 500 MPa และ 100 MPa โดยประมาณตามลำดับ) ขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุ Si จาก 0.1 เป็น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงครากและความต้านทานแรงดึงต่างกันเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 20 และ 40 MPa ตามลำดับ) เมื่อปริมาณของธาตุ Si เพิ่มมากขึ้นจากตั้งแต่ 0.1 จนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลทำให้คุณสมบัติแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทางผู้วิจัยคาดการณ์ข้อสรุปว่าคุณสมบัติของธาตุ Si มีความสามารถยับยั้งเติบโตของเกรนส่งผลทำให้เกรนมีขนาดเล็ก ซึ่งถ้าเกรนมีขนาดใหญ่หรือเติบโตมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานแรงดึงต่ำและความแข็งแรงครากต่ำ

โดยคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงและความแข็งแรงครากมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะผสม Co-Cr-Mo ชนิด F-799 (ซึ่งเป็นโลหะผสมที่ใช้ในด้านการแพทย์ ผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปทางความร้อน) มีค่าความเค้นจุดคราก ความต้านทานแรงดึง เท่ากับ 841 กับ 1277 MPa ซึ่งโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าโลหะผสมชนิด F-799 ซึ่งอาจจะมาจากเหตุผลในขั้นตอนการสร้างโลหะผสมทั้ง 2 แบบ มีความต่างกันเล็กน้อยและส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคแตกต่างกันได้ ดังนั้นวัสดุที่ใช้งานทางการแพทย์ ถ้าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงจะส่งผลให้วัสดุที่ใช้งานทางด้านการแพทย์มีความแข็งแรงทนทานจากสภาวะแวดล้อมภายนอกได้สูงและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านทันตกรรม ด้านทดแทนกระดูกได้ดีกว่าที่วัสดุที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ

4.3 อิทธิพลของซิลิกอนต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo

การศึกษาคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งมีปริมาณของธาตุ Si ที่แตกต่างโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si และทดสอบในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 โดยทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดและทดลองที่ระดับ pH เท่ากัน แสดงการเปรียบเทียบกราฟโพลาไรเซชันในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2 ได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาไรเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2

การเปรียบเทียบอิทธิพลของธาตุ Si ในสภาพแวดล้อมที่ pH เท่ากับ 7.2 หรือเป็นกลาง ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาไรเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-

6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2 ในรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density หรือ i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.500×10^{-6} ถึง 0.600×10^{-6} A/cm² และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential หรือ E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.47 ถึง -0.33 V vs. SCE โดยแนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.6 V vs. SCE และมีการเกิด Transpassive ตั้งแต่ช่วง +0.6 V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ + 0.6 V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าตั้งแต่ 40×10^{-6} A/cm² จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 7.2

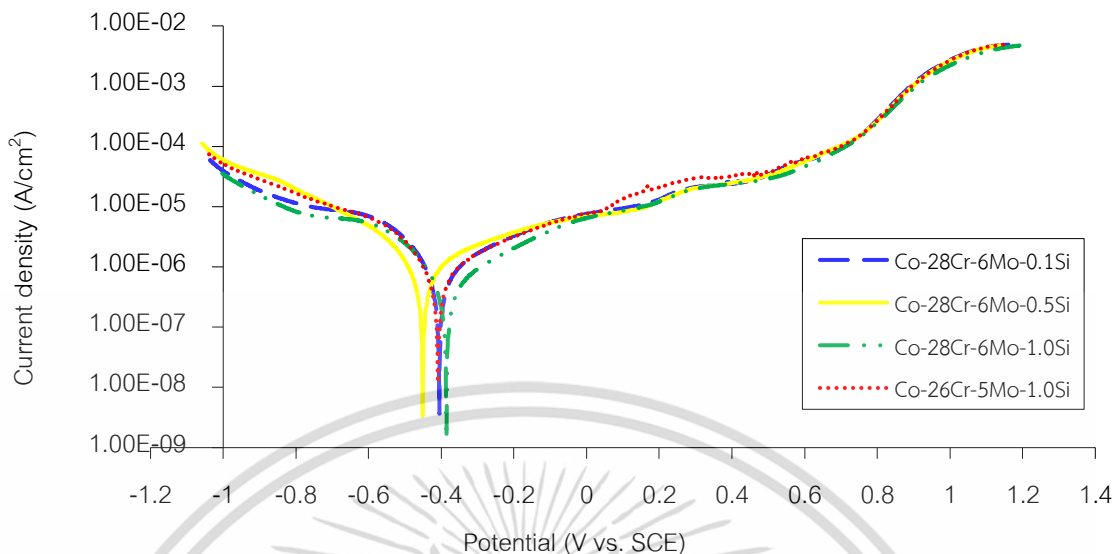
Alloy	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density (μ A/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density (μ A/cm ²)
0.1Si	-428.268	0.548	0.018	651.811	53.413
0.5Si	-450.057	0.509	0.016	685.272	44.457
1.0Si	-461.729	0.294	0.009	689.941	46.544
26Cr5Mo1.0Si	-337.224	0.606	0.019	714.063	52.325

ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ pH 7.2 แสดงดังตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -428.268 -450.057 -461.729 และ -337.224 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.548 0.509 0.294 และ 0.606 μ A/cm² และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.018 0.016 0.009 และ 0.019 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในโลหะผสม Co-Cr-Mo ทั้ง 4 ชนิดนี้เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น ค่าของความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าลดลง ขณะที่โลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง มีค่าของความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีเพิ่มสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของการกระแทกการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อโลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง ในส่วน

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุ Si ที่แตกต่างกันกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 7.2 หรือเป็นกลาง ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.18 พบว่าช่วงพาสซีฟของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.6 V vs. SCE ซึ่งมีลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายคลึงกันและในส่วนการกัดกร่อนแบบรูเข็มของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วง ศักย์ไฟฟ้า + 0.65 V vs. SCE และค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือเป็นค่าบ่งบอกถึงความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เท่ากับ 53.413 44.457 46.544 และ 52.325 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสมที่มีปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง และโลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง มีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มสูงขึ้น

ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 7.2 หรือสภาพเป็นกลางพบว่าโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มของค่ากระแสการกัดกร่อน ค่ากระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น ขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีปริมาณของ Cr กับ Mo ต่ำลง มีค่ากระแสการกัดกร่อน ค่ากระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง



รูปที่ 4.19 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 4.0

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของธาตุ Si ในสภาพแวดล้อมที่ pH เท่ากับ 4.0 หรือเป็นกรด ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 4.0 ในรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.400×10^{-6} ถึง 1.000×10^{-6} A/cm² และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.46 ถึง -0.36 V vs. SCE โดยแนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.7 V vs. SCE และมีการเกิด Transpassive ตั้งแต่ช่วง +0.7 V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ +0.7 V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าตั้งแต่ 110×10^{-6} A/cm² จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0

Alloy	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
0.1Si	-404.924	0.641	0.021	752.193	149.291
0.5Si	-453.169	0.538	0.017	737.408	120.883
1.0Si	-384.692	0.426	0.014	730.406	112.326
26Cr5Mo1.0Si	-409.593	0.973	0.031	744.411	138.723

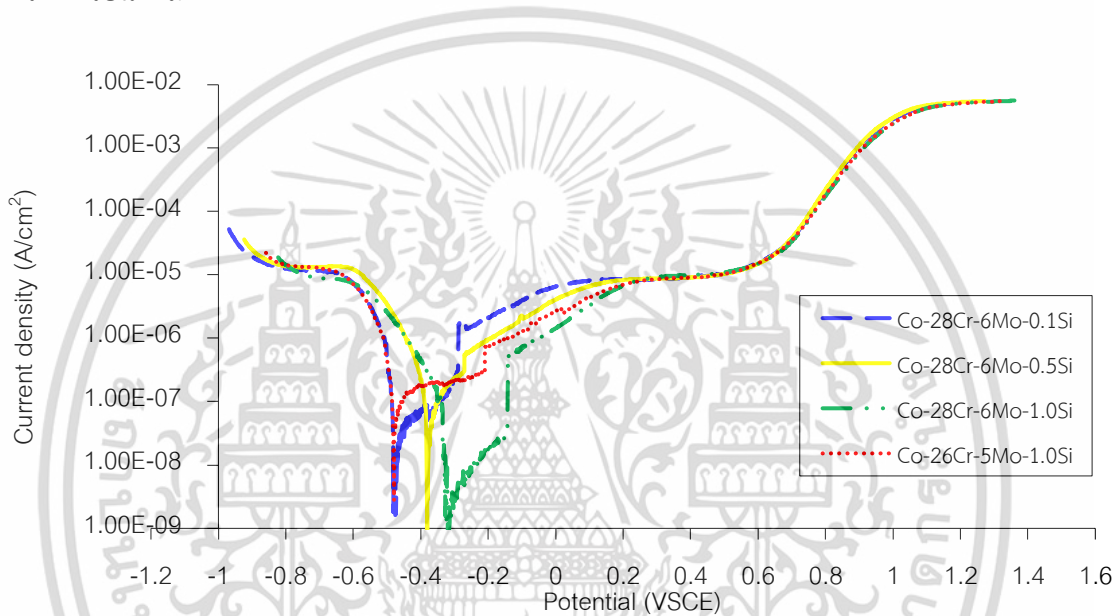
ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ pH 4.0 แสดงดังตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -404.924 -453.169 -384.692 และ -409.593 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.641 0.538 0.426 และ 0.973 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.021 0.017 0.014 และ 0.031 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในโลหะผสม Co-Cr-Mo ทั้ง 4 ชนิดนี้ เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น ค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีค่าลดลง ขณะที่โลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง มีค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีเพิ่มสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของการกระแสการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อโลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง ในส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุ Si ที่แตกต่างกันกับค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 หรือเป็นกรด ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.19 พบว่าช่วงพาสซีฟของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.7 V vs. SCE ซึ่งมีลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายคลึงกันและในส่วนการกัดกร่อนแบบรูเข็มของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วง ศักย์ไฟฟ้า + 0.73 V vs. SCE ในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็ม เท่ากับ 149.291 120.883 112.326 และ 138.723 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสมที่มีปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความหนาแน่นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง และโลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง มีค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มสูงขึ้น

ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 หรือสถานะเป็นกรด พบว่าโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มของค่ากระแสการกัดกร่อน ค่ากระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น ขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีปริมาณของ Cr กับ Mo ต่ำลง มีค่ากระแสการกัดกร่อน ค่ากระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง



รูปที่ 4.20 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่ pH เท่ากับ 10.0

การเปรียบเทียบอิทธิพลของธาตุ Si ในสภาพแวดล้อมที่ pH เท่ากับ 10.0 หรือเป็นเบส ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 10.0 ในรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.100×10^{-6} ถึง 0.600×10^{-6} A/cm² และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.47 ถึง -0.32 V vs. SCE โดยแนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.7 V vs. SCE และมีการเกิด Transpassive ตั้งแต่ช่วง +0.7 V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ + 0.67 V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าตั้งแต่ 0.10×10^{-6} A/cm² จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมา

คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 10.0

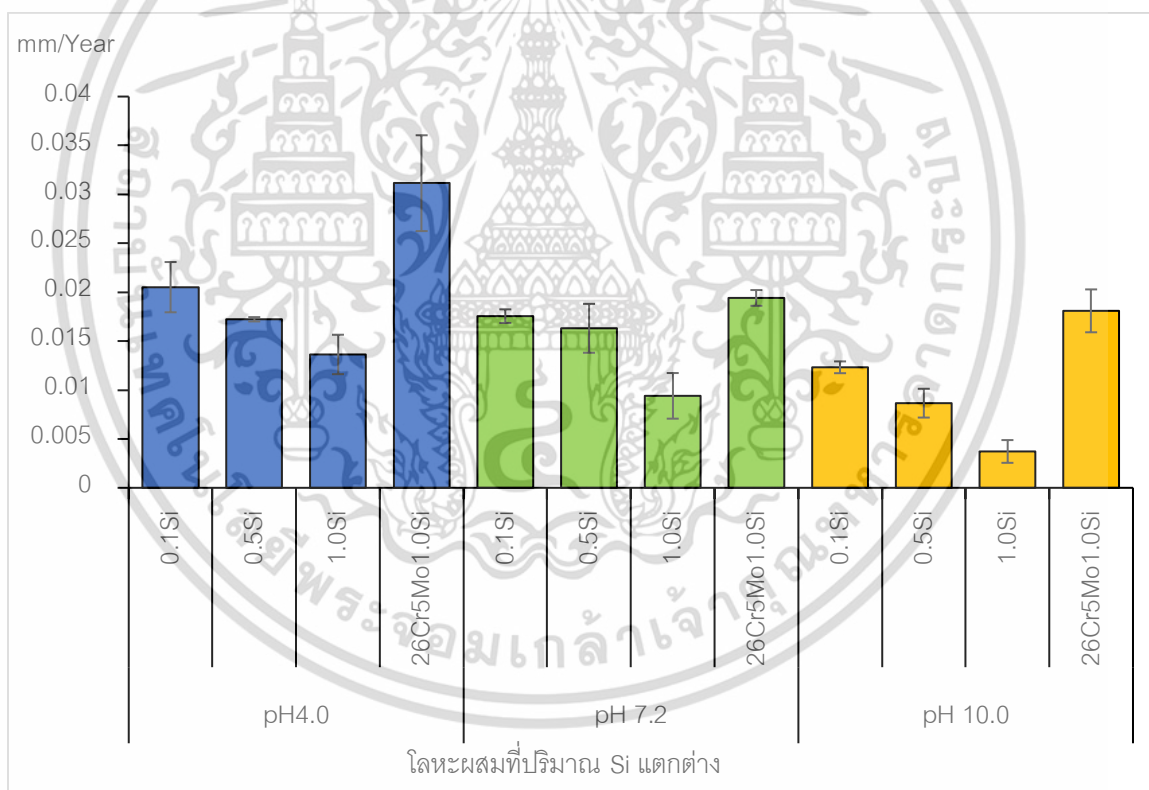
Alloy	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
0.1Si	-474.958	0.385	0.012	693.831	34.561
0.5Si	-377.688	0.270	0.009	679.825	29.243
1.0Si	-324.561	0.116	0.004	688.031	29.789
26Cr5Mo1.0Si	-481.749	0.565	0.018	711.163	38.067

ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ pH 10.0 แสดงดังตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -474.958 -377.688 -324.561 และ -481.749 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.385 0.270 0.116 และ 0.565 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.012 0.009 0.004 และ 0.018 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในโลหะผสม Co-Cr-Mo ทั้ง 4 ชนิดนี้ เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มมากขึ้น ค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีค่าลดลง ขณะที่โลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง มีค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีเพิ่มสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อโลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง ในส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุ Si ที่แตกต่างกันกับค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 10.0 หรือเป็นเบส ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.20 พบว่าช่วงพาสซีฟของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.6 V vs. SCE ซึ่งมีลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายคลึงกัน และในส่วนของารกัดกร่อนแบบบูรเขิมของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วง ศักย์ไฟฟ้า + 0.67 V vs.

SCE โลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็ม เท่ากับ 34.561 29.243 29.789 และ 38.067 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสมที่มีปริมาณของ Si เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง และโลหะผสมลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง มีค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มสูงขึ้น

ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 10.0 หรือสภาพเป็นด่าง พบว่าโลหะผสม Co-Cr-Mo เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มของค่ากระแสการกัดกร่อน ค่ากระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น ขณะที่โลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีปริมาณของ Cr กับ Mo ต่ำลง มีค่ากระแสการกัดกร่อน ค่ากระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง สรุปการเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 ได้ดังกราฟที่ 4.21



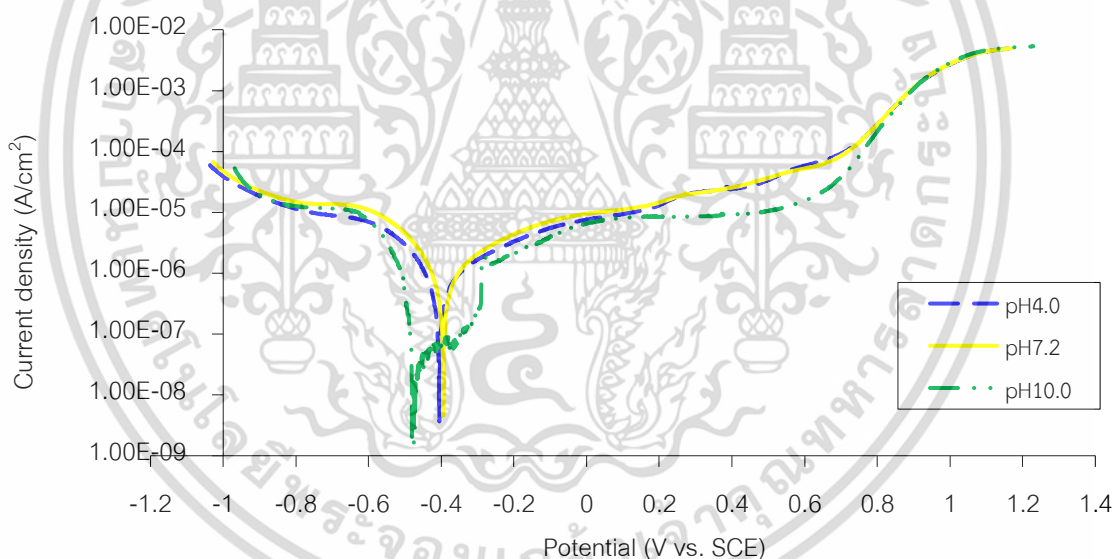
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมที่มีปริมาณของ Si ต่างกันของโลหะผสม Co-Cr-Mo ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0

การสรุปผลการทดลองด้านอิทธิพลของธาตุ Si ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 แสดงได้ดังกราฟที่ 4.21 กราฟอัตราการกัดกร่อนกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo พบว่าใน

สารละลาย pH 4.0 7.2 และ 10.0 อัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มต่ำลง เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลง ทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นในสารละลายทุกค่า pH ดังนั้นสัดส่วนปริมาณของธาตุโลหะผสมที่มีปริมาณแตกต่างกันอย่างของ ธาตุ Cr Mo และ Si จะมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo โดยปริมาณ ธาตุ Si เปลี่ยนแปลงส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อน ถ้าปริมาณของธาตุ Si สูงขึ้น จะทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงหรือความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้นในโลหะผสม Co-Cr-Mo

4.4 อิทธิพลของ pH ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ชนิดเดียวกัน ในสารละลาย NaCl ที่มีความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH แตกต่างกัน (มีค่า pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0) โดยทำการเปรียบเทียบความสามารถการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมชนิดเดียวกันโดยทดลองที่ระดับค่า pH แตกต่างกัน และทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 4 ชนิดและทดลองที่ระดับ pH เท่ากัน แสดงการเปรียบเทียบกราฟโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0

การเปรียบเทียบอิทธิพลของ pH ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาริเซชันของ pH 4.0 7.2 และ 10.0 ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.350×10^{-6} ถึง 0.650×10^{-6} A/cm² และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.40 ถึง -0.48 V vs. SCE โดยแนวโน้ม

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.2 ถึง $+0.6$ V vs. SCE และมีการเกิด Tranpassive ตั้งแต่ช่วง $+0.6$ V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูปเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ $+0.65$ V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูปเข็มมีค่าตั้งแต่ 34.00×10^{-6} A/cm² จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.5

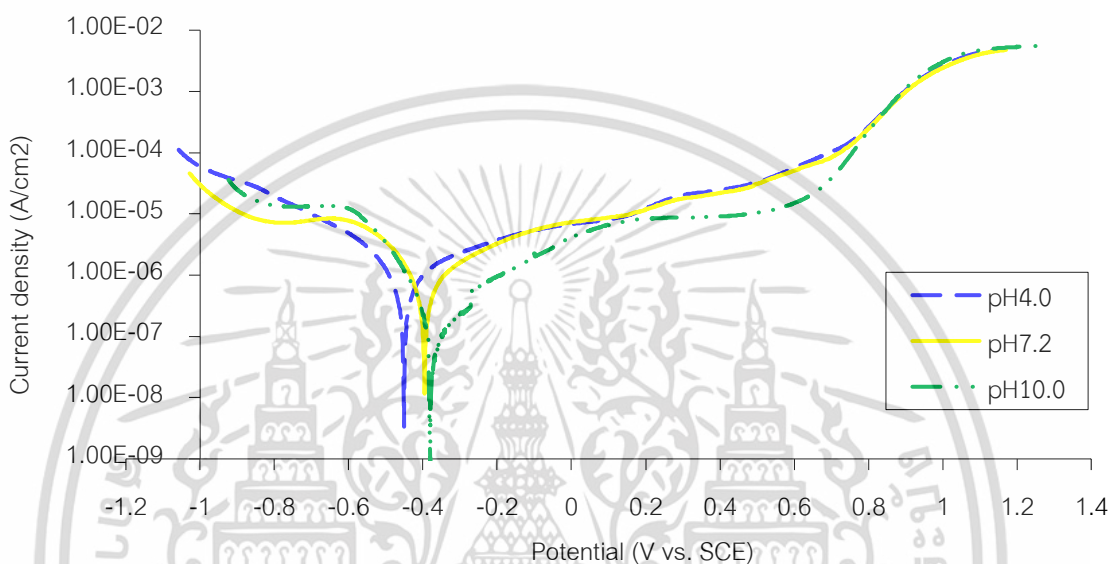
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si

Co-28Cr-6Mo-0.1Si					
pH	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
4.0	-404.924	0.641	0.021	0.730	112.326
7.2	-428.268	0.548	0.018	0.652	53.413
10	-474.958	0.385	0.012	0.694	34.561

ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si แสดงดังตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ที่ค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -404.924 -428.268 และ -474.958 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.641 0.548 และ 0.385 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.021 0.018 และ 0.012 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกันนี้ (pH 4.0 7.2 และ 10.0) เมื่อ pH ต่ำลงหรือมีความเป็นกรดมากขึ้น ทำให้ค่าของความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของการกระแสการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณค่า pH ต่ำลง ในส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มที่แตกต่างเมื่อค่า pH ต่างกัน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันพื้นผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.22 พบว่าช่วงพาสซีฟของ pH ทั้ง 3 ค่าอยู่ในช่วง -0.2 ถึง $+0.65$ V vs. SCE ซึ่งมีลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายคลึงกันและในส่วนการกัดกร่อนแบบรูปเข็ม 10.0 เท่ากับ 3 ค่านี้เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วง ศักย์ไฟฟ้า $+0.65$ V vs. SCE สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูปเข็มของค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0

เท่ากับ 112.326 53.413 และ 34.561 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si เมื่อค่า pH สูงขึ้นหรือมีความเป็นเบสสูงมากขึ้น แนวโน้มของค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง ดังนั้นในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 พบว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si มีอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น เมื่อค่า pH ลดต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง



รูปที่ 4.23 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0

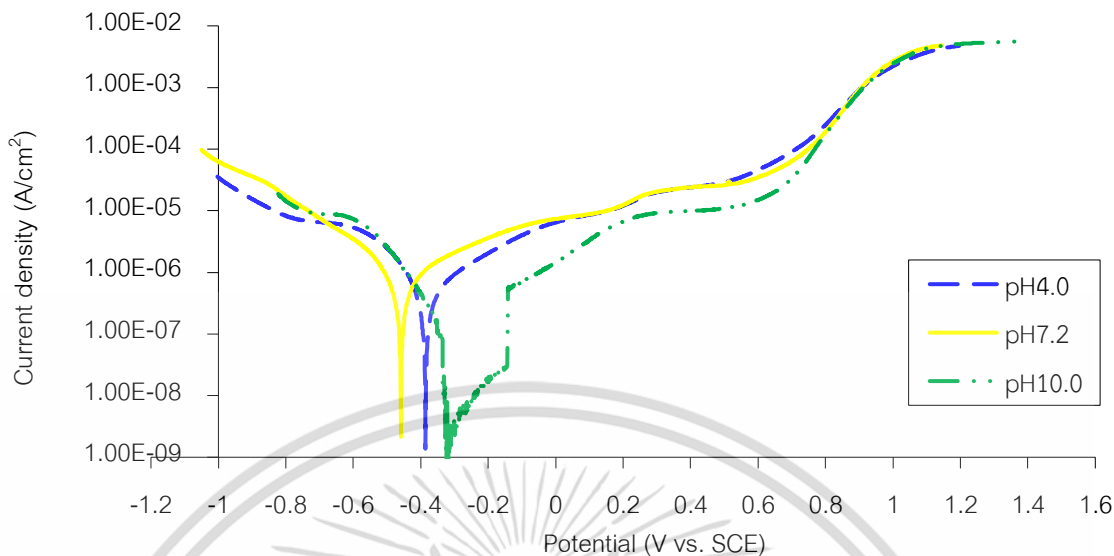
การเปรียบเทียบอิทธิพลของ pH ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาริเซชันของ pH 4.0 7.2 และ 10.0 ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.50×10^{-6} ถึง 0.250×10^{-6} A/cm^2 และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.37 ถึง -0.45 V vs. SCE โดยแนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.6 V vs. SCE และมีการเกิด Transpassive ตั้งแต่ช่วง +0.6 V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ + 0.65 V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าตั้งแต่ 29.00×10^{-6} A/cm^2 จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si

Co-28Cr-6Mo-0.5Si					
pH	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
4.0	-453.169	0.538	0.017	0.752	149.291
7.2	-450.057	0.509	0.016	0.685	44.457
10	-377.688	0.270	0.009	0.680	29.243

ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si แสดงดังตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si ที่ค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -453.169 -450.057 และ -377.688 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.538 0.509 และ 0.270 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.017 0.016 และ 0.009 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกันนี้ (pH 4.0 7.2 และ 10.0) เมื่อ pH ต่ำลงหรือมีความเป็นกรดมากขึ้น ทำให้ค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของการกระแสการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณค่า pH ต่ำลง ในส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มที่แตกต่างเมื่อค่า pH ต่างกัน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.23 พบว่าช่วงพาสซีฟของ pH ทั้ง 3 ค่าอยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.6 V vs. SCE ลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายมีความคล้ายคลึงกันและในส่วนค่าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของ pH ทั้ง 3 ค่านี้เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงศักย์ไฟฟ้า + 0.68 V vs. SCE สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มของค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 เท่ากับ 149.291 44.457 และ 29.243 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si เมื่อค่า pH สูงขึ้นหรือมีความเป็นเบสสูงมากขึ้น แนวโน้มของค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง ดังนั้นในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 พบว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si มีอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น เมื่อค่า pH ลดต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง



รูปที่ 4.24 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0

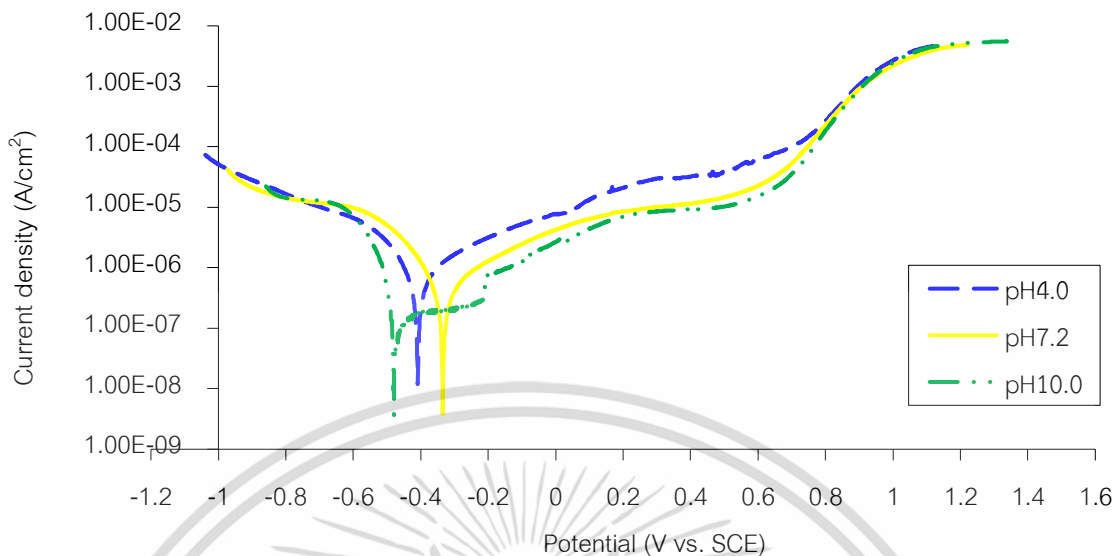
การเปรียบเทียบอิทธิพลของ pH ต่อความต้านการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาริเซชันของ pH 4.0 7.2 และ 10.0 ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.10×10^{-6} ถึง 0.450×10^{-6} A/cm² และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.32 ถึง -0.46 V vs. SCE โดยแนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.1 ถึง +0.6 V vs. SCE และมีการเกิด Transpassive ตั้งแต่ช่วง +0.6 V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูปเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ + 0.69 V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าตั้งแต่ 38.00×10^{-6} A/cm² จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si

Co-28Cr-6Mo-1.0Si					
pH	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
4.0	-384.692	0.426	0.014	0.737	120.883
7.2	-461.729	0.294	0.009	0.690	46.544
10	-324.561	0.116	0.004	0.711	38.067

ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si แสดงดังตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ที่ค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -384.692 -461.729 และ -324.561 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.426 0.294 และ 0.116 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.014 0.009 และ 0.004 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกันนี้ (pH 4.0 7.2 และ 10.0) เมื่อ pH ต่ำลงหรือมีความเป็นกรดมากขึ้น ทำให้ค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของการกระแสการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณค่า pH ต่ำลง ในส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มที่แตกต่างเมื่อค่า pH ต่างกัน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.20 พบว่าช่วงพาสซีฟของ pH ทั้ง 3 ค่าอยู่ในช่วง -0.1 ถึง +0.6 V vs. SCE ซึ่งมีลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายคลึงกันและในส่วนการกัดกร่อนแบบรูเข็มของ pH ทั้ง 3 ค่านี้เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงศักย์ไฟฟ้า + 0.69 V vs. SCE สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มของค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 เท่ากับ 120.883 46.544 และ 38.067 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si เมื่อค่า pH สูงขึ้นหรือมีความเป็นเบสสูงมากขึ้น แนวโน้มของค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง ดังนั้นในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 พบว่าโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si มีอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น เมื่อค่า pH ลดต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง



รูปที่ 4.25 กราฟโพเทนซีไอโตนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 4.0 7.2 และ 10.0

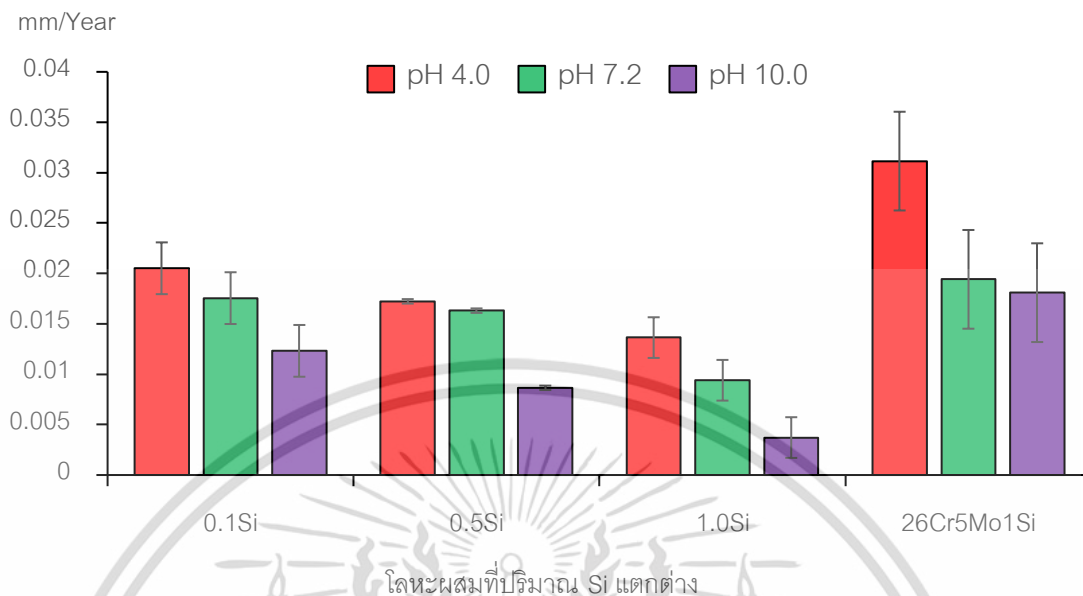
การเปรียบเทียบอิทธิพลของ pH ต่อความต้านการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ของกราฟโพลาริเซชันของ pH 4.0 7.2 และ 10.0 ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.55×10^{-6} ถึง 1.00×10^{-6} A/cm² และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.30 ถึง -0.50 V vs. SCE โดยแนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้โลหะผสมถูกกัดกร่อนจากสารละลายมากยิ่งขึ้น มีการเกิดช่วง Passive อยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.7 V vs. SCE และมีการเกิด Transpassive ตั้งแต่ช่วง +0.7 V vs. SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าแบบรูเข็ม (Pitting potential) ตั้งแต่ + 0.68 V vs. SCE และมีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าตั้งแต่ 30.00×10^{-6} A/cm² จากกราฟโพลาริเซชันนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม NOVA 1.11 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si

Co-28Cr-6Mo-1.0Si					
pH	Corrosion potential (mv)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)	Pitting potential (mV)	Pitting corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
4.0	-409.593	0.973	0.031	0.744	138.723
7.2	-337.224	0.606	0.019	0.714	52.325
10	-481.749	0.565	0.018	0.688	29.789

ค่าพารามิเตอร์ของการกัดกร่อนจากการวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชันการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si แสดงดังตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนในโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si ที่ค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) มีค่าเท่ากับ -409.593 -337.224 และ -481.749 mV ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (Corrosion current density) มีค่าเท่ากับ 0.973 0.606 และ 0.565 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) เท่ากับ 0.031 0.019 และ 0.018 mm/Year ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกันนี้ (pH 4.0 7.2 และ 10.0) เมื่อ pH ต่ำลงหรือมีความเป็นกรดมากขึ้น ทำให้ค่าของความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น และจากค่าความหนาแน่นของการกระแสการกัดกร่อนนำไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณค่า pH ต่ำลง ในส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือศักย์ไฟฟ้าที่โลหะผสมเริ่มถูกการกัดกร่อนนั้น ไม่พบถึงแนวโน้มที่แตกต่างเมื่อค่า pH ต่างกัน

พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 ช่วงการเกิดพาสซีฟหรือช่วงที่โลหะผสมมีการสร้างออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาเพื่อป้องกันผิวของโลหะผสมจากการถูกกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก จากกราฟที่ 4.25 พบว่าช่วงพาสซีฟของ pH ทั้ง 3 ค่าอยู่ในช่วง -0.2 ถึง +0.7 V vs. SCE ซึ่งมีลักษณะของช่วงพาสซีฟคล้ายคลึงกันและในส่วนการกัดกร่อนแบบรูเข็มของ pH ทั้ง 3 ค่านี้เกิดขึ้นตั้งแต่วงศักย์ไฟฟ้า + 0.68 V vs. SCE สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มของค่า pH 4.0 7.2 และ 10.0 เท่ากับ 138.723 52.325 และ 29.789 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งในโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si เมื่อค่า pH สูงขึ้นหรือมีความเป็นเบสสูงมากขึ้น แนวโน้มของค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนแบบรูเข็มลดต่ำลง ดังนั้นในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH 4.0 7.2 และ 10.0 พบว่าโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si มีอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น เมื่อค่า pH ลดต่ำลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง สรุปการเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของ pH ที่แตกต่างกันในโลหะผสมทั้ง 4 ชนิด ได้ดังกราฟที่ 4.26



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของค่า pH ต่างๆ กับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo

การสรุปผลการทดลองด้านอิทธิพลของค่า pH ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยค่า pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 แสดงได้ดังกราฟที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนกับค่า pH ที่แตกต่างกัน โดยแยกชุดข้อมูลตามปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo พบว่าในแต่ละโลหะผสม เมื่อค่า pH สูงขึ้นหรือมีความเป็นกรดมากขึ้นส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นหรือความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง และแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนต่ำลงเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มสูงขึ้น สำหรับโลหะผสมปริมาณของ Cr กับ Mo ต่ำลงนั้น ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด

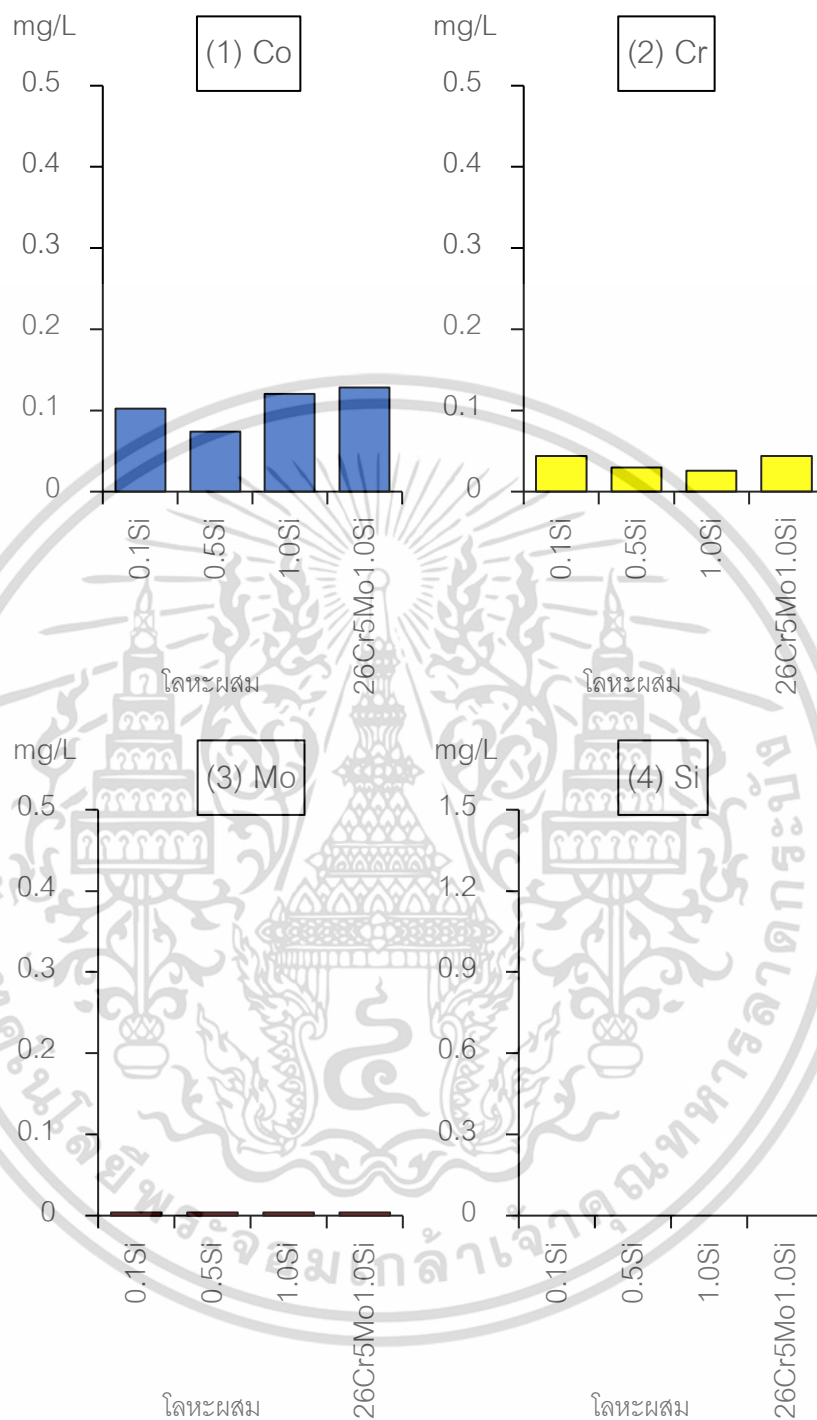
4.5 อิทธิพลของธาตุต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

การศึกษาอิทธิพลของธาตุ Si ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH 3 ระดับ คือ 4.0 7.2 และ 10.0 โดยทำการตรวจสอบหาปริมาณของธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวโลหะผสมหลังจากการทำการทดลองการกัดกร่อน ด้วยการใช้เทคนิค Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) และสามารถวัดปริมาณธาตุที่อยู่ในสารละลายที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมหลังจากการทดลองการกัดกร่อน แสดงได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวโลหะผสมหลังจากการกัดกร่อน

โลหะผสม	ธาตุ (mg/l)	pH		
		4.0	7.2	10.0
Co-28Cr-6Mo-0.1Si	Co	1.248	0.102	0.034
	Cr	0.702	0.044	0.032
	Mo	0.060	0.004	0.004
	Si	-	-	-
Co-28Cr-6Mo-0.5Si	Co	0.088	0.074	0.036
	Cr	0.026	0.030	0.004
	Mo	0.002	0.004	0.006
	Si	-	-	0.050
Co-28Cr-6Mo-1.0Si	Co	0.238	0.120	0.022
	Cr	0.094	0.026	0.020
	Mo	0.010	0.004	0.002
	Si	-	-	0.072
Co-26Cr-5Mo-1.0Si	Co	0.182	0.128	0.050
	Cr	0.066	0.044	0.040
	Mo	0.006	0.004	0.004
	Si	-	-	0.196

การหาปริมาณของธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมหลังจากการทำการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระดับ pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 แสดงจากตารางที่ 4.9 ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้จากตารางนี้มาแสดงเป็นกราฟของปริมาณธาตุที่หลุดออกมาจากพื้นผิวโลหะผสมหลังจากทำการกัดกร่อน ณ ที่ pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 โดยทำการเปรียบเทียบกับปริมาณของธาตุ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo ดังรูปกราฟที่ 4.23 ถึง 4.24 และจากตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณธาตุที่หลุดออกกับปริมาณของธาตุ Si ที่แตกต่างกันในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2 แสดงดังรูปที่ 4.27

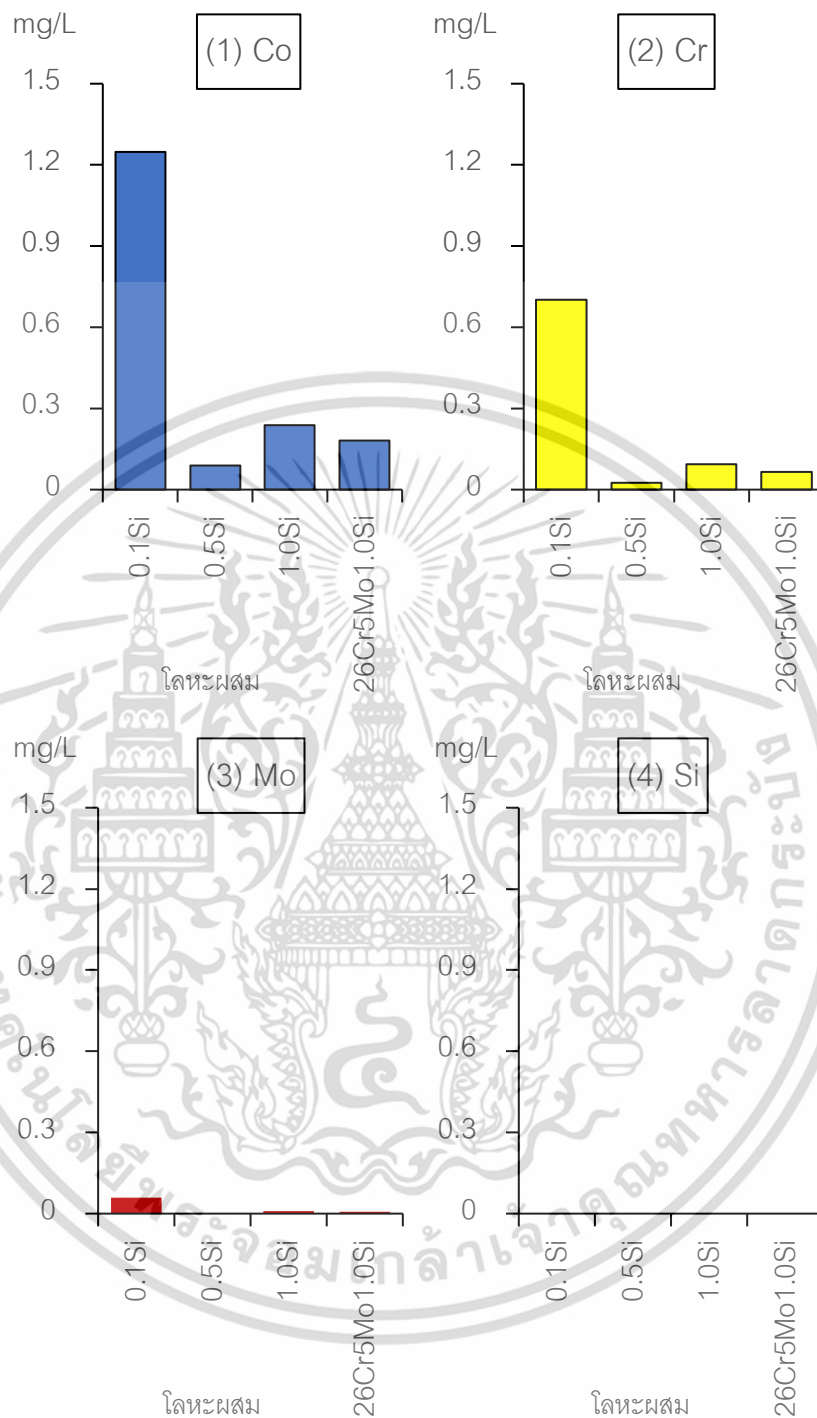


รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2 (1) Co (2) Cr (3) Mo (4) Si

การเปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของแต่ละโลหะผสมที่มีปริมาณของธาตุ Si แตกต่างกัน ซึ่งทดสอบในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH 7.2 แสดง

ได้จากรูปที่ 4.27 พบว่าที่สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH 7.2 มีปริมาณการหลุดออกของธาตุ Co Cr และ Mo แต่ไม่พบการหลุดออกของธาตุ Si โดยพบปริมาณการหลุดออกของธาตุ Co มากที่สุด มีปริมาณเฉลี่ย 0.106 mg/L ในส่วนการหลุดออกของธาตุ Cr มีค่าเฉลี่ย 0.036 mg/L ซึ่งมีแนวโน้มการหลุดออกต่ำลงเมื่อปริมาณของธาตุ Si เพิ่มขึ้นและเมื่อการลดปริมาณของ Cr กับ Mo ลงกลับในโลหะผสม Co-26Cr-5Mo ทำให้ปริมาณของธาตุ Cr หลุดออกมาเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณการหลุดออกของธาตุ Mo นั้น พบในปริมาณต่ำมาก

การเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่หลุดออกหลังการทำการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 7.2 โดยมีปริมาณของธาตุ Co กับ Cr หลุดออกมา ซึ่งหลุดออกมาต่ำกว่าในสารละลายที่มีความเป็นกรดหรือ pH 4.0 และจากรูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของค่า pH แตกต่างกันกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่แสดงถึงแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำลงในสารละลาย pH เป็นกลางหรือเท่ากับ 7.2 เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มมากขึ้น และจากรูปที่ 4.27 ปริมาณของธาตุของ Cr หลุดออกมาต่ำลงเมื่อปริมาณของธาตุ Si สูงขึ้น โดยธาตุ Cr มีความสำคัญกับออกไซด์ฟิล์มและคาดการณ์ว่าธาตุ Si ที่เพิ่มสูงขึ้นในโลหะผสมน่าจะไปช่วยยึดเหนี่ยว Cr ออกไซด์ให้ดีขึ้นและทำให้ปริมาณการหลุดออกของ Cr ลดต่ำลงและส่งผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น



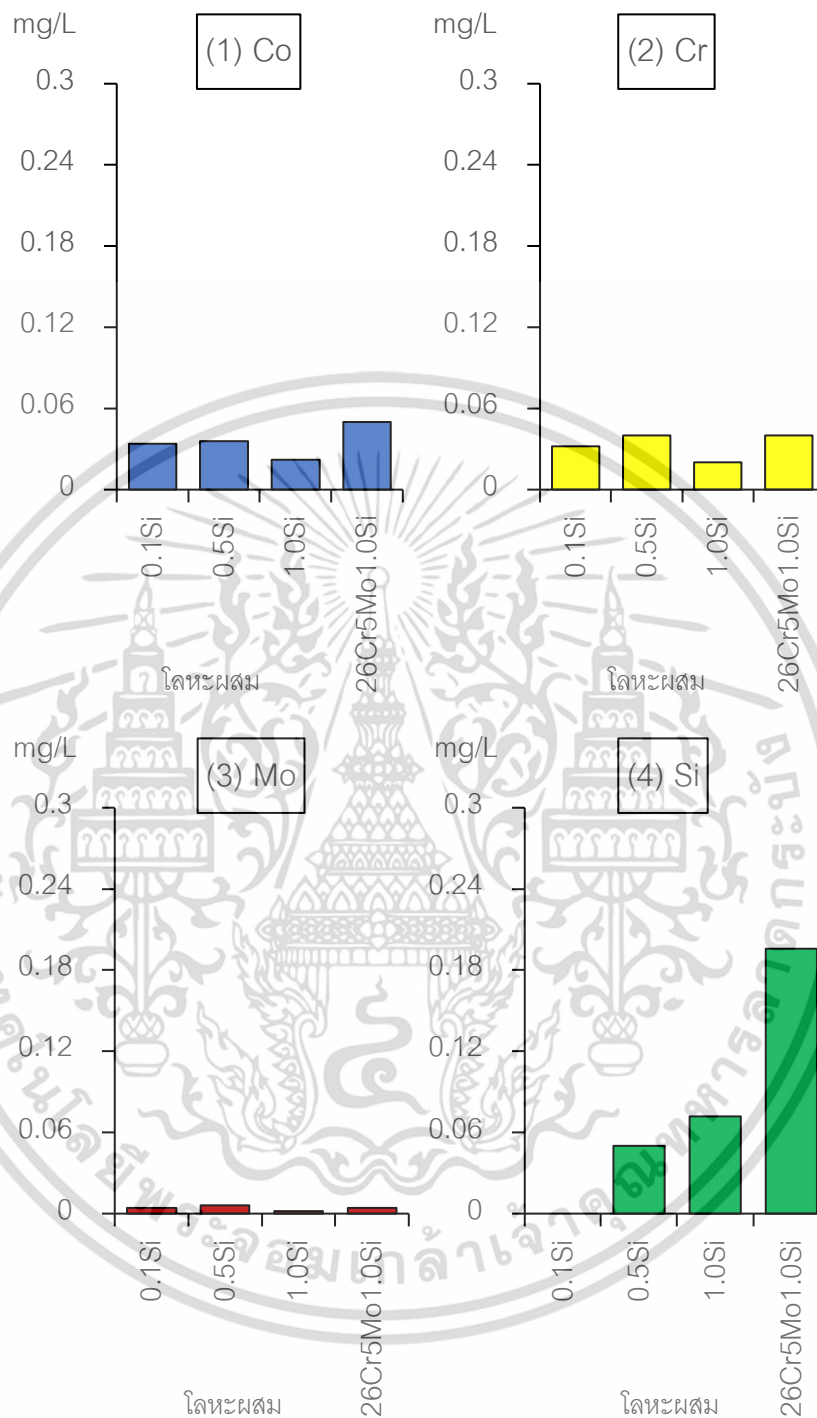
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสม ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 4.0 (1) Co (2) Cr (3) Mo (4) Si

การเปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของแต่ละโลหะผสมที่มีปริมาณของธาตุ Si แตกต่างกัน ซึ่งทดสอบในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH 4.0 แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากรูปที่ 4.28 พบว่าที่สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH 4.0 มีปริมาณการหลุดออกของธาตุ Co Cr และ Mo แต่ไม่พบการหลุดออกของธาตุ Si โดยพบปริมาณการหลุดออกของธาตุ Co มากที่สุด มีปริมาณเฉลี่ย 0.439 mg/L ปริมาณการหลุดออกของธาตุ Cr มีค่าเฉลี่ย 0.222 mg/L ปริมาณการหลุดออกของธาตุ Mo มีค่าเฉลี่ย 0.020 mg/L ซึ่งมีแนวโน้มการหลุดออกของธาตุ Co Cr และ Mo ลดต่ำลงเมื่อปริมาณของธาตุ Si เพิ่มขึ้น-(ปริมาณของ 0.1 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ตดยน้ำหนัก)

การเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่หลุดออกหลังการทำการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 4.0 โดยมีปริมาณของธาตุ Co Cr และ Mo หลุดออกมาซึ่งปริมาณธาตุเหล่านี้หลุดออกมาสูงที่สุดกว่าในสารละลายที่มีความเป็นกลางและเป็นเบส บ่งบอกได้ว่าในสารละลายที่มีความเป็นกรดนี้จะมีความรุนแรงต่อการกัดกร่อนสูงที่สุด และจากรูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของค่า pH แตกต่างกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่แสดงถึงแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำลงในสารละลาย pH เป็นกรดหรือเท่ากับ 4.0 เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มมากขึ้น และจากรูปที่ ปริมาณของธาตุของ Co Cr และ Mo หลุดออกมาต่ำลง โดยธาตุ Si ที่เพิ่มสูงขึ้นในโลหะผสมส่งผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของโลหะผสมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 10.0 (1) Co (2) Cr (3) Mo (4) Si

การเปรียบเทียบปริมาณของโลหะที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของแต่ละโลหะผสมที่มีปริมาณของธาตุ Si แตกต่างกัน ซึ่งทดสอบในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH 10.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงได้จากรูปที่ 4.29 พบว่าที่สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH 10.0 มีปริมาณการหลุดออกของธาตุ Co Cr Mo และ Si โดยพบปริมาณการหลุดออกของธาตุ Co มากที่สุด มีปริมาณเฉลี่ย 0.036 mg/L ปริมาณการหลุดออกของธาตุ Cr มีค่าเฉลี่ย 0.033 mg/L ปริมาณการหลุดออกของธาตุ Mo มีค่าเฉลี่ย 0.004 mg/L และปริมาณการหลุดออกของธาตุ Si มีค่าเฉลี่ย 0.080 mg/L โดยการหลุดออกของธาตุ Co Cr และ Mo ลดต่ำลงเมื่อปริมาณของธาตุ Si เพิ่มสูงขึ้น และต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่มีความเป็นกรดและเป็นกลาง ขณะที่ในสารละลายที่มีความเป็นเบสหรือที่ pH 10.0 นี้พบปริมาณการหลุดออกของธาตุ Si ออกมาก ซึ่งคาดการณ์ว่าองค์ประกอบของธาตุ Si ไม่ค่อยเสถียรเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีความเป็นเบส

การเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่หลุดออกหลังการทำการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si Co-28Cr-6Mo-0.5Si Co-28Cr-6Mo-1.0Si และ Co-26Cr-5Mo-1.0Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก pH เท่ากับ 10.0 โดยมีปริมาณของธาตุ Co Cr และ Mo หลุดออกมาซึ่งปริมาณธาตุเหล่านี้หลุดออกมาต่ำที่สุดกว่าในสารละลายที่มีความเป็นกลางและเป็นกรด บ่งบอกได้ว่าในสารละลายที่มีความเป็นเบสนี้จะมีความรุนแรงต่อการกัดกร่อนต่ำที่สุด และจากรูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของค่า pH แตกต่างกับปริมาณของ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่แสดงถึงแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำลงในสารละลาย pH เบสหรือ pH 10.0 เมื่อปริมาณของ Si เพิ่มมากขึ้น และจากรูปที่ ปริมาณของธาตุของ Co Cr และ Mo หลุดออกมาต่ำลง โดยธาตุ Si ที่เพิ่มสูงขึ้นในโลหะผสมส่งผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

ค่า pH มีอิทธิพลต่ออัตราการกัดกร่อนในโลหะผสม Co-Cr-Mo ซึ่งจากรูปที่ 4.27 ถึง 4.29 เปรียบเทียบการหลุดออกของปริมาณธาตุ Co Cr Mo และ Si ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ pH เท่ากับ 4.0 7.2 และ 10.0 พบว่าแนวโน้มของธาตุต่างๆ หลุดออกมาต่ำลงเมื่อสารละลายมีค่า pH สูงขึ้นหรือเป็นเบสมากขึ้น โดยในสารละลายเป็นกรดหรือ pH เท่ากับ 4.0 มีปริมาณของการหลุดออกของธาตุสูงที่สุด ในสารละลายเป็นกลางหรือ pH เท่ากับ 7.2 มีปริมาณการหลุดออกของธาตุรองลงมา โดยปริมาณการหลุดออกของธาตุเหล่านี้บ่งบอกถึงอัตราการกัดกร่อน เมื่อปริมาณธาตุหลุดออกมากส่งผลทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น ขณะที่ปริมาณของธาตุ Si ที่แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo ส่งผลต่อปริมาณการหลุดออกของธาตุด้วยเช่นกัน คือเมื่อปริมาณของ Si เพิ่มสูงขึ้นในโลหะผสม Co-Cr-Mo ในสารละลายทุกค่า pH ส่งผลทำให้ปริมาณการหลุดออกของธาตุลดต่ำลงหรือทำให้อัตราการกัดกร่อนลดต่ำลงด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของธาตุซิลิกอน (Si) ในโลหะผสม Co-Cr-Mo ต่อโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระดับ pH 4.0 7.2 และ 10.0 โดยปริมาณของ Si แตกต่างกันในโลหะผสม Co-Cr-Mo สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุ Si จาก 0.1 จนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม Co-Cr-Mo ทำให้สัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะ σ ลดลง
2. เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุ Si จาก 0.1 จนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในโลหะผสม Co-Cr-Mo การเพิ่มปริมาณของ Si ทำให้ความต้านทานแรงดึงดียิ่งขึ้น
3. เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุ Si จาก 0.1 จนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงหรือความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การลดปริมาณของธาตุ Cr และ Mo ลดต่ำลงในโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น
4. ค่า pH ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำลงหรือมีความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้โลหะผสม Co-Cr-Mo มีอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นมากกว่าสารละลายที่มีค่า pH สูงกว่าหรือมีความเป็นกลางและเป็นเบส

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมในเงื่อนไขที่มีการเติมธาตุซิลิกอน (Si) ตั้งแต่ 1.0 ถึง 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-โมลิบดีนัม (Co-Cr-Mo) ในช่วง pH ที่แคบลงอยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 8.5 (จำลองสภาวะที่ใกล้เคียงกับ pH ของสารละลายในร่างกายมนุษย์) และศึกษาการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์เนื้อเยื่อเพาะเลี้ยง (Cytotoxicity test) เพื่อยืนยันผลการทดลองของธาตุ Si ที่เพิ่มเข้าไปจะสามารถใช้กับร่างกายของมนุษย์และไม่เกิดผลกระทบในด้านลบ ซึ่งทางผู้วิจัยคาดว่าโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมมีค่าสูงกว่าการใช้ปริมาณของซิลิกอนเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. **ประเภทของวัสดุการแพทย์**. [Online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=30&chap=9&page=t30-9-infodetail04.html>
- [2] จินตมัย สุวรรณประทีป. **โลหะทางการแพทย์**. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/95->
- [3] Arcam. **Arcam-ASTM-F75-Cobalt- Chrome**. [Online]. Available : <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-ASTM-F75-Cobalt-Chrome.pdf>
- [4] Amine A. M., Alexey K., Eliane S. and Bernard T. “Effect of Silicon content in steel and oxidation temperature on scale growth and morphology” **Materials Chemistry and Physics**. Volume 143. Feb 2014. Pp 996-1004.
- [5] Mohamed A. H., Abdul S. M. and Naser A. A. “Wear Characteristics of Metallic Biomaterials a Review” **Materials**. Volume 8. 2015. Pp 2749-2768.
- [6] Joon B. P., Roderic S. Lakes. **Biomaterials an Introduction**. Springer Science & Business Media. 2007.
- [7] Hendra H., Dadan R., Joy R. P. D. **Biomedical Engineering**. IntechOpen. 2011.
- [8] Valero-Vidal C., Casabán-Julián L., Herraiz-Cardona I. and Igual-Muñoz A. “Influence of carbides and microstructure of CoCrMo alloys on their metallic dissolution resistance” **Materials Science and Engineering: C**. Volume 33. Dec 2013. Pp 4667-4676.
- [9] Buddy R., Allan H., Frederick S., Jack L. **Biomaterials Science an Introduction to Materials in Medicine**. 3. MA, USA: Waltham, 2012.
- [10] Tanzi and Candiani. “Foundations of Biomaterials Engineering”. 2019.
- [11] Xiaoqing Z., Yunping L., Ning T., Emi O. and Akihiko C. “Corrosion behavior of CoCrMo alloys in 2 wt% sulphuric acid solution” **Electrochimica Acta**. Volume 125. 2014. Pp 543-555.
- [12] Akihiko C., Naoyuki N. and Yoshiki O. “Microstructure and mechanical properties of biomedical Co–29Cr–8Mo alloy wire fabricated by a modified melt-spinning process” **Acta Materialia**. Volume 55. 2007. Pp 2119-2128.
- [13] Keita Y., Suyalatu, Atsushi T., Naoyuki N., Yusuke T., Hisashi D., Shingo K., Akihiko C., Yoshimasa I. and Takao H. “Effects of chromium and nitrogen content on the microstructures and mechanical properties of as-cast Co–Cr–Mo alloys for dental applications” **Acta Biomaterialia**. Volume 8. July 2012. Pp 2856-2862.
- [14] DA C. “Effect of Sigma Phase Precipitated at 850 °C on Corrosion Behaviour of UNS S82441 Duplex Stainless Steel”. **Matéria (Rio J.)**. 2019. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0775>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [15] A.W.E. Hodgson., S. Kurz., S. Virtanen., V. Fervel., C.-O.A. Olsson. and S. Mischler. “Passive and transpassive behaviour of CoCrMo in simulated biological solutions” **Electrochimica Acta** Volume 49. 2004. Pp 2167-2178
- [16] S. Kurz. , A.W.E Hodson., S.Virtanen., V. fervel. and S. Mischle. “Corrosion characterization of passive films on CoCrMo with electrochemical techniques in saline and simulated biological solutions” **European Cells and Materails**. Volume 3. 2002. Pp 26-27.
- [17] George B. “The corrosion of CoCrMo alloys for biomedical applications” **School of Metallurgy and Materials**. Jan 2010. Pp 1-88.
- [18] A. Banu , M. Marcu., C. Juganaru., P. Osiceanu., M. Anastasescu. and L. Capra. “Corrosion behavior of CoCrMoW cast alloy in lactic acid environment for surgical applications” **Arabian Journal of Chemistry**. Volume 12. Dec 2019. Pp 2007-2016.
- [19] Fernando C. G., Cristiano G. and Almir S. “Behavior of a Co-Cr-Mo biomaterial in simulated body fluid solutions studied by electrochemical and surface analysis techniques” **Journal of the Brazilian Chemical Society**. Volumn 15 July-Aug 2004
- [20] Sudip S., Venkat K., Xin Z., Xiaodong H. and Sougata R,. “Investigating the tribological and corrosion behavior of Co–Cr alloy as an implant material for orthodontic applications” **Wear**. Volume 523. 15 June 2023.
- [21] Hui Z., Yujie W. and Tengfei M. “Effect of Silicon Addition on Corrosion Behavior of Carbon Steel Rebar in Sulfuric Acid Environment” **Int. J. Electrochem**. Volume 15. 2020. Pp 3003 – 3012.
- [22] Phacharaphon T., Mettaya K., Kasama S. , Yunping L., Kenta Y. and Akihiko C. “Characterization of oxide films on wrought Co–Cr–Mo–xSi alloys exposed to high-temperature oxidation”. **Corrosion Science**. Volume 191. October 2021.
- [23] Jian W., Shanping L., Lijian R., Dianzhong L. and Yiyi L.. “Effect of silicon on the oxidation resistance of 9 wt.% Cr heat resistance steels in 550 °C lead-bismuth eutectic” **Corrosion Science**. Volume 111. October 2016. Pp 13-25.
- [24] Blesson M. and Cijo M. “Effect of Silicon on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Poston Alloys” **International Journal of Engineering Trends and technology**. Volume 29. November 2015. Pp 299-303.
- [25] Milind G K. and Pradeep D. “Impact of Silicon Content on Mechanical Properties of Aluminum Alloys” **International Journal of Science and Research (IJSR)**. Volume 4. February 2015. Pp 38-40.
- [26] Phacharaphon T. and Akiho C. “Effects of Si concentrations on microstructure and mechanical properties of as-cast Co–Cr–Mo alloys” **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Volume 635.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [27] C.A. Higgerson. 1973. **Experiments in Materials Technology: A Laboratory Text for Engineers in Physical Metallurgy, Manufacturing Process Metallurgy and Materials Testing Experiments in materials technology.** Affiliated East-West Press.
- [28] The University of Utah. **Scanning Electron Microscope.** [Online]. Available: https://my.eng.utah.edu/~lzung/images/Lecture_3_conventional-Microscope.pdf
- [29] Małgorzata K. 2014. **In-operando hard X-ray photoelectron spectroscopy study on the resistive switching physics of HfO₂-based RRAM.** Von der Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.
- [30] Scott A Speakman. **Basics of X-Ray Powder Diffraction.** Materials Science and Engineering at MIT. [Online]. Available : <http://prism.mit.edu/xray/oldsite/Basics%20of%20X-Ray%20Powder%20Diffraction.pdf>
- [31] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. **ปฏิบัติการทดลองที่ 5 การทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียว.** [Online]. Available : <http://www.cmerc.engr.tu.ac.th /document/Lab%205%20Tensile%20test.pdf>
- [32] Pittsburgh Mineral & Environmental Technology. **Tensile Properties.** [Online]. Available : <https://www.pmet-inc.com/tensile-properties/>
- [33] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. **Mechanical Properties of Materials.** [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/metal/1/mechanical%20properties.htm>
- [34] Giovanni Negroni. 2013-1014. “Corrosion and tribocorrosion study of CoCrMo biomedical Alloys.” Master’s degree in department of Chemistry, Materials and Chemical Engineering Giulio Natta.
- [35] Dieter Landolt. **Corrosion and surface chemistry of metals.** New York EPFL press. 2007.
- [36] Maffiotte C., M. Navas., M.L. Castano. and A.M. Lancha. “XPS characterization of oxide films formed in cobalt-based alloys during corrosion tests at high temperature” **Surface and Interface Analysis.** Volume 30. Pp. 161-166
- [37] Yu Y., Anne N., and Duncan Dowson. “Biotribocorrosion of CoCrMo orthopaedic implant materials—Assessing the formation and effect of the biofilm” **Tribology International.** Volume 40. Oct–Decr 2007. Pp 1492-1499.
- [38] Kauser, F. (2007). **Corrosion of CoCrMo alloys for biomedical applications.** Birmingham, UK: University of Birmingham. (2010).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] ASTM international. 2020. **ASTM G59-97(2020) Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.** [Online]. Available :<https://www.astm.org/g0059-97r20.html>
- [40] พรวิสา วงศ์ปัญญา. **Corrosion testing by Potentiostat Analyzer.** วิศวกรรมโลหการ.
- [41] Strec Chula. **Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer – SEM-EDS (6610LV.** [Online]. Available : <https://strec.chula.ac.th/equipments-rates/scanning-electron-microscope-and-energy-dispersive-x-ray-spectrometer-sem-eds-6610lv>
- [42] Shimadzu. **LabX XRD-6100.** [Online]. Available : <https://www.shimadzu.com/an/products/elemental-analysis/x-ray-diffraction/labx-xrd-6100/index.html>
- [43] Japan International Institute of Technology (MIIT), Universiti Teknologi Malaysia. **Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES).** [Online]. Available : <https://mjiit.utm.my/waterlab/inductively-coupled-plasma-optical-emission-spectrometry-icp-oes/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



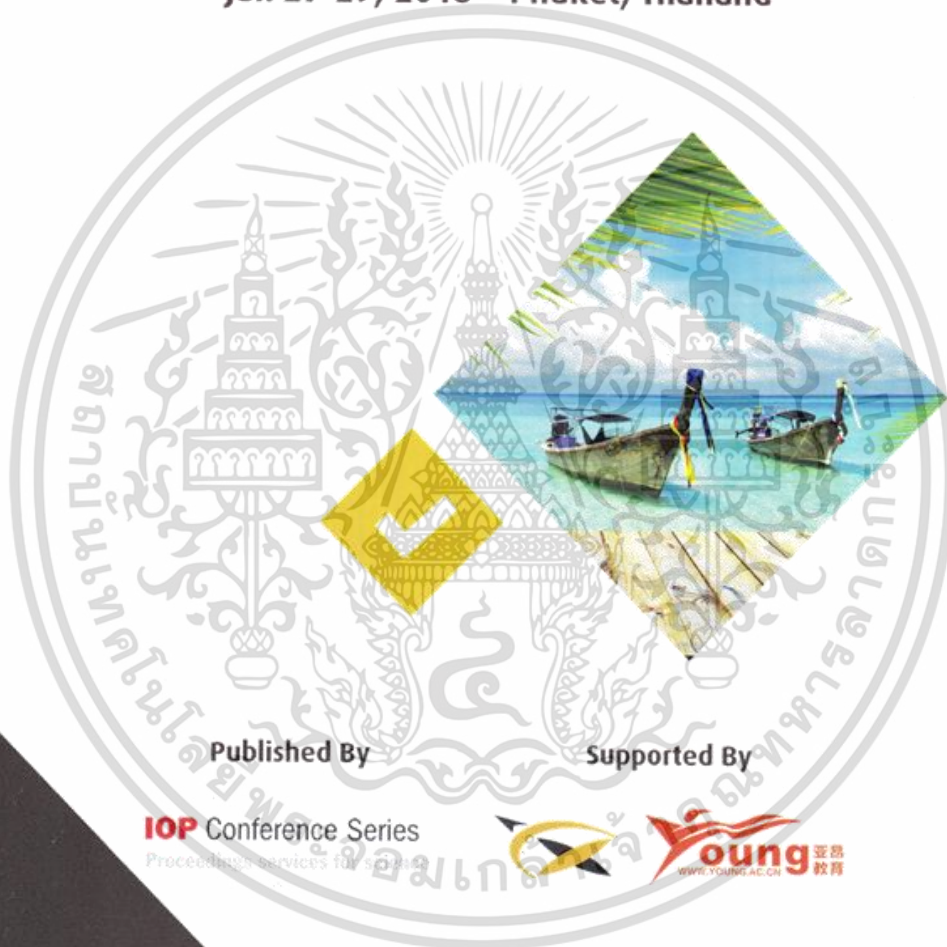
ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Conference Abstract

Jan 27-29, 2018 Phuket, Thailand



Published By

Supported By

IOP Conference Series
 Proceedings services for scientists

Young 亞昂 教育
 WWW.YOUNG.AC.CN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PAPER · OPEN ACCESS

Related content

Effect of Si on Microstructure and Corrosion Behavior of CoCrMo Alloys

To cite this article: Chonlawit Peaubuapuan *et al* 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng* **361** 012004

View the [article online](#) for updates and enhancements.

[Investigation of mechanical properties for open cellular structure CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting process](#)

A Azidin, Z A M Taib, W S W Harun *et al.*

[The Effect of Silicon on Cuprous Oxide](#)

Tomihiro Nemoto and Tomoyasu Nakano

[Influence of solid-solution treatment on microstructure, mechanical property and corrosion behavior of biodegradable Mg-Zn-Ca alloy](#)

Xuan Nam Ly, S Yang and Y Qin



Effect of Si on Microstructure and Corrosion Behavior of CoCrMo Alloys

Chonlawit Peaubuapuan, Phacharaphon Tunthawiroon, Kannachai Kanlayasiri, Chumpol Yuangyai

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

E-mail: chonlawit.fc@gmail.com

Abstract: The aim of this research was to investigate the effect of silicon (Si) on the microstructure and corrosion behavior of CoCrMo alloys. The concentration of Si added in CoCrMo alloys was 0.1, 0.5 and 1 wt %. The corrosion behavior of the present alloys was investigated using potentiodynamic polarization measurements. The normal saline solution with 0.9 wt % was used as an electrolyte. Polarization curves obtained from the polarization test were used to evaluate in terms of corrosion current density (i_{corr}), corrosion potential (E_{corr}) and corrosion parameters that be used to compute corrosion resistant property of CoCrMo alloys. The microstructure of a sample during the polarization test was compared using X-ray diffraction (XRD) and optical microscope (OM). The results indicated that the increase in Si slightly changed the microstructure of CoCrMo alloys and could enhance the resistance to corrosion of CoCrMo alloys in NaCl solution. In addition, the reduction of Cr and Mo concentration in CoCrMo alloys was found to be a significant influence on the decrease in corrosion resistance.

1. Introduction

The CoCrMo alloys are widely used in implants owing to their excellent mechanical properties, good biocompatibility and high corrosion resistance [1-3]. In addition, they are recommended for use in metal-on-metal joint replacement applications because of their high wear resistance and hardness [4,5]. However, CoCrMo alloys which expose to the environment is undergone an oxidation as well as other metallic biomaterials. As well-known, the oxidation is one of the corrosion degradation mode in which the oxide films are formed at the interface of the alloy and environment. In the oxidation process, although, spontaneous passive film forms, the loss of metals are simultaneously taken place. In general, it is accepted that the good corrosion resistance of CoCrMo alloys is attributed to the high concentration of Cr which is play an important role on the formation of an inert Cr_2O_3 film [6]. In contrast, Cr and Mo were reported to be a cause of the formation of intermetallic phase, named σ phase, which decreased the corrosion properties of these alloys [7]. Therefore, the concentration of Cr and Mo should be controlled to obtain the high performance of alloys. Si is widely used as an alloying element to enhance the corrosion resistance of steels and alloys in various conditions. In addition Si adding to CoCrW could retard the precipitation of the brittle σ phase [8]. However, no research related to the effect of Si on corrosion resistance of CoCrMo alloys has been carried out. Thus, in this study, three kinds of CoCrMo alloys with different Si concentrations (0.1, 0.5 and 1.0 wt %) are investigated



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

the corrosion behavior in NaCl solution. For comparison, an alloy with reduced Cr and Mo is also performed the corrosion test in the same condition with the above-mentioned three alloys.

2. Materials and methods

Three kinds of Cobalt-Chromium-Molybdenum (CoCrMo) alloys with 0.1, 0.5 and 1 wt% Si and another alloy which has the lower Cr and Mo concentration were chosen for this study. Table 1 shows the chemical compositions of studied alloys. The all investigated alloys were cast using vacuum melting. In order to obtain the homogeneous structure, as-cast alloys were solution treated at 1250 °C for 24 hours followed by the thermo-mechanical process by hot forging at 1200 °C. Subsequently, alloys were rapidly quenched to room temperature in water. The disk samples were cut using wire electrical discharge machining (wire-EDM). The surface of sample was ground by silicon emery paper, polished with 1 and 0.3 μm alumina powder (AP-A suspension, Struers). Mirror-like surface was cleaned in alcohol ultrasonic cleaner for 10 minutes. Prior to corrosion tests, the phases identification of alloys used X-ray diffraction (XRD) analysis (Shimadzu labx xrd-6100) equipped with X-ray diffractometer (Cu K α radiation source). The microstructure of the alloy was characterized by optical microscope (OM; ZEISS Axio lab).

Table 1. The chemical compositions of investigated CoCrMo alloys

Alloy composition (wt %)	Co	Cr	Mo	Si	Mn	C	N
Co-28Cr-6Mo-0.1Si	Bal.	27.5	6.1	0.156	0.614	0.056	0.135
Co-28Cr-6Mo-0.5Si	Bal.	28.1	6.15	0.466	0.521	0.054	0.148
Co-28Cr-6Mo-1.0Si	Bal.	28.2	6.17	0.966	0.593	0.054	0.128
Co-26Cr-5Mo-1.0Si	Bal.	26.5	5.5	1.0	0.75	0.065	0.100

The potentiodynamic polarization measurement was performed in three electrode systems including the working electrode (sample), Pt counter electrode and activated carbon reference electrode. The applied potentials ranging from -0.8 V to 0.4 V (SCE) were generated using a Potentiostat/Galvanostat PGSTAT 302N (Autolab, EcoChemie, Netherlands). The polarization experiments were performed with a scan rate of 1 mV/s in 0.9 wt % NaCl solution. The polarization test of each alloy was repeated at least three times to confirm the repeatability of experimental results. The corrosion rate was calculated using the parameters obtained by Nova 1.11 software (Electrochemistry software; Metrohm Autolab).

3. Results and Discussion

3.1. Phase identification and microstructure

The phase diagram of Co-29Cr-6Mo-(0.2wt%)Si was predicted by the Thermo-Calc V5.0 as shown in Fig. 1(a). Two types of crystal structures: face-centered cubic (γ -phase) and hexagonal close-packed (ϵ -phase) were displayed depend on the temperature. In addition, two intermetallic phases were shown in the calculated phase diagram; σ and μ . The results of the XRD analysis in Fig. 1(b), revealed that the microstructure of alloys was dominantly composed of a nearly single γ -phase. No peak related to the intermetallic phase was observed. This attributes to the homogenized temperature and cooling process which are favorable for the presence of a single γ -phase. In previous study, Li et al. has demonstrated that the dominant presence of the γ -phase provided a higher resistance to corrosion than that of ϵ -phase [9].

Figure 2 shows the initial microstructure of the investigated CoCrMo alloys, observed using the optical microscope. Equiaxed grains along with the small fraction of twin boundaries which is typical microstructure after deformation processes were observed for all alloys. Moreover, finer grains were observed when the concentration of Si in the CoCrMo alloys was increased. The finest grain size was obtained in the Co-26Cr-5Mo-1.0Si alloys. Some defects in the form

of microspores which possibly remained from the casting process were detected in all alloys. The corrosion behavior of CoCrMo alloys with different grain size has been reported by Li et al [9] in that increasing of the quantity of 2 grain boundaries would accelerated the anodic reaction resulting in the earlier occurrence of corrosion processes. To gain more details on the effects of different grain sizes causing by the Si addition, the corrosion behavior was performed and discussed in a next paragraph.

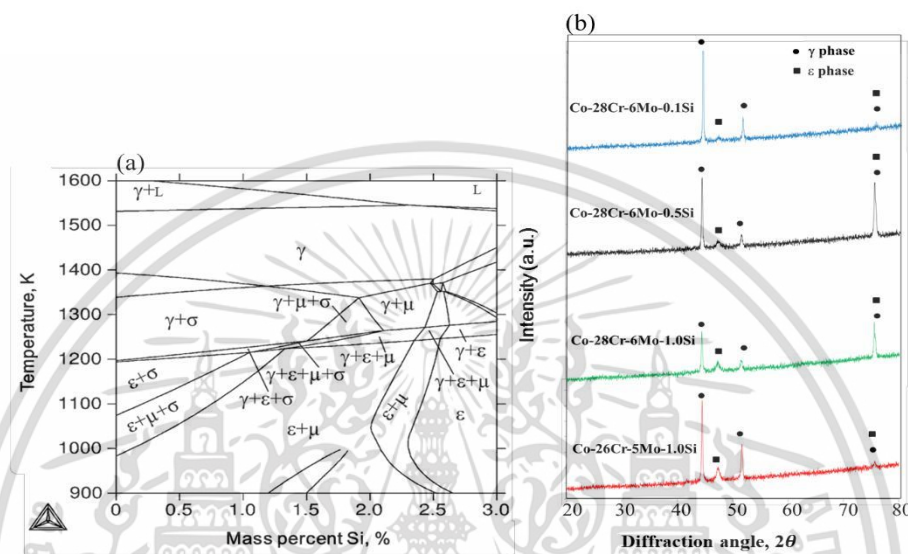


Figure 1. (a) Phase diagram of Co-29Cr-6Mo-xSi predicted by Thermo-Calc V5.0 and (b) XRD pattern of Co-Cr-Mo alloys with different Si contents.

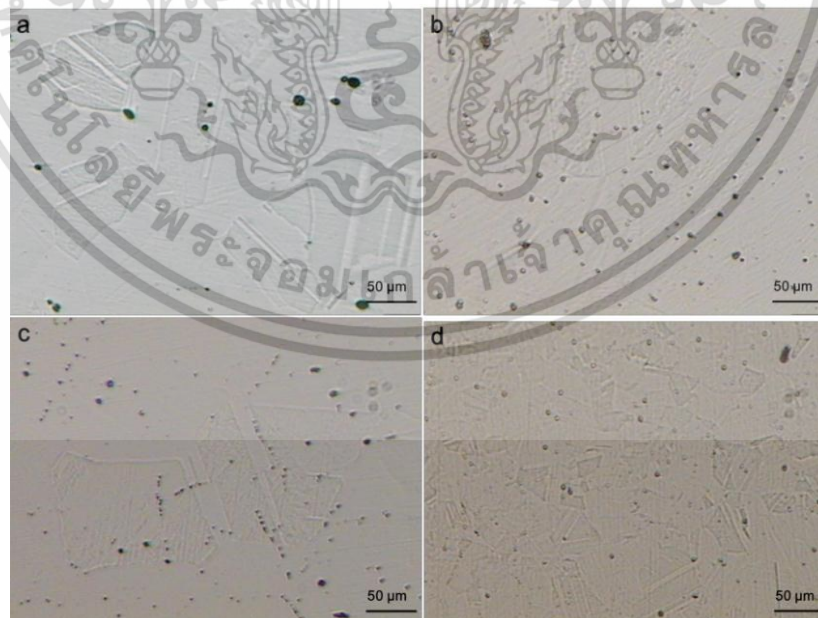


Figure 2. Optical micrograph of the investigated CoCrMo alloys: (a) Co-28Cr-6Mo-0.1Si, (b) Co-28Cr-6Mo-0.5Si, (c) Co-28Cr-6Mo-1.0Si and (d) Co-26Cr-5Mo-1.0Si.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.2. Polarization testing

Figure 3 shows the polarization curves of Co-28Cr-6Mo-0.1Si, Co-28Cr-6Mo-0.5Si, Co-28Cr-6Mo-1.0Si and Co-26Cr-5Mo-1.0Si alloys in 0.9 wt % NaCl solution at room temperature. The shape of the curves 3

exhibited a similar characteristic. The transition from cathodic to anodic regions of four alloys, generally referring to the open circuit potential (E_{ocp}), is located around the applied potentials ranging from -0.4 to -0.35 V (SCE). Among three alloys which have a similar Cr and Mo concentration, the

E_{ocp} of Co-28Cr-6Mo-1.0Si alloys was higher than that of Co-28Cr-6Mo-0.1Si and Co-28Cr-6Mo-0.5Si.

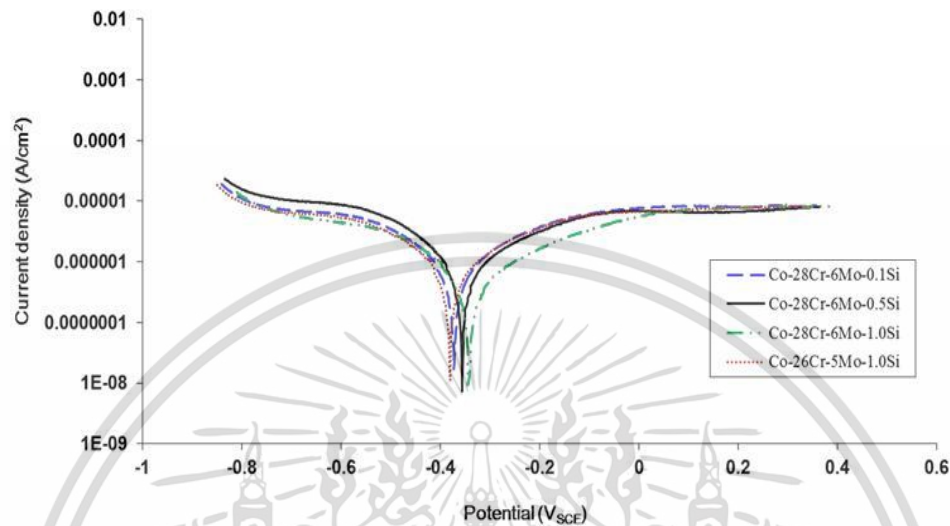


Figure 3. The polarization curves of CoCrMo with different Si alloys in 9 wt % NaCl solution.

This result indicates that the concentration of Si directly contributes to the enhancement of corrosion resistance although the higher concentration of Si reduce grain size of CoCrMo alloys. For the alloy with lower Cr and Mo concentration, the E_{ocp} was observed to be the most negative value, as seen in the polarization curve of Co-26Cr-5Mo-1.0Si in Fig. 3. This implies that reduced Cr and Mo leads to the decrease of corrosion resistance of alloys. This finding provides the interesting evidence on the influence of alloying elements on the corrosion resistance of CoCrMo alloys. Not only Cr/Mo but also Si plays a key factor in determining the corrosion behavior of investigated alloy series.

It has been reported that the high corrosion resistance of CoCrMo alloys is due to the formation of protective passive Cr_2O_3 -rich film although Co is a primary constitutional element [10]. Mo also significantly enhances the localized corrosion resistance [11]. In addition, Si promoted the formation of a compact and single Cr_2O_3 passive film [12]. Thus, the alloys with higher Si concentration would have a higher ability to resist the corrosion from surrounding environment.

Table 2. Corrosion parameter of CoCrMo with different Si alloys in 9 wt % NaCl solution.

Alloy	Parameter				
	b_a (mV/dec)	b_c (mV/dec)	E_{corr} (mV vs SCE)	i_{corr} (A/cm^2)	Corrosion rate (mm/year)
Co-28Cr-6Mo-0.1Si	0.5552	0.2551	-385.17	1.68	0.0195
Co-28Cr-6Mo-0.5Si	0.2060	0.2833	-332.47	0.65	0.0075
Co-28Cr-6Mo-1.0Si	0.2840	0.2626	-353.90	0.82	0.0095
Co-26Cr-5Mo-1.0Si	0.6544	0.3504	-386.05	1.51	0.0175

The parameters from the polarization curve are summarized in the Table 2. The corrosion rate in the unit of mm per year was calculated. It is clear that the corrosion rate is reduced from 0.0195 to 0.0095 mm/year for Co-28Cr-6Mo-0.1Si and Co-28Cr-6Mo-1.0Si, respectively while the reduced Cr and Mo alloys exhibit the highest corrosion rate. This observation is consistent with the previous observation on the corrosion property of CoCrMo alloys at high temperature application [13]. The presence of Si could slow down the reaction and dissolution of passive film in severe environment due to a positive effect from the oxide film formation. The further research about the surface

characterization of these alloys is required to clarify with regarding to the significant effect of such a chemical composition of passive film.

4. Conclusions

The effect of Si on the microstructure and corrosion behavior of CoCrMo alloys was investigated. The finer microstructure of alloys was obtained by increasing of Si concentration. The corrosion behavior of CoCrMo alloys in 0.9 wt % NaCl solution exhibited a similar cathodic and anodic characteristic. The presence of Si in CoCrMo alloys could slightly enhance the corrosion resistance properties. The transition from cathodic to anodic region of low Si alloys took place much faster than that of high Si alloys. The amount of Cr and Mo also played a key role on the determination of corrosion behavior. Considering future direction of this work, corrosion behavior of these alloys should be characterized at near the human body temperature which might increase the rate of corrosion and oxidation. Furthermore, with further optimization of compositions that might provide the higher performance of corrosion resistance, Co-based alloys would become a potential materials for biomedical applications.

References

- 1 Chiba A, Kumagai K, Nomura N and Miyakawa S 2007 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.* 55 1309-18
- 1 Giacchi J and Morando C 2010 Microstructural characterization of as-cast biocompatible Co-Cr-Mo alloys *Mater. Charact.* 62 53-61
- 1 Bettini E, Eriksson T, Boström M, Leygraf C and Pan J 2011 Influence of metal carbides on dissolution behavior of biomedical CoCrMo alloy: SEM, TEM and AFM studies *Electrochim. Acta* 56 9413-9
- 1 Chen Y, Li Y, Kurosu S, Yamanaka K, Tang N and Chiba A 2014 Effects of microstructures on the sliding behavior of hot-pressed CoCrMo alloys *Wear* 319 200-10
- 1 Chen Y, Li Y, Kurosu S, Yamanaka K, Tang N, Koizumi Y and Chiba A 2014 Effects of sigma phase and carbide on the wear behavior of CoCrMo alloys in Hanks' solution *Wear* 310 51-62
- 1 Zimmermann J and Colombi Ciacchi L 2010 Origin of the selective Cr oxidation in CoCr alloy surfaces *J. Phys. Chem. Lett.* 1 2343-8
- 1 Kurosu S, Nomura N and Chiba A 2007 Effect of Sigma Phase in Co-29Cr-6Mo Alloy on Corrosion and Mechanical Properties *Adv. Mater. Res.* 26-28 777-80
- 1 Yamanaka K, Mori M, Kuramoto K and Chiba A 2014 Development of new Co-Cr-W-based biomedical alloys: Effects of microalloying and thermomechanical processing on microstructures and mechanical properties *Mater. Des.* 55 987-98
- 1 Zhang X, Li Y, Tang N, Onodera E and Chiba A 2014 Corrosion behaviour of CoCrMo alloys in 2 wt% sulphuric acid solution *Electrochim. Acta* 125 543-55
- 1 Hodgson A W E, Kurz S, Virtanen S, Fervel V, Olsson C O A and Mischler S 2004 Passive and transpassive behaviour of CoCrMo in simulated biological solutions *Electrochim. Acta* 49 2167-78
- 1 Yang B, Li J, Gong X, Nie Y and Li Y 2017 Effects of Cu addition on the corrosion behavior of NiCoCrMo alloys in neutral chloride solution *RSC Adv.* 7 40779-90
- 1 Zhang X, Hu J, Ye L, Deng Y, Tang C, Yang L and Liu Z 2013 Effects of Si addition on microstructure and mechanical properties of Mg-8Gd-4Y-Nd-Zr alloy *Mater. Des.* 43 74-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1 Tunthawiroon P, Li Y and Chiba A 2015 Influences of alloyed Si on the corrosion resistance of Co (Tunthawiroon P)-Cr-Mo alloy to molten Al by iso-thermal oxidation in air *Corros. Sci.* 100

Acknowledgements

The author would like to thank Suppawat Chuvaree of Rajamangala University of Technology Krungthep for assistance in sample preparation.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ThermoFisher
SCIENTIFIC

SAFETY DATA SHEET

Creation Date 22-Jun-2009

Revision Date 28-May-2019

Revision Number 9

SECTION 1: IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/MIXTURE AND OF THE COMPANY/UNDERTAKING

1.1. Product identification

Product Description:	Sodium chloride
Cat No. :	S/3160/PC71, S/3160/70G, S/3160/53, S/3160/60, S/3160/63, S/3160/65, S/3160/68, S/3160/70
Synonyms	Halite; Common salt; Rock salt
CAS-No	7647-14-5
EC-No.	231-698-3
Molecular Formula	Cl Na

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Recommended Use	Laboratory chemicals.
Uses advised against	No Information available

1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

Company	UK entity/business name Fisher Scientific UK Bishop Meadow Road, Loughborough, Leicestershire LE11 5RG, United Kingdom
	EU entity/business name Acros Organics BVBA Janssen Pharmaceuticaan 3a 2440 Geel, Belgium

E-mail address	begel.sdsdesk@thermofisher.com
----------------	--------------------------------

1.4. Emergency telephone number

Tel: 01509 231166
Chemtrec US: (800) 424-9300
Chemtrec EU: 001 (202) 483-7816

SECTION 2: HAZARDS IDENTIFICATION

2.1. Classification of the substance or mixture

CLP Classification - Regulation (EC) No 1272/2008

Not hazardous
Physical hazards

Based on available data, the classification criteria are not met

Health hazards

Based on available data, the classification criteria are not met

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

Environmental hazards

Based on available data, the classification criteria are not met

2.2. Label elements

Hazard Statements

Precautionary Statements

2.3. Other hazards

No information available

SECTION 3: COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

3.1. Substances

Component	CAS-No.	EC-No.	Weight %	CLP Classification - Regulation (EC) No
Sodium chloride	7647-14-5	231-598-3	>95	1272/2008

Full text of Hazard Statements: see section 16

SECTION 4: FIRST AID MEASURES

4.1. Description of first aid measures

Eye Contact	Rinse immediately with plenty of water, also under the eyelids, for at least 15 minutes. Get medical attention.
Skin Contact	Wash off immediately with plenty of water for at least 15 minutes. Get medical attention immediately if symptoms occur.
Ingestion	Get medical attention if symptoms occur. Clean mouth with water and drink afterwards plenty of water.
Inhalation	Move to fresh air. Get medical attention immediately if symptoms occur.
Self-Protection of the First Aider	No special precautions required.

4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed

None reasonably foreseeable.

4.3. Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

FSUS3160

Page 2 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

Notes to Physician

Treat symptomatically.

SECTION 5: FIREFIGHTING MEASURES

5.1. Extinguishing media

Suitable Extinguishing Media

Use extinguishing measures that are appropriate to local circumstances and the surrounding environment. Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

Extinguishing media which must not be used for safety reasons

No information available.

5.2. Special hazards arising from the substance or mixture

Thermal decomposition can lead to release of irritating gases and vapors. Keep product and empty container away from heat and sources of ignition.

Hazardous Combustion Products

Hydrogen chloride gas, Sodium oxides.

5.3. Advice for firefighters

As in any fire, wear self-contained breathing apparatus pressure-demand, MSHA/NIOSH (approved or equivalent) and full protective gear.

SECTION 6: ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Ensure adequate ventilation. Use personal protective equipment. Avoid dust formation.

6.2. Environmental precautions

Should not be released into the environment.

6.3. Methods and material for containment and cleaning up

Sweep up or vacuum up spillage and collect in suitable container for disposal. Avoid dust formation.

6.4. Reference to other sections

Refer to protective measures listed in Sections 8 and 13.

SECTION 7: HANDLING AND STORAGE

7.1. Precautions for safe handling

Wear personal protective equipment. Ensure adequate ventilation. Avoid contact with skin, eyes and clothing. Avoid ingestion and inhalation. Avoid dust formation.

Hygiene Measures

Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Keep away from food, drink and animal feeding stuffs. Do not eat, drink or smoke when using this product. Remove and wash contaminated clothing before re-use. Wash hands before breaks and at the end of workday.

FSUS3160

Page 3 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Keep containers tightly closed in a dry, cool and well-ventilated place. Store under an inert atmosphere. Protect from moisture.

7.3. Specific end use(s)

Use in laboratories

SECTION 8: EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

8.1. Control parameters

Exposure limits

List source(s):

Biological limit values

This product, as supplied, does not contain any hazardous materials with biological limits established by the region specific regulatory bodies

Monitoring methods

BS EN 14042:2003 Title Identifier: Workplace atmospheres. Guide for the application and use of procedures for the assessment of exposure to chemical and biological agents.

MDHS14/3 General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable and inhalable dust

Derived No Effect Level (DNEL) No information available

Route of exposure	Acute effects (local)	Acute effects (systemic)	Chronic effects (local)	Chronic effects (systemic)
Oral Dermal Inhalation				

Predicted No Effect Concentration (PNEC) No information available.

8.2. Exposure controls

Engineering Measures

Ensure adequate ventilation, especially in confined areas. Ensure that eyewash stations and safety showers are close to the workstation location.

Personal protective equipment

Eye Protection Safety glasses with side-shields (European standard - EN 166)

Hand Protection Protective gloves

Glove material	Breakthrough time	Glove thickness	EU standard	Glove comments
Natural rubber	See manufacturers recommendations	-	EN 374	(minimum requirement)
Nitrile rubber				
Neoprene				
PVC				

Skin and body protection Wear appropriate protective gloves and clothing to prevent skin exposure

Inspect gloves before use.

FSUS3160

Page 4 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

Please observe the instructions regarding permeability and breakthrough time which are provided by the supplier of the gloves.
(Refer to manufacturer/supplier for information)

Ensure gloves are suitable for the task: Chemical compatibility, Dexterity, Operational conditions, User susceptibility, e.g. sensitisation effects, also take into consideration the specific local conditions under which the product is used, such as the danger of cuts, abrasion.

Remove gloves with care avoiding skin contamination.

Respiratory Protection	When workers are facing concentrations above the exposure limit they must use appropriate certified respirators.
Large scale/emergency use	Use a NIOSH/MSHA or European Standard EN 136 approved respirator if exposure limits are exceeded or if irritation or other symptoms are experienced Recommended Filter type: Particle filter
Small scale/Laboratory use	Maintain adequate ventilation
Environmental exposure controls	No information available.

SECTION 9: PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

9.1. Information on basic physical and chemical properties

Appearance	White	
Physical State	Solid	
Odor	Odorless	
Odor Threshold	No data available	
pH	5.0-8.0 @ 20°C;	5% aq. sol
Melting Point/Range	801 °C / 1473.8 °F	
Softening Point	No data available	
Boiling Point/Range	1461 °C / 2661.8 °F	@ 760 mmHg
Flash Point	No information available	Method - No information available
Evaporation Rate	Not applicable	Solid
Flammability (solid,gas)	No information available	
Explosion Limits	No data available	
Vapor Pressure	1 mmHg @ 865 °C	
Vapor Density	Not applicable	Solid
Specific Gravity / Density		
Bulk Density	No data available	
Water Solubility	360 g/L (20°C)	
Solubility in other solvents	No information available	
Partition Coefficient (n-octanol/water)		
Autoignition Temperature		
Decomposition Temperature	No data available	
Viscosity	Not applicable	Solid
Explosive Properties	No information available	
Oxidizing Properties	No information available	

9.2. Other information

Molecular Formula	Cl Na
Molecular Weight	58.44

SECTION 10: STABILITY AND REACTIVITY

FSUS3160

Page 5 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

10.1. Reactivity

None known, based on information available

10.2. Chemical stability

Hygroscopic.

10.3. Possibility of hazardous reactions

Hazardous Polymerization

Hazardous polymerization does not occur.

Hazardous Reactions

None under normal processing.

10.4. Conditions to avoid

Incompatible products. Excess heat. Avoid dust formation. Exposure to moist air or water.

10.5. Incompatible materials

Strong oxidizing agents, Metals, Strong acids.

10.6. Hazardous decomposition products

Hydrogen chloride gas, Sodium oxides.

SECTION 11: TOXICOLOGICAL INFORMATION

11.1. Information on toxicological effects

Product Information

See actual entry in RTECS for complete information.

(a) acute toxicity;

Oral

Based on available data, the classification criteria are not met

Dermal

Based on available data, the classification criteria are not met

Inhalation

Based on available data, the classification criteria are not met

Component	LD50 Oral	LD50 Dermal	LC50 Inhalation
Sodium chloride	LD50 = 3 g/kg (Rat)	LD50 > 10 g/kg (Rabbit)	LC50 > 42 g/m ³ (Rat) 1 h

(b) skin corrosion/irritation;

No data available

(c) serious eye damage/irritation;

No data available

(d) respiratory or skin sensitization;

Respiratory

No data available

Skin

No data available

(e) germ cell mutagenicity;

No data available

Not mutagenic in AMES Test

(f) carcinogenicity;

No data available

There are no known carcinogenic chemicals in this product

(g) reproductive toxicity;

No data available

(h) STOT-single exposure;

No data available

FSUS3160

Page 6 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

(i) STOT-repeated exposure; No data available

Target Organs None known.

(j) aspiration hazard; Not applicable
Solid

Symptoms / effects, both acute and delayed No information available

SECTION 12: ECOLOGICAL INFORMATION

12.1. Toxicity

Ecotoxicity effects

Do not empty into drains.

Component	Freshwater Fish	Water Flea	Freshwater Algae	Microtox
Sodium chloride	Pimephals prome: LC50: 7650 mg/L/96h	EC50: 1000 mg/L/48h		

12.2. Persistence and degradability

Persistence

Soluble in water, Persistence is unlikely, based on information available.

Degradability

Not relevant for inorganic substances.

12.3. Bioaccumulative potential

Bioaccumulation is unlikely

12.4. Mobility in soil

The product is water soluble, and may spread in water systems. Will likely be mobile in the environment due to its water solubility. Highly mobile in soils

12.5. Results of PBT and vPvB assessment

No data available for assessment.

12.6. Other adverse effects

Endocrine Disruptor Information

This product does not contain any known or suspected endocrine disruptors

Persistent Organic Pollutant

This product does not contain any known or suspected substance

Ozone Depletion Potential

This product does not contain any known or suspected substance

SECTION 13: DISPOSAL CONSIDERATIONS

13.1. Waste treatment methods

Waste from Residues / Unused Products

Chemical waste generators must determine whether a discarded chemical is classified as a hazardous waste. Consult local, regional, and national hazardous waste regulations to ensure complete and accurate classification.

Contaminated Packaging

Empty remaining contents. Dispose of in accordance with local regulations. Do not re-use empty containers.

European Waste Catalogue (EWC)

According to the European Waste Catalogue, Waste Codes are not product specific, but application specific.

Other Information

Waste codes should be assigned by the user based on the application for which the product was used.

SECTION 14: TRANSPORT INFORMATION

FSUS3160

Page 7 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

IMDG/IMO Not regulated

14.1. UN number
14.2. UN proper shipping name
14.3. Transport hazard class(es)
14.4. Packing group

ADR Not regulated

14.1. UN number
14.2. UN proper shipping name
14.3. Transport hazard class(es)
14.4. Packing group

IATA Not regulated

14.1. UN number
14.2. UN proper shipping name
14.3. Transport hazard class(es)
14.4. Packing group

14.5. Environmental hazards No hazards identified
14.6. Special precautions for user No special precautions required
14.7. Transport in bulk according to Annex II of MARPOL 73/78 and the IBC Code Not applicable, packaged goods

SECTION 15: REGULATORY INFORMATION

15.1. Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixtureInternational Inventories

X = listed, Europe (EINECS/ELINCS/NLP), U.S.A. (TSCA), Canada (DSL/NDSL), Philippines (PICCS), China (IECSC), Japan (ENCS), Australia (AICS), Korea (ECL).

Component	EINECS	ELINCS	NLP	TSCA	DSL	NDSL	PICCS	ENCS	IECSC	AICS	KECL
Sodium chloride	231-598-3	-		X	X		X	X	X	X	KE-3138 7

National Regulations

Component	Germany - Water Classification (VWWWS)	Germany - TA-Luft Class
Sodium chloride	WGK1	

Component	France - INRS (Tables of occupational diseases) Tableaux des maladies professionnelles (TMP) - RG 78
Sodium chloride	

Take note of Control of Substances Hazardous to Health Regulations (COSHH) 2002 and 2005 Amendment.

15.2. Chemical safety assessment

A Chemical Safety Assessment/Report (CSA/CSR) has not been conducted

FSUS3160

Page 8 / 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFETY DATA SHEET

Sodium chloride

Revision Date 28-May-2019

SECTION 16: OTHER INFORMATION

Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3

Legend

CAS - Chemical Abstracts Service

EINECS/ELINCS - European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances/EU List of Notified Chemical Substances
 PICCS - Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances
 IECSC - Chinese Inventory of Existing Chemical Substances
 KECL - Korean Existing and Evaluated Chemical Substances

TSCA - United States Toxic Substances Control Act Section 8(b) Inventory

DSL/NDSL - Canadian Domestic Substances List/Non-Domestic Substances List
 ENCS - Japanese Existing and New Chemical Substances
 AICS - Australian Inventory of Chemical Substances
 NZIoC - New Zealand Inventory of Chemicals

WEL - Workplace Exposure Limit

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists
 DNEL - Derived No Effect Level
 RPE - Respiratory Protective Equipment
 LC50 - Lethal Concentration 50%
 NOEC - No Observed Effect Concentration
 PBT - Persistent, Bioaccumulative, Toxic

TWA - Time Weighted Average

IARC - International Agency for Research on Cancer
 PNEC - Predicted No Effect Concentration
 LD50 - Lethal Dose 50%
 EC50 - Effective Concentration 50%
 POW - Partition coefficient Octanol:Water
 vPyB - very Persistent, very Bioaccumulative

ADR - European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road

IMO/MDG - International Maritime Organization/International Maritime Dangerous Goods Code
 OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development
 BCF - Bioconcentration factor

ICAO/IATA - International Civil Aviation Organization/International Air Transport Association

MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
 ATE - Acute Toxicity Estimate
 VOC - Volatile Organic Compounds

Key literature references and sources for data

Suppliers safety data sheet, Chemadvisor - LOLI, Merck index, RTECS

Training Advice

Chemical hazard awareness training, incorporating labelling, Safety Data Sheets (SDS), Personal Protective Equipment (PPE) and hygiene.

Creation Date

22-Jun-2009

Revision Date

28-May-2019

Revision Summary

Update to Format.

This safety data sheet complies with the requirements of Regulation (EC) No. 1907/2006

Disclaimer

The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as a guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process, unless specified in the text

End of Safety Data Sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl)

SAFETY DATA SHEET

According to Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)
Revision Date Jul 01, 2018

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking**1.1 Product Identifier**

Product name HYDROCHLORIC ACID 37%
CAS-No. 7647-01-0
Product code AR1107, BP1107, EP1107, GP1107, RP1107, SL1107, SM1107, VL1107

1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses Chemical for analysis and production.

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Company RCI LABSCAN LIMITED.
24 Rama 1 Road, Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand
Telephone number (662) 613-7911-4
Fax number (662) 613-7915

1.4 Emergency Telephone Number

Emergency phone (662) 613-7911-4

SECTION 2: Hazards identification**2.1 Classification of the substance or mixture**

Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008
Corrosive to metals (Category 1), H290
Skin corrosion (Category 1B), H314
Specific target organ toxicity - single exposure (Category 3), Respiratory system, H335
For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

2.2 Label elements

Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008

Pictogram



Signal word

Danger

Hazard statement(s)

H290 May be corrosive to metals.
H314 Causes severe skin burns and eye damage.
H335 May cause respiratory irritation.

Precautionary statement(s)

P234 Keep only in original packaging.
P260 Do not breathe dusts or mists.
P264 Wash hand thoroughly after handling.
P271 Use only outdoor or in a well-ventilated area.
P280 Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.
P301 + P330 + P331 IF SWALLOWED: Rinse mouth. Do NOT induce vomiting.
P303 + P361 + P353 IF ON SKIN (or hair): Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water [or shower].
P304 + P340 IF INHALED: Remove person to fresh air and keep comfortable for breathing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hydrochloric acid 37%

P305 + P351 + P338	IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
P310	Immediately call a POISON CENTER/doctor.
P312	Call a POISON CENTER/doctor if you feel unwell.
P363	Wash contaminated clothing before reuse.
P390	Absorb spillage to prevent material-damage.
P403 + P233	Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed.
P405	Store locked up.
P406	Store in corrosion resistant/ container with a resistant inner liner.

2.3 Other hazards None

SECTION 3: Composition/Information on Ingredients3.1 Substances
Not applicable

3.2 Mixture

Hydrochloric acid

Synonyms

Chlorohydric acid, Hydrogen chloride, Muriatic acid, Spirits of salt.

CAS-No	EC-No	EC-Index-No	Formula	Molecular Weight	Weight %
7647-01-0	231-595-7	017-002-01-X	HCl	36.46 g/mol	37

Hazardous Ingredients according to Regulation (EC) No 1272/2008

Component	Concentration	Classification
Hydrochloric acid		
CAS-No 7647-01-0	37%	Corrosive to metals (Category 1), H290
EC-No 231-595-7		Skin corrosion (Category 1B), H314
EC-Index-No 017-002-01-X		Specific target organ toxicity - single exposure (Category 3), Respiratory system, H335

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

SECTION 4: First aid measures

4.1 Description of first aid measures

General advice	Show this safety data sheet to the doctor in attendance.
Inhalation	Move to fresh air in case of accidental inhalation of vapors. Keep patient warm. In case of shortness of breath, give oxygen. Apply artificial respiration only if patient is not breathing or under medical supervision. No artificial aspiration mouth to mouth or mouth to nose. Use suitable instruments/apparatus.
Skin contact	Remove contaminated clothing and wash affected skin with soap and water. Dab with polyethylene glycol 400. If signs of poisoning appear, treat as for inhalation. Obtain medical attention. Wash contaminated clothing before reuse.
Eye contact	If the substance has got into the eyes, immediately wash out with plenty of water at least 15 minutes. Obtain medical attention.
Ingestion	Rinse mouth. Do not induce vomiting. Keep patient warm. In case of shortness of breath, give oxygen. Apply artificial respiration only if patient is not breathing or under medical supervision. No artificial aspiration mouth to mouth or mouth to nose. Use suitable instruments/apparatus. Obtain medical attention. Never give anything by mouth to an unconscious person.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in section 2.2 and section 11

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

After swallowing: make victim drink water (two glasses at the most), avoid vomiting (risk of perforation). Immediately call in physician. Do not attempt to neutralize.

SECTION 5: Firefighting measures**5.1 Extinguishing media**

Suitable extinguishing media

In adaption to materials stored in the immediate neighborhood.

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Non-combustible. Hydrogen may form upon contact with metals (danger of explosion). Ambient fire may liberate hazardous vapors. The following may develop in event of fire: Hydrochloric acid.

5.3 Advice for firefighters

Do not stay in dangerous zone without self-contained breathing apparatus. In order to avoid contact with skin, keep a safety distance and wear suitable protective clothing.

5.4 Further information

Contain escaping vapors with water. Prevent fire-fighting water from entering surface water or ground water.

SECTION 6: Accidental release measures**6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

Evacuate personnel to safe areas. Do not breathe vapors or spray mist. Wear a positive-pressure supplied-air respirator, flame retardant antistatic protective clothing. Shut off leaks if without risk. Keep people away from and upwind of spill/leak.

6.2 Environmental precautions

Contain or absorb leaking liquid with sand or earth, consult an expert. Prevent liquid entering sewers, basements and workpits. If substance has entered a water course or sewer or contaminated soil, advise police.

6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

Spillage : soak up with inert absorbent material (e.g. sand, silica gel). Prevent liquid entering sewers, basements and workpits. Transfer to covered drums. Dispose of promptly.

6.4 Reference to other sections

For disposal see Section 13.

SECTION 7: Handling and storage**7.1 Precautions for safe handling**

Provision of good ventilation in the working area. The floor must be acid resistant. Suitable materials: Glass, Stoneware, porcelain, Polyvinyl chloride, Polyethylene (PE), Polypropylene, Polytetrafluoroethylene PTFE (Teflon). Do not leave container open. Avoid spillage.

7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Keep tightly closed at room temperature in a dry, cool and well-ventilated place. Keep out of direct sunlight and away from heat, water and incompatible materials. Requirements for containers, no metal containers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 Specific end use(s)

Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated.

SECTION 8: Exposure controls/personal protection**8.1 Control parameters****8.1 Control parameters****Derived No Effect Level (DNEL)**

Application Area	Health Effects	Exposure	Value
Worker	Long-term Local effects	Inhalation	8 mg/m ³
Consumer	Long-term Local effects	Inhalation	8 mg/m ³

Predicted No Effect Concentration (PNEC)

Not Available

8.2 Exposure controls**Appropriate engineering controls**

The product should only be used in ventilation hoods and fans.

Individual protection measures (Personal protective equipment, PPE)**Eye/face protection**

Goggles giving complete protection to eyes.

Skin protection

Chemical resistant apron / corrosive protective clothing, heavy duty work shoes.

Handle with gloves

- Full contact wears gloves from nitrile rubber material.
- Splash contact wears gloves from natural latex material.

The select protective gloves have to satisfy the specifications of EU Directive 89/686 EEC and standard EN 374 derived from it.

Respiratory protection

In case of insufficient ventilation, wear suitable respiratory equipment. Required when vapor/aerosols are generated filter E-(P2) (EN 141 or EN 14387).

Environmental exposure controls

Prevent liquid entering sewers, basements and workpits.

SECTION 9: Physical and chemical properties**9.1 Information on basic physical and chemical properties**

Appearance: From	Liquid
Color	Colorless
Odour	Pungent
Odour Threshold	Not Available
pH	<1 at 20°C
Melting point/range	-30°C
Boiling point/range	51°C
Flash point	Not Available
Evaporation rate	Not Available
Flammability (solid, gas)	Not Available
Explosion limits: lower	Not Available
upper	Not Available
Vapor Pressure	190 hPa at 20°C
Relative Vapor Density	Not Available
Density	1.19 g/ml at 20°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water solubility	Soluble at 20°C
Partition coefficient (n-octanol/water)	Not Available
Auto-ignition temperature	Not Available
Decomposition Temperature	Not Available
Viscosity	2.3 mPa.s
Explosive properties	Not Explosive
Oxidizing properties	The substance or mixture is not classified as oxidizing.

SECTION 10: Stability and reactivity

10.1 Reactivity

Corrosive in contact with metals. Reacts with alkalis, strong oxidizing agents and strong bases.

10.2 Chemical stability

Stable under recommended storage conditions.

10.3 Possibility of hazardous reactions

Risk of explosion in contact with alkali metals, conc. sulphuric acid, potassium permanganate.

The substance can react dangerously with aluminium, alkali hydroxide, amines, ammonia, fluorine, bases, oxidizing agents, metal carbides, calcium hydride, formaldehyde, copper sulphide, lithium silicide, metals, sodium hydride, sodium hypochlorite and its solutions, silanes, silicon dioxide, vinyl methyl ether and zinc.

10.4 Conditions to avoid

Heat

10.5 Incompatible materials

Aluminium, amines, carbides, hydrides, fluorine, potassium permanganate, strong alkali, salts of oxyhalogenic acids, conc sulphuric acid, semimetallic oxide, semimetallic hydrogen compounds, aldehydes, sulfides, lithium silicide, vinylmethyl ether.

Incompatible with various metals and metal alloys.

10.6 Hazardous decomposition products

Hydrogen gas (Hazardous decomposition products from under contact with metals). Danger of explosion.

SECTION 11: Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects

Mixture

Acute toxicity

Not Available

Acute oral toxicity

Symptoms: burns in mouth, throat, oesophagus and gastrointestinal tract. Risk of perforation in the oesophagus and stomach.

Acute inhalation toxicity

Irritations of the mucous membranes, coughing, and dyspnoea.

Skin corrosion/irritation

Burns

Serious eye damage/eye irritation

Burns, Risk of blindness

Respiratory or skin sensitization

Not Available

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Germ cell mutagenicity
Not Available

Carcinogenicity
Not Available

Reproductive toxicity
Not Available

Teratogenicity
Not Available

Specific target organ toxicity (STOT) - single exposure
May cause respiratory irritation.

Specific target organ toxicity (STOT) - repeated exposure
Not Available

Aspiration hazard
Not Available

Further information
After a latency period: cardiovascular failure.

SECTION 12: Ecological information

- Mixture**
- 12.1 Toxicity**
Toxicity to fish LC₅₀ Leuciscus idus: 862 mg/l (1N solution)
- 12.2 Persistence and degradability**
Not Available
- 12.3 Bioaccumulative potential**
Not Available
- 12.4 Mobility in soil**
Not Available
- 12.5 Other adverse effects**
Forms corrosive mixtures with water even if diluted. Damage to plant growth. The following applies to Hydrochloric acid general: Harmful effect on aquatic organisms. Harmful effect due to pH shift. Do not allow to enter waters, waste water or soil.

SECTION 13: Disposal considerations

- 13.1 Waste treatment methods**
Product
There are no uniform EC Regulations for the disposal of chemicals or residues. Chemical residues generally count as special waste. The disposal of the latter is regulated in the EC member countries through corresponding law and regulations. We recommend that you contact either the authorities in charge or approved waste disposal companies which will advise you on how to dispose of special waste or burn in a chemical incinerator equipped with an afterburner and scrubber but exert extra care in igniting as this material is highly flammable. Observe all federal, state, and local environmental regulations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contaminated packaging

Disposal in compliance with official regulations. Handle contaminated packaging as hazardous waste in the same way of the substance itself. If not officially specified differently, non-contaminated packaging may be treated like household waste or recycled.

SECTION 14: Transport information**Land Transport (ADR/RID)**

UN Number	1789
UN proper shipping name	HYDROCHLORIC ACID
Transport hazard class(es)	8
Packing group	II
Environmental hazards	No
Special precautions for user	Yes

Sea transport (IMDG)

UN Number	1789
UN proper shipping name	HYDROCHLORIC ACID
Transport hazard class(es)	8
Packing group	II
Marine pollutant	No
Special precautions for user	Yes
EmS	F-A G-B

Air transport (IATA)

UN Number	1789
UN proper shipping name	HYDROCHLORIC ACID
Transport hazard class(es)	8
Packing group	II
Environmental hazards	No
Special precautions for user	No

River transport (AND/ADNR)

(Not examined)

SECTION 15: Regulatory information

This safety datasheet complies with the requirements of Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)

15.1 Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

Not Available

15.2 Chemical Safety Assessment

For this product a chemical safety assessment was not carried out.

SECTION 16: Other information**Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3**

H290	May be corrosive to metals.
H314	Causes severe skin burns and eye damage.
H335	May cause respiratory irritation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hydrochloric acid 37%

Recommended restrictions

Take notice of labels and safety data sheets for the working.

Reference

Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS).

Labelling according to EC Directives 67/548 EEC and Regulation (EC) No 1272/2008.

Transportation information according to Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations. Twelfth revised edition. United Nations.

Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance in Sankt Augustin/Germany, Source: IFA for Databases on hazardous substances (GESTIS).

Further Information

Contact to RCI Labscan Limited.

Revision Date

01/07/2018

The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process unless specified in the text.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ThermoFisher
 SCIENTIFIC

SAFETY DATA SHEET

Australian statement of hazardous nature : Classified as hazardous according to criteria of NOHSC

Section 1 - Identification

Product Name	<u>Sodium hydroxide pellets extra pure</u>
Product Code	ACR13407, ACR20606, ACR38304, ACR42433, ACR44728, ACR45058, ACR45113, AJA2534, AJA2535, AJA301, AJA482, AJA483, AJA951, AJACSL482, APPA0991, APPA6829, BSPSL740, FSBBP359, FSBS/4800, FSBS/4845, FSBS/4920
Address	ThermoFisher Scientific Australia Pty Ltd 5 Caribbean Drive, Scoresby VICTORIA 3179, Australia
Emergency Tel.	CHEMTREC® 03 9757 4559 or +613 9757 4559
Telephone / Fax Numbers	Tel: 1300 735 292 Fax: 1800 067 639
E-mail address	auinfo@thermofisher.com
Recommended Use	Laboratory chemicals.

Section 2 - Hazard(s) Identification

Classification under the National Occupational Health and Safety Commission (NOHSC), Australia

Classified as hazardous according to criteria of NOHSC

<u>Physical hazards</u>	No hazards identified
<u>Health hazards</u>	Skin Corrosion/Irritation Serious Eye Damage/Eye Irritation Category 1 A Category 1
<u>Environmental hazards</u>	No hazards identified

Label Elements


Corrosion

Signal Word	Danger
Hazard Statements	H314 - Causes severe skin burns and eye damage
Precautionary Statements	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEET

P264 - Wash face, hands and any exposed skin thoroughly after handling
 P271 - Use only outdoors or in a well-ventilated area
 P280 - Wear protective gloves/ protective clothing/ eye protection/ face protection
 P301 + P330 + P331 - IF SWALLOWED: rinse mouth. Do NOT induce vomiting
 P303 + P361 + P353 - IF ON SKIN (or hair): Remove/ Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/ shower
 P304 + P340 - IF INHALED: Remove to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing
 P305 + P351 + P338 - IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing
 P310 - Immediately call a POISON CENTER or doctor/ physician
 P363 - Wash contaminated clothing before reuse
 P403 + P233 - Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed
 P501 - Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant

Other information

No information available

Section 3 - Composition and Information on Ingredients

Component	CAS-No	Weight %
Sodium hydroxide	1310-73-2	100

Section 4 - First Aid Measures

Inhalation	Move to fresh air. Call a physician or Poison Control Center immediately. If breathing is difficult, give oxygen. Do not use mouth-to-mouth method if victim ingested or inhaled the substance; give artificial respiration with the aid of a pocket mask equipped with a one-way valve or other proper respiratory medical device.
Ingestion	Immediate medical attention is required. Do not induce vomiting. Drink plenty of water. Never give anything by mouth to an unconscious person.
Skin Contact	Wash off immediately with soap and plenty of water while removing all contaminated clothes and shoes. Call a physician immediately.
Eye Contact	Immediate medical attention is required. Rinse immediately with plenty of water, also under the eyelids, for at least 15 minutes. Keep eye wide open while rinsing.
General Advice	Show this safety data sheet to the doctor in attendance. Immediate medical attention is required.
Protection of First-aiders	Ensure that medical personnel are aware of the material(s) involved, take precautions to protect themselves and prevent spread of contamination.
First Aid Facilities	Eyewash, safety shower and washroom.
Most important symptoms/effects	Causes burns by all exposure routes. . Product is a corrosive material. Use of gastric lavage or emesis is contraindicated. Possible perforation of stomach or esophagus should be investigated: Ingestion causes severe swelling, severe damage to the delicate tissue and danger of perforation
Notes to Physician	Treat symptomatically.

Section 5 - Fire Fighting Measures**Suitable Extinguishing Media**CO₂, dry chemical, dry sand, alcohol-resistant foam.**Extinguishing media which must not be used for safety reasons**

AUS-000604

Version 1

10-Nov-2015

Page 2 / 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEET

No information available.

Specific Hazards Arising from the Chemical

The product causes burns of eyes, skin and mucous membranes.

Special protective equipment and precautions for fire fighters

As in any fire, wear self-contained breathing apparatus pressure-demand, MSHA/NIOSH (approved or equivalent) and full protective gear. Thermal decomposition can lead to release of irritating gases and vapors.

Section 6 - Accidental Release Measures**Emergency procedures**

Evacuate personnel to safe areas. Use personal protective equipment. Avoid contact with skin, eyes and clothing.

Environmental Precautions

Do not allow material to contaminate ground water system. Should not be released into the environment. Do not flush into surface water or sanitary sewer system.

Methods for Containment and Clean Up

Sweep up or vacuum up spillage and collect in suitable container for disposal. Avoid dust formation.

Reference to Other Sections

Refer to protective measures listed in Sections 8 and 13.

Section 7 - Handling and Storage**Precautions for Safe Handling**

Use only under a chemical fume hood. Wear personal protective equipment. Do not breathe dust. Do not get in eyes, on skin, or on clothing. Do not ingest.

Conditions for Safe Storage, Including any Incompatibilities

Keep containers tightly closed in a dry, cool and well-ventilated place. Corrosives area.

AS/NZS 2243.10:2004, Safety in laboratories - Storage of chemicals

Section 8 - Exposure Controls and Personal Protection**Exposure limits**

AUS - Exposure Standards for Atmospheric Contaminants in the Occupational Environment - Guidance Note on the Interpretation of Exposure Standards for Atmospheric Contaminants in the Occupational Environment [NOHSC:3008(1995)]

Adopted National Exposure Standards for Atmospheric Contaminants in the Occupational Environment [NOHSC:1003(1995)]

updated in August, 2005. Safe Work Australia ACGIH - Threshold Limit Values - Ceiling (TLV-C) guidelines by the American

Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) for controlling worker exposure to airborne chemical concentrations in

the workplace. UK - EH40/2005 Containing the workplace exposure limits (WELs) for use with the Control of Substances

Hazardous to Health Regulations (COSHH) 2002 (as amended). Updated by September 2006 official press release and October

2007 Supplement. DE - MAK and BAT values of Hazardous Chemical Compounds in the Work Area. Published by German

Research Foundation on July 1, 2011

Component	Australia	New Zealand WEL	ACGIH TLV	The United Kingdom	Germany
Sodium hydroxide	2 mg/m ³ TWA	Ceiling: 2 mg/m ³	Ceiling: 2 mg/m ³	2 mg/m ³ STEL	2 mg/m ³ TWA (Inhalable fraction)

Biological limit values

This product, as supplied, does not contain any hazardous materials with biological limits established by the region specific regulatory bodies

Exposure Controls**Engineering Measures**

Ensure that eyewash stations and safety showers are close to the workstation location.

Wherever possible, engineering control measures such as the isolation or enclosure of the process, the introduction of process or equipment changes to minimise release or contact, and the use of properly designed ventilation systems, should be adopted to control hazardous materials at source

Personal protective equipment**Eye Protection**

Goggles (Australian/New Zealand Standard AS/NZS 1337 - Eye protectors for Industrial applications)

AUS-000604

Version 1

10-Nov-2015

Page 3 / 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEET

Hand Protection		Protective gloves		
Glove material Neoprene	Breakthrough time See manufacturers recommendations	Glove thickness -	AUS/NZ Standard AS/NZS 2161.1	Glove comments (minimum requirement)

Inspect gloves before use.

Please observe the instructions regarding permeability and breakthrough time which are provided by the supplier of the gloves. (Refer to manufacturer/supplier for information)

Ensure gloves are suitable for the task: Chemical compatibility, Dexterity, Operational conditions, User susceptibility, e.g. sensitisation effects, also take into consideration the specific local conditions under which the product is used, such as the danger of cuts, abrasion.

Remove gloves with care avoiding skin contamination.

Skin and body protection	Long sleeved clothing
Respiratory Protection	Use an AS/NZS 1716 approved respirator if exposure limits are exceeded or if irritation or other symptoms are experienced. To protect the wearer, respiratory protective equipment must be the correct fit and be used and maintained in line with AS/NZS 1715 on the use and maintenance of respiratory protective devices
Recommended Filter type: Recommended half mask:-	Particulates filter conforming to EN 143 (or AUS/NZ equivalent) Valve filtering: EN405 or Half mask: EN140 plus filter, EN 141 (or AUS/NZ equivalent) When RPE is used a face piece Fit Test should be conducted
Hygiene Measures	Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice.
Environmental exposure controls	Prevent product from entering drains.

Section 9 - Physical and Chemical Properties

Information on basic physical and chemical properties

Appearance	White	
Physical State	Solid	
Odor	No information available	
Odor Threshold	No data available	
pH	14	
Melting Point/Range	318 °C / 604.4 °F	
Softening Point	No data available	
Boiling Point/Range	1390 °C / 2534 °F	
Flash Point	No information available	Method - No information available
Evaporation Rate	Not applicable	Solid
Flammability (solid,gas)	No information available	
Explosion Limits	No data available	
Vapor Pressure	No data available	
Vapor Density	Not applicable	Solid
Specific Gravity / Density	No data available	
Bulk Density	No data available	
Water Solubility	soluble	
Solubility in other solvents	No information available	
Partition Coefficient (n-octanol/water)		
Autoignition Temperature	Not applicable	
Decomposition Temperature	No data available	
Viscosity	Not applicable	Solid
Explosive Properties	No information available	
Oxidizing Properties	No information available	
Other information		
Molecular Formula	NaOH	
Molecular Weight	40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEET**Section 10 - Stability and Reactivity**

Reactivity None known, based on information available

Stability Stable under normal conditions.

Conditions to Avoid Incompatible products, Excess heat.

Hazardous Decomposition Products None under normal use conditions.

Hazardous Polymerization Hazardous polymerization does not occur.

Section 11 - Toxicological Information**Information on Toxicological Effects****Product Information****(a) acute toxicity:**

Oral

Based on available data, the classification criteria are not met

Dermal

Based on available data, the classification criteria are not met

Inhalation

Based on available data, the classification criteria are not met

Component	LD50 Oral	LD50 Dermal	LC50 Inhalation
Sodium hydroxide		LD50 = 1350 mg/kg (Rabbit)	

(b) skin corrosion/irritation;Category 1
A**(c) serious eye damage/irritation;**

Category 1

(d) respiratory or skin sensitization;

Respiratory

Based on available data, the classification criteria are not met

Skin

Based on available data, the classification criteria are not met

(e) germ cell mutagenicity;

Based on available data, the classification criteria are not met

(f) carcinogenicity;

Based on available data, the classification criteria are not met

(g) reproductive toxicity;

There are no known carcinogenic chemicals in this product

(h) STOT-single exposure;

Based on available data, the classification criteria are not met

(i) STOT-repeated exposure;

Based on available data, the classification criteria are not met

Target Organs

No information available.

(j) aspiration hazard;

Not applicable

Solid

Symptoms / effects, both acute and delayed

Product is a corrosive material. Use of gastric lavage or emesis is contraindicated.

Possible perforation of stomach or esophagus should be investigated: Ingestion causes severe swelling, severe damage to the delicate tissue and danger of perforation

Section 12 - Ecological Information**Ecotoxicity effects**

Contains a substance which is: Harmful to aquatic organisms. The product contains following substances which are hazardous for the environment.

Component	Freshwater Fish	Water Flea	Freshwater Algae	Microtox
Sodium hydroxide	LC50: = 45.4 mg/L, 96h	-	-	-

AUS-000604

Version 1

10-Nov-2015

Page 5 / 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEET

	static (Oncorhynchus mykiss)		
Persistence and Degradability	Soluble in water, Persistence is unlikely, based on information available.		
Persistence	Contains substances known to be hazardous to the environment or not degradable in waste water treatment plants.		
Degradation in sewage treatment plant	Bioaccumulation is unlikely		
Bioaccumulative Potential	The product is water soluble, and may spread in water systems. Will likely be mobile in the environment due to its water solubility Highly mobile in soils		
Mobility	This product does not contain any known or suspected endocrine disruptors		
Endocrine Disruptor Information	This product does not contain any known or suspected substance		
Persistent Organic Pollutant	This product does not contain any known or suspected substance		
Ozone Depletion Potential			

Section 13 - Disposal Considerations

Waste from Residues / Unused Products	Do not allow into drains or watercourses or dispose of where ground or surface waters may be affected. Wastes, including emptied containers, are controlled wastes and should be disposed of in accordance with all federal, E.P.A., state and local regulations. Assure conformity with all applicable regulations.
Contaminated Packaging	Dispose of this container to hazardous or special waste collection point.
Other Information	Chemical wastes should be disposed through a licensed commercial waste collection service. Do not dispose of waste into sewer. Waste codes should be assigned by the user based on the application for which the product was used. Do not empty into drains. Large amounts will affect pH and harm aquatic organisms. Solutions with high pH-value must be neutralized before discharge.

Section 14 - Transport Information**IMDG/IMO**

UN-No	UN1823
Proper Shipping Name	SODIUM HYDROXIDE, SOLID
Hazard Class	8
Packing Group	II

ADG

UN-No	UN1823
Proper Shipping Name	SODIUM HYDROXIDE, SOLID
Hazard Class	8
Packing Group	II

Component	Hazchem Code
Sodium hydroxide 1310-73-2 (100)	2W 2R

IATA

UN-No	UN1823
Proper Shipping Name	SODIUM HYDROXIDE, SOLID
Hazard Class	8
Packing Group	II

Environmental hazards	No hazards identified
Special Precautions	No special precautions required
Additional information	None known

Section 15 - Regulatory Information

Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

AUS-000604

Version 1

10-Nov-2015

Page 6 / 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEET

International Inventories

X = listed

Component	AICS	NZIoC	EINECS	ELINCS	TSCA	DSL	NDSL	PICCS	ENCS	IECSC	KECL
Sodium hydroxide	X	X	215-185-5	-	X	X	-	X	X	X	X

Standard for the Uniform Scheduling of Medicines and Poisons

Component	Standard for the Uniform Scheduling of Medicines and Poisons	Health Surveillance
Sodium hydroxide	<p>Schedule 5 listed - except its salts and derivatives; in preparations being: solid preparations the pH of which in a 10 g/L aqueous solution is >11.5; liquid or semi-solid preparations the pH of which is >11.5 except in food additive preparations for domestic use</p> <p>Schedule 6 listed - except its salts and derivatives; except when included in Schedule 5; in preparations containing <=5% of Sodium hydroxide being: solid preparations the pH of which in a 10 g/L aqueous solution is <=11.5; or liquid or semi-solid preparations the pH of which is <=11.5; or liquid or semi-solid food additive preparations; the pH of which is >11.5 for domestic use</p>	
Component	Australian - Illicit Drug Precursors/Reagents Substance List	
Sodium hydroxide		Category 3

Prohibition or notification/licensing requirements Shown below are details of specific prohibition/notifications or licensing requirements when they apply.

Section 16 - Other Information

Legend

AICS - Australian Inventory of Chemical Substances	NZIoC - New Zealand Inventory of Chemicals
TSCA - United States Toxic Substances Control Act Section 8(b) Inventory	EINECS/ELINCS - European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances/EU List of Notified Chemical Substances
DSL/NDSL - Canadian Domestic Substances List/Non-Domestic Substances List	ENCS - Japanese Existing and New Chemical Substances
IECSC - Chinese Inventory of Existing Chemical Substances	KECL - Korean Existing and Evaluated Chemical Substances
PICCS - Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances	CAS - Chemical Abstracts Service
TWA - Time Weighted Average	ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists
IARC - International Agency for Research on Cancer	PNEC - Predicted No Effect Concentration
ICAO/IATA - International Civil Aviation Organization/International Air Transport Association	IMO/IMDG - International Maritime Organization/International Maritime Dangerous Goods Code
MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships	ADG - Australian Code for the Transport of Dangerous Goods by Road and Rail
NZS 5433:2012 - Transport of Dangerous Goods on Land	OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development
LD50 - Lethal Dose 50%	LC50 - Lethal Concentration 50%
EC50 - Effective Concentration 50%	ATE - Acute Toxicity Estimate
WEL - Workplace Exposure Limit	RPE - Respiratory Protective Equipment
DNEL - Derived No Effect Level	NOEC - No Observed Effect Concentration
POW - Partition coefficient Octanol:Water	BCF - Bioconcentration factor
vPvB - very Persistent, very Bioaccumulative	PBT - Persistent, Bioaccumulative, Toxic
VOC - Volatile Organic Compounds	

Key literature references and sources for data

Suppliers safety data sheet, Chemadvisor - LOLI, Merck index, RTECS

Training Advice

Chemical hazard awareness training, incorporating labelling, Safety Data Sheets (SDS), Personal Protective Equipment (PPE) and hygiene.

Use of personal protective equipment, covering appropriate selection, compatibility, breakthrough thresholds, care, maintenance, fit and standards.

First aid for chemical exposure, including the use of eye wash and safety showers.

Chemical incident response training.

AUS-000604

Version 1

10-Nov-2015

Page 7 / 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium hydroxide pellets extra pure

SAFETY DATA SHEETRevision Date
Revision Summary10-Nov-2015
Update to Format.

This safety data sheet complies with the requirements of Safe Work Australia WHS Regulation

Disclaimer

The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as a guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process, unless specified in the text

End of Safety Data Sheet

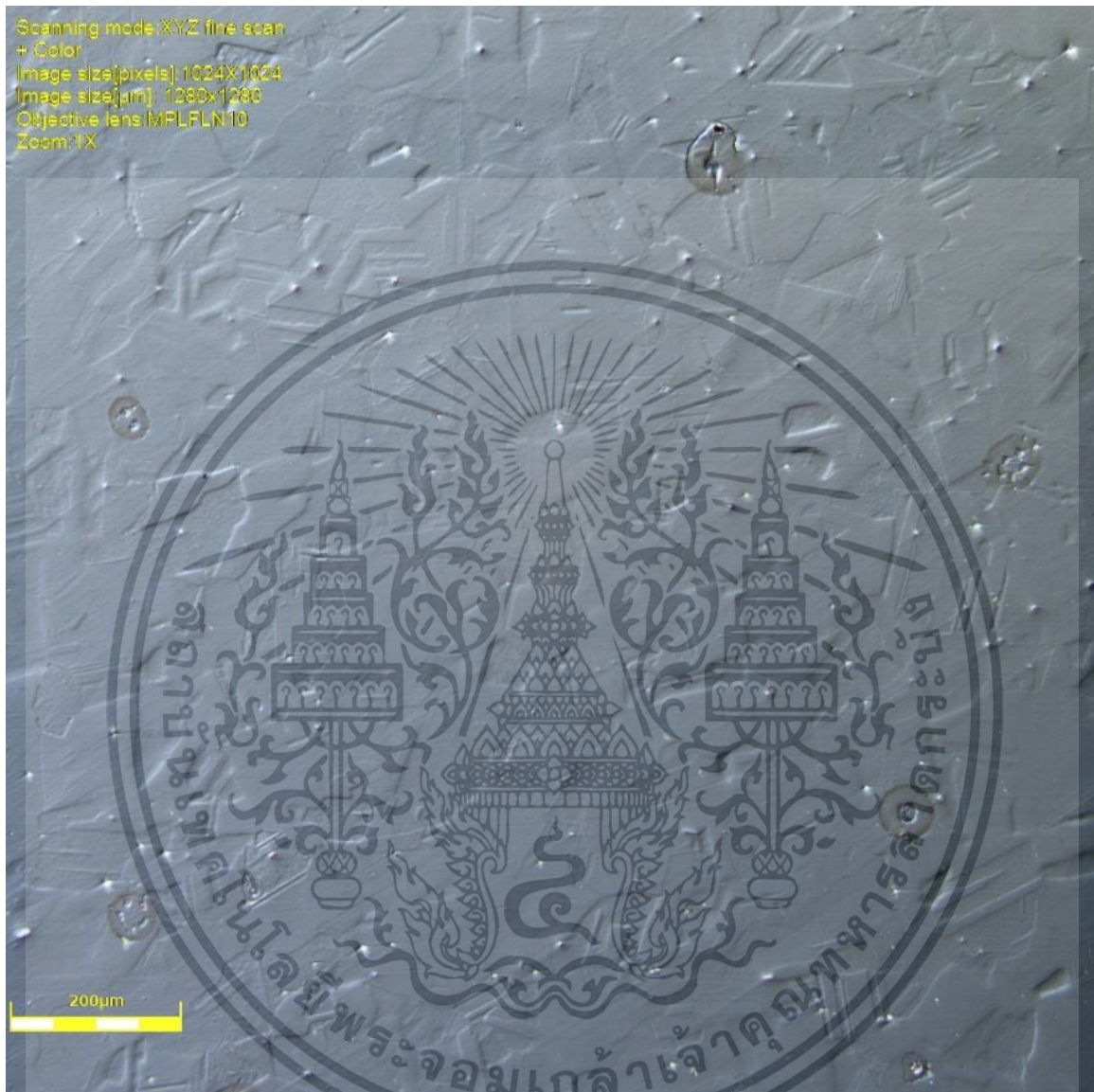
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

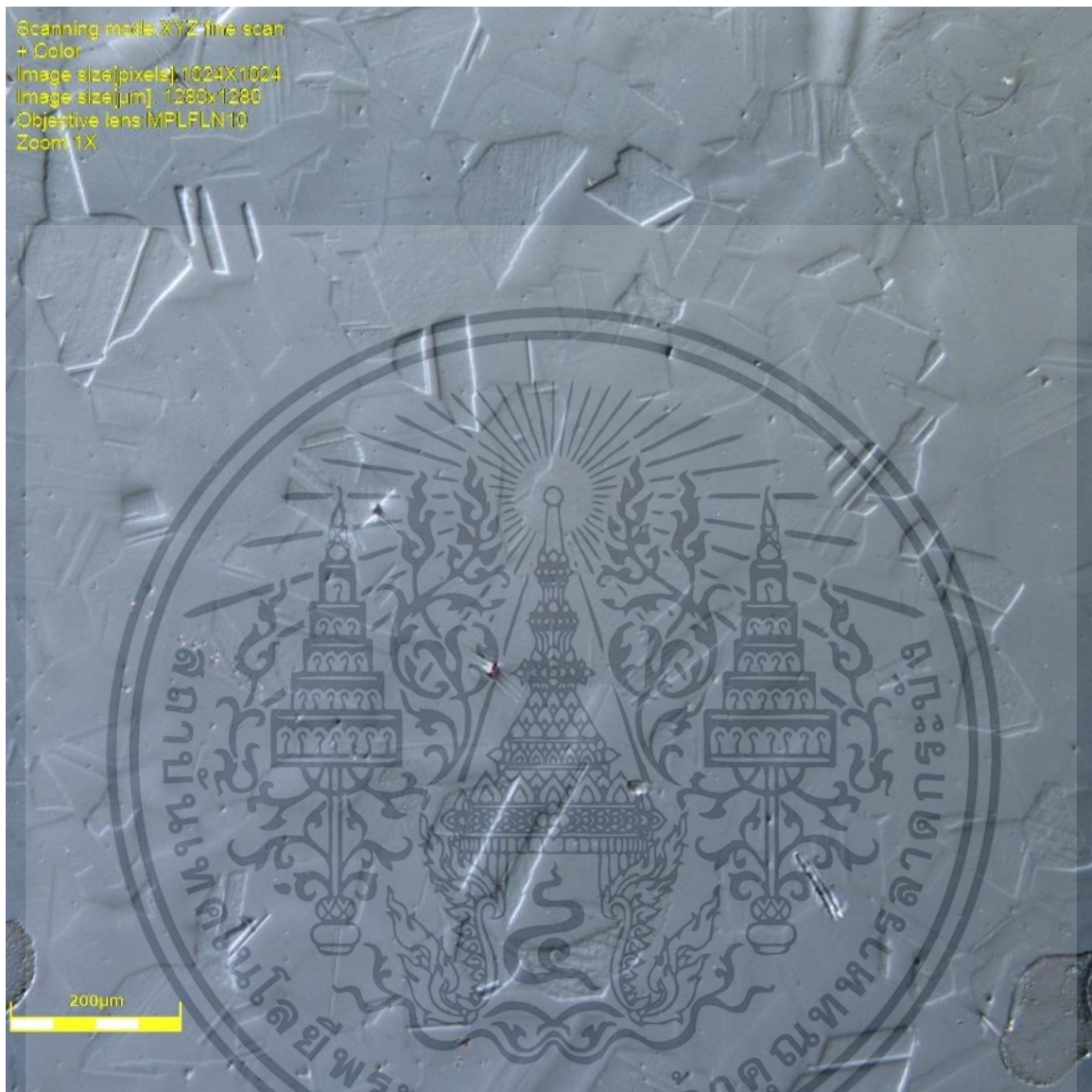
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย OM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



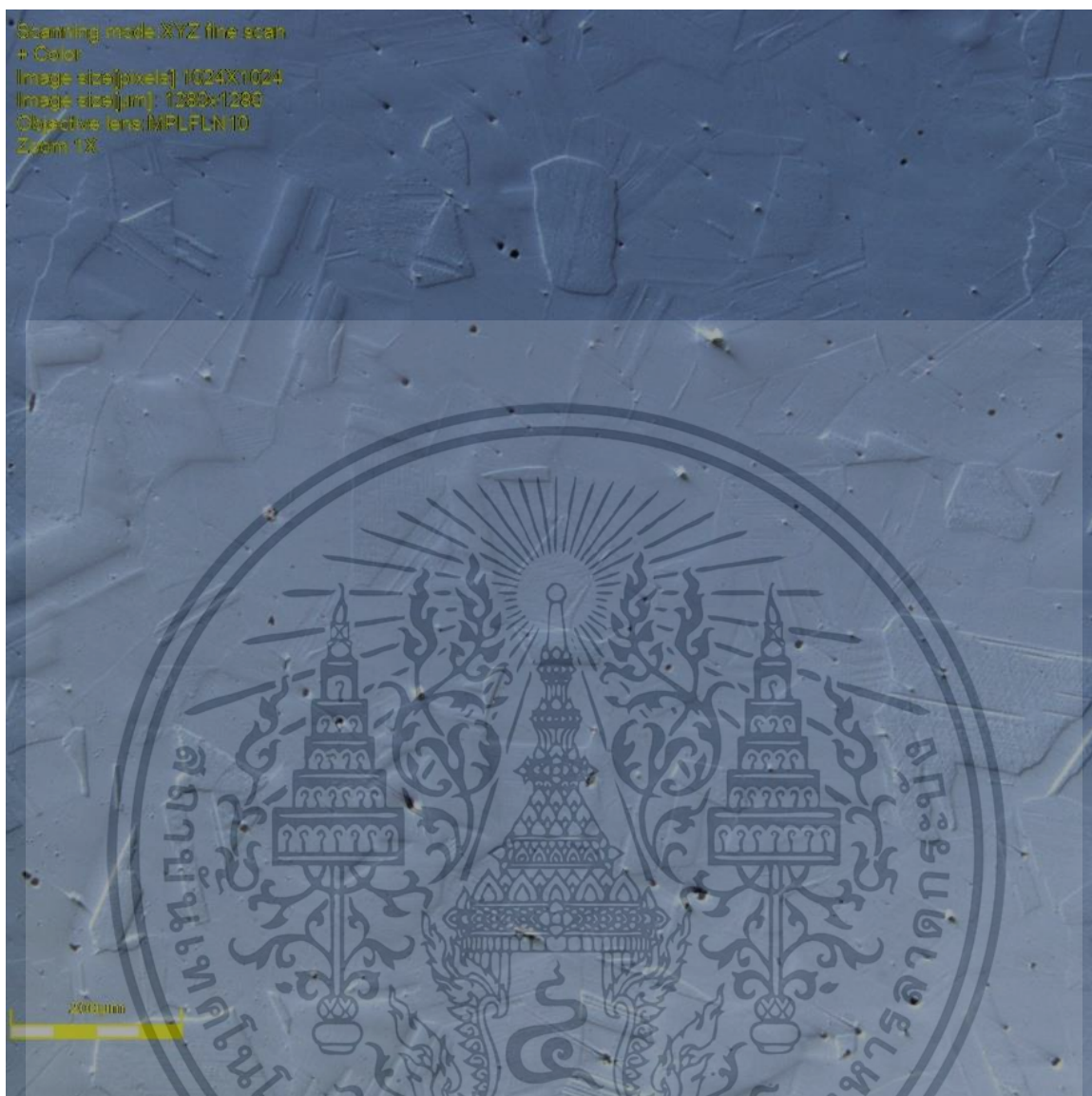
รูปที่ ค.1 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



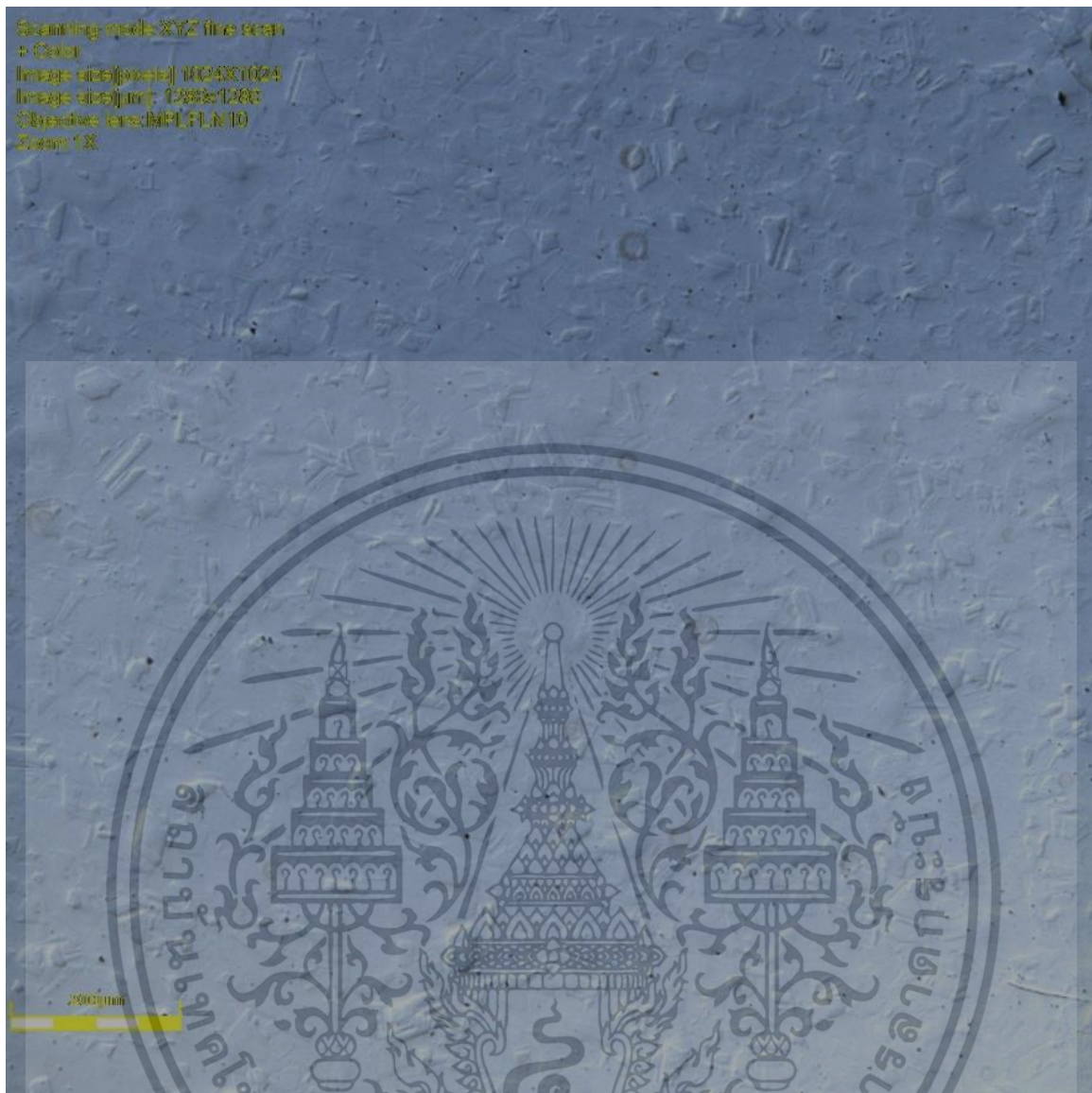
รูปที่ ค.2 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

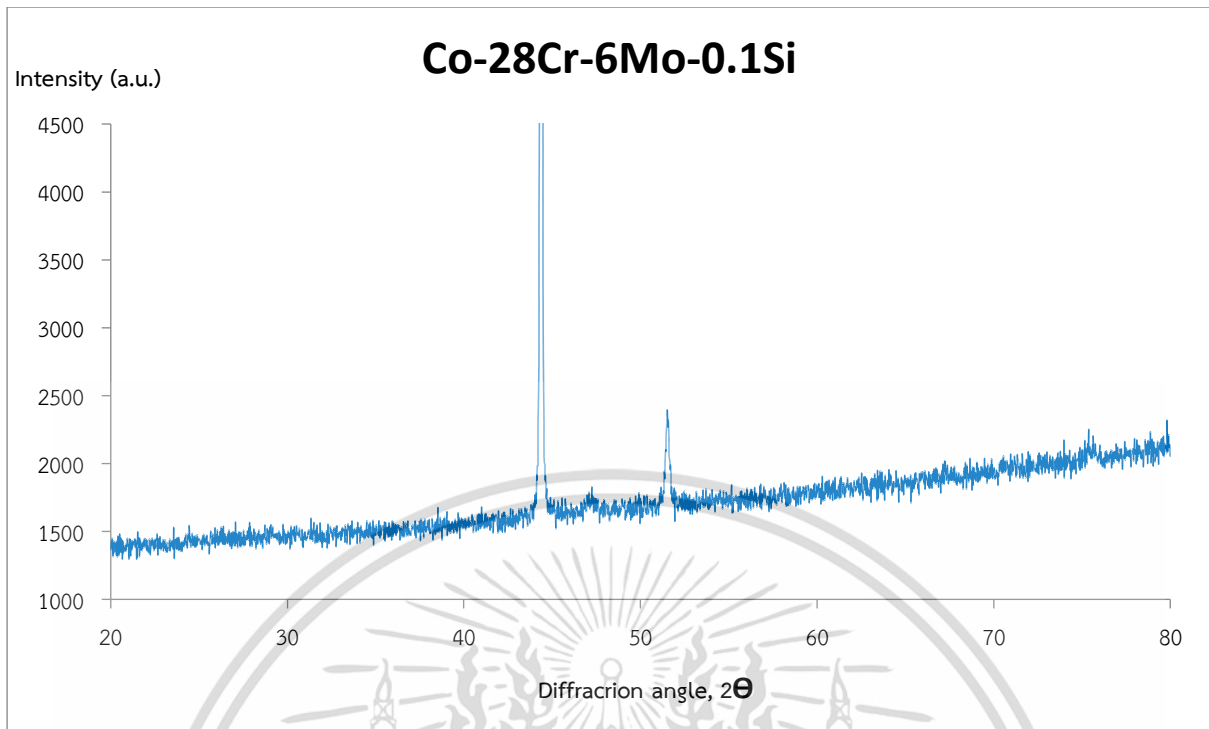


รูปที่ ค.2 ลักษณะเกรนของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si

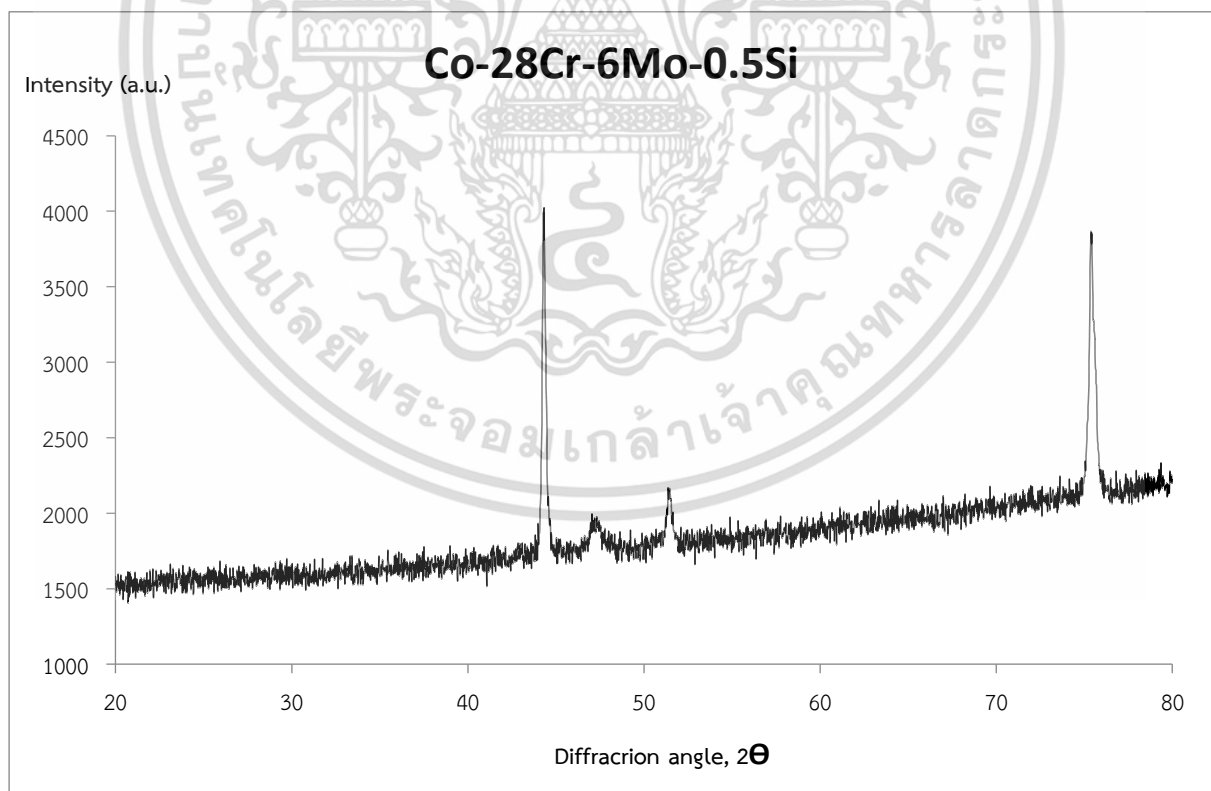
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

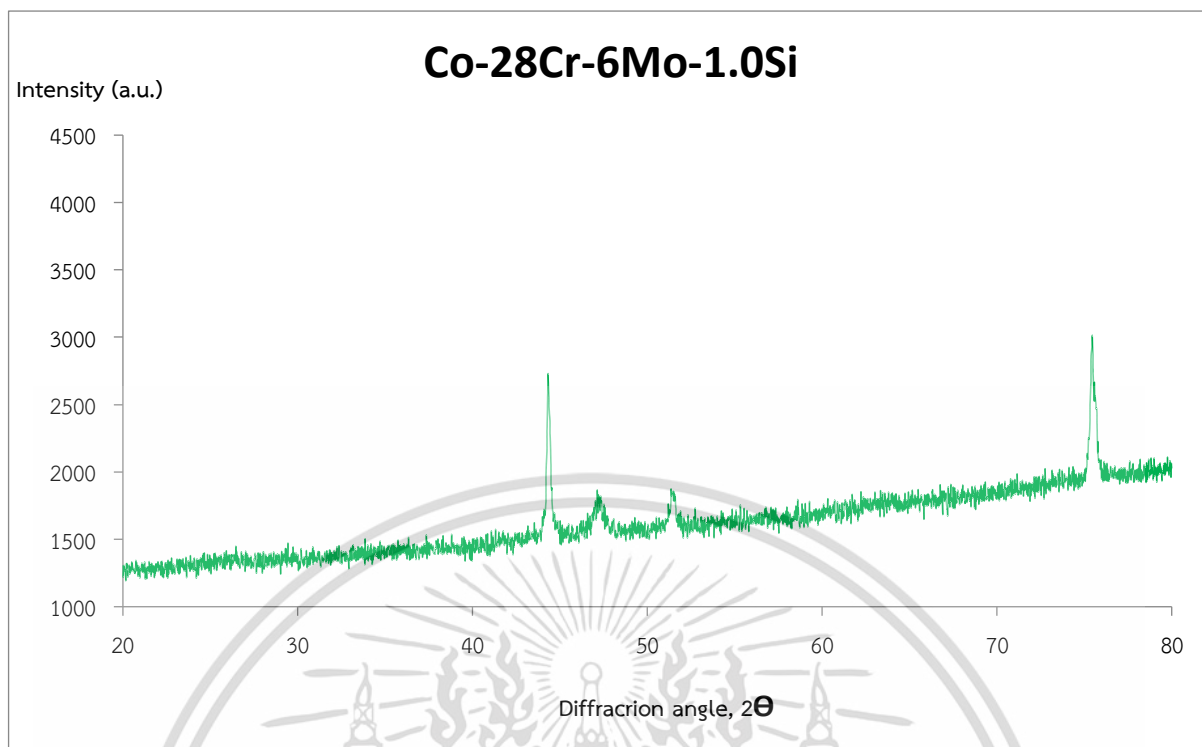


รูปที่ ง.1 กราฟ XRD ของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si



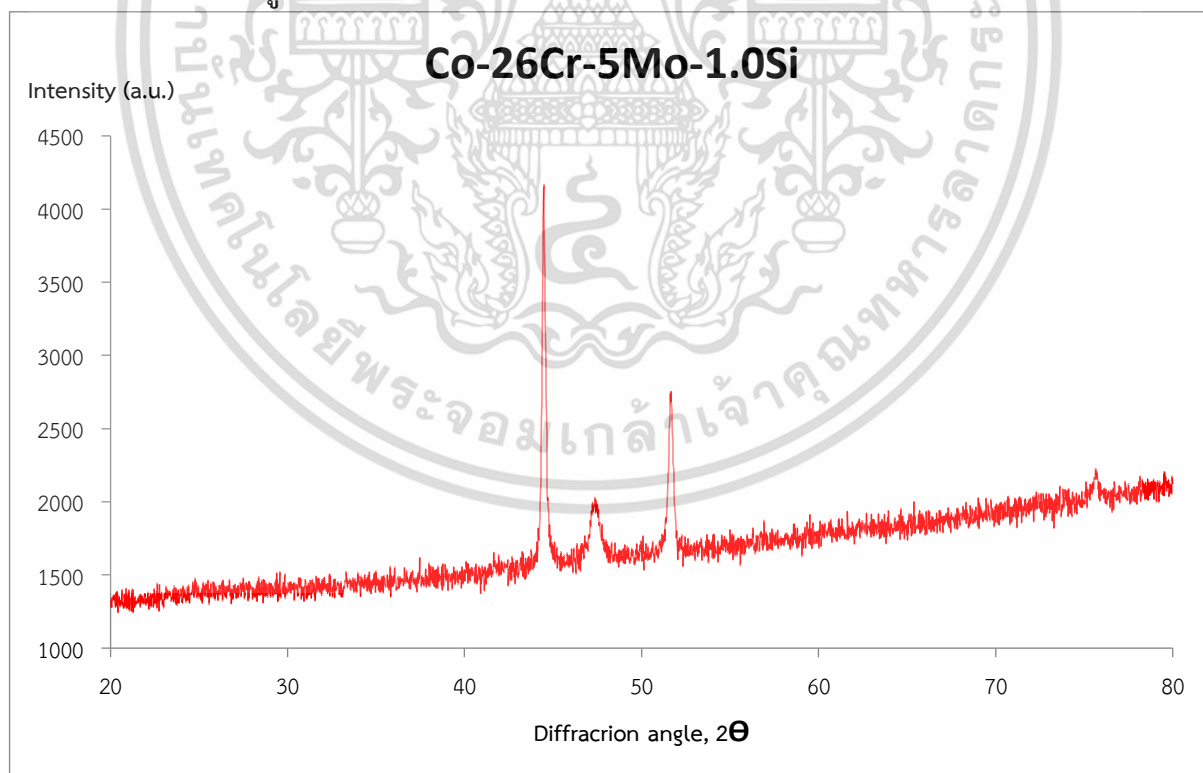
รูปที่ ง.2 กราฟ XRD ของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 กราฟ XRD ของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si

รูปที่ ง.2 กราฟ XRD ของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si



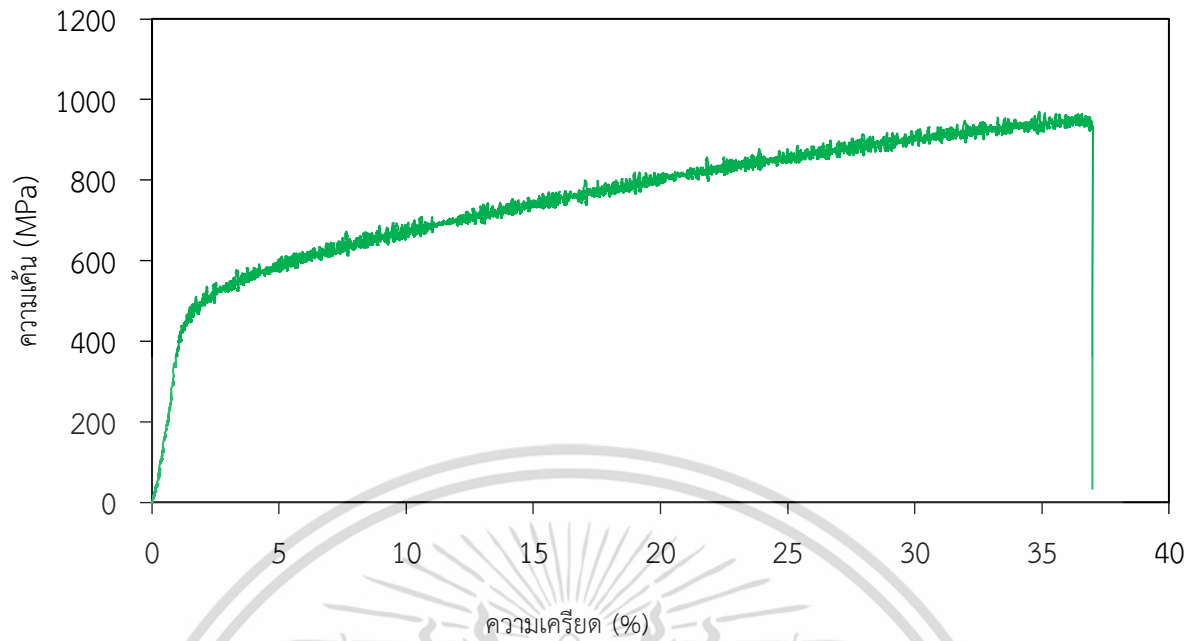
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



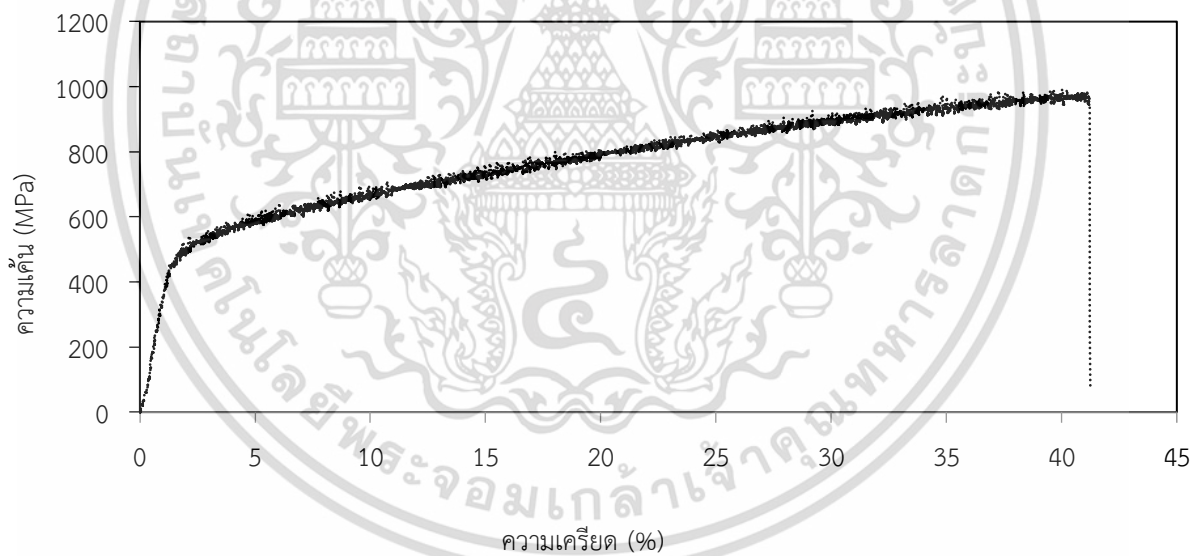
ภาคผนวก ง

ทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

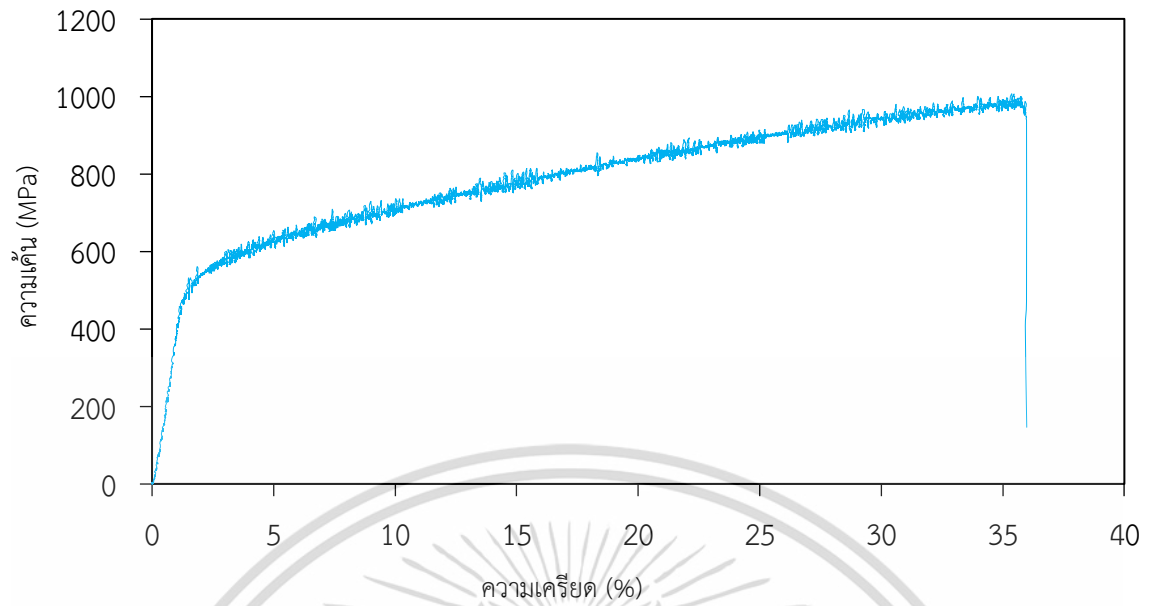


รูปที่ จ.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.1Si

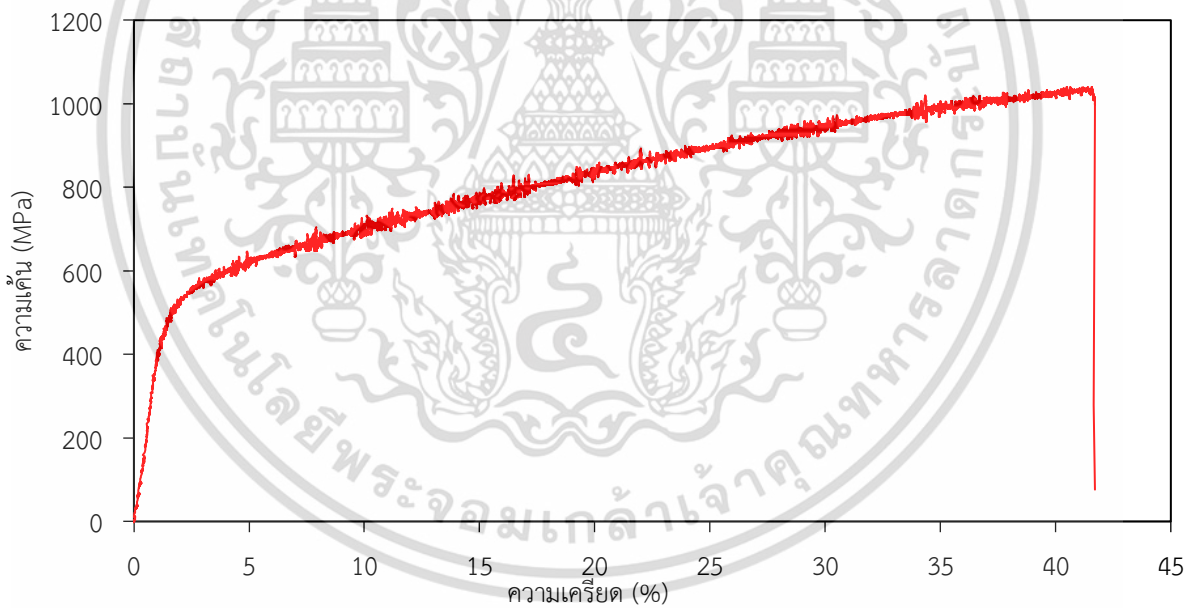


รูปที่ จ.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-0.5Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-28Cr-6Mo-1.0Si



รูปที่ จ.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเครียดของโลหะผสม Co-26Cr-5Mo-1.0Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตองสง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 901 12.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 1 / 13

รายงานผลวิเคราะห์ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยคลองกรุง 1 ถนนคลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชา นวกทนต์
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : J_1
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสบัญชีบริการ : 61-30892
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	1.248
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.702
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.060
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ :
 1. ปริมาณสารที่พบในตัวอย่างทดสอบ
 2. ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็นค่าประมาณโดยอิงตามค่ามาตรฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และไม่ได้ผ่านการยืนยันโดยนักวิทยาศาสตร์หรือเนี่ยส

(นางสาวนัชชา นวกทนต์)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ



(นางสาวสุสติ มุขะหมัด)
 หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง

17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตอทอง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.
โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850
<http://ced.sci.pnu.ac.th>

หน้า 2 / 13

รายงานผลวิเคราะห์ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชาดา หมวกทอง
ประเภทตัวอย่าง : ยางละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
ชื่อตัวอย่าง : 4_#2
รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
รหัสปฏิบัติการ : 61-10693
วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
วันที่วิเคราะห์ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลทางทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.088
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.026
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.002
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ

ปริมาณสารที่วิเคราะห์ทั้งหมดจะรวมกัน
รายงานผลการวิเคราะห์ตามที่ได้ไปรษณีย์มาขอรับบริการ โดยไม่มีการรับประกันผลวิเคราะห์ และผู้ส่งรายงานผลวิเคราะห์ต้องรับผิดชอบ

(นางสาวนัชชาดา หมวกทอง)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ



(นางสาวมุสดี มุหะหมัด)
หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง

17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตท่าหลวง

ตู้ ปณ.3 ตอหงส์ อ.ท่าหลวง จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 3 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชาตา หมวดทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : A_3
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรจุ ในขวดพลาสติก
 หมายเลขรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10694
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.238
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.094
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.010
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ :
 - ปริมาณตัวอย่างที่ส่งมาใช้ในการทดสอบ
 - รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจทางกฎหมายหรือการค้า


 (นางสาวนัชชาตา หมวดทอง)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

 (นางสาวนุชดี นุชนุช)
 หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง
 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตอทอง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 4 / 13

รายงานผลวิเคราะห์ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์ทดสอบ : นางสาวนัชชยา ทมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 3.44
 รายละเอียดตัวอย่าง : บวลงในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10095
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีการสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.182
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.066
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.006
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ :
 1. ปริมาณสารที่วัดได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น
 2. รายการวิเคราะห์ทดสอบนี้ใช้โดยอ้างอิงตามมาตรฐานของกรมการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม (ดูได้ที่สำนักงานสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กรมการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม)



 (นางสาวนัชชยา ทมวกทอง) (นางสาวนุชดี มุหะหมัด)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ดอทอง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 5 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชาดา หมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 7 #1
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 812374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10696
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.102
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.044
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.004
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ :
 - ไม้รวมถึงผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่นอกเหนือจากนี้
 - รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ นี้จะไม่ถูกใช้สำหรับนัยยะทางกฎหมาย ยกเว้นที่ระบุไว้ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากหน่วยงานเครื่องมือกลาง

(นางสาวนัชชาดา หมวกทอง)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ



(นางสาวสุสดี มุหะหมัด)

หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง

17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 538550

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 6 / 13

รายงานผลวิเคราะห์ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยสองแคว 1 ถนนลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัยยาตา ทนวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 7-#2
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสบัญชีการ : 61-10607
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.074
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.030
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.004
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ :
 1. ผลการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบ
 2. การแปลผลการวิเคราะห์ผลจะส่งไปผู้ส่งและผู้รับตัวอย่างเท่านั้น โดยไม่ได้มีการเปิดเผยไปยังบุคคลอื่นที่เกี่ยวข้อง


 (นางสาวนัยยาตา ทนวกทอง)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ


 (นางสาวมุตติ มุหะหมัด)
 หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง


 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 7 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวณัชชยาตา หมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 7_#3
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10698
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.120
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.026
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.004
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ - วิจารณ์ผลเท่ากับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น
 - รายงานผลการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งไม่ถูกต้องส่วนใดส่วนหนึ่ง กรุณาชี้แจงกลับมา มิฉะนั้นผู้วิเคราะห์จะรับผิดชอบในส่วนที่ตนได้วิเคราะห์เท่านั้น (โปรดอ่าน)

(นางสาวณัชชยาตา หมวกทอง)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ



(นางสาวมุสตี มุหะหมัด)

หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง

17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตอทองส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 8 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชยาตา ทมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 7 #4
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10699
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.128
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.044
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.004
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ - ปริมาณผลพวงตัวอย่างที่นำมาทดสอบข้างต้น
 - รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ ต้องไม่ถูกใช้ก่อนการลงนามรับทราบ ยกเว้นทั้งนี้ มิได้มีใ้ใช้ตรวจสอบในกรณีฉุกเฉินโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

(นางสาวนัชยาตา ทมวกทอง) (นางสาวสุสติ มุทะหมัด)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง
 คณะวิทยาศาสตร์
 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ดอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 9 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชาตาทา หมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 10_#1
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10700
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.034
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.032
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.004
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ - ตัวอย่างส่งมาพร้อมกับตัวอ้างอิงที่ส่งมาทดสอบเท่านั้น
 - รายงานผลการวิเคราะห์ที่แนบมา คือ ผลการวิเคราะห์เบื้องต้น โดยไม่ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอื่นที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้


 (นางสาวนัชชาตาทา หมวกทอง)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ
 หน่วยเครื่องมือกลาง
 คณะวิทยาศาสตร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
 นางสาวสุستی มุหะหมัด
 หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง
 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ดอทอง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 10 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวณิชาดา หมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 10_#2
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรจุ ในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 812374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10701
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.036
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.040
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.006
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	0.050

หมายเหตุ - รับรองเฉพาะค่าที่ส่งมาที่ไม่มีการดัดแปลง
 - รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ เป็นข้อมูลทางวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการวินิจฉัยทางการแพทย์หรือการฟ้องคดี


 (นางสาวณิชาดา หมวกทอง) 
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตอทองส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.
โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850
<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 11 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ : 1 ซอยจลองกรุง 1 ถนนจลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชาดา หมวกทอง
ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
ชื่อตัวอย่าง : 10_#3
รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
รหัสปฏิบัติการ : 61-10702
วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.022
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.020
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.002
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	0.072

หมายเหตุ - วิเคราะห์เฉพาะในตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
- รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ ส่งให้ผู้ส่งตัวอย่างด้วยตนเอง กรุณาแจ้งรับผลได้ โดยไม่ได้ดำเนินการวิเคราะห์/ทดสอบในฉบับที่ส่งมาอีกหากหน่วยงานที่ส่งมา (ลูกค้า)


 (นางสาวนัชชาดา หมวกทอง) (นางสาวสุستی มุหะหมัด)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง

 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 12 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชยาตา หมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สาละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 10_#4
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10703
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.050
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.040
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	0.004
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	0.196

หมายเหตุ : วิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างที่ส่งทดสอบเท่านั้น

รายงานผลการวิเคราะห์ทดสอบนี้ถูกต้องทุกส่วนภายใต้เงื่อนไขการรับวิเคราะห์โดยไม่มีประกันผลวิเคราะห์ใดๆ จากหน่วยงานอื่น

(นางสาวนัชยาตา หมวกทอง)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ



(นางสาวสุستی มุหะหมัด)

หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง

17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ตู้ ปณ.3 ตอทอง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112.

โทรศัพท์ (074) 288058-9 โทรสาร (074) 558850

<http://ced.sci.psu.ac.th>

หน้า 13 / 13

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบ

หมายเลขรายงานผล : 2040/61
 ชื่อผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ที่อยู่ : 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 ผู้วิเคราะห์/ทดสอบ : นางสาวนัชชาตา หมวกทอง
 ประเภทตัวอย่าง : สารละลาย จำนวน 1 ตัวอย่าง
 ชื่อตัวอย่าง : 4 #21
 รายละเอียดตัวอย่าง : บรรจุในขวดพลาสติก
 แบบฟอร์มขอรับบริการเลขที่ : 612374
 รหัสปฏิบัติการ : 61-10704
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 สิงหาคม 2561
 วันที่วิเคราะห์/ทดสอบ : 14 สิงหาคม 2561 - 17 สิงหาคม 2561

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Cobalt (Co)	ICP-OES	mg/L	0.054
Chromium (Cr)	ICP-OES	mg/L	0.032
Molybdenum (Mo)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ
Silicon (Si)	ICP-OES	mg/L	ไม่พบ

หมายเหตุ :
 * ปริมาณผลวิเคราะห์ตัวอย่างนี้ไม่รวมค่าเบี่ยงเบน
 * รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ ต้องไม่ผูกพันเฉพาะกับหน่วยงาน ผู้รับวิเคราะห์ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากหน่วยงานผู้ส่งมา

(นางสาวนัชชาตา หมวกทอง) (นางสาวสุสติ มุหะหมัด)
 นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ หัวหน้าหน่วยเครื่องมือกลาง
 17 สิงหาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	ชลวิชัย ผิวบัวเพื่อน
วัน เดือน ปี เกิด	11 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	75 ซ.พืงมี 28 ถ.สุขุมวิท 93 แขวงบางจาก เขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร 10260
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีที่สำเร็จการศึกษา 2558
ประสบการณ์ทำงาน	พ.ศ. 2561 – 2564 ตำแหน่ง วิศวกรส่วนผลิตแทรกเตอร์แอล พ.ศ. 2564 – ปัจจุบัน ตำแหน่ง วิศวกรส่วนส่งเสริมเทคโนโลยีและระบบการผลิตคูโบต้า Siam kubota corporation co. ltd.
ผลงานทางวิชาการ	1. “อิทธิพลของ Si ต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมCo-Cr-Mo”. 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้