



การศึกษาการกระจายตัวของแรงเชิงกลบน
แบบจำลองสามมิติของฟันกรามน้อยเสมือนจริง
ที่เกิดจากการบิดเคี้ยวด้วยการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เสนอ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

โดย

TNI

รศ.ดร. ณัฐพล ลิ่มจีระจรัส

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการชุดแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการทำการทดสอบ และสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนโครงการวิจัยนี้ ภายใต้เลขที่โครงการ 1810/A014

ณัฐพล ลิ่มจีระจรัส



สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการวิจัย.....	4
2 การศึกษาวรรณกรรม.....	5
2.1 โครงสร้างของฟัน.....	5
2.2 การถ่ายภาพรังสีส่วนตัดด้วยคอมพิวเตอร์.....	7
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	17
3.1 การเลือกต้นแบบและตัวอย่าง.....	18
3.2 การทดสอบกด.....	18
3.3 การพัฒนาแบบจำลอง.....	19
3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง.....	21
3.5 ค่าตัวแปรของแบบจำลอง.....	21
3.6 การวิเคราะห์แบบจำลอง.....	23
3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	25
3.8 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบิดเคี้ยว.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
4 ผลและการวิเคราะห์.....	27
4.1 การทดสอบกด	27
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง.....	28
4.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง.....	29
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	30
4.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบิดเคี้ยว.....	31
5 สรุปผลการวิจัย.....	33
บรรณานุกรม.....	34



TNI

TAH - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการวิจัย.....	4
2.1 ขนาดของฟันกรามน้อยด้านบนฝั่งซ้าย	13
2.2 ความยาวของฟันกรามน้อยด้านบนฝั่งซ้าย	13
3.1 คุณสมบัติทางกลของส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลอง.....	22
4.1 ผลการวัดขนาดของฟันแต่ละส่วนประกอบ	28



สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
1.1 โครงสร้างของฟัน.....	1
2.1 ลักษณะการเรียงตัวของฟันและอายุที่ฟันแท้จะขึ้นมาแทนที่.....	5
2.2 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของฟันและภายในของฟัน	6
2.3 ตัวอย่างภาพถ่าย (ก.) ภาพถ่ายเอกซเรย์จะมีการทับซ้อนของอวัยวะ (ข.) ภาพถ่ายจาก CT 2 มิติ ในแนวตัดขวาง (ค.) ภาพถ่ายของ CT ที่นำไปประมวลผลเป็นภาพ 3 มิติ.....	8
2.4 ลักษณะของเอลิเมนต์และจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์.....	9
2.5 ลักษณะเอลิเมนต์ 1 มิติ.....	10
2.6 ลักษณะเอลิเมนต์ 2 มิติ.....	10
2.7 ลักษณะเอลิเมนต์ 3 มิติ.....	10
2.8 ลักษณะความเค้นที่เกิดตามพื้นผิวของวัตถุ.....	11
2.9 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนฟันกรามน้อย	14
2.10 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนฟันกรามน้อยที่มีลักษณะรากคู่และรากเดี่ยว	15
2.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนฟันกราม	16
3.1 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำวิจัย.....	17
3.2 เปรียบเทียบขนาดของฟันต้นแบบ (•) กับขนาดมาตรฐานของฟันบนด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) ของคนเอเชียทั้งผู้ชาย (M) และผู้หญิง (F).....	18
3.3 การนำภาพถ่าย CT มาเรียงซ้อนกันเพื่อทำการสร้างแบบจำลอง	20
3.4 การเขียนแบบจำลองของโครงสร้างฟัน.....	20
3.5 แบบจำลองเสมือนจริงของฟันกรามน้อย	21
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง.....	21
3.7 ลักษณะของเอลิเมนต์ของแบบจำลอง	24
3.8 การกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทดสอบกด (ก) ตำแหน่งตัวยึด (ข) การให้แรงกด	25
3.9 การกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทดสอบกด (ก) ลักษณะของเอลิเมนต์ของแบบจำลอง (ข) ตำแหน่งตัวยึด (ค) การให้แรงกดเคี้ยว.....	26
4.1 ผลการทดสอบกด (ก) แผนภูมิความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์ (ข) รอยแตกของฟัน ตัวอย่าง.....	27

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.2	ชั้นที่เลือกมาทำการวัดขนาดของฟันแต่ละส่วนประกอบ..... 28
4.3	ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM).... 29
4.4	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (ก) ระยะทางที่หัวกดเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งจาก ผลของแรงกด 637 นิวตัน (ข) แผนภูมิความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์จากการ วิเคราะห์กับการทดลอง..... 30
4.5	การกระจายตัวของแรงเชิงกลและความเค้นอัดสูงสุดบนผิวฟันในกรณีศึกษาต่างๆ..... 31
4.6	การกระจายตัวของแรงเชิงกลและความเค้นอัดสูงสุดบนกระดูกงูเข้าฟันในกรณีศึกษาต่างๆ (ก) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดสูงสุด (ข) ค่าความเค้นอัดสูงสุด 32

TNI

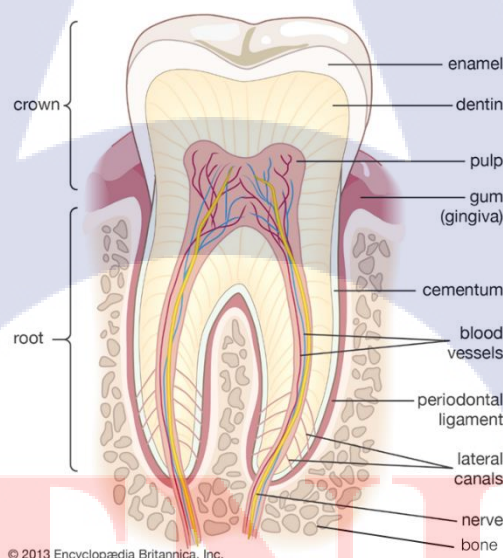
THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ฟันเป็นอวัยวะสำคัญของร่างกาย ทำหน้าที่ฉีกและบดเคี้ยวอาหารให้มีขนาดที่พอเหมาะ ในช่องปากที่เป็นด่านแรกของระบบย่อยอาหาร ก่อนส่งไปยังส่วนต่างๆ ทำให้อาหารไหลผ่านจากหลอดอาหารไปสู่กระเพาะอาหารได้สะดวก กระเพาะอาหารไม่ต้องทำงานหนักในการใช้แรงบีบรัดเพื่อย่อยอาหารและดูดซึมสารอาหารเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย โดยปกติโครงสร้างฟันจะประกอบไปด้วย 7 ส่วนประกอบหลักได้แก่ เคลือบฟัน (Enamel) เนื้อฟัน (Dentine) เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน (Dental pulp) เอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal ligament: PDL) เคลือบรากฟัน (Cementum) เหงือก (Gingiva) และกระดูกฟัน (Bones) ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของฟัน [1]

ในการบดเคี้ยวและการฉีกอาหารจะทำให้เกิดแรงเชิงกล ได้แก่ แรงกด แรงดึง และแรงเฉือนกับเซลล์และเนื้อเยื่อของฟัน เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียเคลือบฟันและเนื้อฟัน นอกจากนี้อุปนิสัยอื่นๆ เช่น การนอนกัดฟัน การขบแน่นฟัน เป็นต้น ก็ทำให้เกิดการสึกหรอของฟันเช่นกัน หากการสึกหรอของฟันเกิดขึ้นเร็วกว่าการซ่อมแซมเนื้อฟันจะส่งผลต่อการมีชีวิตของฟัน อาจเกิดอาการเสียวฟัน การอักเสบภายในโพรงประสาทฟัน ลักษณะการขบของฟันเปลี่ยนแปลงไปทำให้การบดเคี้ยวผิดปกติไปได้

จากรายงานผลการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory research) ในปัจจุบัน แรงเชิงกลที่กระทำต่อเซลล์และเนื้อเยื่อที่เหมาะสม สามารถทำให้เซลล์และเนื้อเยื่อนั้นฟันฟุ้งด้วยตัวเองได้และในงานวิจัย

ทางคลินิก (Clinical research) ก็ได้มีการรักษาการสึกหรอของเคลือบฟัน (Enamel) โดยใช้ฟันยาง เพื่อไม่ให้มีแรงมากระทบกับเคลือบฟัน จนก่อให้เกิดความเสียหายของตัวเคลือบฟัน การจัดฟันเพื่อให้ฟันอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมช่วยให้ฟันขบกันพอดีและเกิดความสวยงามของช่องปาก การรักษาฟันที่ช่วยรักษาฟันที่มีโพรงประสาทฟันอักเสบจนต้องถูกถอนไว้ได้ และการรักษาอื่นๆอีกมากมาย

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีวิธีการใดสามารถวัดผลของแรงที่เกิดขึ้นกันส่วนประกอบภายในของฟันหรือส่วนประกอบที่บางมากอย่างโพรงประสาทฟันหรือเอ็นยึดปริทันต์ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของฟันให้อยู่ในรูปแบบของสามมิติจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างของฟัน เช่น ในปี 2557(2014) Jackeline Coutinho Guimarães และคณะ[2] ได้สร้างแบบจำลองสามมิติของฟันกรามน้อยโดยนำฟันกรามน้อยมาเคลือบด้วย Epoxy resin แล้วตัดเป็นชั้นย่อยๆ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นบนฟันกรามน้อยปกติกับฟันที่เกิดการสึก ในปีเดียวกัน P.V. Soares และคณะ[3] ได้สร้างแบบจำลองของฟันกรามน้อยที่มีส่วนประกอบของเคลือบฟัน เนื้อฟัน และโพรงประสาทฟัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางชีววิทยาเชิงกลในฟันกรามน้อยที่มีรากเดี่ยวเปรียบเทียบกับฟันกรามน้อยที่มีรากคู่ และในปี 2559(2016) Stefano Benazzi และคณะ[4] ได้สร้างแบบจำลองของฟันกรามจากการถ่ายภาพ micro CT ของหัวกะโหลกที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน ถือเป็นแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงอย่างมาก และสามารถจำลองลักษณะการสบกันของฟันในขณะบดเคี้ยวได้เป็นอย่างดี เพื่อศึกษาผลของแรงที่เกิดจากการบดเคี้ยว เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยต่างๆ การวิเคราะห์โครงสร้างจะใช้หลักการทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) มาช่วยในการศึกษาการกระจายของความเค้น การเสียรูปของโครงสร้างหรือผลกระทบของแรงที่กระทำในส่วนต่างๆ ของโครงสร้างฟัน เพราะการศึกษาโดยพิจารณาจากลักษณะกายภาพภายนอกเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถเห็นโครงสร้างภายในที่อาจจะมีการผิดปกติได้ จึงใช้การถ่ายภาพด้วยวิธี CT-scan (computed tomography scan) เนื่องจากภาพมีความละเอียดสูง ไม่มีการซ้อนทับกันของอวัยวะอื่น และสามารถถ่ายภาพออกมาเป็นรูปแบบสองมิติหรือสามมิติก็ได้ ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อที่จะทำการรักษาให้กับคนไข้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีการสร้างรูปแบบจำลองโครงสร้างของฟัน จากภาพถ่าย CT มาสร้างเป็นโครงสร้างของฟันขึ้นมาให้อยู่ในรูปแบบของสามมิติ ยังไม่มีการศึกษาการสร้างรูปแบบจำลองโครงสร้างของฟันที่มีขนาดเสมือนจริง (True Dimension) และมีส่วนประกอบหลักของฟันหลายส่วน (Multi-component) อย่างแท้จริง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างของฟันกรามน้อยด้านบนซี่ที่หนึ่ง (Maxillary first premolar) โดยจะสร้างรูปแบบจำลองจากภาพถ่าย CBCT-scan (Cone beam computed tomography scan) เพราะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการรักษาคนไข้จริง และจะทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างฟันสามมิติที่เสมือนจริง และมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบหาแรงที่จะทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหาย โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) มาทำการวิเคราะห์แบบจำลองสามมิติเสมือนจริงของฟันกรามน้อย

ทางคณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อเป็นสื่อกลางช่วยเชื่อมต่อองค์ความรู้ระหว่างห้องปฏิบัติการวิจัย (Laboratory research) กับคลินิก (Clinical research) ให้สามารถนำไปพัฒนา

ในการรักษาต่อไปในอนาคต และต้องการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างฟันที่มีความเสมือนจริงที่สุด ทั้งใน ด้านความซับซ้อนของโครงสร้างและขนาด เพื่อให้สามารถวิเคราะห์แรงเชิงกลที่กระทำต่อโครงสร้างฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างฟันจากภาพถ่าย CBCT-scan (Cone beam computed tomography scan) ในรูปแบบสามมิติเสมือนจริง คือ ประกอบ ด้วยโครงสร้างหลายส่วน (Multi-components) รวมถึงกระดูกเบ้าฟันและกราม และมีขนาดตามจริง (True scale)
- เพื่อศึกษาการกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวบนแบบจำลองนั้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย (ระบุขอบเขตของงานวิจัยให้ครอบคลุม ดังต่อไปนี้)

- สร้างแบบจำลองของโครงสร้างฟันกรามน้อย (First Premolar) เท่านั้น
- ใช้โปรแกรม ANSYS Space Claim ในการขึ้นรูปแบบจำลอง และใช้โปรแกรม ANSYS Workbench ในการวิเคราะห์โครงสร้าง
- วิเคราะห์ในรูปแบบของสถิตยศาสตร์ (Static Structural Analysis)
- แบบจำลองของโครงสร้างฟันกรามน้อยจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Isothermal)
- ข้อมูลบางส่วนได้รับจากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ระยะเวลาของโครงการ ประมาณ 1 ปี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างฟันกรามน้อยเสมือนจริง จากภาพถ่าย CBCT-scan (Cone beam computed tomography scan) ได้
- สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงบนส่วนต่างๆของฟันกรามน้อยได้
- ผลงานวิชาการที่ตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการ / วารสาร ระดับชาติ / นานาชาติ อย่างน้อย 1 ผลงาน

1.5 แผนการวิจัย

ตาราง 1.1 แผนการวิจัย

[illegible]

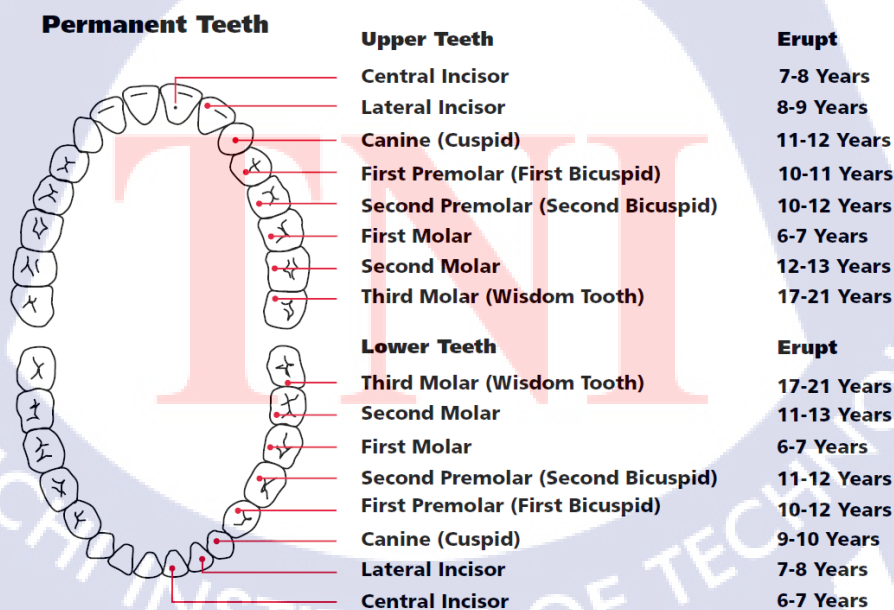
บทที่ 2

การศึกษาวรรณกรรม

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาหลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ ซึ่งจะทำการนำเสนอเป็นหัวข้อตามลำดับ โดยในหัวข้อ 2.1 จะกล่าวถึงโครงสร้างของฟัน หัวข้อที่ 2.2 จะกล่าวถึงการถ่ายภาพรังสีส่วนตัดด้วยคอมพิวเตอร์ (Computed Tomography : CT) หัวข้อที่ 2.3 จะอธิบายถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) และหัวข้อที่ 2.4 จะนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

2.1 โครงสร้างของฟัน

ฟัน (Teeth) ถือเป็นอวัยวะสำคัญในระบบย่อยอาหาร ทำหน้าที่ย่อยเชิงกล โดยการบดเคี้ยวหรือฉีกอาหารให้มีขนาดเล็กลงเพื่อส่งไปยังอวัยวะต่อไป และช่วยในการออกเสียงให้มีความชัดเจน ซึ่งในมนุษย์จะมีฟันอยู่ 2 ชุด คือ ฟันน้ำนม (Primary teeth หรือ Deciduous teeth) จะเริ่มขึ้นเมื่ออายุประมาณ 6 เดือน มีทั้งหมด 20 ซี่ หลังจากนั้นเมื่ออายุประมาณ 6 ขวบ ฟันน้ำนมจะหลุดออกไป และ ฟันถาวรหรือฟันแท้ (Secondary teeth หรือ Permanent teeth) จะขึ้นมาแทนที่ มีทั้งหมด 32 ซี่ เป็นฟันที่มีความแข็งแรงและมีความสำคัญในการบดเคี้ยวหรือฉีกอาหาร

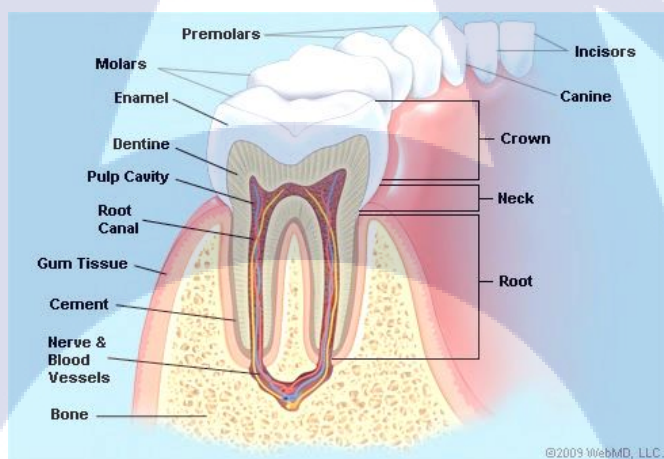


รูปที่ 2.1 ลักษณะการเรียงตัวของฟันและอายุที่ฟันแท้จะขึ้นมาแทนที่ [5]

หากจำแนกฟันตามรูปร่างและหน้าที่ของฟัน สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ดังนี้

- ฟันตัด (Incisor) แบ่งเป็น ฟันตัดซี่กลาง (Central incisor) และฟันตัดซี่ข้าง (Lateral incisor) ลักษณะเหมือนจอบหรือสิ่ว ปลายฟันตัดแบนเรียบ ทำหน้าที่ในการตัดและฉีกอาหาร พุดอกเสียง และเพื่อความสวยงาม
- ฟันเขี้ยว (Canine) มีปุ่มฟันแหลมคมปุ่มเดียว ทำหน้าที่ในการกัดและฉีกอาหาร
- ฟันกรามน้อย (Premolar) มีปุ่มฟัน 2-3 ปุ่มที่เตี้ยกว่าฟันเขี้ยว ทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหาร
- ฟันกราม (Molar) มีปุ่มฟันเตี้ยๆ 3-6 ปุ่ม ทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหาร

โครงสร้างภายนอกของฟันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นตัวฟัน (Crown) จะโผล่พ้นเหงือกและปรากฏให้สามารถมองเห็นได้ในช่องปาก และส่วนรากของฟัน (Root) จะอยู่ข้างใต้ของเหงือกและรอบล้อมไปด้วยของกระดูก ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้จากในช่องปาก ดังรูปที่ 2.2 บริเวณที่สองส่วนต่อกัน เรียกว่า แนวคอฟัน (Cervical Line)



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของฟันและภายในของฟัน [6]

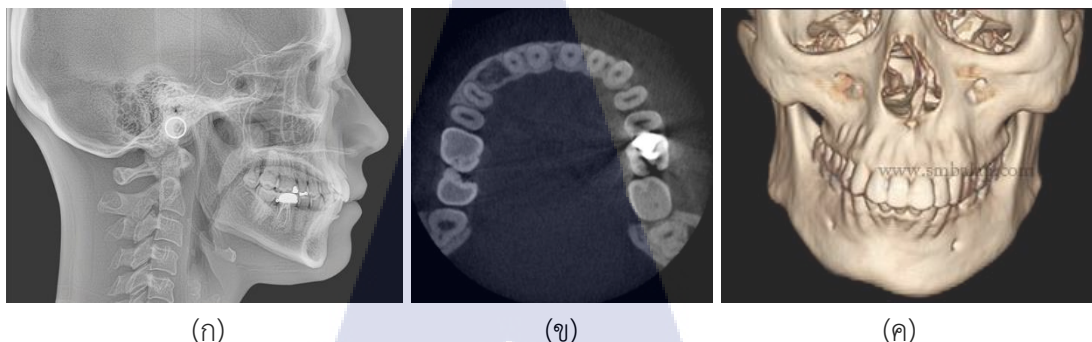
โครงสร้างภายในฟันประกอบด้วย 7 ส่วนหลัก ได้แก่

- เคลือบฟัน (Enamel) เป็นส่วนปกคลุมด้านนอกสุดของตัวฟัน เป็นส่วนที่แข็งที่สุดของฟัน ทำหน้าที่เหมือนเกราะหุ้มฟันเพื่อช่วยปกป้องอันตรายให้แก่ชั้นของเนื้อฟัน และเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน เคลือบฟันโดยทั่วไปมีสีขาวใส เป็นมันวาว
- เนื้อฟัน (Dentine) คือ ส่วนที่อยู่ถัดจากชั้นเคลือบฟันเข้าไป เป็นส่วนประกอบหลักของฟัน มีสีเหลือง เนื้อฟันจะอ่อนกว่าเคลือบฟัน แต่มีความแข็งมากกว่ากระดูก
- เคลือบรากฟัน (Cementum) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มปกคลุมรากฟันทั้งหมด มีสีเหลืองอ่อนและทึบแสง

- เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน (Dental pulp) เป็นเนื้อเยื่ออ่อนที่อยู่ในช่องว่างกลางฟัน ประกอบด้วย หลอดเลือดและเส้นประสาท ซึ่งผ่านเข้าโพรงประสาทฟันทางรูเปิดที่ปลายรากฟัน เข้าสู่ช่องว่างกลางฟันที่เรียกว่า โพรงประสาทฟัน (pulp cavity) เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันทำหน้าที่นำอาหารมาหล่อเลี้ยงฟัน และรับความรู้สึกจากฟันผ่านทางเส้นประสาทไปยังสมอง
- เหงือก (Gingiva) คือ เนื้อเยื่อที่ปกคลุมอยู่ภายในช่องปาก เหงือกจะยึดติดกับกระดูกเบ้าฟัน (alveolar process) โดยทำหน้าที่ต้านทานแรงเสียดสีจากอาหารระหว่างการบดเคี้ยว และการกลืน ในสภาวะปกติจะมีลักษณะแน่น (firm) มีสีชมพูอ่อน
- เอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal ligament) คือ เนื้อเยื่อยึดต่อที่อยู่ระหว่างฟันกับกระดูกเบ้าฟัน ปลายข้างหนึ่งของเอ็นยึดปริทันต์จะฝังตัวอยู่ในเคลือบรากฟัน ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งฝังอยู่ในกระดูกเบ้าฟัน ทำหน้าที่ช่วยยึดฟันไว้ให้อยู่ในกระดูกเบ้าฟัน
- กระดูกเบ้าฟัน (Alveolar bone) คือ ส่วนของกระดูกขากรรไกรบนและล่างที่อยู่ล้อมรอบรากฟัน ทำหน้าที่รองรับฟัน รวมทั้งเป็นที่ฝังตัวของเส้นใยเอ็นยึดปริทันต์ เพื่อยึดให้อยู่กับกระดูกเบ้าฟัน

2.2 การถ่ายภาพรังสีส่วนตัดด้วยคอมพิวเตอร์ (Computed Tomography : CT)

Computed Tomography เป็นระบบที่คิดค้นขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาของภาพเอกซเรย์ ในการวิเคราะห์ที่ต้องการความละเอียดมากขึ้น เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ภาพรังสีเอกซเรย์ที่อาศัยคอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อสร้าง ภาพตัดขวางเฉพาะจุดของวัตถุที่ทำการสแกน เนื่องจากภาพเอกซเรย์เป็นภาพลักษณะ 2 มิติ ทำให้ภาพเงาของอวัยวะต่างๆ ซ้อนทับกัน ทำให้เห็นภาพได้ไม่ชัดเจนเพียงพอ ดังรูปที่ 2.3(ก) โดยเครื่อง CT จะใช้รังสีเอกซเรย์เช่นเดียวกัน แต่แทนที่จะใช้ฟิล์มแผ่นเดียวมารับภาพเงาที่เกิดขึ้น เครื่อง CT จะมีหัวอ่านหลายสิบตัวอยู่ภายในเพื่อรับภาพเงาที่เกิดขึ้น โดยระบบ CT ก็จะมีการหมุนต้นกำเนิดรังสีไปโดยรอบเพื่อให้เกิดภาพเงาจากหลายๆมุม จากนั้นระบบจะนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาประมวลผลและสร้างภาพในลักษณะ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.3(ข) และ (ค) ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเห็นภายในได้โดยไม่ต้องผ่าตัด ภาพตัดขวางที่ได้จะถูกนำมาใช้เพื่อการวินิจฉัยและการรักษาทางการแพทย์ในสาขาต่างๆ และเนื่องจากภาพทั้งหมดเกิดจากภาพตัดขวางจำนวนมาก เราจึงสามารถให้เครื่องทำการสร้างภาพแบบ Tomography คือเป็น Slice ย่อยๆ ออกมาให้เราได้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพถ่าย (ก.) ภาพถ่ายเอกซเรย์จะมีการทับซ้อนของอวัยวะ [7] (ข.) ภาพถ่ายจาก CT 2 มิติ ในแนวตัดขวาง (ค.) ภาพถ่ายของ CT ที่นำไปประมวลผลเป็นภาพ 3 มิติ [8]

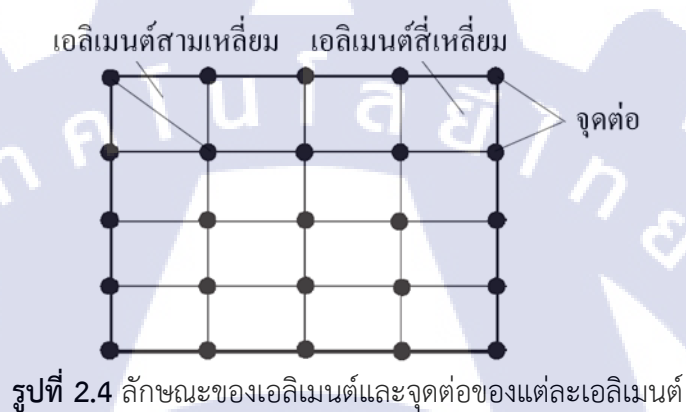
Computed Tomography มีจุดประสงค์หลักเพื่อตรวจหาความผิดปกติในเนื้อเยื่อ กระดูก หรือ โครงสร้างของร่างกายและช่วยในการบอกตำแหน่ง ที่แม่นยำในการนำเครื่องมือเข้าไปรักษา การ บันทึกภาพตัดขวางของร่างกายในระดับที่ต่างกัน เป็นการถ่ายภาพที่ไม่สามารถเห็นได้ด้วยการ ถ่ายเอกซเรย์โดยทั่วไป ช่วยในการวินิจฉัยโรคในขั้นแรกเริ่มหรือเห็นความผิดปกติได้ดีกว่า และนำไปสู่ ความสำเร็จในการรักษาโรคได้มากขึ้น

ในทางทันตกรรมนิยมใช้การถ่ายภาพรังสีส่วนตัดด้วยคอมพิวเตอร์แบบลำรังสีรูปกรวย (Cone Beam Computed Tomography: CBCT) เพื่อประกอบการวางแผนการรักษาในงานทันตกรรมรากเทียม หาตำแหน่งและรูปร่างของฟันฝัง ฟันเกิน ฟันคุด และตำแหน่งกายวิภาคที่สำคัญ ประเมินลักษณะข้อ ต่อขากรรไกร รูปร่างของคลองรากฟันที่ซับซ้อน แสดงให้เห็นพยาธิสภาพปลายรากขนาดเล็กละเอียดที่ไม่เห็น จากภาพรังสีรอบปลายราก รอยหักของฟันกระดูกใบหน้า และขากรรไกร รวมทั้งรอยโรคต่างๆของ กระดูกใบหน้าและขากรรไกร เป็นต้น

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM)

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน ผลลัพธ์ (Solution) ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่าง ดังนั้นผลของคำตอบ แม่นตรง (Exact solution) ที่ถูกสร้างขึ้นมาจึงเต็มไปด้วยตัวแปรต่างๆ ตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นบน รูปร่างของปัญหานั้นๆ หรือสามารถกล่าวอีกอย่างว่า ผลของคำตอบแม่นยำจะประกอบไปด้วยค่า จำนวนอนันต์ค่า ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถเป็นไปได้นี้เนื่องจากจำนวนตัวแปรอนันต์ ค่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ (Approximate solution) โดยทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่าเป็นค่าเชิงประมาณในจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแบ่งโดเมน (Domain) ของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ย่อยๆ ที่มีขนาดต่างๆกัน ซึ่ง

เอลิเมนต์เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (Nodes) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าตัวแปรตาม (Dependent variables) ที่ต้องการ ในทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้สามารถบ่งบอกว่า ผลของคำตอบแม่นยำตรงของแต่ละเอลิเมนต์นั้นมีค่าเท่าไร และจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขต่างๆ อาทิเช่น แรงที่กระทำ อุณหภูมิ จุดยึดของปัญหา หรือคุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น มากำหนดให้กับปัญหานั้นหมายความว่า หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มต้นคิดจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการพิจารณาการสร้างความสมการของสาสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ จะต้องให้มีความสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา [9,10]



ต่อจากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้สร้างขึ้นมาทำการประกอบเข้าด้วยกันจนได้เป็นรูปร่างของปัญหาที่นำมาทำการพิจารณาได้อย่างแท้จริง แล้วจึงนำมาประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่ได้กำหนดมาใส่ลงในสมการที่ได้จัดเตรียมไว้เป็นรูปเรื่องของปัญหา เสร็จแล้วจึงทำการคำนวณจากสมการของปัญหาเพื่อหาคำตอบของระบบสมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคำตอบจะเป็นเชิงประมาณตามตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

ในการวิเคราะห์ปัญหานั้น เอลิเมนต์มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงจำเป็นจะต้องเลือกเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดกับรูปร่างแบบจำลองของปัญหา เพราะว่าการคิดวิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้างเอลิเมนต์ก็เป็นอีกแบบหนึ่ง หรือจะวิเคราะห์ปัญหาของไหลตัวเอลิเมนต์ก็จะเป็นอีกแบบ แต่รูปร่างของเอลิเมนต์เหมือนกัน แตกต่างกันที่การคำนวณระหว่างจุดต่อถึงจุดต่อ (Node to Node) ซึ่งเอลิเมนต์ที่นิยมใช้หลักๆในปัจจุบันในการวิเคราะห์โครงสร้างจะแบ่งได้ออกเป็น 3 แบบคือ เอลิเมนต์แบบ 1 มิติ (Line – dimensional element) เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (Two – dimensional element) และเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (Three – dimensional element)

1. เอลิเมนต์แบบ 1 มิติ (Line – dimensional element) เป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของจำพวกโครงสร้าง (Structure) เพื่อทำการวิเคราะห์ในเรื่องของการโก่งของคาน หรือโครงสร้างที่มีความแ่งหรือเป็นท่อ ซึ่งเอลิเมนต์ 1 มิติ มีข้อดีคือให้คำตอบในการวิเคราะห์

การโก่งของคาน (Deflection of beams) ได้ดี แต่ไม่สามารถดูลักษณะของการเกิดความเค้น (Stress) ได้รูปที่ 2.5

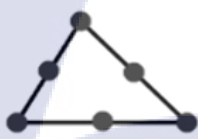


รูปที่ 2.5 ลักษณะเอลิเมนต์ 1 มิติ

2. เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (Two – dimensional element) เป็นเอลิเมนต์นิยมใช้กับการวิเคราะห์โครงสร้างหรือการวิเคราะห์ของไหลแบบ 2 มิติ ซึ่งจะคิดโดยการอ้างอิงกับแนวระนาบใดระนาบหนึ่ง มีข้อดีคือสามารถคำนวณให้ความถูกต้องได้ดีและใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน แต่ก็จะได้ไม่มีความเหมือนจริงที่สุดเพราะของที่เป็นปัญหาทั้งส่วนใหญ่จะเป็นรูปของ 3 มิติ ซึ่งลักษณะรูปร่างของเอลิเมนต์มีมากมายดังรูปที่ 2.6



3-node Triangular



6-node Triangular



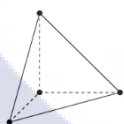
4-node Quadrilateral



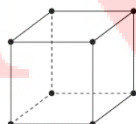
8-node Quadrilateral

รูปที่ 2.6 ลักษณะเอลิเมนต์ 2 มิติ

3. เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (Three – dimensional element) รูปร่างเอลิเมนต์ชนิดนี้เป็นเอลิเมนต์ที่วิเคราะห์ปัญหาทั่วไปของปัญหา 3 มิติ และมีความเหมือนจริงในการจำลองปัญหา แต่เป็นเอลิเมนต์ที่ใช้ระยะเวลานานที่สุดเมื่อเทียบกับเอลิเมนต์ 1 มิติ และเอลิเมนต์ 2 มิติ เพราะมีทิศทางที่เพิ่มขึ้นมา ทำให้มีตัวแปรเพิ่มขึ้นในการคำนวณจึงทำให้การคำนวณนั้นใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบ แต่จะได้ผลของคำตอบหรือลักษณะการแสดงผลของการเกิดปัญหาได้ดียิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.7



4-node Tetrahedron(Tet)



8-node Hexagonal(Brick)



6-node Pentagonal(Wedge)

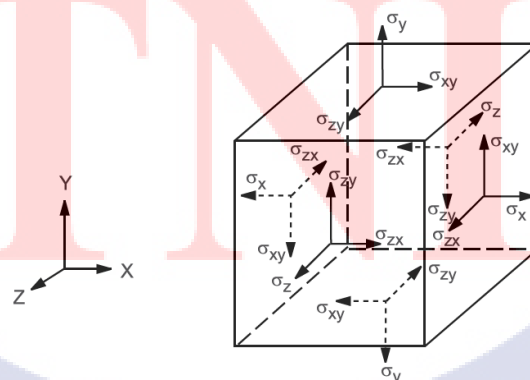
รูปที่ 2.7 ลักษณะเอลิเมนต์ 3 มิติ

4. ทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์ปัญหาของแข็ง การแก้ไขปัญหาด้านของแข็งจะมีการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ต่างเช่น การเคลื่อนตัว ตามตำแหน่งต่างๆ ที่เกิดจากการยืดหรือการหดตัวของวัสดุ หรือการหาผลลัพธ์ความเค้นและความเครียดของปัญหาของแข็งที่ตามมา โดยใช้หลักการสมมุติตัวแปรที่ต่างกันบนเอลิเมนต์เป็นเอลิเมนต์ในรูปทรงต่างๆ เพื่อที่จะให้สามารถจัดเรียงเอลิเมนต์ให้เสมือนกับของจริงมากที่สุด ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะมีสมการคำนวณหาผลลัพธ์ต่างๆ อาทิเช่น การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นของปัญหา

สมการพื้นฐานทั่วไปในสามมิติ ในการวิเคราะห์ของแข็งจะให้สมการเชิงอนุพันธ์ สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0\end{aligned}\quad (2.1)$$

โดยให้ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ เป็นตัวแทนของความเค้นฉากย่อย (Normal stress components) ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ และในส่วนของความเค้นเฉือนย่อย (Shearing stress components) จะแทนด้วย $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ และแรงที่กระทำกับวัตถุ (Force of body) จะอธิบายแทน F_x, F_y, F_z ตามแนวแกนที่ได้กล่าวไปในขั้นต้น นอกจากนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวของวัตถุได้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวของวัตถุ

นอกเหนือจากนี้ในการวิเคราะห์ของแข็งในรูปทรงสามมิติอาจมีความเครียดเกิดขึ้นอยู่ก่อนทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Relations) จากสมการทั่วไปคือ [11]

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (2.2)$$

โดย

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}] \quad (2.3)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}] \quad (2.4)$$

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

เมื่อ $\{\sigma\}$ คือความเค้นที่เกิดขึ้น $\{\varepsilon\}$ แทนด้วยความเครียดที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในสมการ $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon - \varepsilon_0\}$ ในการยืดหยุ่นขั้นต้นได้ และ $[C]$ คือความสัมพันธ์ของการยืดหยุ่นของวัสดุ (elastic stiffness matrix) ในทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการแบ่งเอลิเมนต์เป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ และแก้สมการด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง ซึ่งสุดท้ายแล้วในการแก้สมการจะได้สมการดังนี้

$$\{F\} = [K]\{\delta\} \quad (2.6)$$

โดยที่ $[K]$ คือเอลิเมนต์เมทริกซ์แข็งเกร็ง $\{F\}$ คือภาระของสมการเวกเตอร์สืบเนื่องมาจากความเค้นต้นจากวัตถุ และแรงที่พื้นผิว และ $\{\delta\}$ คือเวกเตอร์ของทิศทาง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยทางสัณฐานวิทยา

ในปี 2554 (2011) Sittiporn Ruengdit และคณะ [12] ได้ศึกษาการบอกลักษณะจากขนาดของฟันของประชากรไทยโดยการวัดขนาดของฟันทุกซี่ทั้งบนและล่าง ด้านซ้ายและด้านขวาของผู้ชายและผู้หญิงเปรียบเทียบกับ พบว่าฟันกรามน้อยด้านบนฝั่งซ้ายมีขนาดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดของฟันกรามน้อยด้านบนฝั่งซ้าย

Tooth variable	Male			Female		
	N	Mean	S.D.	N	Mean	S.D.
MD	62	7.5966	0.48937	101	7.4716	0.43893
BL	61	9.9301	0.53103	102	9.6127	0.53378

ในปี 2555 (2012) Erdal Özcan และคณะ [13] ได้รวบรวมสถิติทางสัณฐานวิทยาของฟันกรามน้อยและศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟันกรามน้อยของประชากรตุรกี พบว่าฟันกรามน้อยของคนส่วนใหญ่ประมาณ 60% มักมีรากฟันสองราก

ต่อมาในปี 2558 (2015) Kafle Dashrath และคณะ [14] ได้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความยาวของฟันกรามน้อยของประชากรประเทศเนปาล พบว่าฟันกรามน้อยด้านบนมีความยาวดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความยาวของฟันกรามน้อยด้านบนฝั่งซ้าย

Tooth variable	Male			Female		
	N	Mean	S.D.	N	Mean	S.D.
Tooth Length	20	21.02	2.09	46	20.99	1.65

2. งานวิจัยการพัฒนาแบบจำลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

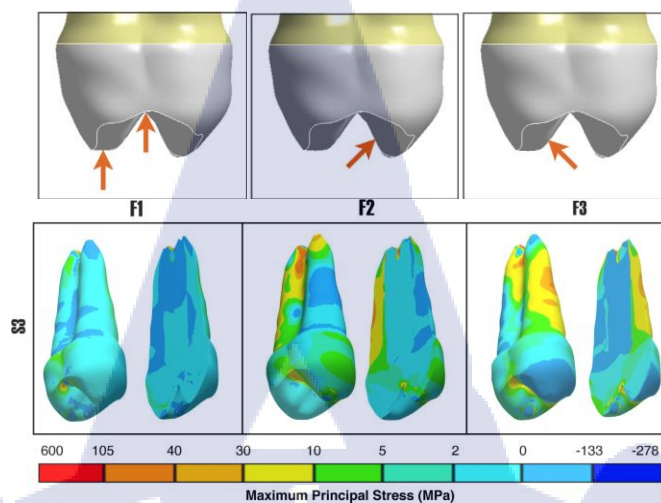
ในปี 2544(2001) A.M. O'Mahony และคณะ [27] ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของความเค้นและความเครียดในการปลูกรากฟันเทียมภายใต้ภาระในแนวเฉียง จากความยืดหยุ่นแบบ Anisotropic ของกระดูกขากรรไกรล่างแบบแข็งและแบบมีรูพรุน โดยเปรียบเทียบการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแบบ Isotropic กับ Anisotropic ของกระดูกขากรรไกรล่างในการวิเคราะห์แบบจำลองสามมิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS ในการปลูกรากฟันเทียม เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบ 10 node-Tetrahedral และกำหนดให้การปลุกถ่ายกับกระดูกเชื่อมต่อกันโดยสมบูรณ์ (Perfect bonding) จากผลการวิเคราะห์พบว่าการกำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นแบบ Anisotropic ทำให้ความเค้นและความเครียดเพิ่มขึ้น 20-30% จากผลการวิเคราะห์ที่กำหนดคุณสมบัติทางกลแบบ Isotropic ในกระดูกขากรรไกรส่วนแข็ง และทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้น 3-4 เท่า จากผลการวิเคราะห์ที่กำหนดคุณสมบัติทางกลแบบ Isotropic ในกระดูกขากรรไกรส่วนที่มีรูพรุน

ในปี 2551 (2008) Josipa Borcic และคณะ [30] ได้ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นโดยการสร้างแบบจำลองสามมิติของฟันกรามน้อยด้านบนซี่ที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 5 ส่วนด้วยการนำไปหล่อใน red epoxy resin แล้วตัดขวางเป็นแผ่นหนา 1.3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปถ่ายเป็นภาพดิจิทัลเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติในโปรแกรม AutoCAD Mechanical Desktop และวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในโปรแกรม NASTRAN โดยให้แรง 200 นิวตัน จากการวิเคราะห์เกิดความเค้นกดมากที่สุดที่บริเวณรอยต่อของเคลือบฟันและเนื้อฟัน และความเค้นดึงมากที่สุดที่ยอดฝังกระพุ้งแก้ม

ในปี 2554 (2011) Eraslan Ö. และคณะ [32] ได้ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของฟันกรามน้อยด้านล่างที่มีลักษณะรากเดียวกับโปรแกรม Solidworks 2007 9.0.3 ที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 5 โครงสร้าง โดยส่วนของเนื้อเยื่อเอ็นยึดปริทันต์และกระดูกจะสร้างอย่างง่ายตามความหนาทั่วไปคือ 0.25 และ 1.5 มิลลิเมตร และพัฒนาเพื่อศึกษาการซ่อมแซมหลังจากทำการรักษารากฟันแบบต่างๆ แล้วให้แรง 300 นิวตัน ลงบนผิวฟันที่รับแรงบดเคี้ยว การกระจายตัวของความเค้นในการซ่อมแซมแบบต่างๆ จะแตกต่างกันที่บริเวณรากของเนื้อฟัน การใช้วัสดุแบบ post จะทำให้เกิดความเค้นสูงขึ้น แต่ถ้าใช้แบบเส้นใยเสริมแรงเส้นใยจะช่วยลดการแพร่ของความเค้น

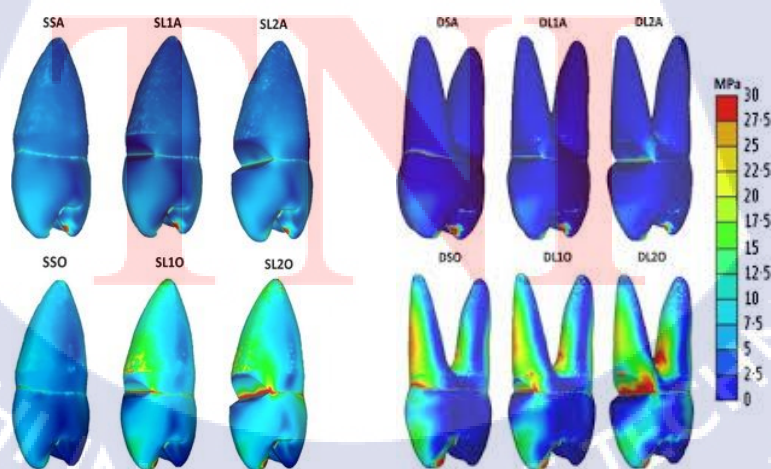
ในปี 2556 (2013) Zheng HUANG และ Zhi CHEN [31] ได้สร้างแบบจำลองสามมิติของฟันกรามน้อยด้านบนซี่ที่ 1 จากการถ่ายภาพ micro CT ของฟันที่ถูกถอนออกมา แล้วทำการสร้างเป็นสามมิติด้วยโปรแกรม MIMICS 10.0 ซึ่งประกอบด้วยสองโครงสร้างได้แก่ เคลือบฟันและเนื้อฟัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS 14.0 พบความเค้นกดสูงสุดที่บริเวณที่จุดรับแรงและความเค้นดึงสูงสุดที่รอยแยกของยอดฟันทั้งสองข้าง

ในปี 2557 (2014) Jackeline Coutinho Guimarães และคณะ [2] ได้ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นบนฟันกรามน้อยปกติกับฟันที่เกิดการสึก โดยใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติของฟันกรามน้อยจากการนำฟันกรามน้อยที่เคลือบด้วย Epoxy resin ไปตัดเป็นชิ้นย่อยๆ เช่นเดียวกับ Josipa Borcic และคณะ และวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Ansys workbench V.13 โดยให้แรงที่กระทำเป็นแรงจากการบดเคี้ยว 105 นิวตันทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ แรงกดลงจากด้านบนตามแนวแกนยาวของฟัน และกดที่ยอดฟันแต่ละด้านโดยทำมุม 35° กับแนวแกนยาวของฟัน จากผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองของแบบจำลองจาก Epoxi resin กับผลการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพียง 4.6% และความเค้นที่เกิดจากแรงกดด้านบนจะกระจายตัวตามแนวแกนของฟัน ซึ่งตรงข้ามกับแรงที่กดทำมุม 35° บนยอดที่เกิดความเค้นภายในและบริเวณรากฟัน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนฟันกรามน้อย [12]

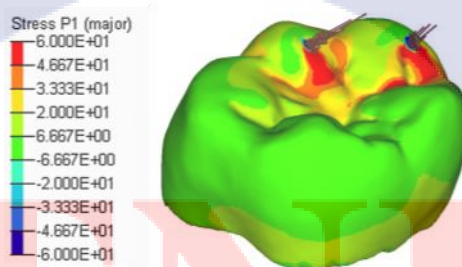
ในปีเดียวกัน P. V. SOARES และคณะ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางชีววิทยาเชิงกลของแรงที่กระทำในแนวแกนและแนวเฉียงบนฟันกรามน้อยที่มีรากฟันเดี่ยวและรากฟันคู่อย่างละ 7 ซี่ โดยติดตั้ง Strain gauge ในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับฟันที่บริเวณรากฟัน และสร้างแบบจำลองของฟันกรามน้อยที่มีส่วนประกอบของเคลือบฟัน เนื้อฟัน และโพรงประสาทฟัน จากการถ่ายภาพทีละโครงสร้างของฟัน โดยใช้โปรแกรม Rhinoceros 3D 4.0 และวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิเคราะห์วัสดุแบบเชิงเส้น (linear elastic deformation) สร้างเอลิเมนต์แบบ 10-node quadratic tetrahedral และให้แรงที่กระทำขนาด 10 นิวตัน ผลของการทดลองทำให้ทราบว่าเกิดความเค้นสูงภายในส่วนเคลือบฟันและเนื้อฟัน บริเวณที่แรงกระทำ และบริเวณคอฟัน โดยฟันที่มีลักษณะรากคู่จะมีความเค้นสูงกว่าฟันที่มีลักษณะรากเดี่ยว ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนฟันกรามน้อยที่มีลักษณะรากคู่และรากเดี่ยว [3]

ในปี 2557 (2014) เช่นกัน Stefano Benazzi และคณะ [29] ได้ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นรูปแบบต่างๆ บนฟันกรามน้อยด้านล่างซี่ที่ 2 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการถ่ายภาพ micro CT ของหัวกะโหลกที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน และใช้โปรแกรมใช้โปรแกรม Occlusal Fingerprint Analyser ในการวิเคราะห์พื้นผิวบดเคี้ยวที่สัมผัสกันระหว่างฟันบนและฟันล่าง เพื่อเปรียบเทียบการกระจายความเค้นจากการให้แรงจุดเดียวและการให้แรงเป็นพื้นที่สบกัด ซึ่งในกรณีที่ให้แรงเป็นพื้นที่จะเกิดความเค้นดังบริเวณร่องฟันและผิวที่ได้รับแรงบดเคี้ยวมากกว่า ยิ่งไปกว่านั้นยังเกิดความเค้นดังสูงที่บริเวณยอดฟันผุด้านกระพุ้งแก้ม ซึ่งเป็นจุดที่มักจะทำให้เกิดการสึกหรอรูปลิ่ม ช่วยสนับสนุนแนวคิดที่ว่าแรงบดเคี้ยวอาจเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอที่ไม่ได้มีสาเหตุจากฟันผุ

และในปี 2559 (2016) ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองแบบไดนามิกของการเสียรูปของฟันและวิเคราะห์ความต่อเนื่องในการบดเคี้ยวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการถ่ายภาพ micro CT ของหัวกะโหลกเช่นกันแต่ในครั้งนี้นำประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน ถือเป็นแบบจำลองที่มีความเหมือนจริงอย่างมาก และใช้โปรแกรม Occlusal Fingerprint Analyser ในการจำลองวัฏจักรการบดเคี้ยว เพื่อวิเคราะห์ผลของแรงที่เกิดจากการบดเคี้ยว จากผลการทดลองแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ที่เกิดการสบกันของฟันคือ 923 N และมีการกระจายตัวของความเค้นที่ส่วนเคลือบฟันบริเวณปุ่มฟันด้านไกลส่วนกลางของร่างกาย (Distal Cusps) และขยายตัวจนถึงร่องฟัน ทั้งฟันกรามด้านบนและด้านล่าง ดังรูปที่ 2.11

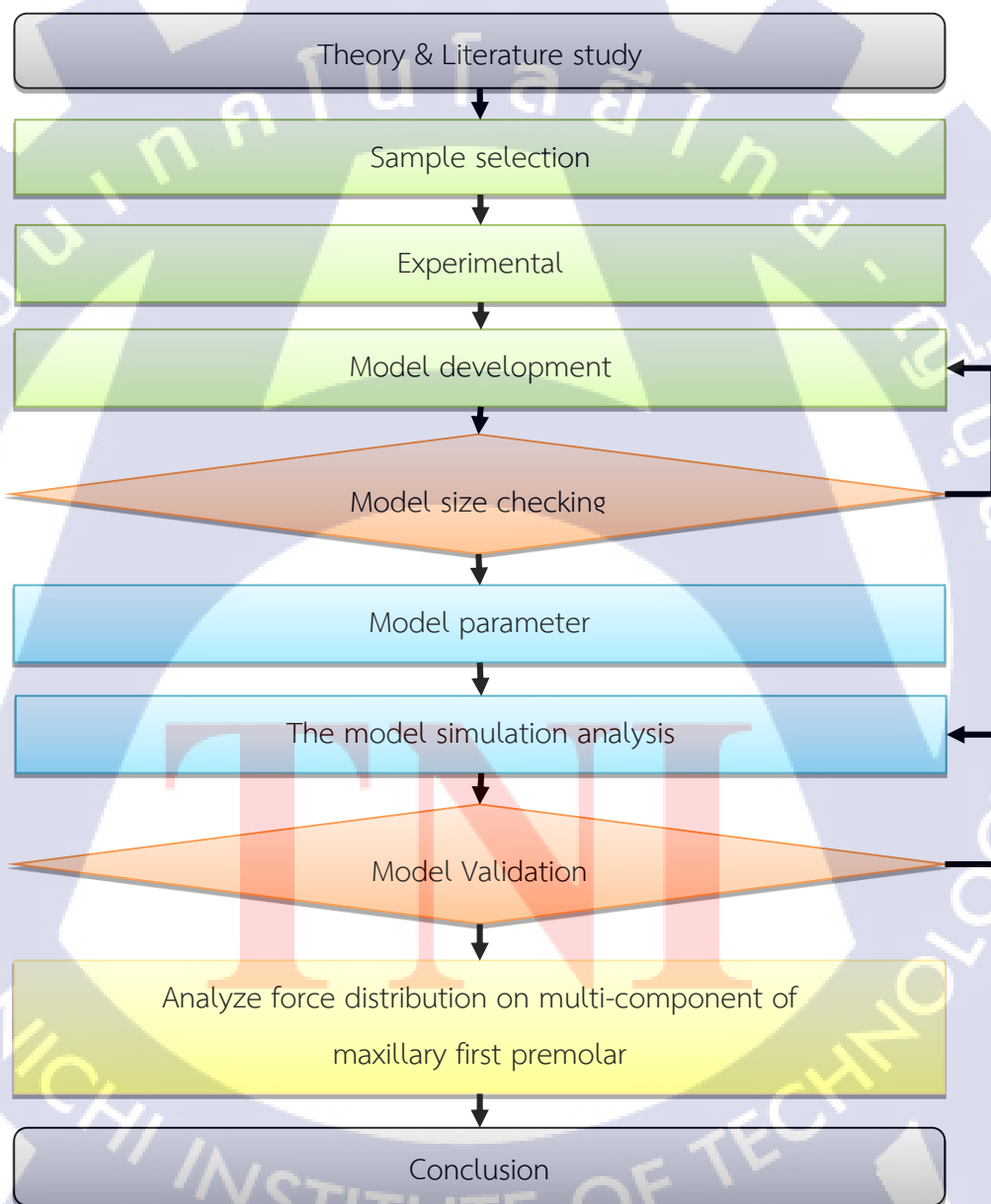


รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดบนฟันกราม [4]

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

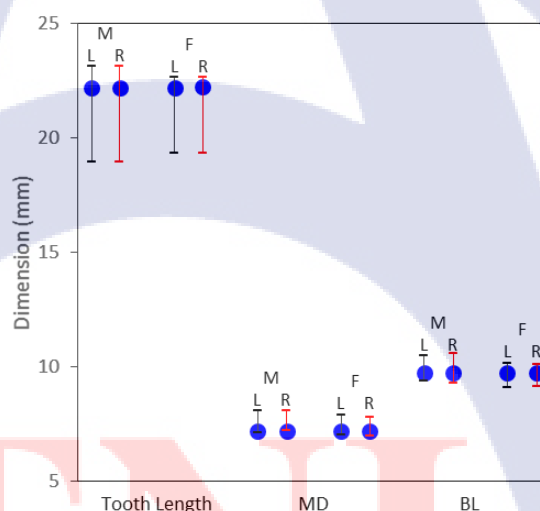
การศึกษาในครั้งนี้จะประกอบไปด้วย การศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างฟันจากภาพถ่าย CBCT-scan (Cone beam computed tomography scan) ในรูปแบบสามมิติเสมือนจริง และการศึกษาการกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวบนแบบจำลองของโครงสร้างฟันกรามน้อย โดยมีขั้นตอนต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำวิจัย

3.1 การเลือกต้นแบบและตัวอย่าง

การศึกษานี้ได้รับภาพถ่าย CBCT จากคณะทันตแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มาเป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลอง โดยเป็นภาพถ่ายของฟันกรามน้อยปกติด้านบนฝั่งซ้ายของผู้ป่วยชาย ซึ่งฟันกรามน้อยของคนไข้มีรูปร่างและขนาดตามมาตรฐานของคนเอเชียทั้งผู้ชายและผู้หญิง [12,13,14] ทั้งความยาว ความกว้างด้านกระพุ้งแก้มถึงด้านลิ้น และความกว้างด้านโกลกลางถึงด้านโกลกลางของร่างกาย ดังรูปที่ 3.2 ที่แสดงว่าขนาดของฟันกรามน้อยต้นแบบจากภาพถ่าย CBCT อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของขนาดมาตรฐานของคนเอเชียทั้งผู้ชายและผู้หญิง และได้เลือกฟันกรามน้อยที่มีรูปร่างและขนาดตามมาตรฐานของคนเอเชียอีก 30 ซี่ มาทำการทดสอบกดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine : UTM) จนเกิดการแตกหักเสียหาย เพื่อนำมาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ผลการทดลอง 30 ซี่ ที่ช่วงความเชื่อมั่น 90% ซึ่งตามสถิติทางสาธารณสุขวิทยา ฟันกรามน้อยของคนส่วนใหญ่ประมาณ 60 % มักมีรากฟันสองราก [13] ดังนั้นฟันกรามน้อยทั้งหมดที่นำมาศึกษาจึงเป็นฟันกรามน้อยที่มีลักษณะสองราก



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบขนาดของฟันต้นแบบ (•) กับขนาดมาตรฐานของฟันบนด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) ของคนเอเชียทั้งผู้ชาย (M) และผู้หญิง (F)

3.2 การทดสอบกด

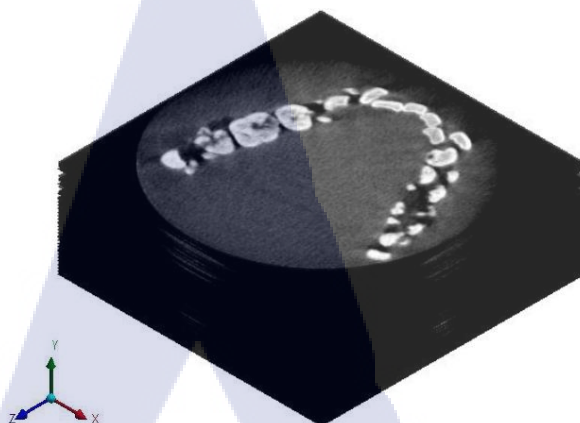
ในการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยของแรงกดที่จะทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหาย จะใช้ฟันกรามน้อยที่ถูกเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 3 เดือน นับจากการถอนออกจากช่องปาก และใช้ซิลิโคน (Polyvinyl siloxane : PVS) มาเคลือบที่รากฟันจนถึงบริเวณต่ำกว่ารอยต่อของเคลือบฟันและเคลือบรากฟัน 2 มิลลิเมตร เพื่อจำลองเป็นเอ็นยึด

ปริทันต์ (Periodontal ligament) ที่มีความหนา 0.2-0.3 มิลลิเมตร [15] หลังจากหล่อให้ซิลิโคนแห้ง จะนำฟันใส่ตรงกลางท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ที่มีความยาว 25 มิลลิเมตร และทำการหล่อเรซินลงในท่อ PVC จนถึงระดับเดียวกับซิลิโคนที่เคลือบรากฟันแล้วรอให้เรซินแข็งตัวอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จากนั้นติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine : UTM) รุ่น INSTRON-8872 โดยใช้หัวบอลกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร หัวกดจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที และบันทึกผลการทดลองในรูปของความสัมพันธ์ของระยะที่หัวกดเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับ แรงที่กดลงในแนวแกนกับจนกระทั่งฟันเกิดการแตกหักเสียหาย

3.3 การพัฒนาแบบจำลอง

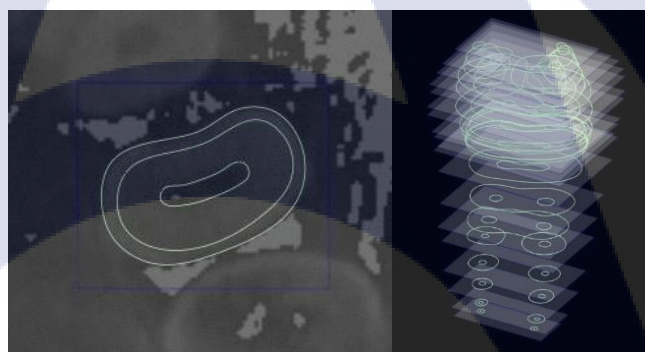
ในการสร้างรูปแบบจำลองนั้นสามารถทำได้ในโปรแกรมออกแบบหรือเขียนแบบ (Computer-Aided Design : CAD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการสร้างแบบจำลองหรือออกแบบชิ้นงานต่างๆ ในปัจจุบันมีบริษัทชั้นนำมากมายที่พัฒนาโปรแกรมออกแบบ เช่น CATIA, Autodesk, Solid work, NX และ ANSYS เป็นต้น จุดที่สำคัญของการสร้างแบบจำลองนั้นคือ ขนาดและรูปทรงของแบบจำลองจะต้องเท่ากับวัตถุของจริงมากที่สุด การเลือกใช้โปรแกรมมีส่วนสำคัญที่ทำให้การสร้างแบบจำลองนั้นมีความง่ายหรือซับซ้อนเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ทำการสร้างรูปแบบจำลองในโปรแกรม CATIA หรือ โปรแกรม Solid work ก็ตามแล้วนำมาวิเคราะห์ โครงสร้างในโปรแกรม ANSYS ในการทำลักษณะนี้อาจจะเกิดปัญหาขึ้นในการถ่ายเทข้อมูลจากโปรแกรมหนึ่งไปยังอีกโปรแกรมหนึ่ง ทำให้มีความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดของรูปแบบจำลองขึ้น เช่น พื้นที่ผิวหายไป มีเส้นที่ผิดปกติแสดงขึ้นมา หรือในกรณีที่ชิ้นส่วนประกอบในรูปแบบจำลองนั้น ชิ้นส่วนบางชิ้นอาจจะหายไป เป็นต้น เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องระมัดระวังเรื่องการใช้โปรแกรมในการทำงาน ซึ่งวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองเป็นต้นแบบ เพื่อนำไปทดลองหรือเปรียบเทียบผลคำตอบของแบบจำลอง (Validation model) ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และเพื่อที่จะนำไปเป็นสู่ผลคำตอบในการวิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะสร้างรูปแบบจำลองของโครงสร้างฟันกรามน้อย (Maxillary first premolar) ที่มีขนาดเทียบเท่ากับขนาดของฟันจริงมากที่สุด โดยจะใช้โปรแกรม ANSYS spaceclaim เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลอง โดยจะนำภาพถ่าย CBCT มาทำการจัดเรียงซ้อนกันตามระยะห่างที่ได้กำหนดขณะที่ทำการถ่ายภาพ CBCT scan กับคนไข้ไว้ในทิศทางแกน เท่ากับ 0.16 มิลลิเมตร ของแต่ละภาพ ดังรูปที่ 3.3



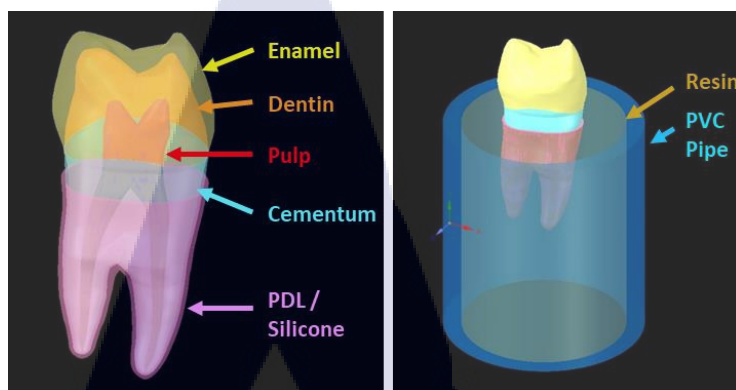
รูปที่ 3.3 การนำภาพถ่าย CT มาเรียงซ้อนกันเพื่อทำการสร้างแบบจำลอง

เสร็จแล้วจึงทำการเขียนแบบตามภาพถ่าย CBCT ที่นำมาเรียงซ้อนกัน โดยที่จะทำการสร้างแบบจำลองจากด้านในออกมาด้านนอกนั่นก็คือ เริ่มวาดจากเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน เนื้อฟัน และเคลือบฟัน ตามลำดับ จนครบทุกภาพ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเขียนแบบจำลองของโครงสร้างฟัน

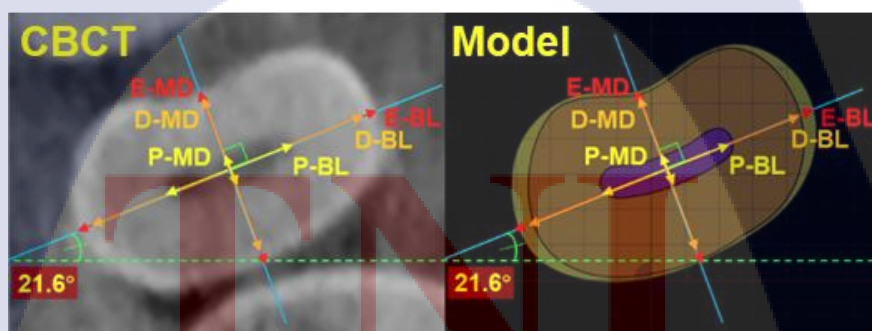
ใช้คำสั่ง Blend ในการขึ้นรูปสามมิติที่ละส่วนประกอบ แต่ส่วนเคลือบรากฟันและเอ็นยึดปริทันต์เป็นส่วนประกอบที่บางมากจนไม่สามารถมองเห็นขอบเขตที่ชัดเจนจากภาพถ่าย CBCT จึงวาดขอบเขตตามความหนาเฉลี่ยที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนเคลือบรากฟันมีความหนาประมาณ 0.195 มิลลิเมตร เริ่มจากรอยต่อของเคลือบฟัน ส่วนเอ็นยึดปริทันต์มีความหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร เริ่มจากบริเวณต่ำกว่ารอยต่อของเคลือบฟันและเคลือบรากฟัน 2 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดสอบกีดส่วนเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันในฟันที่นำมาทดลองจะแห้งและหดตัวลงจนเหลือแต่โพรงประสาทฟัน และได้ใช้ซิลิโคนแทนส่วนของเอ็นยึดปริทันต์ และใช้เรซินกับท่อ PVC มาจำลองเป็นกระดูกเบ้าฟัน ดังนั้นจึงจะสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเสมือนจริงของฟันกรามน้อย

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง

การพัฒนาสร้างแบบจำลองนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนของการขึ้นรูปแบบจำลอง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองมีขนาดเท่ากับขนาดจริง เนื่องจากขนาดของส่วนประกอบแต่ละส่วนของแบบจำลองจะส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายแรงอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะทำวัดขนาดของฟันจากภาพถ่าย CBCT ด้วยโปรแกรม RadiAnt DICOM Viewer ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์เปรียบเทียบกับแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS spaceclaim ในทิศทาง BL และ MD ซึ่งจะใช้มุมอ้างอิงเหมือนกันในแต่ละชั้นที่เลือก ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง

3.5 ค่าตัวแปรของแบบจำลอง

คุณสมบัติทางกลของส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองทั้งเคลือบฟัน เนื้อฟัน เคลือบรากฟัน ซิลิโคน เรซิน และท่อ PVC ที่จะใช้ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง สามารถหาได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแค็ตตาล็อกสินค้าอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกลของส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลอง

Component	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Shear Coefficient (MPa)	Ultimate Compressive Strength (MPa)	Reference
Orthotropic Components					
Enamel					
Sagittal plane	73.72	0.23	20.89	384	[17,26]
Coronal plane	63.27	0.45	24.07		
Axial plane	63.27	0.23	20.89		
Dentin					
Sagittal plane	17.07	0.30	1.70	297	[17,26]
Coronal plane	5.61	0.33	6.00		
Axial plane	5.61	0.30	1.70		
Cancellous bone					
Sagittal plane	1.15	0.01	0.07		[27]
Coronal plane	0.21	0.06	0.07		
Axial plane	1.15	0.32	0.43		
Cortical bone					
Sagittal plane	7.20	0.50	4.20		[28]
Coronal plane	8.70	0.42	3.50		
Axial plane	12.20	0.50	2.80		

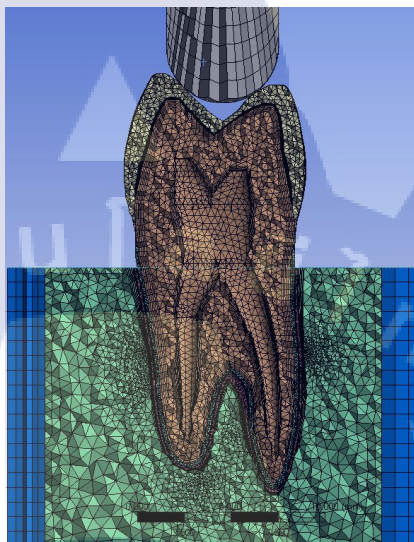
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกลของส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลอง (ต่อ)

Component	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Shear Coefficient (MPa)	Ultimate Compressive Strength (MPa)	Reference
Isotropic Components					
Cementum	15.5	0.31	-	-	[18], [19]
Silicone	0.001	0.3		-	[20]
Resin	3.45	0.35		-	[21], [22], [23]
PVC Pipe	0.00027	0.35		68.65	[24]
Stainless Steel - Grade 304	193	0.265		205	[25]

3.6 การวิเคราะห์แบบจำลอง

หลังจากสร้างรูปแบบจำลองและทำการตรวจสอบความถูกต้องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสร้างเอลิเมนต์ให้กับแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench ซึ่งเป็นโปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ที่มีชื่อเสียงและมีความน่าเชื่อถืออันดับต้นๆของโลกในการคำนวณหรือวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งโปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้ถึง 3 ฟิสิกส์คือ ปัญหาทางด้านโครงสร้าง (Structures) ปัญหาทางของไหล (Fluids) ปัญหาทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) ซึ่งในปัญหาของไหลจะรวมปัญหาเรื่องของการขึ้นรูปของ Plastics (Polyflow) ด้วย แต่เนื่องจากปัญหาของงานวิจัยนี้จะอยู่ในส่วนของปัญหาทางโครงสร้าง (Structure) เป็นหลัก และเนื่องจากรูปทรงของแบบจำลองโครงสร้างฟันนั้นไม่ใช่รูปทรงที่มีความสมมาตรเชิงเรขาคณิต ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Tetrahedral elements) เพราะเอลิเมนต์สามเหลี่ยมนั้นสามารถเข้ารูปร่างของปัญหาได้ง่ายและผลคำตอบที่ถูกต้อง แต่จะมีข้อเสียในเรื่องของระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณนานกว่าเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเมื่อเปรียบเทียบที่จำนวนการใช้เอลิเมนต์ที่เท่ากัน เพราะว่ายิ่งจำนวนของเอลิเมนต์มากขึ้นจะทำให้การคำนวณผลคำตอบใช้เวลานานขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาจำนวนของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

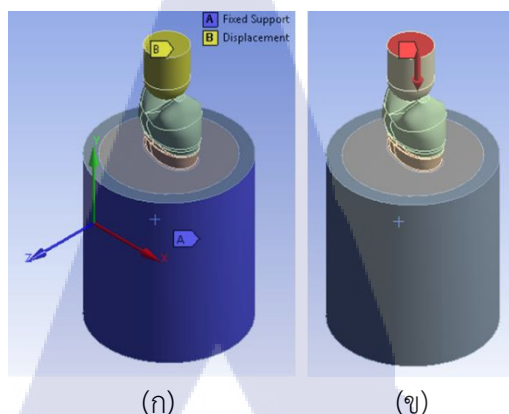
ในการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีทั้งส่วนของเคลือบฟัน เนื้อฟัน เคลือบรากฟัน ซิลิโคน เรซิน และท่อ PVC จะวิเคราะห์โดยใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Tetrahedral 10 Node) จำนวนเอลิเมนต์ (Element) เท่ากับ 1,086,158 เอลิเมนต์และมีจำนวนจุดต่อ(Node) เท่ากับ 2,079,490 จุดต่อ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะของเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

การกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทดสอบกด จะกำหนดให้ ผิวด้านล่างของเรซิน และ ผิวด้านล่างและด้านข้างของท่อ PVC ถูกยึดอยู่กับที่ (Fix support) และหัวกดจะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งเท่านั้น ดังรูปที่ 3.8(ก) และการให้แรงจะเป็นแรงกดในแนวตั้งที่ผิวบนของหัวกดแบบสถิตยศาสตร์ (Static) ดังรูปที่ 3.8(ข) โดยขนาดของแรงกดจะค่อยๆเพิ่มขึ้น เพื่อหาแรงที่จะทำให้ฟันเกิดการแตกหัก นั่นคือแรงที่ทำให้เกิดความเค้นหลักสูงสุดเกินกว่าค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่องค์ประกอบทางทันตกรรมรับได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย ภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์ดังนี้

- แบบจำลองของโครงสร้างฟันกรามน้อยจะไม่มีเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Isothermal)
- ส่วนประกอบของฟันเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน ไม่มีสมบัติเฉพาะในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นพิเศษ และมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น



รูปที่ 3.8 การกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทดสอบกด (ก) ตำแหน่งตัวยึด (ข) การให้แรงกด

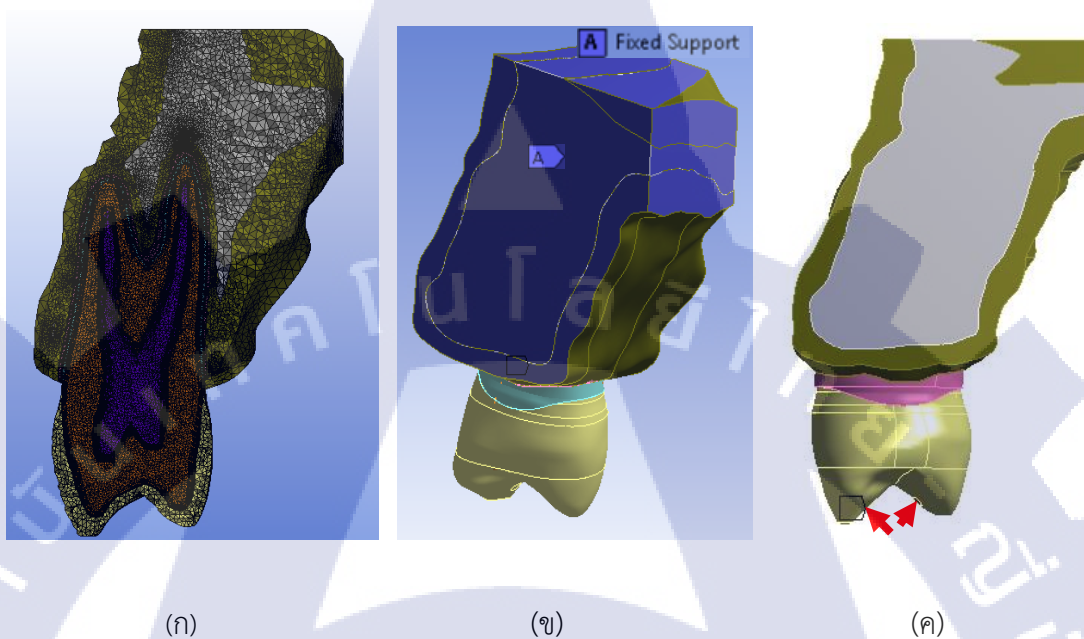
3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ปัญหาหลักอีกอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์แบบจำลองนอกจากการสร้างแบบจำลองให้มีความเสมือนจริงที่ประกอบด้วยหลายโครงสร้างและมีขนาดจริงคือการกำหนดเงื่อนไขให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากที่สุด ดังนั้นหลังจากได้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจนพบบังเกิดการแตกหักเสียหาย โดยจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของระยะทางที่หัวกดเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งกับแรงลัพธ์ที่ทำให้เกิดความเค้นหลักสูงสุดเกินกว่าค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่องค์ประกอบทางทันตรกรรมรับได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะวิเคราะห์จากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

3.8 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงกดเดียว

เมื่อแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นผ่านการตรวจสอบความถูกต้อง ทั้งในด้านวิธีการสร้างแบบจำลองและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงกดเดียวบนแบบจำลองจะเริ่มจากการจำลองสถานะเสมือนจริงในช่องปากด้วยการสร้างกระดูกเบ้าฟันและกระดูกกรามบนแทนเรซินและท่อ PVC จะวิเคราะห์โดยใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Tetrahedral 10 Node) จำนวนเอลิเมนต์ (Element) เท่ากับ 1,999,751 เอลิเมนต์และมีจำนวนจุดต่อ(Node) เท่ากับ 3,796,784 จุดต่อ ดังรูปที่ 3.9(ก) และกำหนดเงื่อนไขเพื่อจำลองการกดเคี้ยว โดยกำหนดให้ ผิวของกระดูก 4 ด้าน ได้แก่ ด้านใกล้ลำตัว ด้านไกลลำตัว ด้านเพดานปาก และด้านโพรงจมูก ถูกยึดอยู่กับที่ (Fix support) ดังรูปที่ 3.9(ข) และให้แรงกดเคี้ยวหรือแรงกดขนาด 68.3 เมกะปาสคาล ในทิศทางตั้งฉากกับผิวลงบนยอดฟันทั้งสองข้างเป็นพื้นที่ขนาด 0.8 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.9(ค) ภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์ดังนี้

- แบบจำลองของโครงสร้างฟันกรามน้อยจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Isothermal)
- ส่วนประกอบของฟันเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน ไม่มีสมบัติเฉพาะในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นพิเศษ และมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น



รูปที่ 3.9 การกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทดสอบกด (ก) ลักษณะของเอลิเมนต์ของแบบจำลอง (ข) ตำแหน่งตัวยึด (ค) การให้แรงกดเคี้ยว

นอกจากนี้ จะทำการวิเคราะห์ความสำคัญของโครงสร้างฟัน หากขาดส่วนประกอบบางอย่าง จะทำให้การกระจายตัวของแรงเชิงกลเปลี่ยนไปอย่างไร โดยแบ่งเป็นกรณีศึกษา ดังนี้

- S1 แบบจำลองที่ประกอบด้วยทุกส่วนประกอบ
- S2 แบบจำลองที่เคลือบรากฟันหายไปและรวมเป็นส่วนเดียวกับเนื้อฟัน
- S3 แบบจำลองที่เอ็นยึดปริทันต์หักหายไปและถูกแทนที่ด้วยกระดูกเบ้าฟัน
- S4 แบบจำลองที่ทั้งเคลือบรากฟันและเอ็นยึดปริทันต์หักหายไป โดยแทนส่วนของเคลือบรากฟันด้วยเนื้อฟันและส่วนเอ็นยึดปริทันต์ด้วยกระดูกเบ้าฟัน

บทที่ 4

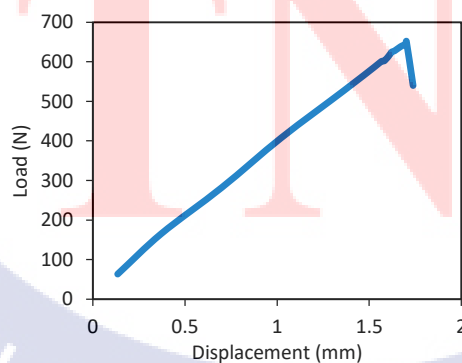
ผลและการวิเคราะห์

ผลที่ได้จากการศึกษานั้น ถูกนำเสนอและวิเคราะห์ในบทนี้ตามลำดับดังต่อไปนี้

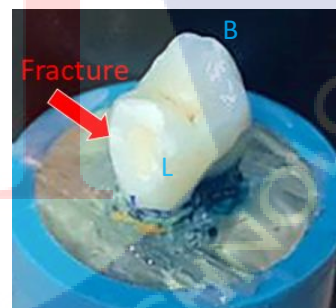
- 4.1 การทดสอบกด
- 4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง
- 4.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง
- 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
- 4.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงกดเดียว

4.1 การทดสอบกด

ผลการทดสอบกดฟันเพื่อหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยของแรงกดที่จะทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหาย โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine : UTM) ของฟันตัวอย่างทั้งหมด 30 ซี่ แรงสูงสุดและต่ำสุดที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหายคือ 950 และ 505 นิวตัน ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 653 ± 96 นิวตัน สามารถแสดงได้ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์ โดยใช้ผลการทดสอบกดของฟันกรามที่เกิดการแตกหักที่แรงใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยมากที่สุด (651 N) มาเป็นตัวแทนของแรงเฉลี่ย ดังรูปที่ 4.1 (ก) จากแผนภูมิความสัมพันธ์ระยะทางกับแรงลัพธ์แสดงให้เห็นว่าฟันเกิดการแตกหักแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งการแตกหักเสียหายของฟันตัวอย่าง 29 ซี่ จากทั้งหมด 30 ซี่ จะแตกบริเวณสูงกว่ารอยต่อระหว่างเคลือบฟันกับเคลือบรากฟันที่ฝั่งด้านลิ้น (Lingual side) ดังรูปที่ 4.1(ข) มีเพียงซี่เดียวที่แตกตามรอยแยกของยอดฟัน (Mesial-distal line)



(ก)

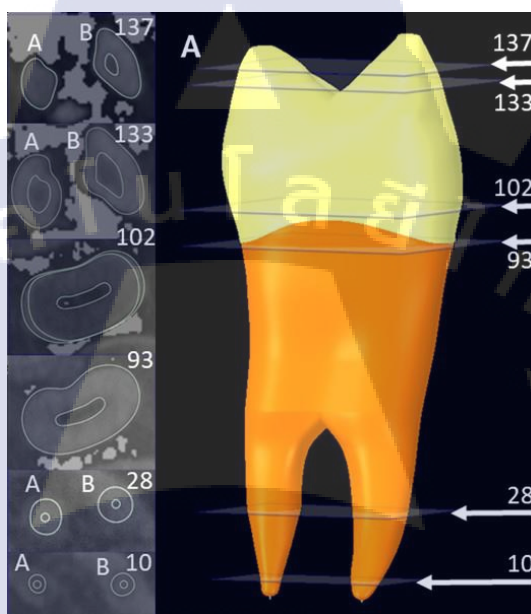


(ข)

รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบกด (ก) แผนภูมิความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์
(ข) รอยแตกของฟันตัวอย่าง

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง

การเปรียบเทียบขนาดของฟันแต่ละส่วนประกอบที่วัดในทิศทาง BL และ MD ในแต่ละชั้นที่เลือก ดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาความแตกต่างโดยเฉลี่ยของขนาด ในทิศทาง BL และ MD ของทุกส่วนประกอบมีค่าประมาณ 0.046 ± 0.048 มิลลิเมตร และ 0.040 ± 0.035 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งน้อยมากๆ ดังตารางที่ 4.1 ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเป็นแบบจำลองที่มีขนาดเทียบเท่าขนาดจริง



รูปที่ 4.2 ชั้นที่เลือกมาทำการวัดขนาดของฟันแต่ละส่วนประกอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดขนาดของฟันแต่ละส่วนประกอบ

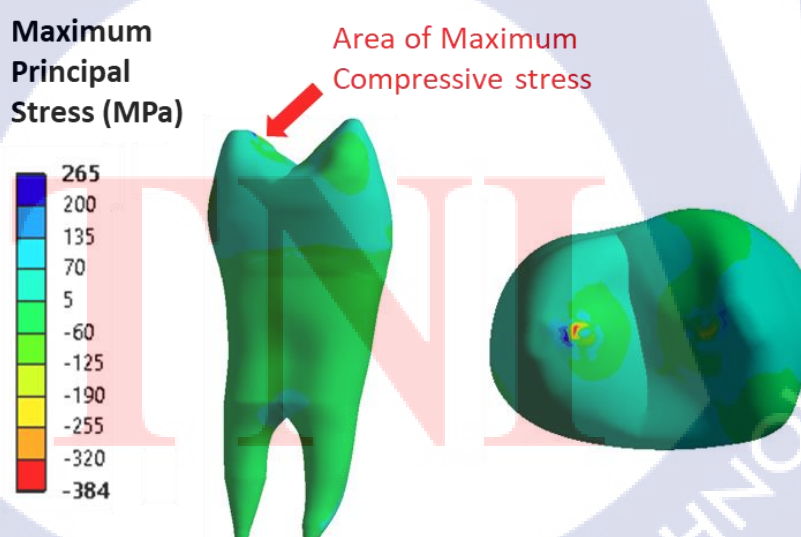
Layer No.			10-A	10-B	28-A	28-B	93	102	133-A	133-B	137-A	137-B
BCT Image (mm)	Enamel	BL	-	-	-	-	8.7	9.33	3.32	3.77	2.53	2.98
		MD	-	-	-	-	4.32	5.21	4.64	5.59	3.41	4.89
	Dentin	BL	0.9	1.2	2.04	2.16	8.7	8.45	1.5	1.62	-	0.82
		MD	0.96	1.09	2.22	2.18	4.32	4.86	2.21	2.78	-	1.5
	Pulp	BL	0.33	0.39	0.6	0.59	3.91	3.99	-	-	-	-
		MD	0.35	0.38	0.61	0.61	0.93	0.88	-	-	-	-
Model (mm)	Enamel	BL	-	-	-	-	8.61	9.36	3.27	3.77	2.53	2.92
		MD	-	-	-	-	4.39	5.15	4.62	5.63	3.4	4.87
	Dentin	BL	0.83	1.17	2.09	2.25	8.61	8.46	1.52	1.63	-	0.82
		MD	0.91	1.1	2.26	2.22	4.39	4.99	2.33	2.8	-	1.49
	Pulp	BL	0.36	0.36	0.61	0.61	3.7	4.06	-	-	-	-
		MD	0.36	0.36	0.62	0.6	0.99	0.9	-	-	-	-

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดขนาดของฟันแต่ละส่วนประกอบ (ต่อ)

Layer No.			10-A	10-B	28-A	28-B	93	102	133-A	133-B	137-A	137-B
Difference (mm)	Enamel	BL	-	-	-	-	-0.09	0.03	-0.05	0	0	-0.06
		MD	-	-	-	-	0.07	-0.06	-0.02	0.04	-0.01	-0.02
	Dentin	BL	-0.07	-0.03	0.05	0.09	-0.09	0.01	0.02	0.01	-	0
		MD	-0.05	0.01	0.04	0.04	0.07	0.13	0.12	0.02	-	-0.01
	Pulp	BL	0.03	-0.03	0.01	0.02	-0.21	0.07	-	-	-	-
		MD	0.01	-0.02	0.01	-0.01	0.06	0.02	-	-	-	-

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง

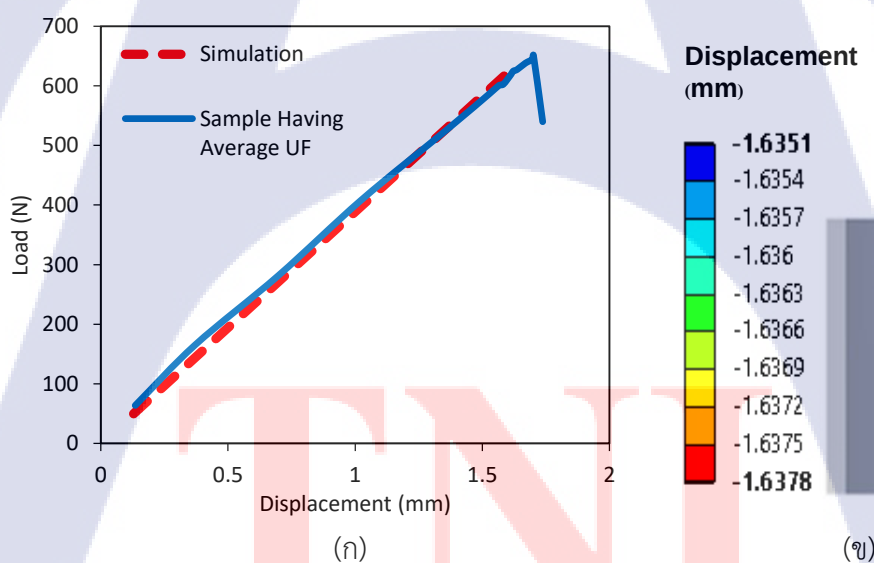
ในการจำลองการทดสอบกดและคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยค่อยๆ เพิ่มแรงกดลงบนแบบจำลองฟันที่พัฒนาขึ้นนี้จนถึงแรงที่จะทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหายคือ 637 นิวตัน จะทำให้เกิดความเค้นอัดหลักสูงสุดที่ 384.19 เมกะปาสคาล ซึ่งมากกว่าความต้านทานแรงกดสูงสุดของเคลือบฟันที่มีค่าเท่ากับ 384 เมกะปาสคาล ดังตารางที่ 3.1 และบริเวณที่เกิดความเค้นอัดหลักสูงสุดคือ ตำแหน่งที่หัวกดสัมผัสบริเวณเคลือบฟันฝั่งด้านลิ้น (Lingual side) และมีการกระจายของความเค้นอัดหลักที่ฝั่งด้านลิ้น (Lingual side) มากกว่าด้านกระพุ้งแก้ม (Buccal side) ดังรูปที่ 4.3 แต่ไม่พบการกระจายของความเค้นอัดหลักที่เกินความต้านทานแรงกดสูงสุดลงไปในส่วนของเนื้อฟัน



รูปที่ 4.3 ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM)

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบสถิติศาสตร์ที่แรงกดเท่ากับ 637 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหาย จะทำให้หัวกดเคลื่อนที่ลงเป็นระยะทางเท่ากับ 1.6351 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.4(ข) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปแบบของความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์ ดังรูปที่ 4.4(ก) พบว่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยของแรงลัพธ์จากการกดที่ระยะทางเท่ากันคือ $4.1 \pm 5.6 \%$ ถือว่าค่อนข้างน้อยและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ความแตกต่างของแรงที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหายเฉลี่ยคือ 2.2% และเกิดความเค้นอัดหลักขึ้นที่ฝั่งด้านลิ้น (Lingual side) สูงกว่า และมีการกระจายมากกว่าด้านกระพุ้มแก้ม (Buccal side) ดังนั้นค่าความเค้นอัดหลักฝั่งด้านลิ้นจะเพิ่มขึ้นไปถึงความเค้นอัดหลักสูงสุดที่เคลือบฟันจะแตกหักก่อนด้านกระพุ้มแก้ม (Buccal side) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเคลือบฟันฝั่งด้านลิ้น (Lingual side) จะเกิดการแตกหักก่อนอย่างแน่นอน แต่การที่ไม่พบการกระจายของความเค้นอัดหลักที่สูงกว่าความต้านทานแรงกดสูงสุดลงไปในส่วนของเนื้อฟัน แสดงว่าการแตกหักจะไม่เกิดขึ้นที่เนื้อฟัน เป็นไปตามผลการทดสอบที่ชิ้นส่วนที่แตกออกมาจากฟัน ตัวอย่างเป็นส่วนของเคลือบฟันบริเวณสูงกว่ารอยต่อระหว่างเคลือบฟันกับเคลือบราก ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

(ก) ระยะทางที่หัวกดเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งจากผลของแรงกด 637 นิวตัน

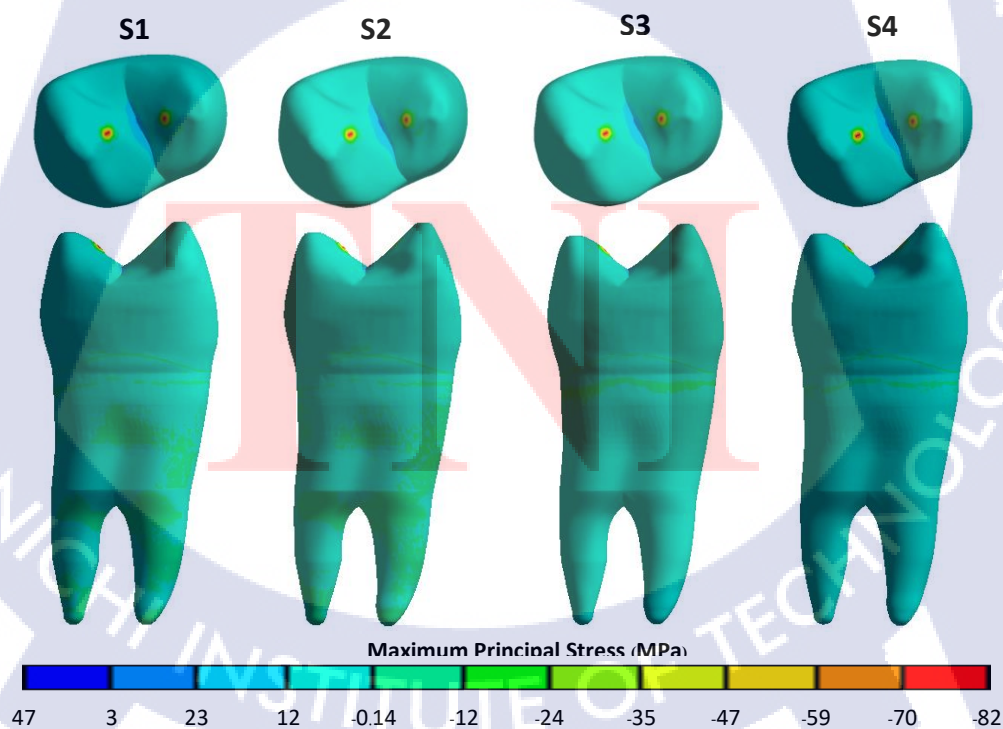
(ข) แผนภูมิความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์จากการวิเคราะห์กับการทดลอง

จากผลการตรวจสอบแบบจำลองทั้งหมดกับการทดลอง ทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลอง ความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์ แรงที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหาย และลักษณะการแตกหักเสียหายของฟัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการสร้างแบบจำลองที่มีหลายส่วนประกอบ

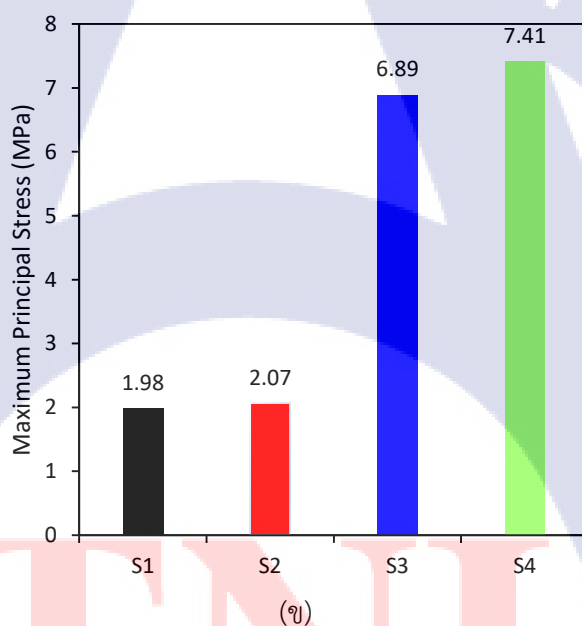
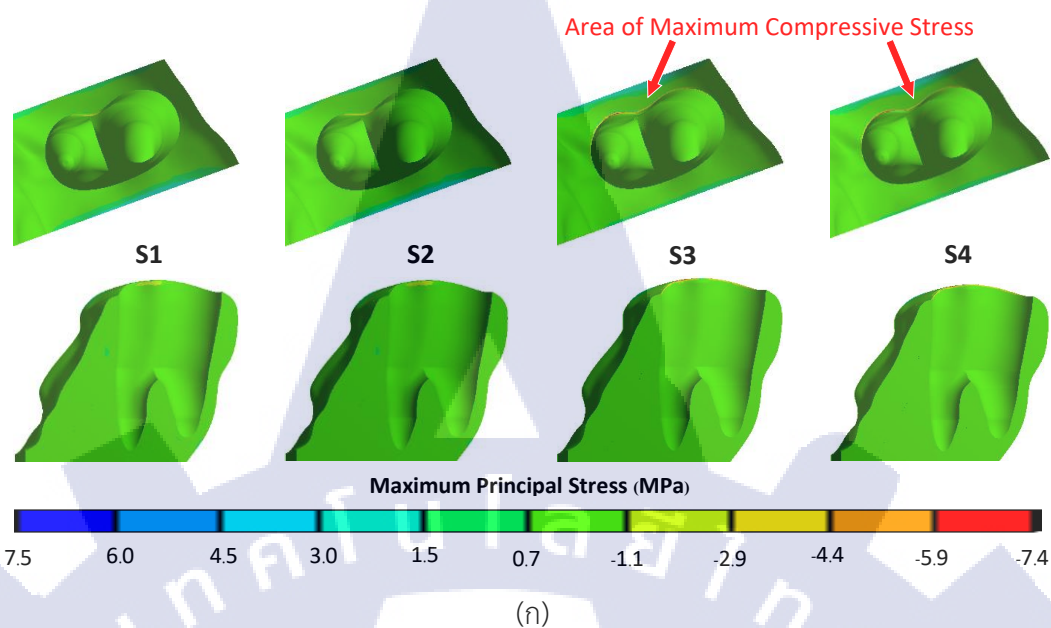
และมีขนาดตามจริงของฟันกรามน้อยจากภาพถ่าย CBCT ที่พัฒนาขึ้น มีความถูกต้องทั้งในด้านวิธีการสร้างแบบจำลองและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

4.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบดเคี้ยว

แรงบดเคี้ยวที่ตกลงบนยอดฟันทั้งสองด้าน ด้านละ 68.3 เมกะปาสคาล ทำให้เกิดความเค้นสูงสุดในแต่ละโครงสร้างดังรูปที่ 4.5 ทุกกรณีศึกษาเกิดความเค้นอัดสูงสุด 82 เมกะปาสคาล บริเวณพื้นที่รับแรงบดเคี้ยวโดยตรงบนเคลือบฟันด้านกระพุ้งแก้ม มากกว่าด้านเพดานปากเล็กน้อย และกระจายไปยังเนื้อฟันบริเวณยอดผิงกระพุ้งแก้มมากกว่าเช่นกัน ส่วนบริเวณรากฟัน ในกรณีแบบจำลองที่ประกอบด้วยทุกส่วนประกอบ (S1) และกรณีแบบจำลองที่เคลือบรากฟันหายไปและรวมเป็นส่วนเดียวกับเนื้อฟัน (S2) จะเกิดความเค้นอัดสูงที่บริเวณใกล้รอยต่อกับเคลือบฟันกระจายลงมายังปลายรากฟัน โดยมีเอ็นยึดปริทันต์ช่วยดูดซับไว้บางส่วน แล้วส่งต่อไปยังกระดูกเบ้าฟัน ทำให้กระดูกเบ้าฟันได้รับความเค้นอัดน้อยกว่าในกรณีแบบจำลองที่เอ็นยึดปริทันต์หักหายไปและถูกแทนที่ด้วยกระดูกเบ้าฟัน (S3) และกรณีแบบจำลองที่ทั้งเคลือบรากฟันและเอ็นยึดปริทันต์หายไป โดยแทนส่วนของเคลือบรากฟันด้วยเนื้อฟันและส่วนเอ็นยึดปริทันต์ด้วยกระดูกเบ้าฟัน (S4) ที่เกิดความเค้นอัดสูงที่บริเวณใกล้รอยต่อกับเคลือบฟันเท่านั้น เนื่องจากไม่มีเอ็นยึดปริทันต์มาช่วยดูดซับแรงไว้ แรงจึงถูกส่งต่อไปยังกระดูกเบ้าฟันโดยตรงและเกิดความเค้นอัดสูงที่ขอบกระดูกเบ้าฟันสูงกว่าสองกรณีแรกประมาณ 3-4 เท่า ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของแรงเชิงกลและความเค้นอัดสูงสุดบนผิวฟันในกรณีศึกษาต่างๆ



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของแรงเชิงกลและความเค้นอัดสูงสุดบนกระดูกเข้าฟันในกรณีศึกษาต่างๆ
(ก) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดสูงสุด(ข) ค่าความเค้นอัดสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1. สรุปผลการวิจัย

ข้อสรุปต่างจากการพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างฟันจากภาพถ่าย CBCT-scan (Cone beam computed tomography scan) ในรูปแบบสามมิติเสมือนจริง และศึกษาการกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวบนแบบจำลองนั้นถูกรวบรวมมาดังต่อไปนี้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างฟันจากภาพถ่าย CBCT-scan (Cone beam computed tomography scan) ในรูปแบบสามมิติเสมือนจริง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดแบบจำลองที่มีความคลื่อนของขนาดโดยเฉลี่ยในทิศทาง BL และ MD ของทุกส่วนประกอบมีค่าประมาณ 0.046 ± 0.048 มิลลิเมตร และ 0.040 ± 0.035 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งน้อยมากจนถือว่าขนาดเทียบเท่าขนาดจริง ความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงลัพธ์จากการกดที่ระยะกดเท่ากันมีความคลาดเคลื่อน 6.9 ± 3.0 % แรงกดที่ทำให้ฟันเกิดการแตกหักเสียหายซึ่งมีความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณด้วยแรงที่จะทำให้เกิดการแตกหักเพียง 2.6% และลักษณะการแตกหักเสียหายของฟันที่คล้ายกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสมจริงมากขึ้น และวิธีการสร้างแบบจำลองและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองมีความถูกต้อง

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวบนแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้อง ทำให้สามารถเข้าใจลักษณะการกระจายความเค้นทั้งทางกายภาพและพยาธิวิทยา ซึ่งจะช่วยในการศึกษาและทำนายพฤติกรรมทางชีวกลศาสตร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของส่วนประกอบต่างๆของฟันในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีที่เอ็นยึดปริทันต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ช่วยดูดซับแรงทำให้โครงสร้างอื่นๆสามารถต้านทานความเค้นได้มากขึ้นหายไป ทำให้ลักษณะการกระจายความเค้นเปลี่ยนแปลงไปและเกิดความเค้นเพิ่มขึ้นในหลายส่วนประกอบของฟัน เช่น เคลือบรากฟันและกระดูกเบ้าฟัน ขณะที่กรณีเคลือบรากฟันหายไปและรวมเป็นส่วนเดียวกับเนื้อฟัน ไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นมากนัก ดังนั้นการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จทั้งในการพัฒนาการสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีหลายส่วนประกอบและมีขนาดตามจริงของฟันกรามน้อยจากภาพถ่าย CBCT และศึกษาการกระจายตัวของแรงเชิงกลที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวบนแบบจำลอง พร้อมสำหรับนำไปพัฒนาเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางชีวกลศาสตร์ การออกแบบซ่อมแซม และเป็นแนวทางในการรักษาทางทันตกรรมต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] The Editors of Encyclopædia Britannica, “*Tooth ANATOMY*,” [Online].
Available: <https://www.britannica.com/science/tooth-anatomy>
[Accessed: April 2013]
- [2] J. C. Guimarães et al., “Stress amplifications indental non-carious cervical lesions,” *Journal of Biomechanics*, vol. 47, pp. 410-416, September 2014.
- [3] P. V. Soares et al., “Effect of root morphology on biomechanical behaviour of premolars associated with abfraction lesions and different loading types,” *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 41, pp. 108-114, October 2013.
- [4] S. Benazzi et al., “Dynamic Modelling of Tooth Deformation Using Occlusal Kinematics and Finite Element Analysis,” *PLOS ONE*, March 2016.
DOI:10.1371/journal.pone.0152663
- [5] JADA, “*Tooth eruption The permanent teeth*,” [Online].
Available: https://www.ada.org/~media/ADA/Publications/Files/patient_58.aspx
[Accessed: January 2006]
- [6] M. Hoffman, “*Picture of the teeth Human antomy*,” [Online].
Available: <https://www.webmd.com/oral-health/picture-of-the-teeth>
[Accessed: 2009]
- [7] J. Tietestä and T. J. Liiketoiminnasta, “*Röntgenkuvantaminen uudelle tasolle*,” [Online]. Available: <http://www.vtt.fi/Impulssi/Pages/Rontgen-kuvantaminen-uudelle-tasolle.aspx> [Accessed: May 2015]
- [8] Balaji Dental & Craniofacial Hospital, “*Facial asymmetry correction using Distraction osteogenesis*,” [Online].
Available: <http://blog.smbalaji.com/surgery-of-the-week/facial-asymmetry-correction-using-distraction-osteogenesis> [Accessed: 13 May 2016]

- [9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม* กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [10] ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ เสฏฐวรรธ สุจริตสวัสดิกุล, *การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโต๊ะช่วงแอนซิส* กรุงเทพฯ: บริษัท แคด-ไอที คอนซัลแทนส์ (เอเชีย) พีทีอี ลิมิเต็ด, 2560.
- [11] ANSYS, Inc., Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications ANSYS, Inc., Southpointe, 2012
- [12] S. Ruengdit et al., “Sex Determination from Teeth Size in Thais,” *The 6th CIFS Academic Day 2011*, Nonthaburi, 14-15 September 2011, pp. 1-12.
- [13] E. Özcan et al., “Root and canal morphology of maxillary first premolars in a Turkish population,” *Journal of Dental Sciences*, vol. 7, pp. 390-394, December 2012.
- [14] K. Dashrath et al., “Root Morphology and Tooth Length of Maxillary First Premolar in Nepalese Population,” *Dentistry*, vol. 5 no.8, pp. 1-3, August 2015.
- [15] I. S'tamfelja et al., “Cementum thickness in multirooted human molars: A histometric study by light microscopy,” *Annals of ANATOMY*, vol. 190, pp. 129-139, November 2016.
- [16] A. Nikolausa et al., “Importance of the variable periodontal ligament geometry for whole tooth mechanical function: A validated numerical study,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 67, pp. 61-73, October 2016.
- [17] B. Dejak et al., “A comparison of stresses in molar teeth restored with inlays and direct restorations, including polymerization shrinkage of composite resin and tooth loading during mastication,” *Dental Materials*, vol. 47, pp. 410-416, November 2013.
- [18] S. P. Ho et al., “The tooth attachment mechanism defined by structure, chemical composition and mechanical properties of collagen fibers in the periodontium,” *Biomaterials*, vol. 28, pp. 5238–5245, September 2007.
- [19] J. W. FARAH, et al., “Finite element analysis of three- and four-unit bridges,” *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 16, pp. 603-611, 1989.

- [20] M. Eisenburger et al., “Long-term results of telescopic crown retained dentures-- a retrospective study,” *Eur J Prosthodont Restor Dent.*, vol. 8 no.3, pp. 87-91, September 2000.
- [21] Tim Pepper and Ashland Chemical Company, “Polyester Resins,” *Constituent Materials*, vol. 8, pp. 90-96.
- [22] *Composite Materials Handbook*. SAE, (2012) vol2. SAE International
- [23] Khurukijwanich C, Aimmanee S, Kaikereati N and Polmook K (2013) Analysis and Design of Electricity Transmission Pole Composed of Glass-fiber Reinforced Composite. doi: 10.13140/RG.2.2.34633.65123.
- [24] Thai Pipe Industry Co., Ltd., “Physical and Mechanical Properties of ‘Thai Pipe’ uPVC & Fittings,” [Online]. Available <http://www.thaipipe.co.th/product-01-01-th.html>
- [25] Lenntech B.V., “*Stain Steel- Grade 304 (UNS S304400)*,” [Online]. Available: <https://www.lenntech.com/stainless-steel-304.htm> [Accessed: 9th Feb 2018]
- [26] Miura J et al., “Multiscale analysis of stress distribution in teeth under applied forces,” *Dental Materials*, vol.25, pp.67-73, January 2009.
- [27] A.M. O'Mahony et al., “Anisotropic elasticity of cortical and cancellous bone in the posterior mandible increases peri-implant stress and strain under oblique loading,” *Clinical Oral Implants Research*, vol. 12 no.6, pp. 648-657, December 2001.
- [28] Jill Peterson et al., “Material Properties of the Dentate Maxilla,” *The anatomical record. Part A, Discoveries in molecular, cellular, and evolutionary biology*, vol. 288A no. 9, pp. 962-972, September 2006.
- [29] S. Benazzi et al., “Comparison of occlusal loading conditions in a lower second premolar using three-dimensional finite element analysis,” *Clinical Oral Investigations*, vol. 18 no. 2, pp. 369–375, March 2014.
- [30] J. Borcic et al., “3-D Stress Analysis in First Maxillary Premolar,” *Collegium antropologicum*, vol. 31, pp. 1025–1029, January 2008.

- [31] Huang, Z. and Chen, Z. J. Huazhong, “Three-dimensional finite element modeling of a maxillary premolar tooth based on the micro-CT scanning: A detailed description,” *Journal of Huazhong University of Science and Technology [Medical Sciences]*, vol. 31, pp. 1025–1029, January 2008.
- [32] Eraslan, Ö. et al., “Conservative restoration of severely damaged endodontically treated premolar teeth: a FEM study,” *Clinical Oral Investigations*, vol. 15 no. 3, pp. 403–108, June 2011.

