

การวิเคราะห์การแตกหักในแนวตั้งของรากฟันกรามน้อย ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Vertical Root Fracture in Premolars by Finite Element Method

ชัชฎาภรณ์ แสงมะณี (Chatchadaporn Saengmanee)^{1*}

ดร.สุภัทรา ปลื้มกมล (Dr.Supattra Plermkamon)**

บทคัดย่อ

การรักษาและบูรณะคลองรากฟัน อาจก่อให้เกิดการแตกหักของรากฟันในลักษณะการแตกในแนวตั้งมากที่สุดและพบในฟันรากเดียวถึงร้อยละ 71 โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟันกรามน้อยที่ทำหน้าที่บดเคี้ยว ตัดและฉีกอาหารซึ่งต้องมีความแข็งแรงเป็นพิเศษ หากเกิดการแตกหักของรากฟันจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ สูญเสียเวลา และทรัพยากรในการรักษาของผู้ป่วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองรากฟันสำหรับการวินิจฉัยรอยแตกหักของรากฟัน และนำไปใช้พัฒนาประสิทธิภาพในการวางแผนการรักษาของทันตแพทย์ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ป่วยได้ป่วยได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องและทันเวลา ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys workbench ซึ่งกำหนดให้สมบัติทางกลของแบบจำลองรากฟันเป็นแบบไอโซทรอปิกและมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นภายใต้ภาระแรงภายนอกแบบสถิตขนาด 50 นิวตัน นำค่าความเค้นสูงสุดและลักษณะการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองรากฟันมาบ่งชี้แนวโน้มการเกิดรอยแตกหักของรากฟัน งานวิจัยนี้แยกพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การแตกหักของรากฟันเป็นสองกรณี คือ กรณีที่หนึ่งพิจารณาผลกระทบจากรูปร่างของคลองรากฟันแบบวงกลมและวงรีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันและกรณีที่สอง พิจารณา รูปทรงภายนอกของรากฟันที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์พบว่า รูปร่างของคลองรากฟันเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเติบโตของรอยแตกหักได้มากกว่ารูปทรงภายนอกของรากฟันที่มีความหนาของคลองรากฟันแตกต่างกัน กล่าวคือรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงรีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวด้านประชิดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรและแบบวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 มิลลิเมตรเกิดความเค้นสูงสุดในผนังคลองรากฟันกระจายสู่ด้านเนื้อฟัน โดยรากฟันที่มีคลองรากฟันลักษณะแบบวงรีจะเกิดความเข้มของความเค้นเพิ่มขึ้นบริเวณมุมโค้งของผนังคลองรากฟันตามแนวด้านแก้มและลิ้น โดยมีค่าความเค้นสูงสุดโดยเฉลี่ยร้อยละ 85.76 และ 44.26 ตามลำดับ

¹Correspondent author: chat_saengmanee@hotmail.com, supple@kku.ac.th

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ABSTRACT

In general, root canal treatment and restoration most possibly cause a vertical root fracture. Meanwhile, root fracture has 71 percent of possibility to be found in single rooted teeth, especially in premolars which perform crushing and grinding food, and they should have extra strength. If patients had a root fracture, it would affect their health such as spend time and financial support for the treatment. This research aims to simulate a three-dimensional model of root for analyzing stress distribution and maximum stress in root by finite element method with Ansys workbench program to indicate tendency of root fracture. Its advantage will improve planning efficiency for the dental treatment in order to correctly and easily restore the patient's root in time. In this research, assigns the mechanical properties of root model to be isotropic, and has linear elasticity under external static load of 50 N. The factors that affect root fracture are divided into two cases: the first case is about effect from the shape of root canal which has round and oval shapes with different diameters, the second case concerns the different exterior shapes of root. The analysis found that the different shape of root canal is the main factor affecting the growth of root fracture more than the external shape of the tooth that just has a little effect. Moreover, the root which has oval-shaped root canal that minor axis with diameter in proximal direction less than or equal to 1 mm, and round-shaped root canal with diameter less than or equal to 1 mm have the average maximum stress values of 85.76 percent and 44.26 percent respectively. These effects highly affect root fracture with the oval root canal has stress concentration which has higher value in the inner canal surface of root canal wall along the buccal-lingual direction.

คำสำคัญ : การแตกหักในแนวดิ่งของรากฟัน ฟันกรามน้อย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Key Words : Vertical root fracture, Premolars, Finite element method

บทนำ

ฟันนับว่าเป็นอวัยวะที่มีความสำคัญของมนุษย์ โดยประกอบด้วย ส่วนของตัวฟันและรากฟัน ซึ่งรากฟัน เป็นส่วนที่ฝังอยู่ในกระดูกเขี้ยวรากฟัน ยึดต่อกันด้วยเอ็นปริทันต์ ที่ทำหน้าที่คล้ายเบาะรองรับ และถ่ายทอดแรงบดเคี้ยว เมื่อฟันได้รับแรงกระแทก ไม่ว่าจะด้วยวิธีใดก็ตาม อาจทำให้เกิดการแตกหักของรากฟันได้ซึ่งพบว่าการแตกหักร้อยละ 7 ของฟันที่ได้รับอันตรายทั้งหมด ส่วนมากพบในฟันชนิดรากเดียวถึงร้อยละ 71 [1] สาเหตุส่วนใหญ่เกิดในระหว่าง

ขั้นตอนการรักษาคลองรากฟันจากทันตแพทย์ ในกรณีที่ฟันชนิดหลายราก อาจเกิดจากการเคี้ยวโดนของแข็ง เช่น กรวดหรือเมล็ดผลไม้ที่มีความแข็งมาก ในการตรวจวินิจฉัยนั้นจำเป็นต้องใช้ภาพถ่ายรังสีเข้ามาช่วยในการตรวจวินิจฉัยเพื่อตรวจดูรอยแตกที่เกิดขึ้นกับรากฟัน แต่ในกรณีที่ไม่สามารถมองเห็นรอยแตกด้วยภาพถ่ายรังสีได้อย่างชัดเจน อาจเป็นเพราะรอยแตกนั้นมีขนาดเล็กมาก ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการตรวจวินิจฉัย ส่งผลต่อความสำเร็จในการรักษา หรือเกิดผลเสียตามมา

ในระยะยาว มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการแตกของ รากฟัน เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแตกหักของ รากฟันโดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วย ในการวิเคราะห์ ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็น วิธีทางวิศวกรรมที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ของโครงสร้างที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี จึงสามารถ ปรับให้เข้ากับการใช้งานทางทันตกรรมได้อย่าง เหมาะสม โดยสร้างรากฟันแบบสามมิติและพิจารณา ที่ภาคตัดขวางตามแนวนอนของรากฟัน การจำลอง รูปแบบรากฟันกำหนดรูปร่างภายนอกของรากฟัน และคลองรากฟันที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความหนา ของเนื้อฟันด้านประชิดที่แตกต่างกันด้วย จากนั้นใช้ โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การ กระจายความเค้นที่เกิดขึ้นและกำหนดให้มีแรงกระทำ ตั้งฉากกับผิวคลองรากฟัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยทั้งสามมีผลต่อการกระจายความเค้น [2, 3] ส่วนลักษณะความโค้งภายนอกของรากฟันนั้นพบ ว่าไม่มีผลต่อการกระจายความเค้นเมื่อมีแรงกระทำ กับหน้าตัดฟันโดยทำมุม 60 องศา กับแนวตั้ง [4] และมีรายงานการศึกษาที่พบว่ามุมของแรงที่มากระทำ ต่อฟันมีผลต่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้น กล่าวคือเมื่อ มุมของแรงที่กระทำกับฟันทำมุมมากขึ้นทำให้ค่า ความเค้นเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่างานวิจัยจากการศึกษา ดังกล่าวมีรูปแบบของฟันที่นำมาวิเคราะห์แตกต่างกัน แต่ให้ผลสอดคล้องกันคือ แรงในแนวตั้ง (90 องศา) ทำให้ฟันเกิดความเค้นสูงสุดจึงส่งผลให้รากฟันเกิด ความเสียหายมากที่สุด [5, 6] จากงานวิจัยที่กล่าว มาบ่งชี้ว่าการกระจายความเค้นเป็นสิ่งที่สามารถบ่ง บอกถึงแนวโน้มของการเกิดรอยแตกของรากฟันได้ แต่ควรเพิ่มรูปแบบของรากฟันและคลองรากฟันให้ หลากหลายและมีความใกล้เคียงกับฟันจริงมากที่สุด รวมไปถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ ที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เพื่อให้ข้อมูลจาก การวิเคราะห์เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากการใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์นั้น ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ในการวิเคราะห์ด้วย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการสร้าง แบบจำลองรากฟันที่ใกล้เคียงกับรากฟันจริง และ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การกระจาย ความเค้น (Stress distribution) และค่าความเค้น สูงสุด (Maximum stress) ที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง รากฟัน เพื่อศึกษาผลกระทบจากรูปร่างคลองรากฟัน และรูปร่างภายนอกของรากฟันที่แตกต่างกัน เพื่อ บ่งชี้บริเวณที่มีแนวโน้มเกิดรอยแตกหักในแนวตั้ง ของรากฟัน งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเทคนิคทาง วิศวกรรมเข้ามาช่วยเพื่อเป็นแนวทางในการช่วย วินิจฉัย รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการ วางแผนการรักษาของทันตแพทย์อีกทางหนึ่งด้วย

วิธีการวิจัย

1. รวบรวมตัวอย่างฟันที่ใช้ในการทดลอง

โดยเลือกใช้ฟันกรามน้อยบนและล่างที่มี รากฟันเดียว จำนวน 8 ซี่ เป็นฟันที่ถอนจากผู้ป่วย จากโรงพยาบาลทันตกรรม คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยตัดส่วนตัวฟันออกให้เหลือ ส่วนตัวฟันห่างจากรอยต่อเคลือบผิวฟันและเคลือบ รากฟัน (CEJ) 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำรากฟันลงใน กล่องเรซิน ซึ่งใช้เป็นฐานรองรับฟันให้คล้ายกับกระดูก เบ้าฟัน ดังภาพที่ 1 [7]

2. สร้างแบบจำลองรากฟันแบบสามมิติ

สร้างแบบจำลองรากฟันให้ใกล้เคียงกับ รูปทรงของรากฟันจริงเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป โดยมีขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 2 เริ่มจากนำรากฟันที่ได้จากข้อที่ 1 ไปเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT scan) ด้วยเครื่อง เอกซเรย์คอมพิวเตอร์จากหน่วยรังสีวินิจฉัย โรงพยาบาลศรีนครินทร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยใช้ เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ของ Philips/iCT128 ใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ที่ 120 kV, 0 degree gantry, 512x512 matrix, Slice Increment 0.5 mm และ Slice Thickness 0.8 mm จากนั้นนำภาพถ่ายทางการแพทย์ที่ได้จาก เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ในลักษณะภาพตัดขวาง

มาขึ้นรูปเป็นโครงร่างของรากฟัน จากนั้นจึงสร้างพื้นผิวและปรับแต่งพื้นผิวภายนอกของรากฟันให้มีพื้นผิวคล้ายกับรากฟันจริง และสร้างแบบจำลองรากฟันซึ่งประกอบด้วยส่วนของ เนื้อฟัน (Dentin) เอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal ligament) หนาประมาณ 0.2 มิลลิเมตร รวมทั้งกระดูกเบ้าฟันซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นกระดูกทึบ (Cortical bone) มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตรและส่วนที่เป็นกระดูกโปร่ง (Cancellous bone) ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 โดยกำหนดให้มีรูปร่างของคลองรากฟันแตกต่างกันทั้งหมด 6 รูปแบบ

3. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 กำหนดสมบัติทางกลของส่วนประกอบรากฟันเป็นแบบไอโซทรอปิกและมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Isotropic Elastic) การยึดติดของผิวสัมผัสทั้งหมดเป็นแบบยึดติดแน่น (Bonded)

3.2 ไม่นำชั้นเคลือบรากฟัน (Cementum) ซึ่งจะอยู่ระหว่างเนื้อฟันกับเอ็นยึดปริทันต์มาวิเคราะห์ แยกจากเนื้อฟัน เนื่องจากมีขนาดที่บางเกินไปที่จะจำลองได้อย่างถูกต้องและเคลือบรากฟันมีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ใกล้เคียงกับเนื้อฟัน จึงให้พิจารณารวมไปกับส่วนเนื้อฟัน

3.3 กำหนดให้บริเวณรอบนอกของรากฟันไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากถูกยึดด้วยกระดูกเบ้าฟัน

3.4 เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดสามมิติทรงสี่หน้าสิบจุดต่อ (10-node tetrahedrons)

3.5 กำหนดให้มีแรงที่กระทำต่อคลองรากฟันเป็นแรงดันกระทำตั้งฉากกับผนังคลองรากฟัน

4. วิเคราะห์การกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยใช้โปรแกรม Ansys workbench ในการวิเคราะห์การกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองรากฟัน เมื่อมีแรงกระทำขนาด 50 นิวตัน ซึ่งประยุกต์มาจากค่าประมาณของแรงสบฟัน (Occlusal force) [8] กระทำกับหน้าตัดของคลองรากฟัน และพิจารณาให้เป็นแรงดันกระทำตั้งฉาก

กับผนังคลองรากฟัน ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในรากฟัน งานวิจัยนี้ได้พิจารณาเป็นความเค้นพอนมิสเชส (Von Mises Stress) ซึ่งเป็นความเค้นที่เกิดจากผลรวมของ ค่าความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) และ ค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ทั้ง 3 แกน ดังสมการ (1) [9] โดยที่ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ แทนความเค้นในแนวแกน x, y, z และ $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ แทนความเค้นเฉือน ตามลำดับ โดยกำหนดสมบัติทางกลของฟัน ดังตารางที่ 1 [4, 10, 11] และแสดงลักษณะรากฟันและลักษณะคลองรากฟันในแนวตัดขวาง ดังตารางที่ 2

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองรากฟันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พิจารณาเป็นสองกรณี โดยกรณีที่หนึ่งคือ พิจารณาผลกระทบของรูปร่างคลองรากฟันที่แตกต่างกันต่อความเค้น โดยรูปร่างของคลองรากฟันที่พบนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลักคือ แบบวงกลมและแบบวงรี ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และกรณีที่สอง คือ พิจารณาผลกระทบของรูปทรงภายนอกของรากฟันต่อความเค้น โดยอธิบายผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ผลกระทบของรูปร่างคลองรากฟันต่อการกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุด

ลักษณะคลองรากฟันแบบวงกลม 1 และแบบวงกลม 2

กำหนดให้คลองรากฟันแบบวงกลมมีรูปร่างแตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือคลองรากฟันแบบวงกลม 1 และ แบบวงกลม 2 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าลักษณะการกระจายความเค้นเกิดความเข้มของความเค้นรอบผนังคลองรากฟันกระจายสู่ด้านเนื้อฟันทุกด้าน แต่ที่บริเวณหน้าตัดเดียวกันค่าความเค้นที่ผนังคลอง

รากฟันตามแนวด้านแก้มและลิ้นสูงกว่าความเค้นตามแนวด้านประชิดเล็กน้อย ส่วนค่าความเค้นสูงสุดของคลองรากฟันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรมีค่าความเค้นสูงกว่าคลองรากฟันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดยค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 221.30 MPa และ 70.94 MPa ตามลำดับ

ลักษณะคลองรากฟันแบบวงรี 1 แบบวงรี 2 แบบวงรี 3 และแบบวงรี 4

กำหนดให้คลองรากฟันแบบวงรีมีรูปร่างแตกต่างกันทั้งหมด 4 รูปแบบ สามารถอธิบายได้ดังนี้ รากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงรี 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวด้านแก้มและลิ้น 2 มิลลิเมตรและแนวด้านประชิด 0.5 มิลลิเมตรพบว่า มีลักษณะการกระจายความเค้นที่มีค่าความเค้นสูงบริเวณมุมของส่วนโค้งผนังคลองรากฟันแนวด้านแก้มและลิ้น โดยค่าความเค้นสูงสุดค่าเฉลี่ย เท่ากับ 428.81 MPa

สำหรับรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงรี 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวด้านแก้มและลิ้น 2 มิลลิเมตร และ แนวด้านประชิด 1 มิลลิเมตรพบว่า การกระจายความเค้นเกิดค่าความเค้นสูงที่บริเวณมุมโค้งของผนังคลองรากฟันตามแนวด้านแก้มและลิ้น และมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นที่ผิวด้านนอกเนื้อฟันด้านประชิดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน โดยค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 148.96 MPa

สำหรับรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงรี 3 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวด้านแก้มและลิ้น 2 มิลลิเมตรและแนวด้านประชิด 1.5 มิลลิเมตร มีลักษณะการกระจายความเค้นที่มีค่าความเค้นสูงบริเวณมุมของส่วนโค้งผนังคลองรากฟันด้านแก้มและลิ้น ส่วนค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวด้านประชิดมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นด้านแก้มและลิ้นมากขึ้นกว่าแบบวงรีสองแบบแรก โดยมีค่าความเค้นสูงสุด เฉลี่ย เท่ากับ 88.53 MPa

และรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงรี 4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวด้านแก้มและลิ้น 3 มิลลิเมตร และแนวด้านประชิด 1 มิลลิเมตร พบว่า

มีค่าความเค้นสูงบริเวณมุมของส่วนโค้งที่ผนังคลองรากฟันตามแนวด้านแก้มและลิ้น และมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นที่ผิวด้านนอกของเนื้อฟันด้านประชิด เกิดขึ้นที่ด้านประชิดใกล้กลางหรือด้านประชิดไกลกลางหรือทั้งสองด้าน โดยค่าความเค้นสูงสุดมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 158.32 MPa ซึ่งได้แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นของรากฟันซี่ที่ 1 ที่เกิดจากรูปร่างคลองรากฟันแตกต่างกันดังตารางที่ 3 รวมถึงภาพที่ 4 ที่แสดงค่าความเค้นสูงสุดโดยเฉลี่ยของรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแตกต่างกัน ซึ่งพบว่า รากฟันที่มีคลองรากฟันแบบวงรีที่เส้นผ่านศูนย์กลางแนวด้านประชิด 0.5 มิลลิเมตรและแนวด้านแก้มและลิ้น 2 มิลลิเมตร (แบบวงรี 1) มีค่าเฉลี่ยค่าความเค้นสูงสุดมากกว่ารูปร่างคลองรากฟันแบบอื่น

กรณีที่ 2 ผลกระทบของรูปร่างภายนอกของรากฟันต่อการกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุด

เมื่อรูปร่างภายนอกของรากฟันแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้ความหนาของผนังคลองรากฟันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย พบว่า ที่คลองรากฟันรูปแบบเดียวกัน ค่าความเค้นสูงสุดของรากฟันทั้งหมดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยค่าความเค้นสูงสุดของรากฟันที่รูปร่างคลองรากฟันแบบวงกลมเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรและ 2 มิลลิเมตรมีค่าแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 3.70% และ 12.38% ตามลำดับและรากฟันที่รูปร่างคลองรากฟันแบบวงรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงรีด้านแก้มและลิ้น 2 มิลลิเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางวงรีด้านประชิด 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร มีค่าแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 2.47% 1.43% และ 4.77% ตามลำดับ และรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านแก้มและลิ้น 3 มิลลิเมตร มีค่าความเค้นสูงสุด แตกต่างกันโดยเฉลี่ย 3.28% ดังแสดงในภาพที่ 5 และเมื่อความหนาของผนังคลองรากฟันแตกต่างกันลักษณะการกระจายความเค้นในรากฟันยังคงมีแนวโน้มเหมือนเดิมเมื่อรากฟันมีรูป

ร่างคลองรากฟันเดียวกัน

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับรอยแตกของรากฟันที่เกิดขึ้นจริง

สำหรับตัวอย่างรอยแตกที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของรากฟันพบว่า เส้นแนวแตกจะเกิดขึ้นตามแนวด้านแก้มและลิ้น ผ่านตรงกลางคลองรากฟัน และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า เกิดความเข้มของความเค้นสูงที่บริเวณมุมโค้งในแนวด้านแก้มและด้านลิ้นของผนังคลองรากฟันและมีความเค้นลดลงกระจายสู่ด้านเนื้อฟัน ซึ่งบริเวณที่เกิดความเข้มของความเค้นมากขึ้น จะมีแนวโน้มของการเริ่มต้นของการแตกหักจากผลการวิเคราะห์ที่ได้จึงมีแนวโน้มของแนวการแตกในทิศทางเดียวกับรอยแตกที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงในภาพที่ 6

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากรูปร่างคลองรากฟันและรูปร่างภายนอกของรากฟันกรามน้อยต่อการแตกหักในแนวตั้งของรากฟัน โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองรากฟันและนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์การกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองรากฟันเพื่อใช้บ่งชี้แนวโน้มการเกิดรอยแตกหักของรากฟันซึ่งกำหนดให้สมบัติทางกลของแบบจำลองรากฟันเป็นแบบไอโซทรอปิกและมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นภายใต้ภาระแรงภายนอกแบบสถิต

ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อรากฟันมีรูปร่างคลองรากฟันแบบวงกลมและแบบวงรี พร้อมทั้งมีรัศมีความโค้งที่แตกต่างกัน พบว่าการกระจายความเค้นเกิดความเค้นสูงที่ด้านในผนังคลองรากฟันกระจายสู่ด้านเนื้อฟันโดยรากฟันที่มีคลองรากฟันลักษณะแบบวงรีและมีรัศมีความโค้งที่แคบ พบว่าเกิดความเค้นสูงกว่าคลองรากฟันที่มีรัศมีความโค้งกว้างขึ้น เนื่องจากบริเวณที่มีรัศมีความโค้งจะเกิดความเข้มของความเค้น

(Stress Concentration) และเกิดความเค้นสูงขึ้นเมื่อบริเวณดังกล่าวมีรัศมีความโค้งเล็กลง [12] เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในรากฟันที่มีรูปร่างคลองรากฟันแตกต่างกัน พบว่าคลองรากฟันแบบวงรีที่มีรัศมีความโค้งด้านแก้มและลิ้นที่แคบที่สุดมีค่าความเค้นสูงสุดมากกว่าคลองรากฟันแบบอื่น ดังภาพที่ 7 ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่การเริ่มเกิดการแตกหักในรากฟันจะเริ่มแตกจากผนังคลองรากฟันบริเวณรัศมีความโค้งน้อยสุดตามแนวด้านแก้มและลิ้น สู่พื้นผิวด้านนอกของรากฟันและมีแนวโน้มของการเกิดรอยแตกในแนวแก้มและลิ้น ส่วนรากฟันที่มีคลองรากฟันแบบวงกลมเกิดการกระจายความเค้นรอบผนังคลองรากฟันจึงมีโอกาสเกิดการแตกหักได้ทุกทิศทาง สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองรากฟันเมื่อรากฟันมีรูปร่างภายนอกแตกต่างกันส่งผลให้ความหนาของผนังคลองรากฟันแตกต่างกันด้วย ซึ่งพบว่าความหนาของผนังคลองรากฟันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อรูปร่างคลองรากฟันเหมือนเดิม ลักษณะการกระจายความเค้นในรากฟันยังคงมีแนวโน้มเหมือนเดิม ดังตารางที่ 4 และมีความเค้นสูงสุดแตกต่างกันเล็กน้อย ดังภาพที่ 8 จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าความหนาของผนังคลองรากฟันส่งผลต่อการแตกหักของรากฟันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งสอดคล้องกับการทดลองซึ่งพบว่าแนวการแตกที่เกิดขึ้นของรากฟันส่วนใหญ่จะเกิดตามแนวแก้มและลิ้น ถึงแม้ว่าจะมีความหนาของเนื้อฟันมากกว่าด้านประชิด [3, 13]

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการแตกหักในแนวตั้งของรากฟันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแบ่งเป็นสองกรณีคือ กรณีที่หนึ่ง พิจารณาผลกระทบของรูปร่างคลองรากฟันและกรณีที่สอง พิจารณาผลกระทบรูปร่างภายนอกของรากฟัน จากการวิเคราะห์พบว่า รูปร่างของคลองรากฟันที่แตกต่างกันจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแตกหักของรากฟันได้มากกว่ารูปร่าง

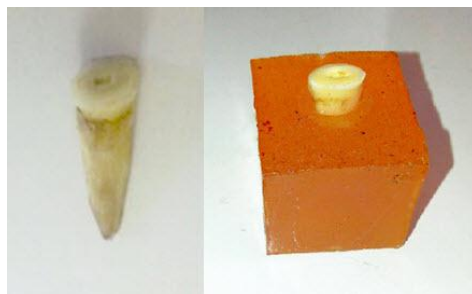
ภายนอกของรากฟัน ซึ่งการวิเคราะห์แบบจำลองรากฟันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยบ่งชี้แนวโน้มการเกิดรอยแตกหักในแนวตั้งของรากฟัน ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการวางแผนการรักษาของทันตแพทย์

กิตติกรรมประกาศ

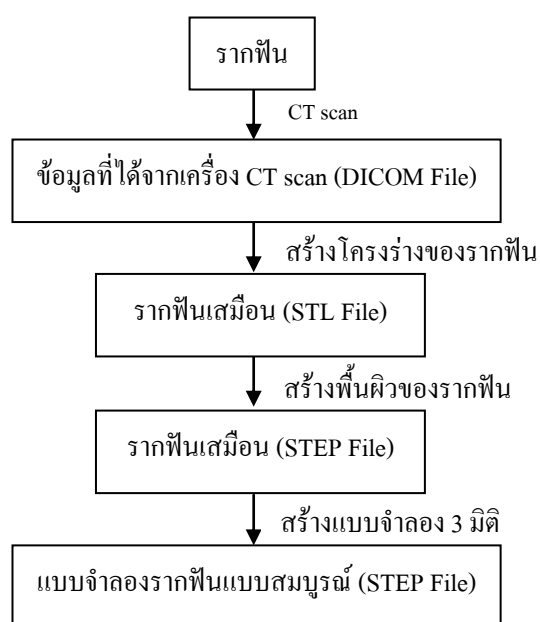
ขอขอบคุณหน่วยรังสีวินิจฉัย โรงพยาบาลศรีนครินทร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในการทำเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT scan) และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้การศึกษางานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

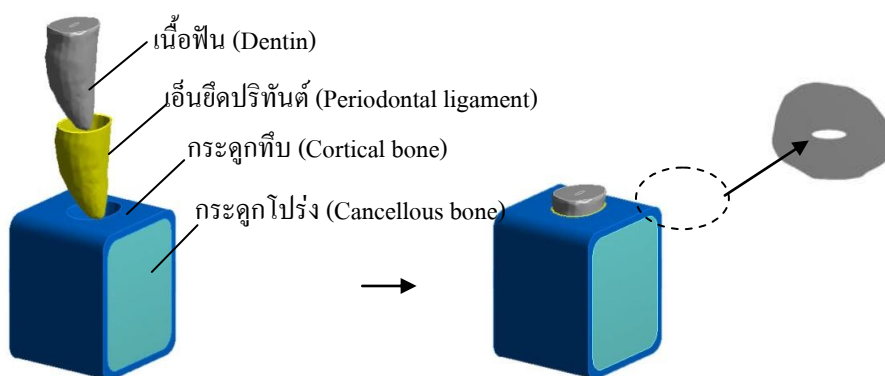
1. Çaliskan MK, Pehlivan Y. Prognosis of root-fractured permanent incisors. *Dental Traumatology*. 1996; 12(3): 129-136.
2. Sathorn C, Palamara JEA, Palamara D, Messer HH. Effect of Root Canal Size and External Root Surface Morphology on Fracture Susceptibility and Pattern: A Finite Element Analysis. *Journal of Endodontics*. 2005 Apr; 31(4): 288-292.
3. Lertchirakarn V, Palamara JEA, Messer HH. Patterns of Vertical Root Fracture: Factors Affecting Stress Distribution in the Root Canal. *Journal of Endodontics*. 2003 Aug; 29(8): 523-528.
4. Chatvanitkul C, Lertchirakarn V. Stress Distribution with Different Restorations in Teeth with Curved Roots: A Finite Element Analysis Study. *Journal of Endodontics*. 2010 Jan; 36(1): 115-118.
5. Cheng R, Zhou X-D, Liu Z, Hu T. Development of a Finite Element Analysis Model With Curved Canal and Stress Analysis. *Journal of Endodontics*. 2007 Jun; 33(6): 727-731.
6. Huang H-M, Ou K-L, Wang W-N, Chiu W-T, Lin C-T, Lee S-Y. Dynamic Finite Element Analysis of the Human Maxillary Incisor Under Impact Loading in Various Directions. *Journal of Endodontics*. 2005 Oct; 31(10): 723-727.
7. Budynas RG, Nisbett JK, Shigley JE. Shigley's mechanical engineering design. Boston: McGraw-Hill; 2008. p. 206-248.
8. Rundquist BD, Versluis A. How does canal taper affect root stresses? *Int Endod J*. 2006 Mar; 39(3): 226-237.
9. Tangkosol T. Dental Root Fracture Detection by Artificial Neural Network [MSc Thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2010. Thai.
10. Santos AFV, Tanaka CB, Lima RG, Espósito COM, Ballester RY, Braga RR, et al. Vertical Root Fracture in Upper Premolars with Endodontic Posts: Finite Element Analysis. *Journal of Endodontics*. 2009 Jan; 35(1): 117-120.
11. Poiate IAVP, Vasconcellos AB, Mori M, Poiate Jr. E. 2D and 3D finite element analysis of central incisor generated by computerized tomography. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2011 Nov; 104(2): 292-299.
12. Kokcharov I, Burov A. Structural Integrity Analysis. Part 1 Stress Concentration. 2013
13. Lertchirakarn V, Palamara JEA, Messer HH. Load and strain during lateral condensation and vertical root fracture. *Journal of Endodontics*. 1999 Feb; 25(2): 99-104.



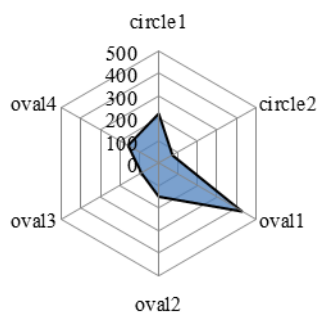
ภาพที่ 1 ตัวอย่างรากฟันจริง [7]



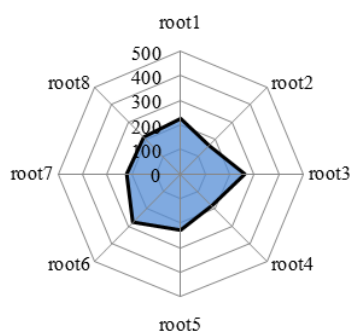
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองรากฟัน



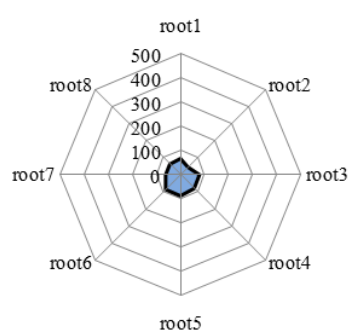
ภาพที่ 3 ตัวอย่างแบบจำลองรากฟัน (คลองรากฟันแบบวงรี)



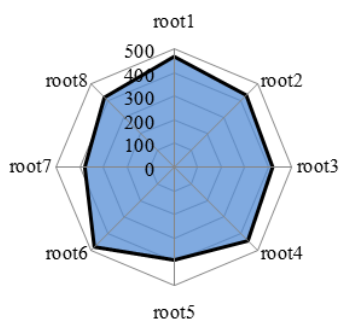
ภาพที่ 4 ค่าความเค้นสูงสุด (MPa) ของรากฟันที่รูปร่างคลองรากฟันแตกต่างกัน



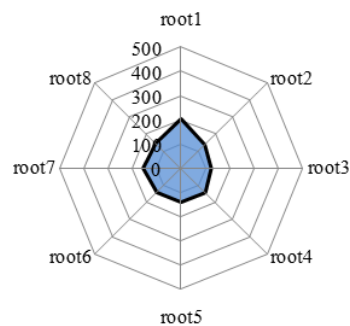
(5a)



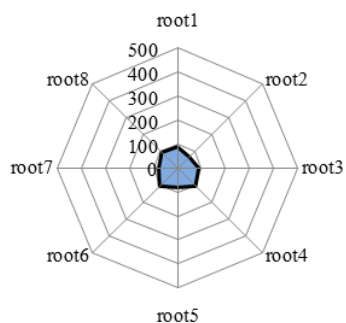
(5b)



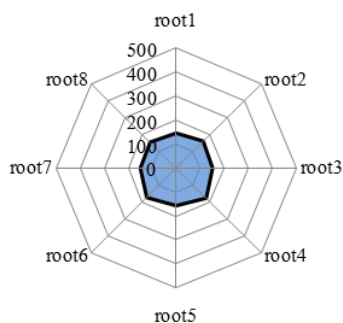
(5c)



(5d)



(5e)

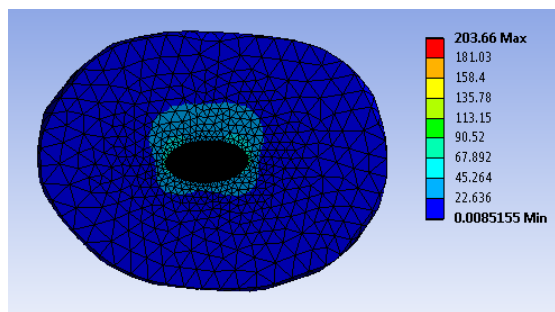


(5f)

ภาพที่ 5 ค่าความเค้นสูงสุด (MPa) ของรากฟันที่รูปร่างภายนอกของรากฟันแตกต่างกันสำหรับคลองรากฟันแบบวงกลม 1 (5a) แบบวงกลม 2 (5b) แบบวงรี 1 (5c) แบบวงรี 2 (5d) แบบวงรี 3 (5e) และแบบวงรี 4 (5f) ตามลำดับ

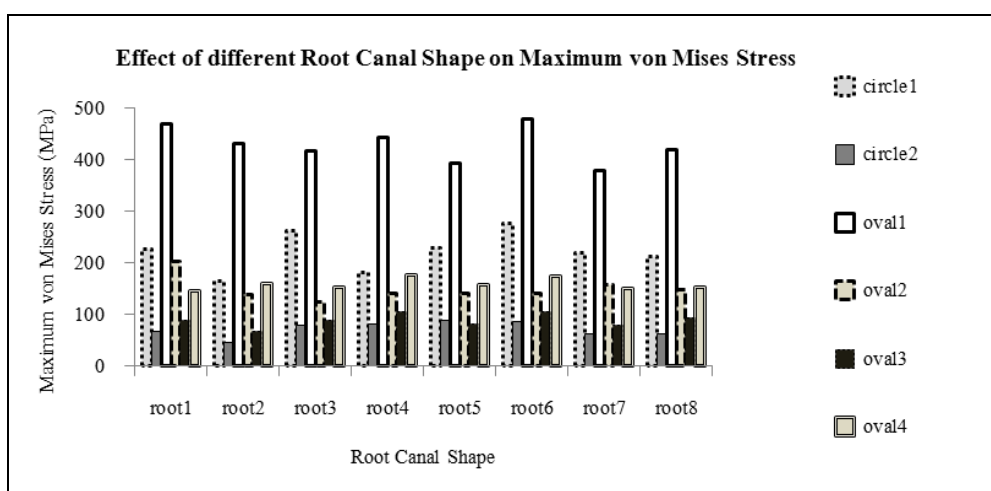


(6a)

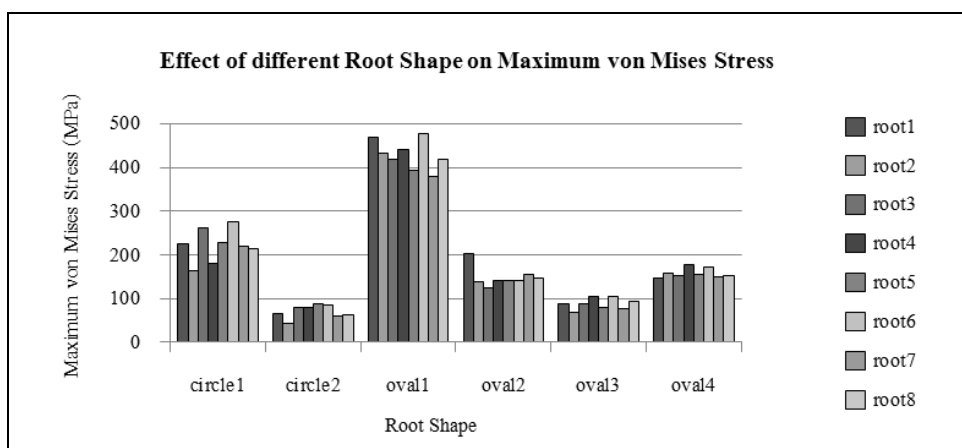


(6b)

ภาพที่ 6 ตัวอย่างรอยแตกที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของรากฟัน (6a) และ การกระจายความเค้นจากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys workbench (6b)



ภาพที่ 7 กราฟแสดงค่าความเค้นสูงสุดที่รูปร่างคลองรากฟันแตกต่างกัน

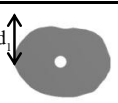
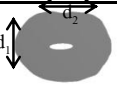


ภาพที่ 8 กราฟแสดงค่าความเค้นสูงสุดที่รูปร่างภายนอกของรากฟันแตกต่างกัน

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของส่วนประกอบแบบจำลองรากฟัน [4, 10, 11]

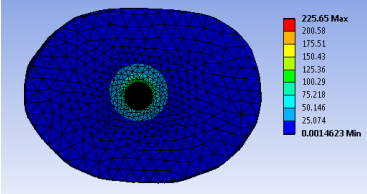
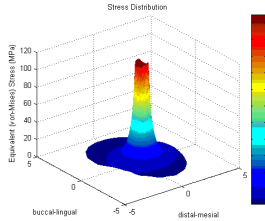
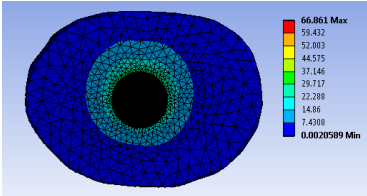
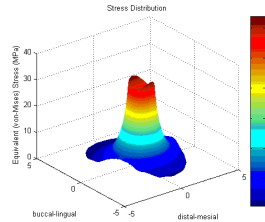
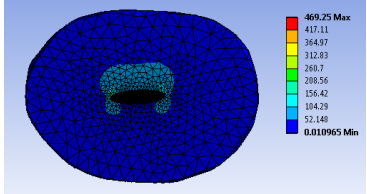
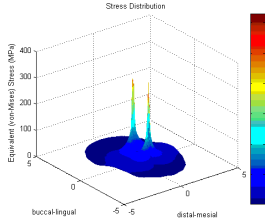
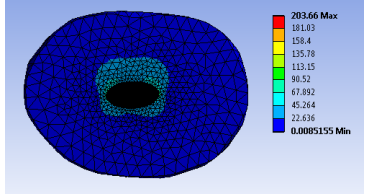
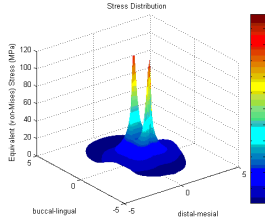
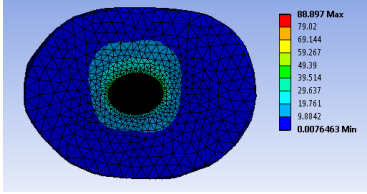
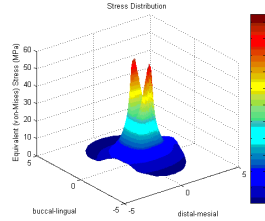
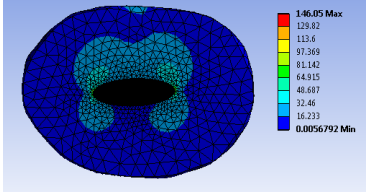
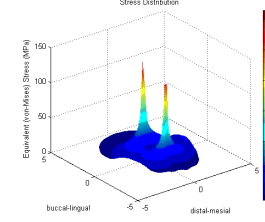
Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Dentin	1.86×10^4	0.31
Periodontal ligament	6.89×10	0.45
Cortical bone	1.37×10^4	0.30
Cancellous bone	1.37×10^3	0.30

ตารางที่ 2 รูปทรงภายนอกของรากฟันและรูปร่างของคลองรากฟัน

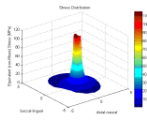
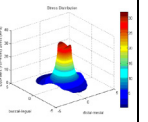
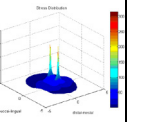
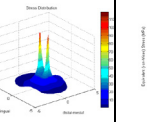
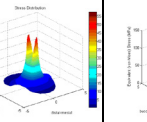
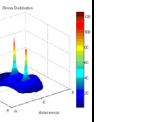
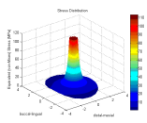
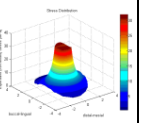
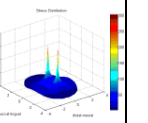
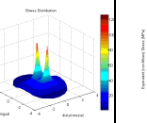
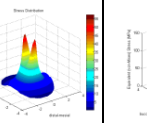
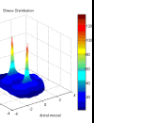
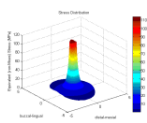
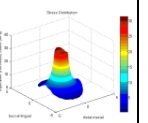
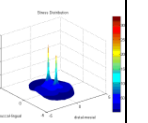
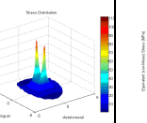
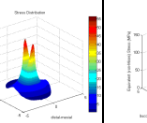
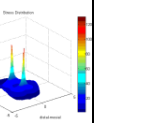
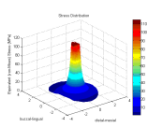
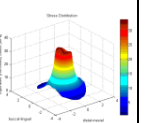
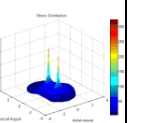
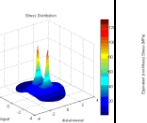
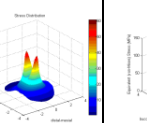
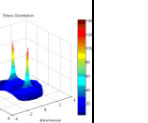
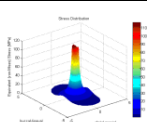
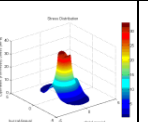
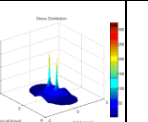
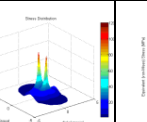
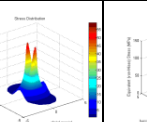
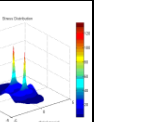
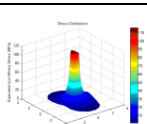
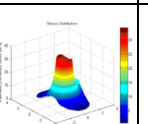
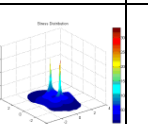
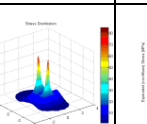
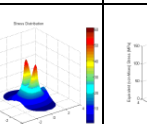
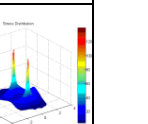
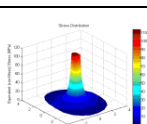
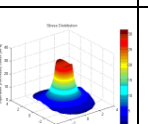
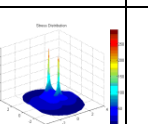
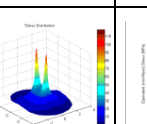
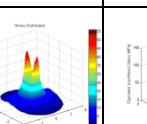
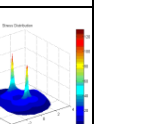
ฟันซี่ที่	รูปทรงรากฟัน	รูปร่างคลองรากฟัน					
		แบบวงกลม		แบบวงรี			
		วงกลม 1 ($d_1 = 1$ มม.)	วงกลม 2 ($d_1 = 2$ มม.)	วงรี 1 ($d_1 = 0.5$ มม., $d_2 = 2$ มม.)	วงรี 2 ($d_1 = 1$ มม., $d_2 = 2$ มม.)	วงรี 3 ($d_1 = 1.5$ มม., $d_2 = 2$ มม.)	วงรี 4 ($d_1 = 1$ มม., $d_2 = 3$ มม.)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

d_1 หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับคลองรากฟันแบบวงกลมและเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตั้งฉากสำหรับคลองรากฟันแบบวงรี (Minor Axis) และ d_2 หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตั้งฉากและเส้นสำหรับคลองรากฟันแบบวงรี (Major Axis)

ตารางที่ 3 การกระจายความเค้นของรากฟันที่รูปร่างคลองรากฟันแตกต่างกัน (รากฟันซี่ที่ 1)

รูปร่างคลองรากฟัน	การกระจายความเค้นของรากฟัน	กราฟการกระจายความเค้นบริเวณหน้าตัดรากฟัน
แบบวงกลม 1		
แบบวงกลม 2		
แบบวงรี 1		
แบบวงรี 2		
แบบวงรี 3		
แบบวงรี 4		

ตารางที่ 4 การกระจายความเค้นบริเวณหน้าตัดของรากฟันที่รูปทรงภายนอกแตกต่างกัน

ฟันซี่ที่	รูปทรงรากฟัน	รูปร่างคลองรากฟัน					
		แบบวงกลม 1	แบบวงกลม 2	แบบวงรี 1	แบบวงรี 2	แบบวงรี 3	แบบวงรี 4
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8		