



สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยการหลอมผงวัสดุด้วยเลเซอร์ โดย
ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

CORROSION OF CO-CR ALLOY FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING
FOLLOWED BY HEAT TREATMENT

วันวิสา วัชรสุนทรพงศ์

สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยการหลอมผงวัสดุด้วยเลเซอร์ โดย
ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน



วันวิสา วัชรสุนทรพงศ์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมคลินิก
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

CORROSION OF CO-CR ALLOY FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING
FOLLOWED BY HEAT TREATMENT



WANWISA WATCHARASOONTORN PONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Clinical Dentistry)

Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University

2025

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติการกักความร้อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยการหลอมผงวัสดุด้วยเลเซอร์

โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

ของ

วันวิสา วัชรสุนทรพงศ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์จัตราชัย เอกปัญญากุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.ณัฐพล กิตติคุณเดชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ไพศาลกอบฤทธิ์)

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ เจียรพุดมิ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชื่นชีวิต ทองศิริ)

ชื่อเรื่อง	สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยการหลอมผงวัสดุด้วยเลเซอร์ โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อน
ผู้วิจัย	วันวิสา วัชรสุนทรพงศ์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2568
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ณัฐพล กิตติคุณเดชา
ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ไพศาลกอบฤทธิ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr alloy) ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (Casting) เปรียบเทียบกับกระบวนการหลอมผงโลหะด้วยเลเซอร์ (Selective Laser Melting; SLM) ภายใต้เงื่อนไขการอบชุบความร้อน (Heat treatment) ที่แตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมของสารละลายและทิศทางการขึ้นรูปต่อพฤติกรรมกัดกร่อนของวัสดุ ขึ้นงานจำนวนทั้งสิ้น 50 ชิ้นถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม Casting และกลุ่ม SLM ที่ผ่านการอบชุบความร้อน 2 สภาวะ คือ 1050°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (HT1050-5h) และ 1150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (HT1150-1h) ในสองทิศทางการขึ้นรูป ได้แก่ XZ (0°) และ XY (90°) ทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธี Immersion test ตามมาตรฐาน ISO 10271 ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกาย (Simulated Body Fluid; SBF, pH ≈ 7.4) และสารละลายกรดแลคติก (pH ≈ 2.3) เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 37°C การปลดปล่อยไอออนโลหะโคบอลต์ (Co) และโครเมียม (Cr) ตรวจสอบด้วยเครื่อง ICP-OES และลักษณะพื้นผิวตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการทดลองพบว่าสารละลายกรดแลคติกก่อให้เกิดการปลดปล่อยไอออนโลหะสูงกว่าสารละลาย SBF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อน พบว่ากลุ่ม SLM-HT1150-1h มีค่าการปลดปล่อยไอออน Co และ Cr ต่ำและสม่ำเสมอว่ากลุ่ม SLM-HT1050-5h ทั้งในสารละลาย SBF และกรดแลคติก สะท้อนถึงความเสถียรของฟิล์มออกไซด์และประสิทธิภาพการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า ผลการวิเคราะห์ SEM ยืนยันว่ากลุ่ม Casting มีการกัดกร่อนเฉพาะที่และความขรุขระผิวสูงกว่า ขณะที่พื้นผิวของกลุ่ม SLM โดยเฉพาะกลุ่ม HT1150-1h มีการพื้นผิวที่เรียบกว่า สรุปได้ว่ากระบวนการผลิตแบบ SLM ร่วมกับการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขที่ให้สมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของ Co-Cr alloy ที่ดีที่สุด และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานทางทันตกรรมเชิงคลินิกมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม, การกัดกร่อน, การหลอมผงด้วยเลเซอร์, กรรมวิธีทางความร้อน

Title	CORROSION OF CO-CR ALLOY FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING FOLLOWED BY HEAT TREATMENT
Author	WANWISA WATCHARASOONTORN PONG
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2025
Advisor	Nuttaphon Kittikundecha, Ph.D.
Co-Advisor	Vibul Paisankobrit, Ph.D.

This study aimed to evaluate the corrosion resistance of cobalt–chromium (Co–Cr) dental alloys. Alloys were fabricated by conventional casting and by selective laser melting (SLM) under different heat treatment conditions. The study also investigated the influence of corrosive media and build orientation on corrosion behavior. Fifty specimens were divided into five groups: casting and four SLM subgroups. Each SLM subgroup underwent two heat treatments. The first was 1050°C for 5 hours (HT1050–5h). The second was 1150°C for 1 hour (HT1150–1h). SLM specimens were produced in two build orientations, XZ (0°) and XY (90°). Corrosion testing used the immersion test according to ISO 10271. Two solutions were used: simulated body fluid (SBF, pH \approx 7.4) and lactic acid (pH \approx 2.3). The solutions were maintained at 37°C for 7 days. Cobalt (Co) and chromium (Cr) ions released were quantified by inductively coupled plasma–optical emission spectrometry (ICP–OES). Surface morphology before and after immersion was examined by scanning electron microscopy (SEM). Results showed that lactic acid caused significantly higher metal ion release in all groups compared to SBF ($p < 0.05$). The casting group showed the highest metal ion release; however, no statistically significant difference was found when compared with the SLM groups. The HT1150–1h condition in SLM groups resulted in the lowest and most stable Co and Cr ion release in both solutions. SEM analysis supported these findings. The casting group exhibited pronounced localized corrosion. SLM specimens, especially those treated at 1150°C for 1 hour, had smoother surfaces with fewer defects from corrosion. In conclusion, SLM with heat treatment at 1150°C for 1 hour effectively improves the corrosion resistance of Co–Cr dental alloys.

Keywords: Cobalt-Chromium Alloy, Corrosion, Selective Laser Melting, Heat Treatment

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร. ณัฐพล กิตติคุณเดชา ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยผู้ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำอย่างต่อเนื่องในการปรับปรุงเนื้อหาและโครงสร้างของงานวิจัยให้มีความครบถ้วน สมบูรณ์ และเป็นไปตามหลักวิชาการ และอาจารย์ ดร.วิบูลย์ ไพศาลกอบฤทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี ตลอดจนคณาจารย์ประจำสาขาทันตกรรมหัตถการ คณะกรรมการสอบเค้าโครงปริญญาานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์ ประกอบกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนประเภทเงินรายได้หน่วยงานสังกัดคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทางผู้วิจัยได้ตระหนักถึงและใคร่กราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณดังกล่าวมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัย คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อครอบครัวที่เป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษาและการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงเพื่อน ๆ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดระยะเวลาจนสามารถดำเนินปริญญาานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

วันวิสา วัชรสุนทรพงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	1
ความสำคัญของการวิจัย	1
ขอบเขตการวิจัย	1
ตัวแปรที่ศึกษา.....	1
ตัวแปรอิสระ	1
ตัวแปรตาม	2
ตัวแปรควบคุม.....	2
ภูมิหลัง.....	2
กรอบแนวคิดการวิจัย	4
สมมติฐานการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
โลหะผสมที่ใช้ในทางทันตกรรม.....	5
โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม	7
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม.....	7
เครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติ	8
การขึ้นรูปด้วยการใช้ของเหลว (liquid based).....	8
การขึ้นรูปโดยใช้ของแข็ง (solid based)	9
การขึ้นรูปโดยใช้ผงฝุ่น (powder based).....	9
การกัดกร่อน (Corrosion).....	12
ชนิดของการกัดกร่อน (Types of corrosion) ⁽¹⁾	13

รูปแบบการกัดกร่อน	14
วิธีการทดสอบการกัดกร่อน	15
ผลกระทบจากการกัดกร่อนของโลหะผสมทางทันตกรรม	17
Inductively Coupled plasma-Optical Emission spectrometry	17
กรรมวิธีการทางความร้อน (Heat treatment).....	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
การออกแบบวิจัย	24
การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง	24
ประชากรที่ใช้ในงานวิจัย	24
กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	24
เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์	25
ขั้นตอนการทดลอง.....	26
การเตรียมชิ้นงาน	26
การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค	27
ทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบแช่ (Immersion test).....	27
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	28
บทที่ 4 ผลการดำเนินวิจัย	31
สมบัติความต้านทานการกัดกร่อน.....	32
การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยไอออนโลหะในสารละลาย SBF และกรดแลคติก	32
การปลดปล่อยไอออนโลหะ Cobalt	32
การปลดปล่อยไอออนโลหะ Chromium	34
การศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่	
แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน	36
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของโลหะผสม Co-Cr ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ	
ส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)	41
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	44
สรุปผลการวิจัย.....	44
อภิปรายผล	46

ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก.....	54



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ส่วนประกอบทางเคมีของผงโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Starbond Easy Powder 30, Scheftner Dental Alloys, Germany).....	25
ตาราง 2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Wironit LA, Bego, Bremen, Gemany)	26
ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของโลหะ กรณีไม่แยกกลุ่มโลหะ ระหว่างแซในสารละลาย SBF กับ สารละลาย Lactic	32
ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ของ Cobalt ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) ด้วยวิธี Post hoc (Tamhane) (n=5).....	33
ตาราง 5 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Cobalt ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ Post hoc (Tamhane) แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (n=5)	34
ตาราง 6 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ Post-Hoc Test (Tamhane's method) แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (n=5).....	35
ตาราง 7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ Post-Hoc Test (Tamhane's method) (n=5).....	36
ตาราง 8 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย SBF โดยใช้ Two-Way ANOVA.....	36
ตาราง 9 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ของ Cobalt ในสารละลาย SBF จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน โดยใช้ Post-Hoc Test (Tamhane's method) (n=5)	37

ตาราง 10 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน เมื่ออยู่ในสารละลาย Lactic โดยใช้ Two-Way ANOVA	38
ตาราง 11 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Cobalt ในสารละลาย Lactic จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Post-Hoc Test (Tamhane's method) (n=5).....	38
ตาราง 12 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Chromium เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย SBF โดยใช้ Two-Way ANOVA	39
ตาราง 13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย SBF จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Post-Hoc Test (Tamhane's method) (n=5)	39
ตาราง 14 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Chromium เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย Lactic โดยใช้ Two-Way ANOVA.....	40
ตาราง 15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย Lactic จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Post-Hoc Test (Tamhane's method) (n = 5)	40
ตาราง 16 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรด้วย Kolmogorov-Smirnov และ Shapiro-Wilk.....	56
ตาราง 17 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Cobalt ในสารละลาย SBF หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)	57
ตาราง 18 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Cobalt ในสารละลายกรดแลคติก หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)	57
ตาราง 19 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Chromium ในสารละลาย SBF หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)	57
ตาราง 20 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Chromium ในสารละลายกรดแลคติก หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)	58

ตาราง 21 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ใน สารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting โดยใช้ One-way ANOVA (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มี นัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$).....	58
ตาราง 22 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณี ไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ One-Way ANOVA แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มี นัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$).....	58
ตาราง 23 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ใน สารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึง ถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ One-Way ANOVA แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทาง สถิติ ($p>0.05$).....	59
ตาราง 24 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ One-Way ANOVA แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มี นัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$).....	59

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย	4
ภาพประกอบ 2 การจัดเรียงของอะตอมของโลหะ	6
ภาพประกอบ 3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม	8
ภาพประกอบ 4 เครื่องพิมพ์แบบสเตอริโอลิโทกราฟี (Stereolithography Apparatus,SLA)..	9
ภาพประกอบ 5 การขึ้นรูปโดยการพอกพลาสติก (Fused Deposition Modeling, FDM)	9
ภาพประกอบ 6 การขึ้นรูปแบบผงร่วมกับเลเซอร์ซินเตอร์ริง	10
ภาพประกอบ 7 รูปแบบการทำงานของ Selective Laser Melting (SLM)	11
ภาพประกอบ 8 การขึ้นรูปแบบ Powder Based Selective Laser Melting, SLM	11
ภาพประกอบ 9 The component of ICP-OES	19
ภาพประกอบ 10 การตัดชิ้นงานโลหะผสมที่ผลิตด้วย SLM ตามแนวแกน x-y และ แกน x-z.....	26
ภาพประกอบ 11 รูปแบบการวางชิ้นงานใน Epoxy resin.....	27
ภาพประกอบ 12 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มทดสอบ	30
ภาพประกอบ 13 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม Casting หลังแช่ใน สารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μm .)	41
ภาพประกอบ 14 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1050-5h : XZ plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μm .).....	41
ภาพประกอบ 15 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1050-5h : XY plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μm .).....	42
ภาพประกอบ 16 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1150-1h : XZ plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μm .).....	42

ภาพประกอบ 17 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1150-1h : XY plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μm .).....	42
ภาพประกอบ 18 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่มควบคุม (a) 1050-5h XZ (b) 1050-5h XY, (c) 1150-1h XZ, (d) 1150-1h XY, (e) Casting (SEM,x100, scale bar = 100 μm .).....	43
ภาพประกอบ 19 การคำนวณขนาดตัวอย่าง	55



บทที่ 1

บทนำ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Selective laser melting ร่วมกับการอบให้ความร้อนเทียบกับวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม
2. ศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางร้อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน

ความสำคัญของการวิจัย

การศึกษานี้ต้องการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการ Heat treatment ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ภายหลังจากขึ้นรูปด้วยวิธี SLM ที่สามารถลดความเค้นตกค้าง (residual stress) และลดสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปในทิศทางที่แตกต่างกัน

ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experimental research) โลหะผสมที่ใช้ครั้งนี้เป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ใช้ในงานทันตกรรม โดยเตรียมชิ้นงานโลหะขนาด 10 mm.x10 mm.x 2 mm. แล้วทดสอบอัตราการกัดกร่อนในน้ำลายเทียม โดยจำลองในสภาวะปกติ และสภาวะที่น้ำลายมีความเป็นกรด รวมถึงดูอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีการให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติการกัดกร่อนของโลหะ และดูการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM)

ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรอิสระ

วิธีการผลิตชิ้นงานโลหะผสม ทิศทางการขึ้นรูป อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อน

ตัวแปรตาม

ตัวแปรตาม คือ ปริมาณไอออนของโลหะในสารละลาย

ตัวแปรควบคุม

ขนาดของชิ้นงานโลหะ, พื้นที่ทดสอบของชิ้นงานโลหะ, กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบสุญญากาศ (Vacuum Heat), ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายทดสอบ, ระยะเวลาการทดสอบ, อุณหภูมิการแช่โลหะในสารละลาย

ภูมิหลัง

โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทันตกรรม ทั้งในงานบูรณะฟันปลอมบางส่วนชนิดถอดได้ (removable partial denture) และฟันปลอมชนิดติดแน่น (fixed prosthodontics) เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี ทนต่อการกัดกร่อน และมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเนื่องจากไม่มีนิเกิลจึงถูกนำมาใช้ในคนที่แพ้โลหะนิเกิล (Ni) โดยในปัจจุบันยังคงใช้การผลิตแบบดั้งเดิม (Conventional) ที่มีหลายขั้นตอนและใช้เวลานาน ซึ่งมีขั้นตอนหลัก คือ การพิมพ์ปากและเทปูนได้แบบจำลอง เพื่อนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีหล่อแบบขี้ผึ้ง (Lost wax technique) ความถูกต้องของงานที่ผลิตด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของรอยพิมพ์ และความชำนาญของช่างทันตกรรม และสามารถเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากมีหลายขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

วัสดุทันตกรรมชนิดโลหะต้องพบเจอกับปัจจัยทางชีวภาพหลายอย่างในช่องปาก ที่ประกอบไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำลาย การควบคุมสมดุลความเป็นกรดต่างในน้ำลาย การกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนอย่างมาก โดยสมบัติการกัดกร่อนของโลหะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของโลหะ โครงสร้างจุลภาค ลักษณะของพื้นผิวโลหะ สิ่งเจือปนและจุดบกพร่องบนผิวโลหะ เป็นต้น ส่งผลต่อสมบัติทางกลที่สัมพันธ์กับความแข็งแรง ความสวยงาม และเกิดความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ

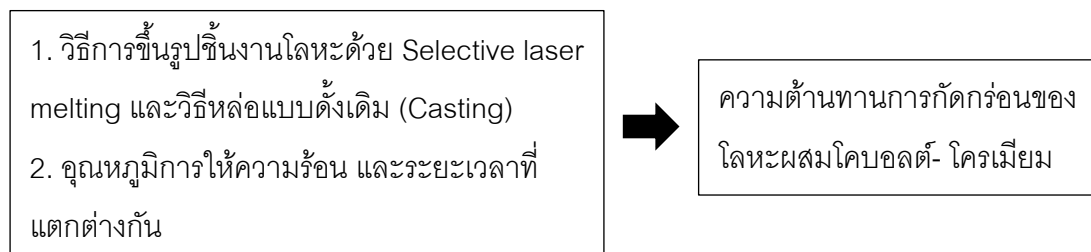
ปัจจุบันได้มีความพยายามนำเทคโนโลยีแคด-แคม (CAD/CAM, Computer-aided design/Computer-aided manufacturing) มาประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรมกับทันตวัสดุใหม่ ๆ มากขึ้นทั้งในงานฟันปลอมชนิดติดแน่น, งานฟันปลอมบนรากเทียม รวมถึงนำมาประยุกต์ใช้ในงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้เช่นกัน นำมาสู่การใช้เทคโนโลยีผลิตชิ้นงานโลหะโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computer numerical control, CNC) เพื่อทำการผลิตชิ้นงานให้ได้ขนาดและรูปทรงที่ต้องการด้วยการกลึงที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง แต่เนื่องจากวิธีมีข้อเสียคือ ความยากในการกลึงรูปร่าง

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่ต้องการความคอดนั้นจะไม่สามารถกลึงได้ มีการใช้วัสดุที่ค่อนข้างสิ้นเปลือง และก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศจากขั้นตอนการกลึง ส่วนอีกวิธีหนึ่งที่มีเริ่มมีการใช้ในปัจจุบันมากขึ้น คือ วิธี Additive manufacturing หรือ rapid prototyping หรือ 3D printing โดยจะใช้กระบวนการของแสงเลเซอร์พลังงานสูงสร้างชิ้นงานทีละชั้น เรียกกระบวนการนี้ว่าการใช้เลเซอร์เผาผนึก (Laser sintering) โดยเทคนิค selective laser melting (SLM) เป็นการนำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มข้นสูงเผาผนึกกับผงโลหะบนแผ่น metal powder plate ในตู้ที่บรรจุด้วยก๊าซเฉื่อย เพื่อลดระดับออกซิเจนให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ทำให้ป้องกันการเกิด oxidation ที่จะเกิดขึ้นกับโลหะเหล่านี้ได้

วิธีการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย selective laser melting จะให้ความร้อนแก่โลหะจนละลายและโลหะที่หลอมเหลวจะเย็นลงและแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเสร็จสิ้นหนึ่งชั้นและกระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำทีละชั้นเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ มีการศึกษาที่รายงานว่าวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี SLM ทำให้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมได้รับการพัฒนาให้มีความแข็งแรงมากกว่าวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม จากข้อบกพร่องของโลหะที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมที่มีความหยาบของโครงสร้างระดับจุลภาค การหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานและมีรูพรุนในโลหะ ซึ่งนำไปสู่การลดลงของสมบัติเชิงกล อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย วิธี SLM ด้วยทิศทางที่ต่างกันนั้นจะส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) คือกระบวนการที่ช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ทำให้เหล็กมีความสมมาตรและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากยิ่งขึ้น มีการศึกษาถึงทิศทางการขึ้นรูปด้วยวิธี SLM ที่ให้ความแข็งแรงแตกต่างกันเมื่อขึ้นรูปในทิศทางที่ต่างกัน จากการขึ้นรูปโลหะผสมด้วยวิธี SLM โลหะจะเกิดการหลอมเหลวและเย็นตัวอย่างรวดเร็วซ้ำ ๆ กัน เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมของความเค้นตกค้าง (residual stress) ปริมาณมากในโลหะแล้วส่งผลให้เกิดการเสียรูปของวัสดุ (Deformation) ดังนั้นกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) จึงมีบทบาทสำคัญในการลดความเค้นสะสม (residual stress) ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ใน Heat treatment ในวัสดุแต่ละชนิดมีค่าที่ต่างกันขึ้นกับจุดหลอมเหลวและองค์ประกอบของโลหะชนิดนั้น ๆ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ Heat treatment ในการขึ้นชิ้นงานโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมด้วยวิธี SLM ยังไม่พบการศึกษาของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะได้ดีที่สุด

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

สมมติฐานการวิจัย

สมมติฐานที่ 1

H_0 : แนวการขึ้นรูปที่ต่างกันของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ไม่มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

H_1 : แนวการขึ้นรูปที่ต่างกันของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

สมมติฐานที่ 2

H_0 : รูปแบบของกระบวนการทางความร้อนที่ต่างกันไม่มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

H_1 : รูปแบบของกระบวนการทางความร้อนที่ต่างกันมีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

บทที่ 2

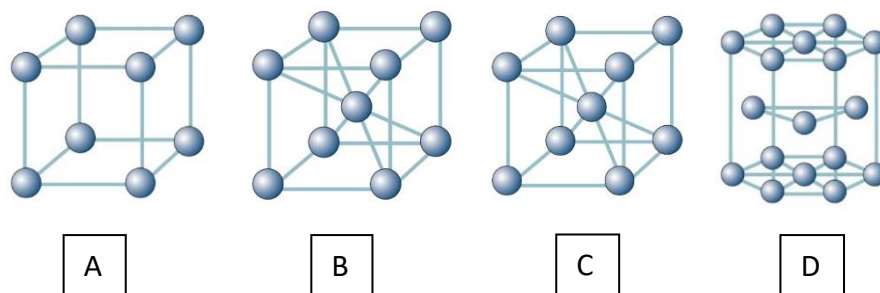
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. โลหะผสมที่ใช้ในทางทันตกรรม
2. โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม
3. เครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติ
4. การกัดกร่อน (Corrosion)
5. Inductively Coupled plasma-Optical Emission spectrometry
6. กรรมวิธีการทางความร้อน (Heat treatment)
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะผสมที่ใช้ในทางทันตกรรม

โลหะผสม คือ โลหะที่มีส่วนผสมของธาตุโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป และอาจจะมีธาตุที่ไม่ใช่โลหะผสมผสมอยู่ด้วย เช่น คาร์บอน ซึ่งการผสมกันระหว่างโลหะกับโลหะ หรือ โลหะกับธาตุอื่น ๆ หรือ อโลหะ (Non- metallic) จะเรียกว่า สารละลายแข็ง หรือ Solid solution โดยการละลายตัวผสมกันของโลหะกับโลหะ หรือ โลหะกับอโลหะนั้น จะมีความสามารถในการเรียงตัวของอะตอมที่อาจจะเป็นเนื้อเดียวกันหรือ มีการกระจายตัวของอย่างไม่สม่ำเสมอได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ขนาดอะตอม, น้ำหนักโมเลกุล และความสามารถในการเรียงตัวเป็นผลึก รูปแบบต่าง ๆ ซึ่งโครงร่างผลึกในโลหะทางทันตกรรมนั้นมักจะอยู่ในรูปแบบของผลึก การเรียงตัวของอะตอมก็必将มีความแตกต่างกันในแต่ละธาตุ จึงทำให้มีรูปแบบของผลึกที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น Face centered cubic, Body centered cubics Hexagonal closed packed และอื่น ๆ เป็นต้น ความสำคัญของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันนี้มีผลทำให้โลหะผสมนั้น ๆ มีสมบัติที่ต่างกันและมีสมบัติเฉพาะ ⁽¹⁾



ภาพประกอบ 2 การจัดเรียงของอะตอมของโลหะ

A: Simple cubic. B: Body-centered. C: Face-centered cubic. D: Hexagonal⁽¹⁾

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเลือกใช้โลหะผสมในงานทันตกรรม คือ สมบัติทางกายภาพ ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ทำให้โลหะผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์โดยจะไม่เกิดการบิดงอขณะที่มีแรงมากระทำ รวมถึงราคาที่ถูกกว่าโลหะที่ผสมทองและความต้านทานการกัดกร่อน โดยในอดีตในงานทันตกรรมติดแน่นจะนิยมใช้โลหะผสมทองเนื่องด้วยสมบัติด้านการกัดกร่อนที่ดี และมีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ดี ต่อมามีการใช้โลหะผสมแพลลาเดียม ที่ให้ความแข็งสูง (hardness) และมีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นใกล้เคียงกับโลหะผสมทอง แต่เนื่องด้วยโลหะผสมทั้งสองกลุ่มมีราคาที่สูง ทำให้มีการใช้โลหะผสมทั้งสองกลุ่มนี้ลดลง⁽²⁾

ปัจจุบันมีการใช้โลหะผสมไร้สกุลอย่างกว้างขวางมากขึ้น เช่น โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม หรือ โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม เนื่องด้วยสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพที่ดีเช่นกัน ซึ่งจะพิจารณาเหมาะสมในงานนั้น ๆ อย่างเช่น อุณหภูมิในการหลอมเหลว (melting temperature) ของโลหะผสมที่มีช่วงการหลอมเหลวที่แตกต่างกันไปตามโลหะที่เป็นองค์ประกอบ, การหดตัวในขณะที่ขึ้นรูป (casting shrinkage), ความหนาแน่นของโลหะ (density), ความต้านทานต่อการหมอง (tarnish resistance), สำหรับสมบัติทางกลนั้น พิจารณาความแข็งผิว (hardness) เพื่อต้านทานต่อการสึกกร่อน การยืดตัว (elongation) ของโลหะผสมในงานทันตกรรมฟันปลอมถอดได้ ซึ่งโลหะที่มีค่าการยืดตัวสูงจะทำให้สามารถตัดได้ง่าย แต่จะมีค่าความเปราะลดลง รวมถึงความแข็งแรงที่ต่ำลงเช่นกัน , กำลังดึงประลัย (ultimate tensile strength) ใช้กำหนดความแข็งแรงโดยรวมของวัสดุเพื่อต้านต่อแรงบิดเคี้ยว, ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เป็นค่าระดับความแกร่ง (stiffness) ต่อความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ และที่สำคัญคือความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ (biocompatibility) ซึ่งโลหะผสมบางชนิดมี

องค์ประกอบของโลหะที่เป็นพิษต่อร่างกาย เช่น นิกเกิล (nickel), ปรอท (mercury) และ เบริลเลียม (beryllium) ซึ่งพบอุบัติการณ์ของการแพ้และเป็นสารก่อมะเร็ง⁽³⁾

โลหะผสมนิกเกิล-โคโรเมียม นิยมนำมาใช้งานทันตกรรม แต่พบว่าเป็นพิษต่อร่างกายจากการที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ทำให้มีอุบัติการณ์การแพ้ในโลหะที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบค่อนข้างสูง จึงเป็นข้อควรระวังโดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีประวัติแพ้ นิกเกิล โลหะผสม โคบอลต์-โคโรเมียมจึงถูกใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น⁽⁴⁾

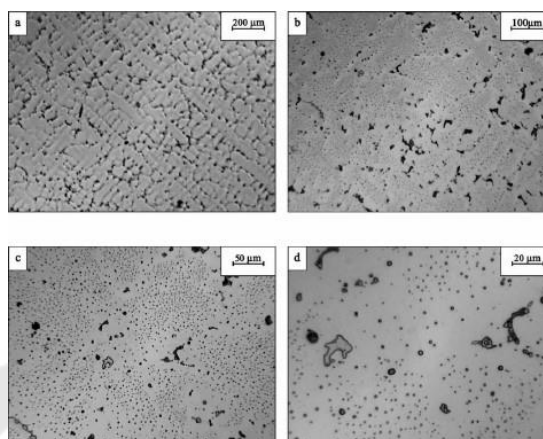
โลหะผสมโคบอลต์-โคโรเมียม

โลหะผสมโคบอลต์-โคโรเมียม เป็นโลหะผสมที่เข้ากับเนื้อเยื่อช่องปากได้ดี เนื่องจากไม่มีทั้งนิกเกิล และ เบริลเลียมแต่มีข้อด้อย คือ การเหวี่ยงที่ทำได้ยาก เนื่องจากมีความแข็งผิวและความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีชั้นออกไซด์ที่ผิวมากกว่ากลุ่มโลหะผสมนิกเกิลแต่มีความสามารถการนำไฟฟ้าที่ต่ำ นิยมนำมาใช้ในโครงโซ่ในงานฟันเทียม บางส่วนชนิดถอดได้ ประกอบด้วย โคบอลต์ร้อยละ 60 โดยมวล และ ปริมาณโคโรเมียมในสัดส่วนร้อยละ 30 โดยมวล โดยมีโคบอลต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งผิว สภาพยืดหยุ่นมอดุลัส และความแกร่งของโลหะ สำหรับโคโรเมียมจะทำหน้าที่ช่วยให้โลหะทนต่อการหมองและการสึกขณะใช้งาน องค์ประกอบอื่น คือ โมลิบดีนัม (molybdenum) และ ซิลิกอน (silicon) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งผิวโดยการลดขนาดเกรนให้เล็กลง เหล็ก, แมงกานีส และคาร์บอน ที่ช่วยทำให้ความแข็งแรงและความแข็งผิวเพิ่มขึ้น และลดปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะหลอมเหลวจากการมีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ^(3, 5)

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โคโรเมียม

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โคโรเมียมขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการสร้างชิ้นงานโลหะ โดยในกรรมวิธีการสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการ หล่อโลหะ (casting) โครงสร้างจุลภาคแสดงส่วนประกอบของสารละลายแข็ง (solid solution) และ โครงสร้างผลึกที่เรียงตัวกันมีรูปร่างแบบเดนไดรต์ (dendritic microstructure) เนื่องจากมีการเย็นตัวอย่างช้า ๆ โดยในบริเวณเดนไดรต์และรอยต่อของเดนไดรต์ เป็นส่วนของ intermetallic phases ที่วางตัวไปตามขอบเกรน ประกอบด้วย โครงสร้างผลึกที่เป็น Face centered cubic (fcc) และ Hexagonal closed packed (hcp) โดยพบว่าเมื่อปล่อยให้ โคบอลต์เย็นตัวลงจากอุณหภูมิที่สูง จะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟส (phase transformation) ของโคบอลต์ จาก Face centered cubic (fcc) เปลี่ยนเป็น Hexagonal closed packed (hcp) ที่อุณหภูมิประมาณ 420 องศาเซลเซียส พบว่าโคโรเมียมและโมลิบดีนัมจะเกิดความเสถียรที่เฟส hcp และเมื่อมีเฟส hcp เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณไอออนของโลหะที่ถูก

ปล่อยออกมามากลง เป็นสาเหตุที่โลหะผสมที่ประกอบด้วยเฟส hcp จำนวนมาก ทำให้โลหะชนิดนั้น มีสมบัติด้านการกัดกร่อนที่ดี⁽⁶⁾



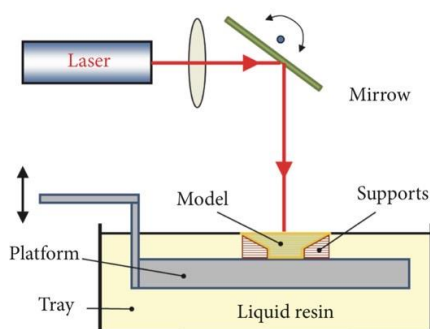
ภาพประกอบ 3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม⁽⁷⁾

เครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติ

การพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว หรือ rapid prototyping (RP) เป็นวิธีการสร้างชิ้นงานที่ได้รับ ความนิยมและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในหลากหลายด้าน เช่น ทางด้านวิศวกรรม, สถาปัตยกรรม ประดิษฐ์อุปกรณ์ทางการแพทย์ และรวมถึงในทางทันตกรรมด้วยเช่นกัน โดยเครื่องพิมพ์ต้นแบบ สามมิติมีหลักการการทำงานที่หลากหลายขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งาน สามารถจำแนก ตามวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน⁽⁸⁾

การขึ้นรูปด้วยการใช้ของเหลว (liquid based)

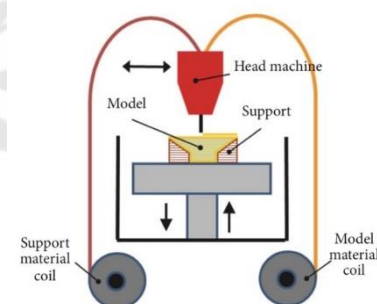
การขึ้นรูปที่ใช้หลักการของของเหลว โดยวัสดุของเหลวที่ใช้คือกลุ่มของ Resin ที่ จัดเป็น Photopolymer ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวเมื่อได้รับรังสี Ultraviolet (UV) หรือลำแสงเลเซอร์ในความยาวคลื่นช่วงที่กำหนด เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้หลักการขึ้นรูป ชิ้นงาน ได้แก่ เครื่องพิมพ์ต้นแบบสเตอริโอลิโทกราฟี (stereolithography Apparatus, SLA) ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์สามมิติเครื่องแรกของโลกที่คิดค้นโดยนักประดิษฐ์ ชาร์ล ฮัล (Charles Hull) ซึ่ง ออกแบบเครื่องพิมพ์สามมิติให้กับบริษัท 3D Systems Corporation ใน ค.ศ. 1998 โดยจะสร้าง ชิ้นงานขึ้นทีละชั้นผ่านการใช้รังสี UV ฉายไปยังของเหลว resin ในแนวระนาบแกน x, y จนเกิดการ แข็งตัวในชั้นแรก หลังจากนั้นแพลตฟอร์มจะถูกเลื่อนในแนวตั้งตามแกน z จะได้รับความหนาของ ชิ้นงานจากการที่ของเหลวถูกทำให้แข็งตัวทีละชั้น



ภาพประกอบ 4 เครื่องพิมพ์แบบสเตอริโอลิโทกราฟี (Stereolithography Apparatus,SLA)⁽⁸⁾

การขึ้นรูปโดยใช้ของแข็ง (solid based)

การขึ้นรูปแบบพอก โดยใช้วัสดุเป็นเส้นพลาสติกที่มีหน้าตัดวงกลม นำมาให้ความร้อนจนกลายเป็นของเหลวเพื่อนำไปขึ้นรูปทีละชั้น ๆ เรียก การขึ้นรูปโดยการพอกพลาสติก (Fused Deposition Modeling, FDM) ถูกคิดค้นและพัฒนาโดย สกอตต์ ครัมป์ (Scott Crump) ในนามบริษัท Stratasys ในปี 1991 หลักการสร้างชิ้นงานโดยการหลอมเส้นพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบของเหลวและอยู่ภายใต้แรงดัน ให้สามารถผลัดออกมาทางหัวฉีดได้ จากนั้นควบคุมหัวฉีดให้เคลื่อนที่ตามระนาบแกน x, y ตามรูปแบบของชิ้นงานที่กำหนด และมีการเคลื่อนที่ของแพลตฟอร์มในแนวตั้ง ทำให้เกิดการฉีดทับขึ้นทีละในแนวแกน z



ภาพประกอบ 5 การขึ้นรูปโดยการพอกพลาสติก (Fused Deposition Modeling, FDM)⁽⁸⁾

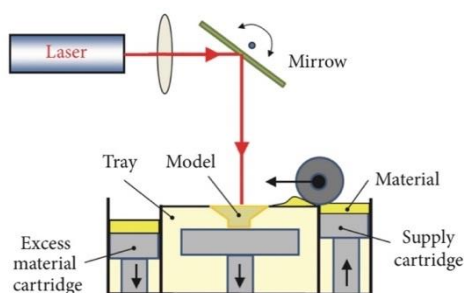
การขึ้นรูปโดยใช้ผงฝุ่น (powder based)

การขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ผงเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอาจจะเป็นผงพลาสติก ผงเซรามิก หรือผงโลหะ ตามชนิดงานที่ทำ แล้วใช้พลังงานจากเลเซอร์ที่มีกำลังสูงฉายไปยังผิวของผงวัตถุดิบจนทำให้เกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันในชั้นแรก และมีการเลื่อนของชั้นแพลตฟอร์มให้สามารถขึ้นชิ้นงานได้ที่ละชั้นตามรูปร่างที่กำหนดไว้ การเลือกใช้เครื่องพิมพ์ประเภทใดนั้น ต้องเลือกให้

เหมาะสมกับการใช้งาน แต่สำหรับเครื่องพิมพ์ชนิดนี้มีข้อได้เปรียบ คือ ความหลากหลายของวัสดุที่จะนำมาใช้

1. การขึ้นรูปแบบผงร่วมกับเลเซอร์ซินเตอร์ริง (Powder Based Selective laser sintering, SLS)

เทคโนโลยีการพิมพ์โดยอาศัยเลเซอร์เพื่อใช้ในการหลอมเหลวผงวัสดุร่วมกับเลเซอร์ซินเตอร์ริงได้ถูกพัฒนาจากมหาวิทยาลัยเทกซัส (Texas University) ในปี ค.ศ. 1980-1991 ความสามารถในการขึ้นชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงถึง 0.15 มิลลิเมตร SLS เป็นการนำเลเซอร์ CO₂ หลอมผงที่มีพื้นฐานมาจากพอลิเมอร์ หรือ ไนลอน (non-metallic material) เข้าด้วยกันเพื่อขึ้นรูปวัสดุ ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการเกลี่ยผงของวัสดุให้ทั่วบริเวณแล้ว ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงไปตามแนวแกน x, y ตามรูปร่างของชิ้นงานที่ออกแบบผงจะถูกหลอมละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันในชั้นแรก และตามด้วยการเลื่อนของแพลตฟอร์มลงให้เกิดการหลอมละลายผงทีละชั้นขึ้นในแนวตั้ง เมื่อเกิดการหลอมรวมวัสดุจึงทำให้วัสดุมีความแข็งแรงในระดับหนึ่ง

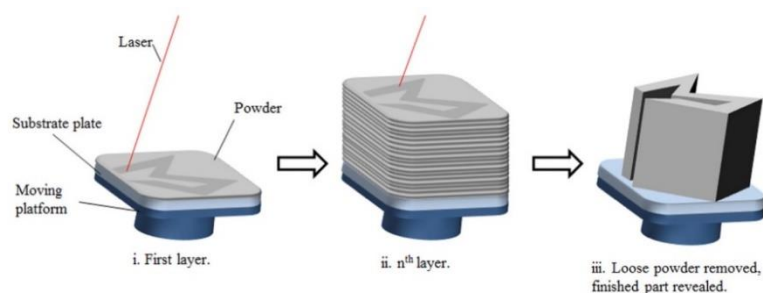


ภาพประกอบ 6 การขึ้นรูปแบบผงร่วมกับเลเซอร์ซินเตอร์ริง⁽⁶⁾

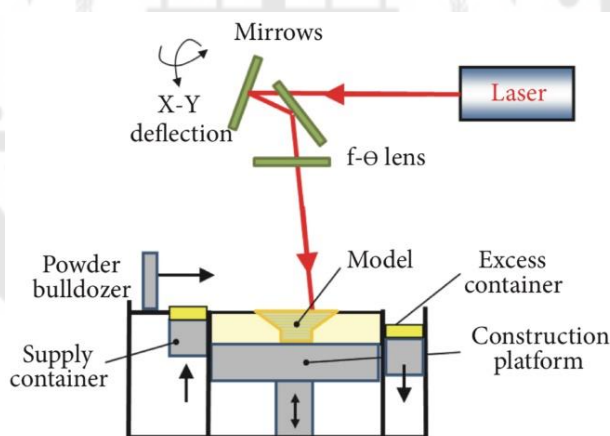
2. การขึ้นรูปแบบผงร่วมโดยทำการหลอมเหลวทั้งหมด (Powder Based Selective Laser Melting, SLM)

Selective Laser Melting (SLM) จะมีความคล้ายคลึงกับวิธีการ Selective laser sintering (SLS) นั่นคือการใช้เลเซอร์ยิงไปยังผงวัสดุแล้วใช้ความร้อนหลอมรวมในการขึ้นรูป ความแตกต่างนั่นคือวัสดุที่ใช้เป็นผงโลหะ วิธีการนี้ทำให้การสร้างชิ้นงานสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง จากการออกแบบชิ้นงานผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ (3D CAD model) ถูกนำมาใช้ในการสร้างชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน จึงมีการใช้เทคนิค SLM อย่างกว้างขวางทั้งด้านการแพทย์รวมถึงงานทันตกรรม เช่น การนำมาผลิตเป็นโครงโลหะในงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ หรือในงานครอบฟันโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่

เตรียมด้วยวิธี SLM ในการสร้างชิ้นงานโครงโลหะของฟันปลอมถอดได้บางส่วน หรือโครงโลหะที่รองรับรากเทียม ที่ให้สมบัติเชิงกล และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดยการทำงานเริ่มต้นจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดตกกระทบกระจกเพื่อบังคับทิศทางและสะท้อนผ่านไปยังเลนส์ F-theta ไปยังผิวของวัสดุผง แล้วทำการเคลื่อนที่เลเซอร์เป็นรูปพื้นที่หน้าตัดตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อให้ผงวัสดุหลอมเหลว จากนั้นทำการเคลื่อนที่แพลตฟอร์มฐานรองรับชิ้นงานลงในแนวแกน Z และลูกกลิ้งจะทำหน้าที่กวาดผงมาเติม จากนั้นทำการหลอมเหลวในชั้นถัดไปที่ละชั้น (layer)



ภาพประกอบ 7 รูปแบบการทำงานของ Selective Laser Melting (SLM)⁽⁹⁾



ภาพประกอบ 8 การขึ้นรูปแบบ Powder Based Selective Laser Melting, SLM⁽⁸⁾

ชิ้นงานที่สร้างด้วยวิธี SLM จะถูกผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่มีซับซ้อน เริ่มจากการให้ความร้อนให้เกิดการหลอมละลายซ้ำและตามด้วยการถูกทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกระบวนการสร้างชิ้นงานจึงนำมาสู่ข้อเสียประการหนึ่งของ SLM คือ ชิ้นงานที่ผลิตโดย SLM จะเกิดการสะสมความเครียดตกค้าง (residual stress) ได้ง่าย⁽¹⁰⁾ เนื่องจากวัสดุผ่านการให้ความร้อนและความเย็นอย่างรวดเร็วในระหว่างการผลิต ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในมิติการผลิตและสมบัติทางกลของชิ้นงาน ดังนั้นขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อน ด้วยการให้ความ

ร้อนหลังการผลิตจึงมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อลดความเครียดในชิ้นงานที่ตักค้ำและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคซึ่งอาจส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนได้^(11, 12)

การกัดกร่อน (Corrosion)

การกัดกร่อน คือ กระบวนการที่โลหะเกิดการสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะนั้น ๆ จากการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมของโลหะ ที่เกิดจากการที่โลหะทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมนั้น ๆ โดยมักพบบ่อยที่พื้นผิวโลหะจากการมีความเค้นหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ในโครงสร้างระหว่างแกรนูล (Intergranular impurities)

การกัดกร่อนในทางทันตกรรม กล่าวถึงการเสื่อมสลายของวัสดุอย่างค่อยเป็นค่อยไปจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อมีวัสดุทางทันตกรรมภายใต้สภาวะละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่องปาก การกัดกร่อนเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) ของโลหะ และเมื่อธาตุในโลหะผสมเกิดไอออน (ionize) ทำให้เกิดการกัดกร่อนในโลหะผสมนั้น ซึ่งเมื่อมีการสูญเสียอะตอมเป็นไอออนหลุดออกมา หรือการสูญเสียอิเล็กตรอน ทำให้ธาตุนั้นกลายเป็นประจุบวก และถูกปล่อยออกมาในสภาวะละลาย โดยสมบัติการกัดกร่อนของโลหะจะขึ้นอยู่กับพันธะโลหะของอะตอมกลางและอิเล็กตรอนที่จะจับกันได้อย่างเหนียวแน่นเมื่อมีพลังงานมากกระตุ้น ซึ่งหากพันธะโลหะนั้นมีความแข็งแรงสามารถทำให้อะตอมยึดอยู่อย่างแน่น เมื่อมีพลังงานที่มาสลายพันธะที่ต่ำ (salvation energy) จึงทำให้โลหะนั้นเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ตัวอย่างเช่น ทอง และ แพลตินัม⁽¹⁾

การกัดกร่อนสามารถเกิดได้กับโลหะเกือบทุกชนิด โดยโลหะแต่ละชนิดจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายแตกต่างกันขึ้นกับส่วนประกอบของโลหะ เฟสในโครงสร้างจุลภาค (microstructure phases) อิเล็กโทรดโพเทนเชียล (electrode potentials) ลักษณะพื้นผิวของโลหะ รวมถึงสิ่งเจือปนหรือจุดบกพร่องบนผิวโลหะ เป็นต้น โดยในโลหะที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลายเฟส หรือมีส่วนผสมของโลหะไร้สกุล มักจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าโลหะที่มีเฟสเดียวหรือโลหะมีสกุล ยกเว้นในโลหะผสมไททาเนียมและโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

ในช่องปากสามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายจากน้ำลายที่อุณหภูมิร่างกาย (37°C) และในสภาวะความเป็นกรดของน้ำลายที่มีความเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และยังขึ้นอยู่กับระดับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ ซึ่งอาจมาจากการสะสมคราบ

จุลินทรีย์ แบคทีเรีย หรือ สภาวะความเป็นกรดที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวของโลหะ

น้ำลายประกอบไปด้วยเอนไซม์ไกลโคโปรตีน แร่ธาตุหลากหลาย เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม คลอไรด์ ฟอสเฟต ไบคาร์บอเนต แมกนีเซียม และซัลเฟต ที่ช่วยรักษาสมดุลความเป็นกรดและด่าง รวมถึงควบคุมการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ในช่องปาก ซึ่งโดยสภาวะปกติแล้ว น้ำลายจะถูกรักษาให้มีค่าความเป็นกรดต่างที่ pH ช่วงระหว่าง 6-7 ซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสมดุลกรดต่างจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นหรือ มีการเคลื่อนไหวของน้ำลายน้อยลงได้ และสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีได้อย่างมากขึ้นกับ อายุ เพศ ช่วงเวลาในแต่ละวัน และที่สำคัญคือ พฤติกรรมการรับประทานอาหาร และพฤติกรรมการดูแลสุขภาพช่องปาก โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในช่องปาก สามารถแบ่งได้เป็นระยะสั้น ๆ และระยะยาว ยกตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น เช่น การรับประทานอาหารที่มีความเป็นกรดสูง โดยมีค่า pH โดยประมาณ 2-3 หรือจากสภาวะเกิดการหดไหลย้อน ที่มีค่า pH โดยประมาณ 1 ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดในระยะยาว เช่น การสะสมของคราบจุลินทรีย์ ที่พื้นผิวของโลหะ (pH 4-4.5) หรือตามหลุมร่องลึกของวัสดุบูรณะ เป็นต้น⁽¹³⁾

ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะจะขึ้นอยู่กับการมีฟิล์มมาปกคลุม (passive film) ซึ่งจะเกิดได้ในสภาวะที่เหมาะสม อย่างเช่นบริเวณที่มีออกซิเจนจะทำให้เกิดการสร้าง passive film ตรงกันข้าม ในสภาวะความเป็นกรดจะทำให้ passive film หายไป จึงสรุปได้ว่า หากช่องปากมีความเป็นกรดจะเร่งให้เกิดอัตราการกัดกร่อนของโลหะให้เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ไอออนของโลหะถูกปลดปล่อยออกมาในช่องปากมากขึ้นเช่นกัน^(1, 14, 15)

ชนิดของการกัดกร่อน (Types of corrosion)⁽¹⁾

การกัดกร่อนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางนั้นคือ การแบ่งตามสภาพแวดล้อมที่เกิด ซึ่งแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. การกัดกร่อนทางเคมี (Chemical corrosion or dry corrosion) การกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีน้ำมาเกี่ยวข้อง เช่น โลหะเงินที่เกิดการเปลี่ยนสีเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเกิดซิลเวอร์ซัลไฟด์

2. การกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical corrosion or wet corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่สภาพแวดล้อมมีส่วนช่วย โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นสภาพแวดล้อมที่มีน้ำปนอยู่ด้วย ยกตัวอย่างเช่น โลหะที่อยู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือของเหลวที่เต็มไปด้วยไอออน เช่น น้ำ น้ำเกลือ กรด และด่าง เป็นต้น ซึ่งมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction)

ทำให้โลหะผุกร่อนได้ ซึ่งในช่องปากเป็นสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นตลอดเวลาจากน้ำลาย จึงจัดอยู่ในการกัดกร่อนชนิดนี้ โดยน้ำลายทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยสมบัติทางเคมีของน้ำลายก็ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำลาย ความเข้มข้นของน้ำลาย ค่าความเป็นกรดต่าง ความตึงผิว และความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของน้ำลาย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนของโลหะทั้งสิ้น

โดยทั่วไปแล้วการกัดกร่อนที่มักพบในชีวิตประจำวันจะเป็นการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี หรือ Wet corrosion เกิดการที่โลหะแตกตัวเป็นไอออน (Ion) ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างโลหะ โดยผ่านอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นต้องมีองค์ประกอบด้วยขั้วแอโนด (Anode) คือ ไอออนขั้วลบ ที่มาจากโลหะที่ถูกละลายออกมา และ ขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นประจุไอออนขั้วบวกของไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion) ในสารละลาย และต้องมีทางให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร ไอออนจากโลหะเป็นขั้วลบ (Anode) จะละลายเป็นไอออนประจุบวก (Positive ion) ในอิเล็กโทรไลต์ และเคลื่อนไปหาขั้วแคโทด (Cathode) จึงทำให้เกิดการสึกกร่อนที่บริเวณขั้วแอโนด (Anode)

ซึ่งโดยปกติแล้ว ในอิเล็กโทรไลต์จะมี Hydrogen ion ทำปฏิกิริยารวมกันเป็นโมเลกุล ซึ่งก็คือแก๊สไฮโดรเจน เกาะตัวอยู่บริเวณขั้วแคโทด (Cathode) ทำให้ไอออนประจุลบจากโลหะไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปได้ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีถูกยับยั้ง ซึ่งทำให้การกัดกร่อนหยุดลงด้วย เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Polarization แต่อย่างไรก็ตามปกติแล้วในน้ำหรือกรดที่สัมผัสกับอากาศจะมีออกซิเจน (Oxygen) ละลายอยู่ด้วยเสมอ แล้วเกิดการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิดเป็นน้ำ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Cathodic Depolarization ซึ่งทำให้แก๊สไฮโดรเจนที่เกาะบริเวณขั้วแคโทดหายไป ไอออนประจุลบสามารถกลับมายังเข้าหาขั้วแคโทดได้ดังเดิม การกัดกร่อนจึงเกิดขึ้นได้อีก

รูปแบบการกัดกร่อน

ลักษณะของการกัดกร่อน แบ่งตามสาเหตุที่เกิดและแบบหรือรูปที่เรามองเห็นดังนี้

1. Uniform Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปตลอดพื้นผิวของโลหะ ซึ่งส่งผลให้โลหะมีความบางลงอย่างสม่ำเสมอ มีอัตราการกัดกร่อนที่คงที่
2. Pitting Corrosion คือการกัดกร่อนเกิดเป็นจุดเล็ก ๆ ในแถวเล็ก โดยช่วงแรกการกัดกร่อนจะเกิดที่ผิวโลหะเฉพาะตำแหน่ง และจะเพิ่มอัตราการกัดกร่อนเข้าสู่เนื้อโลหะ เกิดลักษณะเป็นรูเข็มและมีความลึกในบริเวณนั้น จัดเป็นการกัดกร่อนที่อันตรายมากเนื่องจากบางครั้งการกัดกร่อนลักษณะรูเข็มมีขนาดเล็ก เราไม่สามารถมองเห็นได้ และมักพบบ่อยกับโลหะที่

มีการสร้างฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อน แต่เมื่อฟิล์มเกิดการแตกออกในบางบริเวณก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่แล้วลึกลงไปกลายเป็นลักษณะรูเข็ม

3. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะสองชนิดหรือมากกว่านั้นสัมผัสภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าระหว่างโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน โดยโลหะที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นแอโนด (Anode) และถูกกัดกร่อนง่ายกว่า ส่วนโลหะที่มีค่าความต่างศักย์สูงกว่าจะทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า นั่นคือขั้ว Cathode ดังนั้นความต่างศักย์ของโลหะยิ่งมาก จะทำให้อัตราการกัดกร่อนยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย

4. การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress corrosion) เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่พบได้มากที่สุดณวัสดุที่ใช้บูรณะในงานทันตกรรม ซึ่งเกิดจากผลร่วมกันระหว่างความเค้นที่ตกค้างอยู่ในโลหะและสภาพแวดล้อมที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosive environment) โดยเฉพาะหากโลหะมีรูพรุนหรือรอยแตกก็จะสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้น

5. การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้นหรือการกัดกร่อนใต้รอยข้อ (Concentration cell corrosion or crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่พบบ่อยในบริเวณที่เป็นช่องแคบ ใต้รอยต่อ หรือพื้นที่ที่สารละลายไหลเวียนได้ไม่สะดวก ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของออกซิเจนในร่องแคบที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน หรือบริเวณที่แคบ และไม่มี การถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนสารละลายภายในบริเวณที่แคบกับภายนอกไม่เท่ากัน เมื่อออกซิเจนลดลงจะส่งผลให้โลหะในบริเวณนั้นมีศักย์ไฟฟ้าต่ำลงและถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่า ถือเป็นงานทันตกรรม เช่น บริเวณด้านประชิดของโลหะของโครงโลหะในฟันปลอมถอดได้บางส่วน หรือบริเวณใต้ฐานโลหะ หรือรอยต่อของวัสดุ และบริเวณที่เป็นหลุมร่องลึกหรือมีรูพรุนบนพื้นผิวโลหะ

วิธีการทดสอบการกัดกร่อน ^(1, 16, 17)

1. การทดสอบแบบแช่ (immersion test)

การทดสอบแบบจุ่มถือเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ประเมินพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะในสารละลาย เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่ทำได้ง่าย โดยการนำตัวอย่างโลหะจุ่มลงในสารละลายตามระยะเวลาที่กำหนด แล้ววัดปริมาณไอออนโลหะที่ละลายออกมาหรือทดสอบหามวลที่สูญหายไป วิธีนี้ช่วยสะท้อนอัตราการสึกกร่อนในสภาวะคงที่และให้ข้อมูลด้านเสถียรภาพของโลหะ เหมาะสำหรับการเลือกใช้วัสดุในเบื้องต้น ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ให้มีความชัดเจนเพื่อให้สามารถทำการทดสอบซ้ำได้ตามมาตรฐาน ตัวแปรที่กำหนด เช่น ส่วนประกอบของสารละลาย ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย คุณสมบัติของสารละลาย ปริมาตรของสารละลาย รวมถึงวิธีการเตรียมชิ้นงาน วิธีการแช่ชิ้นงานทดสอบ ระยะเวลาที่ทดสอบ และวิธีการทำความเข้าใจ

สะดวกขึ้นงานเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ การทดสอบแบบนี้จะสามารถประเมินการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะแบบกัลวานิก การกัดกร่อนแบบชอก การกัดกร่อนแบบรูเข็ม และการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นได้ โดย มาตรฐาน ISO 10271 กำหนดให้เตรียมชิ้นงานจุ่มลงในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อน คือ กรดแลคติก และสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ จากนั้นจึงนำสารละลายนี้ไปวัดความเข้มข้นของไอออนธาตุต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยออกมา

2. การทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical test)

การทดสอบโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) ถือเป็นวิธีที่นิยมในการประเมินการกัดกร่อนของโลหะผสมทางทันตกรรม โดยใช้ อิเล็กโทรดทั้งหมด 3 ตัว คือ อิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) ที่เตรียมจากโลหะผสมที่ต้องการศึกษาทางทันตกรรม ส่วนที่สองคือ เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (counter electrode) ซึ่งมักใช้โลหะแพลตินัม และส่วนที่สามคือ อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) เช่น Saturated calomel electrode (SCE) หรือ Saturated Ag/AgCl electrode) การทดสอบอาศัยโพเทนชิออสแตทควบคุมศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดตัวอย่างและอิเล็กโทรดอ้างอิงให้เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ จากศักย์ลบเป็นศักย์บวก โดยจะมีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential, E_{ocp}) เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงเริ่มแสดงด้วยอัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อนาที อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง อาจเป็นสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม, น้ำลายธรรมชาติ หรือน้ำลายเทียม หรือ สารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาการกัดกร่อน เช่น สารละลายฟูซายามา (Fusayama solution) สารละลายริงเกอร์ (Ringers solution) เป็นต้น

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟโพลาริเซชัน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถระบุค่าทางไฟฟ้าเคมีสำคัญแสดงทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}), ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}), ค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟ (Passive current density, i_p) และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ (Tranpassive potential, E_t) การเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนระหว่างโลหะผสมต่างชนิดภายใต้สภาวะในอิเล็กโทรไลต์เดียวกันสามารถทำได้จากค่าดังกล่าว โดยจะบอกได้ว่าโลหะผสมที่มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าหรือมีค่าทางไฟฟ้าเคมีสูงกว่าคือ จะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่า และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่า นอกจากนี้ค่า polarization resistance (R_p) ยังสามารถใช้ประเมินค่าความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะได้โดยพิจารณา

จากความชันของกราฟโพลาริเซชันในบริเวณใกล้ศักย์ไฟฟ้าวงจรปิด ซึ่งค่าความต้านทานยิ่งสูงจะสะท้อนถึงความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่า

3. การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นเกลือ (Cabinet Testing หรือ Salt Spray Testing)⁽¹⁸⁾

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นเกลือเป็นการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของโลหะ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นตู้ที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้พ่นน้ำเกลือ (Fog chamber) ที่ประกอบด้วยหัวพ่นน้ำเกลือ (Spray Nozzle) และแท่นวางชิ้นงานทดสอบ ส่วนที่สองคือห้องเครื่อง (Machine Chamber) ประกอบด้วยถังใส่น้ำเกลือ (Brine Tank) และอุปกรณ์ที่ควบคุมระดับน้ำเกลือ เกจวัดความชื้น (Pressure Humidifier) และเครื่องวัดอัตราการพ่นน้ำเกลือ (Flow rate Meter) ที่ถูกควบคุมผ่านแผงควบคุมการทำงานให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

ผลกระทบจากการกัดกร่อนของโลหะผสมทางทันตกรรม^(1, 19)

การกัดกร่อนของโลหะถือเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อความสำเร็จในงานทันตกรรมที่สามารถเกิดขึ้นได้กับโลหะทุกชนิด การเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนสามารถส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโลหะ ความสวยงาม และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดยเมื่อไอออนของโลหะถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการกัดกร่อน เมื่อมาสัมผัสกับเนื้อเยื่อของร่างกายสามารถทำให้เกิดอาการแพ้ เป็นพิษต่อเซลล์และเนื้อเยื่อของร่างกายตามมา อาจพบผู้ป่วยรู้สึกถึงรสโลหะในช่องปาก (Metallic taste) จากการปล่อยไอออนของโลหะ เกิดการเปลี่ยนสีของโลหะให้ดูหมอง มีความสัมพันธ์ต่อกระบวนการเกิดฟันผุ (Cariogenesis) โดยเมื่อเกิดการกัดกร่อนทำให้ผิวของโลหะบริเวณนั้นมีความขรุขระ ซึ่งสามารถส่งเสริมการสะสมของคราบจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเซลล์ความเข้มข้นได้

ปฏิกิริยาการแพ้และการเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ (Allergic hypersensitive reaction) เกิดขึ้นเมื่อมีไอออนของโลหะถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการกัดกร่อน ส่งผลต่อการเข้ากันได้ทางชีวภาพ ทำให้เกิดการแพ้ เกิดการระคายเคืองหรือการอักเสบต่อเนื้อเยื่อในช่องปากและร่างกาย มีความเป็นพิษต่อเซลล์ ซึ่งการแพ้ไอออนของโลหะนั้น ผู้ป่วยอาจจะมีอาการแพ้อยู่แล้ว หรือ อาจเกิดการแพ้เป็นครั้งแรกได้ ซึ่งจัดเป็น Type IV Hypersensitivity reaction (Cell mediated delayed hypersensitivity)

Inductively Coupled plasma-Optical Emission spectrometry

Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) เป็นการวิเคราะห์ทางเคมีที่มีความแม่นยำสูง ในการตรวจวัดปริมาณธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะโลหะหนักในตัวอย่างสารละลาย ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาวัสดุศาสตร์ ชีวการแพทย์ และทันตกรรม โดย

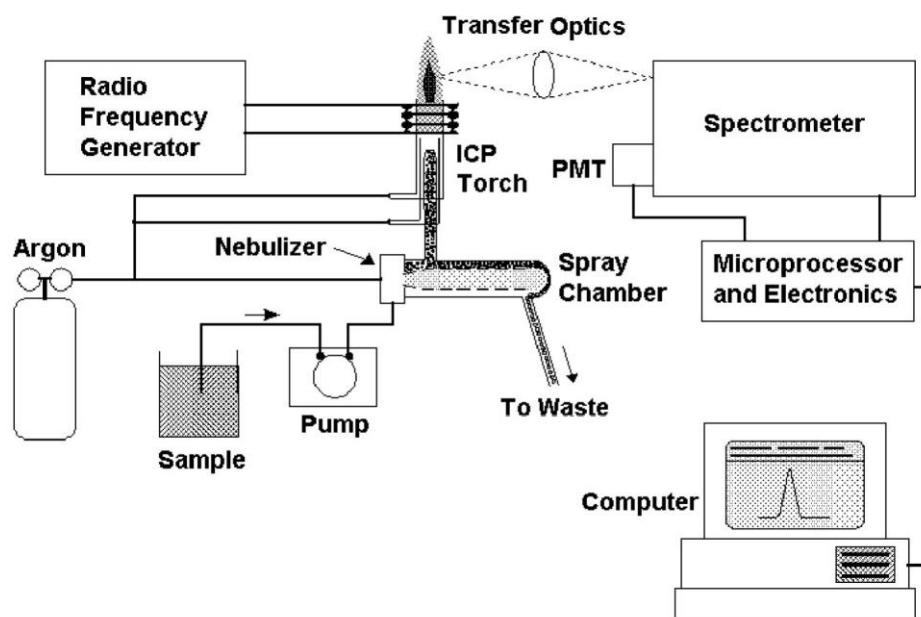
อาศัยการปล่อยแสงของอะตอมที่ถูกกระตุ้นพลังงานในพลาสมาอุณหภูมิสูง มีความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิดพร้อมกัน (Simultaneous multi-element detection) ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำมาก (ppm หรือ ppb level) และมีความแม่นยำสูงในการตรวจวัด จึงเหมาะสมต่อการประเมินสมบัติด้านการกัดกร่อนของวัสดุทางทันตกรรม โดยเฉพาะวัสดุประเภทโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr alloy) ที่นิยมนำมาใช้ในงานฟันปลอมชนิดถอดได้ ครอบฟัน และงานทันตกรรมรากเทียม

หลักการการทำงานของ ICP-OES เริ่มจากการนำน้ำยาตัวอย่างเข้าสู่ระบบพ่นฝอย (nebulizer) เพื่อเปลี่ยนให้เป็นละอองฝอยละเอียด ซึ่งจะถูกพาเข้าสู่เปลวพลาสมาที่สร้างขึ้นจากก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar) ที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency : RF) จนเกิดอุณหภูมิสูง 6,000-10,000 เคลวิน ในสภาวะดังกล่าว อะตอมของธาตุในตัวอย่างจะถูกกระตุ้น (excited) จนปลดปล่อยแสง (emission) ที่มีความยาวคลื่นจำเพาะเมื่อกลับสู่สถานะพื้น แสงที่ปล่อยออกมาจะถูกแยกด้วยโมโนโครมิเตอร์ (monochromator) และวัดความเข้มด้วยตัวตรวจจับ (photomultiplier tube หรือ solid-state detector)

ธาตุที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr alloy) ที่ใช้ในงานทันตกรรม ได้แก่ Cobalt⁽¹³⁾ และ Chromium (Cr) มีการเลือกใช้ความยาวคลื่นเฉพาะเพื่อให้ได้ความไวสูงสุดในการตรวจวัด ดังนี้

Cobalt (Co)⁽¹³⁾ : ความยาวคลื่นที่นิยมใช้คือ 228.616 nm. ซึ่งมีความไวสูงและเป็นเส้นที่มีสัญญาณรบกวนน้อย อีกทั้งยังสามารถใช้เสริมด้วยความยาวคลื่น 238.892 nm. ในกรณีที่เป็น

Chromium (Cr)⁽¹³⁾ : ใช้ความยาวคลื่น 205.560 nm. ซึ่งมีค่าความไวสูงมาก และเหมาะสมสำหรับการวัดปริมาณไอออนที่มีระดับต่ำ โดยสามารถใช้ความยาวคลื่นรอง เช่น 267.716 nm. เพื่อขจัดผลกระทบ หรือในกรณีที่มีการรบกวนจากแมทริกซ์ (matrix interference)



ภาพประกอบ 9 The component of ICP-OES
(BOSS,C.B and Fredeen, K. J.,2004)⁽²⁰⁾

องค์ประกอบหลักของเครื่อง ICP-OES ประกอบด้วย

1. Nebulizer และ Spray Chamber : เปลี่ยนสารละลายเป็นละอองฝอยละเอียด
2. Torch และ RF Coil : ทำหน้าที่สร้างเปลวพลาสมาด้วยการเหนี่ยวนำพลังงาน
3. Optical System : ใช้การแยกแสง (ผ่าน diffraction grating) และตรวจจับแสงจาก

แต่ละธาตุ

4. Computer Software: วิเคราะห์และแสดงผลการวัด พร้อมระบบควบคุมและคำนวณอัตโนมัติ

งานวิจัยทางทันตกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุโลหะ เช่น โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) หรือโลหะกลุ่ม precious alloys การประเมินสมบัติการกัดกร่อนโดยวัดปริมาณไอออนโลหะที่ปลดปล่อยออกมาจากชิ้นงานเมื่อแช่อยู่ในสารละลายจำลอง (เช่น SBF หรือกรดแลคติก) เป็นวิธีที่มีความสำคัญ เทคนิค ICP-OES เหมาะสมต่อการใช้งานนี้ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่ปลดปล่อยในระดับความเข้มข้นต่ำ (sub-ppm level) และมีความสามารถในการแยกแยะไอออนของโลหะที่มีสมบัติเฉพาะใกล้เคียงกัน เช่น Co และ Cr ได้ดี

การศึกษาของ Kajima et al. (2020) ได้ใช้เครื่อง ICP-AES รุ่น ICPS-7000 ver. 2 (Shimadzu, Japan) เพื่อวิเคราะห์ไอออน Co, Cr และ Mo ที่ปลดปล่อยออกมาจาก Co-Cr-Mo alloys หลังผ่านการแช่ในสารละลายกรดแลคติก 1% ตามมาตรฐาน การแปรผันของทิศทางการ

ขึ้นรูปและการอบชุบความร้อนส่งผลต่อปริมาณไอออนโลหะที่ปลดปล่อยอย่างมีนัยสำคัญความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับการตรวจวัด Co และ Cr

การใช้ ICP-OES ในการวิเคราะห์ไอออนโลหะในงานทันตกรรมมีข้อดีที่ชัดเจน คือ ความแม่นยำในการตรวจวัด ความสามารถในการวิเคราะห์พร้อมกันหลายธาตุ ความรวดเร็วในการทำงาน และสามารถใช้ได้แม้ในตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของธาตุในระดับที่ต่ำมาก เทคนิคนี้จึงเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวัสดุชีวภาพ รวมถึงการประเมินความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้ในช่องปาก

กรรมวิธีการทางความร้อน (Heat treatment)

เป็นการนำโลหะที่ต้องการปรับปรุง พัฒนาโครงสร้างไปอบให้ความร้อนในระดับความร้อนต่าง ๆ กัน และทำให้เย็นตัวลง ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการปรับปรุง พัฒนาโครงสร้างของโลหะ โดยวัตถุประสงค์ของการอบให้ความร้อนนี้คือ การคลายความเค้นในชิ้นงานโลหะที่เกิดได้จาก

1. การขึ้นรูป เช่น การกลึง, การรีด
2. การเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโลหะ (thermal stress) ที่ทำให้แต่ละบริเวณในชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวไม่เท่ากัน

3. การเปลี่ยนแปลงเฟสขณะที่โลหะเย็นตัว ซึ่งเฟสที่เปลี่ยนไปนั้นมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการยึดหรือหดในตัวชิ้นงาน หากเรานำชิ้นงานที่มีความเค้นสะสม (residual stress) ไปใช้งานจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของมิติชิ้นงาน และความแม่นยำในปริมาตรของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานตามมา มีงานวิจัยที่พยายามศึกษาถึงอุณหภูมิที่ให้ในกระบวนการทางความร้อนหลังจากขึ้นชิ้นงานด้วยวิธี SLM ที่มีความเค้นสะสมจำนวนมากในตัวชิ้นงานจากการให้อุณหภูมิที่สูงและทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หลังจากผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนพบว่าสามารถพัฒนาโครงสร้างผลึกให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และลดรูปพูนในโลหะ ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น⁽¹¹⁾ ซึ่งวิธีการของการอบให้ความร้อน คือ การให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงานเป็นระยะเวลาหนึ่งจนทำให้อุณหภูมิด้านในมีความสม่ำเสมอแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

สามารถแบ่งประเภทของกรรมวิธีทางความร้อนได้ดังนี้

1. การอบอ่อน (Annealing) คือ การปล่อยให้โลหะเย็นตัวในเตาอย่างช้า ๆ (Furnace cooling) เพื่อให้โลหะมีความอ่อนตัว (Softening) และมีความเหนียว (Toughening) เพิ่มขึ้นซึ่งใช้เวลาประมาณ 1-2 วันให้โลหะเย็นตัวอย่างสนิท

2. การชุบแข็ง (Hardening) เป็นเทคนิคที่อาศัยความสามารถการละลายที่น้อยลงของธาตุผสมมาเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม โดยมีวิธีการอบชิ้นงานในเตาที่อุณหภูมิสูงทิ้งไว้เป็นระยะเวลาที่นานพอที่ secondary phase จะละลายใน solid solution การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มชิ้นงานลงในของเหลว ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรง แต่มักเกิดรอยแตกร้าว บิดเบี้ยว หรือเสียรูปทรง

3. การทำออสเทนไนต์เซชัน (Austennization) เป็นเทคนิคในการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงให้กับโลหะ โดยการนำโลหะไปอบที่อุณหภูมิที่สูงกว่า upper critical temperature เป็นเวลานานจนเกิดเป็นโครงสร้าง Austenite ทั้งชิ้น⁽²¹⁾

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr alloy) ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting (SLM) และเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (Casting) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปในด้านความต้านทานการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อม

Takaichi และคณะ ในปี 2020⁽¹²⁾ ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธี Selective laser melting (SLM) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ต่างกัน โดยออกแบบชิ้นงานโลหะที่ถูกตัดในระนาบที่แตกต่างกัน คือ แนวแกน XY และ XZ เพื่อดูแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) ของโลหะผสม ออกแบบชิ้นโลหะผสมให้มีขนาด 10 มม.x10 มม.x10 มม. และตัดในแนวราบ (XY) และแนวตั้ง (XZ) ให้มีขนาด 10 มม.x10 มม.x 2 มม. โดยกำหนดการให้ความร้อนในขั้นตอน Heat treatment ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (HT750-6H) อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (HT1150-1H) และ อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างที่มีขนาดเดียวกันโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม นำมาศึกษาลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค และประเมินสมบัติการกัดกร่อนโดยใช้การทดสอบการแช่และโพลาริไรซ์ซีวบวก

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ Backscattered electron (BSE) image ของโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่ให้กรรมวิธีทางความร้อนได้สภาวะที่ต่างกัน ในกลุ่ม HT750-6H แสดงขอบเกรน มีโครงสร้างเดนไดรต์แบบเซลล์และแบบแท่งละเอียดจำนวนมากในระนาบ x-y และ x-z ตามลำดับ เมื่อให้ความร้อนจะเห็นโครงสร้างเหล่านี้ได้น้อยลง เห็นการตกตะกอนที่ชัดเจนมากขึ้นตามแนวโครงสร้าง กลุ่ม HT1150-1H ไม่พบโครงสร้างเดนไดรต์ระดับเซลล์ละเอียด มีขอบเกรนที่ชัดเจนของการตกตะกอน กลุ่ม HT1150-6H มีขอบเกรนที่หนาและใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน แต่

อย่างไรก็ตามการตกตะกอนที่พบในตัวอย่างหล่อแบบดั้งเดิมนั้นยังคงมีขนาดใหญ่กว่าตะกอนในตัวอย่าง HT1150-6H

การปล่อยไอออนของโลหะในการทดสอบด้วย immersion test พบว่าตัวอย่างทั้งหมดยังคงให้ความวาวของโลหะและไม่พบ corrosion product ส่วนปริมาณไอออนของโลหะสามารถสรุปได้ว่าในกลุ่มตัวอย่างที่ผลิตด้วยวิธี SLM ทั้งหมด มีการปล่อยไอออนของโลหะที่ต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างหล่อแบบดั้งเดิม ในกลุ่มตัวอย่าง SLM พบการปล่อยไอออนในแนวแกน XY ที่ต่ำกว่าแกน XZ และในกลุ่ม HT1150-6H ในแนวแกน XY มีการปล่อยไอออนที่สูงที่สุด สรุปได้ว่าปริมาณการปล่อยไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือระยะเวลา heat treatment ทั้งแนวแกน XY และ XZ

พฤติกรรมการกัดกร่อน ศึกษาจากการทำ Anodic polarization test โดยใช้เครื่องมือ potentiostat พบว่าแทบไม่พบความแตกต่างกันของพฤติกรรมการส่งผ่านของกราฟโพลาริเซชันของแต่ละตัวอย่าง และไม่พบลักษณะ pitting ที่ขึ้นงานตัวอย่าง Corrosion potential วัดจากเส้นโค้ง polarization โดยรวมแล้วค่าเฉลี่ยของ Corrosion potential ของตัวอย่าง SLM นั้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างหล่อแบบดั้งเดิม พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญระหว่างระนาบแกน XY และระนาบแกน XZ ของตัวอย่าง HT1150-6H ที่ผลิตด้วย SLM

จากผลการศึกษานี้พบว่ากระบวนการให้ความร้อนและระนาบของขึ้นงานไม่ได้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อความต้านทานการกัดกร่อนในกลุ่มตัวอย่าง SLM จาก polarization curve พบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเฉลี่ยของตัวอย่าง SLM สูงมากกว่าตัวอย่างหล่อแบบดั้งเดิม ซึ่งชี้ให้เห็นว่า passive film ของตัวอย่างกลุ่ม SLM ป้องกันการกัดกร่อนที่ดีกว่า ผลของการทดสอบการแช่ในสารละลาย SBF พบว่าปริมาณไอออนของโลหะที่ปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตระนาบ และสภาวะการให้ความร้อน โครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะ fine cellular or columnar ในตัวอย่างกลุ่ม SLM จะหายไปอย่างสมบูรณ์ หลังจากให้ความร้อนที่ 1150 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะนี้จึงไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนตัวอย่าง SLM ดีขึ้น ขนาดของคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กกว่ามากเมื่อเทียบกับตัวอย่างแบบหล่อดั้งเดิม การก่อตัวของคาร์ไบด์ส่งผลให้เมทริกซ์โลหะของ Cr และ Mo ใกล้เคียงกับตะกอนหายไป ซึ่งนำไปสู่ข้อบกพร่องเฉพาะจุดใน passive film ดังนั้น คาร์ไบด์ขนาดเล็กในโลหะผสม SLM จึงเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ดังที่พบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง ดังนั้น passive film ในตัวอย่าง SLM จึงมีการป้องกันมากกว่าตัวอย่างแบบหล่อดั้งเดิม

นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณไอออนที่ปล่อยออกมาก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในการศึกษาที่มีสภาวะการให้ความร้อน 3 ประเภท การให้ความร้อนที่

อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงนั้นทำให้เกิดการตกตะกอนที่หยาบกว่าที่ขอบเกรน เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลเสียต่อความแข็งแรงของโลหะ ภายใต้เงื่อนไขทั้งหมดสรุปได้ว่า ตัวอย่างกลุ่ม SLM แสดงการปล่อยไอออนของโลหะที่ต่ำกว่าตัวอย่างตัวอย่างการหล่อแบบดั้งเดิมมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าคุณสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่ผ่านกระบวนการ SLM นั้นเหนือกว่าตัวอย่างการหล่อแบบดั้งเดิมโดยไม่คำนึงถึงการให้ความร้อนหลังการผลิตซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่มาจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ที่ค่อนข้างเล็กในตัวอย่างโลหะผสม Co-Cr-Mo ที่ผ่านกระบวนการ SLM และ passive film การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปทำให้เกิดตะกอนหยาบที่ขอบเกรน ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง
2. ขั้นตอนการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบวิจัย

การวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Experimental research)

การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในงานวิจัย

ผงโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

กำหนดกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด 50 ชิ้น โดยแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ขึ้นรูปด้วยวิธี Casting

กลุ่มที่ 2 ขึ้นรูปแบบ SLM ที่มุม 0 องศา ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,050 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (0°HT1,050-5H)

กลุ่มที่ 3 ขึ้นรูปแบบ SLM ที่มุม 0 องศา ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (0°HT1,150-1H)

กลุ่มที่ 4 ขึ้นรูปแบบ SLM ที่มุม 90 องศา ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,050 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (90°HT1,050-5H)

กลุ่มที่ 5 ขึ้นรูปแบบ SLM ที่มุม 90 องศา ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,150 °C เวลา 1 ชั่วโมง (90°HT1,150-1H)

ทดสอบการแช่ในสารละลาย 2 สภาพแวดล้อม กำหนดกลุ่มตัวอย่างละ 5 ชิ้น

เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องพิมพ์โลหะสามมิติ (Selective Laser Melting machine (HBD/HBD-150D, China)
2. Co-Cr alloy Powder (Starbond Easy Powder 30, Scheftner Dental Alloys, Germany)
3. โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Wironit LA, Bego, Bremen, Germany)
4. เครื่องตัดโลหะ (Cutting machine, Struer, Denmark)
5. เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner, Branson 5210, Branson, Germany)
6. เครื่องขัดผิววัสดุ (Nano 1000T grinder polisher, Pace Technologies, U.S.A)
7. กระดาษทรายน้ำ (wet silicone carbide paper) เบอร์ 400, 600, 800, 1000
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
9. เครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)
10. สารละลาย Simulated body fluid (SBF)
11. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.9% โดยน้ำหนัก ที่มี pH 6.2
12. กรดแลคติก
13. อะซีโตน
14. น้ำกลั่น (Distilled water)

ตาราง 1 ส่วนประกอบทางเคมีของผงโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Starbond Easy Powder 30, Scheftner Dental Alloys, Germany)

Co	61 wt.%
Cr	27 wt.%
W	8.5 wt.%
Si	1.6 wt.%

ตาราง 2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Wironit LA, Bego, Bremen, Gemany)

Co	63.5 wt.%
Cr	29.0 wt.%
Mo	5.0 wt.%
Si	1.2 wt.%
C, Mn, Ta, N	<1 wt.%

ขั้นตอนการทดลอง

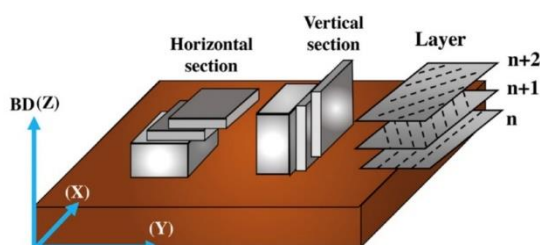
การเตรียมชิ้นงาน

เตรียมชิ้นงานโคบอลต์-โครเมียม โดยใช้ผงโลหะผสม Co-Cr (Scheftner Dental Alloys, Germany) ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีแสดงดังตาราง ขึ้นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10 มม. x 10 มม. x 10 มม. จำนวน 12 ชิ้น ที่ขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Selective Laser Melting machine (SLM) ระหว่างชั้นที่ต่อเนื่องกันตามทิศทางแนวแกน Z จากนั้นให้ความร้อน (Heat treatment) ดังนี้

กลุ่มทดสอบที่ 1 ที่อุณหภูมิ 1,050 °C เวลา 5 ชั่วโมง (HT1,050-5H)

กลุ่มทดสอบที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1,150 °C เวลา 1 ชั่วโมง (HT1,150-1H)

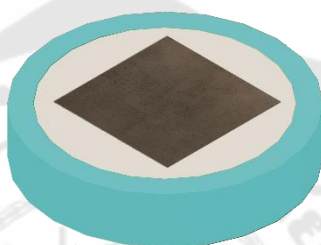
ตัดชิ้นงานทดสอบตามระนาบแกน x-y และ x-z ตามที่กำหนดไว้ (ภาพประกอบที่ 10) ด้วยเครื่องตัดโลหะได้รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 10 มม. x 10 มม. x 2 มม. เพื่อทดสอบสมบัติ Anisotropy ของโลหะผสม แล้วการเตรียมตัวอย่างที่มีรูปร่างและขนาดที่เหมือนกันด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยใช้แท่งโลหะผสม Co-Cr-Mo (Wironit LA, Bego, Bremen, Gemany) ซึ่งมีส่วนประกอบ ดังตาราง 2



ภาพประกอบ 10 การตัดชิ้นงานโลหะผสมที่ผลิตด้วย SLM ตามแนวแกน x-y และ แกน x-z⁽¹²⁾

การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) โดยนำชิ้นงานมาฝังลงใน Epoxy resin จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายกันน้ำที่เบอร์ 400, 600, 800 และ 1000 ด้วยเครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ แล้วจึงใช้ผงขัดเพชรขนาด 1 ไมครอน ขัดเป็นลำดับสุดท้าย จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิกในอะซิโตน เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวโลหะผสม โดยจะศึกษาโครงสร้างจุลภาคในขั้นตอนก่อนและหลังจากทดสอบการกัดกร่อน



ภาพประกอบ 11 รูปแบบการวางชิ้นงานใน Epoxy resin

ทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบแช่ (Immersion test)

ทำการทดสอบการแช่ตามมาตรฐาน ISO 10271 โดยฝังชิ้นงานใน Epoxy resin เพื่อให้แน่ใจว่ามีเพียงขนาดที่สนใจศึกษาเท่านั้นที่จะสัมผัสกับสารละลาย จากนั้นขัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายน้ำที่เบอร์ 400, 600 และ 800 แล้วแช่ชิ้นงานในน้ำกลั่น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง 37 °C ในขวด PPE ที่มีฝาปิดมิดชิด แบ่งกลุ่มสารละลายที่ใช้เป็นสองสภาพแวดล้อม ได้แก่ กลุ่มที่แช่ในสารละลาย simulated body fluid (SBF) โดยใช้สารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (SBF) จำนวน 10 มิลลิลิตร และจำลองสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรด การเตรียมสารละลาย SBF โดยใช้กรดแลคติก 10 กรัม และ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 5.85 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร เจือจางให้ได้ปริมาตรสุทธิที่ 1,000 มิลลิลิตร และวัดค่า pH ให้ได้ค่า 2.3 หลังการเตรียมสารละลายตัวอย่างแต่ละชิ้น (n=5) ถูกแช่ในสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร บรรจุในภาชนะโพลีโพรพิลีนที่มีฝาปิดมิดชิด และเก็บที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 7 วัน หลังการแช่ สารละลายถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณการปลดปล่อยไอออนของโลหะ โคบอลต์ (Co) และ โครเมียม (Cr) ดำเนินการด้วยเครื่อง Inductive Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES; iCAP Pro, Thermo Fisher Scientific, USA) ใช้โหมดการวัด Aqueous-Axial iFR ที่ความยาวคลื่นของ Co เท่ากับ 238.892

nm. และ ความยาวคลื่นของ Cr เท่ากับ 283.563 nm. ค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of Detection; LOD) ของ Co เท่ากับ 0.0007 ppm และ Cr เท่ากับ 0.0004 ppm ก่อนนำไปคำนวณปริมาณการปลดปล่อยไอออนต่อพื้นที่ผิวของชิ้นทดสอบ

ปริมาณการปลดปล่อยไอออนโลหะถูกคำนวณโดยใช้สมการ อ้างอิงจากการศึกษา Kajima et al. ดังนี้

$$C_r = \frac{V_s(C_s - C_b)}{A}$$

เมื่อ C_r คือ ปริมาณการปลดปล่อยไอออนโลหะ (mg/m^2)

V_s คือ ปริมาตรสารละลาย (0.01L)

C_s คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่แช่ตัวอย่าง (mg/L)

C_b คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย blank (mg/L)

A คือ พื้นที่ผิวที่สัมผัสสารละลายของตัวอย่าง (m^2)

จากนั้นค่าที่ได้ถูกแปลงหน่วยเป็น $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ตามมาตรฐาน ISO 10271

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลทั้งหมดถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (Version 25.0, IBM Corp., USA)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (statistical analysis)

สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics)

ตัวแปรที่มีการวัดเป็นระดับ Nominal Scale และ Ordinal Scale ใช้ค่าความถี่ร้อยละ และในกรณีที่ตัวแปรที่มีการวัดเป็นระดับ Interval Scale และ Ratio Scale ใช้ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามัธยฐาน

สถิติเชิงอนุมาน ได้แก่

1. การเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยไอออนระหว่างกลุ่มภายใต้สารละลายที่แตกต่างกัน (SBF และกรดแลคติก)

ทดสอบความแตกต่างของค่าการปลดปล่อยไอออนโลหะระหว่างกลุ่มการทดลองโดยใช้สถิติ Independent t-test สำหรับการเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยไอออนระหว่างกลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ และ กลุ่ม SLM ภายใต้เงื่อนไขของสารละลายที่แตกต่างกัน (SBF และ lactic acid)

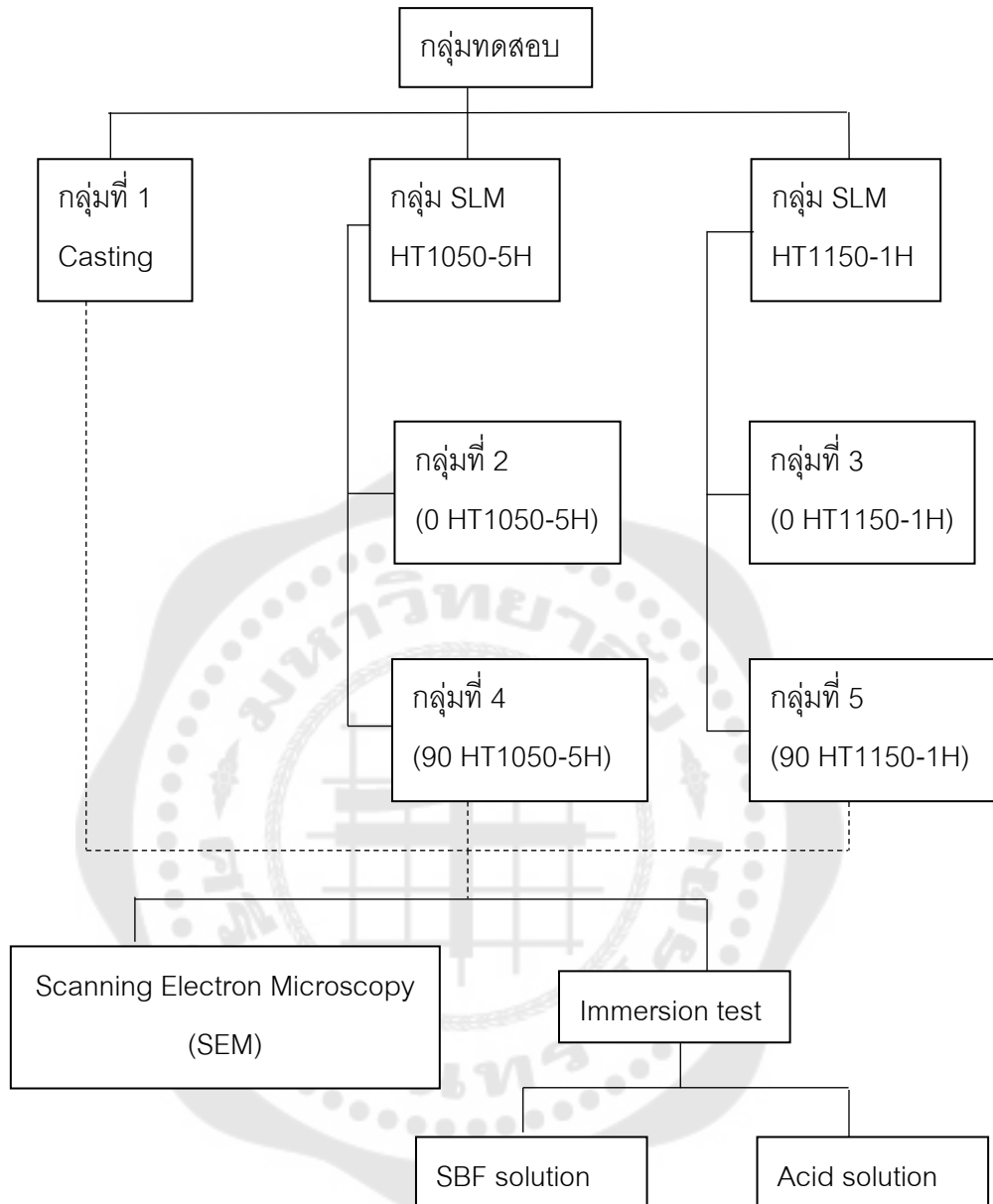
2. การเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยไอออนของโลหะในสารละลาย

ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยไอออนโลหะระหว่างกลุ่มที่ผลิตเทคนิค Selective Laser Melting (SLM) ที่มีการอบชุบความร้อนในสถานะที่แตกต่างกัน และเทคนิคการหล่อแบบขึ้นรูปดั้งเดิม (Casting) หากพบว่ามีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะดำเนินการวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วยการทดสอบแบบ Post Hoc (Tukey's Honestly Significant Difference) เพื่อระบุคู่ของกลุ่มที่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน

3. การวิเคราะห์ผลของปัจจัยร่วมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) เพื่อตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยร่วม ได้แก่ วิธีการผลิต (Casting และ Selective Laser melting) ที่ศทางการขึ้นรูป (แนวแกน XZ และ XY) และอุณหภูมิในการอบชุบความร้อน รวมถึงการตรวจสอบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยไอออนหรือไม่

ในการวิเคราะห์ทั้งหมด กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละ 95 (α) = 0.05 หากค่าความน่าจะเป็น (p-value) น้อยกว่าระดับนัยสำคัญดังกล่าว จะถือว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพประกอบ 12 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มทดสอบ

บทที่ 4 ผลการดำเนินวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเปรียบเทียบสมบัติการกัดกร่อนจากอัตราการปลดปล่อยไอออนโลหะ Cobalt และ Chromium (Cr) ในสารละลาย SBF และสารละลายกรดแลคติก จากชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ (Casting) เทียบกับการขึ้นรูปด้วยวิธี Selective laser melting (SLM) ภายใต้เงื่อนไขการอบชุบความร้อน (Heat treatment) ที่แตกต่างกันและทิศทางการขึ้นรูป โดยกลุ่ม SLM กำหนดการอบชุบความร้อน ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และ อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับ รวมถึงศึกษาอิทธิพลของทิศทางการขึ้นรูปที่ต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อน ขั้นตอนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรก คือ ทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบแช่ (Immersion test) โดยวัดการปลดปล่อยของไอออนของโลหะ Cobalt และ Chromium ในสารละลาย 2 ชนิดที่จำลองสภาพแวดล้อมในช่องปากในสภาวะเป็นกลาง คือ สารละลาย SBF และ สภาพแวดล้อมในช่องปากเป็นกรด คือ สารละลายกรดแลคติก (Lactic acid) ของแต่ละกลุ่มทดลอง โดยแบ่งกลุ่มทดลอง ดังนี้

กลุ่มที่ 1 : กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ (Casting)

กลุ่มที่ 2 : กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM อบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 5 ชั่วโมง ทิศทางแกน XZ (0 HT1050-5H)

กลุ่มที่ 3 : กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM อบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลา 1 ชั่วโมง ทิศทางแกน XZ (0 HT1150-1H)

กลุ่มที่ 4 : กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM อบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 5 ชั่วโมง ทิศทางแกน XY (90 HT1050-5H)

กลุ่มที่ 5 : กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM อบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลา 1 ชั่วโมง ทิศทางแกน XY (90 HT1150-1H)

โดยทั้ง 5 กลุ่มทดลองนี้จะนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบแช่ (Immersion test) ในสารละลาย SBF และ สารละลายกรดแลคติก (Lactic acid) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 7 วันเท่ากัน ทำให้สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

ผลการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอบชุบ (heat treatment) ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ภายหลังจากการขึ้นรูปด้วยวิธี Selective laser melting (SLM)

ที่สามารถลดความเค้นตกค้าง (Residual stress) และลดสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปในทิศทางต่างกัน จะถูกเปรียบเทียบตามหัวข้อต่อไปนี้

สมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

การศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Selective laser melting ร่วมกับการอบให้ความร้อนเทียบกับวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม โดยแสดงผลการเปรียบเทียบ ดังนี้

การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยไอออนโลหะในสารละลาย SBF และกรดแลคติก

ผู้วิจัยใช้สถิติ Independent t-test เพื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยไอออนของโลหะที่แช่ในสารละลาย SBF มีค่าเฉลี่ย คือ 0.0286 (S.D.=0.017) และในสารละลายกรด Lactic มีค่าเฉลี่ย คือ 0.1098 (S.D.=0.057) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนระหว่างกลุ่มโลหะที่แช่ในสารละลาย SBF กับ สารละลาย Lactic พบว่า **มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ**ที่ระดับความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 5 ($p < 0.001$) รายละเอียดดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของโลหะ กรณีไม่แยกกลุ่มโลหะ ระหว่างแช่ในสารละลาย SBF กับ สารละลาย Lactic

Solution	Number	\bar{x}	S.D.	\bar{x} d.f.	95%CI	p-value
SBF	50	0.0286	0.017	0.0812	-0.098,-0.064	<0.001
Lactic	50	0.1098	0.057			

หมายเหตุ : \bar{x} d.f. = Mean difference

การปลดปล่อยไอออนโลหะ Cobalt

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป)

ผู้วิจัยใช้สถิติ One Way ANOVA ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย SBF พบว่า กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการ Casting มีอัตราการ

ปลดปล่อยไอออน Cobalt ในสารละลาย SBF **ไม่แตกต่างกัน**กับวิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting ($F = 2.533$, $P\text{-value} = 0.102$)

กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการ Casting มีอัตราการปลดปล่อยไอออนของวัสดุ Cobalt สูงกว่ากลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting แต่ **ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ** ($p > 0.05$) รายละเอียดตามตาราง 4

ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ของ Cobalt ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) ด้วยวิธี Post hoc (Tamhane) ($n=5$)

Group	Mean±Standard deviation
Casting	0.040±0.029 ^a
SLM 1050_5H	0.017±0.013 ^a
SLM 1150_1H	0.025±0.017 ^a

หมายเหตุ : ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันแสดงความไม่แตกต่างกันของค่าเฉลี่ยค่าการปลดปล่อยไอออนของโลหะ Cobalt ในสารละลาย SBF อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป)

ผู้วิจัยใช้สถิติ One Way ANOVA ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย Lactic พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย Lactic ที่ใช้วิธีการ Casting **ไม่แตกต่างกัน**กับวิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting ($F = 1.182$, $P\text{-value} = 0.325$)

กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อมีอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย Lactic สูงกว่ากลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) แต่ **ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ** ($p > 0.05$) รายละเอียดตามตาราง 5

ตาราง 5 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Cobalt ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ Post hoc (Tamhane) แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (n=5)

Group	Mean±Standard deviation
Casting	0.170±0.023 ^a
SLM 1050_5H	0.069±0.022 ^a
SLM 1150_1H	0.059±0.019 ^a

หมายเหตุ : ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันแสดงความไม่แตกต่างกันของค่าเฉลี่ยค่าการปลดปล่อยไอออนของโลหะ Cobalt ในสารละลาย SBF อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p>0.05)

การปลดปล่อยไอออนโลหะ Chromium

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป)

ผู้วิจัยใช้สถิติ One Way ANOVA ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย SBF พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย SBF ที่ใช้วิธีการ Casting ไม่แตกต่างกันกับวิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting (F = 0.743, P-value = 0.487)

อัตราการปลดปล่อยไอออนของวัสดุ Chromium ในสารละลาย SBF ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Casting จะสูงกว่าการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) แต่ **ไม่มีความแตกต่าง**อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p >0.05) รายละเอียดตามตาราง 6

ตาราง 6 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ Post-Hoc Test (Tamhane's method) แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (n=5)

Group	Mean±Standard deviation
Casting	0.036±0.013 ^a
SLM 1050_5H	0.034±0.016 ^a
SLM 1150_1H	0.029±0.003 ^a

หมายเหตุ : ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันแสดงความไม่แตกต่างกันของค่าเฉลี่ยค่าการปลดปล่อยไอออนของโลหะ Cobalt ในสารละลาย SBF อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p>0.05)

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป)

ผู้วิจัยใช้สถิติ One-Way ANOVA ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย Lactic พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย Lactic ที่ใช้วิธีการ Casting **ไม่แตกต่างกัน**กับวิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting (F = 2.810, P-value = 0.082)

อัตราการปลดปล่อยไอออนของวัสดุ Chromium ในสารละลาย Lactic ที่กลุ่ม Casting จะสูงกว่ากลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) แต่**ไม่มีความแตกต่าง**อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value>0.05) รายละเอียดตามตาราง 7

ตาราง 7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ Post-Hoc Test (Tamhane's method) (n=5)

Group	Mean±Standard deviation
Casting	0.110±0.060 ^a
SLM 1050_5H	0.079±0.031 ^a
SLM 1150_1H	0.066±0.014 ^a

หมายเหตุ : ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันแสดงความไม่แตกต่างกันของค่าเฉลี่ยค่าการปลดปล่อยไอออนของโลหะ Cobalt ในสารละลาย SBF อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p>0.05)

การศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย SBF

ผู้วิจัยใช้สถิติ Two-Way ANOVA ในการทดสอบ พบว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลากับทิศทางการขึ้นรูปโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ต่อค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความผิดพลาดไม่เกิดร้อยละ 5 (F =6.92, p-value = 0.018) รายละเอียดดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางความร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย SBF โดยใช้ Two-Way ANOVA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p-value
Heat	0.00032	1	0.00032	1.730	0.207
Angle	0.00002	1	0.00002	0.108	0.747
Heat*Angle	0.001	1	0.001	6.919	0.018*
Error	0.003	16	0.00019		
Total	0.013	20			

หมายเหตุ : * p-value < 0.05 แสดงถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

อัตราการปลดปล่อยไอออนโลหะ Cobalt ในสารละลาย SBF ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Selective laser melting ที่ผ่านการอบชุบด้วยอุณหภูมิ 1150°C -1h ในทิศทางขึ้นรูป XZ มีอัตราการปลดปล่อยไอออนสูงกว่า ที่อุณหภูมิ 1050°C-5h ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value}<0.05$) แต่การขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 1050°C ในทิศทางที่ต่างกัน อัตราการปลดปล่อยไอออน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value}>0.05$) รายละเอียดตามตาราง 9

ตาราง 9 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ของ Cobalt ในสารละลาย SBF จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน โดยใช้ Post-Hoc Test (Tamhane's method) ($n=5$)

	1050_5H	1150_1H
XZ	0.010±0.006 ^a	0.034±0.006 ^b
XY	0.024±0.006 ^{a,b}	0.016±0.006 ^{a,b}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ตามการทดสอบ Post-Hoc Test (Tamhane's method) ขณะที่ตัวอักษรที่เหมือนกันหมายถึงค่าที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนของ Cobalt เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่ต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย Lactic

ผู้วิจัยใช้สถิติ Two-Way ANOVA ในการทดสอบ พบว่า ทั้งอุณหภูมิและเวลา กับทิศทางการขึ้นรูปโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออน รายละเอียดดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Cobalt เมื่อใช้ อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน เมื่ออยู่ในสารละลาย Lactic โดยใช้ Two-Way ANOVA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p-value
Heat	0.002	1	0.002	0.680	0.422
Angle	0.015	1	0.015	4.098	0.060
Heat*Angle	0.002	1	0.002	0.562	0.464
Error	0.057	16	0.004		
Total	0.424	20			

อัตราการปลดปล่อยไอออนของวัสดุ Cobalt ในสารละลาย Lactic ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการ Selective laser melting ด้วยอุณหภูมิ 1050°C ในทิศทาง XZ มีอัตราการปลดปล่อยไอออน สูงกว่ากลุ่มอื่น แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.005$) รายละเอียดตามตาราง 11

ตาราง 11 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Cobalt ในสารละลาย Lactic จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Post-Hoc Test (Tamhane's method) ($n=5$)

	1050_5H	1150_1H
XZ	0.180±0.027 ^a	0.138±0.027 ^a
XY	0.106±0.027 ^a	0.104±0.027 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่เหมือนกัน หมายถึงค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามการทดสอบ Post-Hoc Test (Tamhane's method)

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนของ Chromium เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย SBF

ผู้วิจัยใช้สถิติ Two-Way ANOVA ในการทดสอบ พบว่า ทั้งอุณหภูมิและเวลา กับทิศทางการขึ้นรูปโลหะ ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออน ($p\text{-value} > 0.05$) รายละเอียดดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Chromium เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย SBF โดยใช้ Two-Way ANOVA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p-value
Heat	0.000125	1	0.000125	0.926	0.350
Angle	0.000125	1	0.000125	0.926	0.350
Heat*Angle	0.000045	1	0.000045	0.333	0.572
Error	0.002	16	0.000135		
Total	0.022	20			

อัตราการปลดปล่อยไอออนของวัสดุ Chromium ในสารละลาย SBF ที่หล่อด้วยวิธีการ Selective laser melting ด้วยอุณหภูมิ 1050°C ในทิศทาง XZ มีอัตราการปลดปล่อยไอออนสูงกว่ากลุ่มอื่น แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) รายละเอียดตามตาราง 13

ตาราง 13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย SBF จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Post-Hoc Test (Tamhane's method) ($n=5$)

	1050_5H	1150_1H
XZ	0.038±0.005 ^a	0.030±0.005 ^a
XY	0.030±0.005 ^a	0.028±0.005 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่เหมือนกัน หมายถึงค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามการทดสอบ Post-Hoc Test (Tamhane's method)

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนของ Chromium เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อสมบัติการกัดกร่อนเมื่อขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย Lactic

ผู้วิจัยใช้สถิติ Two-Way ANOVA ในการทดสอบ พบว่าทิศทางการขึ้นรูปโลหะมีผลต่อค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 5 ($F = 8.117$, $p\text{-value} = 0.012$) รายละเอียดดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 14 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนกรรมวิธีทางร้อนของ Chromium เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน และขึ้นรูปด้วยทิศทางที่แตกต่างกัน กรณีอยู่ในสารละลาย Lactic โดยใช้ Two-Way ANOVA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p-value
Heat	0.001	1	0.001	2.195	0.158
Angle	0.003	1	0.003	8.117	0.012*
Heat*Angle	0.001	1	0.001	3.753	0.071
Error	0.006	16	0.000385		
Total	0.117	20			

หมายเหตุ : * $p\text{-value} < 0.05$ แสดงถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

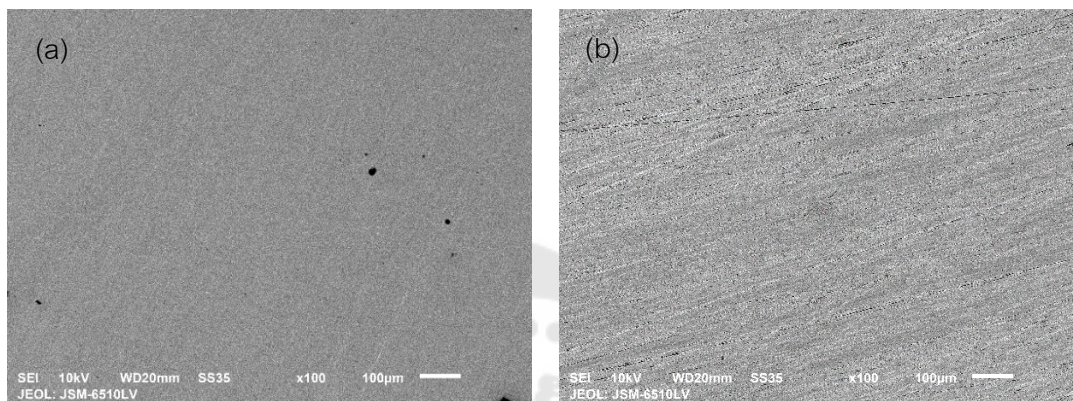
อัตราการปลดปล่อยไอออนของวัสดุ Chromium ในสารละลาย Lactic ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการ Selective laser melting ด้วยอุณหภูมิ 1050°C ในทิศทาง XZ มีอัตราการปลดปล่อยไอออน สูงกว่ากลุ่มอื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 5 ($p\text{-value} < 0.05$) รายละเอียดตามตาราง 15

ตาราง 15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนรายคู่ ของ Chromium ในสารละลาย Lactic จำแนกตามทิศทางการขึ้นรูป และตามอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Post-Hoc Test (Tamhane's method) ($n = 5$)

	1050_5H	1150_1H
XZ	0.100 ± 0.009^a	0.070 ± 0.009^b
XY	0.058 ± 0.009^b	0.062 ± 0.009^b

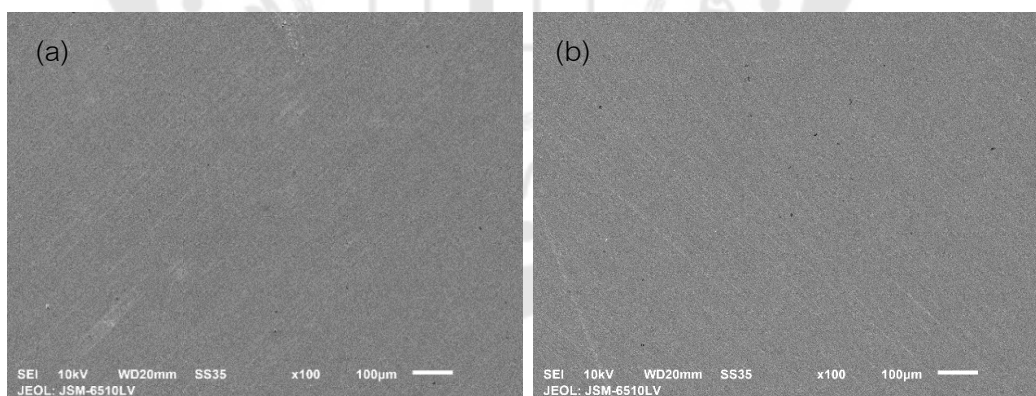
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามการทดสอบ Post-Hoc Test (Tamhane's method) ขณะที่ตัวอักษรที่เหมือนกันหมายถึงค่าที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของโลหะผสม Co-Cr ด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (Casting)

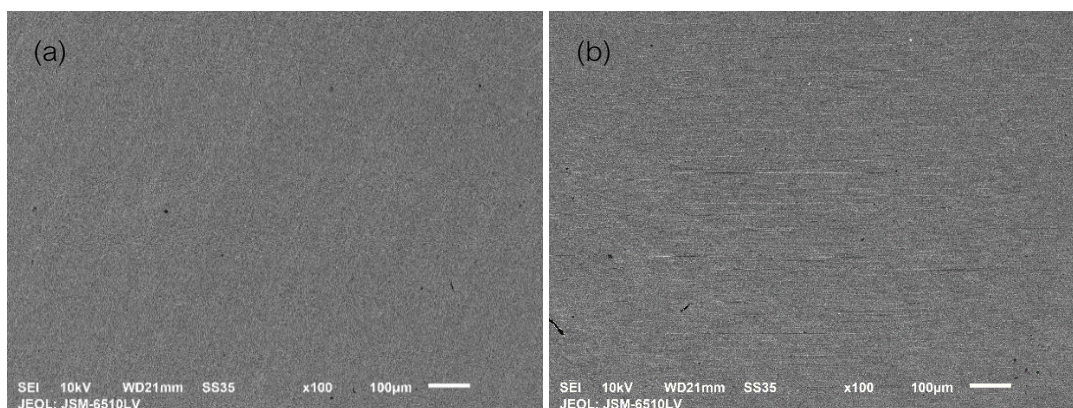


ภาพประกอบ 13 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม Casting หลังแช่ในสารละลาย
SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μ m.)

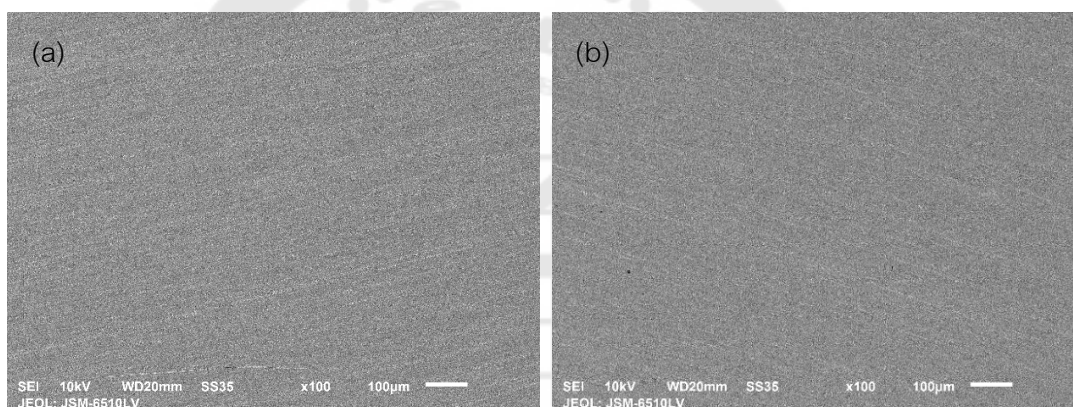
กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Selective Lase Melting (SLM)



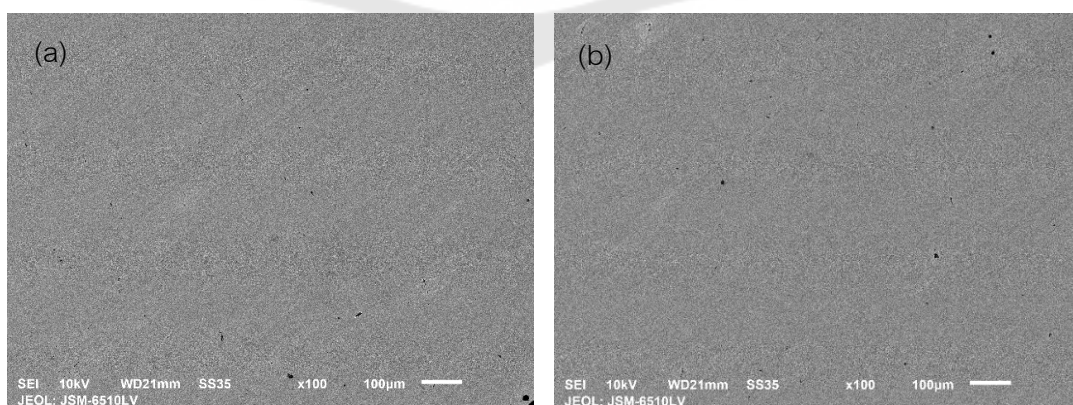
ภาพประกอบ 14 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1050-5h : XZ plane หลังแช่
ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 μ m.)



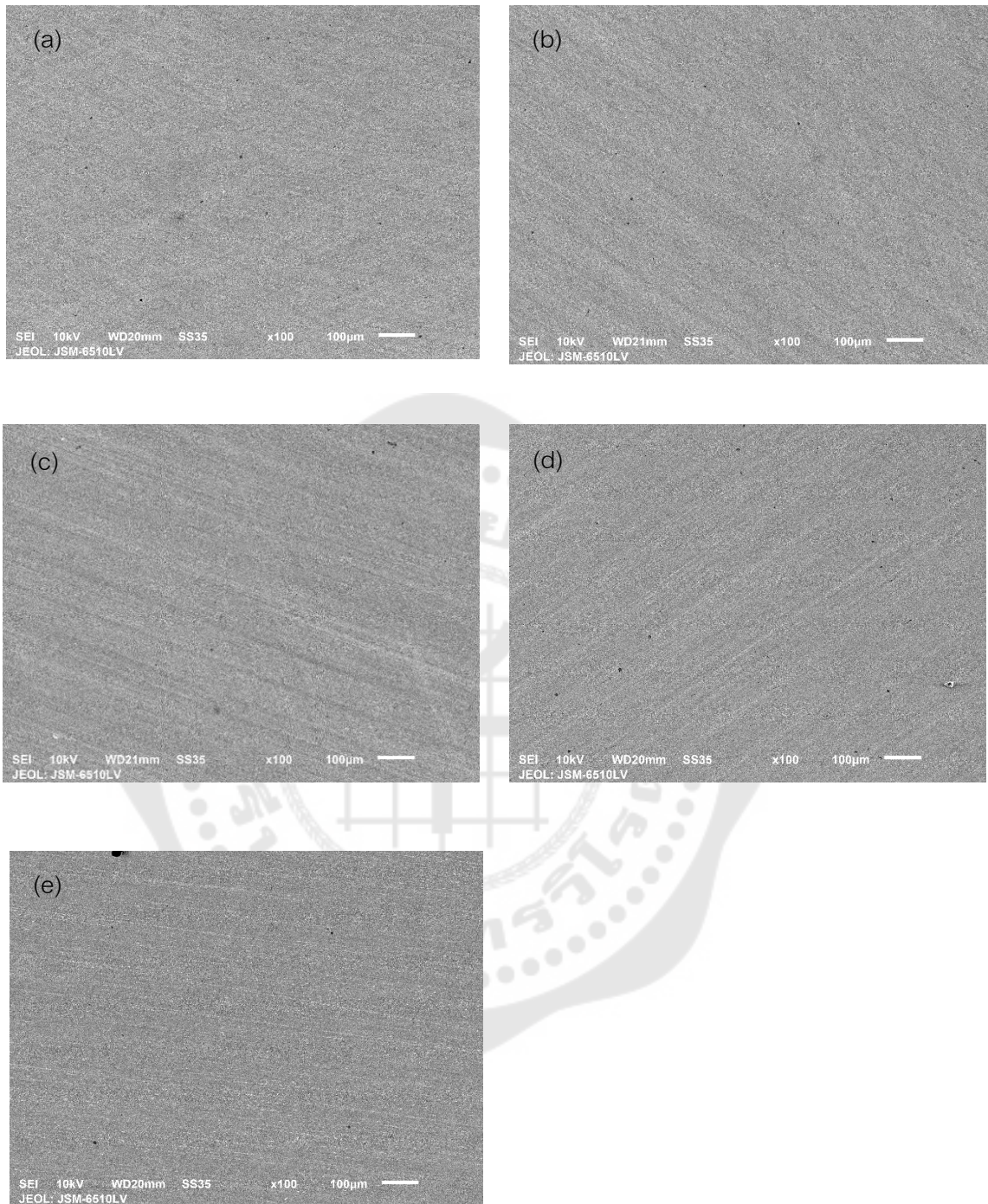
ภาพประกอบ 15 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1050-5h : XY plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 µm.)



ภาพประกอบ 16 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1150-1h : XZ plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 µm.)



ภาพประกอบ 17 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่ม 1150-1h : XY plane หลังแช่ในสารละลาย SBF (a) และ Lactic acid (b) เป็นเวลา 7 วัน (SEM,x100, scale bar = 100 µm.)



ภาพประกอบ 18 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr กลุ่มควบคุม (a) 1050-5h XZ (b) 1050-5h XY, (c) 1150-1h XZ, (d) 1150-1h XY, (e) Casting (SEM,x100, scale bar =100 μm.)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาเรื่องการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ผลิตด้วยวิธี Selective Laser Melting และผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ทางผู้วิจัยได้นำผลการศึกษามาประเมินและทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ หลังจากได้ผลการดำเนินงานแล้ว สามารถสรุปผลการดำเนินงานโดยแบ่งหัวข้อในการสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. สรุปผลการวิจัย
2. อภิปรายผลการวิจัย
3. ข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr alloy) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Selective Laser Melting (SLM) และวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (Casting) ภายใต้เงื่อนไขการอบชุบความร้อนที่แตกต่างกัน โดยประเมินจากอัตราการปลดปล่อยไอออนของโลหะ Co และ Cr ในสารละลายสองชนิด ได้แก่ สารละลาย Simulated Body Fluid (SBF, pH ~7.4) เป็นสารละลายที่มีค่าความเป็นกลาง ซึ่งใช้จำลองสภาวะของเหลวในร่างกายมนุษย์ และสารละลายกรดแลคติก (Lactic acid, pH ~2.3) เพื่อจำลองสภาวะในช่องปากที่มีความเป็นกรด ผลการศึกษพบว่าสภาวะของสารละลายมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการปลดปล่อยไอออนของโลหะ โดยกรดแลคติกซึ่งมีค่า pH ต่ำกว่าสารละลาย SBF ส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยไอออนของ Co และ Cr ในระดับที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Casting และ Selective Laser Melting (SLM) โดยไม่พิจารณาถึงทิศทางการขึ้นรูป พบว่า แมื่กลุ่ม Casting จะมีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยทั้ง Co และ Cr สูงกว่ากลุ่ม SLM ในทั้งสองสภาวะของสารละลาย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) ต่อการปลดปล่อยไอออนโลหะในชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการ Selective Laser Melting (SLM) ภายใต้สองเงื่อนไข คือ การอบชุบที่อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ($1050-5\text{h}$) และการอบชุบที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ($1150-1\text{h}$) พบว่า สำหรับโลหะโคบอลต์ (Co) ในสารละลาย SBF แนวแกน XZ ของกลุ่มที่อบชุบที่อุณหภูมิ 1150°C แสดงค่าการปลดปล่อยไอออน (0.034 ± 0.006)

สูงกว่ากลุ่มกลุ่มที่อบชุบที่อุณหภูมิ 1050°C (0.010 ± 0.006) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ในขณะที่โลหะโครเมียม (Cr) ในสารละลายกรดแลคติก พบว่ากลุ่มที่อบชุบที่อุณหภูมิ 1050°C แสดงความแตกต่างของค่าการปลดปล่อยไอออนระหว่างทิศทาง XZ และ XY โดยแนวแกน XZ (0.100 ± 0.009) มีค่าการปลดปล่อยสูงกว่าแนว XY (0.058 ± 0.009) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการศึกษารูปได้ว่า การอบชุบความร้อนส่งผลในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน Co-Cr alloy ที่ผลิตด้วยกระบวนการ SLM โดยพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีแนวโน้มแสดงค่าการปลดปล่อยไอออนโลหะ Co และ Cr ที่สม่ำเสมอมากกว่ากลุ่มที่อบชุบที่อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทั้งในทิศทาง XZ และ XY สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการลดผลกระทบจากทิศทางการขึ้นรูป (anisotropy) และช่วยเพิ่มความเสถียรของสมบัติการกัดกร่อนของวัสดุโดยรวม จึงสรุปได้ว่า การอบชุบที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและลดความไม่สม่ำเสมอของสมบัติระหว่างทิศทางการขึ้นรูปในชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr alloy ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM

จากการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) แสดงลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ผ่านการแช่ในสารละลาย โดยพบว่า กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Casting แสดงลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและไม่สม่ำเสมอมากกว่ากลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี SLM เมื่อศึกษาในกลุ่มชิ้นงานหลังการแช่สารละลายที่แตกต่างกัน โดยภาพรวมพบว่า กลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Casting แสดงลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระมากกว่ากลุ่มที่ผลิตด้วยวิธี SLM ในทุกเงื่อนไขการแช่สารละลาย

เมื่อเปรียบเทียบผลในแต่ละสารละลาย พบว่า พื้นผิวของชิ้นงานที่แช่ในสารละลาย SBF มีความเรียบมากกว่าที่แช่ในสารละลายกรดแลคติกในทุกกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับค่าการปลดปล่อยไอออนที่ต่ำกว่าในสารละลาย SBF ทั้งนี้กลุ่ม SLM ที่ผ่านการอบชุบความร้อนทั้งสองเงื่อนไข มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบใกล้เคียงกันจึงสนับสนุนข้อสรุปว่า การขึ้นรูปชิ้นงานโลหะผสม Co-Cr alloy ด้วยวิธี SLM ร่วมกับการอบชุบความร้อนสามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผล

Selective Laser Melting (SLM) เป็นกระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing) ที่อาศัยการหลอมผงโลหะทีละชั้น (layer-by-layer melting) ด้วยลำแสงเลเซอร์ ความร้อนและการหลอมซ้ำอย่างต่อเนื่องในแต่ละชั้นก่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (rapid solidification) ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเค้นตกค้าง (residual stress) และโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นกับทิศทาง (orientation-dependent) หรือ anisotropy เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการอบชุบความร้อน (heat treatment) ภายหลังการขึ้นรูป ซึ่งมีบทบาทในการลดความเค้นตกค้าง ปรับโครงสร้างจุลภาคให้สม่ำเสมอ และเสริมสมบัติโดยรวมของวัสดุ นอกจากนี้ heat treatment ยังมีอิทธิพลโดยตรงต่อความต้านทานการกัดกร่อนจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความหนาของฟิล์มพาสซีฟ (Cr_2O_3)^(10,11,12)

จากผลการทดลองพบว่าวัสดุที่อยู่ในสารละลายกรดแลคติกมีการปลดปล่อยไอออนมากกว่าสารละลาย SBF ในการทดลองลักษณะของสารละลายกรดแลคติกและสารละลาย SBF เป็นการจำลองลักษณะความเป็นกรดและสภาวะเป็นกลางภายในช่องปากเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกัดกร่อนของวัสดุในสภาวะที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติการกัดกร่อนของโลหะนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพแวดล้อม, ชนิดของโลหะ รวมถึงการก่อตัวของฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ซึ่งเป็นชั้นของ oxide layer ที่เกิดจากกระบวนการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวโลหะกับออกซิเจนในอากาศ หรือน้ำเกิดเป็นชั้นที่แยกผิววัสดุออกจากสภาวะแวดล้อมภายนอก ดังนั้นฟิล์มดังกล่าวจึงมีบทบาทโดยตรงต่อความสามารถในการยับยั้งหรือเร่งการปลดปล่อยไอออน⁽²²⁾ โดยวัสดุที่มี oxide layer หนาจะสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมภายนอก ลดการปลดปล่อยแร่ธาตุออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xin และ คณะ (2014) พบว่าวัสดุที่มีชั้นฟิล์มพาสซีฟ (passive film) จะมีความเสถียรต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มพาสซีฟละลายหรือเสื่อมสภาพได้ในสภาวะกรด ทำให้เกิดการปลดปล่อยไอออนโลหะในปริมาณสูงขึ้น^(23, 24) ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในสารละลายกรดแลคติกที่มี pH ต่ำ จะมีการปลดปล่อยไอออนมากกว่าสารละลาย SBF อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการศึกษานี้ พบว่ากลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ (Casting) มีแนวโน้มในการปลดปล่อยไอออน Co และ Cr สูงกว่ากลุ่มที่ขึ้นรูปด้วย SLM ในทุกเงื่อนไขของสารละลาย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย Kajima และคณะ (2020) ได้รายงานว่าการสร้างจุลภาคแบบ fine cellular และ columnar dendritic structure ที่พบในชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการ SLM ซึ่งมีขอบเซลล์ (cell boundaries) ที่อุดมด้วยธาตุโครเมียม (Cr) และ โม

ลิบดินัม (Mo) ซึ่งธาตุทั้งสองนี้มีบทบาทโดยตรงต่อการสร้างและคงสภาพของฟิล์มออกไซด์ชนิด พาสซีฟ (Cr_2O_3 และ Mo-oxide) ที่มีความเสถียรสูง ฟิล์มดังกล่าวทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการ ละลายของโลหะ ทำให้การปลดปล่อยไอออนโลหะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม Casting ที่มี โครงสร้างจุลภาคหยาบและไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่โลหะผสม Co-Cr ที่ผลิตด้วยวิธีการ Casting มักแสดงโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะ heterogeneous ประกอบด้วย coarse dendritic grains และการแยกตัวขององค์ประกอบ (elemental segregation)^(12, 25, 26) อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยไอออนโลหะจากตัวอย่างกลุ่ม SLM ยังคงต่ำกว่ากลุ่ม casting อย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าโครงสร้าง fine cellular และ columnar จะหายไปทั้งหมด ภายหลังจากอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลา 1 ชั่วโมง

ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่า ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน SLM ไม่ได้ขึ้นกับการคงอยู่ ของโครงสร้าง fine cellular และ columnar เพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่น เช่น การลดความเค้นตกค้าง (residual stress relief), การกระจายตัวขององค์ประกอบ (elemental homogenization), และการสร้างฟิล์มออกไซด์ที่มีความเสถียร ภายหลังจากอบชุบความร้อน แม้ โครงสร้างเดิมที่มีบทบาทป้องกันการกัดกร่อนจะสลายไป แต่กระบวนการ recrystallization และ grain growth ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้ passive film สามารถก่อ ตัวได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพมากกว่าในกลุ่ม Casting ที่มีความไม่สม่ำเสมอของ องค์ประกอบและ segregation อยู่ในระดับสูง⁽¹²⁾

แม้ว่ากลุ่ม SLM จะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่ากลุ่ม Casting โดยรวม แต่ผล การศึกษายืนยันถึงการมีอยู่ของสมบัติ anisotropy กล่าวคือ ปริมาณการปลดปล่อยไอออนโลหะ แตกต่างกันระหว่างระนาบ XY และ XZ อย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาของ Takaichi และคณะ (2020) พบว่าการขึ้นรูปด้วย SLM ในระนาบ XY แสดงลักษณะ fine cellular dendrite ในขณะที่ ตัวอย่างในระนาบ XZ แสดงลักษณะจุลภาค columnar dendrite นอกจากนี้ยังพบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคแสดงลักษณะของ melt pool boundaries (MPBs) ที่แตกต่างกันในแต่ละ ระนาบ ความแตกต่างนี้สัมพันธ์กับระยะห่างของ melt pool boundaries (MPBs) ที่แตกต่างกัน ระหว่างสองระนาบ โดยในระนาบ XY ระยะห่างของ MPBs มีค่าใกล้เคียงกับ hatch spacing ขณะที่ในระนาบ XZ ระยะห่างของ MPBs มีค่าใกล้เคียงกับ layer thickness ซึ่งมีขนาดเพียง 1/3 - 1/2 ของระนาบ XY ทำให้ระนาบ XY มีจำนวน MPBs น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับระนาบ XZ ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะ microstructural anisotropy ตาม build direction ความแตกต่างดังกล่าว จึงมีผลโดยตรงต่อสมบัติการกัดกร่อน เนื่องจาก MPBs เป็นบริเวณที่มี microsegregation และ

residual stress สูง จึงมีแนวโน้มเป็นตำแหน่งที่ง่ายต่อการเกิดกัดกร่อน การที่ระนาบ XZ มี MPBs มากกว่า จึงทำให้มีแนวโน้มการกัดกร่อนสูงกว่าระนาบ XY⁽¹²⁾

จากการทดลองนี้พบว่า การอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 5 ชั่วโมง และ 1150 °C เวลา 1 ชั่วโมง ช่วยลดการกัดกร่อนของโลหะและลด anisotropy effect เนื่องจากว่าการอบชุบความร้อนช่วยลด MPBs ออกไป ทำให้เกิดความ homogeneity ภายในโครงสร้างของวัสดุ ส่งผลให้ anisotropy ของสมบัติการกัดกร่อนลดลงอย่างชัดเจน ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในกลุ่ม HT1150-1h ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการปลดปล่อยไอออนระหว่างระนาบ XZ และ XY บ่งชี้ว่ามีการกำจัด MPBs และการปรับโครงสร้างให้เป็น equiaxed grains ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการลด anisotropy และเสริมความเสถียรของ passive film ดังนั้น การอบชุบความร้อนภายหลังการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย SLM จึงมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยกระบวนการ recrystallization และ grain growth ช่วยลดความเค้นตกค้าง (residual stress) และเพิ่มความสม่ำเสมอขององค์ประกอบ (element homogenization) ลด MPBs อย่างไรก็ดีตามการให้ความร้อนในอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาานาน ส่งผลให้เกิด carbide precipitates โดยเฉพาะตะกอนชนิด Cr-rich carbides ($Cr_{23}C_6$) ซึ่งมักเกิดขึ้นตาม grain boundary ได้^(12, 26)

จากการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบการอบชุบความร้อนสองเงื่อนไข คือที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 5 ชั่วโมง ไม่สามารถกำจัด anisotropy ได้อย่างสมบูรณ์ โดยยังพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในปริมาณการปลดปล่อยไอออนระหว่างทิศทาง XZ และ XY โดยเฉพาะในสารละลายกรด lactic ในทางตรงกันข้าม การอบชุบที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงผลที่แตกต่างอย่างชัดเจน โดยช่วยลด anisotropy ได้ โดย Takaichi และคณะ (2020)⁽²⁷⁾ ได้ศึกษาความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาควะหว่างตัวอย่างที่มีทิศทางแตกต่างกัน โดยในสภาวะ as-built พบว่า 0° -sample ประกอบด้วยโครงสร้าง fine cellular dendrites (0.5-1 μm) ในขณะที่ 90° -sample แสดงโครงสร้าง fine columnar dendrites (0.5-1 μm) ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะ microstructural anisotropy ตาม build direction เมื่อให้การอบชุบที่อุณหภูมิ 750 °C , 900 °C, 1050 °C และ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบชุบสูงขึ้น โครงสร้าง dendritic จะค่อย ๆ ถูกกำจัด ในตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1050 °C โครงสร้าง dendritic ยังคงสังเกตเห็นได้น้อยลง และพบการเกิด precipitates ตามแนว grain boundary และพบการก่อตัว

ของตะกอนขนาดใหญ่ (large particles) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1-1.5 μm บริเวณ grain boundary ทั้งใน 0° และ 90° การเกิดตะกอนขนาดใหญ่นี้ดักจับคาร์บอนและการลดลงของ Co และ Cr ใน matrix ซึ่งส่งผลให้เกิด Cr-depleted zones รอบ ๆ grain boundary และกลายเป็นตำแหน่งที่อ่อนแอต่อการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized corrosion) ในทางตรงกันข้ามจากการศึกษาของ Kajima และคณะ (2020)⁽¹²⁾ ถึงความแตกต่างทางโครงสร้างจุลภาคที่ อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า จากภาพ SEM ไม่พบลักษณะ fine cellular และ columnar dendrite แสดงถึงการเกิด recrystallization และ equiaxed grains ทำให้ anisotropy ของโครงสร้างจุลภาคลดลง นอกจากนี้ยัง Kajima และคณะ (2020) รายงานการกระจายตัวขององค์ประกอบอยู่ในระดับ weak segregation โดยมี Cr และ C สะสมตัวในระดับปานกลางที่ grain boundaries โดยไม่มี Cr depletion อย่างรุนแรง และยังช่วยให้ passive film ที่เกิดขึ้นมี Cr_2O_3 ที่เสถียรและต่อเนื่อง อีกทั้งตะกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในสภาวะนี้มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งลดผลกระทบต่อความต่อเนื่องของ passive film และลดโอกาสการเกิด localized corrosion ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปริมาณการปลดปล่อยไอออนของโลหะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการสร้างและคงสภาพของชั้นออกไซด์แบบพาสซีฟ (passive oxide layer)

การศึกษาของ Kittikundecha และคณะ (2019) สนับสนุนผลการศึกษานี้โดยรายงานว่า การอบชุบความร้อนมีบทบาทสำคัญต่อการก่อตัวและการหนาตัวของชั้นออกไซด์ โดยพบว่า ออกซิเจนมีการกระจายตัวเฉพาะบริเวณ outer surface ของตัวอย่างทุกกลุ่ม และมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนหลังการอบชุบความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเวลาการอบชุบเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย⁽²⁸⁾ ในงานวิจัยนี้ การลดลงของการปลดปล่อยไอออนโลหะในกลุ่มที่ผ่านการอบชุบความร้อน โดยเฉพาะ กลุ่ม HT1150-1h เมื่อเทียบกับกลุ่ม HT1050-5h อาจอธิบายได้จากการที่ชั้นออกไซด์หนาขึ้นและต่อมมีความต่อเนื่องมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการป้องกันการแพร่ของไอออน Co และ Cr ดีขึ้น ขณะที่กลุ่ม HT1050-5h มีแนวโน้มเกิดตะกอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่และการ segregate ของ Cr บริเวณ grain boundary ซึ่งรบกวนการสร้างชั้นออกไซด์ ทำให้ความหนาและความเสถียรของชั้นออกไซด์ลดลง และเกิดการปลดปล่อยไอออนมากกว่า

อย่างไรก็ตาม แม้กลุ่ม SLM จะแสดงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าโดยรวม แต่ยังคงพบความเป็น anisotropy ของสมบัติการกัดกร่อน โดยระนาบ XY ที่มีโครงสร้างแบบ fine cellular dendrites มีการปลดปล่อยไอออนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระนาบ XZ ซึ่งประกอบด้วย columnar dendrites ขนานไปกับ build direction และมีจำนวน melt pool boundaries มากกว่า

การอบชุบความร้อนมีบทบาทสำคัญในการลดข้อจำกัดนี้^(11, 12) โดยที่เงื่อนไข HT1050–5h ยังไม่สามารถกำจัด anisotropy ได้ทั้งหมด อีกทั้งยังพบการเกิดคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ตาม grain boundary ซึ่งก่อให้เกิด Cr depletion และลดเสถียรภาพของฟิล์มพาสซีฟ ในขณะที่เงื่อนไข HT1150–1h ส่งผลให้โครงสร้าง recrystallization และ equiaxed grains เกิดขึ้น พร้อมทั้งคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่กระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้ฟิล์มพาสซีฟมีความต่อเนื่องมากขึ้น และสามารถลด anisotropy ของการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน⁽¹²⁾ ดังนั้น การประยุกต์ใช้กระบวนการ SLM ร่วมกับการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถือเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตชิ้นงาน Co–Cr alloy สำหรับงานทันตกรรม เนื่องจากสามารถลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเชิงทิศทาง ปรับปรุงเสถียรภาพของฟิล์มพาสซีฟ และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน โดยยังช่วยลดระยะเวลาการอบชุบลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิต่ำกว่า (HT1050°C-5h) โดยไม่ลดทอนสมบัติทางวัสดุ

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดจากการใช้เพียงการทดสอบแช่แบบคงที่ตามมาตรฐาน ISO 10271 เท่านั้น การขาดการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เช่น potentiodynamic polarization หรือ electrochemical impedance spectroscopy (EIS) จำกัดการประเมินความเสถียรของฟิล์มพาสซีฟอย่างละเอียดมากขึ้น นอกจากนี้ เพื่อตรวจสอบกลไกการลด anisotropy เพิ่มเติมควรมีการศึกษาร่วมกับเทคนิควิเคราะห์ขั้นสูง เช่น EBSD (Electron Backscatter Diffraction) เพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงเกรนและทิศทางผลึกหลังการอบชุบความร้อน อีกทั้งควรมีการทดสอบในสภาวะที่เลียนแบบสภาวะในช่องปากอย่างต่อเนื่อง (dynamic immersion) เพื่อประเมินพฤติกรรมการกัดกร่อนที่แม่นยำมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. Anusavice KJ, Phillips RW, Shen C, Rawls HR. Phillips' science of dental materials. 12th ed. St. Louis, Mo.: Elsevier/Saunders St. Louis, Mo.; 2013. 21 p.
2. Kim HR, Jang SH, Kim YK, Son JS, Min BK, Kim KH, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Co-Cr Dental Alloys Fabricated by Three CAD/CAM-Based Processing Techniques. *Materials (Basel)*. 2016;9(7).
3. Al Jabbari YS. Physico-mechanical properties and prosthodontic applications of Co-Cr dental alloys: a review of the literature. *J Adv Prosthodont*. 2014;6(2):138-45.
4. Malten KE, Spruit D. The relative importance of various environmental exposures to nickel in causing contact hypersensitivity. *Acta Derm Venereol*. 1969;49(1):14-9.
5. Schneider R. Metals used to fabricate removable partial denture frameworks. *J Dent Technol*. 1996;13(2):35-42.
6. Saji VS, Choe H-C. Electrochemical behavior of Co-Cr and Ni-Cr dental cast alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009;19(4):785-90.
7. Augustyn-Nadzieja J, Łukaszczyk A, Zapała R. Microstructure and Corrosion Resistance Characteristics of Cr-Co-Mo Alloys Designed for Prosthetic Materials. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013;58.
8. Calzado M, Romero L, Domínguez I, Espinosa MM, Domínguez M. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity*. 2019;In Press.
9. Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015;2(4):041101.
10. Liu Y, Yang Y, Wang D. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(1):647-56.
11. Ko K-H, Kang H-G, Huh Y-H, Park C-J, Cho L-R. Effects of heat treatment on the microstructure, residual stress, and mechanical properties of Co-Cr alloy fabricated by

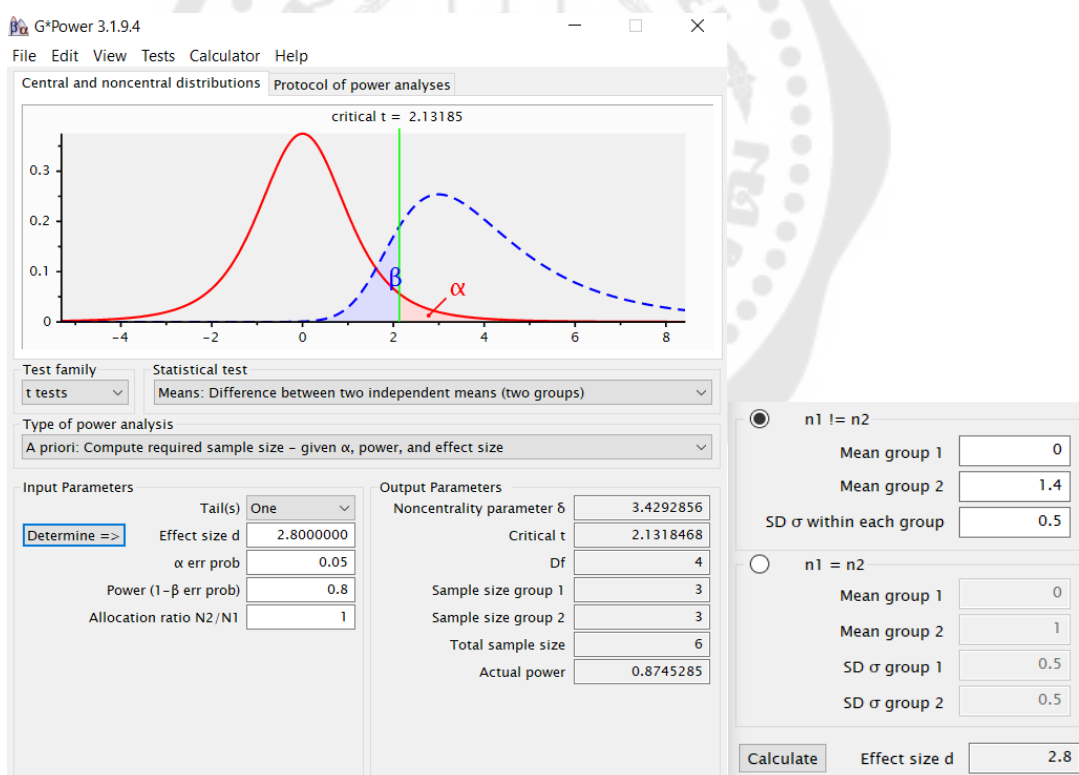
- selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022;126:105051.
12. Kajima Y, Takaichi A, Kittikundecha N, Htat HL, Cho HHW, Tsutsumi Y, et al. Reduction in anisotropic response of corrosion properties of selective laser melted Co–Cr–Mo alloys by post-heat treatment. *Dental Materials*. 2021;37(3):e98-e108.
 13. Mercieca S, Caligari Conti M, Buhagiar J, Camilleri J. Assessment of corrosion resistance of cast cobalt- and nickel-chromium dental alloys in acidic environments. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*. 2017;16(1):47-54.
 14. Renata Poljak-Guberina. DK-Z, Marina, Katunaric. Dental alloys and corrosion resistance. *Acta Stomatol Croat*. 2002;36:447-50.
 15. Asri RIM, Harun WSW, Samykano M, Lah NAC, Ghani SAC, Tarlochan F, et al. Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review. *Materials Science and Engineering: C*. 2017;77:1261-74.
 16. Kedici SP, Aksüt AA, Kılıçarslan MA, Bayramoğlu G, Gökdemir K. Corrosion behaviour of dental metals and alloys in different media. *J Oral Rehabil*. 1998;25(10):800-8.
 17. Geis-Gerstorfer J. In vitro corrosion measurements of dental alloys. *J Dent*. 1994;22(4):247-51.
 18. PareshPawar1, PB, R, S, MN. Salt Spray Corrosion Test Chamber. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. February 2019;6(2).
 19. Spiro Megremis CMC. Corosion and Tanish of Dental Alloys. *American Dental Association Clifton M Carey, American Dental Association Foundation*. 2006;13B.
 20. C.B. Boss KJF. *Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. 2004.
 21. Saeed Mohammed S, Kök M, Qader I, Qadir R. A Review on the Effect of Mechanical and Thermal Treatment Techniques on Shape Memory Alloys. 2022;5:51-61.
 22. Sato N. An overview on the passivity of metals. *Corrosion Science*. 1990;31:1-19.

23. Xin XZ, Chen J, Xiang N, Gong Y, Wei B. Surface characteristics and corrosion properties of selective laser melted Co–Cr dental alloy after porcelain firing. *Dental Materials*. 2014;30(3):263-70.
24. Hodgson AWE, Kurz S, Virtanen S, Fervel V, Olsson COA, Mischler S. Passive and transpassive behaviour of CoCrMo in simulated biological solutions. *Electrochimica Acta*. 2004;49(13):2167-78.
25. Hedberg YS, Qian B, Shen Z, Virtanen S, Odnevall Wallinder I. In vitro biocompatibility of CoCrMo dental alloys fabricated by selective laser melting. *Dental Materials*. 2014;30(5):525-34.
26. Takaichi A, Suyalatu, Nakamoto T, Joko N, Nomura N, Tsutsumi Y, et al. Microstructures and mechanical properties of Co–29Cr–6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;21:67-76.
27. Takaichi A, Kajima Y, Kittikundecha N, Htat HL, Wai Cho HH, Hanawa T, et al. Effect of heat treatment on the anisotropic microstructural and mechanical properties of Co–Cr–Mo alloys produced by selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;102:103496.
28. Kittikundecha N, Kajima Y, Takaichi A, Wai Cho HH, Htat HL, Doi H, et al. Fatigue properties of removable partial denture clasps fabricated by selective laser melting followed by heat treatment. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2019;98:79-89.



การคำนวณขนาดตัวอย่าง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experimental research) โลหะผสมที่ใช้ครั้งนี้เป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ใช้ในงานทันตกรรม โดยเตรียมชิ้นงานโลหะขนาด 10x10x1 มิลลิเมตร แล้วทดสอบอัตราการกัดกร่อนในน้ำลายเทียม โดยจำลองในสภาวะปกติ และสภาวะที่น้ำลายมีความเป็นกรด ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Sven Mercieca และคณะ ในปี 2018 ที่ทำการศึกษาเรื่อง Assessment of corrosion resistance of cast cobalt and nickel-chromium dental alloys in acidic environments ผลการศึกษาพบว่า ค่าของ Concentration of Cr และ Co ions leached from the Co-Cr alloys หลังจากการ exposure ต่อ acidified saliva มีค่าเท่ากับ 0 และ 1.4 mg/g ตามลำดับ (mean1 = 0, mean2 = 1.4) เมื่อใช้โปรแกรม G*Power ในการคำนวณขนาดตัวอย่างโดยกำหนดค่า α (α) = 0.05 และ power ($1-\beta$) = 0.8 และ ratio = 1 ดังนี้



ภาพประกอบ 19 การคำนวณขนาดตัวอย่าง

จะได้ว่า ในการศึกษาครั้งนี้ต้องใช้กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อยกลุ่มละ 3 ชิ้นงาน

ตาราง 16 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรด้วย Kolmogorov-Smirnov และ Shapiro-Wilk

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Metal Released	.184	100	.000	.854	100	.000

a. Lilliefors Significance Correction

Descriptives

		Statistic	Std. Error	
Metal Released	Mean	.0692	.00584	
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	.0576	
		Upper Bound	.0808	
	5% Trimmed Mean	.0643		
	Median	.0500		
	Variance	.003		
	Std. Deviation	.05844		
	Minimum	.00		
	Maximum	.29		
	Range	.29		
	Interquartile Range	.06		
	Skewness	1.354	.241	
	Kurtosis	1.517	.478	

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.001 จึงปฏิเสธสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำค่า Skewness (1.354) และ Kurtosis (1.517) มาพิจารณาร่วมตามเกณฑ์ของ Kline⁽²⁹⁾ ซึ่งระบุว่า Skewness ไม่ควรเกิน ± 3 และ Kurtosis ไม่ควรเกิน ± 10 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ

ตาราง 17 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Cobalt ในสารละลาย SBF หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)

กลุ่มตัวอย่าง	ชิ้นงานตัวอย่าง				
	1	2	3	4	5
Cast	0.006	0.002	0.008	0.003	0.001
1050-5h XZ	0	0.001	0.001	0.001	0.002
1050-5h XY	0	0.003	0.004	0.002	0.003
1150-1h XZ	0.006	0.004	0.002	0.004	0.001
1150-1h XY	0.001	0.001	0.003	0.002	0.001

ตาราง 18 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Cobalt ในสารละลายกรดแลคติก หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)

กลุ่มตัวอย่าง	ชิ้นงานตัวอย่าง				
	1	2	3	4	5
Cast	0.017	0.018	0.019	0.013	0.018
1050-5h XZ	0.022	0.014	0.029	0.013	0.012
1050-5h XY	0.013	0.015	0.009	0.004	0.012
1150-1h XZ	0.015	0.018	0.008	0.006	0.022
1150-1h XY	0.013	0.007	0.018	0.008	0.006

ตาราง 19 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Chromium ในสารละลาย SBF หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)

กลุ่มตัวอย่าง	ชิ้นงานตัวอย่าง				
	1	2	3	4	5
Cast	0.003	0.003	0.003	0.006	0.003
1050-5h XZ	0.007	0.004	0.003	0.002	0.003
1050-5h XY	0.005	0.002	0.003	0.002	0.003
1150-1h XZ	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
1150-1h XY	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002

ตาราง 20 ปริมาณการปลดปล่อยไอออน Chromium ในสารละลายกรดแลคติก หลังแช่ระยะเวลา 7 วัน (หน่วย : $\mu\text{g/mL}$ หรือ ppm)

กลุ่มตัวอย่าง	ชิ้นงานตัวอย่าง				
	1	2	3	4	5
Cast	0.016	0.005	0.005	0.011	0.018
1050-5h XZ	0.014	0.009	0.012	0.008	0.007
1050-5h XY	0.007	0.004	0.007	0.004	0.007
1150-1h XZ	0.007	0.009	0.005	0.005	0.009
1150-1h XY	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006

ตาราง 21 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting โดยใช้ One-way ANOVA (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

Source of Variation	Sum of Squares	Df	Mean Squares	F	P-value
Between Groups	0.002	2	0.001	2.533	0.102
Within Groups	0.008	22	0.000348		
Total	0.009	24			

ตาราง 22 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Cobalt ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ One-Way ANOVA แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

Source of Variation	Sum of Squares	Df	Mean Squares	F	P-value
Between Groups	0.008	2	0.004	1.182	0.325
Within Groups	0.076	22	0.003		
Total	0.084	24			

ตาราง 23 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย SBF ระหว่างวิธีการ Casting กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ One-Way ANOVA แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

Source of Variation	Sum of Squares	Df	Mean Squares	F	P-value
Between Groups	0.00021	2	0.000103	0.743	0.487
Within Groups	0.003	22	0.00014		
Total	0.003	24			

ตาราง 24 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยไอออนของ Chromium ในสารละลาย Lactic ระหว่างวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม กับ วิธีการ Selective laser melting (กรณีไม่คำนึงถึงทิศทางการขึ้นรูป) โดยใช้ One-Way ANOVA แสดงค่าความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

Source of Variation	Sum of Squares	Df	Mean Squares	F	P-value
Between Groups	0.006	2	0.003	2.810	0.082
Within Groups	0.025	22	0.001		
Total	0.032	24			