

การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพและอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟและการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติม

นางสาวภิษรชต์ อยู่ตรีรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

COMPARATIVE STUDY ON QUALITY AND CORROSION RATE OF SOLDERED AND
LASER-WELDED JOINT OF Ni-FREE Co-Cr ALLOY USING FILLER

Miss Piyarach Eutrarak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพและอัตราการกัดกร่อน
ของรอยเชื่อมของโลหะผสม โคบอลต์-โครเมียมที่
ปราศจากนิกเกิลระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟและการเชื่อม
ด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติม

โดย

นางสาวกษิรัชต์ อยู่ตรีรักษ์

สาขาวิชา

ทันตกรรมประดิษฐ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.สุจิต พูลทอง)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร.ปรารมภ์ ซาลิม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วัชรศักดิ์ ตุมราศวิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.สมชาย อูร์พีพล)

ภิชรัชต์ อยู่ตรีรักษ์ : การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพและอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟและการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติม. (COMPARATIVE STUDY ON QUALITY AND CORROSION RATE OF SOLDERED AND LASER-WELDED JOINT OF Ni-FREE Co-Cr ALLOY USING FILLER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ทพ.ดร.วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์, 92 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพและอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟและการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติม โดยเตรียมชิ้นงานทั้งหมด 45 ชิ้น ตามมาตรฐาน ISO 9333 แบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 15 ชิ้น กลุ่มควบคุมเป็นชิ้นงานที่ไม่มีการเชื่อมโลหะ ชิ้นงานของกลุ่มบัดกรีด้วยไฟและกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์จะถูกนำมาตัดตรงกลาง และใช้อุปกรณ์ยึดชิ้นงานเพื่อควบคุมให้มีขนาดช่องว่างที่เท่ากันทุกชิ้นงานคือ 0.2 ± 0.1 มิลลิเมตร และทำการเชื่อมด้วยวิธีบัดกรีด้วยไฟโดยใช้โลหะบัดกรี และเชื่อมด้วยเลเซอร์โดยใช้โลหะเติมตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต การประเมินคุณภาพของรอยเชื่อมทำโดยใช้วิธีทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานด้วยเครื่องมือโคร โฟกัสเอกซเรย์ ซึ่งได้ข้อมูลเป็นภาพดิจิทัล และใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์รูพรุนในภาพรอยเชื่อม การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคโพเทนชิอไดนามิกโพลาริเซชัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก ที่ปรับค่า pH เท่ากับ 2.3 ด้วยกรดแลกติก และควบคุมอุณหภูมิที่ 37°C วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม one-way analysis of variance (ANOVA) ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีเปอร์เซ็นต์รูพรุนเฉลี่ยสูงสุด (3.58%) รองลงมาคือกลุ่มบัดกรีด้วยไฟ (0.52%) และกลุ่มควบคุม (0.06%) ตามลำดับ จากผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนพบว่า กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยสูงสุด (0.19 มิลลิเมตรต่อปี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) ในขณะที่อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของกลุ่มบัดกรีด้วยไฟ (0.14 มิลลิเมตรต่อปี) และกลุ่มควบคุม (0.14 มิลลิเมตรต่อปี) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$) สรุปว่า การเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลด้วยวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีโอกาสเกิดรูพรุนและรอยแตกได้มากกว่าซึ่งนำไปสู่การมีอัตราการกัดกร่อนที่สูงกว่า และถึงแม้ว่ากลุ่มบัดกรีด้วยไฟจะมีเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่มากกว่ากลุ่มควบคุมแต่อัตราการกัดกร่อนของทั้ง 2 กลุ่มนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ภาควิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อ.....อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5276121432 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEYWORDS : SOLDERING / LASER WELDING / CORROSION RATE / Ni-FREE Co-Cr ALLOY

PIYARACH EUTRIRAK : COMPARATIVE STUDY ON QUALITY AND CORROSION RATE OF SOLDERED AND LASER-WELDED JOINT OF Ni-FREE Co-Cr ALLOY USING FILLER. ADVISOR : ASSIT. PROF. VIRITPON SRIMANEEPONG, Ph.D., 92 pp.

The purpose of this study was to compare the quality and corrosion rates between soldered and laser-welded joints of cast Ni-free Co-Cr alloy using filler. Forty-five rectangular specimens were cast and divided into three groups (n=15). For the as-cast group, the fifteen specimens were left as cast. The soldered and laser-welded test groups were sectioned at the center and rejoined by either soldering or laser welding using compatible fillers. The quality of the joint area was observed using microfocus X-ray and the percentage of porosity was calculated. Potentiodynamic polarization was performed in a 0.9 wt.% NaCl solution (pH 2.3), at 37°C, to assess the corrosion rate. The data were statistically analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) and Scheffe post hoc test at a 95% of significance level. The results revealed that the mean percentage of porosity of the welded group was 3.58%, which was significantly higher than that of the soldered (0.52%) and as-cast (0.06%) groups. Potentiodynamic polarization demonstrated that the mean corrosion rate of the laser-welded joints was the highest (0.19 mm/year) which was significantly different ($P < .05$) compared to the other groups. The corrosion rates of the soldered joints (0.14 mm/year) and as-cast (0.14 mm/year) group were the same. Thus, laser-welded Ni-free Co-Cr alloy showed a higher possibility of porosity and cracks leading to a higher corrosion rate. Soldered Ni-free Co-Cr alloy showed no significant difference in corrosion rate compared to the as-cast Co-Cr alloy.

Department :Prosthodontics..... Student's Signature.....

Field of Study :Prosthodontics..... Advisor's Signature.....

Academic Year : ..2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือ การดูแลเอาใจใส่ และการให้คำแนะนำเป็นอย่างดีจาก ผศ.ทพ.ดร.วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และนางสาวกนกวรรณ แสงเกียรติคุณ ผู้เป็นนักวิจัยและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองเป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา อันมีประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ทำให้ขั้นตอนต่างๆ ในการดำเนินงานมีความราบรื่น และมีประสิทธิภาพ รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์จนเป็นที่เรียบร้อย

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ทพญ.ดร.ปรารมภ์ ชาลิมิ อ.ทพ.ดร.วัชรศักดิ์ ตุมราศวิน และ รศ.ทพ.ดร.สมชาย อรุณีพิล คณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อ.เคโซ ทองอร่าม รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว และนิสิตที่เกี่ยวข้องทุกคน ของภาควิชาชีวเคมีและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ เกี่ยวกับการใช้งานของเครื่องมือโครโมโทกราฟีแก๊สเอ็กซ์เรย์ อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี รวมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้เครื่องโพเทนชิออสแตท และอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และให้ความเอื้อเฟื้ออย่างยิ่งตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท พีซี เติ้นทัด แล็บ จำกัด และบริษัท เค เติ้นทัด แล็บ จำกัด ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานวิจัย และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณธีระ เมฆบุญส่งลาก เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ และจัดเตรียมอุปกรณ์เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านของศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนกระจกไทยอาสา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง รวมทั้งเพื่อนๆ ทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจสำคัญตลอดเวลาทำให้ผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกมากมายซึ่งมิได้กล่าวถึง ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	4
1.7 คำสำคัญ.....	4
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โลหะผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดคิดแน่น.....	5
2.2 ความหมายของการบัดกรี การเล่นประสาน และการเชื่อม.....	6
2.3 วิธีการเชื่อมโลหะ.....	7
2.4 วิธีการบัดกรีด้วยไฟ.....	8
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมบัดกรี.....	10
2.6 งานวิจัยเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมบัดกรี.....	11
2.7 วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์.....	11
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์.....	12
2.9 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์โดยทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน.....	17
2.10 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์โดยทดสอบแบบทำลายชิ้นงาน.....	17

	หน้า
2.11 งานวิจัยเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบต่างๆ โดยทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน.....	20
2.12 งานวิจัยเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบต่างๆ โดยทดสอบแบบทำลายชิ้นงาน.....	20
2.13 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม.....	23
2.14 การถ่ายภาพด้วยรังสี.....	23
2.15 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการถ่ายภาพรังสี.....	26
2.16 โครงสร้างจุลภาค.....	27
2.17 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม.....	28
2.18 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบัดกรี.....	29
2.19 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเลเซอร์.....	30
2.20 การกัดกร่อน.....	31
2.21 ชนิดของการกัดกร่อน.....	32
2.22 วิธีการทดสอบการกัดกร่อน.....	34
2.23 ลักษณะสำคัญทางคลินิกที่พบในรอยเชื่อมบัดกรีหรือรอยเชื่อมเลเซอร์ที่เกิดการกัดกร่อน.....	36
2.24 งานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรี.....	38
2.25 งานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเลเซอร์.....	41
2.26 งานวิจัยเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนระหว่างรอยเชื่อมบัดกรีและรอยเชื่อมเลเซอร์.....	41
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	43
3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	43
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	43
3.3 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	43
3.4 วิธีการวิจัย.....	45
3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	45
3.4.2 การทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม.....	48
3.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	51
3.4.4 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อม.....	51

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	53
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	54
4.1 ผลการทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม.....	54
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	54
4.3 ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อม.....	55
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย.....	57
5.1 อภิปรายผลการวิจัย.....	57
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	71
ภาคผนวก ค.....	80
ภาคผนวก ง.....	83
ภาคผนวก จ.....	86
ภาคผนวก ฉ.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมี อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิทำงาน และ ความหนาแน่นของโลหะผสม โลหะบัดกรี และโลหะเติม.....	46
ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความ หนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าอัตราการกัดกร่อน.....	56

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 แสดงชิ้นงานที่ถูกยึดด้วยอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน โดยมีช่องว่างประมาณ 0.2±0.1 มิลลิเมตร.....	47
ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ.....	47
ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์.....	48
ภาพที่ 4 แสดงการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส.....	49
ภาพที่ 5 แสดงแผ่นบันทึกภาพชนิดความละเอียดสูง.....	49
ภาพที่ 6 แสดงเครื่องสแกนแผ่นบันทึกภาพ.....	49
ภาพที่ 7 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมอิมเมจ เจ.....	50
ภาพที่ 8 แสดงภาพรอยเชื่อมที่กำหนดให้มีขนาดเท่ากันทุกชิ้นงาน.....	50
ภาพที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ภาพรอยเชื่อม.....	50
ภาพที่ 10 แสดงพื้นที่รูพรุนในภาพรอยเชื่อมซึ่งแสดงเป็นพื้นที่สีแดง.....	51
ภาพที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์รูพรุนในภาพรอยเชื่อม.....	51
ภาพที่ 12 แสดงอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างโดยนำชิ้นงานใส่เข้ากับ Teflon holder พร้อมกับ O-ring ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร.....	52
ภาพที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของเปอร์เซ็นต์รูพรุนของกลุ่มควบคุม กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ และกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์.....	54
ภาพที่ 14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานควบคุมที่เป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (1) ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ (2) และชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ (3).....	55
ภาพที่ 15 แสดงกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานควบคุม ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ และชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก (pH 2.3).....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเชื่อมโลหะมีความสำคัญโดยเฉพาะกับงานทางทันตกรรมประดิษฐ์ เช่น การเชื่อมโครงสร้างฐานโลหะ (metal substructure) ในงานสะพานฟันหลายยูนิต การเชื่อมโครงโลหะของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ การเชื่อมบริเวณจุดสัมผัสของฟัน ปรับแต่งด้านบดเคี้ยว การเชื่อมแก้ไขจุดบกพร่อง และงานทันตกรรมรากเทียม เป็นต้น [1] นอกจากนี้หลังจากการลองชิ้นงานแล้วชิ้นงานกระดกใส่ไม่เข้าที่ เนื่องจากเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) จะต้องแก้ปัญหาคือได้โดยตัดและเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกันใหม่ เพื่อปรับปรุงให้มีความแนบสนิทของขอบที่ดี [2] โดยไม่แนะนำให้ทำสะพานฟันหลายยูนิตเป็นชิ้นเดียว เนื่องจากทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของอินเวสเมนต์ในขั้นตอนการเหวี่ยงโครงโลหะ [3, 4] ปัจจุบันการเชื่อมโลหะที่ใช้ในทางทันตกรรมมีหลายวิธี ได้แก่ การบัดกรีด้วยไฟ (torch soldering) การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (laser welding) การเชื่อมด้วยอินฟราเรด (infrared welding) การเชื่อมแบบทิก (tungsten inert gas welding or TIG welding) และการบัดกรีด้วยไฟฟ้า (electric brazing) เป็นต้น แต่วิธีที่นิยมคือ การบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [5]

การบัดกรีด้วยไฟเป็นการเชื่อมโลหะเข้าด้วยกัน โดยในขั้นตอนการบัดกรีจะประกอบด้วยโลหะชิ้นงาน (parent metal) โลหะบัดกรี (solder) สารช่วยบัดกรี (flux) และแหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งนิยมใช้เปลวไฟจากก๊าซโพรเพน (propane oxygen torch) [4] วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถมองเห็นชิ้นงานได้ง่าย และควบคุมความร้อนไปยังชิ้นงานได้โดยตรง แต่มีข้อเสียคือใช้เวลานาน และชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมจากการบัดกรีมักมีความแข็งแรงต่ำกว่าการทำเป็นชิ้นเดียว (one-piece casting) เนื่องจากเกิดอินคลูชันของก๊าซในระหว่างการหลอมเหลวโลหะบัดกรี มีสิ่งเจือปน (impurity) จากสารช่วยบัดกรี และอาจเกิดความร้อนที่มากเกินไป (overheat) ของโลหะบัดกรีหรือโลหะชิ้นงาน ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบที่แตกต่างกันระหว่างโลหะบัดกรีกับโลหะชิ้นงาน ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (galvanic corrosion) ซึ่งส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงลดลงเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน [6]

การเชื่อมด้วยเลเซอร์เป็นการเชื่อมโลหะอีกวิธีหนึ่ง ที่จะใช้โลหะเติม (filler) หรือไม่ใช้ก็ได้ ซึ่งเครื่องเลเซอร์ที่ใช้ในการเชื่อมคือ นีโอดีเมียมเย็กเลเซอร์ (Nd:YAG laser) ในทางทันตกรรมเริ่มนำวิธีนี้มาใช้โดย Gordon และ Smith [7] ตั้งแต่ปี 1970 และเป็นที่นิยมเมื่อประมาณ 15 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้เวลาน้อยกว่าการบัดกรี เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเป็นบริเวณแคบๆ และขั้นตอนทั้งหมดสามารถทำได้โดยตรงบนแบบจำลอง ทำให้ลดการบิดเบี้ยว

ของชิ้นงาน นอกจากนี้การเชื่อมด้วยเลเซอร์ยังสามารถทำได้เมื่อโลหะที่จะเชื่อมอยู่ใกล้หรือสัมผัสกับอะคริลิกเรซินหรือเซรามิก [8] โดยห้องปฏิบัติการทันตกรรมส่วนใหญ่จะเชื่อมโลหะด้วยวิธีบัดกรีด้วยไฟ ยังคงมีส่วนน้อยที่ใช้วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เนื่องจากเครื่องมือและโลหะเดิมมีราคาสูง ซึ่งการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในโครงโลหะฟันปลอมมักจะใช้โลหะเดิม เพื่อเติมโลหะเข้าไปในช่องว่างให้เต็ม โดยการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในทางทันตกรรมมีการศึกษาอย่างมาก และประสบความสำเร็จในการเชื่อมโลหะไทเทเนียม และโลหะผสมไทเทเนียม [9, 10] โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Co-Cr) ที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่นยังมีการศึกษาไม่มากนัก และในปัจจุบันโลหะผสมทอง และโลหะผสมแพลเลเดียมมีราคาสูงเพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้ใช้โลหะผสมไร้สกุลมากขึ้น ซึ่งในทางทันตกรรมมีแนวโน้มที่จะใช้โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมแทนโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม (Ni-Cr) เนื่องจากผลทางความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความเหมาะสมในสมบัติทางกลและทางกายภาพ [11-13]

เทคนิคการเชื่อมโลหะมีผลต่อทั้งสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของรอยเชื่อม โดยการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเป็นสมบัติทางเคมีที่มีความสำคัญ เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีผลต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก และยังทำให้เกิดอาการแพ้ได้ ดังนั้นชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมจึงควรมีความทนทานต่อสภาวะในช่องปาก หรือมีการปล่อยไอออนของโลหะออกมาน้อยที่สุด นอกจากนี้ถ้าบริเวณรอยเชื่อมมีจุดบกพร่องหรือรูพรุน จะส่งเสริมให้เกิดการสะสมของคราบจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น [14-17] จึงจำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมอย่างละเอียด ซึ่งจุดบกพร่องบริเวณพื้นผิวรอยเชื่อมสามารถตรวจสอบด้วยตาเปล่าได้ ส่วนจุดบกพร่องที่อยู่ภายในรอยเชื่อมสามารถตรวจสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพรังสีซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน [4, 18] อย่างไรก็ตามภาพถ่ายรังสีทางทันตกรรมสามารถตรวจสอบจุดบกพร่องที่มีขนาดใหญ่ในระดับมิลลิเมตรเท่านั้น ถ้าจุดบกพร่องมีขนาดเล็กเกินไปก็ไม่สามารถตรวจสอบได้

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของรอยเชื่อม และในการเชื่อมด้วยเลเซอร์มักจะไม่ใช่โลหะเดิม [6, 9, 10] ซึ่งในทางปฏิบัติบางครั้งมีความจำเป็นต้องใช้โลหะเดิมในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่ศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมโดยใช้โลหะเดิม และยังมีการศึกษาอยู่น้อยที่ประเมินคุณภาพของรอยเชื่อมที่ใช้โลหะเดิมโดยไม่ทำลายชิ้นงาน การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมโดยไม่ทำลายชิ้นงาน และศึกษาอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเดิมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณภาพของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล
2. เพื่อศึกษาอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. สมมติฐานว่าง (H_0) : คุณภาพของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : คุณภาพของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

2. สมมติฐานว่าง (H_0) : อัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : อัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

โลหะผสมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล ที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดคิเดนแน่น โดยชนิดของโลหะบัดกรีและโลหะเติมจะใช้ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตที่มีส่วนประกอบใกล้เคียงกับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบออกแบบเพื่อความสะดวกในการทดสอบการกัดกร่อนโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 9333 จึงไม่ทำในรูปแบบครอบฟัน โดยเตรียมชิ้นงานโลหะ

ขนาด 10×10×1 มิลลิเมตร ตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานซึ่งจะได้ขนาดประมาณ 5×10×1 มิลลิเมตร และกำหนดขนาดช่องว่างที่จะเชื่อมเท่ากับ 0.2±0.1 มิลลิเมตร

การทดสอบแบ่งเป็นการทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม และการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อม โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล

1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. วิธีการถ่ายภาพรังสีทำให้เห็นเป็นภาพ 2 มิติ ไม่สามารถบอกจำนวน และขนาดของรูพรุนภายในรอยเชื่อมได้อย่างแท้จริง จึงเป็นการประเมินเปรียบเทียบโดยภาพรวมเท่านั้น
2. การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experimental research) จึงไม่สามารถควบคุมปัจจัยบางอย่างให้เหมือนกับสภาพในช่องปากได้ทุกประการ แต่ทำในสถานะที่เป็นกรดเพื่อส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนมากกว่าปกติ

1.7 คำสำคัญ

การบัดกรีด้วยไฟ (Soldering)

การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser welding)

อัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate)

โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล (Ni-free Co-Cr alloy)

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความแตกต่างของคุณภาพและอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติม
2. เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเลือกใช้โลหะผสมในงานทันตกรรมประดิษฐ์คือ ราคาของโลหะผสม สมบัติทางกายภาพ และความต้านทานการกัดกร่อน โดยค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) มีความสำคัญสำหรับโลหะผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น เนื่องจากโลหะผสมที่มีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงจะทำให้โลหะผสมนั้นไม่บิดงอเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งในอดีตมักจะใช้โลหะผสมทองเนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี และมีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นมากเพียงพอสำหรับการบูรณะครอบฟันซี่เดียว หรือฟันเทียมติดแน่นที่มีช่วงสั้นๆ ต่อมาบริษัทผู้ผลิตจึงแนะนำการใช้โลหะผสมแพลเลเดียม เนื่องจากมีความแข็ง (hardness) สูง และมีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงกว่าโลหะผสมทอง อย่างไรก็ตามโลหะผสมทั้งสองกลุ่มนี้ยังคงมีราคาค่อนข้างสูง และมีการตระหนักถึงอันตรายของปริมาณแพลเลเดียมไอออนที่เข้าสู่ร่างกาย ทำให้มีการใช้โลหะผสมทองและโลหะผสมแพลเลเดียมลดลง [19, 20]

ในปัจจุบันมีการใช้โลหะผสมไร้สกุล เช่น โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม เป็นต้น ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพที่เป็นข้อได้เปรียบอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งสูง มีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงกว่าโลหะผสมทองถึง 2 เท่า มีความต้านทานต่อการแอ่นตัว (sag resistance) สูง มีความต้านทานต่อการผิดรูปสูง (resistance to deformation) สามารถทำให้โครงโลหะได้บางกว่า และสามารถทำโครงโลหะที่ยาวสำหรับใส่ฟันหลายซี่ได้ นอกจากนี้ยังมีราคาค่อนข้างคงที่และถูกกว่าโลหะผสมทองและโลหะผสมแพลเลเดียมซึ่งปัจจุบันมีราคาสูงขึ้น [19] อย่างไรก็ตามข้อเสียของโลหะผสมไร้สกุลคือ มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ ขัดแต่งยาก ทำให้เกิดอาการแพ้ได้ นอกจากนี้ยังมีเทคนิคที่ยุ่งยากในขั้นตอนการบัดกรีเนื่องจากโลหะผสมไร้สกุลมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง [11, 12, 21]

โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม นิยมนำมาใช้ในการทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น แต่พบว่าโลหะผสมชนิดนี้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย มีผลเป็นพิษต่อร่างกาย และทำให้เกิดอาการแพ้ได้ค่อนข้างสูง [21] โดยโลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่เป็นพิษต่อเซลล์โดยไปยับยั้งอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้อเยื่อเหงือก (proliferation rate of gingival fibroblasts) [22] ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังหลีกเลี่ยงการใช้โลหะผสมที่มีนิกเกิล โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีประวัติแพ้ นิกเกิล [23]

ในสมัยก่อนโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม จะถูกนำมาใช้ในงานโครงโลหะฟันปลอม บางส่วนถอดได้เป็นหลัก ปัจจุบันมีทันตแพทย์ที่นิยมใช้โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจาก นิกเกิลในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่นเพิ่มมากขึ้น และยังใช้ในงานรากเทียม (dental implant suprastructures) อีกด้วย เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีสมบัติทางกลที่ดีมาก และมีความ ต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง ซึ่งความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียม และโมลิบดีนัม โดยจะต้องมีส่วนประกอบของโครเมียมอยู่ ประมาณ 16-20% โดยน้ำหนัก [13, 24] และโครเมียมยังเป็นธาตุที่ให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่น (resilience) อีกด้วย [25, 26] นอกจากนี้โลหะผสมชนิดนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงเนื่องจาก มีฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ และโมลิบดีนัมออกไซด์ปกคลุมอยู่บนพื้นผิว ซึ่งฟิล์มนี้สามารถ เกิดขึ้นได้เอง [5, 13, 24, 27] และยังสามารถเกิดฟิล์มขึ้นใหม่ได้ซ้ำ เพื่อซ่อมแซมพื้นผิวที่มี จุดบกพร่องจากการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) และการกัดกร่อนในร่องรอย (crevice corrosion) [28] อย่างไรก็ตามโลหะที่มีโคบอลต์เป็นส่วนประกอบพบว่า สามารถทำให้เกิด อาการแพ้ เป็นพิษต่อเซลล์ และเนื้อเยื่อของร่างกายได้เช่นกัน [14, 21]

2.2 ความหมายของการบัดกรี การเชื่อมประสาน และการเชื่อม [4]

2.2.1 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรี คือ กระบวนการเชื่อมโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยให้ความ ร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะชิ้นงาน โดยมีโลหะบัดกรีที่เรียกว่า solder ซึ่งมี อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 450°C (840°F) โลหะบัดกรีนี้เมื่อถูกความร้อนจะละลายเข้าไปบนผิว โลหะชิ้นงานทั้งสอง โดยโลหะชิ้นงานไม่ละลายหรือเปลี่ยนสมบัติไปจากเดิม ซึ่งจะยึดติดกันด้วย พันธะทางกล

2.2.2 การเชื่อมประสาน (Brazing)

การเชื่อมประสาน คือ กระบวนการเชื่อมโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยให้ ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะชิ้นงาน ต่างจากการบัดกรีคือ โลหะบัดกรี จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 450°C (840°F)

ในทางทันตกรรมโลหะหลายชนิดเชื่อมโดยการเชื่อมประสานแต่เรียกเป็นการบัดกรี เนื่องจากนิยมนำใช้กันมากกว่า

2.2.3 การเชื่อม (Welding)

การเชื่อม หมายถึง กระบวนการเชื่อมโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่าให้ติดกันโดยใช้ความร้อน ความดัน หรือทั้งสองอย่าง โดยมีโลหะเติมหรือไม่มีโลหะเติมก็ได้ ซึ่งเป็นการเชื่อมผ่านตำแหน่งรอยต่อระหว่างโลหะชิ้นงาน

2.3 วิธีการเชื่อมโลหะ

ถ้าแบ่งตามขั้นตอนการเชื่อมโลหะจะแบ่งเป็น 2 แบบ [4] คือ

1. กระบวนการเชื่อมโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกันก่อนขึ้นรูปเซรามิก (presoldering/preceramic solder)
2. กระบวนการเชื่อมโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกันหลังขึ้นรูปเซรามิก (postsoldering/postceramic solder)

ถ้าแบ่งตามเทคนิคที่ใช้เชื่อมโลหะจะมีหลายวิธี คือ วิธีแบบดั้งเดิม (conventional) ได้แก่ การบัดกรีด้วยไฟ ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมโลหะก่อนขึ้นรูปเซรามิก และการใช้เตาเผา (oven heat หรือ porcelain furnace) ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิก โดยต่อมาได้มีการแนะนำวิธีการเชื่อมด้วยอินฟราเรด และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [29, 30] นอกจากนี้ยังมีวิธีการเชื่อมแบบทิก และวิธีการบัดกรีด้วยไฟฟ้า เป็นต้น [10, 31]

ข้อดีของวิธีการเชื่อมโลหะก่อนขึ้นรูปเซรามิก คือ

1. สามารถทำให้บริเวณที่จะเชื่อมโลหะเป็นเส้นทแยงมุมเพื่อเพิ่มความลึกของบริเวณที่เชื่อมโลหะ และทำให้มีอายุการใช้งานนานขึ้น
2. หลีกเลี่ยงโอกาสที่พอร์ซเลนจะเกิดการแตกหัก (porcelain cracking) และพอร์ซเลนเปลี่ยนสี (discoloration) ในขั้นตอนการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิก

ข้อดีของวิธีการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิก คือ

1. ขั้นตอนการทำพอร์ซเลนสามารถทำโดยแยกแต่ละส่วนของฟันหลัก และฟันแขวน (pontics)
2. สามารถแก้ไขชิ้นงานได้ จากการเคลื่อนที่ของฟันในระหว่างรอการใส่ชิ้นงาน หลังจากพิมพ์ปากครั้งสุดท้าย
3. ลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานจากการเกิดออกซิเดชันในขั้นตอนการทำพอร์ซเลน
4. สามารถใช้โลหะบัดกรีที่ต่างจากโลหะชิ้นงานได้ [32]

ปัจจุบันวิธีที่นิยมในการเชื่อมโลหะทางทันตกรรมคือ การบัดกรีด้วยไฟ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [5] ซึ่งห้องปฏิบัติการทางทันตกรรมส่วนใหญ่จะเชื่อมโลหะด้วยวิธีบัดกรีด้วยไฟ มีส่วนน้อยที่ใช้วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เนื่องจากเครื่องมือและโลหะเต็มมีราคาสูง

2.4 วิธีการบัดกรีด้วยไฟ

การบัดกรีด้วยไฟเป็นการเชื่อมโลหะเข้าด้วยกัน โดยในขั้นตอนการบัดกรีจะประกอบด้วย โลหะขึ้นงาน โลหะบัดกรี สารช่วยบัดกรี และแหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งนิยมใช้เปลวไฟจากก๊าซโพรเพน [4]

โลหะบัดกรีที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีอุณหภูมิหลอมเหลว (fusion range) ต่ำกว่าโลหะขึ้นงานให้ติดกันประมาณ 100-150 องศาเซลเซียส มิฉะนั้นโลหะขึ้นงานจะหลอมละลายไปด้วย
2. ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีในช่องปาก
3. มีความแข็งแรงสูงคือควรเท่ากับโลหะขึ้นงานให้ติดกัน
4. มีสีเหมือนกับโลหะขึ้นงาน
5. มีการไหลที่ดีคือไหลไปตามบริเวณที่จะเชื่อม โดยสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนเล็กๆบนผิวของโลหะได้ และยังไหลไปตามบริเวณที่จะเชื่อมเป็นแบบกะปิลารี (capillary action) ถ้ามีการไหลที่ไม่ดีจะทำให้เกิดรูพรุน ซึ่งจะเกิดเป็นจุดรวมความเค้น (stress concentration) และอาจเป็นร่องหรือซอก (crevices) ที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (stress corrosion) และการกัดกร่อนได้รอยซ้อนที่ส่งผลให้รอยเชื่อมบัดกรี (soldered joint) มีความแข็งแรงลดลง

6. มีแรงตึงผิวต่ำและมี low contact angle เมื่อถูกหลอมเหลว สารช่วยบัดกรีที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ลดการเกิดออกไซด์หรือละลายออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่โลหะได้รับความร้อน
2. ยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน โดยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกับโลหะ
3. ช่วยทำให้โลหะบัดกรีไหลแผ่ไปบนพื้นผิวโลหะได้ง่ายขึ้น
4. ต้องมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะบัดกรีและโลหะที่จะบัดกรี แต่ไม่ควรเผาไหม้หรือระเหยออกไปหมด
5. สามารถกำจัดออกได้ง่ายหลังจากการบัดกรี

โดยถ้าใช้สารช่วยบัดกรีมากเกินไปจะทำให้เกิดอินคลูชันของสารช่วยบัดกรี (flux inclusion) ส่งผลให้รอยเชื่อมบัดกรีมีความแข็งแรงต่ำ และ สารช่วยบัดกรีที่เหลืออยู่อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลนได้

สารช่วยบัดกรีที่ใช้สำหรับ โลหะผสมมีสกุลสูงหรือ โลหะผสมมีสกุลคือ บอแรกซ์ (borax) หรือ โซเดียมเตตระโบเรต (sodium tetraborate) ส่วนสารช่วยบัดกรีที่ใช้สำหรับโลหะไร้สกุลคือ สารช่วยบัดกรีฟลูออไรด์ (fluoride fluxes) เนื่องจากออกไซด์ของโลหะไร้สกุลมีความเสถียรมากกว่า และไม่สามารถกำจัดโดยใช้บอแรกซ์ได้ และในการเลือกใช้สารช่วยบัดกรีจะต้องเลือกใช้ตามโลหะที่จะบัดกรี ไม่ใช่เลือกตามโลหะบัดกรี [33]

ข้อเสียของวิธีการบัดกรีด้วยไฟ คือ

1. ใช้เวลานาน และต้องมีการเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานได้
2. ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมบัดกรีมีความแนบสนิทในระดับที่ยอมรับได้ (compromised precision)
3. ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมบัดกรีพบว่ามีความแข็งแรงต่ำกว่าการทำเป็นขึ้นเดียว เนื่องจากเกิดฟองอากาศหรือมีอินคลูชันของก๊าซอยู่ภายในรอยเชื่อมบัดกรีระหว่างการหลอมเหลวโลหะบัดกรี และมีสิ่งเจือปนจากสารช่วยบัดกรี
4. เกิดความร้อนจากเปลวไฟเป็นบริเวณกว้างทำให้ไม่สามารถเชื่อมโลหะที่อยู่ใกล้กับอะคริลิกเรซิน หรือเซรามิกได้
5. การเกิดความร้อนที่มากเกินไปของโลหะบัดกรีหรือโลหะชิ้นงาน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากเกินไป (excessive oxidation) ที่ทำให้มีการแพร่กระจายของไอออน (ion diffusion) จากโลหะชิ้นงานเข้าไปในโลหะบัดกรี หรือจากโลหะบัดกรีเข้าไปในโลหะชิ้นงาน ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (heat-affected zone) ทำให้ chemical homogeneity ของโลหะลดลง ส่งผลให้รอยเชื่อมโลหะมีความแข็งแรงลดลง และมีสมบัติอื่นๆ ที่แย่ง
6. ส่วนประกอบที่แตกต่างกันระหว่างโลหะบัดกรีกับโลหะชิ้นงาน ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้ ซึ่งทำให้รอยเชื่อมบัดกรีมีความแข็งแรงลดลงเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน [6]

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมบัดกรี [14, 18, 33]

1. เทคนิคที่ใช้บัดกรี ในการเชื่อมโลหะจะต้องมีเทคนิคการบัดกรีที่ดีเพื่อให้ชิ้นงานมีทั้งสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีที่ดี โดย Stade และคณะ [3] พบว่าเทคนิคที่ใช้ในการบัดกรีมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากกว่าขนาดของช่องว่างที่จะบัดกรี

2. ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้บัดกรี ในการบัดกรีควรใช้อุณหภูมิต่ำที่สุดและระยะเวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไปและระยะเวลานานเกินไปอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรูพรุน และยังมีผลต่อโครงสร้างเกรน (grain structure) ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะอีกด้วย และขณะบัดกรีควรใช้เปลวไฟส่วนที่เป็นสีน้ำเงิน (reducing zone)

3. ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะชิ้นงานและโลหะบัดกรี โดยส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันระหว่างโลหะบัดกรีกับโลหะชิ้นงาน ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้ โดยควรมีส่วนประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

4. ความสะอาดของบริเวณที่จะบัดกรี โลหะส่วนที่จะเชื่อมติดกันจะต้องสะอาด ไม่มีออกไซด์ ก๊าซ และสิ่งเจือปนอื่นๆ เนื่องจากสิ่งเหล่านี้สามารถทำให้เกิดจุดบกพร่องที่ส่งผลให้เกิดการแตกหักบริเวณรอยเชื่อมบัดกรีได้ [34]

5. ขนาดช่องว่าง (Gap) ของบริเวณที่จะบัดกรี ช่องว่างควรมีขนาดเหมาะสมกับชนิดของโลหะชิ้นงานและโลหะบัดกรี ถ้าช่องว่างไม่เพียงพอจะทำให้โลหะบัดกรีไม่สามารถไหลเข้าไปได้ ทำให้เกิดรูพรุนที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงลดลง โดย Ryge [35] พบว่าช่องว่างที่แคบกว่า 0.005 นิ้ว (0.123 มิลลิเมตร) จะทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Lautenschlager และคณะ [36] ที่พบว่าช่องว่างที่แคบมีความสัมพันธ์กับจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Stade และคณะ [3] ยังแนะนำว่าช่องว่างควรมีขนาดประมาณ 0.3 มิลลิเมตร เนื่องจากพบว่าทำให้รอยเชื่อมบัดกรีมีความแข็งแรงเพียงพอ

6. ชนิดและปริมาณการใช้สารช่วยบัดกรี โดยต้องใช้สารช่วยบัดกรีที่เหมาะสมกับโลหะชิ้นงาน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันที่มากเกินไปจะขัดขวางการไหลของโลหะบัดกรี ซึ่งถ้าการหลอมรวมตัวของโลหะและสารช่วยบัดกรีไม่เหมาะสมอาจทำให้รอยเชื่อมแตกหักได้ [16]

7. ความชำนาญของช่างเทคนิค

2.6 งานวิจัยเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง (tensile strength) ของรอยเชื่อมบัดกรี

การศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมบัดกรีโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิก และวิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิก พบว่าให้ผลไม่แน่นอนชัดเจน โดย Squire และคณะ [37] ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงในโลหะผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดดีดแน่น (metal ceramic alloy) หลายชนิดพบว่า วิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิกแข็งแรงมากกว่าวิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิก เช่นเดียวกับ Shehab และคณะ [18] ซึ่งศึกษาในโลหะผสมแพลเลเดียม 2 ชนิด (Rx Naturelle Plus alloy และ Option alloy) พบว่าวิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิก มีความแข็งแรงมากกว่าวิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ Stade และคณะ [3] ศึกษาใน Ceramco “O” alloy (JF Jelenko) ซึ่งเป็นโลหะผสมทองพบว่า วิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิกที่ระยะห่างต่างๆมีความแข็งแรงมากกว่าวิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิก เช่นเดียวกับ Rasmussen และคณะ [38] ที่พบว่า วิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิกในโลหะผสมทอง-แพลเลเดียมมีความแข็งแรงมากกว่าวิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิก และการศึกษาของ Staffanou และคณะ [39] ที่พบว่า วิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิกในโลหะผสมทองมีความแข็งแรงต่ำที่สุด และวิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิกในโลหะผสมไร้สกลูมีความแข็งแรงมากที่สุด ในขณะที่ Monday และคณะ [40] ศึกษาใน Olympia alloy (JF Jelenko) ซึ่งเป็นโลหะผสมทองเช่นกัน แต่พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างวิธีบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิกและวิธีบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิก

2.7 วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์

การเชื่อมด้วยเลเซอร์จะใช้โลหะเติม หรือไม่ใช้ก็ได้ โดยโลหะชิ้นงานสามารถเป็นโลหะเติมได้ ซึ่งในทางทันตกรรมเครื่องเลเซอร์จะเป็นแบบพัลส์เลเซอร์ชนิด นีโอติเมียม แยกเทรียม อลูมินัม การ์เนท โดยจะต้องมีการตั้งค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ (output energy) ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด (pulse duration) และขนาดของจุดเลเซอร์ (spot diameter) ซึ่งทั้ง 3 ค่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกของเลเซอร์ที่สามารถเข้าไปในโลหะผสมได้ โดยจะมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมโลหะ ทำให้ความสำเร็จของการเชื่อมโลหะขึ้นอยู่กับการควบคุมปัจจัยทั้ง 3 นี้ [6]

ข้อดีของการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ คือ

1. ประหยัดเวลาในห้องปฏิบัติการ เพราะการเชื่อมโลหะสามารถทำได้โดยตรงบนแบบจำลองหลัก (master cast) และทำให้ไม่เกิดความผิดพลาดจากการเคลื่อนย้ายชิ้นงานจากแบบจำลองหลักไปลงอินเวสเมนต์ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความถูกต้อง (accuracy) เพิ่มมากขึ้น และยังลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานจากความร้อนที่ส่งผ่านไปยังชิ้นงานลดลงด้วย (low thermal energy)

2. สามารถเชื่อมโลหะได้ใกล้กับส่วนที่เป็นอะคริลิกเรซิน หรือเซรามิกโดยไม่ทำให้เกิดการแตกหักหรือทำให้สีเปลี่ยนแปลงไป

3. โลหะทุกชนิดสามารถทำการเชื่อมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโลหะผสมไทเทเนียม

4. รอยเชื่อมเลเซอร์สามารถให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกลับมาเหมือนเดิมสำหรับโลหะทุกชนิด โดยยังคงมีค่าใกล้เคียงกับโลหะชิ้นงาน

5. ไม่ต้องการทั้งสารช่วยบัดกรี และอินเวสเมนต์ [8]

ข้อดีของการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ คือ

1. ค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากเครื่องมือมีราคาแพง

2. โลหะบางชนิดที่มีค่าการสะท้อน (reflectivity) สูง หรือค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง ทำให้การเชื่อมโลหะทำได้ยาก เช่น โลหะผสมทอง โลหะผสมทองแดง เป็นต้น [29]

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์

ลักษณะที่ต้องการในการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์คือ มีพื้นผิวที่เรียบรอยเชื่อม เชื่อมโลหะได้เพิ่มความลึกทั้งหมด รวมทั้งปราศจากทั้งรอยแตกและรูพรุน [41]

1. พารามิเตอร์ (Parameter)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถทำให้รอยเชื่อมเลเซอร์มีคุณภาพที่ดีได้ [42] โดยค่าพารามิเตอร์นี้คือ ค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด และขนาดของจุดเลเซอร์ โดยค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์สามารถกำหนดเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์ หรือค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นโวลต์ ซึ่งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะแตกต่างกันในโลหะผสมแต่ละชนิด โดยในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ควรทำให้มีจำนวนจุดเลเซอร์ที่น้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ เนื่องจากทุกจุดที่เกิดขึ้นใหม่สามารถทำให้เกิดความเค้นและรอยแตกภายในรอยเชื่อมได้ [8, 43] ซึ่งจุดบกพร่องในรอยเชื่อมเลเซอร์อาจเกิดจากการกำหนดขนาดของจุดที่ใหญ่เกินไปพร้อมกับค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่สูงเกินไปในขั้นตอนสุดท้ายของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [42] โดยการเพิ่มขนาดของจุดเลเซอร์จะทำให้ลดระยะเวลาการซึมลึกของรอยเชื่อม [9] และค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดรูพรุน รอยแตก ลักษณะคอดเว้า (concavity) และเกิดการบิดเบี้ยวได้ ซึ่งทำให้โลหะนั้นมีสมบัติทางกลที่ลดลง นอกจากนี้รอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์ยังอาจเกิดจากแรงดึงภายใน (internal tension) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัวของโลหะอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากการควบคุมชิ้นงานด้วยมือในขณะที่เชื่อมด้วยเลเซอร์ [31]

Baba และคณะ [44] ศึกษาพบว่าค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับขนาดของจุดเลเซอร์ที่ลดลง จะทำให้เพิ่มระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมได้มากขึ้น ซึ่งพบว่าขนาดของจุดเลเซอร์ที่เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร จึงจะเพิ่มระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม แต่เมื่อค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นถึง 320 โวลต์ และขนาดของจุดเลเซอร์ 0.6 มิลลิเมตร พบว่ามีรูพรุนจำนวนมากในรอยเชื่อม สรุปได้ว่า การเพิ่มค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ จะทำให้เพิ่มระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม แต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจะทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากได้ ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง แต่ถ้ากำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์น้อยไป ก็จะทำให้ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมไม่เพียงพอเช่นกัน

ดังนั้นการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้เชื่อมโลหะลงไปได้ ความลึกที่เพียงพอกับความหนาของโครงโลหะที่ปิดล้อมที่ต้องการได้

2. ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม (Penetration depth)

ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม หมายถึง ระยะของบริเวณการละลายกินลึกลงไปภายใต้ผิวหน้าของชิ้นงาน โดย Tambasco และคณะ [29] ศึกษาพบว่าความสำเร็จในการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ขึ้นอยู่กับระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยผู้ชำนาญการเชื่อมด้วยเลเซอร์พบว่า การเชื่อมวิธีนี้มีระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้รอยเชื่อมโลหะมีความแข็งแรงเพียงพอและเกิดความร้อนในโลหะน้อยที่สุด

Srimaneepong และคณะ [45] ศึกษาระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมในการเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมพบว่า เมื่อกำหนดขนาดของจุดเลเซอร์ที่ 1 มิลลิเมตร ค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 220 โวลต์ จะมีระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม 0.8 มิลลิเมตร แต่เมื่อค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นเป็น 260 โวลต์ ระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.7 มิลลิเมตร ในขณะที่ Baba และคณะ [44] พบว่าเมื่อกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 260 โวลต์ ขนาดของจุดเลเซอร์ที่ 1 มิลลิเมตร จะมีระยะการซึมลึกของรอยเชื่อม 1 มิลลิเมตร ส่วน Bertrand และคณะ [8] พบว่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่พบได้ทั่วไปในการเชื่อมโครงโลหะที่ปิดล้อม

3. ความหนาของชิ้นงาน (Thickness)

ความหนาของชิ้นงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม [41, 45] โดย Zupancic และคณะ [5] แนะนำว่าการเลือกชิ้นงานที่มีความหนาเหมาะสม จะสามารถเชื่อมโลหะได้อย่างสมบูรณ์และมีจำนวนรูพรุนน้อยที่สุด เนื่องจากชิ้นงานที่หนามากจะทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพ

ที่ไม่ดี เนื่องจากมีโลหะจำนวนมากในบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแรงดึงจากภายในจำนวนมากที่เป็นผลมาจากการหดตัวของโลหะทำให้เกิดรอยแตกได้ [42] นอกจากนี้ Baba และคณะ [44] ยังแนะนำให้ใช้เทคนิคการเชื่อมโลหะทั้ง 2 ด้าน (double-welded technique) ในชิ้นงานที่มีความหนาเพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนภายในรอยเชื่อม เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่ดี และเพื่อให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นในช่องปาก โดยพบว่าชิ้นงานที่มีความหนาดังแต่ 0.3-2.0 มิลลิเมตร จะประสบความสำเร็จในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [31]

4. ขนาดช่องว่าง (Gap)

Nabandalung และคณะ [10] แนะนำว่าชิ้นงานที่จะเชื่อมด้วยเลเซอร์ควรวางให้สัมผัสชิดกันโดยไม่มีช่องว่าง แต่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ จึงเป็นข้อจำกัดของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งอาจแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้โลหะเติม เช่นเดียวกับ Cristina และคณะ [42] ที่แนะนำว่า ขนาดช่องว่างที่มากกว่า 0.2 - 0.5 มิลลิเมตร ควรจะใช้โลหะเติมด้วยเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดช่องว่างควรน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร จึงจะทำให้รอยเชื่อมเลเซอร์มีคุณภาพดี [41]

5. การใช้โลหะเติม (Filler alloy)

การเชื่อมด้วยเลเซอร์จะใช้โลหะเติมหรือไม่ใช้ก็ได้ โดย Carek และคณะ [31] แนะนำให้ใช้โลหะเติมด้วยเสมอในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในทางปฏิบัติของการเชื่อมโครงโลหะฟันปลอม อย่างเช่น การเชื่อมเติมบริเวณจุดสัมผัสของฟันเมื่อชิ้นงานเกิด loose contact เป็นต้น และพบว่าในชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ควรใช้โลหะเติม เนื่องจากทำให้รอยเชื่อมเลเซอร์มีคุณภาพที่ดีกว่า [29] นอกจากนี้ Bertrand และคณะ [41] ยังแนะนำให้เลือกใช้โลหะเติมที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากสามารถหลอมเหลวเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่าโลหะเติมที่มีขนาดใหญ่ แต่การเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมนี้เป็นวิธีที่ technique sensitive ซึ่งอาจทำให้เกิดรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ได้

6. ความชำนาญของผู้เชื่อมโลหะ (Manual dexterity/Operator skill)

Bertrand และคณะ [43] พบว่าความชำนาญของผู้เชื่อมโลหะ (operator skill) ได้แก่ ความรู้ ความสามารถในการมองเห็น และความสามารถในการใช้มือควบคุมชิ้นงานที่ดี (knowledge, eyesight, and dexterity) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสำเร็จในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เช่นเดียวกับ Carek และคณะ [31] ที่พบว่าผู้เชื่อมโลหะควรมีสายตาที่ดี มีความสัมพันธ์ของตากับ

มือที่ดี (hand-eye cooperation) และควรมีสมาธิในการทำงานที่ใช้เวลานานได้ โดยพบว่า การควบคุมชิ้นงานด้วยมือที่ไม่ดีในขณะที่เชื่อมด้วยเลเซอร์ จะทำให้มีการซ้อนทับกันของจุดที่ไม่เพียงพอ ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกและรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ได้

7. ชนิดของโลหะ (Type of alloy)

โลหะผสมแต่ละชนิดจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมด้วยเลเซอร์แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสมบัติของโลหะผสม คือ อัตราการดูดกลืนแสงเลเซอร์ (laser beam absorption rate) และการนำความร้อน (thermal conductivity) โดยค่าอัตราการดูดกลืนแสงเลเซอร์ที่มากขึ้น และค่าการนำความร้อนที่ลดลง จะทำให้เพิ่มระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมได้มากขึ้น [45] ซึ่งโลหะผสม โคบอลต์-โครเมียมมีค่าอัตราการดูดกลืนแสงเลเซอร์ที่ดี มีการสะท้อนของโลหะน้อย แต่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ดังนั้นในการเชื่อมโลหะนี้ด้วยเลเซอร์ควรตั้งค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ระดับปานกลางและระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุดที่สูงขึ้นเพื่อให้ความร้อนลงไปโลหะได้ดีขึ้น ชดเชยกับการที่โลหะนี้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ถ้าใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมกับชนิดของโลหะ จะทำให้เกิดรูพรุนอยู่ภายใน และรอยแตกได้ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อน [41]

8. พื้นผิวของบริเวณที่จะเชื่อม (Surface)

พื้นผิวของบริเวณที่จะเชื่อมจะต้องสะอาด เพื่อให้รอยเชื่อมเลเซอร์มีคุณภาพที่ดี โดย Zupancic และคณะ [5] แนะนำให้ใช้ปากกาสีดำ (black felt-tipped pen) ทาบริเวณพื้นผิวที่จะทำการเชื่อม หรือทำการเป่าทรายด้วยผงอะลูมินาก่อนการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ เพื่อลดการสะท้อนของแสงเลเซอร์ ทำให้เพิ่มระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้จะต้องทำความสะอาดพื้นผิวโลหะในอะซิโตนหรือแอลกอฮอล์ และเป่าให้แห้งก่อนการเชื่อมด้วยเลเซอร์อีกด้วย [8, 41]

9. ขั้นตอนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Welding procedures)

Bertrand และคณะ [41] แนะนำการเตรียมชิ้นงานและขั้นตอนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งถ้าควบคุมขั้นตอนทั้งหมดให้เหมาะสมจะสามารถทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพที่ดีได้ ถึงแม้ว่าผู้ทำการเชื่อมจะยังไม่ชำนาญก็ตาม โดยรูปร่างของรอยเชื่อมจะมีทั้งแบบ X และแบบ I (butt joint) โดยแบบ X จะเหมาะสำหรับโลหะที่มีความหนามากกว่า 2 มิลลิเมตร หรือเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งจะต้องใช้โลหะเติมด้วยเสมอ ส่วนแบบ I จะเหมาะสำหรับโลหะที่มีความหนาน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และควรเป็นโลหะที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยพื้นผิวของโลหะชิ้นงาน

จะต้องขนานกันให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ และควรเตรียมให้มีขนาดช่องว่างที่น้อยและแคบที่สุด สำหรับการเชื่อมโลหะแบบ I จะเริ่มเชื่อมเข้าด้วยกันเป็น 3 จุด ด้วยพลังงานที่ต่ำทั้ง 2 ด้าน โดยจุดแรกคือตรงกลางที่ด้านหนึ่ง จุดที่สองและสามจะอยู่ที่บริเวณขอบทั้งสองด้านอีกด้านหนึ่ง เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน จากนั้นจึงเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น และเชื่อมจนเต็มด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบจุดที่ซ้อนทับกัน (overlapping spot welds) ให้มีการซ้อนทับกันประมาณ 75-80% ขั้นตอนสุดท้ายควรใช้ขนาดของจุดเลเซอร์ 1 มิลลิเมตร โดยค่าพารามิเตอร์อื่นๆเหมือนเดิม เพื่อแก้ไขจุดบกพร่องที่พื้นผิว เช่น รอยแตกเล็กๆ และเพื่อให้เกิดความสวยงาม นอกจากนี้ในขณะที่เชื่อมโลหะควรวางลำแสงเลเซอร์ให้ตั้งฉากกับพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากมุมของลำแสงเลเซอร์ที่กระทำต่อพื้นผิวชิ้นงานสามารถส่งผลต่อการซึมลึกของรอยเชื่อมได้ [29]

10. การใช้ก๊าซอาร์กอน (Argon gas)

การเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ควรทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเพื่อป้องกันการเกิดรูพรุน และลดการปนเปื้อนจากการเกิดออกซิเดชันกับออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งแนะนำให้ทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนสำหรับโลหะผสมไร้สกรูด โดยเฉพาะกับไทเทเนียม แต่ก็ควรใช้ก๊าซอาร์กอนในโลหะผสมมีสกรูดด้วยเช่นกัน [29, 41]

ในขณะที่ Watanabe และคณะ [1] ศึกษาพบว่าในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมไม่มีความจำเป็นต้องทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเนื่องจากการใช้ก๊าซอาร์กอนจะทำให้มี shallow welded penetration depth ที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าการไม่ใช้ก๊าซอาร์กอน ส่วน Tartari และคณะ [46] ศึกษาพบว่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเลเซอร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการใช้ก๊าซอาร์กอนและไม่ใช้ก๊าซอาร์กอนในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

11. ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสม (Alloy chemical composition)

ในการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้ใช้โลหะผสมที่ไม่มีคาร์บอนและซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากธาตุคาร์บอนและซิลิกอนจะทำให้การเชื่อมโลหะทำได้ยาก [5, 41] และยังพบว่าทำให้เกิดรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์อีกด้วย [42]

2.9 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์โดยทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน

Cristina และคณะ [42] ศึกษาจุดบกพร่องในรอยเชื่อมเลเซอร์ของฟินปลอมบางส่วน ถอดได้ฐานโลหะซึ่งเป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม จำนวน 20 ชิ้น รอยเชื่อมเป็นแบบ I โดยใช้และไม่ใช้โลหะเติม และใช้ก๊าซอาร์กอนในขณะที่เชื่อม ซึ่งทดสอบจุดบกพร่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า พบว่ามีรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์คิดเป็น 72% ของชิ้นงานทั้งหมด ที่อาจมาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของขนาดจุดเลเซอร์ที่ใหญ่เกินไปพร้อมกับค่าพลังงานของแสงเลเซอร์ที่สูงเกินไปในขั้นตอนสุดท้ายของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และยังพบรอยแตกในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่มีสาเหตุมาจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของโลหะหลังจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์

Nomoto และคณะ [47] ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมระหว่างรอยเชื่อมแบบ X และแบบ I ชิ้นงานมีความหนา 1 มิลลิเมตร เชื่อมทั้ง 2 ด้าน และใช้โลหะเติม ซึ่งประเมินรูพรุนด้วยการถ่ายภาพรังสีโดยใช้ X-ray micro-focus computerized tomography (micro-CT) ที่สามารถประเมินรูพรุนในรอยเชื่อมได้เป็นภาพ 3 มิติ ผลการศึกษาพบว่าในรอยเชื่อมแบบ I (0.17%) จะมีจำนวนรูพรุนมากกว่าแบบ X (0.09%) แต่ยังคงมีความแข็งแรงพอเพียงในการใช้งานทางคลินิก ซึ่งอาจเตรียมชิ้นงานที่จะเชื่อมแบบ I ได้ในกรณีที่ชิ้นงานมีความบาง

2.10 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของรอยเชื่อมเลเซอร์โดยทดสอบแบบทำลายชิ้นงาน

Srimaneepong และคณะ [45] ศึกษาระยะเวลาการซึมลึกของรอยเชื่อมและความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยไม่ใช้โลหะเติม ซึ่งเตรียมชิ้นงานเป็นรูปดัมเบล (dumbbell-shape) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 220 และ 260 โวลต์ กำหนดระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 8 มิลลิวินาที และขนาดของจุดเลเซอร์ 1 มิลลิเมตร พบว่ากลุ่มค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 220 โวลต์ มีระยะเวลาการซึมลึกของรอยเชื่อมเฉลี่ย 0.8 มิลลิเมตร ส่วนกลุ่มค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 260 โวลต์ มีระยะเวลาการซึมลึกของรอยเชื่อมเฉลี่ย 1.7 มิลลิเมตร และพบว่าทั้งกลุ่มค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 220 และ 260 โวลต์ มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่กลุ่มที่ 260 โวลต์ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ากลุ่ม 220 โวลต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบการแตกหักเกิดขึ้นภายในรอยเชื่อม ซึ่งแสดงว่าโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่มีการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีลักษณะการแตกหักเป็นแบบเปราะ (brittle fracture) จากการวิเคราะห์ทางมหภาค (macroscopic analysis) พบลักษณะคล้ายฟองอากาศ (bubble-like) ที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณขอบรอยเชื่อม และพบรอยแตกภายในรอยเชื่อมทั้งกลุ่ม 220 และ 260 โวลต์

นอกจากนี้ยังพบรูพรุนภายในรอยเชื่อมของกลุ่ม 260 โวลต์อีกด้วย ซึ่งรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์ อาจเกิดจากความเค้นภายในที่เกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม [8, 48] ส่วนรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์อาจเกิดจากกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่สูงเกินไป [44]

Srimaneepong และคณะ [9] ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงบิด (torsional strength) และลักษณะรอยแตก (fracture characteristics) ของรอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยไม่ใช้โลหะเติม ซึ่งเตรียมชิ้นงานเป็นรูปคัมเบลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 220 และ 260 โวลต์ ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 8 มิลลิวินาที และขนาดของจุดเลเซอร์ 1 มิลลิเมตร พบว่าโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่เชื่อมด้วยเลเซอร์ทั้งกลุ่มที่ 220 และ 260 โวลต์ มีค่าความแข็งแรงบิดต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และกลุ่มที่ 260 กับ 220 โวลต์ มีค่าความแข็งแรงบิดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมไม่ค่อยประสบความสำเร็จเนื่องจากพบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงบิดที่ต่ำ และมีลักษณะการแตกหักเป็นแบบเปราะ นอกจากนี้ยังพบรูพรุนและรอยแตกภายในรอยเชื่อมทั้งที่ 220 และ 260 โวลต์อีกด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ก๊าซอาร์กอนที่รบกวนประสิทธิภาพของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม [1] และอาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่ทำให้เกิดการขยายตัวของเกรน ซึ่งส่งผลให้รอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมมีความเปราะ [10]

Baba และคณะ [48] ศึกษาเปรียบเทียบค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยไม่ใช้โลหะเติม ซึ่งเปรียบเทียบค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 180, 210, 240, 270 และ 300 แอมแปร์ ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่เป็นแผ่นหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยการเชื่อมแบบด้านเดียว กับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่เป็นแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร โดยการเชื่อมทั้งแบบด้านเดียวและสองด้าน พบว่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น โดยโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่เป็นแผ่นหนา 0.5 มิลลิเมตร ค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 270 และ 300 แอมแปร์ ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกัน และไม่ต่างจากกลุ่มที่ไม่มีเชื่อม ส่วนในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่เป็นแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร การเชื่อมแบบสองด้าน ที่ค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ 270 แอมแปร์ จะมีความแข็งแรงดึงมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยพบที่ 300 แอมแปร์ มากกว่า 270 แอมแปร์ ซึ่งรอยแตกนี้อาจเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกักความร้อน (stress

corrosion cracking) หรือทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายจากการล้าตัว (fatigue failure) และยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นงานอีกด้วย สรุปได้ว่า การเชื่อมด้วยเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมถ้าทำในสภาวะที่เหมาะสม (ความหนาของชิ้นงาน วิธีการเชื่อม และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม) ก็สามารถทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่ดีได้ และการเชื่อมด้วยเลเซอร์นี้สามารถเชื่อมโดยไม่ใช้โลหะเติม ทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกอย่างที่พบในวิธีบัดกรีด้วยไฟ ดังนั้นความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมจึงไม่แตกต่างกับ โลหะชิ้นงาน ซึ่งถือเป็นข้อดีของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่เหนือกว่าวิธีบัดกรีด้วยไฟ

Tartari และคณะ [46] ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเลเซอร์ระหว่างการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนและไม่ใช้ก๊าซอาร์กอนในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมพบว่าในกลุ่มรอยเชื่อมเลเซอร์มีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ได้เชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของค่าความแข็งแรงดึงระหว่างการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนและไม่ใช้ก๊าซอาร์กอน

Watanabe และคณะ [1] ศึกษาพบว่าการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ของโลหะซีพีไทเทเนียม (CP Ti) และโลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-7 นีโอโดเนียม (Ti-6Al-7Nb) แต่ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมพบว่า ไม่มีความจำเป็นต้องเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเนื่องจากการใช้ก๊าซอาร์กอนจะทำให้มี shallow welded penetration depth ซึ่งทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าการไม่ใช้ก๊าซอาร์กอน โดยในการศึกษานี้เป็นการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในชิ้นงานที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยไม่ใช้โลหะเติม และใช้พลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ต่ำ (200 โวลต์) ร่วมกับขนาดของจุดเลเซอร์ที่ใหญ่ (1 มิลลิเมตร) ถ้าใช้พลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่สูงร่วมกับขนาดของจุดเลเซอร์ที่เล็ก จะทำให้การเชื่อมโลหะลงไปได้ลึกมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ไม่เกิดความแตกต่างกันระหว่างการเชื่อมและไม่ใช้ก๊าซอาร์กอน

Nomoto และคณะ [47] ศึกษาความสัมพันธ์ของรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์กับความแข็งแรงดึงของโลหะผสมที่มีรอยเชื่อมในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ระหว่างรอยเชื่อมแบบ X และแบบ I ในชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยเชื่อมทั้ง 2 ด้าน และใช้โลหะเติม ผลการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมแบบ X และแบบ I ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ถึงแม้ว่ารอยเชื่อมแบบ I จะมีจำนวนรูพรุนมากกว่าแบบ X สรุปได้ว่า ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเลเซอร์ไม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนรูพรุนที่พบในรอยเชื่อม อาจเนื่องมาจากรูพรุนที่พบในรอยเชื่อมเลเซอร์มีจำนวนเพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zupancic และคณะ [5] ที่พบว่า รอยเชื่อมเลเซอร์แบบ X และแบบ I มีค่าความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

และการศึกษาของ Cristina และคณะ [42] ที่พบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในรอยเชื่อมเลเซอร์อาจไม่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน

2.11 งานวิจัยเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบต่างๆโดยทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน

Carek และคณะ [31] ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และวิธีการเชื่อมแบบทิกในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยใช้โลหะเติมซึ่งเตรียมชิ้นงานเป็นแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร รอยเชื่อมเลเซอร์เป็นแบบ I กำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 278 โวลต์ และทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50-200 เท่า พบว่า รอยเชื่อมบัดกรีมีคุณภาพที่ดีกว่าทั้งรอยเชื่อมเลเซอร์และรอยเชื่อมแบบทิก โดยในรอยเชื่อมบัดกรีไม่พบรูพรุนซึ่งอาจเกิดจากการที่โลหะบัดกรีไหลเข้าไปเต็มช่องว่างอย่างเพียงพอ และยังมีส่วนประกอบที่ใกล้เคียงกับโลหะชิ้นงาน ส่วนรอยเชื่อมด้วยเลเซอร์พบรอยแตกและรูพรุน เนื่องจากแรงดึงภายในที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัวของโลหะอย่างรวดเร็ว และอาจเกิดจากการซ้อนทับกันของจุดเลเซอร์ที่ไม่เพียงพอที่เกิดจากการควบคุมชิ้นงานด้วยมือในขณะที่เชื่อมด้วยเลเซอร์

2.12 งานวิจัยเปรียบเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบต่างๆโดยทดสอบแบบทำลายชิ้นงาน

Wiskott และคณะ [30] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกล ลักษณะของผิวหน้าแตกหัก (fracture surface) และการแพร่กระจายของธาตุ (elemental diffusion) ของรอยเชื่อมโลหะในโลหะผสมทอง-แพลเลเดียม โดยเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมโลหะ 5 วิธี คือ วิธีบัดกรีด้วยไฟ วิธีการใช้เตาเผาพอร์ซเลน วิธีการเชื่อมโลหะก่อนขึ้นรูปเซรามิกด้วยอินฟราเรด วิธีการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิกด้วยอินฟราเรด และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยประเมินค่าความแข็งแรงดึง ค่าความทนต่อการล้า (fatigue resistance) ของรอยเชื่อม และวัดการแพร่กระจายของธาตุในรอยเชื่อมโดยใช้ microprobe tracings รวมทั้งประเมินลักษณะของผิวหน้าแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ใช้วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาคือ วิธีการเชื่อมโลหะก่อนขึ้นรูปเซรามิก โดยวิธีการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิกให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำที่สุด ส่วนค่าความทนต่อการล้า พบว่าวิธีการเชื่อมโลหะก่อนขึ้นรูปเซรามิกมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ วิธีการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิก และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ จากการประเมินลักษณะของผิวหน้าแตกหักพบว่า มีรูปแบบที่ไม่

แน่นอนชัดเจน และจากการวิเคราะห์ด้วย microprobe พบว่าเกิดการแพร่กระจายเล็กน้อยบริเวณรอยเชื่อมเมื่อเชื่อมโลหะด้วยวิธีการเชื่อมโลหะก่อนขึ้นรูปเซรามิก ในขณะที่รอยเชื่อมเมื่อเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิกเกิดการแพร่กระจายอย่างมีนัยสำคัญชัดเจน จากการศึกษาที่สรุปได้ว่าในแง่ของสมบัติทางกล วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์หรือการเชื่อมด้วยอินฟราเรดไม่ได้แตกต่างไปจากวิธีบัดกรีด้วยไฟหรือการใช้เตาเผาพอร์ซเลน เช่นเดียวกับ Cattaneo และคณะ [49] ที่ศึกษาพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าความแข็งแรงดึง ระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟกับวิธีการเชื่อมด้วยอินฟราเรด แต่พบว่าข้อเสียของวิธีบัดกรีด้วยไฟคือใช้เวลานานกว่าวิธีการเชื่อมด้วยอินฟราเรด

Lima Verde และคณะ [11] ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมไร้สทกที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น 2 ชนิด คือ โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน 4 วิธีคือ วิธีบัดกรีด้วยไฟ วิธีการเชื่อมด้วยอินฟราเรด วิธีการใช้เตาเผาพอร์ซเลนที่ใช้เครื่องสุญญากาศ (vacuum) และวิธีการใช้เตาเผาพอร์ซเลนที่ไม่ใช้เครื่องสุญญากาศ โดยมีชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกบัดกรีเป็นกลุ่มควบคุม ผลการศึกษาพบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความแข็งแรงดึงทั้ง 3 วิธีคือวิธีการเชื่อมด้วยอินฟราเรด วิธีบัดกรีด้วยไฟ และวิธีการใช้เตาเผาพอร์ซเลนที่ใช้เครื่องสุญญากาศ ทั้งในโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และยังพบว่าวิธีการใช้เตาเผาพอร์ซเลนที่ใช้เครื่องสุญญากาศมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าวิธีที่ไม่ใช้เครื่องสุญญากาศอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ Cheng และคณะ [50] ศึกษาในรอยเชื่อมบัดกรีของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมพบว่าวิธีการเชื่อมโลหะด้วยวิธีอินฟราเรดมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าวิธีบัดกรีด้วยไฟอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในโลหะผสมทอง-แพลเลเดียม และโลหะผสมแพลเลเดียม-เงิน พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 2 วิธีนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Zupancic และคณะ [5] ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมโลหะระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟ และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ซึ่งเตรียมขึ้นงานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 35 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ไม่มีการเชื่อมโลหะเป็นกลุ่มควบคุม กลุ่มบัดกรีด้วยไฟโดยใช้โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียม กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่มีรอยเชื่อมเป็นแบบ X ซึ่งใช้โลหะเติม และกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ 255 โวลต์ ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 4.5 มิลลิวินาที และขนาดของจุดเลเซอร์ 0.9 มิลลิเมตร และกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่มีรอยเชื่อมเป็นแบบ I ซึ่งไม่ใช้โลหะเติม และกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ 290 โวลต์ ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 10 มิลลิวินาที และขนาดของจุดเลเซอร์ 0.7 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้มีการซ้อนทับกันประมาณ 75% ผลการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมบัดกรีสูงกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์อย่างมีนัยสำคัญ และจาก

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ผิวหน้าแตกหักของรอยเชื่อมบัดกรีค่อนข้างเรียบ และมีอินคลูชันของอินเวสเมนต์ ส่วนรอยเชื่อมเลเซอร์แบบ I พบรูพรุนขนาดใหญ่และไม่เกิดการเชื่อมกันของโลหะบริเวณตรงกลาง และรอยเชื่อมเลเซอร์แบบ X ก็พบว่ามีส่วนตรงกลางที่ไม่เกิดการเชื่อมกันของโลหะเช่นเดียวกันแต่พบรูพรุนเล็กน้อย สรุปว่า วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่าวิธีบัดกรีด้วยไฟในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมเนื่องจากมี shallow weld penetration

Serichetaphongse และคณะ [6] ศึกษาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดิ่งของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟโดยใช้โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียม และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์โดยไม่ใช้โลหะเติม ในโลหะผสม 3 ชนิดคือ โลหะผสมทอง-แพลเลเดียม โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ซึ่งเตรียมชิ้นงานโลหะตามมาตรฐานของ ISO 6892 โดยกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ 270-290 โวลต์ ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 7 มิลลิวินาที และขนาดของจุดเลเซอร์ 0.8-1 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เทคนิคการเชื่อมแบบ 2 ด้าน จากการตรวจสอบผิวหน้าแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า กลุ่มบัดกรีด้วยไฟพบรูพรุนและสิ่งเจือปนจากสารช่วยบัดกรีในโลหะผสมทั้ง 3 ชนิด ในขณะที่กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ไม่พบทั้งรูพรุนและสิ่งเจือปนในโลหะผสมทั้ง 3 ชนิด สรุปว่า ค่าความแข็งแรงดิ่งของวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์สูงกว่าวิธีบัดกรีด้วยไฟอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในโลหะผสมทั้ง 3 ชนิด

Nabadalung และคณะ [10] ศึกษาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดิ่งของรอยเชื่อมระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟฟ้าโดยใช้โลหะบัดกรีทอง และวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์โดยไม่ใช้โลหะเติม ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ซึ่งเตรียมชิ้นงานโลหะตามมาตรฐานของ ANSI/ADA สำหรับการทดสอบแรงดิ่ง โดยกำหนดค่ากำลังของแสงเลเซอร์สูงสุด (peak power) 4 กิโลวัตต์ ระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด $\frac{1}{12}$ มิลลิวินาที และขนาดของจุดเลเซอร์ 1.5 มิลลิเมตร โดยเชื่อมให้มีการซ้อนทับกัน 75% ผลการศึกษาพบว่า ทั้งกลุ่มบัดกรีด้วยไฟฟ้าและกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้เชื่อมโลหะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงกว่ากลุ่มบัดกรีด้วยไฟฟ้าแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเนื่องมาจากกลุ่มบัดกรีด้วยไฟฟ้าพบรูพรุนในรอยเชื่อมจำนวนมากและขนาดใหญ่กว่ากลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ และในกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของเกรน และเกิดการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของผลึก (recrystallization) ที่อาจทำให้รอยเชื่อมเลเซอร์มีความเปราะได้ โดยพบว่าขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีผลต่อค่าความแข็งแรงดิ่ง ซึ่งสามารถลดขนาดของบริเวณนี้ได้โดยเชื่อมแบบ single pass penetration

Carek และคณะ [51] ศึกษาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัด (flexural strength) ระหว่างวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และวิธีการเชื่อมแบบทิกในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยไม่ใช้โลหะเติม กำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 290 โวลต์ ขนาดของจุดเลเซอร์ 0.7 มิลลิเมตร และทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนพบว่า กลุ่มที่ไม่ได้เชื่อมโลหะมีค่าความแข็งแรงดัดสูงที่สุด และกลุ่มเชื่อมแบบทิกมีค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่ากลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่ามีความลึกที่ไม่เพียงพอในกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งสามารถลงไปได้ลึกเฉลี่ยที่ 0.3 มิลลิเมตร และยังพบรอยแตกในกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ทั้งในบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนอีกด้วย

2.13 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม

วิธีการตรวจสอบจุดบกพร่องและรูพรุนภายในชิ้นงานโลหะหล่อหรือรอยเชื่อมโลหะ โดยทั่วไปสามารถประเมินได้จากทั้งวิธีการตรวจสอบแบบทำลายชิ้นงาน (destructive testing) และไม่ทำลายชิ้นงาน (non-destructive testing) การตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานที่ใช้ในทางทันตกรรมมีอยู่หลายวิธี เช่น การถ่ายภาพด้วยรังสี (radiography) การวิเคราะห์ทางมหภาค (macroscopic analysis) และการวิเคราะห์ทางจุลภาค (microscopic analysis) เป็นต้น ส่วนการตรวจสอบแบบทำลายชิ้นงาน เช่น การทดสอบทางกล (mechanical testing) การวิเคราะห์ทางเคมี (chemical analysis) และการวิเคราะห์ทางพื้นผิวโลหะ (metallographic analysis) เป็นต้น [31, 42, 51] แต่วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานที่นิยมคือ การถ่ายภาพด้วยรังสี [52]

2.14 การถ่ายภาพด้วยรังสี [52]

การถ่ายภาพด้วยรังสีเป็นวิธีการถ่ายภาพที่อาศัยสมบัติในการทะลุผ่านของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา ส่องผ่านวัตถุฟิล์ม หรือ อุปกรณ์รับภาพอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่เราต้องการตรวจสอบทั้งทางด้านอุตสาหกรรม และทางการแพทย์ โดยสามารถใช้ตรวจสอบวัสดุได้นานาชนิด ไม่ว่าจะเป็นโลหะ หรือโลหะ เช่น ในการผลิตโลหะหล่อ การเชื่อมโลหะ การผลิตอุปกรณ์ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

การเกิดภาพของภาพถ่ายรังสีเกิดจากการทำอันตรกิริยาของลำรังสีที่ผ่านวัตถุที่มีโครงสร้างภายในแตกต่างกันเมื่อลำรังสีตกกระทบชิ้นงาน ลำรังสีบางส่วนจะทะลุผ่าน บางส่วนจะถูกดูดกลืน บางส่วนจะกระเจิงไป ปริมาณของลำรังสีที่ทะลุผ่านออกมาจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุ และความหนา เช่น ถ้าชิ้นงานโลหะที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน ที่ว่างของฟองอากาศส่งผลทำให้ความหนาของชิ้นงานโลหะลดลง มีปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านออกมามากกว่าส่วนอื่น จะเห็นจุดดำเกิดขึ้นที่

ภาพเนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพเงาของชิ้นงาน บริเวณที่เป็นจุดดำเกิดขึ้นจะสอดคล้องกับบริเวณที่ความหนาของชิ้นงานลดลง ซึ่งแสดงเป็นภาพสองมิติเกิดขึ้นบนฟิล์มหรืออุปกรณ์รับภาพ ทำให้สามารถตรวจสอบ โครงสร้างภายในของชิ้นงานที่ไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้

2.14.1 องค์ประกอบของการถ่ายภาพรังสี [52]

การถ่ายภาพรังสีมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้

1 ต้นกำเนิดรังสี

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ จะผลิตลำรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ซึ่งจะเป็นลำรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (continuous X-ray) โดยขนาดของต้นกำเนิดรังสีหรือจุดโฟกัส มีผลต่อความคมชัดของภาพ โดยต้นกำเนิดรังสีที่มีจุดโฟกัสมีขนาดใหญ่จะส่งผลให้ความคมชัดของภาพลดลง

2 อุปกรณ์รับภาพ

เป็นส่วนที่รับลำรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานมาแล้วทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นภาพ ซึ่งภาพที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากการที่ลำรังสีมีปริมาณความเข้มรังสีไม่เท่ากันในแต่ละส่วนพื้นที่ทำปฏิกิริยากันในแต่ละส่วนของตัวรับภาพเกิดเป็นข้อมูลภาพของภาพถ่ายรังสีขึ้น โดยทั่วไปอุปกรณ์รับภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือฟิล์ม แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์รับภาพชนิดต่าง ๆ ขึ้นมา เช่น แผ่นบันทึกภาพ (Imaging plate) เป็นต้น

2.1 แผ่นบันทึกภาพ

แผ่นบันทึกภาพ เป็นอุปกรณ์รับภาพชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่ในการรับปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ แล้วเกิดภาพแฝงขึ้นภายในแผ่นบันทึกภาพหลังจากนั้นนำแผ่นบันทึกภาพที่ผ่านการถ่ายภาพรังสีแล้วไปอ่านด้วยระบบสแกนข้อมูลโดยแสงเลเซอร์ จะได้ภาพออกมาเป็นข้อมูลภาพดิจิทัลในเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่สามารถใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ ในการปรับค่าความเปรียบต่าง และการคำนวณทางเลขาคณิตกับภาพ อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งรายละเอียดต่างๆของภาพได้อีกด้วย

การเกิดภาพของแผ่นบันทึกภาพเกิดจากการที่สารที่ใช้ทำแผ่นบันทึกภาพมีคุณสมบัติในการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี (photostimulated luminescence, PSL) แผ่นบันทึกภาพมีโครงสร้างและหลักการทำงานคล้ายกับแผ่นเรืองรังสี (intensifying screen) ตัวแผ่นบันทึกภาพ

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นฐานทำด้วยโพลีเอสเตอร์เคลือบด้วยผลึกสารเรืองแสงกลุ่มแบเรียมฟลูออไรด์เฮไลด์ (BaFX) ทำหน้าที่เป็นตัวบันทึกข้อมูลภาพ โดยเมื่อมีรังสีเอกซ์มาตกกระทบจะเกิดเป็นภาพแฝงบนแผ่นบันทึกภาพ ซึ่งเครื่องสแกนจะฉายลำแสงเลเซอร์ในการอ่านข้อมูลภาพที่เกิดขึ้นบนแผ่นบันทึกภาพ และสร้างเป็นภาพถ่ายรังสีโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ หลังจากการสแกนจะนำแผ่นบันทึกภาพไปทำการลบ เพื่อให้สามารถนำแผ่นบันทึกภาพกลับมาใช้ในการถ่ายภาพรังสีอีกครั้งได้

แผ่นบันทึกภาพ มีข้อดี และข้อเสีย แตกต่างจากฟิล์มบันทึกภาพดังนี้

ข้อดีของแผ่นบันทึกภาพ คือ

1. แผ่นบันทึกภาพมีความไวสูงกว่า ทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพได้รวดเร็วกว่า
2. แผ่นบันทึกภาพตอบสนองต่อแสงน้อย และไม่ต้องใช้กระบวนการทางเคมีในการล้างฟิล์ม ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ห้องมืด ทั้งในการจัดเตรียมและการกำเนิดภาพ
3. แผ่นบันทึกภาพสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้
4. ภาพที่ได้จากแผ่นบันทึกภาพ เป็นข้อมูลภาพทางดิจิทัลทันทีที่มีความสะดวกรวดเร็วในการปรับปรุงคุณภาพของภาพด้วยคอมพิวเตอร์ อีกทั้งยังประหยัดเนื้อที่ในการจัดเก็บข้อมูลภาพ

ข้อเสียของแผ่นบันทึกภาพ คือ

1. แผ่นบันทึกภาพและเครื่องสแกนแผ่นบันทึกภาพมีราคาแพง เมื่อเทียบกับฟิล์ม

3 ตำแหน่งของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่สามารถถ่ายภาพด้วยรังสีได้จะต้องสามารถวางอยู่ระหว่างต้นกำเนิดรังสีและอุปกรณ์รับภาพได้ นอกจากนี้ตำแหน่งการวางของชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดภาพด้วย โดยภาพที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของชิ้นงานที่วางไว้ระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับอุปกรณ์รับภาพ อีกทั้งตำแหน่งการวางของชิ้นงานยังส่งผลถึงคุณภาพของภาพถ่ายได้ โดยการเพิ่มระยะทางจากชิ้นงานถึงอุปกรณ์รับภาพส่งผลให้ความคมชัดของภาพลดลง อีกทั้งการจัดแนวกึ่งกลางลำรังสีให้ตั้งฉากกับชิ้นงานและอุปกรณ์รับภาพเพื่อลดความบิดเบือนของภาพที่เกิดขึ้น

2.15 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการถ่ายภาพรังสี

จากการศึกษาของ Nunez และคณะ [53] พบว่าวิธีการถ่ายภาพรังสีมีความเหมาะสมเพียงพอในการตรวจสอบรูพรุนภายในรอยเชื่อมเลเซอร์ของโลหะผสมไทเทเนียม และโลหะหล่อไทเทเนียม (Cp titanium casting) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสี (exposure of radiation) คือ 90 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ เวลา 0.6 วินาที และมีระยะ 10-13 มิลลิเมตร โดยใช้ฟิล์มในช่องปาก (Ektaspeed Plus) ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ราคาไม่แพง ทำซ้ำได้ง่าย และรวดเร็ว เช่นเดียวกับการศึกษาของ Elarbi และคณะ [54] ที่พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้า 90 กิโลโวลต์ มีความเหมาะสมในการตรวจสอบจุดบกพร่องทั้งขนาดเล็กและใหญ่ในชิ้นงานโครงโลหะพินปลอมบางส่วนถอดได้ โดยการถ่ายภาพรังสีในหลายๆมุม (different angulations) เพื่อให้สามารถตรวจสอบจุดบกพร่องได้ทั้งหมด ในขณะที่ Dharmar และคณะ [55] พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้า 80 กิโลโวลต์ มีความเหมาะสมในการประเมินรูพรุนภายในของโครงโลหะพินปลอมบางส่วนถอดได้โดยใช้เครื่องเอ็กซเรย์ทางอุตสาหกรรม

จากการศึกษาของ Eisenburger และคณะ [56] พบว่าการตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสีเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็วและมีความเหมาะสมในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานโลหะหล่อผสมทางทันตกรรม ที่สามารถทำให้เห็นตำแหน่งและขนาดของจุดบกพร่องได้ โดยเครื่องเอ็กซเรย์ทางทันตกรรมทั่วไปมีความเหมาะสมสำหรับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และโลหะผสมไทเทเนียม เนื่องจากโลหะผสมทั้งสองนี้มีค่าการดูดซับรังสี (absorption) ที่ไม่สูงมาก โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสีคือ 70 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 8 มิลลิแอมแปร์ เวลา 1.2 วินาที และมีระยะ 50 เซนติเมตร โดยใช้ฟิล์มในช่องปาก และยังพบว่าวิธีนี้สามารถตรวจสอบรูพรุนในรอยเชื่อมบัดกรีหรือรอยเชื่อมเลเซอร์ได้อีกด้วย

Nomoto และคณะ [47] จากมหาวิทยาลัยหนึ่งในประเทศญี่ปุ่น ได้พัฒนาเครื่องมือถ่ายภาพรังสีในการวัดจำนวนรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ (1.96×10 มิลลิเมตร) ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่เรียกว่า X-ray micro-focus computerized tomography (micro-CT) ทำให้เห็นเป็นภาพ 3 มิติ และสามารถประเมินรูพรุนโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (image analysis software) ที่สามารถบอกจำนวน ขนาดของรูพรุน คำนวณพื้นที่รูพรุนทั้งหมด และยังคงเป็นเปอร์เซ็นต์ของรูพรุนได้ เนื่องจากวิธีการถ่ายภาพรังสีทำให้เห็นรูพรุน แต่ไม่สามารถบอกพื้นที่รูพรุนที่แท้จริงได้ และประเมินได้เพียง 2 มิติเท่านั้น

ธรรมวัตร และคณะ [52] จากภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส ซึ่งใช้ในการตรวจสอบจุดบกพร่องในชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ที่สามารถถ่ายภาพขยายได้ประมาณ 10 เท่า โดย

ภาพถ่ายยังมีความคมชัดดี หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสที่ใช้คือ Hamamatsu L6731-01 ที่มีขนาดจุดโฟกัสไม่เกิน 8 ไมครอน มีค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุด 80 กิโลโวลต์ และกระแสไหลสูงสุด 100 ไมโครแอมแปร์ โดยใช้แผ่นบันทึกภาพ (Fujifilm BAS-SR 2040) เพื่อความสะดวกรวดเร็วของกระบวนการสร้างภาพถ่าย ซึ่งจะมีเครื่องสแกนภาพในการอ่านข้อมูล และบันทึกภาพเป็นข้อมูลดิจิทัลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ และปรับแต่งความคมชัดของภาพได้จากโปรแกรม Multigauge-image โดยสามารถเห็นรายละเอียดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ ในการปรับแต่งภาพช่วยเพิ่มคุณภาพของภาพได้ ทำให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดภายในชิ้นงานได้ดีขึ้น

ในการถ่ายภาพขยายเครื่องกำเนิดรังสีถือเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากความไม่คมชัดของภาพที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากขนาดจุดโฟกัสของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องกำเนิดรังสีจะมีขนาดจุดโฟกัสประมาณ 300 ไมครอน เมื่อทำการถ่ายภาพขยายจะทำให้ความคมชัดของภาพลดลง และในการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไป จะต้องจัดวางให้ชิ้นงานให้ติดอยู่กับฟิล์ม หรือ อุปกรณ์รับภาพมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม หรือ อุปกรณ์รับภาพ หรือลดระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับต้นกำเนิดรังสี ภาพที่ได้จะเป็นภาพที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของวัตถุจริง ทำให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กได้ แต่ถึงแม้ว่าวิธีการถ่ายภาพรังสี จะทำให้เห็นจุดบกพร่องภายในชิ้นงานได้ แต่ไม่สามารถบอกจำนวนและขนาดของจุดบกพร่องที่แท้จริงได้ เนื่องจากเป็นเพียงการประเมินจากภาพ 2 มิติเท่านั้น

2.16 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) [33]

ลักษณะโครงสร้างภายในของโลหะผสมเมื่อพิจารณาจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (light microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบพฤติกรรมของโลหะผสม ส่วนโครงสร้างของอะตอมสามารถตรวจสอบได้จาก x-ray diffraction (XRD) หรือ high-resolution electron microscopy

2.16.1 เกรน ขอบเกรน และเดนไดรต์ (grains, grain boundaries, and dendrites)

นิวคลีเอชัน (nucleation) เป็นกระบวนการที่โลหะผสมเริ่มเป็นของแข็งในขณะที่เย็นตัวลงหลังจากเกิดการหลอมเหลว โดยขณะที่ทำให้โลหะผสมเย็นลง nuclei จะค่อยๆเกิดขึ้นภายในผลึกเรียกว่า เกรน ขนาดของเกรนจะขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งของเหลวหมดไป และจากนั้นจะเกิดเป็นขอบเขต (boundaries) ระหว่างแต่ละเกรนที่ solidus temperature ซึ่งสามารถเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยโลหะผสมบางชนิดจะมีการเติมโลหะที่ทำให้เกรนละเอียด (grain refiner)

เข้าไปด้วย ซึ่งขนาดของเกรนขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของโลหะผสม (cooling rate) ส่วนประกอบของโลหะผสม และการเติมโลหะที่ทำให้เกรนละเอียด โดยขนาดของเกรนนี้จะมีผลต่อความแข็งแรงของโลหะผสม ความสามารถในการหล่อโลหะผสม (workability) และยังมีผลต่อการกัดกร่อนด้วย

ขอบเขตเกรนเป็นรอยต่อระหว่างเกรนที่สามารถเห็นได้ง่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง มีความสำคัญเนื่องจากมักพบจุดบกพร่องอยู่บริเวณนี้ ทำให้เป็นตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย โดยจุดบกพร่องอาจเกิดจากอินคลูชันของก๊าซ พบเป็นรูพรุน หรือรอยแตกเล็กๆอยู่ภายในหรือที่พื้นผิวของโลหะผสม ซึ่งรูพรุนที่อยู่ภายในโลหะผสมนี้อาจเป็นจุดรวมความเค้นที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความล้มเหลวของชิ้นงาน ส่วนรูพรุนที่พื้นผิวโลหะผสมอาจส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดการเปลี่ยนสีของโลหะผสมอันเนื่องมาจากการสะสมของคราบจุลินทรีย์

เดนไดรต์เป็นผลจากเกรนที่ขยายไปตามแนวหลักของผลึกก่อนกระบวนการแข็งตัวของโลหะ และยังคงอยู่จนถึงอุณหภูมิห้อง โครงสร้างเดนไดรต์บ่งบอกว่าโลหะผสมไม่อยู่ในสถานะสมดุล และยังทำให้โลหะผสมเกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ถ้าให้อัตราการเย็นตัวของโลหะผสมเร็วที่สุดจะทำให้โลหะอยู่ในสถานะสมดุลได้ โดยเดนไดรต์สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไปในโลหะผสมทางทันตกรรม ซึ่งสามารถเห็นได้หลังจากเตรียมผิวโลหะผสมด้วยกรดและขัดให้เรียบ

2.17 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ (dendritic microstructure) เนื่องจากการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ (slow cooling process) ที่อุณหภูมิห้อง [5, 8, 13, 48, 51] โดยพบว่ามีโครงสร้างจุลภาคเป็น 2 เฟส จากการวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าส่วนประกอบทางเคมีของบริเวณเดนไดรต์ และรอยต่อเดนไดรต์มีลักษณะใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามบริเวณเดนไดรต์พบมีโครเมียมปริมาณสูงและมีโคบอลต์ปริมาณต่ำ และจากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าทั้งบริเวณเดนไดรต์และรอยต่อเดนไดรต์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็น hcp และ fcc โดยพบมีการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transformation) ของโคบอลต์ในขณะที่เย็นตัวลงจากอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นเฟส α (fcc) เปลี่ยนเป็นเฟส ϵ (hcp) ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 420 องศาเซลเซียส และยังพบว่าโครเมียมและโมลิบดีนัมจะเกิดความเสถียรที่เฟส ϵ [13] โดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเฟส ϵ จะส่งผลให้ปริมาณไอออนของโลหะที่ถูกปล่อยออกมาลดลง ดังนั้นโลหะผสมที่ประกอบด้วยเฟส ϵ จำนวนมาก มีแนวโน้มที่จะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [57] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะ

ผสมโคบอลต์-โครเมียมมีหลายเฟส (multiphase microstructure) โดยพบมีการ precipitate ของคาร์ไบด์อยู่ในบริเวณรอยต่อเดนไดรต์ [51]

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมมีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนที่ทำให้มีการปล่อยไอออนของโลหะออกมาในช่องปาก [13] Kurosu และคณะ [57] ศึกษาผลของเฟส σ ที่มีต่อการเกิดการกัดกร่อนในโลหะผสมโคบอลต์-29โครเมียม-6โมลิบดีนัมพบว่า การ precipitate ของเฟส σ ทำให้ปริมาณของโครเมียมและโมลิบดีนัมรอบๆเฟส σ ลดลง จึงเกิดการกัดกร่อนรอบๆเฟส σ โดยเมื่อมีเฟส σ เพิ่มขึ้น จะทำให้โครเมียม โมลิบดีนัม และนิกเกิลถูกปล่อยออกมาเพิ่มมากขึ้น แต่โครเมียมและโมลิบดีนัมที่ถูกปล่อยออกมามีปริมาณน้อยกว่านิกเกิล ถึงแม้ว่าส่วนประกอบทางเคมีของโครเมียมและโมลิบดีนัมในโลหะผสมจะมีปริมาณมากกว่านิกเกิลก็ตาม ซึ่งการที่โครเมียมและโมลิบดีนัมถูกปล่อยออกมามีปริมาณน้อยกว่า อาจเนื่องมาจากโครเมียมและโมลิบดีนัมอยู่ในส่วนของสารสร้างฟิล์มพาสซีฟ ในขณะที่นิกเกิลไม่ได้สร้างฟิล์มพาสซีฟ และจากการศึกษาความสัมพันธ์ของเฟส σ กับค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟ และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟพบว่า เมื่อมีการ precipitate ของเฟส σ จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟเพิ่มขึ้น และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมในเมทริกซ์ [58] แต่จากผลการศึกษานี้พบเฟส σ จำนวนน้อยมาก จึงทำให้ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟ และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ หรือไม่มีผลต่อการสร้างและการทำลายของฟิล์มพาสซีฟในโลหะผสมโคบอลต์-29โครเมียม-6โมลิบดีนัม

2.18 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบัดกรี

Kollmannsperger และคณะ [59] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และโลหะผสมทองที่มีปริมาณสูง (high gold alloy) โดยใช้โลหะทองเป็นโลหะบัดกรี จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า เกิดการแพร่กระจายของธาตุในบริเวณรอยต่อของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมกับโลหะบัดกรีทอง และเกิดเป็นหลายเฟส (heterogeneous phase) ซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น ส่วนรอยต่อของโลหะทองที่มีปริมาณสูงกับโลหะบัดกรีทอง พบว่าไม่เกิดการแพร่กระจายของธาตุ โดยเป็นรอยเชื่อมบัดกรีที่ดีที่สุด ซึ่งน่าจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุดในสภาวะแวดล้อมในช่องปาก

Cheng และคณะ [50] ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมโลหะระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟและวิธีอินฟราเรด พบว่าโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมโลหะในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมเมื่อเชื่อมด้วยวิธีบัดกรีด้วยไฟโดยใช้โลหะบัดกรีทอง จะเกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเป็นบริเวณกว้างกว่าวิธีอินฟราเรด เนื่องจากโลหะบัดกรีทองมีการ

แพร่กระจายเข้าไปในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ส่วนในโลหะผสมทอง-แพลเลเดียม และโลหะผสมแพลเลเดียม-เงิน พบว่ารอยเชื่อมโลหะทั้งวิธีบัดกรีด้วยไฟและวิธีอินฟราเรดมีโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกัน โดยพบรูพรุนทั้งในรอยเชื่อมของโลหะผสมทอง-แพลเลเดียม โลหะผสมแพลเลเดียม-เงิน และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ซึ่งสามารถพบรูพรุนได้ทั่วไปเนื่องจากการที่จะทำให้รอยเชื่อมบัดกรีมีลักษณะสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยากในอากาศ และยังพบว่ารอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมที่มีทองปริมาณต่ำ (low-gold content alloys) จะเกิดรูพรุนได้มากกว่าในโลหะผสมที่มีทองปริมาณสูง (high-gold content alloys) [60] นอกจากนี้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า วิธีการบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิกมีขนาดเกรนใหญ่กว่าวิธีการบัดกรีหลังขึ้นรูปเซรามิก และยังพบรูพรุนขนาดเล็กที่ขอบเกรนในวิธีการบัดกรีก่อนขึ้นรูปเซรามิกอีกด้วย [32]

2.19 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเลเซอร์

โดยปกติโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่มีการเชื่อมด้วยเลเซอร์จะแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณรอยเชื่อม (fusion zone) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (unaffected zone) [45] ซึ่งพบว่ามีการแยกเกิดขึ้นในบริเวณรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และพบลักษณะ fine precipitate ในเมทริกซ์ (matrix) บริเวณรอยเชื่อม ที่เกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของโลหะผสม [45, 48] เช่นเดียวกับการศึกษาของ Bertrand และคณะ [8] ที่พบว่าโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเลเซอร์มีลักษณะเป็นแกรนูลา (granular) ที่มี fine cellular substructure (strong cohesion) แต่พบการเกิดรอยแตกไปตามขอบเกรน และพบรูพรุนขนาดเล็กอยู่ในบริเวณนี้

Nabandalung และคณะ [10] ยังพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน โดยเกิดการเรียงตัวใหม่ของผลึก และการขยายตัวของเกรนที่ทำให้โลหะมีความเปราะได้ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมเลเซอร์นี้มักไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากกระบวนการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงาน โลหะที่มีรอยเชื่อมมีสมบัติทางกลที่แย่งลง

Carek และคณะ [51] พบว่าโครงสร้างจุลภาคในบริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมมีลักษณะเป็น small crystal particle ที่มีการ precipitate จำนวนมากของคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ อย่างสม่ำเสมอ ส่วนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้ back scatter detector ภาพที่ได้พบว่ามี precipitate จำนวนมากบริเวณรอยต่อเค้นโครงในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และยังพบเฟส σ ทั้งในบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนอีกด้วย

2.20 การกัดกร่อน (Corrosion) [17]

การกัดกร่อนเป็นการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมของโลหะ ซึ่งเกิดจากการที่โลหะทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมรอบๆ พบได้บ่อยที่พื้นผิวโลหะจากการมีความเค้น หรือมีสิ่งเจือปนอยู่ภายใน โครงสร้างระหว่างเกรนูล (intergranular impurities)

กระบวนการเกิดการกัดกร่อนเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) ของโลหะ เมื่อธาตุในโลหะผสมเกิดไอออน (ionize) จะทำให้โลหะผสมนั้นเกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยเริ่มเกิดจากธาตุที่ไม่มีประจุในโลหะผสมมีการสูญเสียอิเล็กตรอน ทำให้ธาตุนั้นกลายเป็นประจุบวก และถูกปล่อยออกมาในสารละลาย สมบัติการกัดกร่อนของโลหะขึ้นอยู่กับความสามารถของอะตอมตรงกลางและอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น โดยปริมาณพลังงานที่ต้องการนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพลังงานในโลหะ อย่างเช่น ทอง หรือแพลตตินัม (platinum) ซึ่งมีพันธะโลหะที่แข็งแรง อิเล็กตรอนจะยึดกันอยู่อย่างแน่น การมีพลังงานในการสลายพันธะที่ต่ำ (salvation energy) จึงทำให้ทอง หรือแพลตตินัมเกิดการกัดกร่อนได้ยาก

การกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนอย่างมาก [61] โดยสมบัติการกัดกร่อนของโลหะขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบของโลหะ เฟสในโครงสร้างจุลภาค (microstructure phases) อิเล็กโทรดโพเทนเชียล (electrode potentials) ลักษณะพื้นผิวของโลหะ และสิ่งเจือปนหรือจุดบกพร่องบนผิวโลหะ เป็นต้น โดยโลหะที่มีโครงสร้างหลายเฟส หรือมีส่วนประกอบของโลหะผสมไว้สกลยแก้ว โลหะผสมไททานเนียมและโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม จะมีแนวโน้มในการเกิดการกัดกร่อนได้มากกว่าโลหะที่มีโครงสร้างเฟสเดียวหรือโลหะมีสกลสูง [20, 21, 61]

ในสภาวะช่องปากจะสามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเนื่องจากมีความชื้นจากน้ำลาย อยู่ในอุณหภูมิร่างกาย (37°C) และมีค่า pH (สภาวะความเป็นกรด) ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาจากการรับประทานอาหาร นอกจากนี้การกัดกร่อนยังขึ้นอยู่กับระดับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การไหลเวียนของอิเล็กโทรไลต์ สภาวะแวดล้อมในช่องปากของแต่ละคน เช่น ส่วนประกอบของน้ำลาย คราบจุลินทรีย์ แบคทีเรีย การไหลย้อนของกรดจากกระเพาะอาหาร เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวโลหะได้ [15, 17, 61, 62]

ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำลายสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากขึ้นอยู่กับ อายุและเพศของผู้ป่วย ช่วงเวลาของแต่ละวัน พฤติกรรมการรับประทานอาหาร การรับประทานยา และพฤติกรรมการดูแลสุขภาพช่องปาก โดยการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในช่องปากสามารถแบ่งได้เป็นแบบระยะสั้นและระยะยาว ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงค่า pH ระยะสั้นเกิดจากการรับประทานอาหารที่เป็นกรด (pH 2-3) และการไหลย้อนของกรดจากกระเพาะอาหาร (pH 1) ในขณะที่การ

เปลี่ยนแปลงค่า pH ระยะยาวเกิดจากคราบจุลินทรีย์ที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวโลหะ (pH 4-4.5) และบริเวณหลุมร่องลึกของวัสดุบูรณะหรือส่วนโครงโลหะของฟันปลอม (pH 1.5-2.5) เป็นต้น [15]

ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะขึ้นอยู่กับกรณีฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ออกซิเจนจะช่วยให้การเกิดฟิล์มและคงสภาพของฟิล์ม ส่วนความเป็นกรดและคลอไรด์ไอออนจะทำลายฟิล์มให้หลุดออกไป [63] ดังนั้นในสภาวะช่องปากที่มีความเป็นกรดจึงสามารถเร่งให้มีอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นหรือทำให้ไอออนของโลหะถูกปล่อยออกมาในช่องปากเพิ่มมากขึ้นได้ [17, 61]

2.21 ชนิดของการกัดกร่อน (Type of corrosion) [17]

ชนิดของการกัดกร่อนแบ่งได้ดังนี้

1. การกัดกร่อนทางเคมี (chemical corrosion or dry corrosion) เกิดขึ้นจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างโลหะกับส่วนที่ไม่ใช่โลหะ อย่างเช่น โลหะเงินมีการเปลี่ยนสีเนื่องจากการเกิดขึ้นของซิลเวอร์ซัลไฟด์ ซึ่งไม่มีน้ำหรือของเหลวที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ในการเกิดการกัดกร่อนชนิดนี้ และโดยปกติการกัดกร่อนทางเคมีมักจะเกิดขึ้นร่วมกับการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี

2. การกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical corrosion or wet corrosion) ต้องการสารละลายเป็นช่องทางให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านได้ ซึ่งในช่องปากมีความชื้นอยู่ตลอดเวลาจากน้ำลาย จึงจัดอยู่ในการกัดกร่อนชนิดนี้ โดยน้ำลายจัดเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่อ่อนแอกว่าน้ำเกลือสมบัติน้ำไฟฟ้าเคมีของน้ำลายจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำลาย ความเข้มข้นของน้ำลาย ค่า pH ความตึงผิว และความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของน้ำลาย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่ออัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น

เมื่อการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นจะมีไอออนของโลหะเข้ามาอยู่ในสารละลาย และมีไฮโดรเจนไอออนอยู่ในสารละลาย โดยจะเกิดเป็น 2 บริเวณคือ แอโนดิก (anodic) ซึ่งโลหะมีการละลายออกมา และแคโทดิก (cathodic) ซึ่งมีไฮโดรเจนไอออนอยู่ในสารละลาย โดยแบ่งย่อยชนิดของการกัดกร่อนเป็นดังนี้

1. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (galvanic corrosion or dissimilar corrosion) เกิดขึ้นเมื่อโลหะต่างชนิดกันที่มีส่วนประกอบต่างกันมาสัมผัสกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้มีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้ากัลวานิก (galvanic currents) เกิดขึ้น เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว โลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (แอโนด) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (แคโทด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสองยิ่งมากเท่าไร ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนก็

จะรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ในโลหะที่มีรอยเชื่อมบัดกรีอาจเกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เนื่องจากส่วนประกอบที่แตกต่างกันของโลหะชิ้นงานและโลหะบัดกรี [2, 14, 27, 64]

2. การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (stress corrosion) เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่พบได้มากที่สุด ในวัสดุบูรณะทางทันตกรรม เกิดขึ้นเมื่อโลหะเกิดความล้าหรือมีความเค้นมากระทำกับโลหะในสภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosive environment) ตัวอย่างเช่น การถอดใส่ฟันปลอมฐานโลหะบ่อยๆทำให้เกิดความเค้นอย่างมากที่ขอบเกรน และร่วมกับสภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนในช่องปาก ทำให้เกิดเป็นการกัดกร่อนร่วมกับความเค้น โดยเฉพาะถ้ามีจุดบกพร่องบนพื้นผิวโลหะ เช่น รูพรุนหรือรอยแตกจะสามารถเร่งกระบวนการเกิดการกัดกร่อนได้ ซึ่งการที่มีปัจจัยทั้ง 3 อย่างมารวมกันคือ ความเค้น สภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน และรอยแตกหรือรูพรุนในเนื้อโลหะ อาจทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนได้ โดยจะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้านอยู่มากมายในเนื้อโลหะ โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่านเกรนก็ได้ ซึ่งพบว่าอาจเกิดการกัดกร่อนลักษณะนี้ได้ ในรอยเชื่อมเลเซอร์ [48]

3. การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น หรือการกัดกร่อนได้รอยซ้อน (concentration cell corrosion or crevice corrosion) คือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นช่องแคบๆที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอกบริเวณแคบๆ ที่มีสารละลายเข้าไปค้างอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการคราบเซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนดคือเกิดการกัดกร่อนและสูญเสียเนื้อโลหะ ตัวอย่างเช่น บริเวณด้านประชิดติดกันของโลหะ (proximal area) บริเวณใต้ฐานโลหะที่มีการสะสมของเศษอาหาร และบริเวณที่เป็นหลุมร่องลึกหรือมีรูพรุนบนพื้นผิวโลหะเมื่อเทียบกับบริเวณด้านบดเคี้ยว จะพบว่ามีค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ต่างกัน ทำให้เกิดกัดกร่อนแบบนี้ได้ โดยเฉพาะในผู้ที่มีการดูแลสุขภาพช่องปากที่ไม่ดีจะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงมากยิ่งขึ้นได้ โดยพบว่าพื้นผิวที่ขรุขระของรอยเชื่อมบัดกรีที่ถูกกัดกร่อนจะทำให้เกิดการสะสมของคราบจุลินทรีย์ ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเซลล์ความเข้มข้นได้ [16]

4. การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เป็นการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (localized corrosion) ที่เกิดขึ้นเป็นรูหรือหลุมเล็กๆในเนื้อโลหะรูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก มักเกิดขึ้นกับโลหะที่มีฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อน แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่และกัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ที่มักจะไม่สามารถสังเกตได้เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจนกระทั่งเกิดความเสียหายของชิ้นงาน

โดยทั่วไปชิ้นงานโลหะหล่อหรือรอยเชื่อมโลหะสามารถพบจุดบกพร่องที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในลักษณะนี้ได้ [13, 16, 24]

2.22 วิธีการทดสอบการกัดกร่อน (corrosion test method) [17]

1. การทดสอบแบบจุ่ม (immersion test)

เป็นวิธีที่ใช้บ่อยในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะในสารละลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายโดยนำชิ้นงานจุ่มลงในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทดสอบน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักไป เป็นการทดสอบที่ใช้เวลาน้อยที่สุดและมีราคาเหมาะสม โดยเหมาะสำหรับการใช้เลือกวัสดุที่จะนำไปใช้ในเบื้องต้น ซึ่งต้องกำหนดตัวแปรต่างๆ ให้ชัดเจนเพื่อให้สามารถทำการทดสอบซ้ำได้ตามมาตรฐาน ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของสารละลาย ค่าความเป็นกรดของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย การเติมอากาศ (aeration) ปริมาตรของสารละลาย ความเร็ว (velocity) การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน วิธีการจุ่มชิ้นงาน ระยะเวลาที่ทดสอบ และวิธีการทำความสะอาดชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ โดยทั่วไปการทดสอบแบบจุ่มจะวัดอัตราการกัดกร่อนของโลหะในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ อย่างไรก็ตามถ้าออกแบบชิ้นงานและสภาวะแวดล้อมที่เฉพาะเจาะจง การทดสอบแบบจุ่มสามารถประเมินความต้านทานของโลหะต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก การกัดกร่อนบริเวณซอก การกัดกร่อนแบบรูเข็ม และการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นได้

โดย ISO 10271 กำหนดให้เตรียมชิ้นงานจุ่มลงในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนคือ กรดแลกติก และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จากนั้นจึงนำสารละลายนี้ไปวัดความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ที่ถูกปล่อยออกมา

2. การทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical test)

เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (potentiodynamic polarization) เป็นที่นิยมใช้ในการประเมินการกัดกร่อนของโลหะผสมทางทันตกรรม โดยประกอบด้วยอิเล็กโทรดทั้งหมด 3 ตัวคือ 1. อิเล็กโทรดตัวอย่าง (experimental/working electrode) ที่เตรียมจากโลหะผสมทางทันตกรรม 2. เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (counter electrode) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้โลหะแพลตินัม และ 3. อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) ที่โดยทั่วไปจะใช้คาโลเมลอิเล็กโทรดชนิดอิ่มตัว (saturated calomel electrode, SCE) หรือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์อิเล็กโทรดชนิดอิ่มตัว (saturated Ag/AgCl electrode) และมีโพเทนชิโอสแตทซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของโวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดตัวอย่างและอิเล็กโทรดอ้างอิงอย่างช้าๆ จากค่าลบเป็นค่าบวก โดยจะมีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential, E_{OCP}) เพื่อให้เกิดความเสถียร

ก่อนการป้อนศักย์ไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง และใช้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น ซึ่งกำหนดให้อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ส่วนอิเล็กโทรไลต์สามารถเลือกใช้ได้หลายชนิด เช่น น้ำเกลือที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เหมาะสม น้ำลายธรรมชาติ น้ำลายเทียม เช่น สารละลายฟูซายามา (Fusayama solution) และสารละลายริงเกอร์ (Ringers solution) เป็นต้น นอกจากนี้ Kedici และคณะ [60] ยังแนะนำอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนทางทันตกรรมคือ สารละลายที่เป็นกรด น้ำลายเทียมที่มีฟลูออไรด์หรือซิลิเฟอร์เป็นส่วนประกอบ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 37 °C

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีทั้งหมดจะถูกแสดงเป็นกราฟโพลาริเซชันระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง และค่า log ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (log current density) ซึ่งจะแสดงทั้งหมด 4 ค่าคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) , ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}), ค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟ (Passive current density, I_p) และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ (Tranpassive potential, E_p) โดยถ้าเปรียบเทียบค่าความต้านทานการกัดกร่อนระหว่างโลหะผสม 2 ชนิดเมื่ออยู่ในอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน จะบอกได้ว่าโลหะผสมที่มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าหรือมีค่าทางไฟฟ้าเคมีสูงกว่าคือ จะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่า และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่า นอกจากนี้ค่า polarization resistance (R_p) ยังสามารถบอกถึงค่าความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะได้โดยพิจารณาจากความชันของกราฟได้ด้วย

เทคนิค electrochemical impedance spectroscopy (EIS) โดยวิธีนี้จะใช้ sinusoidal voltage signal ร่วมกับ small amplitudes (โดยปกติประมาณ 10 มิลลิโวลต์) และอิเล็กโทรดจะถูกครอบงำเพียงเล็กน้อย ซึ่งนอกจากจะได้ข้อมูลโดยทั่วไปเกี่ยวกับการกัดกร่อนแล้ว ข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับกลไกทางไฟฟ้าเคมีก็สามารถวัดได้ด้วยวิธีนี้ [5]

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค minicell-system ซึ่งพบว่าเทคนิคนี้สามารถทำได้ง่ายและประสบความสำเร็จในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของรอยเชื่อมทั้งวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์และการบัดกรีด้วยไฟ [65]

สำหรับค่าอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมสามารถวัดได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี [62]

วิธีทางเคมีคือ การวัดแนวโน้มของการกัดกร่อนจากน้ำหนักของโลหะที่สูญเสียไปจากการถูกกัดกร่อน จากปริมาณธาตุของโลหะทั้งหมดที่ปล่อยออกมาในสารละลาย และจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการกัดกร่อน

วิธีทางไฟฟ้าเคมีคือ คำนวณค่าอัตราการกัดกร่อน โดยโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบ การกัดกร่อน จากการตัดกราฟแคโทดิกและแอนโอดิกบนเส้นกราฟโพลาริเซชัน (fit curve) เพื่อ คำนวณเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ซึ่งค่าความ หนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะคำนวณจาก Stern-Geary equation โดยนำค่าความชันของ กราฟแคโทดิกและแอนโอดิกบนเส้นกราฟโพลาริเซชัน และค่า polarization resistance มาใช้ในการ คำนวณ จากนั้นจะนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนนี้มาคำนวณอัตราการกัดกร่อน โดยระบุค่าความหนาแน่นชั้นงาน ค่ามวลสมมูลเฉลี่ย และค่าพื้นที่ผิวชั้นงานที่ถูกทดสอบ

3. Scanning electrochemical microscope (SECM)

วิธีนี้จะมีไมโครอิเล็กโทรด (microelectrode) ที่สามารถสแกนผ่านพื้นผิวของโลหะ ออกมาเป็นรูปภาพซึ่งแสดงถึง microelectrochemical process บนผิวโลหะ เช่น แสดงภาพจำลอง การเกิดหลุม (pit) บนผิวโลหะ เป็นต้น

2.23 ลักษณะสำคัญทางคลินิกที่พบในรอยเชื่อมบัดกรีหรือรอยเชื่อมเลเซอร์ที่เกิดการกัดกร่อน

(Clinical significance of corrosion on soldered/laser-welded joint)

การกัดกร่อนของโลหะเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อความสำเร็จของงานทางทันตกรรม ประดิษฐ์ โดยการกัดกร่อนสามารถเกิดได้กับโลหะทุกชนิด แต่อิออนของโลหะที่ถูกปล่อยออกมา มีปริมาณน้อยมากในระดับที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ [20]

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะสามารถส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง ความสวยงาม และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ซึ่งผลทางด้านชีวภาพสำคัญที่สุด เนื่องจากไอออนของโลหะที่ถูกปล่อย ออกมาจากกระบวนการกัดกร่อน เมื่อมาสัมผัสกับเนื้อเยื่อของร่างกายสามารถทำให้เกิดอาการแพ้ และเป็นพิษต่อเซลล์และเนื้อเยื่อของร่างกายได้ [15]

1. ความล้มเหลวทางกลของโครงโลหะฟันปลอม (mechanical failure of prosthesis)

การกัดกร่อนของรอยเชื่อมโลหะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลที่สัมพันธ์กับความแข็งแรง ของรอยเชื่อม [14] โดยบริเวณรอยเชื่อมมักจะเกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะตำแหน่งที่ทำให้ชั้นงาน เกิดความล้าเฉพาะตำแหน่ง หรือทำให้ชั้นงานมีความแข็งแรงลดลง และเมื่อเกิดการกัดกร่อนเพิ่ม มากขึ้นจากการใช้งานในช่องปากเป็นระยะเวลานาน ชั้นงานนั้นอาจไม่สามารถรับแรงที่มากได้จน ทำให้เกิดความเสียหายทางกล [2, 16, 17] โดยพบสะพานฟันหักที่รอยเชื่อมเนื่องจากมีจุดบกพร่อง บริเวณรอยเชื่อมบัดกรี [34]

2. การเปลี่ยนสีของโลหะ (Discoloration)

การเปลี่ยนสีของโลหะบริเวณรอยเชื่อมของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ถูกกัดกร่อนจากการใช้งานในช่องปากสามารถสังเกตเห็นได้ง่าย เช่น รอยเชื่อมบัดกรีที่ถูกกัดกร่อนจะมีการเปลี่ยนสี และดูหมองไปจากเดิมที่เคยเป็นเงามัน ในขณะที่รอยเชื่อมเลเซอร์พบว่าเกิดการกัดกร่อนได้น้อยกว่า โดยยังมีความเป็นมันเงาเหมือนเดิม เนื่องจากสามารถทำการเชื่อมโลหะเข้าด้วยกันโดยไม่ต้องใช้โลหะเติม ทำให้บริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์มีความต้านทานการกัดกร่อนเท่ากับบริเวณโลหะชิ้นงาน [34]

3. การสะสมของคราบจุลินทรีย์ (Plaque accumulation)

การกัดกร่อนบริเวณรอยเชื่อมโลหะส่งผลให้พื้นผิวบริเวณนั้นมีความขรุขระ ซึ่งสามารถส่งเสริมให้เกิดการสะสมของคราบจุลินทรีย์ ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเซลล์ความเข้มข้นได้ ยกเว้นมีฟิล์มมาปกคลุมบริเวณพื้นผิวรอยเชื่อมไว้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเน้นการดูแลสุขภาพช่องปากที่ถูกต้องเหมาะสม [16, 17, 21]

4. ปฏิกิริยาการแพ้และการเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ (Allergic reaction and Cytotoxic response)

การกัดกร่อนทำให้มีไอออนของโลหะปล่อยออกมาในช่องปาก ที่ส่งผลต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดยทำให้เกิดอาการแพ้ ไลเคนพลาเน็ต ทำให้เกิดการระคายเคืองหรือการอักเสบของเนื้อเยื่อในช่องปากและร่างกาย รวมทั้งเป็นพิษต่อเซลล์หรือทำให้เซลล์ร่างกายผิดปกติได้ [14, 20, 61] ซึ่งอาการแพ้ไอออนของโลหะ ผู้ป่วยอาจจะมีอาการแพ้แล้ว หรืออาจจะเกิดอาการแพ้เป็นครั้งแรกก็ได้ และการแพ้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่สี่ (type IV) [24] โดยพบผู้ป่วยที่ใส่ฟันปลอมที่มีรอยเชื่อมบัดกรีเกิดอาการอักเสบและระคายเคืองเนื้อเยื่อในช่องปาก [27]

ปัจจุบันยังไม่มีการยืนยันที่แน่นอนถึงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะที่กระทำกับเนื้อเยื่อในช่องปากและร่างกาย และยังไม่มีการกำหนดปริมาณไอออนที่ต่ำที่สุดที่จะไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีในงานทางทันตกรรมประดิษฐ์ติดแน่นจะต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพเป็นหลัก และควรทราบส่วนประกอบของโลหะบัดกรีที่เลือกใช้ด้วย ซึ่งต้องอ้างอิงจากการศึกษาทางห้องปฏิบัติการ โดยรอยเชื่อมโลหะควรมีการปล่อยไอออนของโลหะออกมาให้น้อยที่สุด หรือสามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมในช่องปากได้ [15, 16, 24, 61]

2.24 งานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรี

2.24.1 ในโลหะผสมมีสกุลสูงและโลหะผสมมีสกุล (high noble and palladium based alloys)

Bessing และคณะ [66] ศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของ low gold alloys, Ag-Pd alloy และ high gold alloy โดยชนิดของโลหะบัดกรีจะเฉพาะเจาะจงกับชนิดของโลหะขึ้นงานตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต (Midas alloy กับ 18-585 solder, Rajah alloy กับ 18-615 solder, Albacast alloy กับ AlboroLF solder และ JS C alloy กับ JS 820) โดยเตรียมขึ้นงาน 4 ชิ้นต่อชนิดของโลหะผสมขนาด $10 \times 10 \times 1$ มิลลิเมตร ตาม ISO/DIS 9333 ชิ้นงานจะถูกแบ่งครึ่งโดยมีช่องว่างขนาด 0.1-0.2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจึงนำไปบัดกรีด้วยไฟ และทดสอบการกัดกร่อนโดยนำขึ้นงานไปแช่ในสารละลายที่เตรียมขึ้นจากกรดแลคติกที่ aerated 0.1 mol/L และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 mol/L เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ $37 \pm 1^\circ\text{C}$ จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากผลการทดสอบการกัดกร่อนพบว่า ชิ้นงานที่บัดกรีด้วยไฟทั้งหมดผ่านมาตรฐานการทดสอบ และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า ชิ้นงานทั้งหมดเกิด strict demarcation line ไม่เกิดการรวมตัวกันระหว่างโลหะขึ้นงานกับโลหะบัดกรี และพบรูพรุนเพียงเล็กน้อย โดยจากการศึกษานี้พบว่าโลหะบัดกรีควรมีปริมาณทองสูงกว่าโลหะขึ้นงาน เนื่องจากมีผลต่ออัตราส่วนของพื้นที่แคโทดต่อแอโนด (cathode/anode area ratio) ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณรอยเชื่อมโลหะน้อยลงซึ่งเป็นผลดี

Kawada และคณะ [67] ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะที่เชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมโลหะหลังขึ้นรูปเซรามิกของโลหะผสมแพลเลเดียมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น (Pd-Cu, Pd-Ni, Pd-Ag และ Pd-Sb) และใช้โลหะบัดกรี 2 ชนิด คือ โลหะบัดกรีทอง 12k และโลหะบัดกรีทอง 16k ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี และจุดหลอมเหลวที่ต่างกัน โดยทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมโลหะด้วยวิธีโพเทนชิอไดนามิกโพลาริเซชัน ผลการศึกษาพบว่าในโลหะผสม Pd-Cu, Pd-Ag และ Pd-Sb ไม่เกิดการกัดกร่อน (ไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน) แต่ใน Pd-Ni พบว่าเกิดการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ (low potential)

2.24.2 ในโลหะผสมไร้สกุล (base metal alloys)

Shigeto และคณะ [64] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีและโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม 6 ชนิดที่มีส่วนประกอบของนิกเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัมแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างโลหะบัดกรีทอง (gold solder) และโลหะบัดกรีเงิน (silver solder) ซึ่งเตรียมขึ้นงานโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม ขนาด 10×10 มิลลิเมตร และโลหะบัดกรีขนาด 2×2 มิลลิเมตร และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก เป็นสารละลายอิเล็ก

โทรไลต์ โดยประเมินการกัดกร่อนจากกระแสไฟฟ้ากัลวานิก และความเข้มข้นของนิกเกิลและคอปเปอร์ในสารละลายซึ่งวัดโดย atomic absorption และ emission spectrometry จากนั้นกราฟโพลาริเซชันจะถูกวัดด้วยเครื่องโพเทนชิออมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า โลหะผสมที่มีโครเมียมปริมาณน้อยเมื่อใช้กับโลหะบัดกรีเงินจะมีกระแสไฟฟ้ากัลวานิกอย่างต่อเนื่อง ส่วนโลหะผสมที่มีโครเมียมปริมาณมากเมื่อใช้กับโลหะบัดกรีทองหรือโลหะบัดกรีเงินจะมีกระแสไฟฟ้ากัลวานิกเพียงระยะเวลาสั้นๆ และพบว่าโลหะผสมที่มีโครเมียมปริมาณน้อยเมื่อใช้กับโลหะบัดกรีเงินจะเกิดการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบความเข้มข้นของนิกเกิลสูงในสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับที่พบว่ามีกระแสไฟฟ้ากัลวานิกสูง ซึ่งโลหะผสมที่มีปริมาณโครเมียมสูงจะถือเป็น high-resistance alloys ที่พบว่าเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า low-resistance alloys (โลหะผสมที่มีปริมาณโครเมียมน้อย) และใน low-resistance alloys พบว่าเกิดการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีทั้ง 2 ชนิด โดยเฉพาะเมื่อใช้กับโลหะบัดกรีเงิน ส่วนใน high-resistance alloys เมื่อใช้กับโลหะบัดกรีทองพบว่าไม่เกิดการกัดกร่อน ดังนั้นในการบัดกรีโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมควรใช้ high-resistance alloys และโลหะบัดกรีทอง เพื่อให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี

ต่อมา Shigeto และคณะ [16] ยังศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรี โดยเปรียบเทียบระหว่างโลหะบัดกรีทองกับโลหะบัดกรีเงินในโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม 6 ชนิดที่มีส่วนประกอบของนิกเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัมแตกต่างกัน ซึ่งเตรียมชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม ขนาด $3 \times 1.5 \times 20$ มิลลิเมตร และนำไปตัดตรงกลางโดยมีระยะช่องห่าง 0.3 มิลลิเมตร และนำไปบัดกรีในเตาเผา จากนั้นนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 100 วัน และนำไปตรวจสอบพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อนและบริเวณพื้นผิวที่ตัดขวางผ่านรอยเชื่อมโลหะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์พบว่า เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มใน low-resistance Ni-Cr alloys โดยเกิดในโลหะบัดกรีเงินมากกว่าในโลหะบัดกรีทอง ในขณะที่ high-resistance Ni-Cr alloys พบว่าไม่เกิดการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีทั้ง 2 ชนิด และเมื่อดูพื้นผิวที่ตัดขวางรอยเชื่อมโลหะพบว่า ในโลหะบัดกรีเงินพบรูพรุณจากการกัดกร่อนซึ่งเกิดขึ้นอย่างมากตามรอยต่อ (interface) ส่วนในโลหะบัดกรีทองไม่พบว่าการกัดกร่อน

Angelini และคณะ [14] ศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และโลหะผสมทองที่ใช้ในงานโครงโลหะฟินปลอมบางส่วนถอดได้ โดยใช้โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียม-นิกเกิล และโลหะบัดกรีทอง ซึ่งทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบจุ่มในสารละลายริงเกอร์ (Ringer's solution; NaCl 9 กรัม, CaCl₂ 0.24 กรัม, KCl 0.43 กรัม, NaHCO₃ 0.2 กรัม และเติมน้ำกลั่นจนเป็น 1 ลิตร) ที่อุณหภูมิ 37°C โดยเลือกใช้สารละลายริงเกอร์เนื่องจากช่วยเร่งการเกิดการกัดกร่อนเพราะมีความเข้มข้นของ

คลอไรด์เป็น 5 เท่าของน้ำลาย โดยแช่เป็นเวลา 30 วัน และตรวจสอบพื้นผิวด้านนอกของรอยเชื่อมบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อตรวจสอบลักษณะ (morphology) ของโลหะผสม โลหะบัดกรี และบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียม-นิกเกิลในการเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม จะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่เหมาะสม เมื่อตัดชิ้นงานพรอยเชื่อมมีความไม่สมบูรณ์ (imperfection) เนื่องจากความร้อนที่มากเกินไปในขั้นตอนการบัดกรี แต่เมื่อใช้โลหะบัดกรีทองในการเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมจะเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกเนื่องจากความแตกต่างกันของโลหะทั้งสองชนิดนี้ ทำให้โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมซึ่งมีความเป็นโนเบิล (noble) น้อยกว่าเกิดการกัดกร่อน โดยมีลักษณะเป็นการกัดกร่อนเฉพาะตำแหน่ง ในขณะที่เชื่อมโลหะผสมทองด้วยโลหะบัดกรีทองจะไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งโลหะผสมทองถือเป็นมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในการเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมบัดกรีอื่นๆ สรุปได้ว่า การเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โดยการอบชุบโลหะด้วยความร้อน (heat treatment) ที่ไม่ถูกต้อง จะส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรีลดลงอย่างมากได้ และการเกิดความร้อนที่มากเกินไปยังทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสที่รอยต่อระหว่างโลหะชิ้นงานกับโลหะบัดกรี (solder-alloy interface) ซึ่งทำให้เกิด chemical inhomogeneity ที่ส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลงเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ Angelini และคณะ [68] ยังศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยใช้โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียม และโลหะบัดกรีทอง ซึ่งทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบจุ่มในน้ำลายเทียม และสารละลายริงเกอร์ เป็นเวลา 60 วัน พบว่ารอยเชื่อมบัดกรีของโลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ในขณะที่พบการเกิดกัดกร่อนอย่างมากในรอยเชื่อมของโลหะบัดกรีทอง สรุปได้ว่า โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียมเหมาะสมมากกว่าโลหะบัดกรีทองในการเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม เนื่องจากโลหะผสมที่มีความเป็นโนเบิลต่างกันเมื่อมาอยู่ติดกันในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อน จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้ และยังส่งผลให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมที่มีความเป็นโนเบิลน้อยกว่าอีกด้วย

Luthy และคณะ [27] ศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรีจากการซ่อมโครงโลหะฟันปลอมซึ่งเชื่อมโลหะต่างชนิดกันคือ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-โมลิบดีนัมกับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิกเกิล โดยใช้โลหะบัดกรีทองซึ่งทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิอไดนามิกโพลาริเซชัน ในน้ำลายเทียมที่อุณหภูมิ 37°C พบว่าเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก โดยเกิดการกัดกร่อนอย่างมากที่โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม-นิกเกิล เนื่องจากมีความเป็นโนเบิลต่ำกว่า

De March และคณะ [2] ศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบัดกรีโดยใช้วิธี บัดกรีหลังจากขึ้นรูปเซรามิกในโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิด ดัดแน่น โดยใช้โลหะบัดกรีทองซึ่งทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก โพลาริเซชันในน้ำลายเทียม ที่อุณหภูมิ 37°C พบว่าเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกระหว่างรอย เชื่อมบัดกรีกับโลหะขึ้นงาน โดยรอยเชื่อมบัดกรีมักจะเป็นขั้วแคโทด เนื่องจากมีความเป็นโนเบิล สูงกว่าทำให้เกิดการกัดกร่อนที่โลหะขึ้นงาน แต่พบว่าเกิดกระแสไฟฟ้ากัลวานิกอย่างต่ำๆ ซึ่งการ กัดกร่อนที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยเชื่อมบัดกรีส่งผลให้ขึ้นงานมีความแข็งแรงลดลง โดยโลหะผสมที่ ยิ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันมากก็จะยิ่งทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.25 งานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเลเซอร์

Muller และคณะ [65] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการกัดกร่อนด้วยเทคนิค minicell-system โดยเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าเคมีระหว่างบริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์กับบริเวณโลหะขึ้นงานซึ่งเป็น โลหะต่างชนิดกัน คือ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และโลหะผสมทอง-เงิน-แพลเลเดียม ใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก ที่มีค่า pH เท่ากับ 6.2 จากกราฟโพลาริ เซชันในช่วงพาสซีฟพบว่า บริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์มีค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมี ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดความเสถียรน้อยกว่าบริเวณโลหะขึ้นงานทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแสดงว่ารอยเชื่อม เลเซอร์นี้มีสมบัติทางไฟฟ้าเคมีไม่เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นควรใช้โลหะชนิดเดียวกันหรือโลหะที่มี ส่วนประกอบใกล้เคียงกันในการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ จึงจะทำให้รอยเชื่อมมีสมบัติทางไฟฟ้าเคมี ที่ดี

2.26 งานวิจัยเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนระหว่างรอยเชื่อมบัดกรีและรอยเชื่อมเลเซอร์

Zupancic และคณะ [5] ศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมใน โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ระหว่างวิธีบัดกรีด้วยไฟโดยใช้โลหะบัดกรีโคบอลต์-โครเมียม และ วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่มีรอยเชื่อมแบบ X และแบบ I โดยใช้โลหะเดิมสำหรับรอยเชื่อมแบบ X และไม่ใช่โลหะเดิมสำหรับรอยเชื่อมแบบ I ซึ่งเตรียมชิ้นงานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 35 มิลลิเมตร โดยทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก โพลาริเซชัน และเทคนิค electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ในน้ำลายเทียมกับ น้ำลายเทียมที่เป็นกรด (pH 3) และประเมินพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องกราด ผลการศึกษาพบว่าเกิดการกัดกร่อนอย่างมากที่รอยเชื่อมบัดกรีในน้ำลายเทียมที่เป็น กรด โดยส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณโลหะขึ้นงานใกล้เคียงกับรอยเชื่อมบัดกรีร่วมกับพบหลุมลึกบาง

ตำแหน่ง ส่วนใน โลหะผสมที่ไม่มีรอยเชื่อมและรอยเชื่อมเลเซอร์พบการเกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย และส่วนใหญ่จะพบจุดบกร่องที่แน่นอน อย่างเช่น อินคลูชันหรือรอยขีดข่วน (scratches) สรุปได้ว่า รอยเชื่อมเลเซอร์ทั้ง 2 แบบมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่ารอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม เนื่องจากพบว่ามีความสามารถในการเกิดช่วงพาสซีฟแตกต่างกัน โดยในรอยเชื่อมบัดกรีไม่เกิดช่วงพาสซีฟอาจเนื่องมาจากโลหะบัดกรีมีความเป็น โนเบิลมากกว่าโลหะชิ้นงาน จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนในโลหะชิ้นงาน อย่างไรก็ตามก็พบรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มากกว่าเมื่อใช้งานในช่องปากเป็นระยะเวลานาน

Negrutiu และคณะ [69] ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการกัดกร่อนระหว่างวิธีการบัดกรีและวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยไม่ใช้โลหะเติม ซึ่งกำหนดค่าความหนาแน่นของพลังงานของแสงเลเซอร์ (energy density) 7.49 กิโลจูลต่อตารางเซนติเมตร และระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 12 มิลลิวินาที ทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการทดสอบแบบจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิดคือ สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 60 นาที สารละลาย Kukis® cleaner เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และน้ำลายเทียม 70 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 90 วัน จากการตรวจสอบผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า มีจุดบกร่องจำนวนมากในชิ้นงานบัดกรี สรุปได้ว่า วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีสมบัติการกัดกร่อนที่ดีกว่าหรือเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่าวิธีการบัดกรี

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากรเป้าหมาย

รอยเชื่อมบัดกรีและรอยเชื่อมเลเซอร์ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ชนิดติดแน่น

2. ประชากรตัวอย่าง

รอยเชื่อมบัดกรีและรอยเชื่อมเลเซอร์ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลยี่ห้อ Argeloy NP special (Argen, USA) โดยใช้โลหะบัดกรียี่ห้อ Wirobond solder (Bego, Germany) และโลหะเติมยี่ห้อ Wireweld Co-Cr (Bego, Germany) จำนวนทั้งหมด 45 ชิ้น

3. กลุ่มตัวอย่าง

3.1 กลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเชื่อมโลหะ จำนวน 15 ชิ้น

3.2 กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ จำนวน 15 ชิ้น

3.3 กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ จำนวน 15 ชิ้น

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรอิสระ คือ รอยเชื่อมบัดกรีและรอยเชื่อมเลเซอร์

ตัวแปรตาม คือ คุณภาพและอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อม

ตัวแปรควบคุม คือ ขนาดช่องว่างของรอยเชื่อม ส่วนประกอบของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล โลหะบัดกรี และโลหะเติม วัสดุและวิธีการที่ใช้ในการบัดกรีด้วยไฟและการเชื่อมด้วยเลเซอร์

3.3. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องเหยียงขึ้นงานโลหะ (Argoncaster-AE, SHOFU)
2. เครื่องตัดโลหะ (Cutting machine, Struer, Denmark)
3. เครื่องมือยึดขึ้นงานโลหะ (Jig)
4. เครื่องมือบัดกรีด้วยไฟ (Propane-oxygen torch)
5. เครื่องเลเซอร์ (Nd-YAG Laser, Laser Star, Bego, Germany)

6. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ (Stereomicroscope, Canon, Japan)
7. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, BX 60, Olympus, Japan)
8. เครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ (Automatic polishing machine, DPS 3200, IMPTECH, South Africa)
9. เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner, Branson 5210, Branson, Germany)
10. เครื่องถ่ายภาพรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส (Microfocus x-ray)
11. แผ่นบันทึกภาพ (Imaging plate, Fujifilm BAS-SR 2040)
12. คอมพิวเตอร์ และโปรแกรมสำเร็จรูปอิมเมจเจอร์ รุ่น 1.42d (Image J version 1.42d)
13. เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat, μ Autolab, type III)
14. Teflon holder พร้อม O-ring (Vitron)
15. คาโลเมลอิเล็กโทรดชนิดอิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE)
16. อิเล็กโทรดแพลตินัม (Platinum electrode)

วัสดุที่ใช้

1. ขี้ผึ้งสีน้ำเงิน (Blue inlay wax)
2. โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิล (Argeloy NP special, Argon, USA)
3. โลหะบัดกรี (Wirobond solder, Bego, Germany)
4. โลหะเติม (Wireweld Co-Cr, Bego, Germany)
5. Phosphate bond investment (Deguvest SR, DeguDent, Germany)
6. สารช่วยบัดกรี (Veriflux P, DeguDent, Germany)
7. กระดาษทรายน้ำ (wet silicon carbide paper) เบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200
8. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.9% โดยน้ำหนัก ที่มีค่า pH 6.2
9. กรดแลกติก
10. อะซีโตน
11. กรดไฮโดรคลอริก 35% โดยน้ำหนัก
12. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% โดยน้ำหนัก

3.4 วิธีการวิจัย

3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

เตรียมชิ้นงานอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 9333 ขนาด $10 \times 10 \times 1$ มิลลิเมตร สำหรับทดสอบการกัดกร่อน ทั้งหมด 45 ชิ้น (3 กลุ่ม กลุ่มละ 15 ชิ้น) โดยวิธีหล่อโลหะอย่างสูญญากาศ (lost wax process) ซึ่งเตรียมแม่พิมพ์ยาง (rubber mold) เป็นแบบในการขึ้นรูปขี้ผึ้ง (wax patterns) เพื่อให้ชิ้นงานมีลักษณะเหมือนกันทุกชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปลงอินเวสเมนต์ในกระบอกพลาสติก (plastic ring) โดยใช้ phosphate bond investment (Deguvest SR, DeguDent, Germany) ที่มีอัตราส่วนผสมของผง 100 กรัม ต่อ น้ำ 22 มิลลิลิตร ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต หลังจากนั้น 90 นาที จึงนำไปวางในเตาเผา (oven) ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อหลอมขี้ผึ้ง จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึง 870°C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งชิ้นงานจะถูกหล่อ (cast) ด้วยเครื่องมือยี่ห้อ Argoncaster-AE (SHOFU) โดยวิธี high frequency induction heating-system ซึ่งตั้งค่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ $1,370^{\circ}\text{C}$ สำหรับโลหะผสมยี่ห้อ Argeloy NP special และมีส่วนประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 หลังจากหล่อชิ้นงานเสร็จ ปล่อยให้ชิ้นงานให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ไม่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) ด้วยการจุ่มในน้ำ และนำชิ้นงานไปพ่นทรายด้วยผงอะลูมินาขนาด 50 ไมครอน กรอแต่งส่วนเกินด้วยหัวกรอส โดนสีเขียว (green stone bur) นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 400 จนถึงเบอร์ 1200 ด้วยเครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ และนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิกในน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงตรวจสอบชิ้นงานด้วยตาเปล่าจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอกำลังขยาย 45 เท่า ถ้าพบมีรูพรุนหรือรอยแตกที่ชิ้นงานไม่ว่าขนาดใดก็ตามจะถูกคัดออกทั้งหมด จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาตัดครึ่งจำนวน 30 ชิ้น (ยกเว้นกลุ่มควบคุม) ให้ได้ขนาดประมาณ $5 \times 10 \times 1$ มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องตัดโลหะและนำชิ้นงานไปพ่นทรายด้วยผงอะลูมินาขนาด 50 ไมครอน จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิกในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที และทำให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน (hot air dry)

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมี อุนหภูมิหลอมเหลว อุนหภูมิทำงาน และความหนาแน่น
ของโลหะผสม โลหะบัดกรี และโลหะเติม

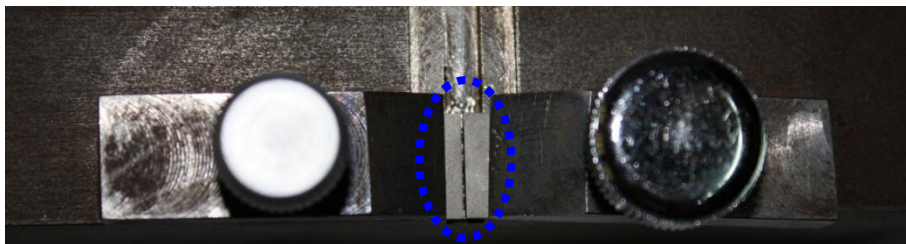
Alloys	Manufacturer	Composition (wt.%)								Melting	Working	Density (g/cm ³)
		Co	Cr	Si	Mo	Mn	Fe	C	B	Range (°C)	Temp. (°C)	
Argeloy NP special	Argen, USA	59.5	31.5	2	5	1	-	-	-	1,240-1,350	1,480	8.8
Wirobond solder	Bego, Germany	60.5	28.5	4.5	3	-	<1	<1	<1	1,100-1,150	1,180	8.5
Wireweld Co-Cr	Bego, Germany	63.5	29	1	5.5	1	-	-	-	N/A	N/A	8.3

ชิ้นงานทั้งหมดจะแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้คือ

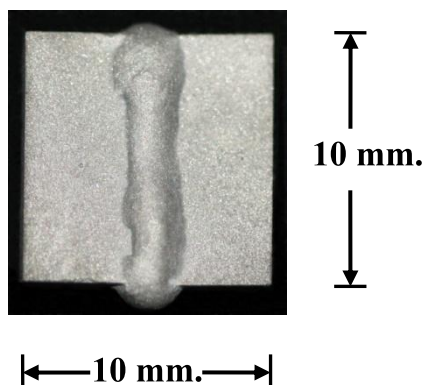
1. **กลุ่มควบคุม** (as-cast group) เป็นกลุ่มที่ไม่มีมีการเชื่อมโลหะ จำนวน 15 ชิ้น (10×10×1 มิลลิเมตร)

2. **กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ** (soldered group) จำนวน 30 ชิ้น (5×10×1 มิลลิเมตร)

นำชิ้นงานที่ถูกตัดแล้ว 2 ชิ้นมายึดกับอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน (jig) โดยให้มีช่องว่างประมาณ 0.2±0.1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 ซึ่งควบคุมให้มีระยะที่เท่ากันโดยใช้แผ่นโลหะบาง (metal shim) ขนาด 0.2 มิลลิเมตร นำเรซินที่บ่มตัวด้วยตัวเอง (Duralay, Reliance Mfg., Worth) มาใส่บริเวณช่องว่างเพื่อยึดชิ้นงานเข้าด้วยกัน รอให้บ่มตัวด้วยตัวเองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และนำชิ้นงานมาลงอินเวสเมนต์ (Deguvest L, DeguDent, Germany) หลังจากนั้น 1 ชั่วโมง นำ soldering block ไปวางในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 40 นาที เพื่อเผาไหม้เรซิน และนำชิ้นงานออกมาทำการบัดกรีด้วยโลหะบัดกรี (Wirobond solder, Bego) ที่มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 1 และใช้สารช่วยบัดกรี (Veriflux P, DeguDent, Germany) ในปริมาณที่เหมาะสมตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต และปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จึงนำชิ้นงานไปพันทรายด้วยผงอะลูมินาขนาด 50 ไมครอน โดยตัวอย่างชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟแสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นกรอแต่งส่วนเกินด้วยหัวกรอสโตนสีเขียว และนำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 400 จนถึงเบอร์ 1200 ด้วยเครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นจะถูกขัดตามลำดับขั้นตอนเหมือนกันทั้งหมดเพื่อให้ได้ความหยาบของพื้นผิว (surface roughness) ที่ใกล้เคียงกัน จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิกในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที และทำให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน



รูปที่ 1 แสดงชิ้นงานที่ถูกยึดด้วยอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน โดยมีช่องว่างประมาณ 0.2 ± 0.1 มิลลิเมตร

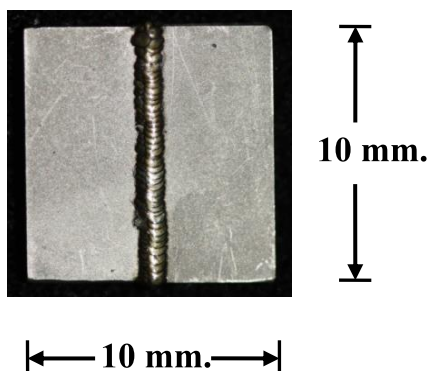


รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ

3. กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ (laser-welded group) จำนวน 30 ชิ้น ($5 \times 10 \times 1$ มิลลิเมตร)

นำชิ้นงานที่ถูกตัดแล้ว 2 ชิ้นมายึดกับอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน โดยให้มีช่องว่างประมาณ 0.2 ± 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งควบคุมให้มีระยะที่เท่ากันเช่นเดียวกับกลุ่มบัดกรีด้วยไฟ จากนั้นทำการเชื่อมโลหะโดยใช้เครื่องนิโอดิเมียมเย็กเลเซอร์ (Laser Star, Bego, Germany; wavelength 1,064 nm.) โดยทำการเชื่อมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันกับออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งกำหนดขนาดของจุดเลเซอร์ 0.7-1.0 มิลลิเมตร พลังงานของลำแสงเลเซอร์ 270-290 โวลต์ และระยะเวลาในการเชื่อมแต่ละจุด 7 มิลลิวินาที โดยการเชื่อมด้วยเลเซอร์จะทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต และปฏิบัติตามแนวทางในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [41] คือเริ่มเชื่อมเป็น 3 จุด ด้วยพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ต่ำ ซึ่งจุดแรกจะเริ่มที่ตรงกลางด้านหนึ่ง จุดที่สองและสามจะอยู่ที่บริเวณขอบทั้งสองอีกด้านหนึ่ง เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน จากนั้นจึงปรับพลังงานของลำแสงเลเซอร์ให้สูงขึ้น และค่อยๆ เชื่อมจนเต็มทีละด้าน โดยจะเชื่อมทั้งสองด้านด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบจุดที่ซ้อนทับกัน (overlapping spot welds) ให้มีการซ้อนทับกันประมาณ 80% และใช้โลหะเติมที่มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 1 ขั้นตอนสุดท้ายควรใช้ขนาดของจุดเลเซอร์ 1 มิลลิเมตร เพื่อแก้ไขจุดบกพร่องที่พื้นผิวและเพื่อให้เกิดความสวยงาม โดยตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมด้วย

เลเซอร์แสดงดังรูปที่ 3 จากนั้นนำชิ้นงานไปกรอแต่งส่วนเกิน ขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ และทำความสะอาดเช่นเดียวกับการเตรียมชิ้นงานกลุ่มบัดกรีด้วยไฟ



รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์

จากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดมาทดสอบตามขั้นตอนดังนี้

3.4.2 การทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม

1.การตรวจสอบด้วยตาเปล่า (visual examination) จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอกำลังขยาย 45 เท่า เพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องบริเวณพื้นผิวรอยเชื่อม ชิ้นงานที่มีรูพรุนหรือรอยแตกบริเวณพื้นผิวรอยเชื่อมจะถูกคัดออกทั้งหมด ส่วนชิ้นงานที่มีรูพรุนเล็กๆจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์จะถูกแก้ไขด้วยการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์เพิ่มเติม

2.การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสีเพื่อประเมินรูพรุนภายในรอยเชื่อม

2.1 ขั้นตอนการถ่ายภาพชิ้นงาน

ทำโดยถ่ายภาพชิ้นงานด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีขนาดจุดโฟกัส 8 ไมครอน โดยปรับค่าพลังงาน 75 กิโลโวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้า 30 ไมโครแอมแปร์ และใช้เวลา 30 วินาที โดยระยะจากชิ้นงานถึงหลอดรังสีเอกซ์เท่ากับ 4 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการถ่ายภาพรังสีลงบนแผ่นบันทึกภาพชนิดความละเอียดสูง (BAS-SR 2040) ดังรูปที่ 5 จากนั้นจะนำไปอ่านด้วยเครื่องสแกน (FLA-5100, FujiFilm) ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเชื่อมเข้ากับโปรแกรม Image Reader FLA-5000 Series v1.0 ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ภาพจะถูกเก็บไว้ในโปรแกรม Multigauge-image และนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์เฉพาะพื้นที่รอยเชื่อมที่กำหนดให้มีขนาดเท่ากันทุกภาพด้วยโปรแกรมอิมเมจ เจ (Image J) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 4 แสดงการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส



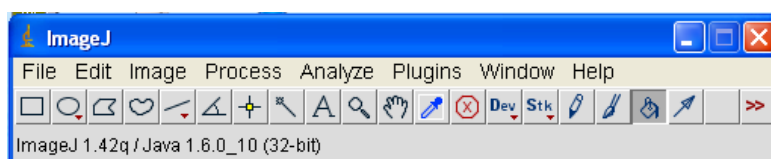
รูปที่ 5 แสดงแผ่นบันทึกภาพชนิดความละเอียดสูง



รูปที่ 6 แสดงเครื่องสแกนแผ่นบันทึกภาพ

2.2 ขั้นตอนการถ่ายโอนข้อมูลภาพถ่ายและการวิเคราะห์ผล

ถ่ายโอนข้อมูลภาพถ่ายไฟล์สกุล TIFF เข้าโปรแกรมอิมเมจ เจ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย The National Institute of Health (NIH) ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่รูพรุนในภาพรอยเชื่อม ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นที่รูพรุนในภาพรอยเชื่อมมีดังนี้



รูปที่ 7 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมอิมเมจ เจ

2.2.1 กำหนดพื้นที่ของภาพรอยเชื่อมซึ่งกำหนดให้มีขนาดเท่ากันทุกชิ้นงาน คือ 0.4×10 มิลลิเมตร โดยวิเคราะห์พื้นที่ที่ภาพรอยเชื่อมจากโปรแกรมอิมเมจ เจ ซึ่งโปรแกรมสามารถคำนวณออกมาได้ในหน่วยพิกเซล (1024×40 pixel) ดังรูปที่ 8 และ 9

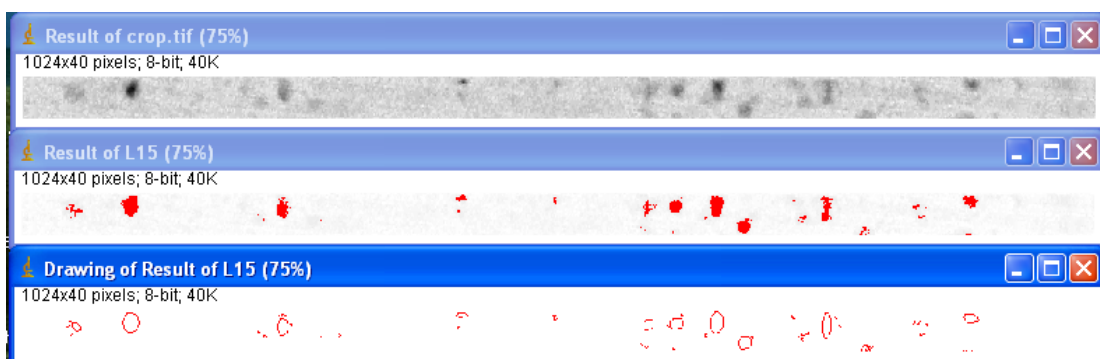


รูปที่ 8 แสดงภาพรอยเชื่อมที่กำหนดให้มีขนาดเท่ากันทุกชิ้นงาน

Results			
File Edit Font			
	Label	Area	%Area
1	L15.tif	40960	100

รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ภาพรอยเชื่อม

2.2.2 วิเคราะห์พื้นที่รูพรุนในภาพรอยเชื่อม โดยโปรแกรมแสดงผลเป็นค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุน (% porosity) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่รูพรุนต่อพื้นที่รอยเชื่อมทั้งหมด (100%) ดังรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 แสดงพื้นที่รูกุพูนในภาพรอยเชื่อมซึ่งแสดงเป็นพื้นที่สีแดง

Results			
File Edit Font			
	Label	Area	%Area
1	L15.tif	40960	100
2	Result of L15	1355	<u>3.308</u>

รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์รูกุพูนในภาพรอยเชื่อม

3.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

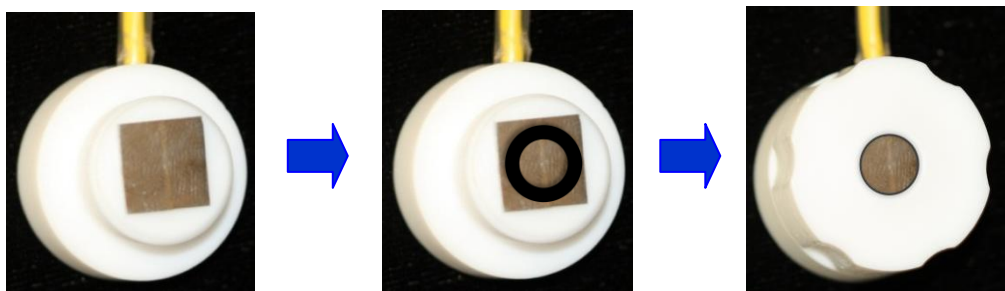
นำชิ้นงานกลุ่มละ 1 ชิ้นมาฝังลงในเรซิน และขัดพื้นผิวโดยใช้กระดาษทรายน้ำจนถึงเบอร์ 1200 ด้วยเครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ แล้วจึงใช้ผงขัดเพชรขนาด 1 ไมครอน ขัดเป็นอันดับสุดท้าย จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิกในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที โดยเตรียมกรดที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 35% จำนวน 20 มิลลิลิตร กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% จำนวน 1 มิลลิลิตร และนำกรดนี้มากัดบริเวณพื้นผิวรอยเชื่อม จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (BX 60, Olympus, Japan)

3.4.4 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อม

นำชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม จำนวน 45 ชิ้น มาทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสโคปิกโพลาไรเซชัน (potentiodynamic polarization test) ซึ่งคัดแปลงจากมาตรฐาน ISO 10271 นำชิ้นงานมาขัดพื้นผิวด้านหนึ่งโดยใช้กระดาษทรายน้ำจนถึงเบอร์ 1200 และใช้ผงขัดเพชรขนาด 1 ไมครอน ขัดเป็นอันดับสุดท้ายด้วยเครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นจะขัดตามลำดับขั้นตอนเหมือนกันทั้งหมด เพื่อให้ได้ความหยาบของพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอกำลังขยาย 45 เท่า

ถ้าพบว่าชิ้นงานมีรอยแตกหรือจุดบกพร่องจะถูกคัดออก และนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิกในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที ทำให้แห้ง และเก็บในกล่องสุญญากาศที่มีสารดูดความชื้น (silica gel) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องโพเทนชิออสแตท (μ Autolab, type III) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยมีโปรแกรม NOVA 1.7 สำหรับทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล เตรียมอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) โดยนำชิ้นงานใส่เข้ากับ Teflon holder พร้อมกับ O-ring ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 12 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ และเป็นตัวกำหนดพื้นที่ในการทดสอบซึ่งเท่ากับ 0.5 ตารางเซนติเมตร โดยบริเวณที่ทดสอบจะรวมทั้งบริเวณรอยเชื่อมที่มีขนาดประมาณ 0.8×8 มิลลิเมตร และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ซึ่งเตรียมคาโพลีเอทิลีนอิเล็กโทรดชนิดอิ่มตัวเป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) และอิเล็กโทรดแพลตินัมเป็นเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (counter electrode) โดยอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก ที่ปรับค่าความเป็นกรด (pH) เท่ากับ 2.3 ด้วยกรดแลคติก ซึ่งจะทำการฟ้น (deaerated) ก๊าซในโตรเจนในสารละลายด้วยอัตรา 50 ลบ.ซม./นาที เป็นเวลา 30 นาที ก่อนการทดสอบ และฟ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 37 ± 1 องศาเซลเซียส การทดสอบจะเริ่มจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential, E_{OCP}) เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งใช้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น จากนั้นชิ้นงานจะถูกป้อนศักย์ไฟฟ้าจาก $-500 \text{ mV} / E_{\text{OCP}}$ ถึง $+2000 \text{ mV} / E_{\text{OCP}}$ ซึ่งกำหนดให้อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที แล้วทำการวัดค่าจากกราฟโพลาริเซชัน เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) เป็นต้น และคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จากโปรแกรม NOVA 1.7 โดยระบุค่าความหนาแน่นชิ้นงาน ค่ามวลสมมูลเฉลี่ย และค่าพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ถูกทดสอบ



รูปที่ 12 แสดงอิเล็กโทรดตัวอย่างโดยนำชิ้นงานใส่เข้ากับ Teflon holder พร้อมกับ O-ring ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

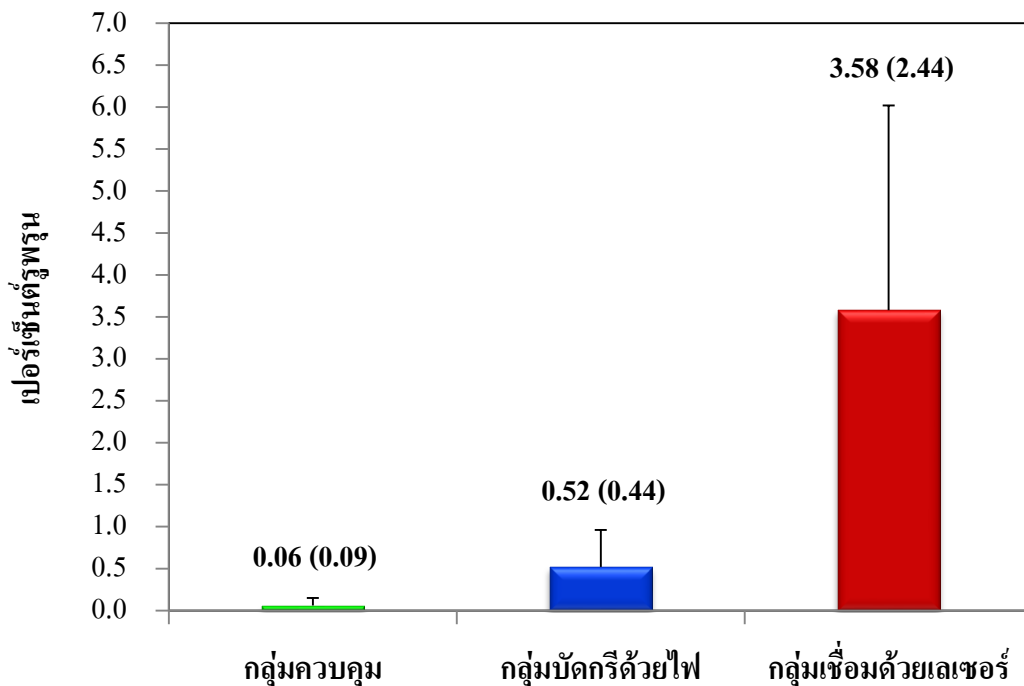
การวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical package for the social sciences plus) ในการประมวลผลข้อมูลที่ใช้สถิติวิเคราะห์ โดยนำค่าเปอร์เซ็นต์รู้พจน และค่าศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อนของชิ้นงานทั้งหมด 3 กลุ่ม มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust test) ชนิดบราวน์-ฟอร์ไรท์ (Brown-Forsythe) และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้จากแต่ละกลุ่มด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) แบบแทมเฮน (Tamhane) ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน และค่าอัตราการกักกร่อนของชิ้นงานทั้งหมด 3 กลุ่ม จะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้จากแต่ละกลุ่มด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบเชฟเฟ (Sheffe) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม

ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์รูพรุนของกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ และกลุ่มควบคุมตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์รูพรุนของทั้ง 3 กลุ่มนี้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) ดังแสดงในรูปที่ 13

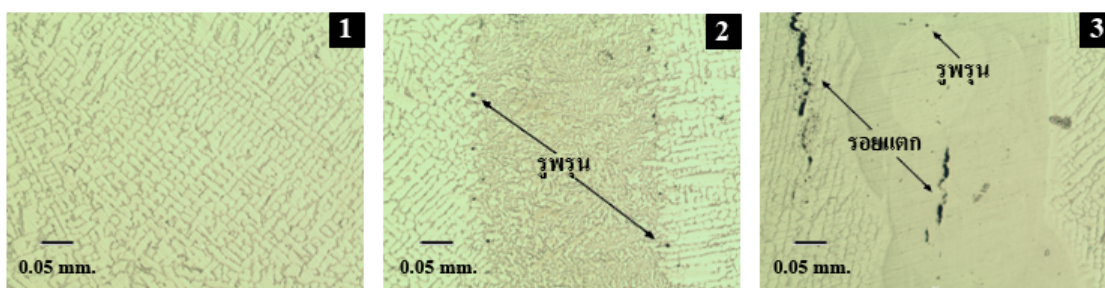


รูปที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของเปอร์เซ็นต์รูพรุนของกลุ่มควบคุม กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ และกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานควบคุมซึ่งเป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ และชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ แสดงในรูปที่ 14 โดยชิ้นงานควบคุมแสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบเคนไดรต์เหมือนโลหะหล่อผสมทั่วไปที่มีหลายเฟส (รูปที่ 14-1) ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟพบลักษณะ heterogeneous phase และพบรูพรุนเล็กน้อยที่บริเวณรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมบัดกรีกับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (รูปที่ 14-2) ในขณะที่ชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์

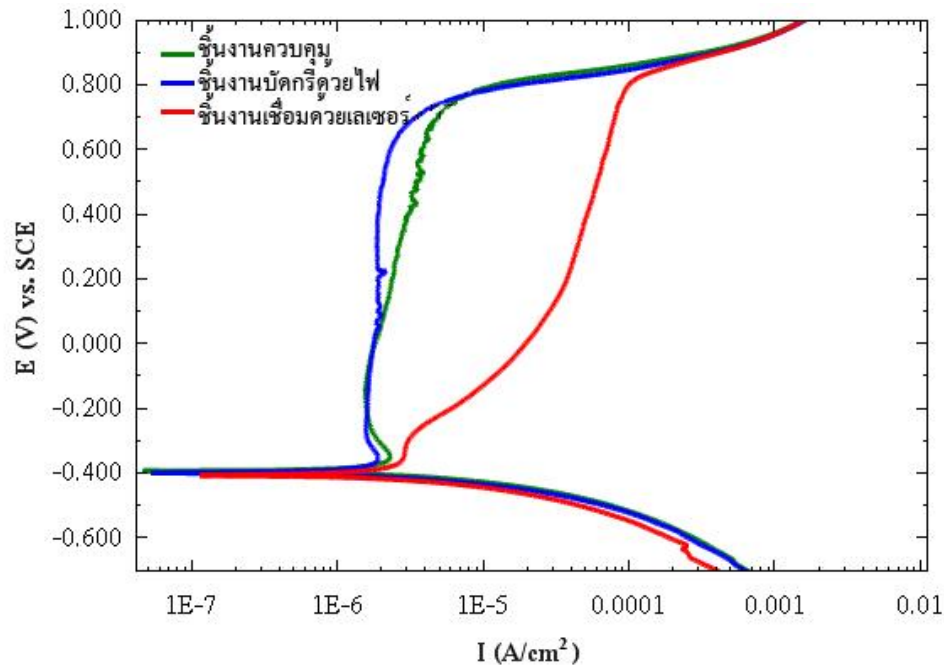
พบลักษณะ fine precipitate ในบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งพบรูพรุนและรอยแตกทั้งในบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน(รูปที่ 14-3) โดยไม่สามารถกำหนดขอบเขตของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนได้ชัดเจน



รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานควบคุมที่เป็น โลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม (1) ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ (2) และชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ (3)

4.3 ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อม

กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานควบคุม ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ และชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ แสดงดังรูปที่ 15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีช่วงพาสซีฟเกิดขึ้นชัดเจน โดยชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟ (passive current density) สูงกว่าชิ้นงานควบคุม และชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มพาสซีฟของชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นมีความต้านทานน้อยกว่าฟิล์มพาสซีฟของชิ้นงานควบคุมและชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ ในส่วนของค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ซึ่งแสดงถึงศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ฟิล์มถูกทำลาย นั้นพบว่า ชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ ชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ และชิ้นงานควบคุมมีค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของกลุ่มบัดกรีด้วยไฟใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม โดยทั้ง 2 กลุ่มนี้มีค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่ากลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ แต่จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าทั้ง 3 กลุ่มนี้มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$)



รูปที่ 15 แสดงกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานควบคุม ชิ้นงานบำบัดด้วยไฟ และชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9% โดยน้ำหนัก (pH 2.3)

ค่าเฉลี่ยของอัตราการกัดกร่อนของกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของอัตราการกัดกร่อนของกลุ่มบำบัดด้วยไฟ และกลุ่มควบคุมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$) โดยตารางที่ 2 สรุปค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าอัตราการกัดกร่อน

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate)

	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/y)
กลุ่มควบคุม	-398.19 (5.98)	20.70 (3.49)	0.14 (0.02)
กลุ่มบำบัดด้วยไฟ	-399.00 (14.00)	21.45 (3.22)	0.14 (0.02)
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	-402.59 (13.09)	24.95 (3.31)	0.19 (0.02)

* แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$)

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้คุณภาพของรอยเชื่อมถูกประเมินโดยการทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานด้วยวิธีการถ่ายภาพรังสี ซึ่งใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส ของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สามารถตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก โดยสามารถเห็นรายละเอียดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอนได้ และเทคนิคนี้ยังสามารถถ่ายภาพขยายได้ โดยที่ภาพถ่ายยังมีความคมชัดดี ภาพที่ได้นี้จะนำไปประเมินรูพรุนในรอยเชื่อมโดยใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ เพื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์รูพรุนต่อพื้นที่รอยเชื่อมทั้งหมด (100%) ซึ่งโปรแกรมนี้มีการบรรยายไว้ในการศึกษาที่ผ่านมา [52]

โดยทั่วไปการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมโลหะในทางทันตกรรมสามารถทำได้ทั้งวิธีการตรวจสอบแบบทำลายชิ้นงานและไม่ทำลายชิ้นงาน วิธีการตรวจสอบแบบทำลายชิ้นงานคือ การทดสอบทางกล เช่น การทดสอบความแข็งแรงดึง และการทดสอบความแข็งแรงดัด (flexural strength) เป็นต้น ส่วนวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน เช่น การถ่ายภาพรังสี การวิเคราะห์ทางมหภาค และการวิเคราะห์ทางจุลภาค เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์ทางมหภาคไม่สามารถตรวจสอบรูพรุนหรือจุดบกพร่องที่อยู่ภายในรอยเชื่อมได้ โดยสามารถตรวจสอบจุดบกพร่องนี้ได้ด้วยวิธีการถ่ายภาพรังสี และการวิเคราะห์ทางจุลภาค [31, 42, 55] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการถ่ายภาพรังสีที่สามารถประเมินจุดบกพร่องทั้งหมดในรอยเชื่อม โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์รูพรุน อย่างไรก็ตามวิธีการถ่ายภาพรังสีมีข้อจำกัดคือ เป็นเพียงภาพ 2 มิติ จึงทำให้ไม่สามารถแยกแยะระหว่างรูพรุนกับรอยแตกได้ และไม่สามารถแสดงรูพรุนที่ซ้อนทับกันได้ ซึ่งในความเป็นจริงภายในรอยเชื่อมอาจมีจุดบกพร่องมากกว่าที่พบในการศึกษาครั้งนี้

จากผลการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมพบว่า กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีเปอร์เซ็นต์รูพรุนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับหลายการศึกษาที่ผ่านมาที่พบทั้งรอยแตกและรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม [5, 9, 10, 31, 42, 47, 48] ปัญหานี้อาจเกิดจากระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมไม่เพียงพอ หรือเกิดจากชนิดของโลหะผสม โดยพบว่าระยะการซึมลึกของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับสมบัติของโลหะผสมคือ อัตราการดูดกลืนแสงเลเซอร์ การนำความร้อน และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature) [9] ซึ่งค่าเหล่านี้จะแตกต่างกันในโลหะผสมแต่ละชนิด ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้รอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมไทเทเนียมมีคุณภาพดีกว่าโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม เนื่องจากโลหะผสมไทเทเนียมมีอัตราการดูดกลืนแสงเลเซอร์สูงและมีการนำความร้อนต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของชิ้นงานโลหะ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และขั้นตอน

การเชื่อมด้วยเลเซอร์ก็มีผลต่อระยะเวลาซึมลึกของรอยเชื่อมด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ [8, 29, 43, 44, 48] โดยถ้ากำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ในแต่ละครั้งที่ยิ่งมากขึ้นไป และขนาดของจุดเลเซอร์ที่ยิ่งใหญ่ขึ้นไป จะส่งผลให้เกิดรูพรุนและรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์ได้ [42, 44] ซึ่งการศึกษาครั้งนี้กำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 270-290 โวลต์ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตในการเชื่อม โลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม และปฏิบัติตามแนวทางในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ของการศึกษาที่ผ่านมา [41] โดย Baba และคณะ [48] พบว่าเมื่อกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 270 แอมแปร์ ในการเชื่อม โลหะผสม โคบอลต์-โครเมียมที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร และเชื่อมทั้ง 2 ด้าน จะทำให้อรอยเชื่อมมีความแข็งแรงถึงสูงที่สุด โดยพบรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์เมื่อกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่ 300 แอมแปร์ ซึ่งพบรอยแตกขนาดใหญ่กว่าที่ 270 แอมแปร์ ดังนั้นรอยแตกที่พบในรอยเชื่อมเลเซอร์ของการศึกษาครั้งนี้ จึงอาจเกิดจากการกำหนดค่าพลังงานของลำแสงเลเซอร์ที่สูงเกินไป นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในห้องปฏิบัติการทางทันตกรรมเป็นระบบพัลส์ (pulse system) และเป็นการเชื่อมแบบจุดที่ซ้อนทับซ้ำๆกัน โดยทุกๆจุดที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งเสริมให้เกิดความเค้นและรอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์ได้ [8] ดังนั้นจึงควรใช้จำนวนจุดที่น้อยที่สุดร่วมกับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้ประสบความสำเร็จในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้ นอกจากนี้รอยแตกในรอยเชื่อมเลเซอร์ยังอาจเกิดจากความเค้นสะสมภายในโลหะผสมที่เกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วหลังจากถูกหลอมเหลว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงโลหะฟันปลอมที่มีรอยเชื่อมได้ [48]

การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับคุณภาพของรอยเชื่อมใน โลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม พบว่ารอยเชื่อมบัดกรีมีคุณภาพดีกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์ [31] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ และยังมีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่พบว่า รอยเชื่อมบัดกรีมีความแข็งแรงถึงสูงกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม [5] อาจเนื่องมาจากเทคนิคของการบัดกรีด้วยไฟที่มีการหลอมเหลวโลหะบัดกรี และสามารถควบคุมให้ไหลเข้าไปในช่องว่างจนเต็มก่อนที่โลหะบัดกรีจะแข็งตัวเต็มที่ ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนน้อยกว่า

อย่างไรก็ตามมีการศึกษาที่กลับพบว่า รอยเชื่อมเลเซอร์มีความแข็งแรงถึงสูงกว่ารอยเชื่อมบัดกรีในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม [6, 10] ซึ่งการศึกษาเหล่านี้ไม่ใช้โลหะเดิมในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และยังพบรูพรุนในรอยเชื่อมบัดกรีมากกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์อีกด้วย โดยมีการศึกษาหนึ่งที่เปรียบเทียบระหว่างวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์กับวิธีบัดกรีด้วยไฟฟ้าโดยใช้โลหะบัดกรีทอง [10] ซึ่งวิธีนี้ต่างจากวิธีบัดกรีด้วยไฟคือ โลหะบัดกรีจะถูกหลอมเหลวจากความร้อนของปลายอิเล็กโทรดโลหะหรือหัวแร้งบัดกรีไฟฟ้า (electrosoldering ion tip) ด้วยปัจจัยเหล่านี้จึงส่งผลให้

การเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยเชื่อมบัดกรีกับรอยเชื่อมเลเซอร์เกิดความแตกต่างกันในแต่ละการศึกษา นอกจากนี้ Angelini และคณะ [68] พบว่าการบัดกรีด้วยไฟในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมเมื่อใช้โลหะบัดกรีทอง จะทำให้รอยเชื่อมบัดกรีมีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก และยังพบว่าการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์ในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมควรจะมีค่าความแข็งแรงที่ดีกว่า เนื่องจากวิธีนี้สามารถเชื่อมโลหะโดยไม่ใช้โลหะเติม ทำให้รอยเชื่อมโลหะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน จึงไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน [48] ในขณะที่การศึกษาคั้งนี้ใช้โลหะเติมในการเชื่อมด้วยเลเซอร์เพื่อเติมเต็มช่องว่างที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในทางปฏิบัติของการเชื่อมโครงโลหะฟืนปลอม โดยอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ เนื่องจากวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ใช้โลหะเติมนี้เป็นวิธีที่ technique sensitive ทำให้การเชื่อมทำได้ยาก โดยการเชื่อมเป็นจุดของโลหะเติมที่ซ้อนทับกันอาจไม่สามารถเติมเต็มช่องว่างได้ทั้งหมด ยิ่งไปกว่านั้นความชำนาญของผู้เชื่อมโลหะยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งบางครั้งไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากผู้เชื่อมโลหะอาจจะปรับใช้ขั้นตอนการเชื่อมโลหะจากประสบการณ์ส่วนตัวมากกว่าตามแนวทางที่กำหนดไว้ [41, 43] ดังนั้นในการศึกษาคั้งนี้จึงกำหนดให้มีผู้เชื่อมโลหะเพียงคนเดียวเพื่อลดความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละชิ้นงาน โดยการศึกษาคั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม แต่เน้นศึกษาในด้านคุณภาพและอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อม ซึ่งจากผลการศึกษาคั้งนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่ารอยเชื่อมบัดกรีควรจะมีสมบัติทางกลที่ดีกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์ เนื่องจากรอยเชื่อมบัดกรีมีรูพรุนน้อยกว่าหรือมีคุณภาพที่ดีกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์

ในส่วนของการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ารอยเชื่อมเลเซอร์มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่ารอยเชื่อมบัดกรี [5] ในขณะที่การศึกษาคั้งนี้พบว่ารอยเชื่อมเลเซอร์มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่ารอยเชื่อมบัดกรีอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจเกิดจากเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่พบในรอยเชื่อมเลเซอร์มากกว่ารอยเชื่อมบัดกรี และพื้นที่ของชิ้นงานที่ถูกทดสอบการกัดกร่อนซึ่งจะรวมทั้งพื้นที่รอยเชื่อมและพื้นที่ของโลหะที่นำมาเชื่อม ทำให้รวมบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนอยู่ด้วย ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รอยเชื่อมเลเซอร์มีอัตราการกัดกร่อนที่สูงกว่า โดยพื้นที่ในการทดสอบการกัดกร่อนที่เป็นลักษณะนี้ก็เพื่อให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงเมื่อมีชิ้นงานโลหะที่มีรอยเชื่อมอยู่ในช่องปาก จากกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันพบว่า ในกลุ่มควบคุมมีบางกราฟที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟของกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งอาจเกิดจากการมีจุดบกพร่องภายในชิ้นงานโลหะที่ไม่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้ สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ซึ่งคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดของโลหะที่เกิดการกัดกร่อน โดยการศึกษาคั้งนี้พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของทั้ง 3 กลุ่ม มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ โดยชิ้นงานกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์มีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าชิ้นงานกลุ่มบัดกรีด้วยไฟ และกลุ่มควบคุม ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานควบคุมพบว่า มีลักษณะเดนไดรต์ที่มีหลายเฟส โดยพบว่าในส่วนเดนไดรต์มักจะเป็นเฟส ϵ (hcp) ที่มีโครเมียมและโมลิบดีนัมอยู่เป็นจำนวนมาก [13] ทำให้เกิดช่วงพาสซีฟอย่างเห็นได้ชัด ส่วน โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์พบว่าอาจมีการ precipitate ของเฟส σ อยู่ในส่วนรอยต่อเดนไดรต์ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อน และมีการปล่อยไอออนของโครเมียมและโมลิบดีนัมออกมา ซึ่งส่งผลให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลง [51, 57] สอดคล้องกับรูปที่ 15 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงพาสซีฟของชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าสูงกว่าชิ้นงานควบคุม นอกจากนี้รอยแตกและรูพรุนที่พบในบริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะตำแหน่งได้ [5] และยิ่งถ้ามีการใช้งานอยู่ในช่องปากเป็นระยะเวลา นานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอาจรุนแรงมากกว่าในการศึกษาครั้งนี้

โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีมาก เนื่องจากมีฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ และโมลิบดีนัมออกไซด์ปกคลุมอยู่บนพื้นผิว ซึ่งฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองในช่องปาก [13, 24] อย่างไรก็ตาม เมื่อมีรอยเชื่อมเกิดขึ้นในโลหะผสมนี้ ซึ่งโลหะบัดกรีหรือโลหะเติมมักเป็นโลหะที่มีส่วนประกอบต่างกับโลหะชิ้นงาน ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกที่ส่งผลให้มีการปล่อยไอออนของโลหะออกมาในช่องปาก [14, 27]

ถึงแม้ว่าจะใช้เทคนิคและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยเลเซอร์แล้วก็ตาม ก็ยังสามารถพบรูพรุนในรอยเชื่อมเลเซอร์ได้ โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้อาจไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม [47] แต่อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมในช่องปาก ซึ่งส่งผลต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื้อเยื่อในช่องปากได้ ดังนั้นในการเชื่อมโครงโลหะฟันปลอมจึงควรพิจารณาเลือกวิธีการเชื่อมโลหะให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะ และความหนาของชิ้นงาน เพื่อให้ได้รอยเชื่อมโลหะที่มีทั้งสมบัติทางกลและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โดยถ้าเลือกใช้วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาเป็นอันดับแรก

5.2 สรุปผลการวิจัย

การเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลด้วยวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ มีโอกาสเกิดรูพรุนและรอยแตกได้มากกว่าวิธีบัดกรีด้วยไฟ ซึ่งนำไปสู่การมีอัตราการกัดกร่อนที่สูงกว่า ถึงแม้ว่ากลุ่มบัดกรีด้วยไฟจะมีเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่มากกว่ากลุ่มควบคุม แต่อัตราการกัดกร่อนของทั้ง 2 กลุ่มนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ วิธีการบัดกรีด้วยไฟควรนำมาใช้ในการเชื่อมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ปราศจากนิกเกิลเนื่องจากพบว่า รอยเชื่อมบัดกรีมีคุณภาพและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่ารอยเชื่อมเลเซอร์

รายการอ้างอิง

- [1] Watanabe, I., and Topham, S. Laser welding of cast titanium and dental alloys using argon shielding. J Prosthodont 15 (2006) : 102-107.
- [2] De March, P., Berthod, P., Haux, E., and Greset, V. Corrosion of some selected ceramic alloys used in fixed partial dentures and their postsolder joints in a synthetic neutral saliva. Eur J Oral sci 117 (2009) : 76-85.
- [3] Stade, E., Reisbick, M.H., and Preston, J.D. Preceramic and postceramic solder joints. J Prosthet Dent 34 (1975) : 527-532.
- [4] Anusavice, K., and Cascone, P. Dental casting and soldering alloys. In Anusavice K. (ed.), Phillips' science of dental materials, pp.563-617. St.Louis : Saunders, 2003.
- [5] Zupancic, R., Legat, A., and Funduk, N. Tensile strength and corrosion resistance of brazed and laser-welded cobalt-chromium alloy joints. J Prosthet Dent 96 (2006) : 273-282.
- [6] Serichetaphongse, P. Comparison of ultimate tensile strength between torch soldering joints and laser welding joints in Au-Pd, Ni-Cr, and Co-Cr alloys. CU Dent J 27 (2003) : 171-181.
- [7] Gordon, T., and Smith, D.L. Laser welding of ceramic fixed prostheses. Dental Digest (1970) : 306-309.
- [8] Bertrand, C., Le Petitcorps, Y., Albingre, L., and Dupuis, V. The laser welding technique applied to the non precious dental alloys procedure and results. Br Dent J 190 (2001) : 255-257.
- [9] Srimaneepong, V., Yoneyama, T., Kobayashi, E., Doi, H., and Hanawa, T. Comparative study on torsional strength, ductility and fracture characteristics of laser-welded $\alpha+\beta$ Ti-6Al-7Nb alloy, CP titanium and Co-Cr alloy dental castings. Dent Mater 24 (2008) : 839-845.
- [10] NaBadalung, D., and Nicholls, J.I. Laser welding of a cobalt-chromium removable partial denture alloy. J Prosthet Dent 79 (1998) : 285-290.
- [11] Lima Verde, M., and Stein, R.S. Evaluation of soldered connectors of two base metal ceramic alloys. J Prosthet Dent 71 (1994) : 339-344.
- [12] Bellagamba, R. The effects of prewetting on postsoldering of base metal alloys. J Prosthet Dent 54 (1985) : 355-358.

- [13] Saji, V., and Choe, H.C. Electrochemical behavior of Co-Cr and Ni-Cr dental cast alloys. Trans Nonferrous Met Soc China 19 (2009) : 785-790.
- [14] Angelini, E., Bonino, P., and Pezzoli, M. Corrosion resistance of solder joints for removable partial dentures. Dent Mater 4 (1988) : 255-260.
- [15] Geis-Gerstorfer, J. In vitro corrosion measurements of dental alloys. J Dent 22 (1994) : 247-251.
- [16] Shigeto, N., Yanagihara, T., and Hamada, T. Corrosion properties of soldered joints. PartII: Corrosion pattern of dental solder and dental nickel-chromium alloy. J Prosthet Dent 66 (1991) : 607-610.
- [17] Anusavice, K., and Cascone, P. Physical properties of dental materials. In Anusavice K. (ed.), Phillips' science of dental materials, pp.56-69. St.Louis : Saunders, 2003.
- [18] Shehab, A., Pappas, M., and Burns, D.R. Comparative tensile strengths of preceramic and postceramic solder connectors using high-palladium alloy. J Prosthet Dent 93 (2005) : 148-152.
- [19] Viennot, S., Dalard, F., Malquarti, G., and Grosogeat B. Combination fixed and removable prostheses using a CoCr alloy: A clinical report. J Prosthet Dent 96 (2006) : 100-103.
- [20] Wataha, J. Alloys for prosthodontic restorations. J Prosthet Dent 87 (2002) : 351-363.
- [21] Schmalz, G., and Garhammer, P. Biological interactions of dental cast alloys with oral tissues. Dent Mater 18 (2002) : 396-406.
- [22] Bumagardner, J., and Lucus, L. Cellular response to metallic ions released from Nickel-Chromium dental alloys. J Dent Res 74 (1995) : 1521-1527.
- [23] Malten, K.E., and Spruit, D. The relative importance of various environmental exposures to nickel in causing contact hypersensitivity. Acta Derm Venereol 49 (1969) : 14-19.
- [24] Geis-Gerstorfer, J., Sauer, K.H., and Passler, K. Ion release from Ni-Cr-Mo and Co-Cr-Mo casting alloys. Int J Prosthodont 4 (1991) : 152-158.
- [25] Viennot, S., Dalard, F., Lissac, M., and Grosogeat, B. Corrosion resistance of cobalt-chromium and palladium-silver alloys used in fixed prosthetic restorations. Eur J Oral Sci 113 (2005) : 90-95.
- [26] Taher, N.M., and Al Jabab, A.S. Galvanic corrosion behavior of implant suprastructure dental alloys. Dent Mater 19 (2003) : 54-59.

- [27] Luthy, H., Marinello, C.P., Reclaru, L., and Scharer, P. Corrosion considerations in the brazing repair of cobalt-based partial dentures. J Prosthet Dent 75 (1996) : 515-524.
- [28] Brune, D. Mechanisms and kinetics of metal release from dental alloys. Int Endodont J 21 (1988) : 135-142.
- [29] Tambasco, J., Anthony, T., and Sandven, O. Laser welding in the dental laboratory: An alternative to soldering. J Dent Technol (1996) : 23-31.
- [30] Wiskott, H., Macheret, F., and Bussy, F. Mechanical and elemental characterization of solder joints and welds using a gold-palladium alloy. J Prosthet Dent 77 (1997) : 607-616.
- [31] Carek, A., Zivko-Babic, J., Schauerperl, Z., and Jakovac, M. Macroscopic analysis of Co-Cr base alloys joints. Acta Stomatol Croat 41 (2007) : 216-224.
- [32] Butson, T.J., Nicholl, J., Ma, T., and Harper, R.J. Fatigue life of preceramic soldered and postceramic soldered joints. Int J Prosthodont 6 (1993) : 468-474.
- [33] Craig, R.G., and Powers, J.M. Cast and wrought base metal alloys. In Restorative dental materials, pp.385-438. St.Louis : Mosby, 2002.
- [34] Mosch, J., Hoffmann, A., and Hopp, M. Lightening in a bottle-State of the art joining techniques in dental technology-part1 in a series. Dental Dialogue 4 (2004) : 110-119.
- [35] Ryge, G. Dental soldering procedures. Dent Clin North Am 2 (1958) : 747-757.
- [36] Lautenschlager, E., Marker, B.C., Moore, B.K., and Wilder, R. Strength mechanisms of dental solder joints. J Dent Res 53 (1974) : 1361-1367.
- [37] Squire, B. The Relative strength of high and low fusing solders, School of Dentistry. Indiana University, 1971.
- [38] Rasmussen, E.J., Goodkind, R.J., and Gerberich, W.W. An investigation of tensile strength of dental solder joints. J Prosthet Dent 41 (1979) : 418-423.
- [39] Staffanou, R.S., Radke, R.A., and Jendresen, M.D. Strength properties of joints from various ceramic-metal combinations. J Prosthet Dent 43 (1980) : 31-39.
- [40] Monday, J.J.L., and Asgar, K. Tensile strength comparison of preceramic soldered and post soldered joints. J Prosthet Dent 55 (1986) : 23-27.
- [41] Bertrand, C., and Poulon-Quintin, A. Proposals for optimization of laser welding in prosthetic dentistry. J Prosthodont 19 (2010) : 69-76.

- [42] Cristina, B., Brandusa, G., Romeo, B., and Otilia, G. Microscopic analyses of welding defects in RPD technology. TMJ 60 (2010) : 23-28.
- [43] Bertrand, C., Le Petitcorps, Y., Albingre, L., and Dupuis, V. Optimization of operator and physical parameters for laser welding of dental materials. Br Dent J 196 (2004) : 413-418.
- [44] Baba, N., and Watanabe, I. Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser. J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater 72B (2005) : 64-68.
- [45] Srimaneepong, V., Yoneyama, T., Kobayashi, E., Doi, H., and Hanawa, T. Mechanical strength and microstructure of laser-welded Ti-6Al-7Nb alloy casting. Dent Mater J 24 (2005) : 541-549.
- [46] Tartari, A., Clark, R.K., Juszczak, A.S., and Radford, D.R. Tensile strength of laser welded cobalt-chromium alloy with and without an argon atmosphere. Eur J Prosthodont Restor Dent 18 (2010) : 60-65.
- [47] Nomoto, R., Takayama, Y., Tsuchida, F., and Nakajima, H. Non-destructive three-dimensional evaluation of pores at different welded joints and their effects on joint strength. Dent Mater 26 (2010) : 246-252.
- [48] Baba, N., Watanabe, I., Liu, J., and Atsuta, M. Mechanical strength of laser-welded cobalt-chromium alloy. J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater 69 (2004) : 121-124.
- [49] Cattaneo, G., Wagnild, G., Marshall, G., and Watanabe, L. Comparison of tensile strength of soldered joints by infrared and conventional torch technique. J Prosthet Dent 68 (1992) : 33-37.
- [50] Cheng, A.C., Chai, J.Y., Gilbert, J., and Jameson, L.M. Investigation of stiffness and microstructure of joints soldered with gas-oxygen torch and infrared methods. J Prosthet Dent 72 (1994) : 8-15.
- [51] Carek, A., Zivko-Babic, J., Schauerl, Z., and Badel, T. Mechanical properties of Co-Cr alloys for metal base framework. IJOPRD 1 (2011) : 13-19.
- [52] ชรรมวัตร ชันตะพลา, นเรศร์ จันทน์ขาว และ เดโช ทองอร่าม. การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [53] Nunez, J.M.C., Takahashi, J.M.F.K., Henriques, G.E.P., Nobilo, M.A.D.A., Consani, R.L.X., and Mesquita, M.F. Radiographic inspection of porosity in pure titanium dumbbell castings. Gerodontology (2010).
- [54] Elarbi, E.A., Ismail, Y.H., Azarbal, M., and Saini, T.S. Radiographic detection of porosities in removable partial denture casting. J Prosthet dent 54 (1985) : 674-677.
- [55] Dharmar, S., Rathmasamy, R.J., and Swaminathan, T.N. Radiographic and metallographic evaluation of porosity defects and grain structure of cast chromium cobalt removable partial denture. J Prosthet Dent 69 (1993) : 369-373.
- [56] Eisenburger, M., and Addy, M. Radiological examination of dental casting - a review of the method and comparisons of the equipment. J Oral Rehabil 29 (2002) : 609-614.
- [57] Kurosu, S., Nomura, N., and Chiba, A. Effect of sigma phase in Co-29Cr-6Mo alloy on corrosion behavior in saline solution. Materials Transactions 47 (2006) : 1961-1964.
- [58] Angelini, E., De Benedetti, B., and Rosalbino, F. Microstructural evolution and localized corrosion resistance of an aged superduplex stainless steel. Corros Sci 46 (2004) : 1351-1367.
- [59] Kollmannsperger, P. Structural investigations of the diffusion-zone of soldered dental gold and base metal alloys. Dent Mater 2 (1986) : 101-105.
- [60] Janus, C.E., Beck, D.A., and Moon, P.C. Quantitative study of soldered connector tensile strength using low-gold content alloys. J Prosthet Dent 54 (1985) : 517-521.
- [61] Wataha, J. Biocompatibility of dental casting alloys: A review. J Prosthet Dent 83 (2000) : 223-234.
- [62] Kedici, S.P., Abbas Aksut, A., Alikilicarslan, M., Bayramoglu, G., and Gokdemir, K. Corrosion behaviour of dental metals and alloys in different media. J Oral Rehabil 25 (1998) : 800-808.
- [63] Merritt, K., and Brown, S.A. Release of hexavalent chromium from corrosion of stainless steel and cobalt-chromium alloys. J Biomed Mater Res 29 (1995) : 627-633.
- [64] Shigeto, N., Yanagihara, T., Hamada, T., and Budtz-Jorgensen, E. Corrosion properties of soldered joints. Part I: Electrochemical action of dental solder and dental nickel-chromium alloy. J Prosthet Dent 62 (1989) : 512-515.

- [65] Muller, W., Manthey, H., Lange, K.P., Gundlach, H.W., and Plank, Th. Electrochemical characterization of laser welding tracks. J Anal Chem 361 (1998) : 662-666.
- [66] Bessing, C., Bergman, M., and Sjogren, G. Corrosion and strength of dental low-gold brazing materials. Swed Dent J 15 (1991) : 7-14.
- [67] Kawada, E., Sakurai, Y., and Oda, Y. Corrosion resistance of the soldering joint of post-soldering of palladium-based metal-ceramic alloys. Bull Tokyo Dent Coll 38 (1997) : 105-111.
- [68] Angelini, E., Pezzoli, M., Rosalbino, F., and Zucchi, F. Influence of corrosion on brazed joint's strength. J Dent 19 (1991) : 56-61.
- [69] Negrutiu, N.L., Sinescu, C., Cozarov, D., Culea, L., Rominu, M., and M.Pop, D. Repairing method of fixed partial prostheses in dentistry: laser welding. Laser in dentistry XIV 6843 (2008) : 684309.

ภาคผนวก

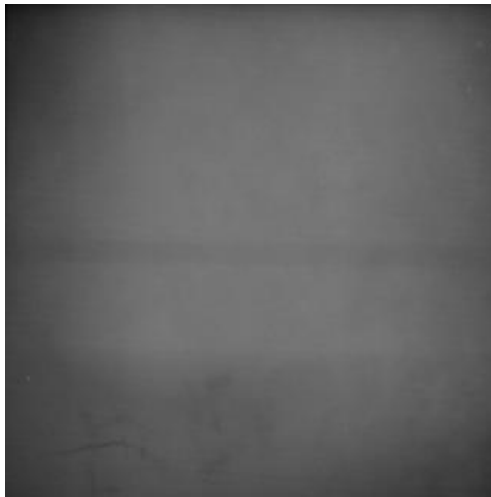
ภาคผนวก ก แสดงผลการทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม

ตาราง ก.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุน (% porosity) ของกลุ่มควบคุม กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ และกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์

ชิ้นงานที่	เปอร์เซ็นต์รูพรุน (% porosity)		
	กลุ่มควบคุม	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์
1	0.049	0.198	2.283
2	0.000	0.527	2.888
3	0.046	0.112	6.130
4	0.022	0.320	1.133
5	0.029	0.046	5.779
6	0.010	0.322	8.044
7	0.000	0.186	1.401
8	0.000	1.221	7.188
9	0.000	0.581	3.220
10	0.049	1.013	2.144
11	0.129	0.652	2.141
12	0.105	0.195	0.979
13	0.142	1.538	6.289
14	0.330	0.269	0.842
15	0.000	0.669	3.308
ค่าเฉลี่ย	0.061	0.523	3.585



ซิงงานคววม



ซิงงานบัตกรีด้วยไฟ



ซิงงานเชื่อมด้วยเลเซอร์

รูป ก.1 แสดงตัวอย่างภาพเอกซเรย์ของซิงงานคววม ซิงงานบัตกรีด้วยไฟ และซิงงานเชื่อมด้วยเลเซอร์

ภาคผนวก ข แสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนจากการ Fit curve ของเส้นโพลาริเซชัน ด้วยโปรแกรม NOVA 1.7

ตาราง ข. 1 แสดงผลจากการ Fit curve ของเส้นโพลาริเซชันของกลุ่มควบคุม

ชื่อ	สี	OCP	ba (V/dec)	bc (V/dec)	E_{corr} Calc(mV)	E_{corr} Obs(mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	i_{corr} (μA)	Corrosion rate	Polarization resistance	E Begin (mV)	E End (mV)	X^2	Iterations
As-cast1	แดง	-0.380	86.626	-188.700	-391.960	-391.580	21.658	10.8290	0.14925	6.42270	-411.680	-375.060	5.3388E-15	130
As-cast2	น้ำเงิน	-0.351	87.433	-174.020	-396.740	-396.150	21.552	10.7760	0.14852	7.08190	-411.830	-377.660	2.7771E-15	138
As-cast3	เขียว	-0.339	81.933	-181.450	-399.800	-399.170	16.315	8.1574	0.11243	7.95340	-421.600	-370.330	2.2948E-14	85
As-cast4	เหลือง	-0.284	73.168	-167.280	-403.290	-403.950	15.798	7.8990	0.10887	7.15040	-425.420	-381.470	2.9868E-14	82
As-cast5	ม่วง	-0.272	84.301	-140.310	-390.810	-390.920	26.232	13.1160	0.18078	6.99310	-417.480	-368.650	5.9321E-14	105
As-cast6	ส้ม	-0.259	75.908	-156.310	-404.930	-404.790	17.739	8.8695	0.12225	7.22590	-426.940	-380.550	2.5209E-14	91
As-cast7	ชมพู	-0.340	79.489	-171.810	-388.190	-388.600	16.734	8.3669	0.11532	7.67840	-414.890	-363.620	7.6227E-14	79
As-cast8	ดำ	-0.279	81.003	-123.600	-400.600	-400.810	26.922	13.4610	0.18553	7.58380	-425.420	-376.590	1.4867E-14	128
As-cast9	ฟ้าใส	-0.300	80.552	-143.130	-399.040	-399.300	21.010	10.5050	0.14479	7.61690	-428.620	-372.470	3.2262E-14	100
As-cast10	น้ำตาล	-0.351	77.881	-151.880	-389.570	-389.360	16.081	8.0407	0.11082	8.63390	-409.240	-365.300	2.3834E-15	130
As-cast11	ชมพูอ่อน	-0.293	75.967	-122.030	-396.890	-396.140	21.444	10.7220	0.14778	8.15110	-414.430	-375.370	3.9807E-15	138
As-cast12	เทา	-0.354	85.691	-168.560	-395.880	-395.010	22.312	11.1560	0.15376	6.78520	-414.120	-375.060	1.3135E-15	181
As-cast13	เขียวอ่อน	-0.291	77.049	-140.410	-403.860	-403.560	22.354	11.1770	0.15405	6.63460	-421.910	-382.840	6.0784E-15	126
As-cast14	ฟ้า	-0.253	80.688	-144.290	-406.170	-406.870	21.492	10.7460	0.14811	7.39770	-431.060	-389.560	1.9120E-15	189
As-cast15	แดงอ่อน	-0.277	76.538	-130.540	-405.200	-405.340	22.872	11.4360	0.15762	7.02620	-423.280	-391.540	4.5670E-15	139

หมายเหตุ คำนวณอัตราการกัดกร่อนโดยใช้ค่าความหนาแน่นชิ้นงานควบคุม 8.8 g/cm^3 ค่ามวลสมมูลเฉลี่ย 18.542 g/mol และค่าพื้นที่ผิว 0.5 cm^2

ตาราง ข. 2 แสดงผลจากการ Fit curve ของเส้น โพลาริเซชันของกลุ่มบัดกรีด้วยไฟ

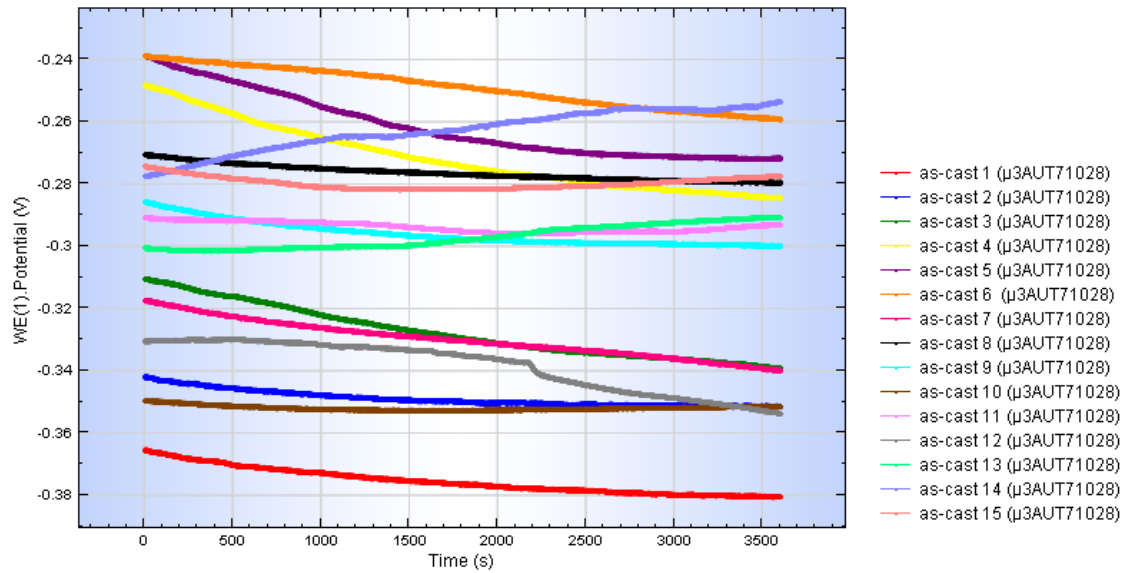
ชื่อ	สี	OCP	ba (V/dec)	bc (V/dec)	E _{corr} Calc(mV)	E _{corr} Obs(mV)	I _{corr} (uA/cm ²)	i _{corr} (uA)	Corrosion rate	Polarization resistance	E Begin (mV)	E End (mV)	X ²	Iterations
Solder1	แดง	-0.317	79.220	-128.250	-396.040	-396.260	21.784	10.8920	0.14722	8.26300	-421.140	-367.430	5.5251E-15	139
Solder2	น้ำเงิน	-0.300	75.648	-132.440	-399.050	-399.300	18.241	9.1206	0.12328	8.40030	-417.180	-380.550	9.1055E-15	112
Solder3	เขียว	-0.231	78.282	-144.840	-415.720	-415.000	17.228	8.6139	0.11643	8.58890	-435.490	-386.660	1.5733E-14	96
Solder4	เหลือง	-0.242	81.767	-147.060	-418.430	-418.590	19.861	9.9304	0.13423	8.05450	-436.400	-394.900	3.9859E-15	127
Solder5	ม่วง	-0.293	81.725	-124.170	-402.660	-402.590	26.234	13.1170	0.17730	7.91560	-424.500	-380.550	3.5144E-15	165
Solder6	ส้ม	-0.305	90.335	-155.830	-408.290	-408.740	22.948	11.4740	0.15509	8.13480	-431.520	-382.690	1.0150E-14	120
Solder7	ชมพู	-0.274	80.381	-155.220	-407.790	-407.840	16.460	8.2298	0.11124	8.79740	-427.550	-383.610	1.5907E-14	98
Solder8	ดำ	-0.282	86.982	-136.710	-408.500	-408.060	25.164	12.5820	0.17007	8.25410	-429.990	-383.610	5.7531E-15	142
Solder9	ฟ้าใส	-0.259	82.031	-147.980	-408.060	-408.870	21.836	10.9180	0.14757	7.32140	-434.110	-380.400	2.2311E-14	103
Solder10	น้ำตาล	-0.283	83.268	-137.650	-412.590	-412.270	24.906	12.4530	0.16832	7.34980	-431.820	-390.320	1.0231E-14	124
solder11	ชมพูอ่อน	-0.324	90.085	-145.250	-381.410	-381.590	26.462	13.2310	0.17884	7.78520	-406.800	-355.530	2.8121E-14	113
Solder12	เทา	-0.336	79.015	-145.290	-378.350	-378.230	19.434	9.7172	0.13134	7.74200	-406.040	-354.770	2.2316E-14	103
Solder13	เขียวอ่อน	-0.327	80.384	-140.530	-379.920	-379.480	21.266	10.6330	0.14372	7.67180	-404.360	-357.970	1.4911E-14	115
Solder14	ฟ้า	-0.322	73.398	-182.600	-383.050	-383.840	18.370	9.1848	0.12415	5.80320	-397.640	-370.790	5.5695E-15	112
Solder15	แดงอ่อน	-0.359	85.501	-175.910	-385.220	-385.030	21.570	10.7850	0.14578	6.69930	-410.160	-363.770	8.9361E-15	121

หมายเหตุ คำนวณอัตราการกัดกร่อนโดยใช้ค่าความหนาแน่นชิ้นงานบัดกรีด้วยไฟ 8.5 g/cm³ ค่ามวลสมมูลเฉลี่ย 17.564 g/mol และค่าพื้นที่ผิว 0.5 cm²

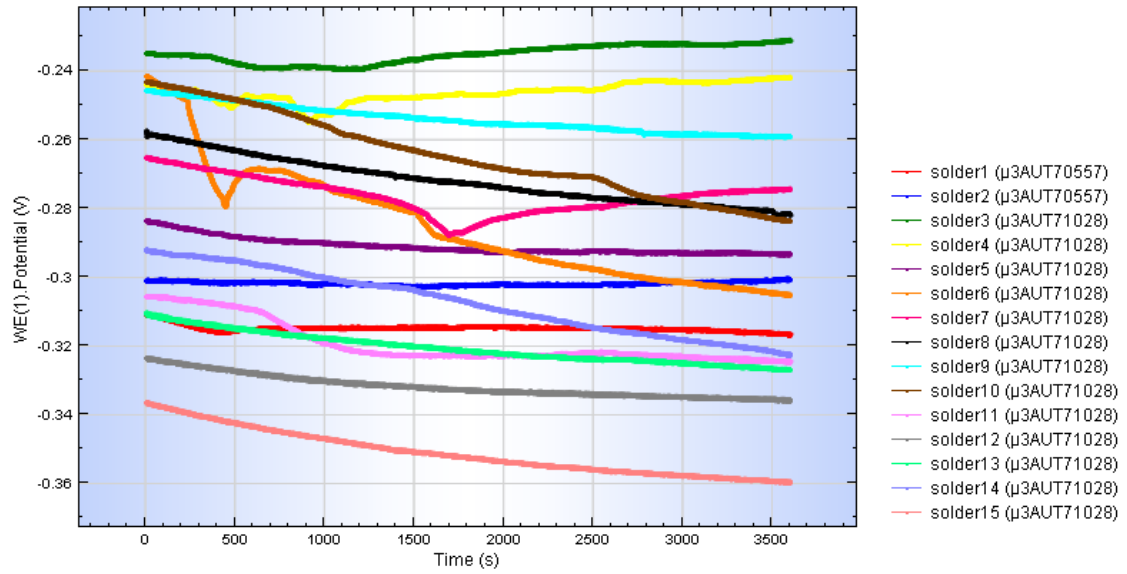
ตาราง ข. 3 แสดงผลจากการ Fit curve ของเส้น โพลาริเซชันของกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์

ชื่อ	สี	OCP	ba (V/dec)	bc (V/dec)	E_{corr} Calc(mV)	E_{corr} Obs(mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	i_{corr} (μA)	Corrosion rate	Polarization resistance	E Begin (mV)	E End (mV)	X^2	Iterations
Laser1	แดง	-0.379	101.120	-213.710	-391.900	-391.220	29.526	14.7630	0.22475	5.64610	-417.790	-366.520	2.3213E-14	114
Laser2	น้ำเงิน	-0.377	88.271	-195.890	-394.080	-394.580	24.738	12.3690	0.18830	5.64160	-427.550	-364.070	5.0255E-14	87
Laser3	เขียว	-0.250	91.176	-173.990	-418.270	-418.220	22.258	11.1290	0.16942	7.47540	-442.500	-396.120	1.6166E-14	112
Laser4	เหลือง	-0.352	97.055	-265.790	-392.670	-392.590	25.084	12.5420	0.19094	5.29380	-417.180	-365.910	5.4408E-15	123
Laser5	ม่วง	-0.329	98.283	-173.970	-403.060	-403.820	27.600	13.8000	0.21009	7.10930	-424.190	-380.250	9.5722E-15	126
Laser6	ส้ม	-0.196	86.149	-164.960	-414.700	-414.140	25.852	12.9260	0.19678	6.05870	-434.720	-393.220	7.1424E-15	131
Laser7	ชมพู	-0.198	90.378	-186.120	-429.490	-429.020	26.906	13.4530	0.20480	5.67190	-446.320	-407.260	1.5566E-14	111
Laser8	ดำ	-0.296	87.496	-179.570	-394.880	-394.590	22.302	11.1510	0.16976	6.64590	-419.920	-368.650	2.0973E-14	102
Laser9	ฟ้าใส	-0.220	84.258	-217.170	-404.210	-404.540	18.474	9.2371	0.14062	6.47280	-422.360	-383.300	2.7094E-15	126
Laser10	น้ำตาล	-0.184	81.047	-188.630	-415.590	-415.870	21.472	10.7360	0.16344	5.74830	-432.740	-403.440	1.7977E-15	162
Laser11	ชมพูอ่อน	-0.216	81.920	-160.090	-414.320	-414.830	27.440	13.7200	0.20887	5.31080	-435.030	-391.080	2.6679E-14	103
Laser12	เทา	-0.273	80.191	-152.460	-393.200	-393.320	20.386	10.1930	0.15518	7.20820	-419.310	-368.040	1.4024E-14	109
Laser13	เขียวอ่อน	-0.359	86.461	-147.190	-382.960	-382.110	28.454	14.2270	0.21659	6.39690	-402.220	-360.720	9.7165E-15	131
Laser14	ฟ้า	-0.239	83.594	-136.420	-398.770	-398.690	25.254	12.6270	0.19223	7.42470	-419.160	-380.100	4.0817E-15	153
Laser15	แดงอ่อน	-0.291	85.559	-136.090	-390.700	-390.970	28.580	14.2900	0.21755	7.00320	-419.920	-368.650	3.8740E-14	117

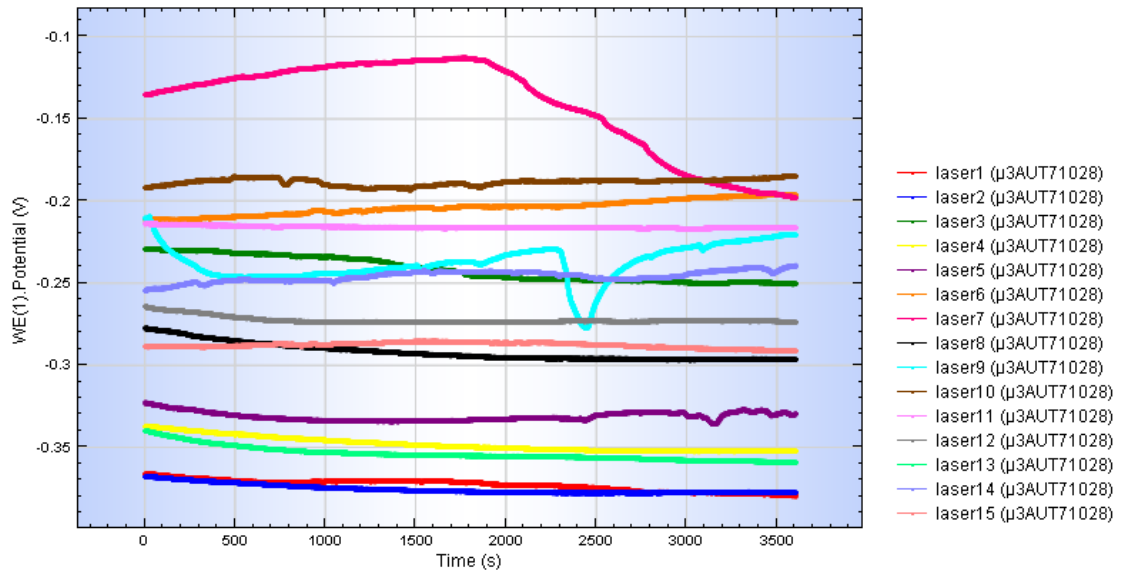
หมายเหตุ: คำนวณอัตราการกัดกร่อน โดยใช้ค่าความหนาแน่นชิ้นงานเชื่อมด้วยเลเซอร์ $8.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ ค่ามวลสมมูลเหล็ก $19.3168 \text{ g}/\text{mol}$ และค่าพื้นที่ผิว 0.5 cm^2



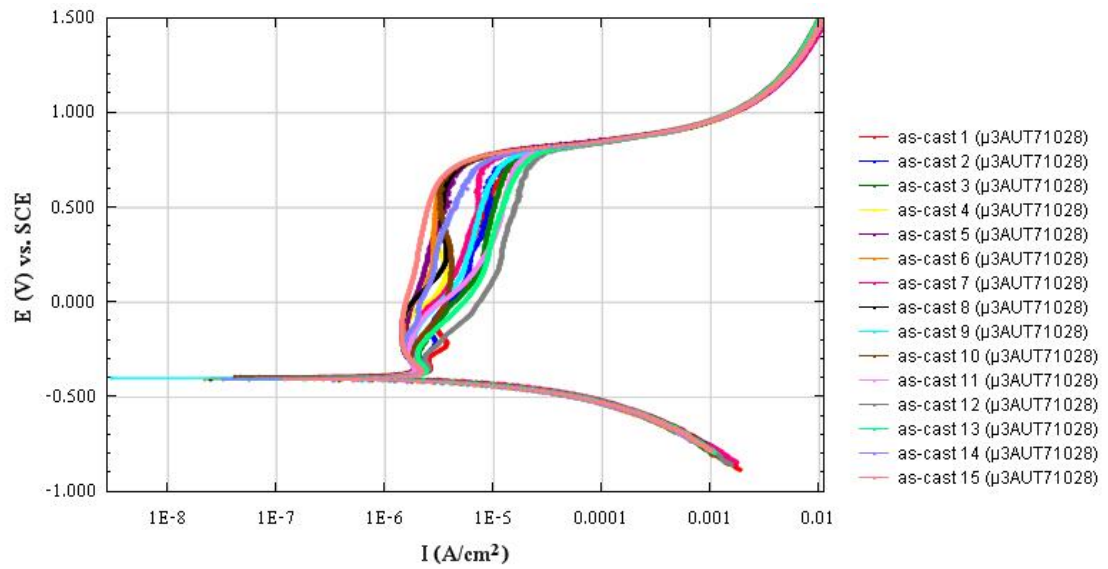
รูป ข. 1 แสดงกราฟค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดเทียบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่มควบคุมจำนวน 15 ชิ้น



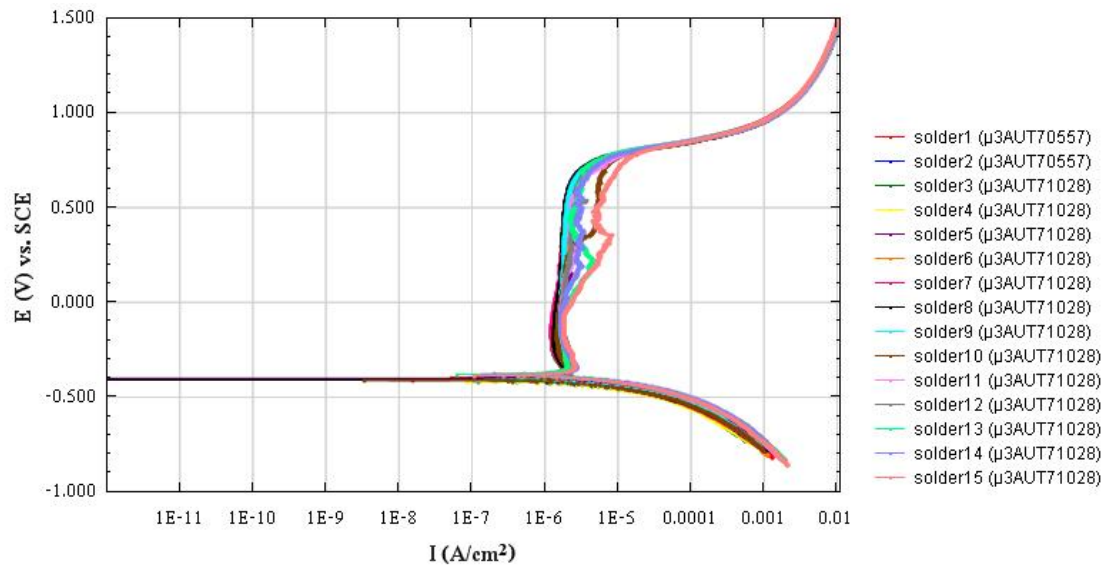
รูป ข. 2 แสดงกราฟค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่มบัดกรีด้วยไฟจำนวน 15 ชิ้น



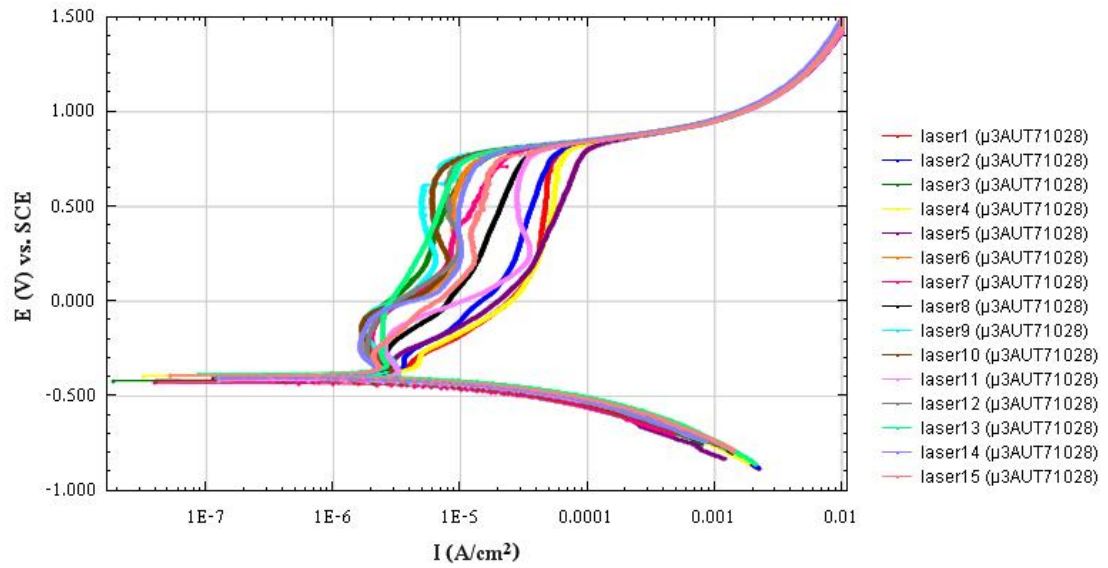
รูป ข. 3 แสดงกราฟค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์จำนวน 15 ชิ้น



รูป ข. 4 แสดงกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่มควบคุมจำนวน 15 ชิ้น



รูป ข. 5 แสดงกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่มบัดกรีด้วยไฟจำนวน 15 ชิ้น



รูป ข. 6 แสดงกราฟโพลาริเซชันของซิงกานกลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์จำนวน 15 ชิ้น

ภาคผนวก ค แสดงผลทางสถิติของการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุน (% porosity)

ตาราง ค.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุน

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่ม		% porosity	
กลุ่มควบคุม	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	,06073
		Std. Deviation	,088538
	Most Extreme Differences	Absolute	,286
		Positive	,286
		Negative	-,246
	Kolmogorov-Smirnov Z	1,108	
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,172	
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	,52327
		Std. Deviation	,436563
	Most Extreme Differences	Absolute	,211
		Positive	,211
		Negative	-,137
	Kolmogorov-Smirnov Z	,817	
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,517	
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	3,58460
		Std. Deviation	2,436575
	Most Extreme Differences	Absolute	,212
		Positive	,212
		Negative	-,149
	Kolmogorov-Smirnov Z	,821	
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,511	

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตาราง ค. 2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของค่าเปอร์เซ็นต์รู้พรุน

Descriptives

เปอร์เซ็นต์รู้พรุน

กลุ่ม					95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Lower Bound	Upper Bound		
กลุ่มควบคุม	15	,06073	,088538	,022860	,01170	,10976	,000	,330
กลุ่มบำบัดด้วยไฟ	15	,52327	,436563	,112720	,28151	,76503	,046	1,538
กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	15	3,58460	2,436575	,629121	2,23527	4,93393	,842	8,044
รวม	45	1,38953	2,110101	,314555	,75559	2,02348	,000	8,044

ตาราง ค. 3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลวิน (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

เปอร์เซ็นต์รู้พรุน

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
37,232	2	42	,000

ตาราง ค. 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust test) ชนิด Brown-Forsythe

Robust Tests of Equality of Means

เปอร์เซ็นต์รู้พรุน

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	26,898	2	14,936	,000

a. Asymptotically F distributed.

ตาราง ก. 5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน (Tamhane)

Multiple Comparisons

เปอร์เซ็นต์รัฐพรุน

แทมเฮน

(I) กลุ่ม	(J) กลุ่ม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
กลุ่มควบคุม	กลุ่มบัตรกรีด้วยไฟ	-,462533*	,115015	,003	-,77100	-,15407
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	-3,523867*	,629536	,000	-5,22873	-1,81900
กลุ่มบัตรกรีด้วยไฟ	กลุ่มควบคุม	,462533*	,115015	,003	,15407	,77100
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	-3,061333*	,639139	,001	-4,77904	-1,34363
กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	กลุ่มควบคุม	3,523867*	,629536	,000	1,81900	5,22873
	กลุ่มบัตรกรีด้วยไฟ	3,061333*	,639139	,001	1,34363	4,77904

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ภาคผนวก ง แสดงผลทางสถิติของการทดสอบค่าศักร์ไฟฟ้าการกั้ดกร่อน (E_{corr})

ตาราง ง.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าศักร์ไฟฟ้าการกั้ดกร่อน

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่ม		E_{corr}	
กลุ่มควบคุม	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-398,19533
		Std. Deviation	5,989512
	Most Extreme Differences	Absolute	,136
		Positive	,136
		Negative	-,118
		Kolmogorov-Smirnov Z	,526
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,945	
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-399,00533
		Std. Deviation	14,000001
	Most Extreme Differences	Absolute	,201
		Positive	,201
		Negative	-,171
		Kolmogorov-Smirnov Z	,780
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,576	
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-402,58667
		Std. Deviation	13,091935
	Most Extreme Differences	Absolute	,189
		Positive	,148
		Negative	-,189
		Kolmogorov-Smirnov Z	,731
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,660	

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตาราง ง. 2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

Descriptives

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

กลุ่ม					95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Lower Bound	Upper Bound		
กลุ่มควบคุม	15	398,19533	5,989512	1,546485	-401,51221	-394,87845	-406,170	-388,190
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	15	399,00533	14,000001	3,614785	-406,75828	-391,25239	-418,430	-378,350
กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	15	402,58667	13,091935	3,380323	-409,83674	-395,33659	-429,490	-382,960
รวม	45	399,92911	11,490759	1,712941	-403,38132	-396,47690	-429,490	-378,350

ตาราง ง. 3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลอวิน (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
6,696	2	42	,003

ตาราง ง. 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust test) ชนิด Brown-Forsythe

Robust Tests of Equality of Means

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	,609	2	32,959	,550

a. Asymptotically F distributed.

ตาราง ง. 5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน (Tamhane)

Multiple Comparisons

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

แทมเฮน

(I) กลุ่ม	(J) กลุ่ม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
กลุ่มควบคุม	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	,810000	3,931703	,996	-9,48202	11,10202
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	4,391333	3,717284	,581	-5,30840	14,09107
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	กลุ่มควบคุม	-,810000	3,931703	,996	-11,10202	9,48202
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	3,581333	4,949066	,856	-8,98847	16,15114
กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	กลุ่มควบคุม	-4,391333	3,717284	,581	-14,09107	5,30840
	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	-3,581333	4,949066	,856	-16,15114	8,98847

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ภาคผนวก จ แสดงผลทางสถิติของการทดสอบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน (I_{corr})

ตาราง จ. 1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่ม		I_{corr}	
กลุ่มควบคุม	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	20,70100
		Std. Deviation	3,498759
	Most Extreme Differences	Absolute	,202
		Positive	,138
		Negative	-,202
		Kolmogorov-Smirnov Z	,782
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,574	
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	21,45093
		Std. Deviation	3,222643
	Most Extreme Differences	Absolute	,125
		Positive	,119
		Negative	-,125
		Kolmogorov-Smirnov Z	,483
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,974	
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	24,95507
		Std. Deviation	3,311621
	Most Extreme Differences	Absolute	,141
		Positive	,122
		Negative	-,141
		Kolmogorov-Smirnov Z	,544
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,928	

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตาราง จ. 2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน

Descriptives

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน

กลุ่ม					95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Lower Bound	Upper Bound		
กลุ่มควบคุม	15	20,70100	3,498759	,903376	18,76345	22,63855	15,798	26,922
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	15	21,45093	3,222643	,832083	19,66629	23,23557	16,460	26,462
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	15	24,95507	3,311621	,855057	23,12115	26,78898	18,474	29,526
รวม	45	22,36900	3,768898	,561834	21,23670	23,50130	15,798	29,526

ตาราง จ. 3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลวิน (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
,045	2	42	,956

ตาราง จ. 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	154,692	2	77,346	6,907	,003
Within Groups	470,310	42	11,198		
Total	625,002	44			

ตาราง จ. 5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบเชฟเฟ (Scheffe)

Multiple Comparisons

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน

เซฟเฟ

(I) กลุ่ม	(J) กลุ่ม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
กลุ่มควบคุม	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	-,749933	1,221903	,829	-3,85075	2,35088
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	-4,254067*	1,221903	,005	-7,35488	-1,15325
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	กลุ่มควบคุม	,749933	1,221903	,829	-2,35088	3,85075
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	-3,504133*	1,221903	,023	-6,60495	-,40332
กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	กลุ่มควบคุม	4,254067*	1,221903	,005	1,15325	7,35488
	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	3,504133*	1,221903	,023	,40332	6,60495

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ภาคผนวก ฉ แสดงผลทางสถิติของการทดสอบค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate)

ตาราง ฉ. 1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการกัดกร่อน

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่ม	Corrosion rate		
กลุ่มควบคุม	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	,1426587
		Std. Deviation	,02411192
	Most Extreme Differences	Absolute	,202
		Positive	,138
		Negative	-,202
		Kolmogorov-Smirnov Z	,782
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,574	
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	,1449720
		Std. Deviation	,02178038
	Most Extreme Differences	Absolute	,125
		Positive	,119
		Negative	-,125
		Kolmogorov-Smirnov Z	,483
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,974	
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	N	15	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	,1899547
		Std. Deviation	,02520834
	Most Extreme Differences	Absolute	,140
		Positive	,122
		Negative	-,140
		Kolmogorov-Smirnov Z	,544
	Asymp. Sig. (2-tailed)	,929	

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตาราง จ. 2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของค่าอัตราการกัดกร่อน

Descriptives

ค่าอัตราการกัดกร่อน

กลุ่ม					95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Lower Bound	Upper Bound		
กลุ่มควบคุม	15	,1426587	,02411192	,00622567	,1293059	,1560114	,10887	,18553
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	15	,1449720	,02178038	,00562367	,1329104	,1570336	,11124	,17884
กลุ่มเชื่อมด้วยเลเซอร์	15	,1899547	,02520834	,00650877	,1759948	,2039146	,14062	,22475
รวม	45	,1591951	,03198215	,00476762	,1495866	,1688036	,10887	,22475

ตาราง จ. 3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลอวีน์ (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

ค่าอัตราการกัดกร่อน

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
,195	2	42	,824

ตาราง จ. 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

ค่าอัตราการกัดกร่อน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,021	2	,011	18,917	,000
Within Groups	,024	42	,001		
Total	,045	44			

ตาราง จ. 5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบเชฟเฟ (Scheffe)

Multiple Comparisons

ค่าอัตราการกัดกร่อน

เซฟเฟ

(I) กลุ่ม	(J) กลุ่ม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
กลุ่มควบคุม	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	-,00231333	,00866982	,965	-,0243147	,0196880
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	-,04729600*	,00866982	,000	-,0692973	-,0252947
กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	กลุ่มควบคุม	,00231333	,00866982	,965	-,0196880	,0243147
	กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	-,04498267*	,00866982	,000	-,0669840	-,0229813
กลุ่มเชื่อมด้วย เลเซอร์	กลุ่มควบคุม	,04729600*	,00866982	,000	,0252947	,0692973
	กลุ่มบัดกรีด้วยไฟ	,04498267*	,00866982	,000	,0229813	,0669840

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภิษรชต์ อยู่ตรีรักษ์ เกิดที่จังหวัดชลบุรี เมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2525 สัญชาติไทย เชื้อชาติไทย จบการศึกษาระดับปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต ปี พ.ศ. 2549 จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปฏิบัติงานในตำแหน่งทันตแพทย์ประจำโรงพยาบาลพุทธโสธร จังหวัดบุรีรัมย์ ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2550 ย้ายมาปฏิบัติงานที่โรงพยาบาลนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2551 ย้ายมาปฏิบัติงานที่โรงพยาบาลพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ระหว่างปี พ.ศ. 2551-2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 ปัจจุบันปฏิบัติงานในตำแหน่งทันตแพทย์ประจำโรงพยาบาลพุทธโสธร จังหวัดฉะเชิงเทรา