

การวิเคราะห์ความเค้นในรากฟันเทียมของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดโดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STRESS ANALYSIS IN HYBRID DENTURE BY THE FINITE ELEMENT METHOD

เชิดพันธุ์^{1*} วิทูราภรณ์ และ ชาคิต¹ ตั้งศิริมณฑล

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

โทร 0-2218-6622 โทรสาร 0-2252-2889 อีเมล chirdpun@hotmail.com

Chirdpun^{1*} Vitooraporn and Chacrit¹ Tangsirimongkol

¹Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University Patumwan, Bangkok 10330

Tel: 0-2218-6622 Fax: 0-2252-2889 E-mail: chirdpun@hotmail.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริดบนกระดูกขากรรไกรล่างโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปัญหาและแนวทางในการแก้ปัญหาซึ่งเกิดจากการลดจำนวนรากฟันเทียมที่รองรับฟันปลอมไฮบริดให้เหลือเพียง 3 ตัว โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งฝังรากฟันเทียม 3 ตัว และ 5 ตัว เมื่อมีแรงบดเคี้ยวกระจายทั้งปากและเมื่อมีแรงบดเคี้ยวเฉพาะฟันกรามด้านขวา กำหนดให้ความยาวรากฟันเทียมระยะระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและหลังสุด และความยาวส่วนยื่นด้านท้ายฟันเทียมปลอมเท่ากัน จากการทำนายค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า การลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรล่างให้เหลือเพียง 3 ตัวทำให้ค่าความเค้นสูงสุดที่ตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุดนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการฝังรากฟันเทียมจำนวน 5 ตัว เนื่องจากรากฟันเทียมแต่ละตัวต้องรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวทางในการแก้ปัญหาก็คือการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างฟันปลอม ได้แก่ การเพิ่มขนาดของหลักยึดรากฟันเทียม หรือการเสริมบารองรับให้แก่หลักยึดรากฟันเทียม และอีกแนวทางในการแก้ปัญหาก็คือการลดโมเมนต์ดัดที่ส่งสู่รากฟันเทียมตัวหลังสุด ได้แก่ การเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะให้มีความแข็งแรงมากขึ้น หรือการออกแบบโครงสร้างฟันปลอมถ่ายทอดแรงในแนวแกนรากฟันเทียมลงสู่รากฟันเทียมเท่านั้น

Abstract: This research is to investigate the probability on reducing of implant that used to support the hybrid denture. The finite element method is used as a tool to study the stress distribution in this study. The hybrid denture supported with three and five implants is modeled and embedded in a model of the mandibular bone. The vertical chewing force is then applied on the denture in two different patterns, i.e. one as a set of concentrated force throughout the denture and the other as a concentrated force on the right molars. The length of the implant,

the distance between the front end and the rear end of the implant and the length of the distal extension cantilevers is set to be equal. The results from the finite element method reveal that by reducing the number of implants into three, the maximum stress occurred in the implant at the rear end are higher than that when using five implants. This is because each implant must bear on the higher bending moment. The solutions on this problem are to enhance the strength on the hybrid denture by increasing the size of abutment or adding the chamfer at the neck of abutment. Other solutions are to reduce the bending moment on the implant at the rear end by using other materials with higher strength such as cobalt or to redesign the structure of denture so that it receives only the axial force.

1. บทนำ

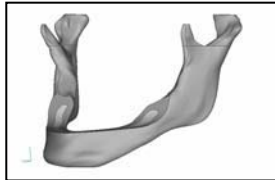
การทำฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดในกระดูกขากรรไกรล่างสำหรับผู้ป่วยไร้ฟัน ทันตแพทย์จะต้องทำการผ่าตัดฝังรากฟันเทียมลงในกระดูกขากรรไกรล่างจำนวนมากถึง 4-6 ตัว แล้วแต่สภาพของกระดูกขากรรไกร แต่ถ้าหากสามารถลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรให้เหลือเพียง 3 ตัวได้ ก็จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ป่วยที่ประสบกับปัญหาทางด้านสภาพร่างกายซึ่งไม่สามารถทนต่อการผ่าตัดฝังรากฟันเทียมจำนวนมากได้ โดยความเป็นไปได้ในการลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรล่างนั้นสามารถพิจารณาได้จากการกระจายความเค้นในกระดูกรอบ ๆ รากฟันเทียม ความเค้นในรากฟันเทียม และความเค้นในส่วนของสะพานฟันปลอม

2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ฟันปลอมไฮบริดในขากรรไกรล่าง

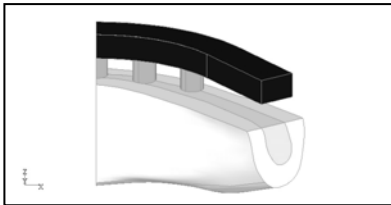
การจำลองกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อศึกษาการกระจายความเค้นรอบ ๆ รากฟันเทียมนั้นไม่จำเป็นต้องจำลองขากรรไกรล่างทั้งอัน เนื่องจากผลการทดสอบทางคลินิกพบว่า การจำลองขากรรไกรให้อยู่ใน

ลักษณะของคานยื่น โดยมีจุดรองรับแบบครึ่งปลายอยู่ที่หน้าตัดขวางของกระดูกขากรรไกรล่างบริเวณหลังรากฟันเทียมตัวสุดท้ายที่ระยะปลายสุดฟันปลอมนั้นเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณความเค้นรอบรากฟันเทียมแล้ว ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองในการศึกษาจึงได้นำภาพสามมิติที่ใช้คอมพิวเตอร์สร้างขึ้นจากภาพที่ได้จากการทำ CT scan (รูปที่ 1) มาตัดกระดูกขากรรไกรล่างส่วนที่อยู่เลยระยะปลายสุดของฟันปลอมไปทางด้านท้ายออก เพื่อใช้เป็นแบบจำลองส่วนที่เป็นกระดูกขากรรไกรล่าง

เนื่องจากกระดูกขากรรไกรล่างและชุดฟันปลอมไฮบริดในแบบจำลองมีความสมมาตรซ้ายขวา ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองครึ่งขวาเพียงครึ่งเดียว (รูปที่ 2) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นโดยมีหน้าตัดที่แบ่งครึ่งขากรรไกรเป็นหน้าตัดสมมาตร

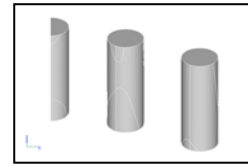


รูปที่ 1 ภาพสามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างทั้งชิ้นที่สร้างขึ้นจากภาพที่ได้จากการทำ CT scan



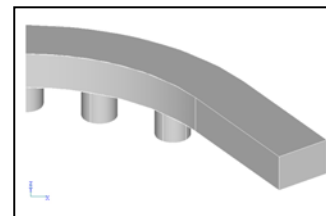
รูปที่ 2 รูปร่างลักษณะครึ่งส่วนด้านขวาของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 5 ตัวในกระดูกขากรรไกรล่าง ส่วนบนสุด (สีดำทึบ) คือโครงโลหะ ใต้โครงโลหะคือหลักยึด สีขาวคือกระดูกทึบ ภายในกระดูกทึบคือกระดูกโปร่ง รากฟันเทียมจะฝังอยู่ในกระดูกขากรรไกรล่างใต้หลักยึดรากฟันเทียม

รูปร่างของรากฟันเทียมถูกจำลองให้เป็นทรงกระบอกสูง 10 มม. มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.75 มม. รากฟันเทียมจะฝังตัวลงในกระดูกขากรรไกรล่างโดยให้แกนรากฟันเทียมอยู่ในแนวตั้ง ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัว จะฝังรากฟันเทียมกระจายอยู่ในขากรรไกร โดยกำหนดให้รากฟันเทียมแต่ละตัวอยู่ห่างจากกัน 11 มม. วัดจากจุดศูนย์กลางรากฟันเทียมตัวหนึ่งไปยังรากฟันเทียมอีกตัวหนึ่ง เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จึงกำหนดให้รากฟันเทียมตัวหลังสุดเป็นรากฟันเทียมตัวที่ 1 รากฟันเทียมตัวหน้าสุดเป็นรากฟันเทียมตัวที่ 3 และรากฟันเทียมที่อยู่ระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าและตัวหลังก็คือรากฟันเทียมตัวที่ 2 โดยที่หน้าตัดสมมาตรของแบบจำลองจะตัดผ่านครึ่งรากฟันเทียมตัวที่ 3 ดังรูปที่ 3 ส่วนในแบบจำลองที่ฝังรากฟันเทียม 3 ตัวจะไม่มีการฝังรากฟันเทียมตัวที่ 2



รูปที่ 3 การเรียงตัวของรากฟันเทียม

โครงสร้างฟันปลอมที่อยู่เหนือกระดูกจะประกอบด้วยโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม โดยโครงโลหะจำลองให้มีรูปร่างเป็นคานโค้งรูปเกือกม้าซึ่งมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 6 มม. หนา 4 มม. และมีส่วนยื่นด้านท้ายยาว 20 มม. ทั้งด้านซ้ายและขวา ส่วนหลักยึดรากฟันเทียมเป็นทรงกระบอกมีหน้าตัดเท่ากับรากฟันเทียมแต่มีความสูง 4 มม. ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะของโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม

กำหนดให้ส่วนที่เป็นรากฟันเทียม โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมทำมาจากโลหะไททาเนียมอัลลอย (Ti-6%Al-7%Nb) โดยมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 105 GPa มีอัตราส่วนของปริมาตรเท่ากับ 0.35 และมีความเค้นดึงที่จุดครากเท่ากับ 830 MPa และความเค้นเฉือนที่จุดครากเท่ากับ 415 MPa

คุณสมบัติวัสดุของกระดูกขากรรไกรถูกกำหนดจากคุณสมบัติของกระดูกที่ใช้ในงานวิจัยทางด้านชีวกลศาสตร์ โดยกำหนดให้กระดูกมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันและอยู่ในกลุ่มไอโซทรอปิก และเลือกใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดทางสถิติจากกลุ่มประชากรที่มีอายุ เพศ และพันธุกรรมที่หลากหลายในการกำหนดเป็นคุณสมบัติให้กระดูกทึบมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 13.7 GPa อัตราส่วนปริมาตรเท่ากับ 0.3 และในกระดูกโปร่งมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 1.37 GPa อัตราส่วนปริมาตรเท่ากับ 0.3 ส่วนค่าความแข็งแรงของกระดูกทึบซึ่งได้จากการทดสอบกำลังวัสดุ พบว่า ค่าความแข็งแรงวัสดุจากการทดสอบแรงดึงเท่ากับ 133 MPa จากการทดสอบแรงกดเท่ากับ 193 MPa และจากการทดสอบแรงเฉือนเท่ากับ 68 MPa

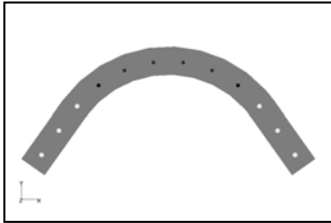
กำหนดให้แรงบดเคี้ยวเป็นแรงในแนวตั้งกระทำบนจุดสบฟัน 12 จุด กระจายอยู่ด้านบนของโครงโลหะด้วยระยะห่างที่คงที่ โดยมีจุดสบฟันหน้า 4 จุด จุดสบฟันเขี้ยว 2 จุด จุดสบฟันหลัง (ฟันกราม) 6 จุด ดังรูปที่ 5

ลักษณะการบดเคี้ยวจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 แรงบดเคี้ยวกระจายทั้งปาก กำหนดให้ใช้ชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N โดยมีแรงบดเคี้ยวในแนวตั้งที่กระทำกับแต่ละจุดสบ

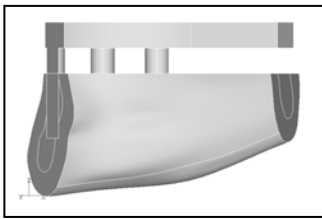
พื่นหน้า เท่ากับ 155 N แรงบิดเฉื่อยในแนวตั้งกระทำกับแต่ละจุดสบฟัน เขี้ยวเท่ากับ 175 N และแรงบิดเฉื่อยในแนวตั้งกระทำกับแต่ละจุดสบ ฟันกรามเท่ากับ 195 N

กรณีที่ 2 แรงบิดเฉื่อยเฉพาะบริเวณฟันกรามด้านขวากระทำกับแต่ละ จุดสบฟันกรามเท่ากับ 190 N



รูปที่ 5 ตำแหน่งจุดสบฟันบนโครงโลหะ

ในการศึกษานี้กำหนดให้มีจุดรองรับที่ด้านทานทั้งการเคลื่อนที่ และการหมุนของหน้าตัด (แบบตรึงปลาย) ที่ปลายแบบจำลองกระดูก ขากรรไกรล่างซึ่งมีตำแหน่งเดียวกับระยะปลายสุดของฟันปลอมใน แนวตั้ง และแบบจำลองนั้นมีสมมาตรซ้ายขวาที่หน้าตัดสมมาตร ซึ่งจะ ให้ผลจากการคำนวณตรงกับผลการตรวจสอบทางคลินิก ดังรูปที่ 6



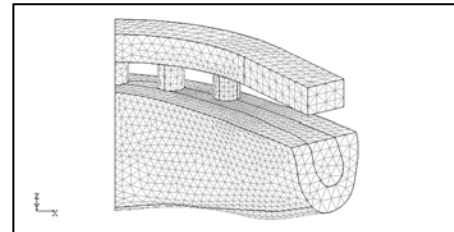
รูปที่ 6 ตำแหน่งของจุดรองรับบนแบบจำลอง ซึ่งหน้าตัดด้านขวา คือหน้าตัดที่กำหนดค่าขอบเขตให้ไม่มีการเคลื่อนที่และการหมุนของ หน้าตัด ส่วนหน้าตัดด้านซ้ายคือหน้าตัดที่กำหนดให้แบบจำลองมีความ สมมาตรของรูปร่างแบบจำลองที่หน้าตัดนี้

งานวิจัยนี้เลือกใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ โดยที่ในแต่ละ ส่วนของแบบจำลองจะกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กไม่ เท่ากัน โดยบริเวณที่ไม่ได้รับความสนใจในการศึกษานี้ซึ่งได้แก่บริเวณ จุดที่กำหนดให้มีแรงบิดเฉื่อยและจุดที่กำหนดให้เป็นจุดรองรับของ โครงสร้างนั้นจะกำหนดให้เอลิเมนต์มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 1.5 มม.) ส่วนของกระดูกครอบฟันเทียมที่มีความเค้นสูงซึ่งเป็นจุดที่มีความ สำคัญต่อการศึกษาจะกำหนดให้เอลิเมนต์มีขนาดเล็ก(ประมาณ 0.7 มม.) ซึ่งหากกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้เล็กกว่านี้ พบว่าผลที่ได้ จากการคำนวณจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รูปที่ 7 แสดงการ แบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองที่มีการฝังรากฟันเทียม 5 ตัว

3. การกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม

เนื่องจากทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายการแตกหักของวัสดุ นั้น แตกต่างกันในวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความ เค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจึงใช้ค่าความเค้นที่แตกต่างกันมาเป็นเกณฑ์

ในการพิจารณา โดยที่ส่วนของแบบจำลองที่เป็นโลหะไททาเนียมอัลลอยซึ่งเป็นวัสดุเหนียวนั้นใช้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเป็นเกณฑ์ในการ วิเคราะห์ ส่วนที่เป็นกระดูกซึ่งเป็นวัสดุเปราะนั้นใช้ค่าความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือนสูงสุด โดยที่สามารถศึกษาการ กระจายค่าความเค้นดึงได้จากค่าความเค้นหลักสูงสุดและศึกษาการ กระจายความเค้นกดได้จากการค่าความเค้นหลักต่ำสุด ส่วนค่าความ เค้นเฉือนนั้นสามารถศึกษาการกระจายความเค้นได้จากการกระจาย ความเค้นเฉือนสูงสุด ทั้งนี้ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอม นั้นต้องมีค่าไม่เกินจุดครากของไททาเนียมอัลลอย ส่วนค่าความเค้นใน กระดูกครอบฟันเทียมต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่ากำลังวัสดุของกระดูก ติบ ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังต่อไปนี้

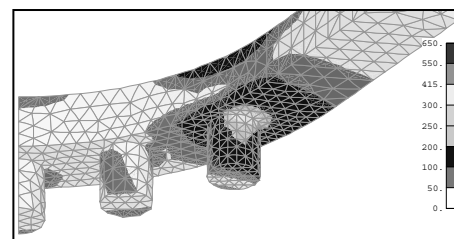


รูปที่ 7 การแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังราก ฟันเทียม 5 ตัวบนกระดูกขากรรไกรล่าง

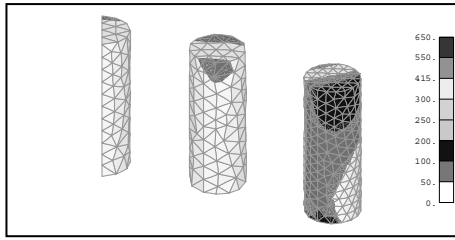
3.1 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 1 เมื่อมีแรงบิดเฉื่อยกระจายทั่วทั้งปากโดยกำหนดชุดแรงบิดเฉื่อย 155-175-195 N

3.1.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม

ความเค้นเฉือนบริเวณคอคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าสูงกว่า ความเค้นเฉือนในบริเวณอื่นๆในโครงสร้างฟันปลอม โดยมีค่าความเค้น เฉือนสูงสุดซึ่งอยู่ที่คอคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้าย ฟันปลอมเท่ากับ 410 MPa ใกล้เคียงกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดคราก ของไททาเนียมอัลลอย (415 MPa) การกระจายความเค้นในบริเวณนี้ อยู่ในลักษณะของความเค้นขมขม สันเกิดได้จากการที่ความเค้นที่มีค่า สูงเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆที่มูมรอยต่อระหว่างหลักยึดกับโครงโลหะ ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณอื่น เช่น ในหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 2 และ 3 ในโครงโลหะ รวมถึงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนรากฟันเทียม ทั้งหมดมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททา นิยมอัลลอย



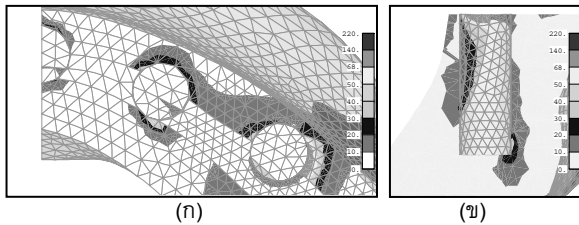
(ก)



(ข)

รูปที่ 8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa ที่เกิดบน (ก) โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, (ข) รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

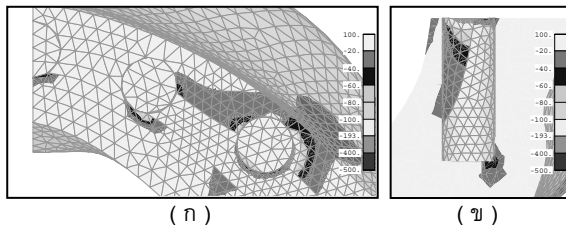
3.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



(ก)

(ข)

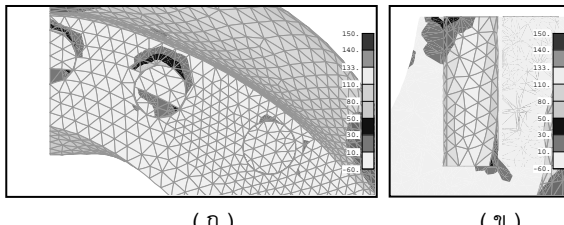
รูปที่ 9 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



(ก)

(ข)

รูปที่ 10 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



(ก)

(ข)

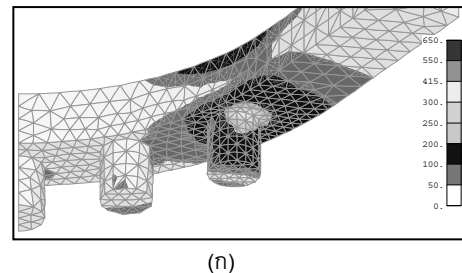
รูปที่ 11 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของ

กระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 2

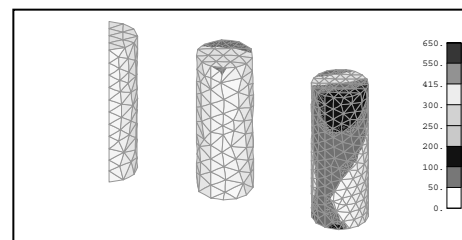
ค่าความเค้นเฉือน ค่าความเค้นกด ค่าความเค้นดึงในส่วนของกระดูกโปร่งมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับความเค้นในกระดูกทึบ สาเหตุจากการที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของกระดูกโปร่งมีค่าต่ำกว่ากระดูกทึบถึง 10 เท่า ทำให้การถ่ายทอดแรงจากรากฟันเทียมลงสู่กระดูกทึบมากกว่ากระดูกโปร่ง โดยที่ค่าความเค้นที่กระจายลงสู่กระดูกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวนั้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่กระดูกระดับบนสุดซึ่งตรงกับบริเวณคอของรากฟันเทียม ซึ่งความเค้นจะมีค่าลดลงในกระดูกที่อยู่ลึกลงไปจากรากฟันเทียม และอยู่ห่างจากรากฟันเทียมออกไปในแนวรัศมีของรากฟันเทียม ความเค้นเฉือน ความเค้นกดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากำลังวัสดุเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆบนกระดูกบริเวณคอของรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยที่จุดนี้ ค่าความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 124 MPa และค่าความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ -322 MPa ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมอยู่ที่กระดูกบริเวณคอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 83 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังวัสดุของกระดูก

3.2 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 2 เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเฉพาะบริเวณฟันกรามขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

3.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



(ก)



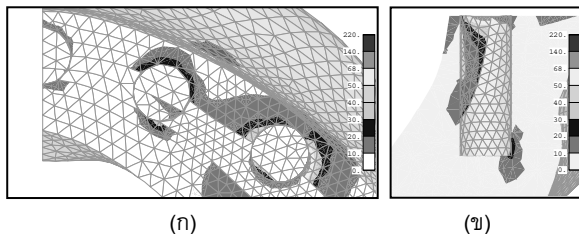
(ข)

รูปที่ 12 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa ที่เกิดบน (ก) โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, (ข) รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190N

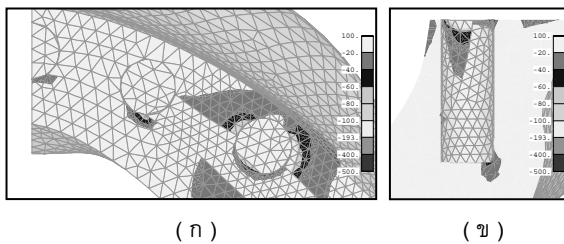
ลักษณะการกระจายความเค้นในกรณีนี้ไม่แตกต่างจากในกรณีที่ 1 โดยที่โครงสร้างฟันปลอมเกิดความเค้นสูงเป็นบริเวณเล็กๆในลักษณะของความเค้นขมุนุ่มที่บริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าเข้าใกล้ค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททาเนียมอัล

ลอย โดยที่ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 411 MPa ส่วนค่าความเค้นเฉือนที่กระจายอยู่ในบริเวณอื่นๆของโครงสร้างพื้นป्लอมนั้นมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของโลหะ

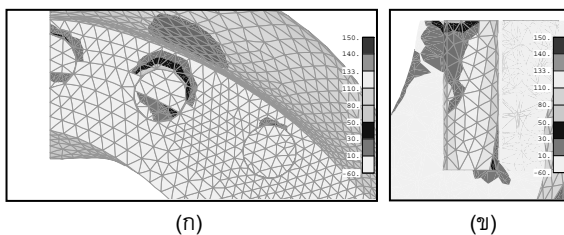
3.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



รูปที่ 13 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองพื้นป्लอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



รูปที่ 14 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองพื้นป्लอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



รูปที่ 15 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองพื้นป्लอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 2

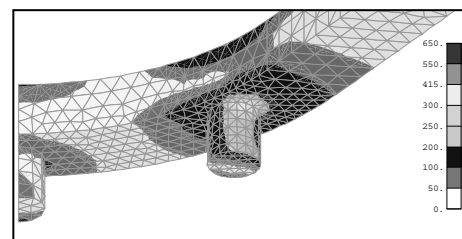
ความเค้นเฉือนและความเค้นกดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณกระดูกรอบคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายพื้นป्लอม โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าค่าความ

แข็งแรงของกระดูก ซึ่งความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในจุดนี้เท่ากับ 89 MPa และความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้นในจุดนี้มีค่าเท่ากับ -219 MPa ค่าความเค้นดึงสูงสุดนั้นอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 2 ด้านหน้าซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุดที่น้อยกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก โดยค่าความเค้นดึงสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 71 MPa

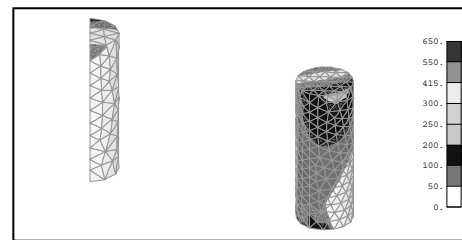
4. การกระจายความเค้นในพื้นป्लอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

4.1 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 1 เมื่อมีแรงกดเคี้ยวกระจายทั่วทั้งปาก โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

4.1.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างพื้นป्लอม



(ก)



(ข)

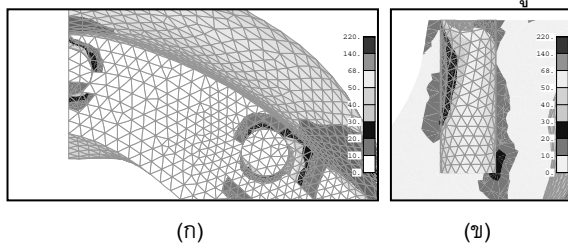
รูปที่ 16 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa ที่เกิดบน (ก) โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, (ข) รากฟันเทียมในแบบจำลองพื้นป्लอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

ความเค้นเฉือนมีการกระจายความเค้นบนโครงสร้างโดยรวมแล้วคล้ายกับในพื้นป्लอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม โดยการขาดหายไปของรากฟันเทียมตัวที่ 2 ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 และตัวที่ 3 เพิ่มขึ้น แต่จุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงยังคงอยู่ในบริเวณเดิมคือบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายพื้นป्लอม โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 432 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททาเนียมอัลลอย ส่วนค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในบริเวณอื่นของโครงสร้างพื้นป्लอมยังคงมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททาเนียมอัลลอย

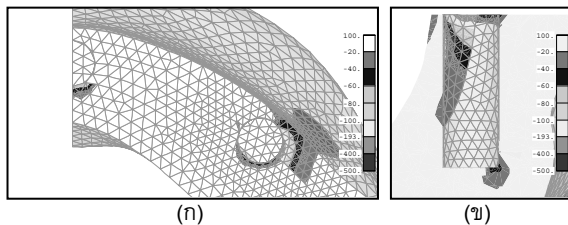
4.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม

รูปแบบของการกระจายความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวคล้ายกับการกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองพื้นป्लอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม โดยค่าความเค้นสูงจะอยู่

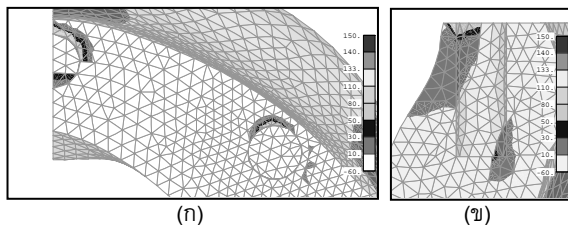
บริเวณคอรากฟันเทียมแต่ละตัว และความเค้นจะมีค่าน้อยลงในกระดูกที่อยู่ห่างจากคอรากฟันเทียมทั้งในแนวรัศมีของรากฟันเทียมและในแนวแกนของรากฟันเทียม และจุดที่พบค่าสูงสุดนั้นอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ซึ่งในจุดนี้จะมีค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมเท่ากับ 144 MPa ความเค้นกดที่มีค่าสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมเท่ากับ -370 MPa ส่วนค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอด้านหลังของรากฟันเทียมตัวที่ 3 เท่ากับ 112 MPa ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูกที่



รูปที่ 17 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



รูปที่ 18 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1

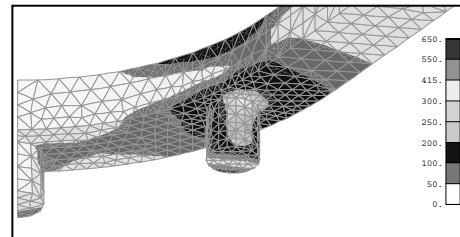


รูปที่ 19 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของ

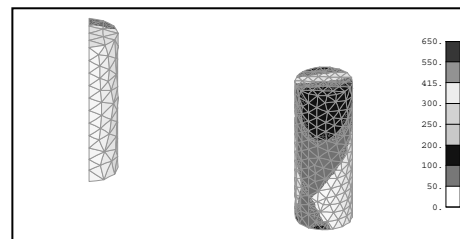
กระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

4.2 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 2 เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเฉพาะบริเวณฟันกรามด้านขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

4.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



(ก)

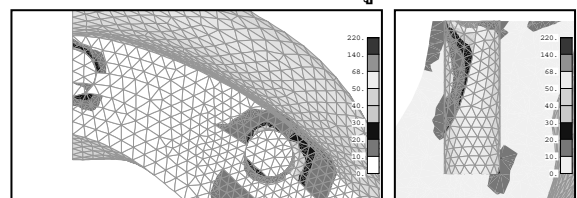


(ข)

รูปที่ 20 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ที่เกิดบน (ก) โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม (ข) รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

ลักษณะการกระจายความเค้นมีลักษณะของการกระจายที่ไม่แตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมเมื่อมีแรงกดเคี้ยวเท่ากัน โดยที่ค่าความเค้นเฉือนที่มีค่าสูงสุดนั้นยังคงอยู่ที่คอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 436 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเฉือนที่จุดคอรากของไททาเนียมอัลลอยเพียงเล็กน้อย

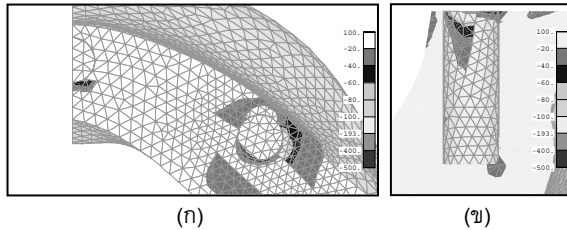
4.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



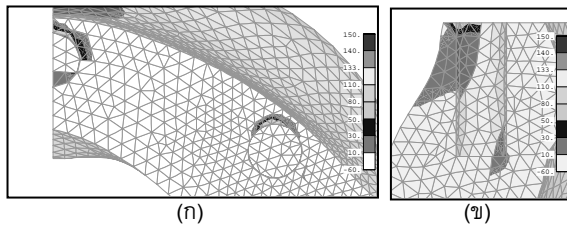
(ก)

(ข)

รูปที่ 21 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



รูปที่ 22 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



รูปที่ 23 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด, MPa บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

ลักษณะการกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวเหมือนกับลักษณะการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมเมื่อมีแรงกดเคี้ยวเท่ากัน โดยความเค้นที่มีค่าสูงจะอยู่ในกระดูกประชิดผิวรากฟันเทียมบริเวณคอรากฟันเทียมและความเค้นจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ห่างจากจุดดังกล่าว ค่าความเค้นเฉือนและค่าความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 102 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก ส่วนค่าความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณเดียวกันนี้มีค่าเท่ากับ -247 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก ส่วนค่าความเค้นดึงบนกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 3 ด้านหน้าของรากฟันเทียม ค่าความเค้นดึงสูงสุดนี้มีค่าเท่ากับ 71 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก

5. สรุปการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด

ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่าง เมื่อมีแรงกดเคี้ยวกระจายทั่วปากและเมื่อมีแรงกดเคี้ยวบนกรามด้านขวาเพียงด้านเดียว มีลักษณะการกระจายความเค้นโดยทั่วไปคล้ายกับแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม กล่าวคือ ความ

เค้นที่มีค่าสูงจะอยู่ที่ตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุดในแบบจำลอง โดยที่บนโครงสร้างฟันปลอม (โครงโลหะ หลักยึด และรากฟันเทียม) จะพบความเค้นสูงในลักษณะของความเค้นขมนามที่คอหลักยึดซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหลักยึดกับโครงโลหะ ส่วนบนกระดูกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวนั้นจะพบความเค้นสูงที่บริเวณคอรากฟันเทียม โดยที่ความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ลึกลงไปจากสันกระดูกและเมื่ออยู่ห่างจากคอหลักยึดรากฟันเทียมไปตามทิศทางรัศมีของรากฟันเทียม

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นที่มีค่าสูงสุดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมกับแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเท่ากันพบว่า ในโครงสร้างฟันปลอมซึ่งเป็นโลหะ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่อยู่ที่คอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมนั้นในแบบจำลองไฮบริด 3 รากฟันเทียมจะมีค่ามากกว่าในแบบจำลอง 5 รากฟันเทียม ($\approx 5.4\%$ ในกรณีที่ 1, $\approx 6.1\%$ ในกรณีที่ 2)

ในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้น ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดมีค่าสูงสุดอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยที่ความเค้นเฉือนสูงสุดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมจะมีค่าสูงกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ($\approx 16.1\%$ ในกรณีที่ 1, $\approx 14.6\%$ ในกรณีที่ 2) ความเค้นกดสูงสุดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมก็มีค่าสูงกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ($\approx 14.9\%$ ในกรณีที่ 1, $\approx 12.8\%$ ในกรณีที่ 2)

ส่วนความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 3 นั้นเมื่อเทียบกับความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 2 พบว่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมจะมีค่าสูงกว่าสำหรับในกรณีที่ 1 ($\approx 34.9\%$) แต่ค่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมจะมีค่าเท่ากันสำหรับในกรณีที่ 2

จากการศึกษาการกระจายความเค้นบนฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม และ 5 รากฟันเทียมแสดงให้เห็นว่าการลดจำนวนรากฟันเทียมลงให้เหลือเพียงแค่ 3 ตัวนั้นทำให้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุด ซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้ขัดแย้งกับการศึกษาของ Branemark และคณะ (1999) [6]

6. สรุปความเป็นไปได้ในการลดจำนวนรากฟันเทียมเหลือเพียง 3 ตัว

จากผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าการลดจำนวนรากฟันเทียมเพื่อรองรับฟันปลอมไฮบริดจาก 5

ตัวเหลือเพียงแค่ 3 ตัวนั้นทำให้ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเพิ่มประมาณ 15-16% ค่าความเค้นกดสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 13-15% ดังนั้นการลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อรองรับฟันปลอมไฮบริดนั้นอาจก่อให้เกิดความล้มเหลวเนื่องจากความเค้นที่มีค่าสูงขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมหรือความเค้นที่สูงขึ้นในกระดูกรอบรากฟันเทียม

การที่ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการหายไปของรากฟันเทียมตัวที่ 2 ทำให้โมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวนั้นมีค่ามากขึ้น แม้ว่าแรงในแนวแกนรากฟันเทียมจะมีค่าลดลง โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดที่ถูกถ่ายทอดจากโครงโลหะนั้นมีผลต่อค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมมากกว่าแรงกดในแนวแกนรากฟันเทียม

ดังนั้นการที่จะนำฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมไปใช้ในตัวผู้ป่วยไร้ฟันนั้นจะต้องลดความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายในโครงสร้างฟันปลอม โดยอาศัยแนวทางดังต่อไปนี้

1. การลดโมเมนต์ที่พยายามทำให้เกิดการหมุนของโครงโลหะรอบตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุด ซึ่งเกิดจากแรงกดเคี้ยวบนฟันปลอมที่กระทำบนส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม เช่น การลดแรงกดเคี้ยวบนฟันปลอม การลดความยาวของส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม
2. เปลี่ยนรูปร่างของหลักยึดรากฟันเทียม เพื่อช่วยลดค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น บริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะของความเค้นขมนาม โดยการออกแบบให้หลักยึดสามารถรับโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น เช่น การเพิ่มบาร์รองรับบริเวณคอรากฟันเทียม หรือการเพิ่มขนาดหลักยึดรากฟันเทียมให้ใหญ่กว่าเดิม (มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้น)
3. เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะให้โครงโลหะมีความแข็งแรงมากขึ้น
4. เปลี่ยนโครงสร้างฟันปลอม ทำให้แรงที่ลงบนรากฟันเทียมแต่ละตัวเป็นแรงตามแนวแกน เพื่อหลีกเลี่ยงการถ่ายทอดโมเมนต์แรงดัดลงสู่หลักยึดและรากฟันเทียม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Adell, R., Eriksson, B., Lekholm, U., Brånemark, P.-I., and Jemt, T., 1990. A long-term follow-up study of Osseo integrated implants in the treatment of totally edentulous jaws. *Int. J. Oral Maxillofacial Implants* 5(1990), pp. 347-359.
- [2] Barbier, L. et al., 1998. Finite element analysis of non-axial versus axial loading of oral implants in the mandible of the dog, *J. Oral Rehab* 25(1998), pp. 874-858.

- [3] Falk, H., Laurell, L. and Lundgren, D.1989. Occlusal force pattern in dentitions with mandibular implant-supported fixed cantilever prostheses occluded with complete dentures. *Int. J Oral Maxillofacial Implants* 4(1989), pp. 55-62.
- [4] Fontijn-Tekamp, F. A. et al.1998. Bite forces with mandibular implant-retained over denture. *J Dent Res* 1998; 77, pp. 1832-1839
- [5] Jemt, T., Book, K. and Karlsson, S. 1993. Occlusal force and mandibular movements in patients with removable over dentures and fixed prostheses supported by implants in the maxilla. *Int. J. Oral Maxillofac Implants* 8(1993), pp. 301-308.
- [6] Brånemark, P.-I., Enstrand, P., Öhrnell, L.-O., Gröndahl, K., Nilsson, P., Hagberg, K., Darle, C. and Lekholm, U., 1999. Brånemark Novum®: A new treatment concept for Rehabilitation of the edentulous of the edentulous mandible. Preliminary results from a prospective clinical follow-up study, *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 1(1999), pp. 2-16.
- [7] Koriath, T.W.P. and Johann, A. R.1999. Influence of mandibular superstructure shape on implant stresses during simulated posterior biting. *J. Prosthetic Dent* 82, pp. 67-72.
- [8] Koriath, T.W.P., Versluis, A. 1997. Modeling the mechanical behavior of the jaws and their related structures by finite element (FE) analysis. *Crit Rev Oral Biol Med* 8(1997): pp. 90-104.
- [9] Sertgöz, A., Guvener, S.1996.Finite element analysis of the effect of cantilever and implant length on stress distribution in an implant-supported fixed prosthesis. *J. Prosthetic Dent* 76(1996), pp. 165-169.
- [10] Zarb, G. A. and Bolender, C. L. 1997, Implant-supported prostheses for edentulous patients. In Zarb, G. A, Bolender, C. I and Carlsson, G. E. Boucher's prosthodontic treatment for edentulous patients, pp. 493-497. Illinois: Mosby-Year Book.
- [11] อัญชลี ตั้งจตุรนต์รัศมี, 2545. การวิเคราะห์การกระจายของแรงเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดที่ฟันผิวประชิดของรากเทียมและกระดูกอันเป็นผลมาจากจำนวนรากเทียมและตำแหน่งของรากเทียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] ชาคิต ตั้งศิริมณฑล, 2545, การวิเคราะห์ความเค้นในรากฟันเทียมของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.