

ความกล้าเบี่ยงเบนของตะขอโลหะเหวี่ยงโคบอลต์-โครเมียมที่นำกลับมาใช้ซ้ำ



นางสาว เกศินี พัฒนเจริญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEFLECTION FATIGUE OF RECYCLED COBALT-CHROMIUM ALLOY
CAST CLASP



Miss Kesinee Pattanachareon

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความล้าเป็ยเบนของตะขอโลหะเหวียงโคบอลต์-โครเมียมที่
นำกลับมาใช้ซ้ำ

โดย

นางสาว เกศินี พัฒนเจริญ


สาขาวิชา

ทันตกรรมประดิษฐ์

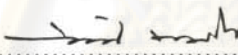
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

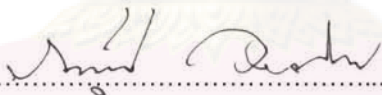
รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง วัชรารักษ์ ทัศจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สรรพชญ์ นามะโน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ตระกมล เมฆฉวีราชชานนท์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์กิตติคุณ ทันตแพทย์หญิง โสภี ชาตีสุทธิพันธุ์)

ศูนย์วิทยุทันตวิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เกศินี พัฒนเจริญ : ความล้าเบี่ยงเบนของตะขอโลหะเหวี่ยงโคบอลต์-โครเมียมที่นำกลับมาใช้ซ้ำ.
(DEFLECTION FATIGUE OF RECYCLED COBALT-CHROMIUM ALLOY CAST CLASP) อ.ที่
ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ทันตแพทย์ ภาควงศ์ วงศ์ไทย, 103 หน้า.

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติและความต้านทานต่อการล้าของตะขอโอบฟันโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่นำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าและโลหะใหม่โดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน

วัสดุและวิธีการ ชิ้นงานตัวอย่างตะขอโอบฟันที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมจำนวน 45 ชิ้น ถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 15 ชิ้น โดยกลุ่มที่ 1 ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมด กลุ่มที่ 2 ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 และกลุ่มที่ 3 ทำจากโลหะเก่าทั้งหมด โดยโลหะเก่าที่ใช้ผ่านการหลอมมาแล้ว 1 ครั้งเท่านั้น ชิ้นงานตัวอย่างกลุ่มละ 10 ชิ้น ถูกนำมาทดสอบแบบเบนด์ โดยให้แรงจนกระทั่งชิ้นงานหัก และทำการบันทึกค่าคุณสมบัติต่างๆ ส่วนชิ้นงานตัวอย่างที่เหลือกลุ่มละ 5 ชิ้นจะถูกนำมาทดสอบความต้านทานต่อการล้า โดยให้แรงที่ทำให้เกิดการเบนออกของชิ้นงานเป็นระยะ 0.25 มม. ซ้ำๆ เพื่อจำลองการติดตัวของตะขอโอบฟันเข้าออกจากส่วนคอคของฟันหลักในขณะถอดใส่ฟันปลอม จนกระทั่งชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเป็นระยะ 0.1 มม. ในแนวตั้ง ทำการบันทึกจำนวนรอบของการให้แรง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยสถิติแบบแอลเอสดี

ผลการศึกษา ค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดคราก ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของตะขอที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมดไม่แตกต่างกับตะขอที่ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีค่าสูงกว่าตะขอที่ทำจากโลหะเก่าทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตะขอที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมดมีความต้านทานต่อการล้าเฉลี่ย (8,457 รอบ) สูงกว่าชิ้นงานตะขอที่ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 (5,479 รอบ) และสูงกว่าชิ้นงานตะขอที่ทำจากโลหะเก่าทั้งหมด (2,880 รอบ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามลำดับ ($p < 0.05$)

สรุป การนำโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมกลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าที่มากขึ้น มีผลทำให้คุณสมบัติต่างๆ และความต้านทานต่อการล้าของตะขอโลหะเหวี่ยงลดลง

คำสำคัญ : ความต้านทานต่อการล้า; ตะขอโอบฟัน; นำกลับมาใช้ซ้ำ; โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ภาควิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อนิติศ.....เกศินี.....พัฒนเจริญ.....
สาขาวิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อ.....ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2552.....

#5076102332 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEYWORDS : CIRCUMFERENTIAL CLASP, COBALT-CHROMIUM ALLOY, FATIGUE RESISTANCE, RECYCLE

KESINEE PATTANACHAREON : DEFLECTION FATIGUE OF RECYCLED COBALT-CHROMIUM ALLOY CAST CLASP. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PARNUPONG WONGTHAI, 103 pp.

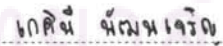
Objective The aim of this study was to investigate properties and fatigue resistance of cobalt-chromium alloy cast circumferential clasps recycled in different mixing ratios by weight between used alloy and new alloy.

Materials and methods Forty-five circumferential clasp samples made from cobalt-chromium alloy were divided into 3 groups (n = 15 per group): 100% new alloy; 50% used alloy mixed with 50% new alloy; and 100% used alloy, which the used alloy was melted only once. Ten samples per group were subjected to the bending test until fractured and data were recorded. The remaining 5 samples per group were subjected to cyclic deflection. The preset value of 0.25 mm was used to simulate the clasp deflection during insertion and removal of the removable partial denture over the undercut of the abutment, until a 0.1 mm permanent deformation occurred vertically. The number of loading cycles of each sample was recorded. One-way analysis of variance and LSD multiple comparison tests were used to compare the results of the 3 groups.

Results The 100% new alloy cast clasps showed significantly higher mean loads at yield point, modulus of elasticity and loads required for 0.25 mm deflection compared to the 100% used alloy cast clasps ($p < 0.05$), but showed no significant difference from those of the 50% used alloy mixed with 50% new alloy cast clasps. The mean fatigue resistance of the 100% new alloy cast clasps (8,457 cycles) was significantly higher than the 50% used alloy and 50% new alloy cast clasps (5,479 cycles) and the 100% previously used alloy cast clasps (2,880 cycles) respectively ($p < 0.05$).

Conclusion Recycle of cobalt-chromium alloy in the higher ratio of the used alloy reduces the properties and fatigue resistance of the cast clasp.

Department : Prosthodontics

Student's Signature 

Field of Study : Prosthodontics

Advisor's Signature 

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูงของอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย ที่ได้กรุณาชี้แนะแนวทางและให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์อย่างละเอียด ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ ให้ความเมตตา และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์กิตติคุณ ทันตแพทย์หญิง โสภิตา ชาติสุทธิพันธุ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ตรีภล เมฆณัฐชนานนท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สรรพชญ์ นามะโน ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทางสถิติ อาจารย์ไพพรรณ วิทยานนท์ ที่ช่วยให้ความรู้ทางด้านสถิติ รวมทั้งคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณพล.ร.ท. ทันตแพทย์ สุรัตน์ นัยสวัสดิ์ คุณกุลชาล นัยสวัสดิ์ และสายน้ำทิพย์ แผลปี่ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการผลิตชิ้นงานวิจัย ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในศูนย์ทันตวัสดุ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัย และผู้มีพระคุณทั้งหมดที่ไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงาน

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ครั้งที่ 2 ประจำปีงบประมาณ 2552 จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณความดีหรือประโยชน์ใดๆที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขออุทิศแด่รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย ถึงแม้ว่าอาจารย์จะจากโลกนี้ไปแล้ว แต่ศิษย์คนนี้จะขอระลึกถึงพระคุณของอาจารย์ตลอดไป ขอให้อาจารย์ไปสู่สุคติเทอญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
คำถามการวิจัย.....	5
วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
สมมติฐานการวิจัย.....	5
ขอบเขตการวิจัย.....	5
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	6
คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	6
ข้อจำกัดของการวิจัย.....	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทบาทของโครงโลหะในฟินปลอมบางส่วนถอดได้.....	8
หน้าที่และความสำคัญของโครงโลหะในฟินปลอมบางส่วนถอดได้.....	8
ส่วนยึดหลัก.....	10
การยึดอยู่ของส่วนยึดหลัก.....	12
รูปร่างของตะขอโอบฟิน.....	19
โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม.....	20
กลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม.....	23
งานวิจัยเกี่ยวกับการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ.....	24
ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฟินปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ.....	27
ความชุกและตำแหน่งที่โครงโลหะหัก.....	27

บทที่	หน้า
กระบวนการหักของโลหะและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
สาเหตุของการหักของโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้	30
งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบความล้าของตะขอ.....	34
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	39
ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	39
ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	39
วิธีการทดลอง.....	41
กระบวนการเตรียมชิ้นงาน.....	41
การทำแบบขึ้นชิ้นตัวอย่างต้นแบบ.....	42
การเหียงโลหะขึ้นตัวอย่างต้นแบบ.....	43
การทำเข้าอัดขึ้นตัวอย่าง.....	46
การทำขึ้นตัวอย่างอะคริลิกเรซินสำหรับเหียงโลหะ.....	47
การเหียงขึ้นโลหะตัวอย่าง.....	48
กระบวนการขัดแต่งโลหะขึ้นตัวอย่าง.....	49
กระบวนการคัดเลือกขึ้นโลหะตัวอย่าง.....	49
กระบวนการวัดผลและแปรผล.....	51
การทดสอบเบนด์จิ่ง.....	51
การทดสอบความล้าเบี่ยงเบน.....	53
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	54
ตอนที่ 1 การทดสอบเบนด์จิ่ง.....	54
การทดสอบค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก.....	55
การทดสอบค่าแรงที่จุดคราก.....	56
การทดสอบค่ามอดูลัสยืดหยุ่น.....	57
การทดสอบแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม.....	58
การทดสอบระยะที่จุดคราก.....	60
การทดสอบระยะที่ชิ้นงานหัก.....	61
ตอนที่ 2 การทดสอบความล้าเบี่ยงเบน.....	63
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย.....	65
อภิปรายระเบียบวิธีการวิจัย.....	65

อภิปรายผลการวิจัย.....	66
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	72
สรุปผลการวิจัย.....	72
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 1	องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม โคบอลต์โครเมียมตามมาตรฐานของ องค์การมาตรฐานนานาชาติ.....	21
ตารางที่ 2	องค์ประกอบมาตรฐานของโลหะผสม โคบอลต์โครเมียม.....	21
ตารางที่ 3	กลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมตามข้อกำหนดหมายเลข 14 ของ สมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา.....	23
ตารางที่ 4	ตารางแสดงจำนวนรอบที่ตะขอได้รับแรงก่อนจะเกิดความล้มเหลวของตะขอ โลหะ 3 ชนิด ที่ระยะการเบี่ยงเบนที่ตั้งไว้ 3 ค่า.....	37
ตารางที่ 5	ตารางแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอโลหะ 3 ชนิด ที่ ระยะการเบี่ยงเบนที่ตั้งไว้ 3 ค่า.....	37
ตารางที่ 6	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสถิติของผลการวิเคราะห์ความ แปรปรวนแบบทางเดียวของผลการทดสอบเบนด์จิ่ง.....	54
ตารางที่ 7	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก	55
ตารางที่ 8	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่จุดคราก.....	56
ตารางที่ 9	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดูลัสยืดหยุ่น.....	57
ตารางที่ 10	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็น ระยะ 0.25 มม.....	59
ตารางที่ 11	แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่จุดคราก	60
ตารางที่ 12	แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่ชิ้นงานหัก	62
ตารางที่ 13	แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนรอบที่ชิ้นงานตะขอเริ่มเกิด การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร.....	63

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
ภาพที่ 1	แสดงชิ้นงานตัวอย่างและมุมในการกดชิ้นตัวอย่างโลหะที่มุมบริเวณด้านในส่วนปลายของตะขอ.....	41
ภาพที่ 2	แสดงการยึดชิ้นตัวอย่างโลหะเข้ากับอุปกรณ์ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล.....	42
ภาพที่ 3	แบบจีฟิ่งขึ้นตัวอย่างต้นแบบบนแท่งอินเวสต์เมนต์ทรงกระบอก.....	43
ภาพที่ 4	แสดงการยึดจีฟิ่งแกนลำงูเทเข้ากับแบบจีฟิ่งขึ้นตัวอย่างต้นแบบ.....	43
ภาพที่ 5	แสดงการวางชิ้นงานลงในแผ่นบุงแหวนที่จะใช้เป็นแบบสร้างแอ่งเท.....	44
ภาพที่ 6	เบ้าหล่อ.....	44
ภาพที่ 7	เตาเผา.....	45
ภาพที่ 8	แสดงเบ้าหล่อที่พร้อมสำหรับเหวียงโลหะ.....	45
ภาพที่ 9	แสดงชิ้นตัวอย่างโลหะหลังแยกวัสดุหล่อเบ้าออก.....	45
ภาพที่ 10	แสดงการยึดชิ้นงานตัวอย่างต้นแบบด้วยจีฟิ่งก่อนการพิมพ์ชิ้นงานเพื่อทำเบ้าอัดขึ้นตัวอย่าง.....	46
ภาพที่ 11	แสดงการนำแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั้นได้ขึ้นล่างมาวางประกบกับขึ้นบน.....	47
ภาพที่ 12	แสดงเบ้าอัดชิ้นงานตัวอย่างฝาบนและฝาล่าง.....	47
ภาพที่ 13	ขึ้นตัวอย่างอะคริลิกเรซินสำหรับเหวียงโลหะ.....	48
ภาพที่ 14	เครื่องวัดอย่างละเอียด.....	48
ภาพที่ 15	เครื่องชั่งน้ำหนักโลหะ.....	49
ภาพที่ 16	กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ.....	50
ภาพที่ 17	ภาพตัวอย่างชิ้นงานที่สมบูรณ์เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ.....	50
ภาพที่ 18	เครื่องถ่ายภาพรังสี.....	51
ภาพที่ 19	แสดงการถ่ายภาพรังสีชิ้นงานตัวอย่าง.....	51
ภาพที่ 20	แสดงการยึดชิ้นงานเข้ากับอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน.....	52
ภาพที่ 21	แสดงการยึดชิ้นงานและอุปกรณ์ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล.....	52
ภาพที่ 22	ภาพตะขอหักหลังจากการทดสอบเบนด์ลิ่ง.....	52
ภาพที่ 23	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก	55
ภาพที่ 24	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงที่จุดคราก.....	56
ภาพที่ 25	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น.....	58
ภาพที่ 26	แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็น	

ระยะ 0.25 มม.....	59
ภาพที่ 27 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่จุดคราก.....	61
ภาพที่ 28 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่ชิ้นงานหัก.....	62
ภาพที่ 29 ภาพขยายส่วนปลายตะขอของชิ้นงานและหัวกด ภาพซ้ายแสดงชิ้นงานก่อนการทดสอบ ความล้าเบี่ยงเบน ภาพขวาแสดงชิ้นงานหลังการทดสอบความล้าเบี่ยงเบน.....	63
ภาพที่ 30 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร.....	64
ภาพที่ 31 ภาพถ่ายรังสีของชิ้นงานตัวอย่างที่มีรูพรุนภายใน.....	70
ภาพที่ 32 แสดงลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานตะขอโลหะเหนียว โคบอลต์-โครเมียมที่แตกหักเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า.....	70-71

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงโลหะเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่หลายประการ ซึ่งล้วนแต่มีความจำเป็นต่อการทำงานของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะ ตั้งแต่ให้การยึดอยู่ (retention) สร้างเสถียรภาพ (stability) กระจายแรงบดเคี้ยว (distribution of masticatory force) และช่วยรองรับแรงที่กระทำต่อฟันปลอม (support) โครงโลหะจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพและส่งผลต่อความสำเร็จหรือความล้มเหลวของฟันปลอม ซึ่งทำให้มีการศึกษาและให้ความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบโครงโลหะรวมทั้งปรับปรุงวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะ ให้มีความเหมาะสมกับสมบัติที่ต้องการขององค์ประกอบต่างๆและเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด⁽¹⁾

การเลือกโลหะเพื่อนำมาใช้ทำโครงโลหะในงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่เอื้ออำนวยต่อการทำหน้าที่ ของส่วนประกอบต่างๆของฟันปลอมอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแต่ละส่วนนั้น ต้องการคุณสมบัติของโลหะผสมที่แตกต่างกันตามความหลากหลายในการทำหน้าที่ โดยคุณสมบัติที่นำมาพิจารณาในการเลือกโลหะที่จะใช้ทำโครงโลหะ สำหรับฟันปลอมบางส่วนถอดได้ ได้แก่ความแข็งแรง (rigidity) ความสามารถในการคืนตัว (flexibility) ระยะเวลายืดตัว (elongation) ความแข็งผิว (surface hardness) ความต้านทานต่อการหมอง (tarnish resistance) น้ำหนักต่อหน่วย (unit weight) สมบัติเกี่ยวกับการหล่อแบบ (casting properties) รวมถึงปัจจัยทางด้านราคา (cost factor)⁽²⁾

โลหะที่ใช้ทำฟันปลอมบางส่วนถอดได้ในประเทศไทยมีหลายชนิด ได้แก่ โลหะผสมทองชนิดที่ 4 (type IV gold alloys) โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม (nickel-chromium alloys) โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (cobalt-chromium alloys) และไททาเนียม (titanium) ทั้งในรูปแบบไททาเนียมบริสุทธิ์ (commercially pure titanium; CpTi) และโลหะผสมไททาเนียม (titanium alloy) ซึ่งมี 3 ชนิด ได้แก่ Ti – 6Al – 4V, Ti – 6Al – 4V และ Ti – Al – Nb⁽³⁾

ในระยะเริ่มแรกใช้ทองผสมชนิดที่ 4 ในการทำโครงโลหะ ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้ แต่เนื่องจากทองคำมีราคาสูงขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1929 จึงได้เริ่มเปลี่ยนมาใช้โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมแทน เพื่อลดปัญหาเรื่องค่าใช้จ่าย เนื่องจากในการทำโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้ต้องใช้โลหะปริมาณมาก และทองคำมีราคาสูง⁽⁴⁾ และต่อมามีการนำโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการโลหะผสมที่มีความอ่อน (ductility) มากกว่าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมในระยะแรก ๆ แต่อย่างไรก็ตามพบว่านิกเกิลเป็นหนึ่งในบรรดาสารที่ทำให้เกิดการแพ้ ได้มากที่สุด อีกทั้งเป็นตัวชักนำให้เกิดภาวะคุ้มกันไวเกินได้ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในทางคลินิก⁽⁵⁾ และในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำไททาเนียมมาใช้ ทั้งในรูปแบบไททาเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสมไททาเนียม ซึ่งถึงแม้ว่าไททาเนียมจะมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่ออย่างดีเยี่ยม (biocompatibility) จึงเป็นโลหะทางเลือกในกรณีผู้ป่วยแพ้โลหะที่ใช้ทำโครงโลหะชนิดอื่นๆ และมีชั้นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงปกคลุม ทำให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) อีกทั้งมีงานวิจัยบางส่วนที่กล่าวว่าการที่ไทเทเนียมความยืดหยุ่นมากกว่าจะสามารถช่วยลดแรงที่กระทำต่อฟันหลักได้ นอกจากนี้ยังมีราคาถูก ทำให้มีความสนใจในการนำไทเทเนียมมาใช้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหาและมีความยุ่งยากในกระบวนการผลิตอยู่มาก เช่น มีความหนาแน่นต่ำ จึงเกิดรูพรุน (porosity) ได้ง่าย ต้องการเครื่องมือที่มีความซับซ้อนและราคาแพงในขบวนการหล่อแบบ อีกทั้งยังมีความยุ่งยากในขบวนการเชื่อมและการขัดแต่ง จึงยังเป็นข้อจำกัดของการนำไทเทเนียมมาใช้ในการงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะอยู่⁽⁶⁾ นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการใช้งานอยู่มาก เนื่องจากไททาเนียมมีความแข็งแรงต่ำ โครงโลหะจึงมีโครงสร้างที่แข็งแรงน้อย สามารถเปลี่ยนรูปตามแรงที่มากกระทำได้ง่าย มีความต้านทานต่อการล้า (fatigue resistance) ต่ำ และมีความต้านทานต่อการสึก (wear resistance) ค่อนข้างต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในบริเวณที่มีความเค้น (stress) สูง⁽⁷⁾ นอกจากนี้ยังพบว่า มีการแยกตัวของฐานฟันปลอมเรซินออกจากโครงโลหะไททาเนียม มีการเปลี่ยนสีบริเวณผิวของโลหะไททาเนียม และมีรายงานว่าผู้ป่วยบางรายรู้สึกว่าได้รับรสโลหะ⁽⁸⁾

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีความพยายามที่จะพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะไททาเนียมให้ดีขึ้น แต่โดยรวมแล้วพบว่ายังมีข้อดีไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงวัสดุหลักที่ใช้ในงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะ ดังนั้นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมซึ่งเป็นโลหะที่ได้ถูกนำมาใช้ในการงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะมากกว่า 70 ปีแล้ว และได้มีการพัฒนาปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง จึงยังคงเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะอยู่⁽⁹⁾

กลสมบัติ (mechanical properties) ของโครงโลหะที่เหวี่ยงได้ ขึ้นอยู่กับกลสมบัติของโลหะผสมที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ในระยะแรกมีการศึกษาจำนวนมากถึงคุณสมบัติของโครงโลหะผสม

โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ในแง่ความเหมาะสมของกายภาพสมบัติ (physical property) และกลสมบัติ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมมีค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนแรงคราก (yield strength) ระยะการยืดตัว ความอ่อน ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และความแข็งผิว เหมาะสมที่จะใช้ทำโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้^(4, 10-13) ภายได้ข้อกำหนดที่ 14 ว่าด้วยเรื่องวัสดุของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา (American dental association specification number 14)⁽¹⁴⁾ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม จึงเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน

เมื่อสมัย 15 ถึง 20 ปีที่ผ่านมาโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมมีราคาไม่แพง การนำมาใช้ทางทันตกรรมจึงใช้โลหะใหม่ทั้งหมดในการผลิต แต่เนื่องจากในสภาวะเศรษฐกิจปัจจุบัน โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมมีราคาสูงขึ้น ห้องปฏิบัติการหลายแห่งจึงได้นำโลหะเก่าที่เหลือจากการเหวี่ยงครั้งก่อนมาผสมกับโลหะใหม่ในการเหวี่ยงโครงโลหะชิ้นใหม่ เพื่อเป็นการประหยัดโลหะ และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตลง⁽¹⁵⁾ ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อกลสมบัติของโครงโลหะที่ได้ และอาจนำไปสู่ปัญหาโครงโลหะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรหรือหักระหว่างการใช้งาน

จนถึงปัจจุบัน ยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ ต่อคุณสมบัติต่างๆของโลหะ ทั้งในแง่ของกลสมบัติ และกายภาพสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ ในลักษณะที่แตกต่างกัน ผู้ทำการวิจัยจึงได้เห็นว่าควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการนำโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมกลับมาใช้ซ้ำ ต่อคุณสมบัติต่างๆของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะ การผลิตโครงโลหะตามห้องปฏิบัติการต่าง ๆ โดยทั่วไปในแต่ละห้องปฏิบัติการมีหลักปฏิบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจมีผลต่อคุณภาพของโครงโลหะ และเป็นสาเหตุสำคัญของความล้มเหลวในการใช้งานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ ดังนั้น จึงควรมีข้อมูลที่เชื่อถือได้สำหรับรองรับข้อปฏิบัติดังกล่าว และเป็นแนวทางปฏิบัติสำหรับการเหวี่ยงโครงโลหะ โดยนำโลหะเก่ากลับมาหลอมและเหวี่ยงซ้ำ เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และได้มาซึ่งชิ้นงานที่มีคุณภาพในขณะเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าโดยปกติแล้วความล้มเหลวทางกล (mechanical failure) ของโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้มักไม่ได้เกิดขึ้น โดยทันที แต่มักเกิดขึ้นหลังจากการใช้งานเป็นระยะเวลาหลายปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความล้มเหลวนี้อาจจะเกิดจากการที่โครงโลหะเกิดความล้า (fatigue) จากการได้รับความเค้นซ้ำๆเป็นเวลานาน ดังนั้นความต้านทานต่อการล้าจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อความคงทนในทางคลินิกของวัสดุทางทันตกรรม⁽¹⁶⁾ ผู้ทำการวิจัยจึงสังเกตเห็นว่า ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำต่อความต้านทานต่อการล้า

ของแกนยึดของตะขอฟันปลอม ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดต่อการให้แรงยึดแก่ฟันปลอม บางส่วนถอดได้ฐานโลหะ

แกนยึดของตะขอเป็นส่วนประกอบที่พบว่ามักจะเกิดปัญหาตามมาหลังจากการใช้งานฟันปลอมของผู้ป่วยในระยะเวลาหนึ่ง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอ หรือการหักของตะขอจากความล้า⁽¹⁷⁻²¹⁾ ซึ่งสาเหตุหนึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการขีดข่วนต่างๆของตะขอเข้าออกจากส่วนคอด (undercut) ของฟันหลัก (abutment) จากการถอดใส่ฟันปลอม จนผู้ป่วยรู้สึกได้ว่าฟันปลอมหลวม ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบดเคี้ยว การพูด การกลืน ความรู้สึกสบายในขณะสวมใส่ฟันปลอม รวมถึงอาจมีผลเสียดฟันหรือเนื้อเยื่อในช่องปากอีกด้วย ผลที่ตามมาคือผู้ป่วยต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการซ่อมฟันปลอมหรือทำฟันปลอมชิ้นใหม่ ดังนั้นจึงเป็นการลงทุนที่ไม่คุ้มค่าตราบไคที่ยังไม่มีการควบคุมตัวแปรที่สำคัญในการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำอย่างเหมาะสม

งานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของตะขอมีหลายลักษณะซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป เช่น การทดสอบความสามารถในการคืนตัวของตะขอ เช่น งานวิจัยของ Brudvik⁽²²⁾ Frank⁽²³⁾ และ Morris^(24, 25) การทดสอบแรงยึดของตะขอ โดยวัดจากค่าแรงดึงที่ได้จากการดึงตะขอออกจากฟันหลัก เช่น งานวิจัยของ Firtell⁽²⁶⁾ และ Marei⁽²⁷⁾ และการทดสอบความล้าของตะขอ ซึ่งมีการทดสอบ 2 ลักษณะ คือ การทดสอบความล้าแรงยึด (retention fatigue) โดยวัดจากแรงที่ใช้ในการดึงตะขอออกจากฟันหลักที่ลดลงหลังจากจำลองการถอดใส่ตะขอด้วยแรงซ้ำๆเป็นระยะเวลานาน เช่น งานวิจัยของ Bridgeman⁽²⁸⁾ Rodrigues⁽⁹⁾ Kim⁽²⁹⁾ และ Arda⁽³⁰⁾ และการทดสอบความล้าเบี่ยงเบน (deflection fatigue) โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรหรือการหักของตะขอจากให้แรงกดให้ตะขอเบนออกในระบะที่กำหนด ด้วยแรงที่ไม่เกินขีดยึดปฏิบัติการของตะขอซ้ำๆเป็นระยะเวลานาน เช่น งานวิจัยของ Snyder⁽³¹⁾ Vallitu⁽³²⁾ Iwama⁽³³⁾ Lassila⁽³⁴⁾ และ Mahmoud^(35, 36) ซึ่งผู้ทำการวิจัยได้เลือกที่จะทำการทดสอบความล้าเบี่ยงเบนของตะขอ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่เป็นการจำลองสภาวะการใช้งานของตะขอได้ใกล้เคียงกับในคลินิกจริงมากที่สุด

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงความต้านทานต่อการล้าและคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แรงที่จุดคราก (yield point) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น แรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ระยะที่จุดคราก และระยะที่ชิ้นงานแตกหักของตะขอโอบฟันโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่ใช้อัตราส่วนผสมของโลหะเก่าและโลหะใหม่โดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน

คำถามของการวิจัย

การนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าและโลหะใหม่โดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน มีผลต่อความต้านทานต่อการล้าและคุณสมบัติต่างๆของตะขอโลหะที่หล่อได้หรือไม่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความต้านทานต่อการล้าและคุณสมบัติต่างๆได้แก่ แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แรงที่จุดคราก ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น แรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ระยะที่จุดคราก และระยะที่ชิ้นงานแตกหัก ของตะขอโอบพันโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่นำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าและโลหะใหม่โดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน

สมมติฐานของงานวิจัย

สมมติฐานว่าง (H0) : ความต้านทานต่อการล้า แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แรงที่จุดคราก ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น แรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ระยะที่จุดคราก และระยะที่ชิ้นงานแตกหัก ของตะขอโอบพันที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างโลหะใหม่ และโลหะเก่าที่ผ่านการใช้ซ้ำ 1 ครั้ง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

สมมติฐานแย้ง (H1) : ความต้านทานต่อการล้า แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แรงที่จุดคราก ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น แรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ระยะที่จุดคราก และระยะที่ชิ้นงานแตกหัก ของตะขอโอบพันที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างโลหะใหม่ และโลหะเก่าที่ผ่านการใช้ซ้ำ 1 ครั้ง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (laboratory experimental research) ซึ่งจะทำการทดสอบคุณสมบัติและความต้านทานต่อการล้าของแกนยึดของตะขอโอบพันที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่นำมาผ่านการใช้ซ้ำโดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่ากับโลหะใหม่ที่แตกต่างกัน

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. มุมที่ใช้ในการกดชิ้นงานในการศึกษานี้ จะให้แรงกดที่ส่วนปลายด้านในของตะขอในแนวตั้งฉากกับรัศมีของความโค้งของตะขอ และทำมุมกับระนาบตัดขวางของทรงกระบอกเป็นมุม 30 องศา ซึ่งเป็นการจำลองมุมในขณะที่แกนตะขอโอบยึดเคลื่อนตัวผ่านบริเวณส่วนป้อง (height of contour) ของฟัน ซึ่งอ้างอิงมาจากการศึกษาของ Mahmoud ในปี 2007⁽³⁶⁾
2. แรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานในการศึกษานี้ จะให้แรงกดด้วยแรงซ้ำๆที่ไม่เกินขีดยึดปฏิบัติการของตะขอ (proportional limit) ให้ปลายตะขอเบนออกไป 0.25 มม. หรือ 0.01 นิ้ว ซึ่งเท่ากับปริมาณความคอดที่น้อยที่สุดสำหรับตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยง โคบอลต์-โครเมียมที่ให้การยึดอยู่ที่ดี⁽³⁷⁾ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับและใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพื่อเป็นการจำลองการง้างหรือดีดตัวออกของแกนตะขอในขณะที่เคลื่อนผ่านส่วนป้องของฟันเข้าหรือออกจากบริเวณความคอด (undercut) ของฟันในขณะถอดหรือใส่ฟันปลอม
3. ความต้านทานต่อการล้าของตะขอ วัดจากจำนวนรอบของการให้แรงที่ทำให้ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรคือปลายตะขอแอ้ออกจากตำแหน่งเริ่มต้นเป็นระยะ 0.1 มม. ในแนวตั้ง ซึ่งในทางทันตกรรมถือว่าเป็นความล้มเหลวอย่างหนึ่งของงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะ เนื่องจากทำให้แรงยึดฟันปลอมลดลง

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

Cobalt-chromium alloy	โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม
Recycle	การนำกลับมาใช้ซ้ำ
Circumferential cast clasp	ตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยง
Deflection fatigue	ความล้าเบี่ยงเบน
Fatigue resistance	ความต้านทานต่อการล้า
Loading cycles	จำนวนรอบของการให้แรง

ข้อจำกัดของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการล้าของแกนตะขอโอบยึดในห้องปฏิบัติการ จึงไม่สามารถควบคุมบางปัจจัยให้เหมือนในช่องปากได้จริง เช่น อุณหภูมิ และความชื้น แต่สามารถนำผลที่ได้ถ่ายได้สภาวะแวดล้อมและข้อจำกัดของการวิจัยไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ทางคลินิกต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงแนวทางในการควบคุมอัตราส่วนของการนำโลหะเก่าส่วนที่เหลือกลับมาใช้ซ้ำ โดยไม่มีผลกระทบต่อความต้านทานต่อการล้าของตะขอโลหะที่หล่อได้
2. เพื่อให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตโครงโลหะของฟีนปลมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะ โดยที่ไม่ทำให้คุณภาพของโครงโลหะเสียไป

รูปแบบการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experimental research)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทบาทของโครงโลหะในฟันปลอมบางส่วนถอดได้

ฟันปลอมบางส่วนถอดได้ เป็นชิ้นงานทางทันตกรรมที่ใช้ทดแทนฟันธรรมชาติและเนื้อเยื่อเหงือกที่สูญเสียไป โดยที่คนไข้สามารถถอดและใส่ได้ด้วยตนเอง ซึ่งฟันปลอมบางส่วนถอดได้นั้น อาจจะใช้ทดแทนฟันธรรมชาติเพียงหนึ่งซี่หรือมากกว่า ในหนึ่งตำแหน่งหรือหลายตำแหน่งของขากรรไกร ฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ เป็นฟันปลอมบางส่วนถอดได้แบบถาวรชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบส่วนใหญ่ของฟันปลอมเป็นโลหะ ร่วมกับซี่ฟันปลอมซึ่งอาจจะทำด้วยอะคริลิก เรซิน โลหะ หรือพอร์ซเลน และฐานฟันปลอมที่อาจจะเป็นอะคริลิกเรซิน หรือโลหะ⁽³⁸⁾

Davan กล่าวถึงวัตถุประสงค์หลักของการใช้งานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ คือ เพื่อช่วยรักษาอวัยวะบดเคี้ยวภายในช่องปากที่เหลืออยู่ให้สามารถทำหน้าที่ต่อไปได้ และทำหน้าที่ชดเชยการทำงานของอวัยวะบดเคี้ยวที่สูญเสียไป ฟันปลอมบางส่วนถอดได้จึงมีบทบาททั้งในส่วนของ การเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการบดเคี้ยว การออกเสียง ให้ความสวยงาม และในส่วนของ การเป็นเครื่องมือช่วยป้องกัน และพยุงสภาพของอวัยวะบดเคี้ยวภายในช่องปากไม่ให้เกิดความเสียหายมากขึ้น⁽³⁹⁾

โครงสร้างของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะจึงต้องเอื้อต่อการทำงานให้บรรลุตาม วัตถุประสงค์ และในขณะเดียวกันต้องมีความสอดคล้องและเข้ากันได้กับสภาวะภายในช่องปากที่ แวดล้อมฟันปลอมซึ่งมีข้อจำกัดมากมายอีกด้วย โลหะจึงเข้ามามีบทบาทในฟันปลอมบางส่วนถอด ได้ โดยทำหน้าที่เป็นโครงหลักของฟันปลอมที่มีส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงโลหะทำหน้าที่ แตกต่างกันตามความเหมาะสมกับสภาวะภายในช่องปากที่เป็นอยู่⁽⁴⁰⁾

หน้าที่และความสำคัญของโครงโลหะในฟันปลอมบางส่วนถอดได้

หน้าที่ของส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงโลหะที่สำคัญต่อการทำงานของชิ้นฟันปลอม บางส่วนถอดได้ อาจจัดเป็นกลุ่มใหญ่ได้ดังนี้⁽⁴¹⁾

1. รองรับแรงที่ฟันปลอมได้รับ โดยส่วนของเรสท์ (rest) ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกับฐานฟันปลอม (denture base)
2. ให้การยึดอยู่ต่อชิ้นฟันปลอม โดยส่วนยึดหลัก (direct retainer) ซึ่งนิยมใช้ในรูปแบบของตะขอ
3. ให้เสถียรภาพต่อชิ้นฟันปลอม โดยส่วนยึดตรง ส่วนโยงใหญ่ (major connector) ส่วนต้นของแขนยึด (retentive arm) และแขนพยาง (reciprocal arm) ของตะขอ
4. กระจายแรงบดเคี้ยว โดยส่วนโยงใหญ่ (major connector)
5. เชื่อมส่วนประกอบต่างๆ ของโครงโลหะเข้ากับส่วนโยงใหญ่ โดยส่วนโยงย่อย (minor connector)

โดยทั่วไป โครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้จะมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังกล่าวครบถ้วน เพื่อการทำหน้าที่อย่างสมบูรณ์ของชิ้นฟันปลอม แต่รูปลักษณะของโครงโลหะจะมีความแตกต่างกันไปตามสภาวะภายในช่องปากของแต่ละบุคคล ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบโครงโลหะให้สอดคล้องกับสภาวะภายในช่องปากที่เป็นอยู่ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบโครงโลหะเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดความสัมพันธ์อย่างถูกต้องระหว่างส่วนประกอบของฟันปลอมแต่ละส่วน โดยการพิจารณาความจำเป็นและลักษณะที่ควรจะเป็นของแต่ละส่วนประกอบ แล้วจึงประกอบเข้าด้วยกันเป็นชิ้นโครงโลหะที่สมบูรณ์ ซึ่งข้อจำกัดต่างๆของสภาวะภายในช่องปากอาจทำให้การออกแบบโครงโลหะมีความซับซ้อนมากขึ้น จึงต้องคำนึงถึงผลเสียที่อาจเกิดขึ้นกับฟันหลักหรือสันเหงือกที่เหลืออยู่โดยอาศัยหลักทางกลศาสตร์ของแรงและหลักทางสรีรศาสตร์เกี่ยวกับเนื้อเยื่อประกอบการออกแบบ เพื่อให้ฟันปลอมสอดคล้องกับสภาวะภายในช่องปากที่เป็นอยู่โดยไม่เกิดผลในทางลบ⁽⁴²⁾

โดยภาพรวมของบทบาทของโครงโลหะในฟันปลอมบางส่วนถอดได้ จึงเป็นโครงสร้างหลักที่สำคัญโดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่แยกกันทำหน้าที่เฉพาะส่วน เพื่อให้ชิ้นฟันปลอมสามารถทำงานได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ รูปลักษณะของโครงโลหะมีความหลากหลายและแตกต่างกันในคนไข้แต่ละราย หรือแม้แต่ระหว่างขากรรไกรบนกับขากรรไกรล่างในคนไข้คนเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับสภาวะภายในช่องปาก โดยทันตแพทย์จะเป็นผู้กำหนดรูปร่างลักษณะของโครงโลหะนั้น ๆ โดยอิงตามหลักทฤษฎีการออกแบบโครงโลหะในฟันปลอมบางส่วนถอดได้

ส่วนยึดหลัก

ส่วนยึดหลักเป็นส่วนประกอบที่ให้การยึดอยู่แก่ชิ้นฟันปลอม โดยการต้านต่อแรงที่ทำให้ฟันปลอมหลุดในแนวดิ่ง ส่วนยึดหลักชนิดที่เป็นชนิดที่นิยมและใช้บ่อยที่สุดมีหลักการทำงานแบบตะขอ ซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่⁽⁴³⁾

1. ตะขอโอบฟัน (Aker's clasp, circumferential clasp, simple circlet clasp, suprabulge clasp, class I class)
ใช้ในฟันปลอมชนิดรองรับแรงโดยฟันธรรมชาติ ตะขอชนิดนี้มีประสิทธิภาพดี ให้การยึดแน่นและการต้านที่ดี จึงเป็นตะขอที่ควรเลือกใช้เป็นแบบแรกถ้าเหมาะสม
2. ตะขอวงแหวน (ring clasp)
จะโอบรอบฟันเป็นวงกลม มีลักษณะคล้ายวงแหวน โดยแขนตะขอจะวกกลับไปด้านตรงข้ามกับแขนตะขอ มีความยาวมาก อาจแตกหักได้ง่าย จึงอาจต้องมีแขนยันเพื่อเสริมความแข็งแรง
3. ตะขอลอย (back action clasp)
เป็นตะขอที่มีส่วนโงยย่อต่อจากส่วนโงยใหญ่ขึ้นมาที่ฟันหลักจากทางด้านลิ้น โดยส่วนโงยย่อจะรูปปลายตะขอขึ้นมา และโอบรอบและจับฟันโดยมีเรสท์ลอยขึ้นไปบนด้านสบฟัน เป็นตะขอที่ไม่นิยมใช้ จะใช้เฉพาะกรณีที่ใช้ตะขอชนิดอื่นไม่ได้แล้วเท่านั้น เนื่องจากการที่เรสท์ไม่ได้โงยโดยตรงกับส่วนโงยรอง ทำให้ตะขอทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ
4. ตะขอโอบฟันชนิดกลับทาง (reverse approach circumferential clasp)
ตัวตะขอขึ้นจากด้านที่ติดกับฟันธรรมชาติ โดยแขนยึดจะทอดผ่านด้านสบฟันมายึดกับส่วนคอดทางด้านใกล้สันเหงือกกว้าง
5. ตะขอฮาฟแอนด์ฮาฟ (half and half clasp)
เป็นตะขอที่มักจะใช้กับฟันหลักที่อยู่เดี่ยวๆ ซึ่งเดี่ยว (isolated abutment) โดยจะมีเรสท์สองข้าง ข้างหนึ่งต่อกับแขนยึด อีกข้างหนึ่งต่อกับแขนพยุง⁽¹⁾
6. ตะขอแขนวกกลับ (reverse action clasp, Hair pin clasp)
แขนยึดต่อจากส่วนโงยย่อ ทอดเหนือเส้นสำรวจในช่วงแรก ส่วนปลายแขนจะวกกลับเข้าไปอยู่ใต้โคนตะขอ และอยู่ใต้เส้นสำรวจ นิยมทำในฟันหลักที่มีส่วนคอดบริเวณฟันที่ถูกถอนไป และใช้ตะขอบาร์ไม่ได้เนื่องจากสันเหงือกด้านข้างกำบัง มีความคอดมาก หรือร่องรอบปากอยู่สูงที่บริเวณแขนตะขอ
7. ตะขอเอ็มเบรเชอร์ (embrasure clasp)

ใช้ ในกรณีที่ฟันหลักบริเวณนั้นมีฟันอยู่ครบ ไม่มีสันเหงือกกว้าง ต่างกับตะขอคู่ตรงที่มี ตะขอเพียงอันเดียวทอดผ่านด้านสบฟันที่บริเวณซอกฟัน⁽¹⁾

8. ตะขอคู่ (double embrasure clasp, Butterfly clasp)

ทำในกรณีที่ฟันหลักบริเวณนั้นมีฟันอยู่ครบ ไม่มีสันเหงือกกว้าง ประกอบด้วยตะขอ 2 อัน หันหลังชนกันโดยมีตัวติดกัน ตะขอจะผ่านด้านสบฟันที่บริเวณซอกฟัน ต้องทำช่องว่าง สำหรับบ่าตะขอ เพื่อให้มีความหนาพอ ไม่หักง่าย และฟันคู่สบไม่กระแทกตะขอเวลาสบ ฟัน ทำในกรณีที่ฟันหลักบริเวณนั้นมีฟันอยู่ครบ ไม่มีสันเหงือกกว้าง

9. ตะขอมัลติเพิล (multiple clasp)

ประกอบด้วยตะขอโอบฟัน 2 อันหันปลายแขนยึดเข้าหากัน ส่วนแขนพยางค์จะเชื่อมติดกัน จะใช้ในกรณีที่ต้องการยึด (splint) ฟันหลักเข้าด้วยกัน

10. ตะขอบาร์ (class II clasp, bar clasp, roach clasp, infrabulge clasp)

เป็นตะขอที่ออกแบบโดย Roach⁽⁴⁴⁾ แขนยึดจะมีการจับฟันจากทางด้านเหงือก โดยที่โคน ของแขนยึดจะทอดจากส่วนของฐานฟันปลอมจากทางด้านเหงือก ขึ้นไปสู่ส่วนคอคของ ฟัน มีรูปร่างหลายแบบ ได้แก่

1. ตะขอบาร์ที่มีปลายรูปตัวไอ (I Bar)

2. ตะขอบาร์ที่มีปลายรูปตัวที (T bar)

3. ตะขอบาร์ที่มีปลายรูปตัวทีครึ่งซีก (Modified T bar)

ซึ่งตะขอบาร์มีข้อดีคือคลุมฟันน้อย แต่จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อมีความคอคของสันเหงือกได้บาร์ ไม่เกิน 0.03 นิ้ว และมีความลึกของร่องรอบปากที่เพียงพอต่อการวางแขนตะขอ

11. ตะขอโลหะร่วม (combination clasp)

คือตะขอโอบฟันชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วย เรสท์ และแขนพยางค์ทำด้วยโลหะหล่อ ส่วนแขน ยึดทำด้วยลวดโลหะซึ่งเชื่อมติดกับส่วนของโครงยึดฟัน (retentive framework) ซึ่ง แขนยึดที่เป็นลวดโลหะนี้มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถโค้งตัวได้มาก จึงใช้ในฟันปลอม ชนิดไม่มีฟันหลักด้านท้ายได้ มีความสวยงามเนื่องจากลวดมีขนาดเล็ก จึงไม่ปกคลุมซี่ฟัน มาก มองไม่เห็นชัดเจน

12. ตะขออาร์ พี ไอ (RPI clasp)

Kratochvil⁽⁴⁵⁾ เป็นผู้ริเริ่มต้นนำให้ใช้แผ่นข้างฟัน (proximal plate) และเรสท์บนด้านสบฟัน ด้านใกล้กลาง ต่อมาได้ถูกนำมาดัดแปลงโดย Krol⁽⁴⁶⁾ และตั้งชื่อว่าตะขออาร์ พี ไอ ซึ่ง ตะขออาร์ พี ไอ ประกอบด้วย เรสท์ ซึ่งวางอยู่บนด้านสบฟันทางด้านใกล้กลาง (mesial rest) แผ่นข้างฟัน ซึ่งวางแนบกับด้านใกล้กลางของฟัน และแขนไอ (I bar) โดยที่จะไม่มี ส่วนของแขนพยางค์ เนื่องจากหน้าที่การต้านแรงของแขนยึด ได้จากแผ่นข้างฟัน และส่วน โยงย่อยซึ่งต่อกับเรสท์ ช่วยกันทำหน้าที่ต้านยันแขนยึด แทนการมีแขนพยางค์ เป็นตะขอที่ใช้

ในฟันปลอมชนิดไม่มีฟันหลักด้านท้ายได้ เพราะเมื่อมีแรงบดเคี้ยวลงบนฟันปลอม จะไม่เกิดแรงงัดหรือแรงคืดฟันหลัก

13. ตะขออาร์ พี เอ (RPA clasp)

เป็นตะขอที่ใช้แทนตะขออาร์ พี ไอ ในกรณีที่สันเหงือกด้านข้างแก้มมีความโป่งมาก ทำให้เกิดส่วนคอดมากเกินไป ซึ่งถ้าเว้นช่องว่างให้ฟันส่วนคอดจะเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ได้จนตะขอ ทำให้เศษอาหารติดง่าย หรือในกรณีที่ร่องรอบปากตื้น ไม่ลึกพอที่จะสามารถวางแขนของตะขอไอให้ห่างจากขอบเหงือกอย่างน้อย 3 มม.ได้ ตะขอชนิดนี้ต่างจากตะขออาร์ พี ไอ ตรงที่ไม่ใช้แขนไอ แต่ใช้แขนตะขอกลุ่มที่1 แทน โดยแขนตะขอจะต่อจากแผ่นข้างฟันออกมา และมีเรสท์บนด้านสบฟันด้านใกล้กลางเหมือนเดิม บ่าของแขนยึดของตะขอโอบฟัน จะต้องทำให้แนบกับตัวฟันเฉพาะส่วนบนที่บริเวณความป่องของฟันเท่านั้น ส่วนด้านล่างของตะขอจะห่างจากฟันเพียงเล็กน้อย และส่วนปลายของแขนตะขอจะยึดกับความคอดของฟัน โดยจะแนบกับตัวฟันโดยตลอด⁽⁴⁷⁾

การยึดอยู่ของส่วนยึดหลัก

ส่วนยึดหลักแบบตะขอ มีหลักการทำงานคล้ายตะขอ อาศัยการเกาะบนผิวฟันหลักในบริเวณต่ำกว่าส่วนป่องของฟันตามทฤษฎีกรวย (cone theory) ของ Prothero ซึ่งเสนอการยึดอยู่ของฟันปลอมโดยอาศัยส่วนป่องสุดของตัวฟัน เป็นตัวกันตะขอเคลื่อนออกจากส่วนคอดเมื่อมีแรงดึงในแนวตั้ง แรงยึดดังกล่าวจะต้องอยู่ภายในขีดจำกัดที่ไม่ขัดขวางต่อการถอดหรือใส่ฟันปลอมโดยคนไข้ และไม่ทำให้เกิดแรงดันในแนวระนาบต่อฟันหลักมากจนเป็นอันตราย⁽⁴⁸⁾

ดังนั้นแนวคิดในเรื่องปริมาณการยึดอยู่ จึงจำกัดอยู่เพียงแต่ควรเป็นปริมาณน้อยที่สุดที่ไม่ทำให้ฟันปลอมหลุดในขณะใช้งาน ปริมาณการยึดอยู่วัดจากระยะระหว่างตำแหน่งปลายแขนยึดที่อยู่ในส่วนคอดกับส่วนป่องสุดของฟันในแนวระนาบ ซึ่งเรียกว่าปริมาณความคอด ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงแรงยึดอยู่ของฟันปลอมโดยตรง โดยไม่เกี่ยวข้องกับระยะในแนวตั้งจากตำแหน่งส่วนคอดถึงส่วนป่องของฟัน⁽⁴⁹⁾

Bates⁴⁵ ได้เสนอแนะถึงปริมาณความคอดที่น้อยที่สุดสำหรับตะขอ โลหะเหวี่ยงที่ให้การยึดอยู่ที่ควรมีขนาด 0.25 มม. หรือ 0.01 นิ้ว ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับและใช้ในปัจจุบัน การจำกัดปริมาณความคอดเป็นการจำกัดแรงยึดอยู่ และความจำเป็นในการง้างหรือคืดตัวของแขนตะขอ เมื่อเคลื่อนผ่านส่วนป่องของฟันเข้าหรือออกจากตำแหน่งส่วนคอด ซึ่งทางหนึ่งเป็นการป้องกันแรงในแนวระนาบที่เกิดจากตะขอเบียดฟันหลักมิให้มากจนเป็นอันตราย อีกทางหนึ่งเป็นการรักษาสภาพ

ของแกนตะขอมิให้มีการเปลี่ยนรูปเกินขีดยืดปฏิภาค ปริมาณความคอดจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงยึดอยู่ ความปลอดภัยของฟันหลัก และความปลอดภัยของแกนตะขอ

แกนยึดของตะขอเป็นส่วนประกอบของฟันปลอมที่ต้องรองรับความเค้นสะสมสูงมาก ซึ่งเป็นผลรวมจากการที่ตะขอจะต้องดึงตัวผ่านส่วนป้องกันของฟัน เข้าหรือออกจากตำแหน่งความคอด ทุกครั้งที่ใส่หรือถอดฟันปลอม ทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในตะขอทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนรูปร่าง อีกทั้งยังมีความเค้นที่เกิดจากการต้านต่อแรงในแนวตั้งที่พยายามดึงฟันปลอมให้หลุด และความเค้นในแนวระนาบที่เกิดจากการส่งผ่านแรงบิดเฉี้ยว⁽³⁷⁾

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าในการทำงานของแกนยึด มีความเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบสำคัญสามประการ ซึ่งล้วนแต่มีผลต่อความสำเร็จของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ ได้แก่

1. การยึดอยู่ของฟันปลอม
2. ความปลอดภัยของฟันหลักที่ตะขอโอบยึดอยู่ ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงที่ฟันหลักได้รับในขณะที่ตะขอเคลื่อนผ่านส่วนป้องกันของฟัน

3. สมรรถภาพของแกนยึด ในแง่ของความแข็งแรง มีกลสมบัติเหมาะสมกับการทำหน้าที่ เช่น ความสามารถในการคืนตัว การอ้า (displacement) ขีดจำกัดการคืนตัวตามน้ำหนักและระยะอ้าของตะขอ (load and displacement proportional limit) และความทนทานต่อการปรับแต่ง เป็นต้น

แบบของแกนยึดของตะขอที่ดีควรเอื้อต่อการเกิดองค์ประกอบดังกล่าวทั้งสามประการ Bates⁽⁵⁰⁾ ได้แจกแจงถึงปัจจัยสามประการหลักที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบตะขอ และการทำงานของแกนยึดของตะขอโอบฟัน ได้แก่

1. กลสมบัติของโลหะผสม
2. รูปทรงของตะขอ ได้แก่ ความยาว ความโค้ง รูปร่าง ความสอบ และขนาดรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดขวาง
3. ความสามารถในการคืนตัวของตะขอที่สัมพันธ์กับปริมาณความคอดที่ใช้

ปัจจัยทั้งสามประการมีความเกี่ยวข้องและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน กลสมบัติและโลหะผสมที่ใช้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติของแกนตะขอที่ใช้ โดยที่รูปทรงของตะขอเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของแกนตะขอในขั้นสุดท้าย ซึ่งรวมถึงความสามารถในการคืนตัวของแกนตะขอ รูปทรงของตะขอจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถสร้างความแตกต่างในคุณสมบัติของแกนตะขอ ที่ทำจากโลหะผสมชนิดเดียวกันได้ หลายการศึกษาได้ให้ความสำคัญต่อรูปทรงของแกนยึด โดยพยายามศึกษาถึงรูปทรงที่มีประโยชน์มากที่สุด และมีอันตรายในการใช้งานน้อยที่สุด ซึ่งอาจแยกพิจารณาออกเป็น

- รูปร่างของตะขอตามความยาว
- ขนาดและรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดขวาง
- ความยาวของแขนตะขอ
- ความโค้งของตะขอ

รูปร่างของตะขอตามความยาว

ตลอดความยาวของแขนตะขอโอบยี่ห้อ มีความสัมพันธ์ต่อตำแหน่งเส้นสำรวจความคอดแตกต่างกัน Stewart และคณะ⁽⁴⁰⁾ แบ่งแขนตะขอโอบยี่ห้อออกเป็นสามส่วน ประกอบด้วยส่วนปลาย 1/3 ที่อยู่ในความคอดใต้เส้นสำรวจ (survey line) เป็นส่วนที่ให้การยึดอยู่และต้องการความสามารถในการคืนตัวของตะขอสูง ส่วนกลาง 1/3 อยู่เหนือและใต้ต่อเส้นสำรวจ ซึ่งต้องการความสามารถในการคืนตัวของตะขอเล็กน้อยและความแข็งเล็กน้อย และส่วนต้น 1/3 อยู่เหนือเส้นสำรวจซึ่งต้องการความแข็งตึง เพื่อช่วยให้เกิดเสถียรภาพของแขนตะขอ และช่วยด้านการขยับในแนวระนาบของพื้นปลอม ดังนั้นแขนตะขอโอบยี่ห้อหนึ่งข้างจึงต้องการกลสมบัติของโลหะที่แตกต่างกันตามการทำหน้าที่ของแต่ละตำแหน่ง

การกำหนดรูปร่างของตะขอให้มีลักษณะเรียวยากต้นตะขอไปยังปลายตะขอ ทั้งในแนวความกว้างและความหนา โดยมีอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความหนาที่ต้นตะขอต่อความกว้างและความหนาที่ปลายตะขอเท่ากับ 2 : 1 จะช่วยให้ตะขอมีความสามารถในการคืนตัวเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า⁽⁵¹⁾ ทำให้ส่วนปลายตะขอมีความสามารถในการคืนตัว เพียงพอกับการทำหน้าที่อัตราส่วนดังกล่าวเป็นค่าที่ยอมรับทางทฤษฎีในปัจจุบัน Bates⁽³⁷⁾ ได้มองถึงประโยชน์ของการเรียวยาวปลายตะขอ ในแง่ของการป้องกันผลเสียที่เกิดจากการทำหน้าที่ จากการทำงานในลักษณะที่เป็นคานหลักยึดข้างเดียว (cantilever) ทำให้ปลายตะขอมีการเคลื่อนที่มากกว่าส่วนต้นตะขอที่เชื่อมกับเรสท์และส่วนโยงย่อย เกิดความเค้นสะสมที่ต้นตะขอมากกว่าส่วนปลายตะขอ การเรียวยาวปลายตะขอช่วยกระจายความเค้นให้ทั่วทั้งแขนตะขอ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการเพิ่มความสามารถในการคืนตัวของส่วนปลายตะขอ ทำให้ความเค้นที่สะสมบริเวณต้นตะขอลดลง เป็นการช่วยแก้ปัญหาการล้าที่เกิดขึ้นเร็วเกินไปของตะขอด้วยอีกทางหนึ่ง และลดโอกาสเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจากการถอดพื้นปลอมอย่างไม่ระมัดระวัง⁽⁵²⁾

ขนาดและรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดขวาง

รูปร่างของพื้นที่หน้าตัดขวางของแขนยึดของตะขอที่ใช้ในปัจจุบัน มีลักษณะครึ่งวงกลมตลอดความยาวของตะขอ ซึ่งเป็นรูปร่างที่อิงตามแนวความคิดของ Bates⁽³⁷⁾ ที่ได้จากการศึกษาในตะขอความยาว 15 มม. ที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาแตกต่างกัน พบว่า ตะขอหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมมีความสามารถในการคืนตัวดีที่สุด ผลการศึกษานี้นำไปสู่ข้อสรุปว่า หน้าตัดขวางของแขนยึดโลหะหวิ่งควรมีอัตราส่วนระหว่างความกว้างและต่อความหนาเป็น 2 : 1 จึงจะมีความสามารถในการคืนตัวของตะขอเหมาะสมที่สุดสำหรับทำหน้าที่เป็นแขนยึด ขณะที่แขนพยุงควรมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเป็น 1 : 1 จึงจะมีความแข็งแรงสูง และได้ข้อสรุปในรูปของสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างและขนาดพื้นที่หน้าตัดขวางของตะขอกับความแข็งแรงและการอ้าของตะขอ โดยที่การอ้าของตะขอแปรผกผันกับค่าความกว้างและกำลังสามของความหนาดังสมการ

$$\text{elastic deflection} = 4PL^3/Ebd$$

เมื่อ	P	=	load
	L	=	length
	E	=	young's modulus of elasticity
	b	=	width
	d	=	thickness

สมการดังกล่าวอาจแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง และความหนาของตะขอกับความแข็งแรงของตะขอตามที่ Morris และคณะ⁽⁵³⁾ ได้กล่าวไว้ ซึ่งอาจแสดงค่าผ่านทางปริมาณแรงที่ใช้ในการขยับให้ตะขออ้าออก หากตะขอมีค่าความกว้างและความหนามากจะมีความแข็งแรงมาก (อ้าได้น้อย) ต้องใช้แรงมากในการอ้าตะขอ

Yausa และคณะ⁽⁵⁴⁾ ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของมิติของตะขอที่มีต่อความสามารถในการคืนตัวโดยใช้การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis : FEA) และได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแรงที่ใช้ในการทำให้ตะขอเคลื่อนตัวอ้าออก 1 หน่วยกับความหนาและความกว้างของพื้นที่หน้าตัดของตะขอ ว่ามีการแปรผันตามกัน ดังสมการ

$$F(d) = E / Kx(t_1^{1.87} xt_2^{0.72} xw_1^{0.70} xw_{21}^{0.30})$$

เมื่อ	F(d)	=	the load producing a 1 mm. displacement of the clasp tip
-------	------	---	--

E	=	Young's modulus of elasticity,
t_1	=	thickness of the base of the clasp
t_2	=	thickness of the tip of the clasp
w_1	=	width of the base of the clasp
w_{21}	=	width of the tip of the clasp

การศึกษาโดย Morris ในตะขอยาว 10 มม. ที่มีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาแตกต่างกัน 4 ค่า อาจเป็นข้อพิสูจน์ถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี ผลที่ได้พบว่า ในการอ้าของตะขอออกด้วยระยะเท่ากันคือ 0.25 และ 0.5 มม. ตะขอที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่า(2.5) จะใช้แรงในการอ้าของตะขอออกน้อยกว่าตะขอที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาน้อยกว่า (2.1, 1.7 และ 1.3) ตามลำดับ⁽²⁵⁾

ดังนั้น ความกว้างและความหนาของพื้นที่หน้าตัดขวางของตะขอโลหะเหวี่ยงรูปครึ่งวงกลม จึงมีผลต่อความสามารถในการคืนตัวและแรงที่ใช้ในการอ้าตะขอ ซึ่งต้องอาศัยการเลือกขนาดความกว้างและความหนาที่เหมาะสม เพื่อให้มีความสามารถในการคืนตัวมากพอที่จะอ้าออกและเคลื่อนตัวผ่านส่วนป่องของฟัน โดยมีแรงกระทำต่อฟันหลักน้อยที่สุด

ตะขอโลหะเหวี่ยงมีความแข็งแรงสูงกว่าตะขอลวดดัด (wrought wire clasp) เนื่องจากมีความแข็งแรงตามกลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ใช้ มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นผลึก (crystalline structure) และมีหน้าตัดรูปครึ่งวงกลม ในขณะที่ตะขอลวดดัดมีโครงสร้างพื้นฐานแนวยาว (longitudinal structure) และมีหน้าตัดรูปวงกลม แรงที่ใช้ในการอ้าตะขอโลหะเหวี่ยง 0.25 มม. มีค่าสูงถึง 970 – 3,140 กรัม^(53, 55)

ตะขอโลหะเหวี่ยงจึงเหมาะกับฟันหลักที่มีความแข็งแรงและในฟันปลอมที่มีฟันธรรมชาติรองรับ โดยต้องมีแกนพุงที่ดี ส่วนในฟันหลักที่อ่อนแอเหมาะสำหรับตะขอโลหะเหวี่ยงรูปบาร์ ซึ่งมีความยาวมากกว่า ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม Applegate ได้กล่าวถึงความไม่เหมาะสมในการใช้ตะขอโลหะเหวี่ยงรูปบาร์ ในฟันปลอมที่ไม่มีฟันหลักท้ายโดยอ้างถึงหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมของตะขอบาร์ ทำให้ความยืดหยุ่นจากการเพิ่มความยาวที่ไม่พอที่จะลดการส่งผ่านแรงบิดฟันหลัก⁽⁴⁸⁾ การเลือกใช้ตะขอลวดดัดเป็นที่ยอมรับสำหรับฟันปลอมชนิดที่ไม่มีฟันหลักท้าย จากความสามารถในการกระจายแรงเค้นและแรงบิดแรงงัดได้ดี เนื่องจากหน้าตัดตะขอเป็นรูปวงกลมมีความยืดหยุ่นสูง สามารถดัดตัวได้ทุกทิศทาง และมีความเหนียวสูง ทำให้เลือกใช้ขนาดเล็กได้⁽⁴⁶⁾

ตะขอลวดตัดจึงมีข้อได้เปรียบในเรื่องความยืดหยุ่นมากกว่าตะขอโลหะเหวี่ยง ปัจจัยอย่างหนึ่งที่แตกต่างกันระหว่างตะขอสองชนิดคือ รูปร่างของพื้นที่หน้าตัด Frank และคณะ⁽²³⁾ ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของตะขอโลหะเหวี่ยงโคบอลต์-โครเมียมหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาเท่ากับ 2 กับตะขอโลหะเหวี่ยงโคบอลต์โครเมียมหน้าตัดรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.219 มม. (ลวดขนาด 18) พบว่าแรงที่ใช้ในการอัดตะขอออกเป็นระยะ 0.25 มม. มีค่าใกล้เคียงกัน แต่มากกว่าตะขอลวดตัดโคบอลต์-โครเมียมรูปวงกลมขนาดเดียวกันถึง 2 เท่า โดยค่าของแรงจะใกล้เคียงกันหากลดขนาดของตะขอโลหะเหวี่ยงรูปวงกลมลงเป็นขนาด 19 และ 20 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดของตะขอโลหะเหวี่ยงเป็นรูปวงกลม ไม่ทำให้การคืนตัวของตะขอต่างจากตะขอโลหะเหวี่ยงหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมในขนาดเดียวกัน นอกจากจะลดขนาดของตะขอโลหะเหวี่ยงรูปวงกลมให้มีขนาดเล็กกลงจึงจะมีผลให้ความสามารถในการคืนตัวของตะขอเพิ่มขึ้นในระดับใกล้เคียงกับตะขอลวดตัดที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้น รูปร่างและขนาดของพื้นที่หน้าตัดขวางของตะขอโลหะเหวี่ยง จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่อาจเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของตะขอให้ดียิ่งขึ้น

Marei⁽²⁷⁾ ทำการศึกษาเกี่ยวกับแรงที่ใช้ในการดึงตะขอ (tensile force) ที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ที่มีรูปร่างหน้าตัดขวางสองแบบคือ รูปร่างครึ่งวงกลม (half round) และรูปร่างกลม (round) ออกจากพื้นหลักสองชนิดคือ พื้นกรามน้อย และพื้นกราม ที่มีปริมาณความคอดต่างกันสามแบบคือ 0.25 มม. (0.01 นิ้ว) 0.5 มม. (0.02 นิ้ว) และ 0.75 มม. (0.03 นิ้ว) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแรงที่ใช้ในการดึงตะขอทั้งสองแบบออกจากพื้นหลัก ทั้งในพื้นหลักสองแบบและปริมาณความคอดทั้งสามแบบ จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าการนำตะขอโลหะเหวี่ยงรูปร่างหน้าตัดกลมไปใช้มีข้อดีเหนือตะขอลวดตัดในแง่ของความเหมาะสมทางคลินิก และยังคงแรงที่กระทำต่อพื้นหลักในกรณีที่เป็นพื้นปลอมชนิดที่ยั่งยืนได้ เนื่องจากมีรายงานว่าความสามารถในการคืนตัวของตะขอโลหะเหวี่ยงรูปร่างหน้าตัดกลมขนาด 19 หรือ 20 ซึ่งนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการคืนตัวของตะขอลวดตัดขนาด 18⁽²³⁾

ความยาวของตะขอ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างการอัดกับขนาดมิติของตะขอ ความยาวของตะขอแปรผันตามการอัดในปริมาณมากถึงยกกำลังสามเท่า⁽³⁷⁾ การศึกษาของ Johnson and Duncanson⁽⁵⁶⁾ ได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความยาวของตะขอต่อการควบคุมความแข็งแรงว่ามีมากกว่าองศาและรัศมีที่ตะขอโอบ ตะขอยาวมีความแข็งแรงต่ำกว่าตะขอสั้นที่รัศมีและองศาของการโอบเท่ากัน ในกรณีนี้

ต้องการความยืดหยุ่นของตะขอมากจึงเหมาะที่จะใช้ตะขอยาวมากกว่าตะขอสั้น Bate⁽³⁷⁾ กล่าวว่า การเพิ่มความยาวของตะขอในสัดส่วนร้อยละ 50 มีผลให้การ้าของตะขอเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 90 ดังนั้น ในทางปฏิบัติ การออกแบบตะขอโอบยึดจึงมีการเพิ่มความยาวในแนวนกลาง เพื่อเพิ่มความสามารถในการคืนตัวของตะขอนอกเหนือจากความโค้งตามผิวฟันหลักในแนวหน้าหลัง ในทางทฤษฎีแล้ว ตะขอโลหะเหวี่ยงโคบอลต์-โครเมียมหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมควรมีความยาวประมาณ 15 มม. หากตะขอสั้นกว่า 15 มม. จะ้าได้น้อยกว่า 0.05 มม. ที่บริเวณยึดยึดปฏิบัติกร ทำให้อายุการใช้งานลดลง⁽⁵⁷⁾

Brudvik⁽²²⁾ ได้ทำการศึกษาความสามารถในการคืนตัวของแกนยึดของตะขอลวดดัด ที่มีเทคนิคการสร้างในแลปที่แตกต่างกัน พบว่า ตะขอลวดที่ทำการเชื่อมเข้ากับโครงตาข่ายฐานฟันปลอม (base retentive meshwork) มีความสามารถในการคืนตัวมากกว่าตะขอลวดที่ทำการเชื่อมเข้ากับส่วนโยงย่อย และตะขอลวดที่ฝังอยู่ในกระสวนซี่ฟัน แล้วนำไปเหวี่ยง ตามลำดับ หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การที่จุดเชื่อม (solder joint) อยู่ใกล้จุดเริ่มต้นของตะขอจะทำให้ความสามารถในการคืนตัวของตะขอลดลง

ในความเป็นจริงแล้ว ความยาวของตะขอถูกจำกัดโดยขนาดเส้นรอบวงของฟันที่ตะขอโอบ ตำแหน่งความคอดที่ปลายตะขอสั้นสุด และความสูงของฟันหลัก ตะขอที่โอบยึดฟันหลักที่มีขนาดเล็กจึงมีความยาวน้อยและมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะลดความคอดให้มีขนาดน้อยกว่า 0.25 มม. เพื่อลดแรงที่กระทำต่อฟันหลัก แต่ความคิดดังกล่าวไม่ประสบความสำเร็จในทางคลินิก เนื่องจากฟันปลอมมีการยึดอยู่ลดลง ความยาวของตะขอจึงเป็นปัจจัยที่ตายตัวเนื่องจากถูกกำหนดโดยขนาดของฟันหลัก การแก้ปัญหาเนื่องจากความแข็งแรงและแรงจากตะขอจึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ประกอบกับการเพิ่มความยาวของตะขอให้มากที่สุด

ความโค้งของตะขอ

แกนยึดของตะขอมีความโค้งตามการโอบรอบฟันหลักในแนวใกล้กลางไกลกลาง โดยหันด้านที่เป็นพื้นระนาบเข้าหาฟันหลัก Stewart และคณะ⁽⁴⁰⁾ ได้เสนอแนวคิดที่ตะขอควรมีความโค้งมากที่สุดเพื่อเพิ่มความยาวให้มีความสามารถในการคืนตัวสูงขึ้น ตามสมการความสัมพันธ์ของ Bates⁽³⁷⁾ การเพิ่มความโค้งสามารถทำได้ทั้งในแนวใกล้กลางไกลกลางและในแนวนกลาง ซึ่งเป็นความโค้งในระนาบที่แตกต่างกันของตัวตะขอที่มีหน้าตัดครึ่งวงกลม ในแนวใกล้กลางไกลกลางเป็นความโค้งกลมเท่านั้น Johnson, Stratton และ Duncanson⁽⁵⁸⁾ ทำการศึกษาถึงผลของความโค้งตามระนาบแบนของฐานหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีต่อคุณสมบัติของตะขอ พบว่าตะขอที่มีองศาความโค้งมากหรือรัศมีมีความโค้งน้อย มีความแข็งสูงกว่าและต้องใช้แรงมากกว่าในการ้าตะขอ

ออกจากความคอดที่มีความลึกเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับตะขอที่มีองศาความโค้งน้อยหรือรัศมี ความโค้งมาก ผลที่ได้สอดคล้องกับความคิดเห็นของ Bates⁽⁵⁰⁾ ซึ่งกล่าวได้ว่า ตะขอที่โค้งงอจะมี ความแข็งเพิ่มขึ้นทำให้การอ้าน้อยกว่าตะขอตรง ผลของความโค้งงอเห็นได้ชัดเจนในตะขอลวดตัด ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโครงสร้างพื้นฐานภายในโลหะได้ง่าย ณ ตำแหน่งที่โค้งงอจากการ ตัดทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ความสามารถในการคืนตัวน้อยลง และต้องออกแรงมากขึ้น Brudvik and Morris⁽⁵⁵⁾ ได้เสนอแนวความคิดใหม่ในการป้องกันปัญหาดังกล่าว โดยการออกแบบตะขอลวด ตัดให้มีความโค้งเพียงหนึ่งระนาบตามความโค้งของฟันเท่านั้น โดยอ้างถึงคุณสมบัติของตะขอ ที่ได้มีความใกล้เคียงกับลวดที่เป็นเส้นตรง

ความโค้งงอของตะขอที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากความพยายามในการเพิ่มความยาวของตะขอ เป็นความโค้งที่เพิ่มขึ้นบนระนาบของฐานครึ่งวงกลมของหน้าตัดตะขอ ซึ่งจากผลการศึกษาต่าง พบว่ามีผลต่อคุณสมบัติของตะขอแตกต่างกัน ความยาวที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการคืนตัว ของตะขอเพิ่มขึ้น แต่ความโค้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ตะขอแข็งขึ้นเช่นกัน ทางแก้ปัญหามอาจทำได้โดยใน การเพิ่มความยาวนั้นพยายามให้ตะขอมีความโค้งน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ความโค้งงอของตะขอเป็น ปัจจัยที่ค่อนข้างตายตัว เพราะขึ้นอยู่กับความโค้งของผิวฟันและตำแหน่งความคอดเป็นหลัก จึง เป็นการยากที่จะกำหนดความโค้งงอของตะขอให้เป็นไปในทางที่จะเกิดประโยชน์ต่อการออกแบบ ตะขอโดยรวม เช่นเดียวกับความยาวของตะขอ ต่างจากรูปร่างของตะขอตามความยาว ขนาดและ รูปร่างของพื้นที่หน้าตัดขวางของตะขอที่สามารถเปลี่ยนได้ไม่จำกัด

รูปร่างของตะขอโอบฟัน

ในปี 1983 Morris⁽²⁵⁾ ได้ทำการศึกษาแบบกระสวนซี่ฟันของตะขอ (clasp pattern) ที่มีมิติ ต่างๆกันจำนวน 36 แบบ โดยเลือกมา 4 แบบเป็นตัวแทนของตะขอทั้งหมด และทำการทดสอบโดย วิธีให้ความเค้นและปล่อยให้คลายตัว (stress-relaxation testing) พบว่าแบบของตะขอแบบ 3 MA40 ของ Howmedica, Austinal ซึ่งมีขนาดความกว้าง 1.8 มม.หนา 0.72 มม.ที่ระยะ 6 มม.จากปลาย ตะขอ, กว้าง 2.0 มม.หนา 0.87 มม.ที่ระยะ 12 มม.จากปลายตะขอ และกว้าง 2.2 มม.หนา 0.97 มม.ที่ ระยะ 18 มม.จากปลายตะขอ ความสอบในแนวของความหนาเท่ากับ 0.25 และมีสัดส่วนของความ กว้างต่อความหนามากเท่ากับ 2.5 ซึ่งหมายความว่ามีความกว้างและแบน ทำให้มีความสามารถในการคืนตัวที่ดี ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการของแขนยึดของตะขอโอบฟัน และยังใช้แรงน้อยที่สุดในการ ทำให้เกิดการเบี่ยงเบน (deflection) ของตะขอตามที่กำหนด คือ 0.25 และ 0.5 มม. และยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร น้อยที่สุดด้วย นอกจากนี้ยังมี ค่าสูงสุดของการเบี่ยงเบนแบบ

ยืดหยุ่น (maximum elastic deflection) สูงที่สุด และมีค่าดัชนีความแข็งตึง (stiffness index) ต่ำที่สุด จึงจัดว่าเป็น แบบของตะขอที่ดีที่สุดที่จะใช้เป็นตะขอ โอบยึด

การศึกษาของ Morris⁽²⁵⁾ นี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Sato⁽⁵⁹⁾ ในปี 1995 ซึ่งได้ใช้การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมของตะขอโอบฟันชนิดโลหะเหวี่ยง พบว่าแกนตะขอที่มีความสอบในแนวของความกว้างเท่ากับ 0.8 จะมีความเค้นที่ต่ำกว่าตะขอที่มีความสอบขนาดอื่นๆ แกนตะขอที่มีความกว้างและบางจะมีความเค้นน้อยกว่ารูปร่างหน้าตัดแบบอื่นๆ โดยแกนของตะขอควรจะมี ความกว้างที่สุดภายใต้ขอบเขตที่จำกัดของสถานะทางคลินิก เช่น ตำแหน่งของเส้นสำรวจ ปริมาณความคอด ความสูงของฟันหลัก และความสัมพันธ์ของการสบฟัน และได้แนะนำให้ใช้ตะขอที่มีความคอดเท่ากับ 0.8 เช่น ตะขอ 3MA40 ของ Howmedica เพื่อลดการเกิดความล้าและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอ

ต่อมาในปี 1999 Sato และคณะ⁽⁶⁰⁾ ได้ใช้การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการศึกษาถึงผลของความโค้งในแนวตั้ง (vertical curvature) ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างเส้นตรงที่ลากจากโคนตะขอไปยังปลายตะขอและตำแหน่งกึ่งกลางของตะขอ ที่มีต่อแกนยึดที่มีหน้าตัดเป็นรูปครึ่งวงกลม พบว่าถ้าใช้รูปแบบของตะขอตามการศึกษาของ Sato ในปี 1995⁽⁵⁹⁾ ซึ่งมีความสอบในแนวของความกว้าง 0.8 และ มีอัตราส่วนความหนาต่อความกว้างเป็น 3.33 จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงยึดจากการเปลี่ยนแปลงความโค้งในแนวตั้งน้อยมาก และมีการสะสมของความเค้นที่น้อยกว่าตะขอที่มีขนาดและรูปร่างแบบอื่น ซึ่งทำให้ทันตแพทย์สามารถออกแบบตะขอได้โดยง่าย โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลของความโค้งในแนวตั้ง

โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

เป็นโลหะผสมที่ผ่านการดัดแปลงจากโลหะผสมตัวแรกเริ่มที่พัฒนาโดย Elwood Haynes เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมอากาศยานภายใต้ชื่อ Stellite ซึ่งมีโครเมียม โคบอลต์ ทังสเทน และโมลิบดีนัมเป็นส่วนประกอบหลัก Stellite มีความแข็งผิว ความแข็งแรง และต้านทานการสึกกร่อน การดัดสี และทนสูงอุณหภูมิสูงได้ดี ทำให้มีการนำมาผลิตเครื่องมือศัลยกรรม แพทย์ ออโรปีดิกและเครื่องมือทันตแพทย์ด้วยกัน⁽¹¹⁾ โดยมีการจดทะเบียนสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1907 ในชนิดของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม⁽⁴⁾

ในปี ค.ศ. 1929 R.W. Erdle และ C.H.Prange ประสบความสำเร็จในการพัฒนาวัสดุวิธีการ และคุณสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมสำหรับเหวี่ยงเป็นชิ้นงานทันตกรรม ภายใต้

ได้ชื่อทางการค้าว่าไวทาลิอุม “Vitallium” ซึ่งมีการพัฒนากายภาพสมบัติและกลสมบัติให้ดีขึ้น จนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน⁽⁴⁾

องค์การมาตรฐานนานาชาติ (International Standardization for Organization, ISO, 1994) ได้กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมตามข้อกำหนด ISO 6871-1 ในแนวกว้างไว้ดังนี้⁽⁶¹⁾

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมตามมาตรฐานขององค์การมาตรฐานนานาชาติ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
โครเมียม	ไม่ต่ำกว่า 25	-
โคบอลต์	-	ไม่กำหนดแน่นอน
โมลิบดีนัม	ไม่ต่ำกว่า 4	-
โคบอลต์+นิกเกิล+โครเมียม	ไม่ต่ำกว่า 85	เท่ามาตรฐาน ADA
นิกเกิล	หากมากกว่า 0.1% ควรระบุปริมาณและข้อควรระมัดระวัง หากน้อยกว่า 0.1% อาจระบุว่าเป็นโลหะผสมปลอดนิกเกิลได้	

(ที่มา: International Organization for standardization, metal Casting alloys part 1: Cobalt based alloys ISO 6871-1, 1st ed., 1994)

สำหรับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมในปัจจุบันมีองค์ประกอบแตกต่างกันในแต่ละบริษัทที่ผลิต ทำให้มีคุณสมบัติมีความแตกต่างกันออกไป แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบมาตรฐานของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมควรจะประกอบด้วย⁽⁶²⁾

ตารางที่ 2 องค์ประกอบมาตรฐานของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โคบอลต์	62.6
โครเมียม	20.0
โมลิบดีนัม	6.0

นิกเกิล	2.0
แมงกานีส	0.6
อื่น ๆ	1.8

(ที่มา: American societies for metal, A.S.M. Metals Handbook, 1948)

โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมในทางทันตกรรมจึงมีโครเมียม โคบอลต์ และนิกเกิลเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างที่ต้องการ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีผลต่างกัน ได้แก่^(3, 10, 11)

โคบอลต์

โคบอลต์เป็นโลหะพื้นฐาน มีอุณหภูมิหลอมเหลว 1,495 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 8.9 เมื่อผสมกับโครเมียมในช่วงจำกัดช่วงหนึ่งจะได้เป็นสารประกอบละลายของแข็ง (solid solution compound) โคบอลต์มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งผิว สภาพยืดหยุ่นมอดูลัสและความแข็งดึงของโลหะผสม

โครเมียม

โครเมียมมีอุณหภูมิหลอมเหลว 1,890 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 7.18 เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้โลหะผสมมีความเฉื่อย (passive) จากการเกิดโครเมียมออกไซด์ที่ผิวโลหะผสม ช่วยต้านทานการสึกกร่อน แต่ปริมาณโครเมียมที่มากกว่าร้อยละ 32 จะเกิดการสร้างสารประกอบโลหะของโครเมียมและโคบอลต์ ทำให้โลหะผสมเปราะ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ประกอบด้วยโคบอลต์ร้อยละ 70 และโครเมียมร้อยละ 30 จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ⁽⁴⁾

นิกเกิล

นิกเกิลเป็นธาตุที่นำมาใช้แทนโคบอลต์ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าและมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน แต่มีผลทำให้ความแข็งแรงลดลง การยึดตัวเพิ่มขึ้น และลดอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมให้ต่ำลง

โมลิบดีนัม

โมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งให้กับโลหะผสม ลดขนาดเกรนของโลหะผสมให้เล็กลง

ทังสเตน

ทังสเตนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโลหะผสม และทำให้คุณสมบัติเป็นเอกภาพในแต่ละชิ้นโลหะที่หึงได้

แมงกานีส

แมงกานีสมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของโลหะผสม ทำให้อนุกรมมีความเด่นชัด และสามารถทำนายได้ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการยึดตัว และทำหน้าที่ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในขณะที่โลหะผสมหลอม (deoxidizing agent)

เบอร์ลิเดียม

เบอร์ลิเดียมทำให้อนุกรมหลอมเหลวของโลหะผสมลดลง เพิ่มการไหลทำให้เหวี่ยงได้ง่ายขึ้น ช่วยควบคุมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวโลหะ และทำให้โลหะผสมมีเกรนขนาดเล็ก

คาร์บอน

คาร์บอนเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งผิวของโลหะผสมเพิ่มขึ้น และการยึดตัวลดลงจากการเกิดโลหะคาร์ไบด์ (metallic carbide) ปริมาณคาร์บอนที่ใส่ในโลหะผสมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย ซึ่งปริมาณที่แน่นอนเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่ควบคุมคุณสมบัติของโลหะผสม⁽⁶³⁾ ในอัตราส่วนโคบอลต์ต่อโครเมียม 70 ต่อ 30 คาร์บอนจะสามารถละลายได้ในสัดส่วนร้อยละ 0.2 ซึ่งหากมีปริมาณคาร์บอนมากเกินไปจะทำให้โลหะผสมเปราะและมีการยึดตัวต่ำมาก

กลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

สมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกาได้วางข้อกำหนดหมายเลข 14 สำหรับใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมในทางทันตกรรม โดยอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับความต้องการกลสมบัติขั้นพื้นฐานของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมจากรายงานการศึกษาต่าง ๆ แล้วกำหนดเป็นค่ากลสมบัติต่าง ๆ ที่ควรจะเป็น ดังแสดงในตารางที่ 3⁽¹⁴⁾

ตารางที่ 3 กลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมตามข้อกำหนดหมายเลข 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา

ความแรงคราก	ช่วงความเค้น (ปอนด์/นิ้ว ²)	5,000 – 60,000
	ความเครียด (นิ้ว/นิ้ว)	สูงสุด 0.0025
ความทนแรงดึง (ปอนด์/นิ้ว ²)		ต่ำสุด 90,000
ระยะของการยึดตัว (ร้อยละ ภายในระยะวัด 1 นิ้ว)		ต่ำสุด 1.5
ความแข็งผิวร็อคเวลล์ (30 นิวตัน)		ต่ำสุด 50

(ที่มา: Taylor, D. F. and Sweeney, W. T., *J Am Dent Assoc* 54 (January, 1957 : 47)

งานวิจัยเกี่ยวกับการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ

มีรายงานการศึกษาเบื้องต้นที่ทำการศึกษาดังผลกระทบของการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ (recycle) ต่อกลสมบัติของโลหะขึ้นใหม่ที่หิว้งได้ Henriques กล่าวว่า การนำโลหะเก่าจาก ส่วนของสปรูและส่วนกัน กลับมาหลอมและนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยมีการผสมโลหะใหม่เข้ากับโลหะเก่าด้วย ทำให้ราคาของชิ้นงานลดลงได้ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ชิ้นงานโครงโลหะมีราคาถูกลง โดยไม่มีการสูญเสียคุณภาพของชิ้นงานไป⁽⁶⁴⁾ Harcourt กล่าวว่า การหลอมโลหะผสมมากเกินไป นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบ และคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งจะลดการไหลแผ่ (fluidity) ของโลหะผสมลง ดังนั้นจึงแนะนำให้ผสมโลหะใหม่เข้าไปด้วย ในอัตราส่วนของน้ำหนักโลหะใหม่ อย่างน้อยต้องเท่ากับน้ำหนักของโลหะเก่า⁽⁶⁵⁾

Lewis ได้ทำการศึกษาดังการเปลี่ยนแปลงกลสมบัติ ของโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมที่ ผ่านกระบวนการหลอมที่ต่างกัน ได้แก่ หลอมด้วยกระแสไฟฟ้า (induction fusion) หลอมภายใต้ความต้านทาน (resistance fusion) และหลอมด้วยก๊าซออกซิเจนอะเซทิลีน (oxy-acetylene fusion) และนำไปผ่านการหิว้งโลหะจำนวน 5 รุ่น 3 รุ่น และ 3 รุ่นตามลำดับ โดยใช้โลหะเก่าในรุ่นก่อนหน้า หลังจากทดสอบกลสมบัติแล้วเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น พบว่า โลหะหิว้งที่ได้ในแต่ละรุ่นในการหลอมโลหะทั้งสามกระบวนการ มีค่าความทนแรงดึง ร้อยละของการยืดตัว และค่าความแข็งผิววิกเกอร์ (vickers hardness) ลดลง ยกเว้นค่าความทนแรงดึงของโลหะที่หลอมด้วยกระแสไฟฟ้า มีค่าคงที่ใน 3 รุ่นแรก แต่ก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในรุ่นที่ 4 และ 5 เช่นเดียวกัน⁽⁶⁶⁾

ในขณะที่ Hesby และคณะ ได้ทำการทดลองโดยศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงกลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ผ่านการหิว้งซ้ำ 4 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งใช้ชิ้นส่วนของชิ้นโลหะตัวอย่างครั้งก่อนหน้าเป็นโลหะเริ่มต้นโดยไม่มีการผสมโลหะผสมใหม่ลงไป พบว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างน้อยที่สุด 4 ครั้ง โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ ค่าความทนแรงดึง ความแข็งผิวร็อกเวลล์ และค่าร้อยละของการยืดตัวของตัวอย่างในแต่ละรุ่น⁽¹⁵⁾ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของHenriquesที่พบว่าสามารถนำโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ทำให้ความทนแรงล้า (fatigue strength) ของโครงโลหะเสียไป⁽⁶⁴⁾

Nelson และคณะ ได้ศึกษาถึงกลสมบัติของโลหะผสมโดยวัดค่าความทนแรงดึง ความทนแรงคราก ร้อยละของการยืดตัว และความแข็งผิววิกเกอร์ ในโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมที่ผ่านการหิว้งซ้ำตั้งแต่ 1 - 100 ครั้ง ซึ่งทุกครั้งที่ผสมโลหะเก่าที่ผ่านการหิว้งในครั้งก่อนเข้ากับโลหะใหม่ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยในการหิว้งครั้งที่ 1 - 9 จะหิว้งเป็นโครงโลหะพันปลอม

บางส่วนถอดได้แล้วนำไปใช้ในคนไข้เพื่อศึกษาผลการใช้งานในคลินิก ส่วนในครั้งที่ 10 จะเหวี่ยงเป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบกลสมบัติในห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นนำโลหะไปเหวี่ยงซ้ำตามกระบวนการเดิมจนครบ 10 รุ่น ผลที่ได้จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 44 ชิ้น พบว่ากลสมบัติของโลหะและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ของโลหะในแต่ละรุ่นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในฟินปลอมบางส่วนถอดได้จำนวน 90 ชิ้น พบว่ามีแขนตะขอ (clasp arm) หักในฟินปลอม 4 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 4.4 ซึ่ง เป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้น และการใช้โลหะเก่าผสมกับโลหะใหม่ในอัตราส่วนร้อยละ 50 ไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้⁽⁶⁷⁾

Altay และคณะ ได้ทำการศึกษาในโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยใช้สัดส่วนของโลหะเก่าต่อโลหะใหม่เป็นสัดส่วน ร้อยละ 100, ร้อยละ 50, ร้อยละ 75 และร้อยละ 0 และทำการเหวี่ยงโลหะเพียง 1 รุ่น พบว่าสัดส่วนที่ใช้ปริมาณโลหะเก่ามากกว่าร้อยละ 50 มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในของโลหะที่เหวี่ยงได้ โดยสถานะออกซิเดชัน (oxidation) ที่เกิดขึ้นจากการหลอมโลหะ ทำให้เกิดการสูญเสียธาตุโลหะบางส่วน ซึ่งมีผลทำให้กลสมบัติของโลหะเปลี่ยนไป คือ เหวี่ยงได้ยากขึ้น การไหลแผ่ลดลง และความต้านทานต่อการสึกกร่อนลดลง⁽⁶⁸⁾

Khamis ได้ทำการศึกษาถึงผลของการนำโลหะไม่มีตระกูล (non-precious metal alloy) 2 ชนิด ได้แก่ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และ โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมกลับมาใช้ซ้ำต่อพฤติกรรมสึกกร่อนของโลหะ พบว่าสามารถหลอมกลับมาใช้ใหม่ได้ 4 ครั้งโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการสึกกร่อน โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมซึ่งมีโคบอลต์และโมลิบดีนัมเป็นส่วนประกอบมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนสูงกว่าโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม ซึ่งความต้านทานต่อการสึกกร่อนจะสูงขึ้นหากมีส่วนประกอบของโครเมียม เนื่องจากเกิดพันธะระหว่างโคบอลต์กับออกซิเจน และพันธะระหว่างโครเมียมกับไฮดรอกไซด์เป็นแผ่นฟิล์มบางๆขัดขวางการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบของโลหะ ไปยังสารละลายน้ำลาย นอกจากนี้การที่มีโมลิบดีนัมมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์จะเพิ่มแนวโน้มในการเกิดการฉีกขาด (rupture potential) เนื่องจากโมลิบดีนัมจำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยจะเพิ่มความชอบ (affinity) ของพื้นผิวต่อออกซิเจน⁽⁶⁹⁾

ปริญทร ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่ากับโลหะใหม่ และจำนวนครั้งในการใช้โลหะเก่าซ้ำที่มีต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่มตามอัตราส่วนผสมโดยนำหน้าระหว่างโลหะเก่ากับโลหะใหม่ ได้แก่ ร้อยละ 100, ร้อยละ 75 ต่อ 25, ร้อยละ 50 ต่อ 50 และร้อยละ 25 ต่อ 75 ตามลำดับ ตัวอย่างในแต่ละกลุ่มแบ่งออกเป็น 3 รุ่นตามจำนวนครั้งในการใช้โลหะเก่าเป็นส่วนผสมซ้ำ วัดค่ากลสมบัติของตัวอย่างโลหะที่เหวี่ยงได้ 4

อย่าง ได้แก่ ความทนแรงดึง ความเครียดในช่วงความเค้น 5,000-60,000 ปอนด์/นิ้ว² ร้อยละของการยืดตัว และความแข็งผิวร็อกเวลล์ (rockwell's hardness) ผลการวิจัยสรุปได้ว่า เฉพาะคุณสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงโดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะแก่ร้อยละ 25 กับโลหะใหม่ร้อยละ 75 โดยที่โลหะแก่ผ่านการเวียนใช้ซ้ำ 1 ครั้งเท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา สำหรับนำมาใช้ทำโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้⁽⁷⁰⁾

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาในทำนองเดียวกันในโลหะผสมชนิดอื่นๆ ด้วย Horasawa พบว่าโลหะผสมซิลเวอร์-พอลลาเดียม (silver-palladium alloy) สามารถหลอมกลับมาใช้ใหม่ได้ในจำนวนครั้งที่จำกัด โดยพบว่าพฤติกรรมการสึกกร่อนยังคงเป็นที่น่าพอใจจนถึงการขึ้นรูปครั้งที่ 4 และจะเกิดการเสื่อมสลาย (degradation) อย่างมากในการขึ้นรูปครั้งที่ 5⁽⁷¹⁾ Péraire พบว่าโลหะมีตระกูล (noble alloy) และโลหะผสมนิกเกิล (nickel-based alloy) มีเสถียรภาพที่ดีทั้งในแง่ของส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และการปล่อยออกซิเจนจนถึงการขึ้นรูปครั้งที่ 7 ส่วนโลหะมีตระกูลสูง (high noble alloy) จะมีการลดลงของสังกะสีและดีบุกอย่างเห็นได้ชัด และไทเทเนียมจะมีความแข็งผิววิคเกอร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในการขึ้นรูปครั้งที่ 5 จึงไม่แนะนำให้ทำการขึ้นรูปไทเทเนียมซ้ำ เนื่องจากความแข็งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โลหะเปราะมากขึ้น ซึ่งอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติทางคลินิกได้⁽⁷²⁾

ต่อมาในระยะหลังๆ ได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการขึ้นรูปซ้ำต่อการนำโลหะไปใช้ทางคลินิกมากขึ้น เช่น Hong ได้ทำการศึกษาถึงผลของการขึ้นรูปซ้ำต่อชั้นออกไซด์ ระหว่างโลหะผสมพอลลาเดียม-ซิลเวอร์และพอร์ซเลน (palladium-silver porcelain alloy) พบว่ามีความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้น และมีรูพรุนขนาดเล็กที่ด้านในของบริเวณชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้นในแต่ละรุ่นของการนำโลหะแก่กลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งอาจมีผลต่อการเชื่อมของโลหะกับพอร์ซเลน ทำให้การนำโลหะผสมซิลเวอร์-พอลลาเดียมกลับมาเวียนใช้ซ้ำยังเป็นที่น่าสงสัยอยู่⁽⁷³⁾ Lopes พบว่าการขึ้นรูปซ้ำของโลหะผสมทำให้ความแนบสนิทตามขอบของชิ้นงานลดลง และพบว่าการใช้โลหะใหม่อย่างเดียวยังได้ชิ้นงานที่มีความแนบสนิทตามขอบมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ⁽⁷⁴⁾ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ayad ซึ่งพบว่า การขึ้นรูปซ้ำของโลหะผสมทองชนิดที่ 3 (type III gold alloy) มีผลเสียต่อความแนบสนิทตามขอบของครอบฟัน แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้ไม่ได้มีนัยสำคัญทางคลินิกแต่อย่างใด⁽⁷⁵⁾

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ มีหลายรูปแบบซึ่งส่วนหนึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เป็นผลจากการใช้ฟันปลอมเป็นระยะเวลาานาน ๆ เช่น ตำแหน่งศูนย์สบ (centric occlusion) เปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงสมดุลในการสบเขื่องฟันอันเนื่องมาจากซี่ฟันปลอมสึก การสูญเสียเสถียรภาพหรือการยึดอยู่ของฟันปลอม เป็นต้น ความเสียหายอีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นกับส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟันปลอมโดยตรง เช่น ซี่ฟันปลอมหลุดออกจากฐานฟันปลอม อะคริลิก ฐานอะคริลิกแตกหรือหลุดออกจากโครงโลหะ และโครงโลหะหัก เป็นต้น

การแตกหักของฟันปลอม ถือว่าเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของความล้มเหลวในการใช้งานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ที่พบเห็นได้ทั่วไป ฟันปลอมบางส่วนถอดได้แม้ว่าจะเป็นฟันปลอมทั้งปากหรือฟันปลอมบางส่วนล้วนแต่มีอายุการใช้งานที่จำกัด ฟันปลอมถอดได้มักมีแนวโน้มที่จะแตกหักได้หลังจากใช้งาน 2 – 3 ปี⁽⁷⁶⁾ ซึ่งสำหรับฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะแล้ว นับเป็นความล้มเหลวที่มีความสูญเสียมาก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทำฟันปลอมชนิดนี้สูงกว่าฟันปลอมถอดได้ชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของโครงโลหะ

ความชุกและตำแหน่งที่โครงโลหะหัก

Derry and Bertram⁽¹⁷⁾ ได้สำรวจการใช้ฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะในคนไข้จำนวน 54 รายหลังจากใช้งานนาน 2 ปี พบว่ามีส่วนประกอบของโครงโลหะหักทั้งหมด 13 ตำแหน่งจาก 615 ตำแหน่ง คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 2 ซึ่งประกอบด้วย ซิงกูลุมเรสต์ (cingulum rest) 5 ตำแหน่งจาก 118 ตำแหน่ง (คิดเป็นร้อยละ 4) แขนตะขอบาร์ 1 ตำแหน่งจาก 43 ตำแหน่ง (คิดเป็นร้อยละ 1) เรสต์บนด้านบดเคี้ยว 1 ตำแหน่งจาก 212 ตำแหน่ง (คิดเป็น ร้อยละ 0.5) และแขนยึดของตะขอ 6 ตำแหน่งจาก 242 ตำแหน่ง (คิดเป็นร้อยละ 2) การศึกษานี้พบความชุกของการหักของโครงโลหะในอัตราต่ำ และตำแหน่งที่หักจำกัดอยู่เฉพาะส่วนประกอบที่มีมิติขนาดเล็ก

การศึกษาโดย Bergman และคณะ⁽¹⁸⁾ ในคนไข้ 30 ราย พบความชุกของโครงโลหะหักมากขึ้น โดยในฟันปลอมจำนวน 33 ชิ้นที่ได้ติดตามตั้งแต่ 1 ถึง 10 ปี และมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 8 – 10 ปี พบว่ามีโครงโลหะหลวมซึ่งทำให้ฟันปลอมสูญเสียการยึดอยู่และเสถียรภาพถึง 10 ชิ้น (คิดเป็นร้อยละ 30) ในขณะที่มีโครงโลหะหัก 2 ชิ้น (คิดเป็นร้อยละ 6)

Ben-Ur และคณะ⁽¹⁹⁾ กล่าวถึงการหักของโครงโลหะว่าเป็นสิ่งที่พบได้เป็นปกติ โดยกล่าวถึงความชุกของโครงโลหะหักที่รวบรวมได้ว่ามีค่าตั้งแต่ร้อยละ 8.7 – 11.8 โดยมีช่วงอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 2.5 – 5 ปี Vallittu และคณะ⁽²⁰⁾ ได้สำรวจฟินปลอมถอดได้ที่ถูกส่งไปซ่อมตามห้องปฏิบัติการ 24 แห่ง ในช่วงเวลา 1 เดือน จากฟินปลอมจำนวน 226 ชิ้น มีฟินปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ 32 ชิ้น ซึ่งในจำนวนนี้มีปัญหาโครงโลหะหัก 18 ชิ้น (คิดเป็นร้อยละ 56) โดยหักที่ตะขอ 7 ชิ้น (คิดเป็นร้อยละ 22) และส่วนอื่น ๆ 11 ชิ้น (คิดเป็น ร้อยละ 34)

Sandu⁽²¹⁾ และคณะได้ใช้การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อที่จะทำการศึกษาถึงการกระจายของความเค้น (stress distribution) ของตะขอโอบฟิน พบว่าตำแหน่งที่เสี่ยงต่อการแตกหักของตะขอมากที่สุดคือ บริเวณรอยต่อของส่วนแขน (arm) และส่วนต้น (body) ของตะขอ นอกจากนี้ยังทำการประเมินความล้าของตะขอพบว่าแขนยึดของตะขอโอบฟิน มีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 5.5 ปี

กระบวนการหักของโลหะและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การหักของวัสดุเป็นผลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการที่ซับซ้อน และมีลำดับขั้นภายในวัสดุนั้น ๆ รูปแบบของการหักที่สังเกตเห็นได้ภายนอกอาจเกิดได้หลายลักษณะ เช่น หักในทันทีทันใด หักเมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ หรือหักภายหลังจากที่มีการเปลี่ยนรูป เป็นต้น ความแตกต่างกันของรูปแบบการหัก ทำให้มีความเป็นไปได้ที่กระบวนการที่ดำเนินไปก่อนเกิดการหักนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการเริ่มแรกนั้นจำกัดอยู่ในระดับที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้การศึกษาทฤษฎีที่สามารถอธิบายขั้นตอนของกระบวนการดังกล่าวอย่างถูกต้องนั้นทำได้ยาก

การหักที่เกิดขึ้นในโลหะอาจแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ⁽⁷⁷⁾

1. การหักเปราะ (brittle fracture) หมายถึง การหักในลักษณะที่เกิดรอยร้าว (crack) ขึ้นภายในวัสดุ และมีการแพร่กระจายรอยร้าวไปตลอดชิ้นวัสดุก่อนหรือ ณ จุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนรูป (plastic flow) ขึ้น ตัวอย่างที่ชัดเจนคือการแตกหักของแก้ว แต่สำหรับโลหะ การหักเปราะเริ่มต้นจากการเกิดการเปลี่ยนรูปภายในโลหะก่อน ซึ่งเกิดในบางตำแหน่งในระดับที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น โดยเกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนตำแหน่ง (dislocation) ของระนาบต่าง ๆ ของผลึกโลหะ (crystal plane) ปฏิกริยาระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นในหลาย ๆ ระนาบผลึก ทำให้เกิดการสะสมความเค้นขึ้นภายใน (stress concentration) ค่าของแรงที่เกิดขึ้นอาจมีค่าถึง 10^6 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งมากกว่าแรงดึงคูระหว่างผลึกโลหะ ทำให้ผลึกโลหะแยกตัวออกจากกัน เกิดเป็นรอยร้าวและแพร่กระจาย

ไปจนเกิดการหักเปราะหักแรงเต็มที่ทำให้เกิดรอยร้าวที่มีค่าสูงกว่าที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายรอยร้าว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลสมบัติของโลหะ

2. การหักยืด (ductile fracture) หมายถึง การหักที่เกิด ณ จุดสุดท้ายของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร เริ่มต้นจากการเกิดรอยร้าวเมื่อได้รับแรงกระทำเช่นเดียวกับการหักเปราะ แต่จะเกิดในบริเวณที่มีอนุภาคแทรก (impurity particles) ในโลหะ เช่น ออกไซด์ (oxide) และอินคลูชัน (inclusion) เป็นต้น แรงที่มากระทำอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายนอกของโลหะที่สามารถสังเกตเห็นได้ ตัวอย่างเช่น การเกิดรอยคอดรูปคอดของชิ้นตัวอย่างในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ขณะเดียวกันกับที่ภายในโลหะก็เกิดรอยร้าวจำนวนมากขึ้น และมีการกระจายตัวรวมกลุ่มและเชื่อมต่อกัน การเปลี่ยนรูปร่างในอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดช่อง (cavity) ที่ขยายตัวออกภายนอกในจังหวะที่รอยคอดภายนอกขยายเข้าด้านใน จนเกิดการหักในลักษณะเฉือน (shear) ในที่สุด ข้อสังเกตสำหรับการหักยืดคือจะดำเนินไปก็ต่อเมื่อเกิดความเครียดภายในโลหะเท่านั้น โดยรอยร้าวจะหยุดเมื่อการเปลี่ยนรูปร่างหยุด หรือแรงที่กระทำต่อโลหะคลายตัวลง

3. การหักจากความล้า (fatigue fracture) นอกเหนือจากการหักในสองลักษณะ ซึ่งเป็นหักที่เกิดขึ้นโดยตรงกับโลหะแล้ว การหักของโลหะอาจเป็นผลสืบเนื่องจากการสะสมความล้าในการใช้งานได้อีกด้วย กระบวนการที่เกิดขึ้นคล้ายกับการหักเปราะและการหักยืด แต่มีปัจจัยเสริมที่แตกต่างกัน การหักจากความล้าเริ่มต้นโดยเกิดรอยร้าวจากความล้าบริเวณผิว ที่ได้รับความเครียดดึงจากแรงที่กระทำเป็นรอบ (cyclic loading) มีลักษณะเป็นรอยเปิดเล็ก ๆ ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวเล็กน้อยในทิศทางด้านหน้าหลัง (antero-posterior) ของกลุ่มระนาบผลึกที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งที่บริเวณใกล้ผิวด้านนอกและมีการขยายตัวในอัตราที่ช้ามาก เมื่อเริ่มมีรอยเปิด ก็เพียงแค่อายุเวลาที่รอยร้าวจะขยายตัวจนถึงขนาดที่ทำให้โลหะหักได้ในที่สุด ดังนั้นสถานะของพื้นผิวโลหะจึงมีความสำคัญในการควบคุมการหักจากความล้า โดยจะต้องเรียบ ปราศจากตำแหน่งสะสมความเค้น และมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับ โครงสร้างภายใต้ผิวโลหะนั้น

การหักของโลหะทั้งสามลักษณะล้วนแต่เป็นผลจากแรงที่มากระทำ แรงทำให้กระบวนการหักของโลหะเริ่มต้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายใน ซึ่งนำไปสู่การหักในลักษณะต่าง ๆ เมื่อแรงที่มากระทำนั้นเกินจากสมคูลที่โครงสร้างภายในโลหะต้านทานได้ การหักของโลหะจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับกลสมบัติของโลหะในแง่ของความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงภายใน ซึ่งกำหนดโดยองค์ประกอบพื้นฐานของโลหะ และรูปแบบของแรงที่มากระทำทั้งในด้านปริมาณ ช่วงเวลา และทิศทางของแรง ดังนั้นแรงและกลสมบัติของโลหะจึงเป็นปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการหักของโครงโลหะ และอาจนำมาใช้อธิบายสาเหตุของการหักของโครงโลหะในพื้นป्लอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะได้

สาเหตุของการหักของโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้

เมื่ออ้างอิงตามทฤษฎีที่อธิบายกระบวนการหักของโลหะ ปัจจัยที่เป็นสาเหตุจะต้องทำให้เกิดรอยร้าวภายในโครงโลหะ ก่อนที่กระบวนการจะสิ้นสุดในลักษณะที่โครงโลหะหัก Bates⁽³⁷⁾ กล่าวถึงสาเหตุการหักของโครงโลหะว่าเป็นเพราะการขาดความรู้ในการออกแบบโครงโลหะให้เหมาะสมกับโลหะผสมที่เลือกใช้ ร่วมกับการขาดความรู้ในเรื่องแรงในช่องปากที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำให้ฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะหักได้ แนวความคิดของ Bates⁽³⁷⁾ อาจจัดได้ว่าอยู่บนความสำคัญของปัจจัยที่เป็นสาเหตุ 2 ประการเช่นเดียวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหักของโลหะทั่วไป คือแรงที่เกิดขึ้นและกระทำต่อชิ้นฟันปลอมในขณะที่ใช้งาน และกลสมบัติของโลหะผสม

1. แรงที่เกิดขึ้นและกระทำต่อฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะในขณะที่ใช้งาน

แนวความคิดเกี่ยวกับสาเหตุการหักของโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับแรงบดเคี้ยว เป็นผลจากการศึกษาและติดตามผลการใช้งานที่พบว่า ความเสียหายของชิ้นฟันปลอมนอกจากมีสาเหตุจากแรงที่มากระทำต่อชิ้นฟันปลอมโดยตรง เช่น จากการกระแทกแล้ว ความเสียหายส่วนหนึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในขณะใช้งานโดยที่ฟันปลอมไม่มีประวัติการได้รับแรงกระแทกมาก่อน ในปี 1993 Vallittu⁽²⁰⁾ และคณะ ศึกษาถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฟันปลอมถอดได้ จำนวน 226 ชิ้น ซึ่งมีทั้งฟันปลอมทั้งปากฐานอะคริลิก ฟันปลอมบางส่วนชนิดอะคริลิก และฟันปลอมบางส่วนชนิดโครงโลหะ พบว่ามีสาเหตุจากการบดเคี้ยวถึงร้อยละ 61 ขณะที่สาเหตุจากการกระแทกเพียงร้อยละ 39 ภาพรวมของความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จึงเป็นผลจากแรงบดเคี้ยวที่กระทำต่อฟันปลอมเป็นประจำ นอกจากนี้ยังพบว่าการหักของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะมีนัยสำคัญกับชนิดของฟันคู่สบ โดยส่วนใหญ่ฟันปลอมบนที่หักจะสบกับฟันปลอมบางส่วนถอดได้มากกว่าฟันธรรมชาติและฟันปลอมทั้งปาก ขณะที่ฟันปลอมล่างที่หักสบกับฟันปลอมทั้งปากบนมากกว่าฟันธรรมชาติและฟันปลอมบางส่วนถอดได้บน แสดงถึงแรงบดเคี้ยวที่ทำให้โครงโลหะหักมิได้จำกัดเฉพาะแรงที่มาจากฟันธรรมชาติเท่านั้น แต่อาจเป็นแรงจากฟันปลอมบางส่วน หรือฟันปลอมทั้งปากได้เช่นกัน ถึงแม้ว่าฟันธรรมชาติสามารถสร้างแรงบดเคี้ยวในปริมาณสูงกว่าฟันปลอมบางส่วนและฟันปลอมทั้งปากก็ตาม

การศึกษาโดย Lassila, Holmlund และ Loivumaa⁽⁷⁸⁾ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบดเคี้ยวกับการหักของโครงโลหะมากยิ่งขึ้น ในผู้ป่วยจำนวน 89 รายที่ฟันปลอมมีการใช้งาน 6 เดือน - 1 ปี พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าแรงกัดที่วัดได้กับการหักของโครงโลหะ ทั้งในกลุ่มที่ใส่ฟันปลอมทั้งปากบนสบกับฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ

ล่างและกลุ่มที่ฟันบนเป็นฟันธรรมชาติ หรือฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะกับฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะล่าง การศึกษาของ Vallittu⁽²⁰⁾ และ Lassila⁽⁷⁸⁾ ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบดเคี้ยวกับการหักของโครงโลหะ ซึ่งอาจเกิดจากการใช้งานร่วมกันระหว่างฟันปลอมถอดได้ หรือระหว่างฟันปลอมกับฟันธรรมชาติ ถึงแม้ว่า การศึกษาดังกล่าวไม่สามารถอธิบายถึงสาเหตุที่แรงบดเคี้ยวทำให้โครงโลหะหักก็ตาม

1.1 แรงที่เกิดขึ้นขณะมีการทำงานของอวัยวะบดเคี้ยว

ในสภาวะที่ฟันธรรมชาติต้องรับแรงตลอดเวลาทั้งในขณะเคี้ยว กลืน และสภาวะพัก ทำให้ฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ ที่ใส่ทดแทนฟันธรรมชาติบางซี่ต้องอยู่ในสภาวะเดียวกัน ในวงจรการเคี้ยว 1 รอบ ฟันปลอมต้องรับแรงบดเคี้ยวในแนวตั้งจากการกัด แรงในแนวระนาบจากการกัดเฉียง แรงในแนวทแยงเฉียงที่เป็นผลรวมของแรงในแนวตั้งและแนวระนาบ และแรงดึงในแนวตั้งจากอาหารเหนียว⁽⁷⁹⁾ รวมถึงแรงดันในแนวระนาบจากด้านข้างของลิ้นในขณะกลืนและพัก ซึ่งจะยังมีค่ามากขึ้นหากปีกฟันปลอมด้านใกล้ลิ้นมีความหนาเพิ่มขึ้น⁽⁸⁰⁾ แรงเหล่านี้ควรจะถ่ายทอดลงสู่ส่วนรองรับโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะเหล่านั้นในฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะที่ออกแบบอย่างถูกต้อง

1.2 การถ่ายทอดแรงผ่านฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ

ฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะ ทำงานโดยอาศัยการถ่ายทอดและกระจายแรงบดเคี้ยว แรงจากการกลืน และแรงจากลิ้นในขณะพักที่ฟันปลอมได้รับลงสู่ส่วนรองรับ ฟันปลอมเป็นเสมือนตัวร่วมสร้างแรงและเป็นตัวกลางในการส่งผ่านแรง โดยที่ส่วนหนึ่งถ่ายทอดลงสู่เนื้อเยื่อผ่านฐานฟันปลอม อีกส่วนหนึ่งถ่ายทอดลงสู่ฟันหลักและเนื้อเยื่อเพดานผ่านทางองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เป็นโครงโลหะ การศึกษาถึงกลวิธีในการถ่ายทอดแรงมีความสำคัญต่อความสำเร็จ และความล้มเหลวของฟันปลอม รวมถึงการคงสุขภาพที่ดีของเนื้อเยื่อที่เหลืออยู่ภายในช่องปากได้

จุดเริ่มต้นในการกระจายแรงมักอยู่ที่ฐานฟันปลอมส่วนที่เชื่อมกับโครงโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟันปลอมที่ไม่มีฟันหลักทำ ในกรณีการกระจายแรงผ่านฟันปลอมจะมีแรงส่วนหนึ่งถูกดูดซับเข้าไปในชั้นฟันปลอม ซึ่งค่าของแรงที่ถูกดูดซับมักไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ของโครงโลหะ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรให้เห็นในทันทีทันใด⁽⁸¹⁾ การศึกษาโดย Ogata, Miyake และ Okunishi⁽⁸²⁾ ในปี 1992 ในฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดโครงโลหะที่ไม่มีฟันหลักทำ พบว่าอัตราการกระจายแรงจากฐานฟันปลอมไปยังตะขอข้างเคียงอยู่ในช่วงร้อยละ 20 - 30

ของปริมาณแรงที่ได้รับ โดยเป็นอัตราคงที่ภายหลังจากใช้งานฟันปลอมนาน 1 - 1.5 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่เคยทำไว้เมื่อปี ค.ศ. 1991 โดย Ogata และคณะ⁽⁸³⁾ ที่ได้วัดแรงถ่ายทอดจากฐานฟันปลอมไปยังตะขอโอบฟัน แล้วพบว่าผลรวมของแรงที่ตะขอได้รับเกิดจากการรวมขนาดและทิศทางของแรงที่ถ่ายทอดมา โดยค่าเฉลี่ยของแรงในแนวตั้งมีค่าคงที่ภายหลังจากใช้งาน 4 - 6 เดือน อาจทำให้คิดได้ว่าปริมาณแรงส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 70 - 80 ส่วนใหญ่ถ่ายทอดลงสู่สันเหงือก และมีบางส่วนสะสมอยู่ในโครงโลหะ

1.3 แรงสะสมในโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้ กับการหักของโครงโลหะ

การดูดซับแรงในขณะฟันปลอมกระจายแรงที่ได้รับ ทำให้เกิดการสะสมภายในโครงโลหะตามบริเวณต่าง ๆ การสะสมความเค้นในโครงโลหะอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการหักของโครงโลหะ จากข้อสังเกตที่พบว่าส่วนของโครงโลหะที่หักมักเป็นบริเวณที่มีความเค้นสะสม เช่น บริเวณส่วนต้นของแขนยึด ส่วนโยงหลัก และส่วนโยงรองที่เป็นอินไดเร็คทีเวนเนอร์ เป็นต้น⁽⁸⁴⁾ การสะสมความเค้นภายในโครงโลหะเป็นผลให้เกิดการล้าขึ้น การล้าในระดับต่ำกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่นจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายนอกที่สังเกตเห็นได้

Bates⁽³⁷⁾ กล่าวว่า ความล้าว่าเป็นเพียงหนึ่งในหลายกระบวนการที่ส่งผลให้โครงโลหะหักเท่านั้น เนื่องจากพบว่าขีดจำกัดความล้า (fatigue limit) ของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียม มีค่าสูงกว่าขีดยึดปฏิภาค และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในช่องปากนั้นไม่ค่อยทำให้เกิดการสะสมความเค้นจนเกินขีดจำกัดความล้า เช่น ค่าความเค้นที่วัดได้ในลิงกวลบาร์ของฟันปลอมชนิดไม่มีฟันหลักทำมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของขีดยึดปฏิภาคและขีดจำกัดความล้า⁽⁴⁷⁾ ความล้าจะมีบทบาทมากขึ้นหากมีปัจจัยที่เอื้อต่อการสะสมความเค้นภายในโครงโลหะอยู่ด้วย เช่น รูพรุนภายในโครงโลหะ บริเวณมุมแหลมของโครงโลหะ⁽¹⁹⁾ การเกิดการแข็ง(work hardening) จากแรงปรับแต่งด้วยคีม รวมถึงกลสมบัติของโลหะผสมที่ใช้ เป็นต้น

หากวิเคราะห์ถึงผลกระทบของแรงที่สะสมในโครงโลหะ ที่มีต่อการหักของโครงโลหะอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลจากการสะสมความเค้นภายใน ซึ่งโดยปกติทำให้เกิดความล้าในระดับต่ำ แต่เมื่อมีปัจจัยบางอย่างที่เพิ่มการสะสมความเค้นในระดับที่สูงขึ้นจนเกินขีดยึดปฏิภาคและขีดจำกัดความล้า ก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโครงโลหะ หากถึงระดับที่สูงกว่าค่าความทนแรงดึง และเกินกว่าที่กลสมบัติของโครงโลหะต้านทานได้ก็จะหักในที่สุด

2. กลสมบัติของโลหะผสม

กลสมบัติของโลหะผสม เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการหักของโครงโลหะ ความบกพร่องในกลสมบัติของโลหะผสม เป็นสาเหตุสำคัญของการหัก Ben-Ur⁽¹⁹⁾ ได้อธิบายถึงสาเหตุของความบกพร่องในกลสมบัติของโลหะผสมที่ใช้ทำโครงโลหะที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. เกิดจากตำหนิภายในโครงโลหะ โดยการมีสิ่งปนเปื้อนหรือผลิตภัณฑ์บางอย่างจากการเหวี่ยงโลหะที่ส่งผลกระทบต่อกลสมบัติของโลหะผสมที่ได้ ได้แก่ อินคลูชัน (inclusion), ฟองอากาศ, รูพรุน, วัฏภาคคาร์ไบด์ (carbide phase) และ โครงสร้างเดนไดรต์ (dendritic pattern) โดยที่

- ฟองอากาศและรูพรุน ทำให้โลหะมีความหนาไม่เท่าที่ควรจะเป็นและมีช่องว่างภายในซึ่งเป็นจุดอ่อนโดยเป็นจุดต้นกำเนิดรอยร้าวเมื่อโครงโลหะได้รับแรง เช่นเดียวกับสิ่งปนเปื้อนที่ทำให้เกิดเป็นอินคลูชันในเนื้อโลหะ
- วัฏภาคคาร์ไบด์ ปริมาณคาร์บอนที่มากเกินไปในส่วนผสม (ร้อยละ 1 - 1.5) ทำให้โลหะที่แข็งตัวเร็วมีวัฏภาคคาร์ไบด์เป็นปริมาณมาก ส่งผลกระทบต่อโลหะผสมโดยลดความแข็งแรงและการยึดตัวลง ขณะที่ความเปราะเพิ่มขึ้น ในโลหะเหวี่ยงที่หักมักพบว่าวัฏภาคคาร์ไบด์เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่และต่อเนื่องกันจำนวนมาก
- โครงสร้างเดนไดรต์ เป็นผลต่อเนื่องจากวัฏภาคคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ที่ทำให้โครงสร้างเดนไดรต์มีขนาดเล็ก โลหะผสมมีการยึดตัวลดลง

ตำหนิเหล่านี้ทำให้กลสมบัติของโครงโลหะที่ได้มีค่าต่ำกว่าปกติ ความสามารถในการต้านทานต่อแรงที่มากกระทำลดลงและหักได้ง่าย

2. เป็นผลจากการเหวี่ยงโลหะซึ่งไม่ใช่ตำหนิ การหักของโครงโลหะที่ปราศจากตำหนิ นั้นเป็นผลจากการที่โลหะนั้นมีเกรน (grain) ขนาดใหญ่ ซึ่งทนต่อความเค้นได้ต่ำ แนวทางในการอธิบายเกี่ยวข้องกับอัตราการเย็นตัวของโลหะผสมภายหลังจากเหวี่ยง โดยบริเวณที่โลหะบางจะเย็นตัวเร็วกว่า การเปลี่ยนแปลงเป็นของแข็งเกิดได้พร้อมกันทำให้เกรนมีขนาดเล็ก ขณะที่บริเวณที่โลหะหนามีการเย็นตัวไม่พร้อมกันทั้งก่อนและช้ากว่าบริเวณที่โลหะบาง ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วโลหะที่มีเกรนขนาดเล็กมีกลสมบัติดีกว่าโลหะเกรนใหญ่ สามารถต้านต่อการเกิดการเปลี่ยนรูอย่างถาวรได้แข็งแรงกว่า มีค่าความแข็งแรงดึงและความยืดหยุ่นสูงกว่า ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด คือ การหักของแกนยึดของตะขอโอบพันโลหะเหวี่ยงซึ่งมักหักที่ต้นตะขอ เนื่องจาก

ลักษณะที่ตะขอเรียวยาวปลายส่วนต้นตะขอจึงมีขนาดมิติใหญ่กว่าปลายตะขอ ทำให้ยื่นตัวซ้ากว่า เกิน เกรนขนาดใหญ่กว่ากลางตะขอและปลายตะขอตามลำดับ

นอกจากนี้การเกิดความล้าของโลหะในช่องปากยังเป็นผลมาจากการเกิดการกัดกร่อนของโลหะตามธรรมชาติเนื่องจากของเหลวในช่องปาก ซึ่ง การกัดกร่อนของโลหะจะช่วยเสริมความรุนแรงของแรงที่มากระทำทำให้เกิดการเจริญเติบโตของรอยแตกที่เกิดจากการได้รับแรงให้เพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาของ Lassila และ Vallittu⁽³⁴⁾ ในปี 1998 พบว่าน้ำและน้ำลายมีผลลดความแข็งแรงต่อการล้าของโลหะผสม โคบอลต์-โครเมียม ได้เนื่องมาจากการเกิดการกัดกร่อนของโลหะผสมภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เปียก โดยพบว่าค่าความต้านทานต่อการล้าเฉลี่ย (mean fatigue resistance) ของแท่งตัวอย่างที่อยู่ในที่แห้งมีค่า 78,000 รอบ ของแท่งตัวอย่างที่อยู่ในน้ำลายเทียมมีค่า 59,000 รอบ และของแท่งตัวอย่างที่อยู่ในน้ำมีค่า 36,000 รอบ

แต่อย่างไรก็ตามน้ำลายเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมไม่ให้เกิดได้ ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาโครงโลหะหัก จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่สามารถทำได้ ที่จะส่งผลกระทบต่อกลสมบัติของโครงโลหะ เป็นต้นว่า การออกแบบขนาดมิติของส่วนประกอบต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการรับแรง การคำนึงถึงทฤษฎีการกระจายแรงในการออกแบบโครงโลหะ และการควบคุมกระบวนการในห้วงปฏิบัติการในขั้นตอนการเหวี่ยงโลหะ เพื่อให้โครงโลหะที่ได้มีกลสมบัติที่ดี

งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบความล้าของตะขอ

งานวิจัยส่วนมากจะทำการศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานต่อการล้าของตะขอที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกัน ซึ่งงานวิจัยจำนวนหนึ่งทำการทดสอบความล้าแรงยึดของตะขอ โดยวัดจากแรงที่ใช้ในการดึงตะขอออกจากฟันหลักที่ลดลงหลังจากจำลองการถอดใส่ตะขอด้วยแรงซ้ำๆเป็นระยะเวลา เช่น งานวิจัยของ Bridgeman⁽²⁸⁾ ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความล้าแรงยึดของตะขอที่ทำจากไททานเนียมบริสุทธิ์ โลหะผสมไททานเนียม และโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โดยจำลองสภาวะการถอดใส่ฟันปลอมทางคลินิกของผู้ป่วยเป็นเวลา 3 ปี ด้วยการถอดใส่ตะขอเข้าออกจากแบบจำลองฟันหลัก 500 ครั้ง จากนั้นจึงใช้คีมตัดตะขอ 1 ครั้ง และทำขั้นตอนเดิมซ้ำอีก 10 รอบ พบว่า ถ้าใช้ปริมาณความคอดน้อย (0.25 มม.) ทำให้การยึดอยู่ของตะขอที่ทำจากโลหะไททานเนียมบริสุทธิ์ โลหะผสมไททานเนียม Ti - 6Al - 4V และโลหะผสมโคบอลต์ - โครเมียม ไม่แตกต่างกันเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลา 3 ปี แต่ถ้าใช้ปริมาณความคอดมาก (0.75 มม.) ตะขอที่ทำจากโลหะไททานเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสมไททานเนียม Ti - 6Al - 4V จะมีการสูญเสียการยึดอยู่ของตะขอน้อยกว่าตะขอที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์ - โครเมียม

Rodrigues และคณะ⁽⁹⁾ ได้เปรียบเทียบแรงยึดของตะขอที่ทำจากไททานเนียมบริสุทธิ์ 1 ชนิด และโลหะผสมโคบอลต์ – โครเมียม 2 ชนิด โดยจำลองการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 ปี ด้วยการถอดใส่ตะขอเข้าออกจากแบบจำลองฟันหลักจำนวน 7,250 รอบ พบว่า ถึงแม้ว่าตะขอที่ทำจากโลหะไททานเนียมสามารถคงสภาพการยึดอยู่ของตะขอได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามยังคงเหลือแรงยึดอยู่ของตะxonน้อยกว่าตะขอที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

Kim และคณะ⁽²⁹⁾ ทำการศึกษาเปรียบเทียบความล้าแรงยึดของตะขอที่ทำจากโลหะผสมไททานเนียม-นิกเกิล ลวดดัด (wrought wire) โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และโลหะผสมทองชนิดที่ 4 พบว่า ภายหลังจากการเลียนแบบการถอดใส่ฟันปลอมเป็นเวลา 3 ปี โดยทำการถอดใส่ 500 ครั้ง จำนวน 10 รอบ พบว่าตะขอทุกชนิดมีแรงยึดที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม ตะขอที่ทำจากโลหะผสมไททานเนียม-นิกเกิล มีการสูญเสียแรงยึดน้อยกว่าตะขอที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

Arda และ Arikan⁽³⁰⁾ ทำการศึกษาความล้าแรงยึดของตะขอที่ทำจากอะซิทิลเรซิน(acetyl resin) เปรียบเทียบกับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม พบว่า หลังทำการเลียนแบบการถอดใส่ตะขอทางคลินิกเป็นเวลา 36 เดือน ด้วยการถอดใส่ตะขอ 1,380 รอบ พบว่า ตะขอที่ทำจากอะซิทิลเรซินมีแรงยึดที่ต่ำกว่าตะขอที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามตะขอที่ทำจากอะซิทิลเรซินไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงยึดอย่างมีนัยสำคัญตลอดการทดลอง จึงอาจเป็นไปได้ว่าอาจนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการความสวยงามมาก หรือกรณีที่ฟันเป็นโรคปริทันต์ซึ่งต้องการตะขอที่มีความยึดหยุ่นมาก

งานวิจัยอีกส่วนหนึ่งจะทำการทดสอบความล้าเบี่ยงเบนของตะขอ โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือการหักของตะขอจากการให้แรงกดให้ตะขอเบนออกในระยะเวลาที่กำหนด ด้วยแรงที่ไม่เกินขีดยึดปฏิบัติการของตะขอซ้ำๆเป็นระยะเวลานาน เช่น งานวิจัยของ Snyder⁽³¹⁾ ในปี 1992 ซึ่งทำการศึกษาความล้าเบี่ยงเบนของตะขอโอบฟัน ที่ทำจากโลหะผสมไททานเนียมที่ผ่านการทำให้เบนออกเป็นระยะทาง 0.01 นิ้ว จำนวน 1500 รอบ ซึ่งเป็นการจำลองการถอดใส่ ฟันปลอมวันละ 2 ครั้ง ซึ่งตะขอดัดตัวผ่านส่วนป้องกันของฟันวันละ 4 ครั้ง เป็นเวลานาน 1 ปี พบว่าการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอไม่มีความสัมพันธ์กับ รูปร่าง หรือสัดส่วนความกว้างต่อความหนาของตะขอ

Vallittu และ Kokkonen ในปี 1995⁽³²⁾ ได้เปรียบเทียบความต้านทานต่อการล้าของตะขอที่ทำจากโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ โลหะผสมโคบอลต์ – โครเมียม ไททานเนียมบริสุทธิ์ โลหะผสมไททา

เนียม Ti – 6Al – 4V และโลหะผสมทองชนิดที่ 4 โดยให้แรงกดแบบโลหะหล่อของกระสวยขึ้นตั้ง ตะขอโอบพื้นหน้าตัดครึ่งวงกลม ในลักษณะที่เป็นแผ่นแบน ให้เบนออกเป็นระยะ 0.6 มม. ไปเรื่อยๆ และวัดจำนวนรอบที่ทำให้แรงที่ใช้ในการเบนตะขอลดลง 20% และจำนวนรอบที่แบบตะขอ เกิดการหัก พบว่าตะขอโลหะทั้ง 4 ชนิดมีความต้านทานต่อการล้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเรียง ตามลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ โลหะผสมโคบอลต์ – โครเมียม (25,000 รอบ) โลหะผสมทองชนิด ที่ 4 (21,000 รอบ) โลหะผสมไททานเนียม Ti – 6Al – 4V (20,000 รอบ) และไททานเนียมบริสุทธิ์ (4,500 รอบ) นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการเพิ่มความต้านทานต่อการล้าของตะขอโดยการกระตุ้นตะขอ ด้วยการตัดตะขอให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรประมาณ 0.5 มม. ซึ่งพบว่าจะทำให้ความ ต้านทานต่อการล้าของตะขอที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์ – โครเมียม และโลหะผสมทองชนิดที่ 4 เพิ่มขึ้นได้ตั้งแต่ร้อยละ 43.56 – 164.50 แต่ทำให้ความต้านทานต่อการล้าของตะขอที่ทำจากโลหะ ไททานเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสมไททานเนียมลดลงร้อยละ 18.29 และ 53.67 เขาจึงแนะนำว่า ควร หลีกเลี่ยงการตัดตะขอที่ทำจากโลหะไททานเนียม

Iwama⁽³³⁾ ในปี 1997 ทำการศึกษาเปรียบเทียบความล้าเบี่ยงเบนระหว่างโลหะผสมโคบอลต์ -โครเมียม-5%ไททานเนียม และโลหะผสมโคบอลต์ -โครเมียมชนิดไวทาลเลียม(vitallium) โดยให้แรง กดแบบโลหะหล่อของกระสวยขึ้นตั้งตะขอโอบพื้น ในลักษณะที่ยังเป็นแผ่นแบนให้เบนออกเป็น ระยะ 0.5 มม. ไปเรื่อยๆจนกระทั่งแบบโลหะหล่อหัก พบว่าโลหะผสมโคบอลต์ – โครเมียม-5%ไท ทานเนียม มีค่าขีดจำกัดความล้าเบี่ยงเบน(flexure fatigue limits)จำนวน 30,240 รอบ ซึ่งสูงกว่า โลหะผสมโคบอลต์ – โครเมียมชนิดไวทาลเลียมซึ่งมีค่าเท่ากับ 23,645 รอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากการศึกษาของ Lassila และ Vallittu⁽³⁴⁾ ในปี 1998 โดยได้ทำการทดลองทำแท่งตัวอย่าง ทดสอบอยู่ในภาชนะปิดที่ใส่ของเหลวลงไปได้ และทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของแท่งตัวอย่างซ้ำๆ เป็นปริมาณ 0.6 มม. และวัดจำนวนรอบจนกว่าจะเกิดการแตกหัก โดยพบว่าค่าความต้านทานต่อ การล้าเฉลี่ย ของแท่งตัวอย่างที่อยู่ในที่แห้งมีค่า 78,000 รอบ ของแท่งตัวอย่างที่อยู่ในน้ำลายเทียมมี ค่า 59,000 รอบ และของแท่งตัวอย่างที่อยู่ในน้ำมีค่า 36,000 รอบ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้น้ำและ น้ำลายมีผลลดความทนแรงล้าของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมได้ เนื่องมาจากการเกิดการสึก กร่อนของโลหะผสมภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เปียก

ในปี 2005 Mahmoud⁽³⁵⁾ ได้ทำการศึกษาถึงความล้าจากการเบี่ยงเบนของตะขอที่ทำจาก โลหะ Ti-6Al-7Nb, โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม และ โลหะผสมทอง โดยให้แรงทำให้เกิดการ เบี่ยงเบนของตะขอซ้ำๆ เป็นระยะตามค่าที่ตั้งไว้สามค่าคือ 0.25 มม. 0.5 มม. และ 0.75 มม. เพื่อ จำลองเปรียบเทียบการทำงานของตะขอที่ปริมาณความกดของฟันที่แตกต่างกัน โดยจะหยุดการ

ทดสอบเมื่อแรงที่ใช้ในการเบนตะขอลดลงจนน้อยกว่า 15% ของแรงเริ่มต้น หรือเมื่อทำการทดสอบครบ 10^6 รอบ และจะทำการวัดผลจากจำนวนรอบที่ตะขอได้รับแรงก่อนจะเกิดความล้า (cycles to failure) และปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอ (ไมครอน) ดังแสดงในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 ผลการวิจัยพบว่า ตะขอที่ทำจากโลหะผสม Ti-6Al-7Nb มีความต้านทานต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอสูงกว่าตะขอแบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนโลหะผสมทองมีค่าอายุของการล้า (fatigue lives) สูงกว่าตะขอแบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และได้แนะนำว่าตะขอที่ทำจากโลหะผสม Ti-6Al-7Nb และโลหะผสมทอง เหมาะที่จะนำมาใช้ในกรณีที่มีปริมาณความคอดของฟันหลักมากกว่า 0.25 มม.

ตารางที่ 4 : ตารางแสดงจำนวนรอบที่ตะขอได้รับแรงก่อนจะเกิดความล้าของตะขอโลหะ 3 ชนิด ที่ระยะการเบี่ยงเบนที่ตั้งไว้ 3 ค่า

ระยะการเบี่ยงเบนที่ตั้งไว้ (preset deflection)	โลหะผสมไททานเนียม (Ti-6Al-7Nb)	โลหะผสมทอง	โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม
0.25 มม.	ไม่เกิดการหัก	ไม่เกิดการหัก	ไม่เกิดการหัก
0.50 มม.	22,469 รอบ	120,500 รอบ	28,929 รอบ
0.75 มม.	2,875 รอบ	32,375 รอบ	15,806 รอบ

(ที่มา : ดัดแปลงมาจากตารางแสดงผลการทดลองของ Mahmoud, A., Wakabayashi, N., Takahashi, H. and Ohya, T. Deflection fatigue of Ti-6Al-7Nb, Co-Cr, and gold alloy cast clasp. *J Prosthet Dent* 93,2(2005):183-188)

ตารางที่ 5 : ตารางแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอโลหะ 3 ชนิด ที่ระยะการเบี่ยงเบนที่ตั้งไว้ 3 ค่า

ระยะการเบี่ยงเบนที่ตั้งไว้ (preset deflection)	โลหะผสมไททานเนียม (Ti-6Al-7Nb)	โลหะผสมทอง	โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม
0.25 มม.	9.6 ไมครอน	13.4 ไมครอน	14.0 ไมครอน
0.50 มม.	27.4 ไมครอน	40.0 ไมครอน	114.4 ไมครอน
0.75 มม.	64.7 ไมครอน	132.0 ไมครอน	298.1 ไมครอน

(ที่มา : ดัดแปลงมาจากตารางแสดงผลการทดลองของ Mahmoud, A., Wakabayashi, N., Takahashi, H. and Ohya, T. Deflection fatigue of Ti-6Al-7Nb, Co-Cr, and gold alloy cast clasp. *J Prosthet Dent* 93,2(2005):183-188)

ในปี 2007 Mahmoud ⁽³⁶⁾ ได้ทำการวิจัยในลักษณะคล้ายเดิม พบว่า การกระตุ้นตะขอ (pre-overloading) ที่ทำจากโลหะ Ti-6Al-7Nb ด้วยแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของตะขอในปริมาณ 20 ไมครอนในตอนแรก จะช่วยทำให้ความต้านทานต่อการล้าของตะขอเพิ่มขึ้น โดยจากการให้แรงซ้ำๆที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของตะขอ ในความถี่ 5 เฮิรตซ์จนเกิดการแตกหักของตะขอ พบว่าตะขอที่ได้รับแรงกระตุ้นดังกล่าวในตอนแรกมีจำนวนรอบที่ตะขอได้รับแรงก่อนจะเกิดการแตกหักของตะขอ ($32,200 \pm 17,300$ รอบ) มากกว่าตะขอที่ไม่ได้รับแรงกระตุ้น ($17,900 \pm 7,600$ รอบ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผู้ทำการวิจัยได้สังเกตเห็นว่าการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำอาจเป็นปัจจัยอีกประการหนึ่งที่อาจส่งผลทำให้คุณสมบัติของโลหะผสมที่ใช้ทำโครงโลหะของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ มีค่าต่ำกว่าปกติ ทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อแรงที่มากกระทำลดลง เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรและหักได้ง่าย จึงได้ทำการวิจัยนี้ขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลของการนำโลหะเก่ามาใช้ซ้ำต่อคุณสมบัติและความต้านทานต่อการล้าของตะขอโลหะที่หล่อได้ เพื่อเป็นแนวทางปฏิบัติสำหรับการเหวี่ยงโครงโลหะโดยนำโลหะเก่าหลอมและเหวี่ยงซ้ำต่อไป เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและให้ได้มาซึ่งชิ้นงานที่มีคุณภาพในขณะเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากรเป้าหมาย

ตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยงที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ซึ่งเป็นโลหะผสมที่นิยมใช้ในการทำโครงโลหะของของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ฐานโลหะในปัจจุบัน

2. ประชากรตัวอย่าง

ตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยงที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม(cobalt-chromium alloy, Vitallium, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.) หมายเลขรุ่น 2223 จำนวน 45 ชิ้น

3. กลุ่มตัวอย่าง

3.1 ตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยง ที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ในอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็นโลหะใหม่ร้อยละ 100 (โลหะใหม่ทั้งหมด) จำนวน 15 ชิ้น

3.2 ตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยง ที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ในอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างโลหะใหม่กับโลหะเก่าเป็นร้อยละ 50 ต่อ 50 จำนวน 15 ชิ้น

3.3 ตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยง ที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม ในอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็นโลหะเก่าร้อยละ 100 (โลหะเก่าทั้งหมด) จำนวน 15 ชิ้น

ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรอิสระ คือ อัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่ากับโลหะใหม่

ตัวแปรตาม คือ คุณสมบัติและความต้านทานต่อการล้าของตะขอ

ตัวแปรควบคุม คือ ขนาดและรูปร่างของตะขอ วัสดุและวิธีการที่ใช้ในการเหวี่ยงขึ้นโลหะตัวอย่าง

เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องทดสอบสากล (universal testing machine, Instron 8872, MA, USA)
2. เครื่องเหวี่ยงชนิดอาศัยแรงหนีศูนย์กลางขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (centrifugal casting machine ,Induction Casting Machine ECM4, Dentsply, USA)
3. เตาเผา (universal burnout furnace, Dentsply, USA)
4. เครื่องเป่าทราย (sandblaster, Thailand)

5. เครื่องอัดความดันไฮดรอลิก (flask press model, Meenum, Thailand)
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Thailand)
7. เครื่องถ่ายภาพรังสี (gendex, Gendex dental system, Desplains, IL, U.S.A.)
8. เครื่องวัดอย่างละเอียด (digimatic caliper, Mitutoyo, japan)
9. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ (stereo microscope, ML 9300 MEIJI, Japan)
10. เครื่องล้างฟิล์ม (DENT-X 810 Plus, KAB dental Inc., sterling heights, MI, U.S.A.)
11. เครื่องมือแต่งจีฟี่ง (wax spatula No.7, Thailand)
12. เป้าหลอมชนิดเซรามิก (ceramic casting crucible, Vitallium crucible, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.)
13. แผ่นคาร์บอร์นดัม (caborundum separating disc No.17, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.)
14. หัวกรอหินชนิดหยาบ และชนิดละเอียด (coarse and fine stone, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.)
15. ภาชนะหล่อแบบฟีน (flask, Thailand)
16. เครื่องทำความสะอาดด้วยไอน้ำ (steam cleaner, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.)

วัสดุที่ใช้

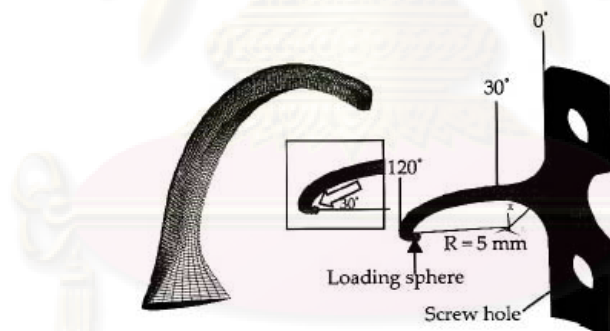
1. โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (cobalt-chromium alloy, Vitallium, Dentsply, Austenal, U.S.A.)
2. อินเวสต์เมนต์ชนิดซิลิกาบอนด์ (Silica bonded Investment, V.R. investment system, Dentsply, Austenal, York, PA,U.S.A.)
3. อินเวสต์เมนต์ชนิดซิลิกาบอนด์แบบละเอียด(fine Silica bonded Investment, Dentsply, Austenal, York, PA,U.S.A.)
4. ปูนทันตกรรมชนิดที่ 4 (stone type IV, Velmix, Daimond rock, The siam moulding plaster, Saraburi, Thailand)
5. จีฟี่งแผ่นสีชมพู (pink baseplate wax, Dentsply, Detray, England)
6. กระสวนจีฟี่งตะขอแบบพรีฟอร์ม (preformed clasp pattern : 21M, Flexseal patterns, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.)
7. วัสดุพิมพ์ ซิลิโคน แอคดิชันแนล ชนิดความหนืดปานกลาง (medium type additional silicone, Express, 3M ESPE, Germany)
8. วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนชนิดปั้นได้ (putty type silicone impression material, Lab putty 90, Vertex Dental, Zeist, Netherlands)

9. ขี้ผึ้งแกนค้ำรูเท (sprue wax pattern, Dentsply, Austenal, York, PA, U.S.A.)
10. ผงทรายละเอียด ขนาด 70 micron (Thailand)
11. วาสลีน (vasline, Thailand)
12. อะคริลิกเรซินสำหรับสร้างแบบชนิดบ่มด้วยตนเอง (self cure inlay pattern resin , Dura Lay, Worth, ILL, U.S.A.)
13. ฟิล์มถ่ายภาพรังสีในช่องปากโกดักอัลตราสปีด ขนาด4 (Kodak ultra-speed dental film : size4, Eastman Kodak company, U.S.A.)

วิธีการทดลอง

1. กระบวนการเตรียมชิ้นงาน

ทำการออกแบบชิ้นงานตัวอย่างตามแบบที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Mahmoud ในปี 2007⁽³⁶⁾ ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปแขนยึดของตะขอโอบฟัน โดยส่วนต้นตะขอเริ่มต้นจากเพลท (plate) ซึ่งเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม.จำนวน 2 รู สำหรับยึดสกรู (screw) เข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล และโค้งไปตามพื้นผิวของท่อทรงกระบอกที่มีรัศมี 5 มม.เป็นมุม 120 องศา โดยมีคูมรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม.ที่ด้านในส่วนปลายตะขอเพื่อเป็นจุดในการให้แรงกด

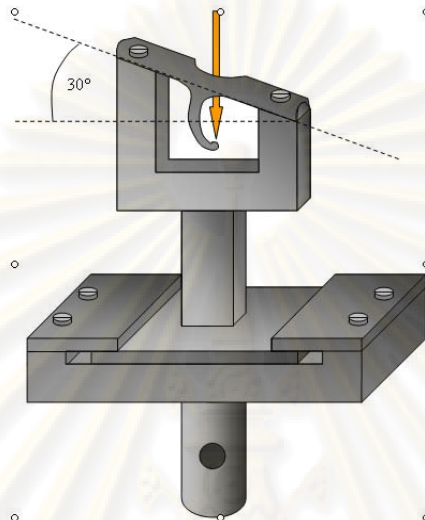


รูปที่ 1 แสดงชิ้นงานตัวอย่าง และมุมในการกดขึ้นตัวอย่างโลหะที่คูมบริเวณด้านในส่วนปลายของตะขอ (ตั้งฉากกับแนวรัศมีความ โค้งของตะขอ และทำมุมกับระนาบตัดขวางของท่อทรงกระบอกเป็นมุม 30 องศา)

(ที่มา : Mahmoud, A. Pre-overloading to extend fatigue life of cast clasps. *J Dent Res* 86,9(2007):868-872

ทำการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 โดยส่วนบนที่ใช้ยึดกับชิ้นงานจะเป็นรูปทรงครึ่งทรงกระบอกที่มีรัศมี 5 มม. และเป็นระนาบเอียง

ทำมุม 30 องศา เพื่อที่เวลายึดชิ้นงานแล้ว แรงจะกดลงที่มุมบริเวณด้านในส่วนปลายของตะขอ ในแนวตั้งฉากกับแนวรัศมีมีความโค้งของตะขอ และทำมุมกับระนาบตัดขวางขอทรงกระบอกเป็นมุม 30 องศา ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการจำลองมุมในขณะที่แขนยึดเคลื่อนตัวผ่านบริเวณส่วนป่อง (height of contour) ของฟัน⁽³⁶⁾ จากนั้นทำการกลึงอุปกรณ์ที่ยึดชิ้นงานตามแบบที่ต้องการด้วยโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 2 แสดงการยึดชิ้นตัวอย่าง โลหะเข้ากับอุปกรณ์ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง โดยมีขั้นตอนในการทำ 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 การทำแบบขี้ผึ้งขึ้นตัวอย่างต้นแบบ

นำแท่งโลหะรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี 5 มม. ความสูง 30 มม. มาเป็นแบบจำลองแทนฟันหลัก ทำการพิมพ์แท่งโลหะด้วยวัสดุพิมพ์ปากชนิดซิลิโคน แอดดิชันแนล ชนิดความหนืดปานกลาง และนำไปเทแบบด้วยอินเวสต์เมนต์ชนิดซิลิกาบอนด์เพื่อใช้ในการวางแบบขี้ผึ้งซึ่งจะนำไปเหยียงเป็นชิ้นงานโลหะต่อไป ทำการวัดระยะบนแท่งอินเวสต์เมนต์และขีดเส้นด้วยดินสอดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง และวาดเส้นรัศมีทำมุม 120 องศา กับเส้นผ่าศูนย์กลางที่วาดไว้ตอนแรก ทำการวางแบบขี้ผึ้งลงบนแท่งอินเวสต์เมนต์ดังรูปที่ 3 โดยเริ่มจากตัดขี้ผึ้งแผ่นสี่เหลี่ยมสำหรับเป็นส่วนเพลทที่จะใช้ยึดสกรูเข้ากับเครื่องทดสอบ เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10.5 มม.ยาว 30 มม. นำไปวางบนแท่งอินเวสต์เมนต์ในแนวตั้ง ให้ขอบด้านยาวตั้งฉากกับแนวระนาบ ส่วนขอบด้านสั้นขนานกับแนวระนาบและมีระยะยาวจากเส้นรัศมีที่ 120 องศา ไปจนถึงเส้นรัศมีที่ 180 องศา หรือถึงเส้นผ่าศูนย์กลางที่วาดไว้ในตอนแรก เจาะรูวงกลมกลม 2 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. ที่ระยะห่างจากขอบบน และขอบล่าง 5 มม. ในแนวกึ่งกลางของความกว้างเพื่อเป็นส่วนที่จะใช้ยึดกับสกรู จากนั้นทำการตัดขอบด้านขวาที่บริเวณกึ่งกลางของความยาวแผ่นขี้ผึ้งเป็นรูปครึ่งวงกลมรัศมี 5 มม.ออกเพื่อไว้สำหรับให้หัวกดผ่านลงไปกดที่ปลายตะขอด้านในได้

ใช้กระสวยจี๊ดึงตะขอแบบพีริฟอร์ม เป็นแบบในการจำลองแกนยึดของตะขอโอบฟัน ทำการตัดแกนตะขอให้ได้ความยาว 10 มม.จากปลายตะขอ ซึ่งความยาวที่ใช้เป็นการประมาณความยาวเฉลี่ยของแกนยึดของตะขอของฟันกรามจากการศึกษาของ Morris และคณะ⁽²⁵⁾ จากนั้นใช้เครื่องมือแต่งจี๊ดึงสอดเข้าไปด้านใต้และกระตุกกระสวยจี๊ดึงตะขอออกมาอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการบิดเบี้ยวน้อยที่สุดในขณะที่ทำการดึงแบบกระสวยจี๊ดึงออกจากแผ่นรอง และนำไปเชื่อมกับส่วนเพลทบนแท่งอินเวสต์เมนต์โดยเริ่มต้นจากกึ่งกลางด้านซ้ายของแผ่นที่ใช้ยึดกับเครื่องทดสอบ และโค้งไปตามพื้นผิวทรงกระบอกเป็นระยะ 120 องศา



รูปที่ 3 แบบจี๊ดึงขึ้นตัวอย่างต้นแบบบนแท่งอินเวสต์เมนต์ทรงกระบอก

1.2 การหึงโยงโลหะขึ้นตัวอย่างต้นแบบ

นำจี๊ดึงแกนค้ำรูเทมายึดเข้ากับแบบจี๊ดึงขึ้นตัวอย่างต้นแบบ บริเวณด้านข้างของส่วนที่เป็นเพลทสำหรับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ ดังรูปที่ 4 โดยให้ขอบด้านบนบนสุดอยู่ต่ำกว่าขอบของแผ่นบุงแหวนที่จะใช้เป็นแบบสร้างแอ่งเท 5 มม. โดยตลอด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แสดงการยึดจี๊ดึงแกนค้ำรูเทเข้ากับแบบจี๊ดึงขึ้นตัวอย่างต้นแบบ



รูปที่ 5 แสดงการวางชิ้นงานลงในแผ่นวงจรทองแดงที่จะใช้เป็นแบบสร้างเอง

ผสมวัสดุทำเบ้าซีลีคาบอนด์แบบละเอียด ตามอัตราส่วนและเวลาตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด และใช้ฟุ้งกันทางๆให้ทั่วกระสวนซี่ผึ้ง ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นผสมวัสดุทำเบ้าซีลีคาบอนด์แบบละเอียดอีกครั้งตามอัตราส่วนและเวลาตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด เทลงในแผ่นวงจรทองแดงที่จะใช้เป็นแบบสร้างเองให้ท่วมชิ้นตัวอย่างจนเต็มขอบบนของซี่ผึ้งแกนข้างรูปที่ 6 ทิ้งไว้จนแห้งตัวเต็มที่ 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงแกะแผ่นวงจรทองแดงออก จะได้เบ้าหล่อดังรูปที่ 6

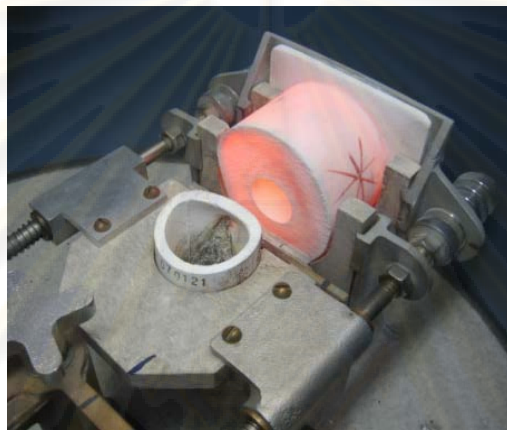


รูปที่ 6 เบ้าหล่อ

นำเบ้าหล่อไปเผาไล่กระสวนซี่ผึ้งในเตาเผาดังรูปที่ 7 จากนั้นนำเบ้าหล่อไปวางลงในเครื่องเหวี่ยงชนิดอาศัยแรงหนีศูนย์กลางขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า หลอมโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมชนิดไวทาลียมในเบ้าหลอมชนิดเซรามิก ดังรูปที่ 8 แล้วจึงกดปุ่มเดินเครื่องเหวี่ยงชนิดที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยปฏิบัติตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด



รูปที่ 7 เตาเผา



รูปที่ 8 แสดงเข้าหล่อที่พร้อมสำหรับเหวี่ยงโลหะ

ปล่อยให้เย็นตัวลงตามอุณหภูมิห้อง 20 นาที นำไปแช่น้ำให้วัสดุหล่อเข้าอ่อนตัวแล้วแยกโลหะออกด้วยคีมตัดปูน (รูปที่ 9) ตัดแกนค้ำรูปเทออกจากชิ้นตัวอย่างโลหะด้วยแผ่นคาร์บอนดำ และใช้หัวกรอหินชนิดหยาบกรอเอาอินเวสต์เมนต์ออกให้หมด จัดแต่งส่วนเกินของชิ้นตัวอย่างโลหะด้วยหัวกรอหินรูปทรงกระบอกชนิดหยาบและละเอียดตามลำดับ โดยพยายามจัดแต่งให้น้อยที่สุด



รูปที่ 9 แสดงชิ้นตัวอย่างโลหะหลังแยกวัสดุหล่อเข้าออก

1.3 การทำเบ้าอัดขึ้นตัวอย่าง

นำชิ้นงานตัวอย่างต้นแบบที่ได้มาติดตุ่มอะคริลิกเรซินเป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม. ที่ด้านใน ส่วนปลายตะขอเพื่อเป็นจุดในการทำให้แรงกดในการทดสอบจากนั้นทำเบ้าอัดขึ้นตัวอย่าง โดยนำภาชนะที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานเล็กน้อยมาใส่ขี้ผึ้งแผ่นสีชมพู ลนไฟจนขี้ผึ้งอ่อนตัว และหยางชิ้นงานด้านในขึ้นวางลงบนขี้ผึ้ง และรอจนขี้ผึ้งแข็งตัวเต็มที่ประมาณ 5 นาที ตักแต่งขี้ผึ้งโดยปาดเอาส่วนที่เกินขึ้นมาบนผิวด้านในของชิ้นงานออก และทำรูกลมๆ ที่ด้านข้าง 4 รู เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการใส่กลับเข้าตำแหน่งเดิม ดังรูปที่ 10

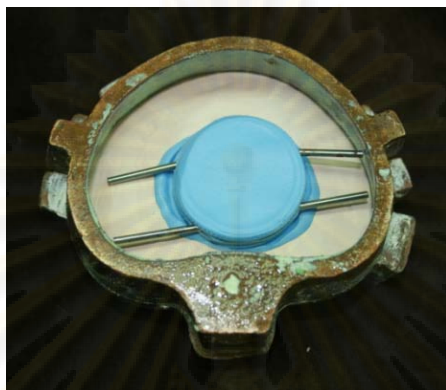


รูปที่ 10 แสดงการยึดชิ้นงานตัวอย่างต้นแบบด้วยขี้ผึ้งก่อนการพิมพ์ชิ้นงานเพื่อทำเบ้าอัดขึ้นตัวอย่าง

ผสมวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนชนิดปั้นได้ ให้ส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน พิมพ์ลงบนด้านในของชิ้นงาน และใส่ก้านโลหะเข้าไป 4 ชิ้นสำหรับยึดกับพลาสติกหีนชนิดเวลมิทซ์ รอจนวัสดุพิมพ์ปากแข็งตัวเต็มที่นาน 10 นาที นำแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั้นได้มาวางลงในภาชนะหล่อแบบพื้นชั้นบน เทพลาสติกหีนชนิดเวลมิทซ์ที่ผสมตามอัตราส่วนที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด (ผง 100 กรัม : น้ำ 23 มิลลิลิตร) ด้วยเครื่องผสมชนิดสูญญากาศ ลงในภาชนะหล่อแบบพื้นชั้นบนให้เต็ม และพอดีกับขอบด้านบนของแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั้นได้ รอจนพลาสติกหีนชนิดเวลมิทซ์แข็งตัวเต็มที่นาน 9 นาที

แกะชิ้นงานตัวอย่างต้นแบบออกจากแบบขี้ผึ้ง นำมาวางลงในพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั้นได้ที่อยู่ในภาชนะหล่อแบบพื้นชั้นบน จากนั้นทาวาสลินบางๆ ให้ทั่วบนแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั้นได้และพลาสติกหีนชนิดเวลมิทซ์ ผสมวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนชนิดปั้นได้และพิมพ์ลงบนด้านนอกของชิ้นงานตัวอย่างต้นแบบ ใส่ก้านโลหะเข้าไป 4 ชิ้นสำหรับยึดกับพลาสติกหีนชนิดเวลมิทซ์ รอจนวัสดุพิมพ์ปากแข็งตัวเต็มที่นาน 10 นาที นำภาชนะหล่อแบบพื้นชั้นล่างมาวางประกบกับภาชนะแบบหล่อพื้นชั้นบน นำแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั้นได้ชั้นล่างมาวางประกบกับชิ้นบน ให้ตรงตำแหน่ง ดังรูปที่ 11 ผสมและเทพลาสติกหีนชนิดเวลมิทซ์ให้เต็มเช่นเดิม และนำภาชนะหล่อแบบ

ฟันชั้นบนและล่างไปอัดด้วยเครื่องอัดความดันไฮดรอลิกภาชนะหล่อแบบฟันแนบสนิทด้วยแรง 7-8 บาร์ รอนจนพลาสติกหินชนิดเวลมิทซ์ในชั้นล่างแข็งตัวเต็มที่ แยกภาชนะแบบหล่อฟันชั้นบนออกจากชั้นล่าง นำโลหะต้นแบบออกจากเบ้า จะได้เบ้าอัดขึ้นตัวอย่างฝาบบนและฝาล่างที่ตรงกลางเป็นแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั่นได้ล้อมรอบด้วยพลาสติกหินชนิดเวลมิทซ์ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 แสดงการนำแบบพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั่นได้ชั้นล่างมาวางประกบกับชั้นบน



รูปที่ 12 แสดงเบ้าอัดขึ้นงานตัวอย่างฝาบบนและฝาล่าง

1.4 การทำขึ้นตัวอย่างอะคริลิกเรซินสำหรับเหวี่ยงโลหะ

ทาวาสลินให้ทั่วเบ้าอัดขึ้นตัวอย่างทั้ง 2 ฝา ผสมอะคริลิกเรซินสำหรับสร้างแบบชนิดบ่มด้วยตนเอง โดยการโรยส่วนผงสลับกับส่วนเหลวตามวิธีการใช้ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดลงในบริเวณเบ้าพิมพ์ซิลิโคนชนิดปั่นได้ทั้งในฝาบบนและฝาล่าง ประกบเบ้าอัดขึ้นตัวอย่างเข้าด้วยกัน นำเข้าเครื่องอัดความดันไฮดรอลิก อัดความดันจนเบ้าอัดขึ้นตัวอย่างแนบสนิทด้วยแรง 7-8 บาร์ รอนจนอะคริลิกเรซินแข็งตัวเต็มที่นาน 4 นาที แล้วจึงแยกขึ้นตัวอย่างอะคริลิกออกจากเบ้า ตัดส่วนเกินของอะคริลิกเรซินเฉพาะบริเวณที่เป็นครีบบางๆทางด้านข้างของขึ้นตัวอย่างออก ด้วยหัวกรอหินรูปทรงกระบอกชนิดหยาบและละเอียดตามลำดับ โดยพยายามขัดแต่งให้น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น กัดเลือกขึ้น

ตัวอย่างเฉพาะที่อัดได้เต็ม ไม่มีรูพรุน ไม่มีฟองอากาศที่สังเกตเห็นภายนอก (รูปที่ 13) และได้ขนาดตามต้องการเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดอย่างละเอียด (รูปที่ 14) โดยทำตัวอย่างอะคริลิกทั้งหมด 45 ชิ้น



รูปที่ 13 ชิ้นตัวอย่างอะคริลิกเรซินสำหรับเหวี่ยงโลหะ



รูปที่ 14 เครื่องวัดอย่างละเอียด (digimatic caliper, Mitutoyo, japan)

1.5 การเหวี่ยงชิ้นโลหะตัวอย่าง

นำชิ้นตัวอย่างอะคริลิกเรซินมายึดเข้ากับซี่ฝิ่งแกนค้ำรูเท และทำการลงอินเวสต์เมนต์นำไปเผาไล่อะคริลิกเรซินที่เตาเผา และเข้าเครื่องเหวี่ยงโลหะตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการเหวี่ยงโลหะชิ้นตัวอย่างต้นแบบ โดยใช้อัตราส่วนของโลหะใหม่ต่อโลหะเก่าที่ต่างกันในแต่ละกลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มควบคุม อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็นโลหะใหม่ร้อยละ 100 (โลหะใหม่ทั้งหมด) จำนวน 15 ชิ้น

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มทดลอง อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างโลหะใหม่กับโลหะเก่าเป็นร้อยละ 50 ต่อ 50 จำนวน 15 ชิ้น

กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มทดลอง อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็นโลหะเก่าร้อยละ 100 (โลหะเก่าทั้งหมด) จำนวน 15 ชิ้น

เริ่มเหวี่ยงโลหะในกลุ่มที่ 1 ก่อน โดยใช้โลหะใหม่ทั้งหมด นำไปหลอมในเบ้าหลอม โดยตั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้หลอมโลหะตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด จากนั้นจึงกดปุ่มเดินเครื่องเหวี่ยงโลหะชนิดอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องนาน 20 นาที แล้วนำไปแช่น้ำให้วัสดุหล่อเบ้าอ่อนตัว แล้วแยกโลหะออกจากวัสดุหล่อเบ้า และตัดแกนค้ำรูเทออกจากชิ้นตัวอย่างโลหะด้วยแผ่นคาร์บอนตัด ใช้หัวกรอหินชนิดหยาบกรอเอาอินเวสต์เมนต์ออกให้หมด จากนั้นทำการเป่าทรายละเอียดขนาด 70 ไมครอน และใช้เครื่องทำความสะอาดด้วยไอน้ำ นำโลหะส่วนแกนค้ำรูเทที่ตัดออกมาและทำความสะอาดอย่างดีแล้วไปใช้เป็นส่วนของโลหะเก่าในการเหวี่ยงขึ้นโลหะตัวอย่างในกลุ่มที่ 2 และ 3 ต่อไป จากนั้นทำการเหวี่ยงโลหะในกลุ่มที่ 2 และ 3 โดยชั่งน้ำหนักโลหะเก่าและโลหะใหม่ให้ได้ปริมาณอัตราส่วนตามที่กำหนดไว้ (รูปที่ 15) และทำการเหวี่ยงโลหะด้วยวิธีการเช่นเดิม



รูปที่ 15 เครื่องชั่งน้ำหนักโลหะ

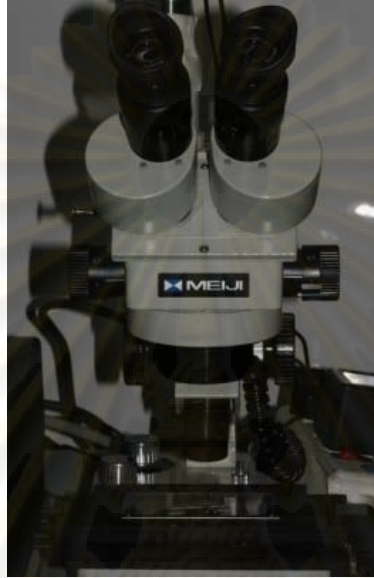
1.6 กระบวนการขัดแต่งโลหะชิ้นตัวอย่าง

ทำการขัดแต่งชิ้นโลหะตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของตะขอ โดยใช้หัวกรอหินชนิดหยาบและชนิดละเอียดกรอแต่งเฉพาะส่วนเกินของชิ้นโลหะตัวอย่าง จากนั้นนำไปทำความสะอาดโดยการเป่าทรายด้วยผงทรายละเอียด ขนาด 70 ไมครอนด้วยเครื่องเป่าทราย

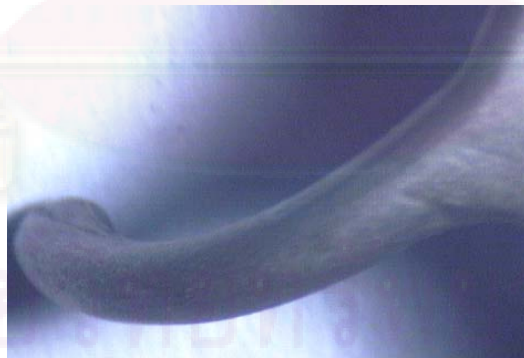
1.7 กระบวนการคัดเลือกชิ้นโลหะตัวอย่าง

นำชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ (stereo microscope, ML 9300 MEIJI, Japan) (รูปที่ 16) เลือกชิ้นตัวอย่างที่สมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า (รูปที่ 17) จากนั้นนำมาตรวจสอบหารอยตำหนิภายใน (internal defect) ด้วยการถ่ายภาพรังสีด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสีดังแสดงในรูปที่ 18 โดยใช้ฟิล์มโกดัก (Kodak)

ultra-speed (speed D) ขนาด 4 (occlusal film) ตั้งค่าความเข้มรังสีที่ 90 Kvp, 15 Ma, เวลา 3/5 วินาที (36 impulses) ระยะห่างระหว่างปากกระบอกกับฟิล์ม 4 นิ้ว^(85, 86) ดังแสดงในรูปที่ 19 ทำการล้างฟิล์ม เป่าฟิล์มแห้งแล้วตรวจดูด้วยตู้ดูฟิล์มและแว่นขยาย(กำลังขยาย 10 เท่า) เลือกเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีฟองอากาศหรือรูพรุนภายในมาทำการทดสอบ



รูปที่ 16 กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ



รูปที่ 17 ภาพตัวอย่างชิ้นงานที่สมบูรณ์เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ



รูปที่ 18 เครื่องถ่ายภาพดิจิทัล



รูปที่ 19 แสดงการถ่ายภาพดิจิทัลชิ้นงานตัวอย่าง

2. กระบวนการวัดผลและแปลผล

2.1 การทดสอบเบนด์จิง (Bending test)

นำชิ้นงานตัวอย่างกลุ่มละ 10 ชิ้นมาทดสอบ โดยจะทำการยึดชิ้นงานตัวอย่างเข้ากับอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน (รูปที่ 20) และทำการยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล (รูปที่ 21) ให้แรงกดที่คุ่มบริเวณด้านในส่วนปลายของตะขอ ในแนวตั้งฉากกับแนวรัศมีความโค้งของตะขอ และทำมุมกับระนาบตัดขวางของทรงกระบอกเป็นมุม 30 องศา(ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2) เพื่อเป็นการจำลองมุมที่ทำให้ตะขอ้าออกในขณะที่แกนยึดของตะขอโอบพันเคลื่อนตัวผ่านบริเวณส่วนป้องกัน (height of contour) ของฟัน⁽³⁶⁾ จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร และเกิดการหักของตะขอ ทำการบันทึกข้อมูลคุณสมบัติต่างๆที่สนใจ ได้แก่ แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แรง

ที่จุดคราก ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น แรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ระยะที่จุดคราก และระยะที่ชิ้นงานแตกหัก

นำค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากที่วัดได้ไปใช้ในการควบคุมค่าของแรงที่ใช้ในการทดสอบ ความล้าเบี่ยงเบนของตะขอไม่ให้เกินค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดคราก เพื่อให้ตะขอไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดสอบ



รูปที่ 20 แสดงการยึดชิ้นงานเข้ากับอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน



รูปที่ 21 แสดงการยึดชิ้นงานและอุปกรณ์ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบสากล

2.2 การทดสอบความล้าเบี่ยงเบน (Deflection fatigue test)

นำชิ้นงานตัวอย่างที่เหลือกลุ่มละ 5 ชิ้น มาทดสอบความล้าเบี่ยงเบนของตะขอ ซึ่งจะเป็นการจำลองสภาวะทางคลินิกในการติดตัวซ้ำๆของแกนยึดของตะขอ โอบฟันผ่านส่วนคอคของฟัน ปริมาณ 0.01 นิ้ว ซึ่งจะเกิดขึ้นในขณะที่คนไข้อยอดและใส่ฟันปลอม โดยให้แรงกดที่คุ่มบริเวณด้านใน ส่วนปลายของตะขอเช่นเดิม ให้ตะขอเบนออก 0.25 มม. ด้วยความถี่ 2 เฮิร์ตซ์ จนกระทั่งชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร คือปลายตะขออ้าจากตำแหน่งเดิมเป็นระยะ 0.1 มม. ในแนวตั้ง จึงทำการหยุดการทดสอบและบันทึกจำนวนรอบของการให้แรง

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ แบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) ด้วยสถิติแบบแอลเอสดี (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมเอสพีเอสเอส รุ่นที่ 11.5 (SPSS version 11.5)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 การทดสอบเบนด์



รูปที่ 22 ภาพตะขอหักหลังจากการทดสอบเบนด์

จากการทดสอบแบบเบนด์โดยให้แรงกดลงที่ตุ่มบริเวณด้านในส่วนปลายของตะขอ ในแนวตั้งฉากกับแนวรัศมีความโค้งของตะขอ และทำมุมกับระนาบตัดขวางของทรงกระบอกเป็นมุม 30 องศา จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก (รูปที่ 22) ทำให้ได้ข้อมูลของคุณสมบัติที่สนใจ ดังสรุปในตารางที่ 6 ต่อไปนี้

ตารางที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสถิติของผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของผลการทดสอบเบนด์

properties	group1	group2	group3	p-value
maximum load required for fracture (N)	121.094 (10.134)	120.956 (16.86)	110.014 (23.949)	0.305
load at yield point (N)	74.807 (8.841)*	75.823 (8.792)*	64.920 (11.848)	0.038*
modulus of elasticity (Mpa)	347.199 (47.903)*	346.302 (82.375)*	253.913 (114.744)	0.033*
load required for 0.25 mm deflection (N)	39.730 (4.129)*	39.718 (8.945)*	32.045 (7.679)	0.036*
distance at yield point (mm)	0.697 (0.069)	0.612 (0.178)	0.609 (0.083)	0.196
distance at fracture point (mm)	2.240 (0.516)	2.128 (0.390)	1.863 (0.487)	0.199

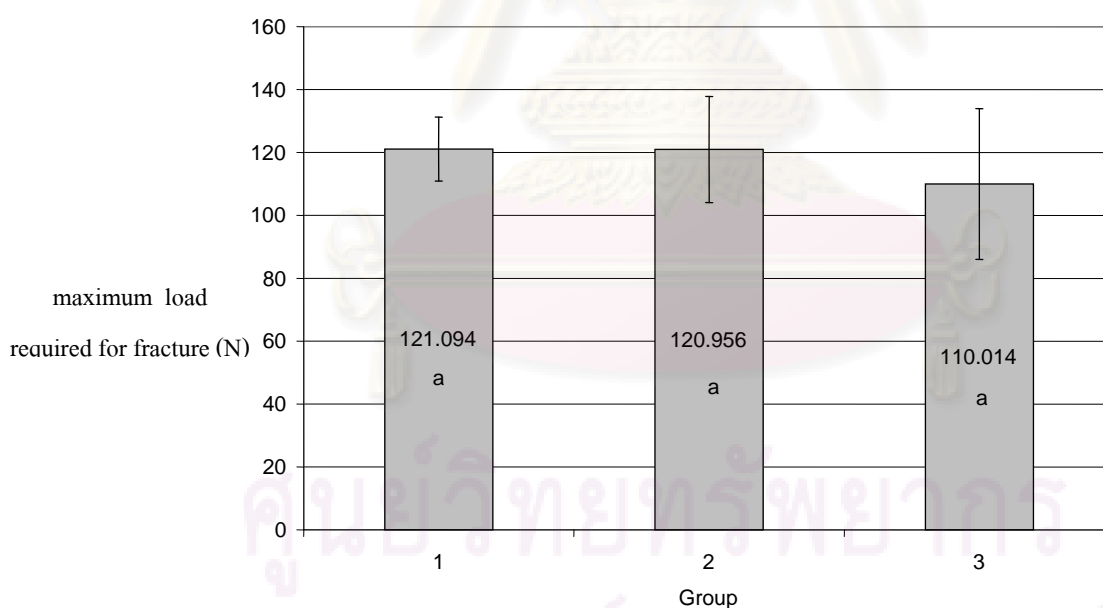
* หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.1 การทดสอบค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

จากการศึกษาแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักพบว่า ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักมากที่สุดคือ 121.094 นิวตัน และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดคือเท่ากับ 10.134 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักคือ 120.956 นิวตัน และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 16.860 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักต่ำที่สุดคือ 110.014 นิวตัน และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดคือเท่ากับ 23.949 ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 23

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

กลุ่มที่	แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก (นิวตัน)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	121.094	10.134
กลุ่มที่ 2	120.956	16.860
กลุ่มที่ 3	110.014	23.949



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 23 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (One-sample Kolmogorov-Smirnov) (ตาราง ข.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่ม

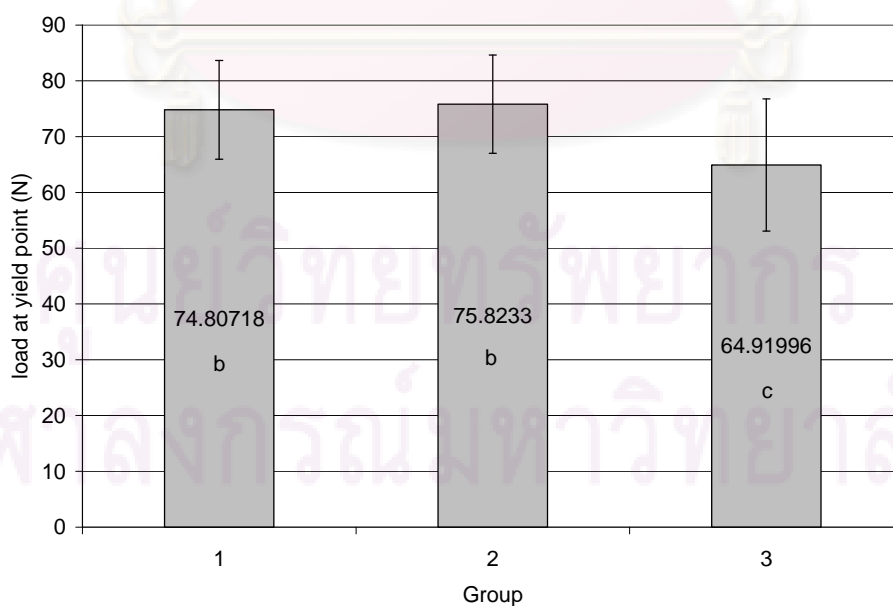
มีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลวีเน (Levene's Test) (ตาราง ข.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p < 0.05$ แสดงว่ามีความไม่เท่ากันของความแปรปรวน จึงต้องทำการทดสอบแบบบราวน์-ฟอร์ซายท์ (Brown-Forsythe) พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักในแต่ละกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.305$)

1.2 การทดสอบค่าแรงที่จุดคราก

จากการศึกษาค่าแรงที่จุดคราก ซึ่งเป็นจุดที่ชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พบว่า ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากมากที่สุดคือ 74.807 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดคือเท่ากับ 8.841 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากเท่ากับ 75.823 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.792 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากต่ำที่สุดคือ 64.920 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดคือเท่ากับ 11.848 ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 24

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่จุดคราก(นิวตัน)

กลุ่มที่	แรงที่จุดคราก (นิวตัน)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	74.807	8.841
กลุ่มที่ 2	75.823	8.792
กลุ่มที่ 3	64.920	11.848



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 24 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงที่จุดคราก

เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (ตาราง ค.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มมีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน ด้วยการทดสอบแบบเลอวิน (ตาราง ค.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p > 0.05$ แสดงว่ามีความเท่ากันของความแปรปรวน จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่า ค่า $p < 0.05$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ($p = 0.039$)

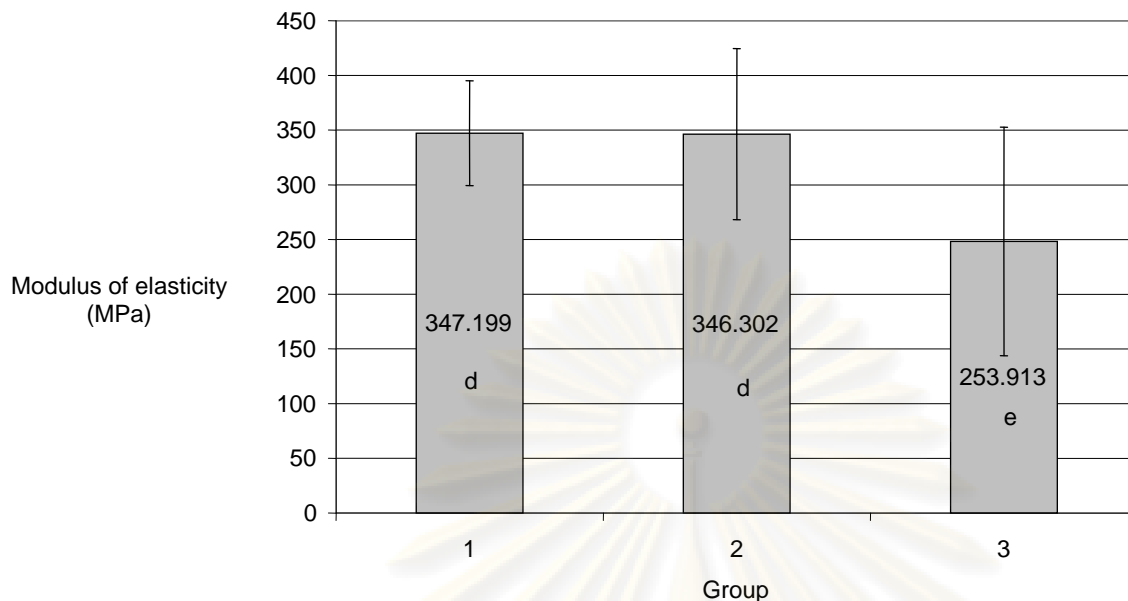
จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน(Multiple comparison)เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยสถิติแบบแอลเอสดี (LSD) (ตาราง ค.5 ของภาคผนวก) พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากของกลุ่มที่ 1 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากของกลุ่มที่ 2 ($p = 0.982$) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากของกลุ่มที่ 3 ($p = 0.022$) และค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากของกลุ่มที่ 2 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากของกลุ่มที่ 3 ($p = 0.024$)

1.3 การทดสอบค้ำมอดูลัสยืดหยุ่น

จากการศึกษาค้ำมอดูลัสยืดหยุ่นพบว่า ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของค้ำมอดูลัสยืดหยุ่นมากที่สุดคือ 347.199 เมกกะปาสคาล และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดคือเท่ากับ 47.903 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของค้ำมอดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 346.302 เมกกะปาสคาล และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 82.375 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของค้ำมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดคือ 253.913 เมกกะปาสคาล และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดคือเท่ากับ 114.744 ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 25

ตารางที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค้ำมอดูลัสยืดหยุ่น

กลุ่มที่	ค้ำมอดูลัสยืดหยุ่น(Modulus of elasticity) (MPa)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	347.199	47.903
กลุ่มที่ 2	346.302	82.375
กลุ่มที่ 3	253.913	114.744



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 25 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สมอนอฟ (ตาราง ง.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มมีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน ด้วยการทดสอบแบบเลอวิน (ตาราง ง.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p > 0.05$ แสดงว่ามีความเท่ากันของความแปรปรวน จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าค่า $p < 0.05$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ($p = 0.033$)

จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยสถิติแบบแอลเอสดี (ตาราง ง.5 ของภาคผนวก) พบว่าค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของกลุ่มที่ 1 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของกลุ่มที่ 2 ($p = 0.982$) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของกลุ่มที่ 3 ($p = 0.022$) และค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของกลุ่มที่ 2 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของกลุ่มที่ 3 ($p = 0.024$)

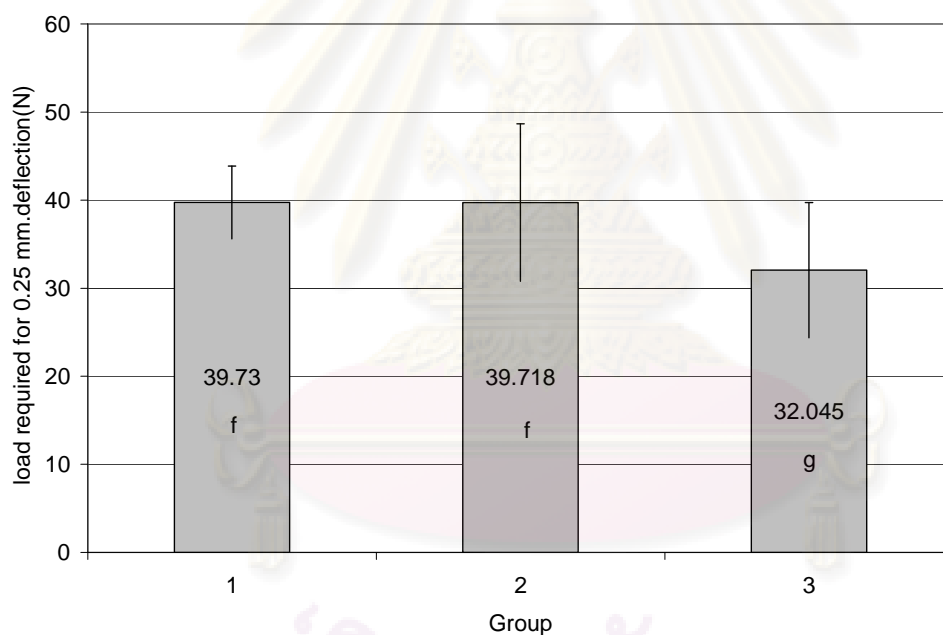
1.4 การทดสอบแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม.

จากการศึกษาแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. พบว่า ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. มากที่สุดคือ 39.730 นิวตัน และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.129 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไป

เป็นระยะ 0.25 มม.เท่ากับ 39.718 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.945 ซึ่งงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ต่ำที่สุด คือ 32.045 นิวตัน และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.679 ดังแสดงในตารางที่ 10 และรูปที่ 26

ตารางที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม.(นิวตัน)

กลุ่มที่	แรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม.(นิวตัน)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	39.730	4.129
กลุ่มที่ 2	39.718	8.945
กลุ่มที่ 3	32.045	7.679



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 26 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม.

เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (ตาราง จ.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มมีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน ด้วยการทดสอบแบบเลอวิน (ตาราง จ.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p > 0.05$ แสดงว่ามีความเท่ากันของความแปรปรวน จึงทำ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าค่า $p < 0.05$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ($p = 0.036$)

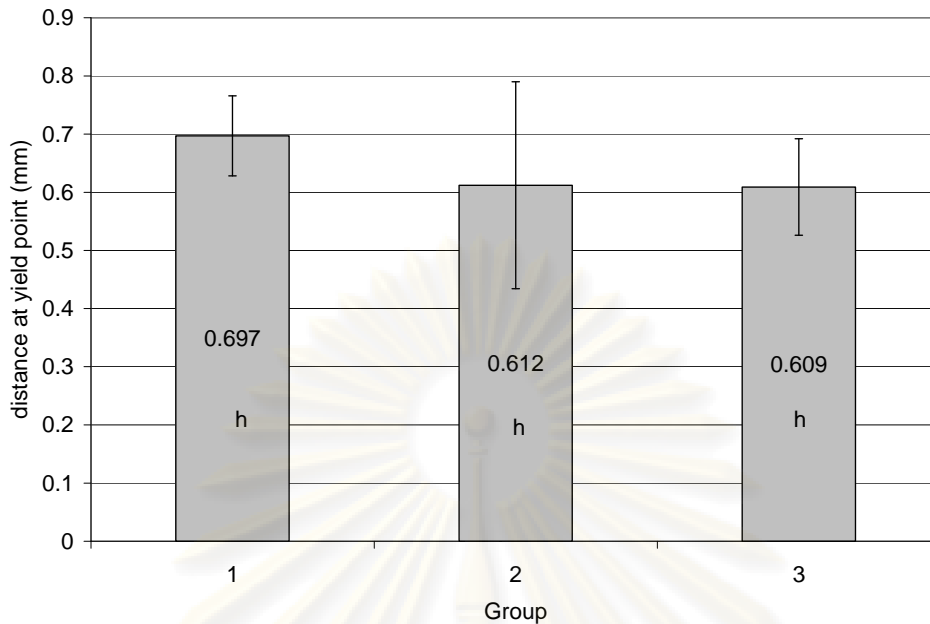
จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ด้วยสถิติแบบแอลเอสดี (ตาราง จ.5 ของภาคผนวก) พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของกลุ่มที่ 1 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของกลุ่มที่ 2 ($p = 0.997$) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของกลุ่มที่ 3 ($p = 0.024$) และค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของกลุ่มที่ 2 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของกลุ่มที่ 3 ($p = 0.025$)

1.5 การทดสอบระยะที่จุดคราก

จากการศึกษาระยะที่จุดคราก ซึ่งเป็นระยะที่ชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พบว่าชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของระยะที่จุดครากมากที่สุดคือ 0.697 มม. และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.069 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของระยะที่จุดครากเท่ากับ 0.612 มม. และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.178 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของระยะที่จุดครากต่ำที่สุด คือ 0.609 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด คือเท่ากับ 0.083 ดังแสดงในตารางที่ 11 และรูปที่ 27

ตารางที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่จุดคราก (มม.)

กลุ่มที่	ระยะที่จุดคราก (มม.)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	0.697	0.069
กลุ่มที่ 2	0.612	0.178
กลุ่มที่ 3	0.609	0.083



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 27 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่จุดคราก

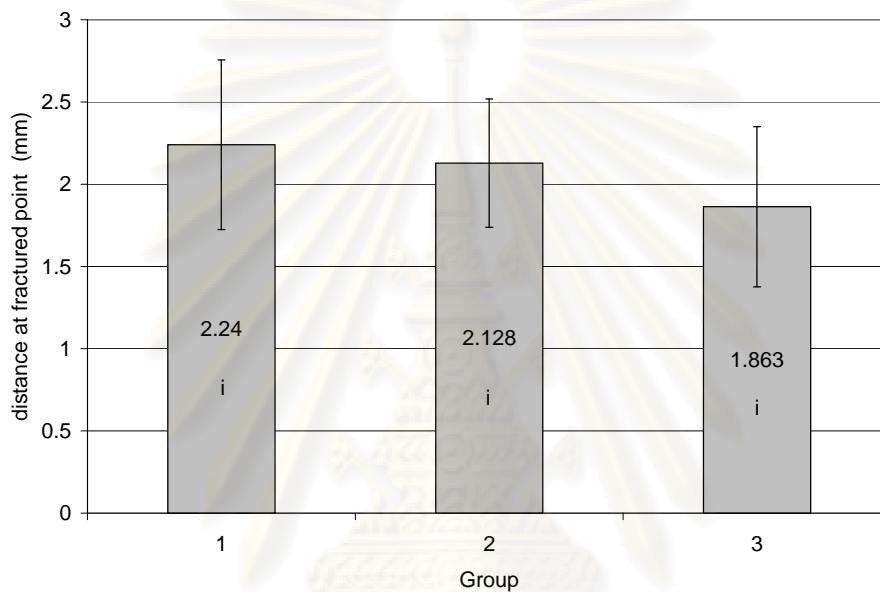
เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโครอฟ-สเมอนอฟ (ตาราง จ.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มมีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน ด้วยการทดสอบแบบเลอวิน (ตาราง จ.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p > 0.05$ แสดงว่ามีความเท่ากันของความแปรปรวน จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ค่า $p > 0.05$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรในแต่ละกลุ่ม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.196$)

1.6 การทดสอบระยะที่ชิ้นงานหัก

จากการศึกษาระยะที่ชิ้นงานหักพบว่า ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานหักมากที่สุดคือ 2.240 มม. และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.516 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานหักเท่ากับ 2.128 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.390 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานหัก ต่ำที่สุดคือ 1.863 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.487 ดังตารางที่ 22 และรูปที่ 28

ตารางที่ 12 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่ขึ้นงานหัก (มม.)

กลุ่มที่	ระยะที่ขึ้นงานหัก (มม.)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	2.240	0.516
กลุ่มที่ 2	2.128	0.390
กลุ่มที่ 3	1.863	0.487



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 28 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่ขึ้นงานหัก

เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (ตาราง ข.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มมีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน ด้วยการทดสอบแบบเลอ-วิน (ตาราง ข.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p > 0.05$ แสดงว่ามีความเท่ากันของความแปรปรวน จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ค่า $p > 0.05$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของระยะที่ขึ้นงานหักในแต่ละกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.199$)

ตอนที่ 2 การทดสอบความล้าเบี่ยงเบน

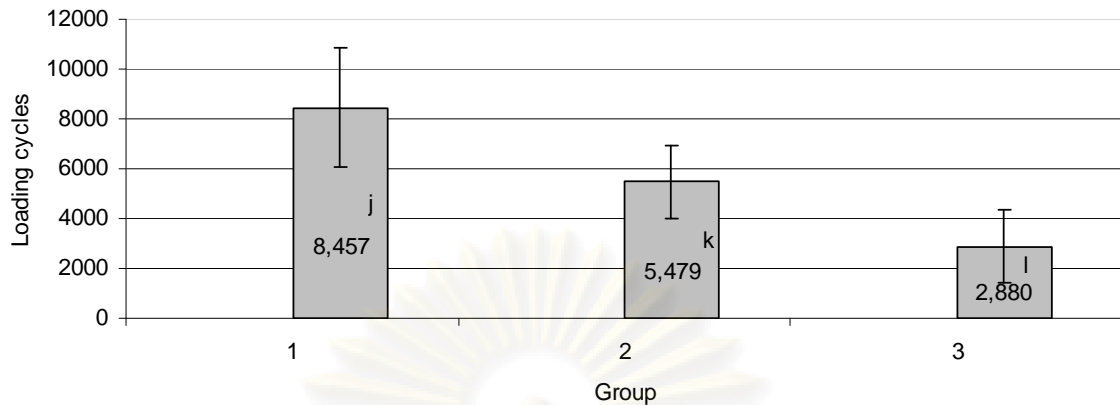


รูปที่ 29 ภาพขยายส่วนปลายตะขอของชิ้นงานและหัวกด ภาพซ้ายแสดงชิ้นงานก่อนการทดสอบความล้าเบี่ยงเบน ภาพขวาแสดงชิ้นงานหลังการทดสอบความล้าเบี่ยงเบน

จากการทดสอบความล้าเบี่ยงเบนของชิ้นงาน โดยให้แรงกดที่ตุ่มบริเวณด้านในส่วนปลายของตะขอให้ตะขอเบนออก 0.25 มม. ด้วยความถี่ 2 เฮิร์ตซ์ จนกระทั่งชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรคือปลายตะขอออกจากตำแหน่งเดิมเป็นระยะ 0.1 มม. ในแนวตั้ง (รูปที่ 29) และทำการศึกษาจำนวนรอบที่ชิ้นงานตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พบว่า ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร คือ 8,457 รอบ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่ากับ 2,371.25 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเท่ากับ 5,479 รอบ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1,466.28 ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่จำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเท่ากับ 2,880 รอบและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1,471.93 ดังแสดงในตารางที่ 13 และรูปที่ 30

ตารางที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนรอบที่ชิ้นงานตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร

กลุ่มที่	จำนวนรอบที่จำนวนรอบที่ชิ้นงานตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (loading cycles)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มที่ 1	8,457	2,371.25
กลุ่มที่ 2	5,479	1,466.28
กลุ่มที่ 3	2,880	1,471.93



(ตัวอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

รูปที่ 30 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนรอบที่จำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร

เมื่อทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (ตาราง ซ.1 ของภาคผนวก) พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มมีค่า $p > 0.05$ แสดงว่าข้อมูลทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน ด้วยการทดสอบแบบเลอ-วิน (ตาราง ซ.3 ของภาคผนวก) พบว่าค่า $p > 0.05$ แสดงว่ามีความเท่ากันของความแปรปรวน จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าค่า $p < 0.05$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยสถิติแบบแอลเอสดี (ตาราง ซ.5 ของภาคผนวก) พบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของทั้ง 3 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของกลุ่มที่ 1 มากกว่ากลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.024$, $p < 0.001$ ตามลำดับ) และค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของกลุ่มที่ 2 มากกว่ากลุ่มที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.043$)

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย

อภิปรายระเบียบวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โลหะไวทาลเลียม (Vitalium) เนื่องจากเป็นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้เลือกใช้กระสวยฉีดตะขอแบบพรีฟอร์มซึ่งใช้กันทั่วไปตามห้องปฏิบัติการในปัจจุบัน เนื่องจากใช้งานได้ง่ายสะดวกรวดเร็ว โดยเลือกแบบตะขอ 21 M ซึ่งอาศัยหลักการจากการศึกษาของ Morris⁽²⁵⁾ และ Sato⁽⁵⁹⁾ ที่พบว่าแกนตะขอที่มีความกว้างและบางจะมีความเค้นน้อยกว่ารูปร่างหน้าตัดแบบอื่นๆ โดยแกนของตะขอควรจะมี ความกว้างที่สุดภายใต้ขอบเขตที่จำกัดของสภาวะทางคลินิก เช่น ตำแหน่งของเส้นสำรวจ ความสูงของฟันหลัก และความสัมพันธ์ของการสบฟัน

สภาวะที่จำลองขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้อาจมีความแตกต่างจากสภาวะที่พบได้ในทางคลินิกจริงทั้งในแง่ขนาดและทิศทางของแรง ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจริงในคลินิกอาจไม่สม่ำเสมอ ไม่คงที่ นอกจากนี้การทดสอบในงานวิจัยนี้ยังทำในบรรยากาศที่แห้ง แตกต่างจากสภาวะในช่องปากจริงที่มีน้ำลาย⁽³⁵⁾ จึงไม่สามารถควบคุมบางปัจจัยให้เหมือนในช่องปากได้จริง เช่น อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Lassila⁽³⁴⁾ ในปี 1998 พบว่า สภาวะแวดล้อมที่เปียกอาจทำให้อัตราการสึกกร่อนสูงขึ้นและลดความต้านทานต่อการฉีกของโลหะได้

งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบความล้าจนกระทั่งขึ้นงานหักดังเช่นในงานวิจัยอื่นเนื่องจากในงานวิจัยของ Mahmoud ในปี 2005 ซึ่งได้ทำการทดสอบความล้าเบี่ยงเบนของตะขอโลหะที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันที่ปริมาณความคอดต่างๆกัน พบว่าที่ปริมาณความคอด 0.25 มม.มีเพียง 1 ชิ้นงานจากทั้งหมด 15 ชิ้น ที่เกิดการแตกหัก นอกนั้นพบว่าชิ้นงานตะขอสามารถทนแรงได้จนถึง 10^6 รอบโดยไม่เกิดการแตกหัก⁽³⁵⁾ ส่วนงานวิจัยอื่นๆ^(31-34, 36) จะให้แรงเบนตะขอออกไปเป็นปริมาณ 0.5 - 0.75 มม. ซึ่งสูงกว่าปริมาณความคอดที่เหมาะสมสำหรับตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยงมากจึงเกิดการแตกหักของตะขอได้ ผู้ทำการวิจัยจึงได้เลือกที่จะทำการทดสอบโดยให้แรงคดให้ตะขอเบนออกไป 0.25 มม. ซึ่งเท่ากับปริมาณความคอดที่เหมาะสมสำหรับตะขอโอบฟันโลหะเหวี่ยง และหยุดการทดสอบเมื่อตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร คือปลายตะขอแอ้ออกจากตำแหน่งเดิมในแนวตั้งเป็นระยะ 0.1 มม. ซึ่งน่าจะทำให้คนไข้รู้สึกได้ว่าตะขอฟันปลอมหลวม ซึ่งถือว่าเป็น

ความล้มเหลวอย่างหนึ่งในงานฟื้นฟูปลอมบางส่วนถอดได้ และจากการสำรวจพื้นผิวของหัวกดหลังการทดสอบไม่พบว่ามีกรีสของหัวกด มีเพียงรอยขีดข่วนเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งไม่ได้ทำให้ผลการวิจัยคลาดเคลื่อนแต่อย่างใด

งานวิจัยนี้ได้แบ่งชิ้นงานตามอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของโลหะเก่าและโลหะใหม่ที่แตกต่างกัน ออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมด กลุ่มที่ 2 ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก้าร้อยละ 50 และกลุ่มที่ 3 ทำจากโลหะเก่าทั้งหมด เนื่องจากผู้ทำการวิจัยมุ่งเน้นที่จะทำการทดสอบข้อสรุปของงานวิจัยส่วนใหญ่ที่กล่าวว่า สามารถนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำได้ในอัตราส่วนผสมของโลหะเก้าร้อยละ 50 โดยที่ไม่ทำให้คุณภาพของโครงโลหะเสียไป รวมถึงคำแนะนำในการหล่อโลหะของบริษัทผู้ผลิตไวทาเลียมเองก็ได้กล่าวไว้ว่า สามารถนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำได้โดยที่ควรมีอัตราส่วนของโลหะใหม่อย่างน้อยที่สุดร้อยละ 50

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบความล้าเบี่ยงเบนในงานวิจัยนี้มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปในงานทดสอบความล้า⁽⁸⁷⁾ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านงบประมาณและเวลา จึงไม่สามารถใช้จำนวนชิ้นงานที่มากได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำผลที่ได้ภายใต้ข้อจำกัดของงานวิจัยไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิกต่อไปได้

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักพบว่า ค่าของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 สามารถทนแรงได้มากที่สุดก่อนจะเกิดการแตกหัก รองลงมาคือกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักจะไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มที่ 3 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 มีความคงที่มากกว่าชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักของชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่าสูงถึง 23.949 ซึ่งสูงกว่าค่าของกลุ่มที่ 1 ถึง 2 เท่า ซึ่งหากนำโลหะในกลุ่มที่ 3 นี้ไปทำโครงโลหะของฟันปลอมจะมีโอกาสสูงที่คนไข้จะได้รับชิ้นงานที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งหากชิ้นงานได้รับแรงในปริมาณที่สูง เช่น ฟันปลอมได้รับแรงกระแทกอย่างแรงในกรณีที่คนไข้ทำฟันปลอมตก จะทำให้ตะขอฟันปลอมหักได้

จากผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดครากพบว่าค่าของกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าของกลุ่มที่ 3 มีค่าต่ำกว่าของกลุ่มที่ 1

และ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรได้ด้วยแรงที่ต่ำกว่าชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ให้ผลในทำนองเดียวกันคือพบว่าค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าของกลุ่มที่ 3 มีค่าต่ำกว่าของกลุ่มที่ 1 และ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งตึง (rigidity) ของวัสดุ การที่ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นหรือความแข็งตึงต่ำจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรได้ง่ายกว่า ด้วยการได้รับแรงที่ต่ำกว่ากลุ่มที่ 1 และ 2 ซึ่งหากนำโลหะในกลุ่มที่ 3 ไปทำโครงโลหะของฟินปลอมบางส่วนถอดได้จะมีผลเสียอย่างมากต่อส่วนโยงใหญ่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ต้องการความแข็งตึงสูง

ค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 เบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 เบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าตะขอโอบฟันที่ทำจากโลหะในกลุ่มที่ 3 ให้แรงยึดแก่ฟินปลอมได้ไม่ดีเท่าตะขอโอบฟันที่ทำจากโลหะในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 เนื่องจากสามารถถูกทำให้แอ้ออกจนพ้นจากส่วนคอดของฟันหลักที่มีปริมาณความคอดเท่ากับ 0.25 มม. หรือ 0.01 นิ้ว ได้ด้วยแรงที่น้อยกว่า

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะที่จุดครากซึ่งเป็นระยะที่ชิ้นงานตะขอได้รับแรงจนเบนไปจนถึงจุดครากหรือจุดที่ตะขอเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พบว่าค่าในแต่ละกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานแตกหักในแต่ละกลุ่มซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลที่ได้นี้สามารถนำไปอธิบายทางคลินิกได้ว่าเมื่อตะขอฟินปลอมได้รับแรงซึ่งทำให้ตะขอแอ้ออกเกิน 0.6 มม. ตะขอจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งหากทันตแพทย์ไม่ได้ทำการวาดเส้นสำรวจ (survey line) อาจทำให้้ออกแบบฟินปลอมไม่เหมาะสม เช่น วางปลายแขนยึดไว้ที่ส่วนคอดของฟันในปริมาณที่มากเกินไปกว่า 0.6 มม. อาจทำให้ตะขอเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรได้ และหากออกแรงแอ้อะขอออกเกินระยะ 1.8 มม. จะทำให้ตะขอหักได้

ถึงแม้ว่าโดยรวมแล้วคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากการทดสอบเบนด์ของชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 จะไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ แต่จากผลการทดสอบความล้าเบี่ยงเบนพบว่า ความต้านทานต่อการล้าของชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 ต่ำกว่ากลุ่มที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหากประเมินอายุการใช้งานของตะขอตามรายงานของ Snyder ในปี 1992 ซึ่งได้ประเมินไว้ว่าคนไข้จะถอดใส่ฟินปลอม

ประมาณ 1,500 ครั้งต่อปี⁽³¹⁾ พบว่าชิ้นงานตะขอในกลุ่มที่ 1 มีอายุการใช้งานเฉลี่ยก่อนที่จะเกิดการ หลวมของตะขอเป็นเวลา 5.63 ปี ชิ้นงานตะขอในกลุ่มที่ 2 มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 3.65 ปี ส่วน ชิ้นงานตะขอในกลุ่มที่ 3 มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 1.92 ปี ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผลิตโครงโลหะโดยนำ โลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50 ทำให้อายุการใช้งานของตะขอลดลงเกือบ 2 ปี และการผลิตโครงโลหะโดยใช้โลหะเก่าทั้งหมดทำให้อายุการใช้งานลดลงถึง 3.71 ปี ซึ่งมีผลเสียทำ ให้คนใช้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำฟันปลอมชุดใหม่ก่อนเวลาอันควร ดังนั้นการนำโลหะเก่ากลับ มาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50 จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในผลิตโครงโลหะของฟัน ปลอมบางส่วนถอดได้ ควรทำการวิจัยเพื่อหาวิธีการหรือหาอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าที่เหมาะสม ต่อไป

จากผลการศึกษาพบว่า การนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ 1 ครั้ง ในอัตราส่วนผสมของโลหะ เก่าร้อยละ 50 มีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อการล้าของชิ้นงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของปรินทร⁽⁷⁰⁾ ที่พบว่ากลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงโดยมีอัตรา ส่วนผสมระหว่างโลหะเก่าร้อยละ 50 กับโลหะใหม่อ้อยละ 50 โดยที่โลหะเก่าผ่านการใช้ซ้ำ 1 ครั้ง ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกาสำหรับนำมา ใช้ทำโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้มีความขัดแย้งกับผลงานวิจัยของ Lewis ในปี 1975 และผล งานวิจัยของ Hesby ในปี 1980 ที่ยอมให้มีการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำได้ โดยไม่มีการผสมโลหะ ใหม่ลงไป การศึกษาของ Lewis⁽⁶⁶⁾ พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของโลหะที่หลอมด้วยกระแสไฟฟ้ามี ค่าคงที่ใน 3 รุ่นแรกของการหลอม โดยใช้โลหะเก่ารุ่นก่อนหน้าที่ผ่านมาทดสอบกลสมบัติแล้ว เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น โดยไม่ผสมโลหะใหม่ลงไป ส่วนการศึกษาของ Hesby⁽¹⁵⁾ และคณะ พบว่าการนำ โลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ 4 ครั้ง โดยไม่มีการผสมโลหะใหม่นั้นไม่มีผลต่อความทนแรงดึง ร้อยละของ การยืดตัว และความแข็งผิวหรือคเวลล์อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่ค่าความทน แรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างในการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันต- แพทย์แห่งสหรัฐอเมริกาถึงเกือบครึ่งหนึ่ง ซึ่ง Hesby แสดงความเห็นว่าเป็นผลจากขนาดที่ แตกต่างกันมากระหว่างแกนค้ำรูปกับชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้มีความเค้นสะสมที่บริเวณแกนของ ชิ้นงานตัวอย่างระหว่างที่โลหะเย็นตัว หรืออาจเกี่ยวข้องกับรูพรุนหรือฟองอากาศในชิ้นงานตัว อย่าง โดยมั่นใจว่าไม่ใช่ผลจากการหลอมโลหะซ้ำ แสดงให้เห็นว่างานวิจัยของ Hesby นี้มีข้อบก พร่องคือขาดข้อกำหนดที่เป็นเกณฑ์ในการคัดตัวอย่างออก

ผลการวิจัยนี้ยังมีความขัดแย้งกับผลงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่ยอมให้มีการนำโลหะเก่ากลับมา ใช้ซ้ำได้ ในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าร้อยละ 50 ดังเช่น การศึกษาของ Nelson และคณะในปี

1986⁽⁶⁷⁾ ที่พบว่าสามารถนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำก็ครั้งก็ได้หากผสมโลหะใหม่ในอัตราส่วนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานทางคลินิก กลสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่เหวี่ยงได้ ซึ่งการสรุปผลของการศึกษานี้อาศัยเพียงการประเมินค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากตัวอย่างแต่ละรุ่นเปรียบเทียบกัน มิได้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ บทสรุปดังกล่าวจึงมีความน่าเชื่อถือน้อย ผลงานวิจัยของ Altay ในปี 1990/1991⁽⁶⁸⁾ ก็ได้ผลที่ขัดแย้งในทำนองเดียวกันคือพบว่า การนำโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมกลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนของโลหะใหม่ร้อยละ 50 เป็นอัตราส่วนต่ำสุดที่ยอมรับได้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีความขัดแย้งกับผลการวิจัยของ Henrique ในปี 1997⁽⁶⁴⁾ ซึ่งศึกษาความต้านทานต่อการล้าของโลหะ โดยการให้แรงเบนแท่งโลหะทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 มม. ไปกลับข้างละ 2 องศา ซ้ำๆจนกระทั่งชิ้นงานหัก สรุปว่าสามารถนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำได้ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยไม่ทำให้ความต้านทานต่อการล้าของโครงโลหะเสียไป แต่งานวิจัยนี้ก็มีจุดบกพร่องตรงที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานที่ดีพอ เนื่องจากไม่มีการถ่ายภาพรังสีเพื่อตัดชิ้นงานที่มีรูพรุนภายในออกก่อนทดสอบ แต่จากการส่องกล้องดูพื้นผิวของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบพบว่า มีรูพรุนในชิ้นงานเกิดขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวิจัยได้ นอกจากนี้ลักษณะชิ้นงานยังแตกต่างจากตะขอฟันปลอมที่ใช้ในทางคลินิกอีกด้วย

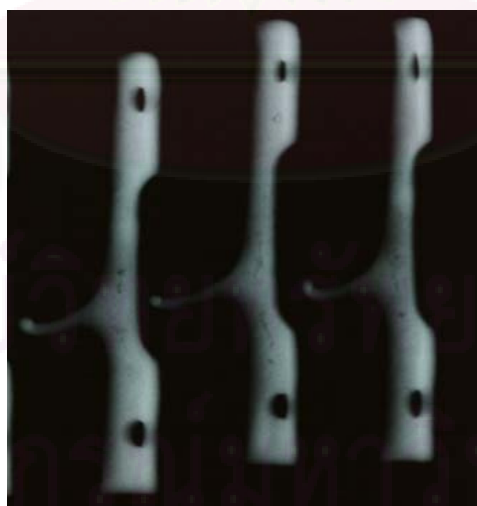
มีหลายการศึกษาที่พยายามอธิบายถึงสาเหตุที่การนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำทำให้กลสมบัติของโลหะด้อยลง Altay และคณะ⁽⁶⁸⁾ ได้เสนอแนวคิดว่าการผสมโลหะเก่าทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการแทรกตัวของสิ่งปนเปื้อน ออกไซด์ (oxide) และเศษวัสดุแปลกปลอม (inclusion) ในโลหะเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมโลหะเก่าในปริมาณมาก จะยังมีสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ภายในโลหะเก่ามากขึ้น ซึ่งอาจสังเกตเห็นด้วยตาเปล่า แต่ก็ส่งผลให้กลสมบัติของโลหะด้อยลงได้ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านแนะนำว่า ก่อนการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำควรทำความสะอาดเอาอินเวสเมนต์ออกจากชิ้นงานให้ได้มากที่สุด โดยทำการเป่าทรายด้วยผงอะลูมินัมออกไซด์ และนำไปเข้าเครื่องทำความสะอาดแบบอัลตราโซนิกโดยใช้น้ำกลั่น เพื่อลดสิ่งปนเปื้อนซึ่งจะก่อให้เกิดผลเสียต่อกลสมบัติของโลหะให้น้อยที่สุด^(15, 64, 67, 73)

นอกจากนี้ การหลอมโลหะเก่าซ้ำยังมีผลให้การแทรกตัวของสิ่งปนเปื้อน ออกไซด์ (oxide) และเศษวัสดุแปลกปลอม (inclusion) ในโลหะเพิ่มมากขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในของโลหะ ซึ่งผลจะมากขึ้นตามจำนวนครั้งในการหลอมซ้ำ การได้รับความร้อนถึงระดับที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคหลายครั้ง อาจทำให้มีการสูญเสียธาตุโลหะบางตัวจากสภาวะออกซิเดชันหรือจากการระเหยได้ จึงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลสมบัติของโลหะจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในแต่ละครั้งที่มีการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งถึงแม้

ว่าการผสมโลหะใหม่อาจมีส่วนช่วยชดเชยธาตุโลหะบางตัวที่ขาดหายไป แต่ก็มิได้ช่วยให้กลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ดีขึ้นแต่อย่างใด⁽⁸⁸⁾

นอกจากปัญหาดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโลหะเมื่อผ่านการหลอมซ้ำยังส่งผลต่อกลสมบัติได้โดยทางอ้อม จากการที่โลหะเหวี่ยงได้ยากขึ้น เนื่องจากการไหล (metal fluidity) ลดลง ทำให้เกิดการแยกตัวของโลหะ (metal disconnection) และปรากฏเป็นฟองอากาศหรือรูพรุนภายในโลหะหลังจากแข็งตัว ดังเช่นปัญหาที่พบในการศึกษาของ Hesby⁽¹⁵⁾ และ Henrique⁽⁶⁴⁾ รวมถึงในการวิจัยครั้งนี้ด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการถ่ายภาพรังสี เพื่อตรวจสอบรูพรุนภายในชิ้นงานก่อนที่จะทำการทดสอบ พบว่าชิ้นงานที่เหวี่ยงจากโลหะที่มีอัตราส่วนร้อยละของโลหะเก่าเป็นส่วนผสมในปริมาณที่มากขึ้นจะพบรูพรุนมากขึ้น และรูพรุนที่พบมีขนาดที่ใหญ่กว่าชิ้นงานในกลุ่มที่เหวี่ยงจากโลหะใหม่ทั้งหมดอย่างเห็นได้ชัด โดยชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 พบรูพรุนใน 2 ชิ้นงาน ซึ่งเป็นเพียงรูพรุนขนาดเล็ก และพบชิ้นละ 1 ตำแหน่งเท่านั้น ชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 พบรูพรุนในชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น ส่วนชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 พบรูพรุนในชิ้นงานจำนวน 7 ชิ้น ถึงแม้รูพรุนจะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก แต่กระจายอยู่หลายตำแหน่งในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 31 ซึ่งผู้ทำการวิจัยได้ทำการคัดชิ้นงานที่ตรวจพบรูพรุนทั้งหมดออกจากการทดสอบ เพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นงานทั้งหมดให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง



รูปที่ 31 ภาพถ่ายรังสีของชิ้นงานตัวอย่างที่มีรูพรุนภายใน

เนื่องจากผู้ทำการวิจัยได้ทำการคัดค้านงานที่ตรวจพบรูพรุนจากการถ่ายภาพรังสีทั้งหมด ออกจากการทดสอบแล้ว ดังนั้น สาเหตุของปัญหาคุณสมบัติที่ด้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่ใช้ โลหะเก่าทั้งหมดจึงน่าจะเกี่ยวข้องกับสาเหตุอื่นที่นอกเหนือไปจากจากสาเหตุของฟองอากาศหรือรูพรุน ซึ่งเมื่ออ้างอิงตามรายงานการศึกษาต่างๆที่กล่าวมาเบื้องต้น ประเด็นสำคัญน่าจะอยู่ที่การ แทรกตัวของสิ่งปนเปื้อน ออกไซด์ (oxide) และเศษวัสดุแปลกปลอม (inclusion) ในโลหะเพิ่มมากขึ้น และการสูญเสียหรือการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของธาตุโลหะบางชนิด ในโลหะที่หลอมซ้ำ ที่อาจจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของโลหะที่เหยียงได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาคและการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโลหะเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถอธิบายได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ทั้งในส่วนของคุณสมบัติที่แยกลงรวมถึง ความต้านทานต่อการล้าที่ลดลงด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติและความต้านทานต่อการล้าของตะขอโอบฟันโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่นำโลหะเก่าที่ผ่านการหลอม 1 ครั้ง กลับมาใช้ซ้ำ ในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าและโลหะใหม่โดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมและข้อจำกัดของการวิจัย พบว่า

1. ค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก ค่าเฉลี่ยของระยะที่จุดคราก และค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานแตกหักในแต่ละกลุ่มไม่มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดคราก ค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออกไปเป็นระยะ 0.25 มม. ของตะขอที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมด ไม่มีความแตกต่างกับค่าเฉลี่ยของชิ้นงานตะขอที่ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของชิ้นงานตะขอที่ทำจากโลหะเก่าทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
2. ชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมดมีความต้านทานต่อการล้าเฉลี่ย (8,457 รอบ) สูงกว่าชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 (5,479 รอบ) และสูงกว่าชิ้นงานที่ทำจากโลหะเก่าทั้งหมด (2,880 รอบ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามลำดับ ($p < 0.05$)
3. ถึงแม้ว่าโดยรวมแล้วค่าคุณสมบัติต่างๆของชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 จะไม่แตกต่างจากค่าของชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ร้อยละ 50 ผสมกับโลหะเก่าร้อยละ 50 มีค่าความต้านทานต่อการล้าต่ำกว่าชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการนำโลหะเก่ากลับมาใช้ซ้ำในอัตราส่วนผสมของโลหะเก่าร้อยละ 50 จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในผลิตโครงโลหะของฟันปลอมบางส่วนถอดได้ เนื่องจากชิ้นงานตะขอที่ได้มีอายุการใช้งานต่ำกว่าชิ้นงานที่ทำจากโลหะใหม่ทั้งหมดถึง 1.98 ปี

รายการอ้างอิง

- (1) McGivney, G. T., and Carr, A. B. McCracken's Removable Partial Prosthodontics. 10 ed. Missouri: Mosby, 2000.
- (2) Applegate, O. C. Factors to be considered in choosing and alloy. Dent Clin North Am Nov (1960): 583-90
- (3) เจน รัตนไพศาล. ทันตวัสดุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, 2533.
- (4) Paffenbarger, G. C., and Dickson, G. Base metal alloys for oral restorations. J Am Dent Assoc 30 (1943): 852 – 62.
- (5) Covington, J. S., McBride, M. A., Slagle, W. F., and Disney, A. L. Quantization of nickel and beryllium leakage from base metal casting alloys. J Prosthet Dent 54(1) (Jul 1985): 127-36.
- (6) Hirata, T., Nakamura, T., Takashima, F., Maruyama, T., Taira, M., and Takahashi, J. Studies on polishing of Ti and Ag-Pd-Cu-Au alloy with five dental abrasives. J Oral Rehabil 28(8) (Aug 2001): 773-7.
- (7) Ohkubo, C., Shimura, I., Aoki, T., Hanatani, S., Hosoi, T., and Okabe, T. In vitro wear assessment of titanium alloy teeth. J Prosthodont 11(4) (Dec 2002): 263-9.
- (8) Sutton, A. J., and Rogers, P. M. Discoloration of a titanium alloy removable partial denture: a clinical report. J Prosthodont 10(2) (Jun 2001): 102-4.
- (9) Rodrigues, R. C., Ribeiro, R. F., de Mattos Mda, G., and Bezzon, O. L. Comparative study of circumferential clasp retention force for titanium and cobalt-chromium removable partial dentures. J Prosthet Dent 88(3) (Sep 2002): 290-6.
- (10) Lane, J. R. A survey of dental alloys. J Am Dent Assoc 39(4) (Oct 1949): 414-37.
- (11) Peyton, F. A. Cast chromium – cobalts alloys. Dent Clin North Am Nov (1958): 759 – 71.
- (12) Taylor, D. F., Leibfritz, W. A., and Adler, A. G. Physical properties of chromium – cobalt dental alloys. J Am Dent Assoc 56 (1958): 343 – 51.
- (13) Cunningham, D. M. Comparison of base metal alloys and type IV gold alloys for removable partial denture frameworks. Dent Clin North Am 17 (1973): 719 - 22.
- (14) Taylor, D. F., and Sweeney, W. T. A proposed specification for dental chromium – cobalt casting alloys. J Am Dent Assoc 54 (1957): 44 – 8.
- (15) Hesby, D. A., Kobes, P., Garver, D. G., and Pelleu, G. B., Jr. Physical properties of a repeatedly used nonprecious metal alloy. J Prosthet Dent 44(3) (Sep 1980): 291-3.

- (16) Gapido, C. G., Kobayashi, H., Miyakawa, O., and Kohno, S. Fatigue resistance of cast occlusal rests using Co-Cr and Ag-Pd-Cu-Au alloys. J Prosthet Dent 90 (2003): 261-9.
- (17) Derry, A., and Bertram, U. A clinical survey of removable partial dentures after 2 years usage. Acta Odontol Scand 28(5) (Nov 1970): 581-98.
- (18) Bergman, B., Hugoson, A., and Olsson, C. O. Caries, periodontal and prosthetic findings in patients with removable partial dentures: a ten-year longitudinal study. J Prosthet Dent 48(5) (Nov 1982): 506-14.
- (19) Ben-Ur, Z., Patael, H., Cardash, H. S., and Baharav, H. The fracture of cobalt-chromium alloy removable partial dentures. Quintessence Int 17(12) (Dec 1986): 797-801.
- (20) Vallittu, P. K., Lassila, V. P., and Lappalainen, R. Evaluation of damage to removable dentures in two cities in Finland. Acta Odontol Scand 51(6) (Dec 1993): 363-9.
- (21) Sandu, L., Faur, N., and Bortun, C. Finite element stress analysis and fatigue behavior of cast circumferential clasps. J Prosthet Dent 97(1) (Jan 2007): 39-44.
- (22) Brudvik, J. S., and Wormley, J. H. Construction techniques for wrought-wire retentive clasp arms as related to clasp flexibility. J Prosthet Dent 30(5) (Nov 1973): 769-74.
- (23) Frank, R. P., Brudvik, J. S., and Nicholls, J. I. A comparison of the flexibility of wrought wire and cast circumferential clasps. J Prosthet Dent 49(4) (Apr 1983): 471-6.
- (24) Morris, H. F., Asgar, K., Roberts, E. P., and Brudvik, J. S. Stress-relaxation testing. Part II: comparison of bending profiles, microstructures, microhardnesses, and surface characteristics of several wrought wires. J Prosthet Dent 46(3) (Sep 1981): 256-62.
- (25) Morris, H. F., Asgar, K., Brudvik, J. S., Winkler, S., and Roberts, E. P. Stress-relaxation testing. Part IV: Clasp pattern dimensions and their influence on clasp behavior. J Prosthet Dent 50(3) (Sep 1983): 319-26.
- (26) Firtell, D. N. Effect of clasp design upon retention of removable partial dentures. J Prosthet Dent 20(1) (Jul 1968): 43-52.
- (27) Marei, M. K. Measurement (in vitro) of the amount of force required to dislodge specific clasps from different depths of undercut. J Prosthet Dent 74(3) (Sep 1995): 258-63.
- (28) Bridgeman, J. T., Marker, V. A., Hummel, S. K., Benson, B. W., and Pace, L. L. Comparison of titanium and cobalt-chromium removable partial denture clasps. J Prosthet Dent 78(2) (Aug 1997): 187-93.
- (29) Kim, D., Park, C., Yi, Y., and Cho, L. Comparison of cast Ti-Ni alloy clasp retention with conventional removable partial denture clasps. J Prosthet Dent 91(4) (Apr 2004): 374-82.

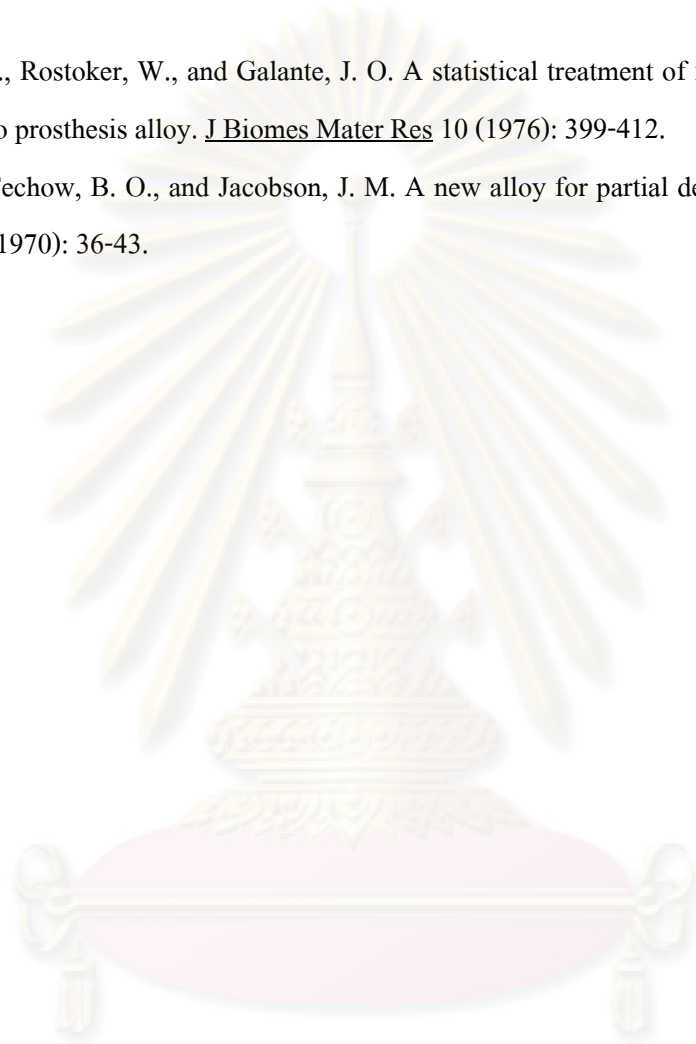
- (30) Arda, T., and Arikan, A. An in vitro comparison of retentive force and deformation of acetal resin and cobalt-chromium clasps. J Prosthet Dent 94(3) (Sep 2005): 267-74.
- (31) Snyder, H. A., and Duncanson, M. G., Jr. The effect of clasp form on permanent deformation. Int J Prosthodont 5(4) (Jul-Aug 1992): 345-50.
- (32) Vallittu, P. K., and Kokkonen, M. Deflection fatigue of cobalt-chromium, titanium, and gold alloy cast denture clasp. J Prosthet Dent 74(4) (Oct 1995): 412-9.
- (33) Iwama, C. Y., and Preston, J. D. Cobalt-chromium-titanium alloy for removable partial dentures. Int J Prosthodont 10(4) (Jul-Aug 1997): 309-17.
- (34) Lassila, L. V., and Vallittu, P. K. Effect of water and artificial saliva on the low cycle fatigue resistance of cobalt-chromium dental alloy. J Prosthet Dent 80(6) (Dec 1998): 708-13.
- (35) Mahmoud, A., Wakabayashi, N., Takahashi, H., and Ohyama, T. Deflection fatigue of Ti-6Al-7Nb, Co-Cr, and gold alloy cast clasps. J Prosthet Dent 93(2) (Feb 2005): 183-8.
- (36) Mahmoud, A. Pre-overloading to extend fatigue life of cast clasps. J Dent Res 86(9) (Sep 2007): 868-72.
- (37) Bates, J. F. Studies Related to the Fracture of Partial Dentures; Flexural Fatigue of a Cobalt-Chromium Alloy. Br Dent J 118 (Jun 15 1965): 532-7.
- (38) The Academy of Prosthetics. The glossary of prosthodontics term. 6 th ed. J Prosthet Dent 71 (1994): 43-107.
- (39) Devan, M. M. The nature of partial denture foundation : suggestion for its preservation. J Prosthet Dent 2 (2) (1952): 210-8.
- (40) Stewart, K. L., Rudd, K. D., and Kuebker, W. A. Clinical removable partial prosthodontics. 2 ed. Missouri: Ishiyaku EuroAmerica, Inc. Publishers, 1988.
- (41) The Academy of Prosthetics. Principles, concepts and practices in prosthodontics. J Prosthet Dent 73 (1995): 81-4.
- (42) Tench, R. W. Fundamentals of partial denture design. J Am Dent Assoc 23 (1936): 1087-92.
- (43) ศาสตราจารย์ทันตแพทย์หญิง โสภี ชาติสุทธิพันธุ์. ฟันปลอมบางส่วนชนิดถอดได้. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- (44) Roach, F. E. Mouth survey and design of partial denture. J Am Dent Assoc 21 (1934): 1166.
- (45) Kratochvil, F. Influence of occlusal rest position and clasp design on movement of abutment teeth. J Prosthet Dent 13 (1963): 114-24.

- (46) Krol, A. J. Clasp design for extension-base removable partial dentures. J Prosthet Dent 29(4) (1973): 408-15.
- (47) Eliason, C. M. RPA clasp design for distal-extension removable partial dentures. J Prosthet Dent 49(1) (Jan 1983): 25-7.
- (48) Applegate, O. C. Use of the paralleling surveyor in modern partial denture construction. J Am Dent Assoc 27 (1940): 1397-407.
- (49) Avant, W. E. Factors that influence retention of removable partial dentures. J Prosthet Dent 25(3) (Mar 1971): 265-70.
- (50) Bates, J. F. The mechanical properties of the cobalt-chromium alloys and their relation to partial denture design. Br Dent J 119(9) (Nov 2 1965): 389-96.
- (51) McGivney, G. P., and Castleberry, D. J. McCracken's removable partial prosthodontics. 8th ed. St Louis: CV Mosby Co, 1989.
- (52) Applegate, O. C. Essentials of removable partial denture prosthesis. 3 th ed. Philadelphia: W. B. Saunders Co, 1965.
- (53) Morris, H. F., Asgar, K., and Tillitson, E. Stress-relaxation testing. Part I: A new approach to the testing of removable partial denture alloys, wrought wires, and clasp behavior. J Prosthet Dent 46(2) (Aug 1981): 133-41.
- (54) Yuasa, Y., Sato, Y., Ohkawa, S., Nagasawa, T., and Tsuru, H. Finite element analysis of the relationship between clasp dimensions and flexibility. J Dent Res 69(10) (Oct 1990): 1664-8.
- (55) Brudvik, J. S., and Morris, H. F. Stress-relaxation testing. Part III: Influence of wire alloys, gauges, and lengths on clasp behavior. J Prosthet Dent 46(4) (Oct 1981): 374-9.
- (56) Johnson, D. L., and Duncanson, M. G., Jr. The effects of configuration on the stiffness parameters of half-round cast clasps. Quintessence Int 16(9) (Sep 1985): 609-14.
- (57) ทะนนง นัตรอุทัย. โลหะ (เจือ) ในทางทันตกรรม. เชียงใหม่: คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2528.
- (58) Johnson, D. L., Stratton, R. J., and Duncanson, M. G., Jr. The effect of single plane curvature on half-round cast clasps. J Dent Res 62(7) (Jul 1983): 833-6.
- (59) Sato, Y., Yausa, Y., Akagawa, Y., and Ohyama, S. An investigation of preferable taper and thickness ratios for cast circumferential clasp arms using finite element analysis. Int J Prosthodont 8 (1995): 392-7.

- (60) Sato, Y., Tsuga, K., Abe, Y., and Akagawa, Y. Finite element analysis of the effect of vertical curvature on half-oval cast clasps. *J Oral Rehabil* 26(7) (Jul 1999): 554-8.
- (61) International Organization for standardization. Metal Casting alloys part 1: Cobalt based alloys ISO 6871-1. 1st ed 1994. cited in ปรีนทร หริรัถยาพิทักษ์. กลสมบัตินของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมเกาที่เวียนใช้ วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- (62) American Society for metals. A.S.M. Metals Handbook 1948. cited in เจน รัตนไพศาล. ทันตวัสดุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, 2533.
- (63) McCabe, J. F. Applied dental materials. 7th ed. Oxford: Blackwell scientific publications, 1990.
- (64) Henriques, G. E., Consani, S., Rollo, J. M., and Andrade e Silva, F. Soldering and remelting influence on fatigue strength of cobalt-chromium alloys. *J Prosthet Dent* 78(2) (Aug 1997): 146-52.
- (65) Harcourt, H. J., and Cotterill, W. F. The remelting of cobalt-chromium alloys. *Br Dent J* 112 (1962): 198. cited in Henriques, G. E., Consani, S., Rollo, J. M., and Andrade e Silva, F. Soldering and remelting influence on fatigue strength of cobalt-chromium alloys. *J Prosthet Dent* 78(2) (Aug 1997): 146-52.
- (66) Lewis, A. J. The effect of remelting on the mechanical properties of a Nickel base partial denture casting alloy. *Aust Dent J* 20 (1975): 89-93.
- (67) Nelson, D. R., Palik, J. F., Morris, H. F., and Comella, M. C. Recasting a nickel-chromium alloy. *J Prosthet Dent* 55(1) (Jan 1986): 122-7.
- (68) Altay, O. T., Oktemet, M., Demirel, F., and Kocaderell, M. A comparative study of the internal structure, hardness, and remelting properties of different combination of new chromium-cobalt alloys. *Quintessence Dent Tech* (1990/1991): 153-5. cited in ปรีนทร หริรัถยาพิทักษ์. กลสมบัตินของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมเกาที่เวียนใช้ วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- (69) Khamis, E., Alexandria, M. S., and Tanta. Corrosion evaluation of recasting non-precious dental alloys. *Int Dent J* 3 (1995): 209-17.
- (70) ปรีนทร หริรัถยาพิทักษ์. กลสมบัตินของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมเกาที่เวียนใช้ วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

- (71) Horosawa, N., and Marek, M. The effect of recasting on corrosion of a silver-palladium alloy. Dent Mater 20 (2004): 352-7.
- (72) Peraire, M., Martinez-Gomis, J., Anglada, J. M., Bizar, J., Salsench, J., and Gil, F. J. Effects of recasting on the chemical composition, microstructure, microhardness, and ion release of 3 dental casting alloys and titanium. Int J Prosthodont 20(3) (May-Jun 2007): 286-8.
- (73) Hong, J., Razzoog, M., and Lang, B. R. The effect of recasting on the oxidation layer of a palladium-silver porcelain alloy. J Prosthet Dent 59 (1998): 420-5.
- (74) Lopes, M. B., Consani, S., Sinhoreti, M. A., and Correr-Sobrinho, L. Influence of recasting palladium-silver alloy on the fit of crowns with different marginal configurations. J Prosthet Dent 94(5) (Nov 2005): 430-4.
- (75) Ayad, M. F. Compositional stability and marginal accuracy of complete cast crowns made with as-received and recast type III gold alloy. J Prosthet Dent 87 (2002): 162-6.
- (76) Hargreaves, A. S. The prevalence of fractured dentures. A survey. Br Dent J 126(10) (May 20 1969): 451-5.
- (77) Brick, R. M., Rense, A. W., and Gordon, R. B. Structure and properties of engineering materials. 4 th ed. Tokyo: Tosho printing Co., Ltd.
- (78) Lassila, V., Holmlund, I., and Koivumaa, K. K. Bite force and its correlations in different denture types. Acta Odontol Scand 43(3) (Jul 1985): 127-32.
- (79) Shohet, H. Relative magnitudes of stress on abutment teeth with different retainers. J Prosthet Dent 21(3) (Mar 1969): 267-82.
- (80) Lowe, R. D., Kydd, W. L., and Smith, D. E. Swallowing and resting forces related to lingual flange thickness in removable partial dentures. J Prosthet Dent 23(3) (Mar 1970): 279-88.
- (81) Lammie, G. A., and Laird, W. R. E. Osborne & Lammie's partial dentures. 5th ed. London: Blackwell scientific publications, 1986.
- (82) Ogata, K., Miyake, T., and Okunishi, M. Longitudinal study on occlusal force distribution in lower distal-extension removable partial dentures with circumferential clasps. J Oral Rehabil 19(6) (Nov 1992): 585-94.
- (83) Ogata, K., and Shimizu, K. Longitudinal study on forces transmitted from denture base to retainers of lower free-end saddle dentures with Aker's clasps. J Oral Rehabil 18(5) (Sep 1991): 471-80.
- (84) Lewis, A. J. The effect of alloy composition on the development of internal porosity in cast structures. Aust Dent J 23(2) (Apr 1978): 192-5.

- (85) Wise, H. B., and Kaiser, D. A. A radiographic technique for examination of internal defects in metal frameworks. J Prosthet Dent 42(5) (Nov 1979): 594-5.
- (86) Elarbi, E. A., Ismail, Y. H., Azarbal, M., and Saini, T. S. Radiographic detection of porosities in removable partial denture castings. J Prosthet Dent 54(5) (Nov 1985): 674-7.
- (87) Miller, H. L., Rostoker, W., and Galante, J. O. A statistical treatment of fatigue of the cast Co-Cr-Mo prosthesis alloy. J Biomes Mater Res 10 (1976): 399-412.
- (88) Asgar, K., Techow, B. O., and Jacobson, J. M. A new alloy for partial dentures. J Prosthet Dent 23 (1970): 36-43.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

แสดงส่วนประกอบและคุณสมบัติของโลหะที่ใช้ในการทดลอง และ
 คำแนะนำในการหล่อโลหะของบริษัทผู้ผลิต
 (Vitallium[®], Dentsply, Austenal, U.S.A.)

Composition	Cobalt 60% Chromium 31.5% Molybdenum 6.0% Nickel and Beryllium free alloy
0.2% yield strength	616 MPa
Ultimate tensile strength	855 MPa
Modulus of elasticity	200,000 MPa
Percent elongation	4.5%
Vickers hardness	428 VHN1
Melting range	1,300-1,370 ^o C
Virgin metal / revert ratio	At least 50% new metal should be used for each casting
Revert (button)	Must be sandblasted and cleaned prior to reuse

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข แสดงผลทางสถิติของการทดสอบแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

ตาราง ข.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่มที่			max load (N)
1	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	121.094
		Std. Deviation	10.13436749
	Most Extreme Differences	Absolute	0.176965298
		Positive	0.176965298
		Negative	-0.099318331
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.559613407
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.912837732	
2	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	120.956
		Std. Deviation	16.86008844
	Most Extreme Differences	Absolute	0.128112454
		Positive	0.128112454
		Negative	-0.114327098
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.405127151
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.996634586	
3	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	110.014
		Std. Deviation	23.94933365
	Most Extreme Differences	Absolute	0.214738331
		Positive	0.147147466
		Negative	-0.214738331
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.679062226
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.745748311	

a Test distribution is Normal.

B Calculated from data.

ตาราง ข.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

Descriptives

max load (N)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	10	121.094	10.13436749	3.204768392	113.8443102	128.3436898	106.56	139.67
2	10	120.956	16.86008844	5.331628102	108.8950193	133.0169807	92.58	149.53
3	10	110.014	23.94933365	7.573444277	92.88167878	127.1463212	77.78	140.93
Total	30	117.3547	18.05472824	3.29632731	110.6129203	124.096413	77.78	149.53

ตาราง ข.3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลอวี (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

max load (N)

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
6.865794088	2	27	0.003884523

ตาราง ข.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust Test) ชนิด Brown-Forsythe

Robust Tests of Equality of Means

max load (N)

	Statistic(a)	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	1.262379335	2	19.75489302	0.304834611

a Asymptotically F distributed.

ตาราง ข.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเสน

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Max load

(I) group	(J) group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.138	6.220675	0.999995	16.6006969	16.87669692
	3	11.08	8.2236	0.492811	-11.6654388	33.82543881
2	1	-0.138	6.220675	0.999995	-16.8766969	16.60069692
	3	10.942	9.261928	0.585738	-13.7100231	35.59402312
3	1	-11.08	8.2236	0.492811	-33.8254388	11.66543881
	2	-10.942	9.261928	0.585738	35.5940231	13.71002312

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค แสดงผลทางสถิติของการทดสอบแรงที่จุดคราก

ตาราง ค.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของแรงที่จุดคราก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่มที่			load at yield point (N)
1	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	74.80718
		Std. Deviation	8.841076449
	Most Extreme Differences	Absolute	0.122002057
		Positive	0.097515317
		Negative	-0.122002057
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.385804378
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.998366658	
2	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	75.8233
		Std. Deviation	8.792222165
	Most Extreme Differences	Absolute	0.160145219
		Positive	0.160145219
		Negative	-0.126708519
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.506423649
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.959687212	
3	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	64.91996
		Std. Deviation	11.8482238
	Most Extreme Differences	Absolute	0.181756339
		Positive	0.181756339
		Negative	-0.141332823
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.574764009
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.895831962	

a Test distribution is Normal.

b Calculated from data.

ตาราง ค.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบแรงที่จุดคราก

Descriptives

Load at yield point

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	10	74.80718	8.841076	2.795794	68.48265	81.13171	57.589	86.2638
2	10	75.8233	8.792222	2.780345	69.53372	82.11288	65.7818	94.962
3	10	64.91996	11.84822	3.746737	56.44425	73.39567	48.4918	82.0344
Total	30	71.85015	10.80901	1.973447	67.81399	75.8863	48.4918	94.962

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

Test of Homogeneity of Variances

Load at yield point

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.931372	2	27	0.406306

ตาราง ค.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

แรงที่จุด yield

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	725.5748	2	362.7874	3.678786	0.038646
Within Groups	2662.634	27	98.61607		
Total	3388.209	29			

ตาราง ก.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแอลเอสดี

Multiple Comparisons

Dependent Variable: load at yield point

LSD

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-1.01612	4.44108	0.821	-10.1285	8.0962
	3	9.88722*	4.44108	0.035	0.7749	18.9996
2	1	1.01612	4.44108	0.821	-8.0962	10.1285
	3	10.90334*	4.44108	0.021	1.791	20.0157
3	1	-9.88722*	4.44108	0.035	-18.9996	-0.7749
	2	-10.90334*	4.44108	0.021	-20.0157	-1.791

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง แสดงผลทางสถิติของการทดสอบค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

ตาราง ง.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่มที่			modulus (MPa)
1	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	347.199
		Std. Deviation	47.90354022
	Most Extreme Differences	Absolute	0.1543483
		Positive	0.1543483
		Negative	-0.144360783
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.48809218
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.971054347	
2	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	346.302
		Std. Deviation	82.37579118
	Most Extreme Differences	Absolute	0.2449661
		Positive	0.230482622
		Negative	-0.2449661
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.774650827
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.585879626	
3	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	253.913
		Std. Deviation	114.7444259
	Most Extreme Differences	Absolute	0.145284591
		Positive	0.145284591
		Negative	-0.102444612
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.459430215
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.984205708	

a Test distribution is Normal.

b Calculated from data.

ตาราง ง.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบตามคู่มือสปีดหยุน

Descriptives

modulus (MPa)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	10	347.199	47.90354	15.14843	312.9308717	381.4671283	288.35	414.81
2	10	346.302	82.37579	26.04951	287.3739089	405.2300911	253.84	457.59
3	10	253.913	114.7444	36.28537	171.8297825	335.9962175	95.47	457.43
Total	30	315.8047	94.26374	17.21013	280.6060075	351.0033258	95.47	457.59

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

Test of Homogeneity of Variances

modulus (MPa)

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.93176	2	27	0.070432

ตาราง ง.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

modulus (MPa)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	57462.69909	2	28731.34954	3.874446457	0.033167114
Within Groups	200221.2307	27	7415.601136		
Total	257683.9297	29			

ตาราง ง.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแอลเอสดี

Multiple Comparisons

Dependent Variable: modulus (MPa)

LSD

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.897	38.5113	0.982	-78.1217	79.9157
	3	93.28600*	38.5113	0.022	14.2673	172.3047
2	1	-0.897	38.5113	0.982	-79.9157	78.1217
	3	92.38900*	38.5113	0.024	13.3703	171.4077
3	1	-93.28600*	38.5113	0.022	-172.3047	-14.2673
	2	-92.38900*	38.5113	0.024	-171.4077	-13.3703

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ แสดงผลทางสถิติของการทดสอบค่าแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออก 0.25 มม.

ตาราง จ.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออก 0.25 มม.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่มที่			Load required for 0.25 mm deflection (N)
1	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	39.73
		Std. Deviation	4.128728618
	Most Extreme Differences	Absolute	0.191090209
		Positive	0.183370373
		Negative	-0.191090209
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.6042803
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.858564865
2	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	39.718
		Std. Deviation	8.94539211
	Most Extreme Differences	Absolute	0.159438275
		Positive	0.124731563
		Negative	-0.159438275
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.504188095
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.961203115
3	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	32.045
		Std. Deviation	7.679010715
	Most Extreme Differences	Absolute	0.16183389
		Positive	0.16183389
		Negative	-0.123668089
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.511763695
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.955918295

a Test distribution is Normal.

b Calculated from data.

ตาราง จ.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบแรงที่ทำให้ชิ้นงานเบนออก 0.25 มม.

Descriptives

Load required for 0.25 mm deflection (N)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	10	39.73	4.128729	1.305619	36.77649	42.68351	33.97	44.92
2	10	39.718	8.945392	2.828781	33.31885	46.11715	21.9	50.02
3	10	32.045	7.679011	2.428316	26.55177	37.53823	20.79	48.11
Total	30	37.16433	7.872731	1.437358	34.22461	40.10406	20.79	50.02

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

Test of Homogeneity of Variances

Load required for 0.25 mm deflection (N)

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.75627421	2	27	0.191845366

ตาราง จ.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

Load required for 0.25 mm deflection (N)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	393.1143267	2	196.5571633	3.779130379	0.035724032
Within Groups	1404.30281	27	52.01121519		
Total	1797.417137	29			

ตาราง จ.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแอลเอสดี

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Load required for 0.25 mm deflection (N)

LSD

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.012	3.22525	0.997	-6.6057	6.6297
	3	7.68500*	3.22525	0.024	1.0673	14.3027
2	1	-0.012	3.22525	0.997	-6.6297	6.6057
	3	7.67300*	3.22525	0.025	1.0553	14.2907
3	1	-7.68500*	3.22525	0.024	-14.3027	-1.0673
	2	-7.67300*	3.22525	0.025	-14.2907	-1.0553

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ แสดงผลทางสถิติของการทดสอบระยะที่จุดคราก

ตาราง ฉ.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของระยะที่จุดคราก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่มที่			Distance at yield point (mm)
1	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	0.697
		Std. Deviation	0.068807299
	Most Extreme Differences	Absolute	0.230910903
		Positive	0.120690902
		Negative	-0.230910903
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.730204389
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.660541764
2	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	0.612
		Std. Deviation	0.177876362
	Most Extreme Differences	Absolute	0.250783764
		Positive	0.17187127
		Negative	-0.250783764
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.793047894
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.555494028
3	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	0.609
		Std. Deviation	0.08305955
	Most Extreme Differences	Absolute	0.15449005
		Positive	0.15449005
		Negative	-0.152679924
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.488540435
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.970804905

a Test distribution is Normal.

b Calculated from data.

ตารางที่ น.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบระยะที่จุดคราก

Descriptives

Distance at yield point (mm)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	10	0.697	0.068807	0.021759	0.647778	0.746222	0.58	0.8
2	10	0.612	0.177876	0.056249	0.484755	0.739245	0.29	0.91
3	10	0.609	0.08306	0.026266	0.549583	0.668417	0.45	0.74
Total	30	0.639333	0.12309	0.022473	0.593371	0.685296	0.29	0.91

ตาราง น.3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยวิธีการทดสอบแบบเลอวี (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

Distance at yield point (mm)

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.327224918	2	27	0.116826516

ตาราง น.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

Distance at yield point (mm)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.049926667	2	0.024963333	1.730627022	0.196252774
Within Groups	0.38946	27	0.014424444		
Total	0.439386667	29			

ตาราง น.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแอลเอสดี

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Distance at yield point (mm)

LSD

(I) กลุ่มที่	(J) กลุ่มที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.085	0.053711	0.12517142	-0.025206	0.195206
	3	0.088	0.053711	0.112942537	-0.022206	0.198206
2	1	-0.085	0.053711	0.12517142	-0.195206	0.025206
	3	0.003	0.053711	0.955869147	-0.107206	0.113206
3	1	-0.088	0.053711	0.112942537	-0.198206	0.022206
	2	-0.003	0.053711	0.955869147	-0.113206	0.107206

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข แสดงผลทางสถิติของการทดสอบระยะที่ชิ้นงานแตกหัก

ตาราง ข.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของระยะที่ชิ้นงานแตกหัก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

กลุ่มที่			Distance at fractured point (mm)
1	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	2.24
		Std. Deviation	0.516139516
	Most Extreme Differences	Absolute	0.185671327
		Positive	0.161293727
		Negative	-0.185671327
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.587144288
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.880833524	
2	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	2.128
		Std. Deviation	0.390407195
	Most Extreme Differences	Absolute	0.212897882
		Positive	0.106689855
		Negative	-0.212897882
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.673242216
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.755191612	
3	N		10
	Normal Parameters(a,b)	Mean	1.863
		Std. Deviation	0.486736296
	Most Extreme Differences	Absolute	0.13441969
		Positive	0.13441969
		Negative	-0.108343414
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.425072384
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.993612522	

a Test distribution is Normal.

b Calculated from data.

ตาราง ข.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบระยะที่ชิ้นงานแตกหัก

Descriptives

Distance at fractured point (mm)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	10	2.24	0.51614	0.163218	1.870776	2.609224	1.21	3.03
2	10	2.128	0.390407	0.123458	1.84872	2.40728	1.39	2.69
3	10	1.863	0.486736	0.15392	1.51481	2.21119	1.16	2.64
Total	30	2.077	0.478908	0.087436	1.898173	2.255827	1.16	3.03

ตาราง ข.3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances)
ด้วยการทดสอบแบบเลอวี (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

Distance at fractured point (mm)

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.348721842	2	27	0.708720553

ตาราง ข.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

Distance at fractured point (mm)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.74966	2	0.37483	1.7148674	0.199014883
Within Groups	5.90157	27	0.218576667		
Total	6.65123	29			

ตาราง ข.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแอลเอสดี

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Distance at fractured point

LSD

(I) group	(J) group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	0.112	0.209082	0.596569	-0.317001	0.541001076
	3	0.377	0.209082	0.082542	-0.052001	0.806001076
2	1	-0.112	0.209082	0.596569	-0.541001	0.317001076
	3	0.265	0.209082	0.215819	-0.164001	0.694001076
3	1	-0.377	0.209082	0.082542	-0.806001	0.052001076
	2	-0.265	0.209082	0.215819	-0.694001	0.164001076

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข แสดงผลทางสถิติของการทดสอบความถี่เบี่ยงเบน

ตาราง ข.1 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบของการให้แรงที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

group			cycles
1	N		5
	Normal Parameters(a,b)	Mean	8457
		Std. Deviation	2371.2457
	Most Extreme Differences	Absolute	0.2971372
		Positive	0.2971372
		Negative	-0.2437941
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.6644189
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.769351	
2	N		5
	Normal Parameters(a,b)	Mean	5479
		Std. Deviation	1466.4759
	Most Extreme Differences	Absolute	0.2401081
		Positive	0.2401081
		Negative	-0.2329172
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.536898
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.9353613	
3	N		5
	Normal Parameters(a,b)	Mean	2880.4
		Std. Deviation	1471.9281
	Most Extreme Differences	Absolute	0.2375402
		Positive	0.1937946
		Negative	-0.2375402
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.5311559
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.9404669	

a Test distribution is Normal.

b Calculated from data.

ตาราง ซ.2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบความล้มเหลวแบบ

Descriptives

Cycles to failure

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	5	8457.00	2371.246	1060.453	5512.71	11401.29	6811	12453
2	5	5479.00	1466.476	655.828	3658.13	7299.87	3892	7233
3	5	2880.40	1471.928	658.266	1052.76	4708.04	700	4802
Total	15	5605.47	2898.594	748.414	4000.28	7210.65	700	12453

ตาราง ซ.3 แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยวิธีการทดสอบแบบเลอวี (Levene's Test)

Test of Homogeneity of Variances

Cycles to failure

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.747	2	12	.494

ตาราง ซ.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA)

ANOVA

Cycles to failure

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	77866122.533	2	38933061.267	11.751	0.001
Within Groups	39759719.200	12	3313309.933		
Total	117625841.733	14			

ตาราง ข.5 แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแอลเอสดี

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Cycles to failure

LSD

(I) group	(J) group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	2978.000(*)	1151.227	.024	469.69	5486.31
	3	5576.600(*)	1151.227	.000	3068.29	8084.91
2	1	-2978.000(*)	1151.227	.024	-5486.31	-469.69
	3	2598.600(*)	1151.227	.043	90.29	5106.91
3	1	-5576.600(*)	1151.227	.000	-8084.91	-3068.29
	2	-2598.600(*)	1151.227	.043	-5106.91	-90.29

* The mean difference is significant at the .05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเกศินี พัฒนเจริญ เกิดที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2525 สัญชาติไทย เชื้อชาติไทย จบการศึกษาระดับปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตร์ บัณฑิต พ.ศ. 2549 จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปฏิบัติงานใน ตำแหน่งทันตแพทย์ประจำโรงพยาบาลศิริประจักษ์ จังหวัดสุพรรณบุรี ระหว่างปี 2549 - 2550 ปฏิบัติ งานในตำแหน่งทันตแพทย์ประจำคลินิกเอกชน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ระหว่าง พ.ศ. 2550- ปัจจุบัน



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย