

การวิเคราะห์ความเค้นของฟันที่มีการอุดหรือการครอบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นางสาวกัญยวันต์ ดวงวิไล



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Stress Analysis of a Tooth with Filling or Crown by Finite Element Method

Miss Kunyawon Thaugwilai



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

กันยวันต์ ดวงวิไล : การวิเคราะห์ความเค้นของฟันที่มีการอุดหรือการครอบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Stress Analysis of a Tooth with Filling or Crown by Finite Element Method) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, 113 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองโครงสร้างฟันดีและแบบจำลองฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดและการครอบฟัน โดยสร้างแบบจำลองมาจากการสแกนฟันด้วยวิธีภาพถ่ายคอมพิวเตอร์ (CT scan) แล้วนำไฟล์สแกนมาปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของแข็งก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์หาความเค้นของฟันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้ การศึกษาที่หนึ่งเป็นการศึกษาแบบจำลองเอ็นยึดปริทันต์ โดยศึกษาผลของการมีและไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ในแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าควรมีการรวมชั้นเอ็นยึดปริทันต์ไว้ในแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่แม่นยำขึ้น การศึกษาที่สองเป็นการศึกษาความเค้นในฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดของแบบจำลองของฟันกรามน้อยส่วนล่างของฟันแท้ ซึ่งเปรียบเทียบเทคนิคในการอุดที่ต่างกันและวัสดุที่ใช้อุดฟัน 2 ชนิดที่ต่างกันคือ อะมัลกัม (amalgam) และ มัลติคอร์ (multicore) พบว่าความเค้นในตัวฟันและในวัสดุอุดที่เป็นอะมัลกัมมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่น ๆ และแบบจำลองที่มีเดือยฟันมีความเค้นต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ๆ การศึกษาสุดท้ายเป็นแบบจำลองการครอบฟันของฟันกรามส่วนล่างของฟันน้ำนมที่มีการสร้างแกนฟันด้วยวัสดุต่างกัน จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (Glass ionomer cement: GIC) มีความเค้นสูงกว่าแบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นมัลติคอร์ การศึกษานี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาโดยการทดลองทางด้านทันตกรรม การเลือกรูปแบบและวัสดุในการบูรณะ และช่วยในการพัฒนาการบูรณะฟันโดยการอุดและการครอบฟันต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5670538821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MODELING / FINITE ELEMENT METHOD / ENDODONTICALLY-TREATED / RESTORATION / STRESS / PERMANENT LOWER MOLAR / PRIMARY LOWER MOLAR

KUNYAWAN THAUNGWILAI: Stress Analysis of a Tooth with Filling or Crown by Finite Element Method. ADVISOR: ASSOC. PROF. PAIROD SINGHATANADGID, Ph.D., 113 pp.

This thesis presents the modeling of a healthy tooth and a tooth that has been endodontically treated and restored with filling and crown. The 3D image of the tooth was obtained from CT scanning, and then was converted to the 3D finite element models. Subsequently the stress generated in the tooth modeling was analyzed using the finite element analysis. The study in this thesis is divided into three study parts. The first part is a study about the effect of modeling a tooth with and without periodontal ligament. The study found that the periodontal ligament should be included in the model in order to obtain a more accurate result. The second study is to study the effect of materials (amalgam and multicore) and methods of coronal restoration on stress in an endodontically-treated permanent lower molar tooth. It is found that stress in dentine and filling material in the tooth filled with amalgam is higher than other models. Also, stress in the model with post is lower stress than other models. The last study is the comparison of stress of primary lower molar model *restored with the multicore or glass ionomer cements (GIC)* and then covered with stainless steel crowns. The stress in the model with GIC core is higher stress than that with multicore core. Therefore, this thesis is a preliminary study for the dental experiment, choosing the method and material for tooth restoration and the development of endodontic treatment and restoration with filling and crown.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์ถนัดกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่เป็นผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวคิดและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในขั้นตอนการดำเนินการและการปรับปรุงแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามจุดประสงค์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทันตแพทย์ ดร.ธีรวัฒน์ โตศิริวัฒนพงศ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำทางด้านวิชาการเกี่ยวกับทันตกรรม

สุดท้ายขอขอบคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในเรื่องต่าง ๆ แก่ผู้วิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการทำงาน.....	2
1.4 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	5
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพิน.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบูรณะพิน.....	8
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	15
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	15
3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	22
3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาด้านของแข็ง.....	26
3.3 บทสรุป	31
บทที่ 4 การวิเคราะห์ปัญหาเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
4.1 การทดสอบโปรแกรม ANSYS.....	32
4.2 การศึกษาผิวสัมผัส	38

4.3 การเตรียมรูปฟัน.....	43
4.4 การศึกษาการลุ่เข้า.....	51
4.5 บทสรุป.....	54
บทที่ 5 การศึกษาแบบจำลองเอ็นอีตปริทันต์.....	55
5.1 บทนำ.....	55
5.2 แบบจำลองและสมบัติเชิงกลวัสดุ.....	55
5.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปในแบบจำลองเอ็นอีตปริทันต์.....	58
5.4 บทสรุป.....	63
บทที่ 6 ฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุด.....	64
6.1 บทนำ.....	64
6.2 แบบจำลองและสมบัติของวัสดุ.....	64
6.3 การวิเคราะห์แบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุด.....	70
6.4 บทสรุป.....	79
บทที่ 7 แบบจำลองการครอบฟัน.....	80
7.1 บทนำ.....	80
7.2 แบบจำลองและสมบัติของวัสดุ.....	80
7.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นในแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการครอบ.....	84
7.4 บทสรุป.....	90
บทที่ 8 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	91
8.1 สรุปผลการศึกษา.....	91
8.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยอนาคต.....	93
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	101

ภาคผนวก ก การเตรียมแบบจำลองพื้นที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุด ...	102
ภาคผนวก ข การเตรียมแบบจำลองการครอบฟัน.....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	113



สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันการสัมผัสและพฤติกรรม	43
ตารางที่ 5.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุในแบบจำลองพัน	57
ตารางที่ 6.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุจุดในแบบจำลองพัน	68
ตารางที่ 7.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุกรอบในแบบจำลองพัน	84



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพิน	6
รูปที่ 3.1 แผนภาพของวัสดุที่รับภาระในแนวแกน	16
รูปที่ 3.2 แผนภาพความเค้นเฉือน	17
รูปที่ 3.3 ระยะยืด ΔL ของแท่งวัตถุยาว L	18
รูปที่ 3.4 ความเค้น 2 มิติ	19
รูปที่ 3.5 เอลิเมนต์ความเค้นบนระนาบ	20
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	22
รูปที่ 3.7 การแบ่งรูปร่างเอลิเมนต์	24
รูปที่ 3.8 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าประกอบด้วยสี่จุดต่อ	24
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์รวมกับการเสียรูป	26
รูปที่ 3.10 ของแข็งที่ยืดหยุ่นที่มีแรงกระทำ	27
รูปที่ 3.11 พลังงานความเครียด	29
รูปที่ 4.1 ปัญหาคานที่มี 2 วัสดุประกอบกัน	33
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนรูปหน้าตัด	34
รูปที่ 4.3 ผลเฉลยแม่นยำตรงที่มีการกระจายความเค้น	35
รูปที่ 4.4 คานสามมิติ	36
รูปที่ 4.5 คานที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวน 14,400 เอลิเมนต์	36
รูปที่ 4.6 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของคาน	37
รูปที่ 4.7 ความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	37
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลเฉลยแม่นยำตรง	38
รูปที่ 4.9 การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง	39
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Bonded	40

รูปที่ 4.11 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ No Separation.....	40
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Frictionless.....	41
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Frictional.....	42
รูปที่ 4.14 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Rough.....	42
รูปที่ 4.15 ไฟล์สแกน (CT scan) ฟันกรามน้อยล่างและชั้นกระดูก	44
รูปที่ 4.16 การสร้างโพรงประสาทฟันของฟันกรามน้อยล่าง.....	44
รูปที่ 4.17 การแยกชั้นฟันของฟันกรามน้อยล่าง.....	45
รูปที่ 4.18 แบบจำลองโครงสร้างของตัวฟันกรามน้อยล่าง.....	45
รูปที่ 4.19 แบบจำลองเอ็นยึดปริทันต์ของฟันกรามน้อยล่าง.....	46
รูปที่ 4.20 แบบจำลองกระดูก.....	47
รูปที่ 4.21 แบบจำลองฟันที่มีโครงสร้างเหมือนฟันมนุษย์.....	47
รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย CT scan ของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม	48
รูปที่ 4.23 แบบจำลองตัวฟันของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม	49
รูปที่ 4.24 แบบจำลองโพรงประสาทฟันกรามล่างของฟันน้ำนม.....	49
รูปที่ 4.25 แบบจำลองโครงสร้างตัวฟันกรามล่างของฟันน้ำนม	50
รูปที่ 4.26 ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม	50
รูปที่ 4.27 แบบจำลองโครงสร้างฟัน	51
รูปที่ 4.28 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเอ็นยึดปริทันต์	52
รูปที่ 4.29 ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นฟัน	53
รูปที่ 4.30 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นกระดูก	53
รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองโครงสร้างฟัน	56
รูปที่ 5.2 แบบจำลองความหนาของเอ็นยึดปริทันต์	56
รูปที่ 5.3 ภาพตัดแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการแบ่งเอลิเมนต์	58
รูปที่ 5.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	58

รูปที่ 5.5 การกระจายความเค้นในแบบจำลอง	59
รูปที่ 5.6 เส้นตรงที่กำหนดตำแหน่ง	60
รูปที่ 5.7 แผนภาพความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลอง	62
รูปที่ 5.8 แผนภาพการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลอง.....	63
รูปที่ 6.1 แบบจำลองฟันดี.....	66
รูปที่ 6.2 แบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันของการอุดแบบต่าง ๆ	68
รูปที่ 6.3 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์.....	70
รูปที่ 6.4 ทิศทางของแรงกระทำกับฟันในรูปแบบต่าง ๆ.....	70
รูปที่ 6.5 ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง.....	72
รูปที่ 6.6 ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟัน.....	73
รูปที่ 6.7 เส้นระหว่างจุด 1 และ 2 ซึ่งจะวิเคราะห์หาคความเค้นอย่างละเอียด.....	73
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งในแบบจำลอง	75
รูปที่ 6.9 เส้นกำหนดตำแหน่งแนวตั้งด้านแก้ม	76
รูปที่ 6.10 เส้นกำหนดตำแหน่งแนวตั้งด้านลิ้น	76
รูปที่ 6.11 เส้นกำหนดตำแหน่งแนวนอนส่วนราก.....	77
รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งทางด้านแก้ม	78
รูปที่ 6.13 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งทางด้านลิ้น	78
รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งแนวนอนส่วนราก.....	79
รูปที่ 7.1 โครงสร้างแบบจำลองฟันดี	81
รูปที่ 7.2 การเรียงลำดับชั้นของแบบจำลองการครอบฟัน.....	82
รูปที่ 7.3 แรงกระทำ	84
รูปที่ 7.4 การกระจายความเค้นในแบบจำลอง	85
รูปที่ 7.5 ภาพตัดความเค้นในแบบจำลอง.....	86
รูปที่ 7.6 การกระจายความเค้นของเนื้อฟันและแกนฟัน.....	87

รูปที่ 7.7 การกระจายความเค้นในแกนพื้น	87
รูปที่ 7.8 การกระจายความเค้นในเนื้อพื้น	87
รูปที่ 7.9 มุมมองด้านบนของการกระจายความเค้นในเนื้อพื้น	88
รูปที่ 7.10 มุมมองด้านล่างของการกระจายความเค้นในเนื้อพื้น	88
รูปที่ 7.11 เส้นตรงกำหนดตำแหน่ง	89
รูปที่ 7.12 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งในแบบจำลองตรงง่ามพื้น	89
รูปที่ 7.13 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งในแบบจำลองบริเวณรากพื้น	90
รูปที่ ก-1 เส้นแนวการเปิดช่องว่าง	103
รูปที่ ก-2 แบบจำลองเนื้อพื้นที่มีช่องว่าง	104
รูปที่ ก-3 แบบจำลองการอุดแบบที่ 1	105
รูปที่ ก-4 แบบจำลองการอุดแบบที่ 2 และแบบที่ 3,	105
รูปที่ ก-5 แบบจำลองการอุดแบบที่ 4	106
รูปที่ ก-6 แบบจำลองการอุดแบบที่ 5	107
รูปที่ ข-1 แบบจำลองเนื้อพื้นที่ถูกตัด	109
รูปที่ ข-2 ชั้นแกนพื้นมัลติคอร์และชั้นซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล	110
รูปที่ ข-3 แบบจำลองที่ครอบพื้น	110
รูปที่ ข-4 ภาพตัดของแบบจำลองการครอบแบบที่ 1	111
รูปที่ ข-5 ชั้นแกนพื้นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และชั้นซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล	111
รูปที่ ข-6 ภาพตัดของแบบจำลองการครอบแบบที่ 2	112

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ฟันเป็นอวัยวะลำดับแรกในระบบย่อยอาหารของมนุษย์ โดยที่ทำหน้าที่บด ฉีก ย่อยอาหาร ก่อนส่งเข้าสู่อวัยวะย่อยอื่น ๆ ต่อไป นอกจากทำหน้าที่บดอาหารแล้ว ฟันยังช่วยส่งเสริมรูปหน้าให้มีบุคลิกภาพที่ดีและช่วยในเรื่องการออกเสียงของมนุษย์ เมื่อฟันเกิดความเสียหายจะสร้างความเจ็บปวดและส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวันของผู้ป่วย เช่น ผู้ป่วยที่เป็นโรคฟันผุจะรู้สึกเสียวฟัน เวลาที่รับประทานอาหารหรือของเย็น ในกรณีที่อาการรุนแรงผู้ป่วยจะรู้สึกปวดฟันตลอดเวลา ดังนั้นผู้ป่วยจึงต้องได้รับการรักษาโดยการบูรณะฟัน (dental restoration) ให้พร้อมกลับมาใช้งานได้โดยปกติ ในการบูรณะฟัน ทันตแพทย์จะวิเคราะห์ว่าฟันเสียหายเนื่องจากสาเหตุใด มีลักษณะการเสียหายอย่างไร จากนั้นจึงทำการบูรณะฟัน ซึ่งวิธีการบูรณะฟันมีหลายวิธีได้แก่ การอุดฟัน (filling) การครอบฟัน (crowns) การรักษาลงรากฟัน (endodontically treated) การถอนฟัน การฝังรากฟันเทียม และการใส่ฟันปลอม เป็นต้น ตัวอย่างของลักษณะความเสียหายของฟันและวิธีการรักษาสามารถแจกแจงได้ดังนี้ การรักษาฟันผุโดยทั่วไปทำโดยการอุดฟัน แต่ถ้าฟันซี่นั้นมีการผุมากจนถึงชั้นเนื้อฟัน (dentine) ทำให้เนื้อฟันเหลือน้อยหรือฟันได้รับความเสียหายมากจนไม่สามารถอุดฟันได้ก็จะบูรณะโดยวิธีการรักษาโดยการครอบฟัน เพื่อป้องกันการแตกของฟันต่อไป แต่ถ้าปล่อยฟันให้มีการผุลงมากจนถึงชั้นโพรงประสาทฟัน (pulp) จะทำการรักษาด้วยวิธีการรักษาลงรากฟัน โดยฟันที่ได้รับการรักษาลงรากฟันแล้วเหลือเนื้อฟันมากพอก็ทำการอุดฟัน แต่ถ้าเนื้อฟันเหลือน้อยก็ทำการครอบฟัน ในกรณีที่ฟันผุมากจนไม่สามารถทำการบูรณะได้จะรักษาโดยการถอนฟันแล้วทดแทนด้วยฟันปลอม

การรักษาฟันด้วยวิธีต่าง ๆ จะต้องมีความปลอดภัย มีประสิทธิภาพ ได้ฟันที่บูรณะแล้วที่มีอายุการใช้งานยาวนาน วิธีการรักษาแบบต่าง ๆ จะต้องผ่านการศึกษา ทดลอง และสอบทวนจนกว่าจะแน่ใจว่าวิธีการรักษานั้น ๆ มีประสิทธิภาพ รักษาได้รวดเร็วขึ้น และสามารถปฏิบัติทางคลินิกได้ ในอดีตการศึกษาวิจัยวิธีการรักษาต่าง ๆ อาจทดลองในสัตว์ ทดลองในมนุษย์และทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ปัจจุบันความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ได้เข้ามามีบทบาทในการศึกษาและวิเคราะห์วิธีการรักษาเหล่านี้มากขึ้น ทำให้มีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) วิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในฟัน ความเครียดภายในตัวฟัน และการเสียรูปของฟันในกรณีต่าง ๆ เช่น ฟันที่มีการอุด ฟันที่มีการครอบ รากฟันเทียม หรือแม้แต่ความเสียหายของกระดูกขากรรไกร ฯลฯ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านทันตกรรมต่อไป จากวิธีศึกษาวิจัยทางทันตกรรมที่มีมาพบว่า การทดลองใน

สัตว์ การทดลองในมนุษย์ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างอย่างน้อย 5 ปี และยังมีข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น สัตว์และมนุษย์มีโครงสร้างฟันที่ไม่เหมือนกัน มีพฤติกรรมการเคี้ยวที่ไม่เหมือนกัน อีกทั้งยังมีประเด็นเรื่องจริยธรรมในการศึกษาในสัตว์หรือในมนุษย์ ส่วนการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าใช้จ่ายที่สูงในการสร้างเครื่องทดสอบ มีความยากลำบากในการจำลองการเคี้ยวให้เหมือนสภาพจริงที่เกิดขึ้นในผู้ป่วย และรวมทั้งเสียเวลาในการทดสอบอีกด้วย

เหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงมีการนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางวิศวกรรมมาใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในฟัน เนื่องจากวิธีการนี้ช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายในการศึกษาและใช้เวลาในการศึกษาไม่มาก ถึงแม้จะได้คำตอบที่ไม่แม่นยำเนื่องจากไม่สามารถกำหนดตัวแปรและเงื่อนไขต่าง ๆ ให้เหมือนกับที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างแม่นยำ แต่สามารถศึกษาได้ว่าคำตอบที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางใด เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้นได้แล้ว จะเป็นประโยชน์ต่อทันตแพทย์ในด้านต่าง ๆ ดังนั้นการศึกษาโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขช่วยให้ทันตแพทย์สามารถเลือกรูปแบบในการรักษา เลือกใช้วัสดุบูรณะ ศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดความเสียหายและพัฒนาวิธีการรักษาได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังช่วยเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาโดยการทดลองต่อไป วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขคือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของแบบจำลองโครงสร้างฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดและการรักษาแบบครอบฟัน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยปัญหาอื่น ๆ ที่ซับซ้อนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างของฟันของฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้ (permanent lower molar) และฟันกรามล่างของฟันน้ำนม (primary lower molar) สำหรับวิเคราะห์หาความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของฟัน
2. เพื่อวิเคราะห์หาความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดและแบบครอบฟัน โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตการทำงาน

วิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตในการวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของแบบจำลองโครงสร้างฟันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะศึกษาการมีเอ็นยึดปริทันต์ในแบบจำลอง การศึกษา

แบบจำลองโครงสร้างฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดและแบบจำลองการครอบฟัน การศึกษานี้จะไม่รวมแบบจำลองโครงสร้างฟันที่เป็นรากฟันเทียมหรือเป็นแบบสะพานฟัน แบบจำลองโครงสร้างฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดจะมีเทคนิคในการอุดต่างกันและใช้วัสดุอุดฟัน 2 ชนิดคือ อะมัลกัม (amalgam) และมัลติคอร์ (multicore) ซึ่งศึกษาในแบบจำลองฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้ ส่วนแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการครอบฟันจะมีแกนฟันด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ ก่อนจะบูรณะด้วยการครอบฟันด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งศึกษาในแบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนม จากแบบจำลองโครงสร้างฟันทั้งหมดจะทำการเปรียบเทียบความเค้นและการเสียรูปด้วยวิธีการอุดแบบต่าง ๆ ในฟัน 1 ซี่ และเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุที่ใช้ในการอุดและการก่อแกนฟันแบบต่าง ๆ

1.4 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 8 บทและภาคผนวก 2 บท มีการลำดับเนื้อหาและรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตปัญหาของวิทยานิพนธ์และรวมถึงเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฟันและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อของวิทยานิพนธ์ เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือการรักษาคลองรากฟัน การบูรณะด้วยการอุดฟันและการบูรณะด้วยการครอบฟัน

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน เป็นการแสดงนิยามความเค้นและความเครียด และทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมไปถึงทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาการหาความเค้น ความเครียดและการเสียรูปของของแข็ง ซึ่งจะประกอบด้วยสมการอนุพันธ์และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ปัญหาเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีการทดสอบและสอบทานในการใช้โปรแกรมว่าให้ผลเฉลยตรงตามทฤษฎีหรือไม่ รวมถึงมีการอธิบายถึงการสัมผัส (contact) ของแบบจำลองแบบต่าง ๆ ที่สามารถเลือกใช้ได้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบของการสัมผัสระหว่างส่วนต่าง ๆ ของฟันนี้จะช่วยให้การจำลองพฤติกรรมเชิงกลของส่วนต่าง ๆ ของฟัน รวมทั้งวัสดุที่ใช้อุดฟันหรือครอบฟันมีความสมจริงมากขึ้น ส่วนต่อมากกล่าวถึงการเตรียมรูปแบบจำลองของฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้และฟันกรามล่างของฟันน้ำนม และส่วนสุดท้ายของบทนี้เป็นการศึกษาการลู่

เข้าของคำตอบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มากพอที่จะให้ผลเฉลยคู่เข้าสู่คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่

บทที่ 5 การศึกษาเอ็นยิตปริทัศน์ เนื่องจากชั้นเอ็นยิตปริทัศน์เป็นชั้นที่บางมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างชั้นอื่น จึงมีแนวคิดที่ชั้นเอ็นยิตปริทัศน์มีอิทธิพลต่อแบบจำลองโครงสร้างฟันมากน้อยเพียงใดในแบบจำลองโครงสร้างฟันของวิทยานิพนธ์ เนื้อหาในบทนี้จึงศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของแบบจำลองที่มีและไม่มีเอ็นยิตปริทัศน์

บทที่ 6 เป็นการศึกษาฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดฟันด้วยวัสดุและรูปแบบในการอุดต่างกัน โดยศึกษาในแบบจำลองฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้ เพื่อเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองโครงสร้างฟันแบบต่าง ๆ

บทที่ 7 เป็นการศึกษาการครอบฟันที่มีแกนฟันแบบต่างวัสดุกัน ในแบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนม เพื่อเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการครอบฟัน

บทที่ 8 เป็นการนำเสนอข้อสรุปของวิทยานิพนธ์ และขอแนะนำแนวทางสำหรับงานวิจัยที่จะนำไปใช้ในอนาคต

ส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์เป็นส่วนของภาคผนวก ที่กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองโครงสร้างฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดและแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการครอบ

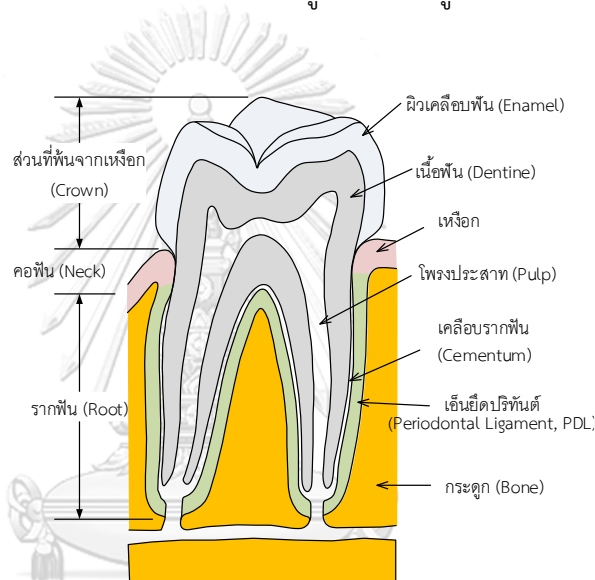
บทที่ 2 ปรัชญาวรรณกรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองของโครงสร้างฟัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของฟันในกรณีต่าง ๆ โดยใช้วิธีคิดทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในฟันหลังจากที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดหรือการครอบ เป็นต้น ดังนั้นเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของฟัน งานวิจัยที่เกี่ยวกับแบบจำลองของฟันและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ฟันที่มีรักษาคลองรากฟัน การอุดฟันและการครอบฟันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านทันตกรรม

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฟัน

ช่องปากของมนุษย์ [1] ประกอบด้วยฟัน ลิ้น เหงือก ต่อมน้ำลาย เป็นต้น โดยที่ฟันของมนุษย์แบ่งได้เป็นสองชุดคือฟันน้ำนม (deciduous teeth) และฟันแท้ (permanent teeth) ฟันน้ำนมมีฟันอยู่ทั้งหมด 20 ซี่ แบ่งเป็นฟันบน 10 ซี่ และฟันล่าง 10 ซี่ ซึ่งประกอบไปด้วยฟันตัด (incisor) ฟันเขี้ยว (canine) และฟันกราม (molar) ฟันน้ำนมจะเริ่มขึ้นในช่องปากเมื่อมีอายุ 6 เดือนและจะขึ้นครบเมื่ออายุประมาณ 2 ปีครึ่ง ส่วนฟันแท้มีทั้งหมด 32 ซี่ แบ่งเป็นฟันบน 16 ซี่ ฟันล่าง 16 ซี่ ซึ่งประกอบไปด้วยฟันตัด ฟันเขี้ยว ฟันกรามน้อย (premolar) และฟันกราม โดยฟันแท้เริ่มเมื่ออายุ 6 ปีขึ้นไป รูปร่างฟันในแต่ละส่วนทำหน้าที่แตกต่างกันออกไปดังนี้ ฟันตัดเป็นฟันที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายสิ่วหรือจอบทำหน้าที่กัดหรือตัดอาหาร ฟันเขี้ยวมีลักษณะแหลมเหมือนหัวลูกศรทำหน้าที่ฉีกอาหาร ฟันกรามน้อยและฟันกรามมีพื้นผิวของฟันทั้งส่วนที่เป็นแบบแหลมและส่วนที่เป็นแบบมนเพื่อใช้ในการบดอาหาร ถึงแม้ว่าฟันจะมีรูปร่างและหน้าที่ที่แตกต่างกันไปแต่มีส่วนประกอบของโครงสร้างที่เหมือนกันคือส่วนที่ฟันจากเหงือก (crown) สามารถมองเห็นได้จากทางช่องปากทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหารและส่วนที่สองคือส่วนราก (root) เป็นส่วนที่อยู่ติดกับขากรรไกรทำหน้าที่ยึดฟันให้อยู่กับที่และตั้งตรง โดยทั้งสองส่วนมีรอยต่อเชื่อมกันด้วยคอฟัน (neck) ที่ห่อหุ้มด้วยเหงือก ดังรูป 2.1 ในฟันหนึ่งซี่จะมีโครงสร้างแต่ละชั้นดังต่อไปนี้ ชั้นแรกคือผิวเคลือบฟัน (enamel) เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของชั้นฟันที่ยื่นออกมาจากเหงือก เป็นส่วนที่แข็งแรงที่สุดสำหรับรองรับแรงจากการบดเคี้ยว ผิวเคลือบฟันทำหน้าที่ปกป้องเนื้อฟันและโพรงประสาทรวมถึงช่วยให้ฟันมีรูปร่างคงรูป ถัดจากชั้นเคลือบฟันคือชั้นเนื้อฟัน (dentin) เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของฟัน ในส่วนนี้มีเซลล์อยู่จำนวนมากสามารถสร้างเนื้อ

ฟันให้กลับคืนสภาพเดิมได้เมื่อถูกทำลาย และส่วนที่อยู่ตรงกลางฟันคือโพรงประสาทฟัน (pulp) เป็นที่อยู่ของหลอดเลือดที่หล่อเลี้ยงเนื้อฟันและเส้นประสาทที่ทำหน้าที่ตอบสนองความรู้สึกของฟัน ในชั้นของตัวฟันจะมีชั้นนอกสุดของส่วนรากฟันคือชั้นเอ็นยึดปริทันต์ (periodontal ligament) เรียกโดยย่อว่า PDL เป็นชั้นที่ประกอบด้วยเส้นเอ็นจำนวนมากที่ทำหน้าที่ช่วยยึดและพยุงตัวฟันให้ติดอยู่กับกระดูก (bone) ของขากรรไกร ในส่วนของกระดูกสามารถจำแนกออกได้เป็นสองชั้นคือ กระดูกเนื้อแน่น (cortical bone) เกิดจากการเรียงตัวที่อัดแน่นของชั้นกระดูกและอยู่ชั้นนอกสุด เพื่อป้องกันและค้ำจุนอวัยวะต่าง ๆ และชั้นที่สองคือ กระดูกฟองน้ำ (spongy bone) มีลักษณะรูพรุนคล้ายฟองน้ำ อยู่ในชั้นกระดูกเนื้อแน่น ทำหน้าที่เป็นแหล่งที่อยู่ของไขกระดูก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของฟัน

การเสียหายของฟันอาจเกิดจากการกระแทกจนแตกร้าวหรือเกิดจากการผุของฟัน (carious lesion) ฟันผุเป็นโรคในช่องปากที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตแล้วเปลี่ยนให้เป็นกรด โดยกรดนี้จะไปทำลายแร่ธาตุของฟัน เมื่อฟันสูญเสียแร่ธาตุมากขึ้นเป็นผลทำให้เกิดโพรงลึกลงไป ซึ่งจะเกิดในชั้นเคลือบฟันเป็นอันดับแรก เมื่อไม่มีการรักษาความเสียหายดังกล่าวจะลุกลามไปในชั้นเนื้อฟัน ในระยะนี้ผู้ป่วยจะมีอาการเสียวฟัน ถ้าการลุกลามจนถึงโพรงประสาทซึ่งเป็นส่วนที่มีเส้นประสาทอยู่ ถ้าเส้นประสาทเกิดความเสียหายจะส่งผลให้เกิดอาการปวดฟันอย่างรุนแรงและตลอดเวลา ทำให้ไม่สามารถรับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มได้อย่างสะดวก จำเป็นต้องมีการบูรณะเพื่อให้ฟันสามารถกลับมาทำหน้าที่ได้ดังเดิม และผู้ป่วยสามารถใช้ชีวิตประจำวันได้เป็นปกติ ไม่มีการเจ็บปวดฟัน และไม่มีฟันผุที่ลุกลามไปยังฟันซี่อื่น ๆ

การรักษาฟันมีหลายวิธียกตัวอย่างเช่นการอุดฟัน การรักษาคอลงรากฟัน การครอบฟัน การถอนฟัน การจัดฟัน ฯลฯ ในการรักษาเบื้องต้นเป็นการรักษาแบบอุดฟัน ซึ่งการอุดฟันเป็นวิธีบูรณะฟันวิธีหนึ่งที่เป็นการซ่อมแซมหรือเพิ่มเติมในส่วนที่เป็นช่องว่าง การอุดฟันมีขั้นตอนดังนี้ กำจัดส่วนที่ผุออก โดยการกรอฟันส่วนที่ผุออกไปให้หมดแล้วทำความสะอาด จากนั้นเติมวัสดุอุดฟันลงไปเพื่อให้โครงสร้างฟันกลับมาให้อยู่ในสภาวะเดิมและทำหน้าที่ต่อไป วัสดุที่ใช้ในการอุดฟันได้แก่ ทอง อะมัลกัม คอมโพสิตเรซิน กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (glass ionomer cement) เป็นต้น วัสดุที่ใช้แต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น ถ้าต้องการให้มีความสวยงามเหมือนธรรมชาติก็จะใช้วัสดุที่เป็นคอมโพสิตเรซิน แต่ถ้าต้องการรับภาระของแรงจากการเคี้ยวและไม่ต้องการความสวยงามก็จะใช้วัสดุที่เป็นทองหรืออะมัลกัมแทน การเลือกใช้วัสดุในการอุดฟันจะขึ้นอยู่กับลักษณะของฟันที่จะอุด ราคา และการแพ้วัสดุบางชนิดของคนไข้ สำหรับคนไข้ที่ไม่สามารถรักษาแบบอุดฟันได้ เนื่องจากการผุลุกลามไปจนถึงชั้นเนื้อฟันหรือมีการรักษาโดยการอุดแล้วมีความเสียหาย เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการอุดเกิดการแตกหรือหลุดออกมา ทำให้ใช้งานไม่ได้หรืออาจเป็นเพราะฟันได้รับความเสียหายมากจากการกระแทก จะใช้วิธีการรักษาแบบการครอบฟัน ซึ่งการครอบฟันเป็นการกรอฟันให้ฟันทั้งซี่มีขนาดเล็กลงทุกด้าน โดยฟันที่กรอต้องกรอให้มีรูปร่างคล้ายเดิม จากนั้นทำการพิมพ์ฟันซี่ที่กรอแล้วนำไปสร้างแบบหล่อ เพื่อขึ้นรูปส่วนที่ถูกรอออกไป แล้วนำมาครอบฟันที่ถูกรอเตรียมไว้ ทำให้ได้ครอบฟันออกมาตรงตามรูปร่างกับฟันที่กรอไว้ วัสดุที่ใช้ในการครอบฟันเช่น โลหะที่มีทองผสม โลหะล้วน เซรามิกผสมโลหะ พอร์ซเลน พลาสติก ฯลฯ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าการผุลุกลามไปถึงชั้นโพรงประสาทจะต้องทำการรักษาโดยวิธีการรักษาคอลงรากฟันแล้วทำการบูรณะด้วยการอุดฟันหรือการครอบฟันตามลักษณะของเนื้อฟันที่เหลืออยู่ นั่นคือถ้าเนื้อฟันเหลือน้อยมากพอก็จะทำการบูรณะด้วยการอุด แต่ถ้าเนื้อฟันเหลือน้อยมากจนไม่สามารถบูรณะด้วยวิธีการอุดได้ก็จะทำการครอบฟันต่อไป ถ้าฟันที่เกิดความเสียหายไม่สามารถใช้วิธีการรักษารากฟันได้เพราะส่วนของเนื้อฟันกับโพรงประสาทฟันได้รับความเสียหายอย่างมากหรือไม่คุ้มค่ากับการรักษาก็จะใช้วิธีการถอนฟันแล้วทดแทนด้วยฟันปลอม การรักษาตัวอย่างที่กล่าวมานั้นต้องอาศัยการศึกษาวิจัยหลายขั้นตอนเพื่อพัฒนาเครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ทางด้านทันตกรรม เพื่อความสะดวกและเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา ยกตัวอย่างเช่น การใช้วิธีการออกแบบและการผลิตโดยใช้คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยี (CAD/CAM) ในการจำลองภาพเป็น 3 มิติ ใช้ตกแต่งขนาดและรูปร่างของวัสดุบูรณะทางด้านทันตกรรมต่าง ๆ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบูรณะฟัน

ในปัจจุบันมีการวิเคราะห์ปัญหาของฟันโดยการใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาช่วยแก้ปัญหามากขึ้น เพื่อนำไปเลือกรูปแบบในการรักษา เลือกวัสดุบูรณะ รวมถึงการนำไปพัฒนาวิธีการรักษา วัสดุและอุปกรณ์ทางด้านทันตกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาให้มากยิ่งขึ้นและใช้เวลาในการรักษาน้อยลง จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ตั้งแต่การผลิตอุปกรณ์เครื่องมือ วัสดุทันตกรรมรวมถึงรูปแบบการรักษา โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาโดยระเบียบวิธีดังกล่าวมักใช้ในการหาความเค้น ความเครียดและการเสียรูปที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหานี้จะนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านทันตกรรมต่อไปได้ การศึกษาผลงานเกี่ยวกับการแก้ปัญหาทางด้านทันตกรรมโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกได้เป็นส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นงานวิจัยที่มีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาแก้ปัญหาทางทันตกรรมในกรณีต่าง ๆ ส่วนที่สองจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาของการรักษาคลองรากฟันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่สามเป็นการกล่าวถึงการแก้ปัญหาของฟันที่มีการอุดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และในที่สุดท้ายเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปัญหาของการครอบฟันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาทางทันตกรรมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงภาพรวมของการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แก้ปัญหาทางทันตกรรมในกรณีต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางทันตกรรมได้ การศึกษาในกลุ่มนี้จะเริ่มจากการจำลองรูปฟัน 3 มิติ แล้วทำการวิเคราะห์ปัญหาในกรณีต่างๆ เพื่อหาค่าความเค้น ความเครียดและการเสียรูปของแบบจำลองรูปฟัน เช่นการศึกษาแรงกระจายความเค้นของฟันโดย Neves AA. [2] การศึกษานี้เป็นการเปรียบเทียบความเค้นระหว่างฟันที่มีสุขภาพดีกับฟันที่มีการผุ แสดงให้เห็นว่าการกระจายความเค้น (stress distribution) ของฟันที่ผุ การกระจายสูงกว่าฟันที่มีสุขภาพดี โดยความเค้นจะกระจายจากชั้นเคลือบฟันลงไปถึงชั้นเนื้อฟัน หรือการศึกษาแบบจำลองจากข้อมูลที่ได้สแกนมา (micro-CT data) [3] เพื่อเปรียบเทียบความเค้นที่มีการบูรณะด้วยวิธีการอุดที่ต่างกันและการศึกษาวิธีการอุดวิธีเดียวกันแต่ขนาดของการอุดไม่เท่ากัน [4] เพื่อเป็นแนวทางในการรักษาเนื้อฟันให้ได้มากที่สุด รวมถึงการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการรักษาคลองรากฟันของฟันเขี้ยว [5] และของฟันกราม [6] จะทำให้ค่าความเค้นจะเปลี่ยนแปลงไป ความเค้นมากที่สุดจะเกิดขึ้นบริเวณคอฟัน และการศึกษาของ Manila และคณะ [7] แสดงให้เห็นว่า

เมื่อฟันที่ได้รับการรักษาลงรากฟันแล้วเกิดการสูญเสียกระดูกบริเวณรากฟันส่งผลให้เกิดความเค้นสูงมากบริเวณรากฟัน จากตัวอย่างการศึกษาที่กล่าวมาเป็นการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว ในการศึกษาอื่นมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์หาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระดูกเมื่อมีแรงกระทำ [8] เพื่อเป็นการเลือกรูปแบบวิธีการรักษารากฟัน ในกรณีที่ยุ่ระยะฟันไม่ได้ เนื่องจากฟันมีความเสียหายมากและทำการรักษาแบบการถอนฟันและใส่ฟันปลอมทดแทน การใส่ฟันปลอมแบบฝังแน่นจะต้องทำฝังรากฟันเทียม โดยมีเดือยเป็นตัวยึดแกนรากฟันเทียมให้ติดกับกระดูกขากรรไกร ทำให้มีการศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวระหว่างเดือยฟันกับกระดูกขากรรไกรโดย Bahrami B. and Shahrbaaf S. [9] และการใส่เดือยฟันลงในกระดูกด้วยวิธีแตกต่างกันที่ถูกกระทำด้วยแรงที่มีมุมมองไม่เท่ากัน [10] การศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางเลือกของการบูรณะฟันแบบใส่รากฟันเทียม จากที่กล่าวมาเป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์ในส่วนตัวฟันและรากฟัน แต่ในโครงสร้างฟันจะมีส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ ยกตัวอย่างเช่น เอ็นยึดปริทันต์ (PDL) ทำหน้าที่ช่วยยึดและพยุงตัวฟันให้ติดอยู่กับกระดูกขากรรไกร ถ้าเกิดความเสียหายจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคปริทันต์ ซึ่งโรคปริทันต์เป็นโรคชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่อยู่รอบตัวฟัน ถ้ามีอาการรุนแรงจะทำให้มีอาการอักเสบที่อวัยวะรอบตัวฟันเกิดอาการบวม ฟันโยกจนสูญเสียฟันในที่สุด ทำให้มีการศึกษาความเสียหายเอ็นยึดปริทันต์ขึ้น โดยวิเคราะห์หาค่าการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อรับแรงกดที่มุมต่าง ๆ [11] และการรับแรงที่มีขนาดไม่เท่ากัน [12] ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปเลือกรูปแบบการรักษาและแนวทางในป้องกันไม่ให้เกิดโรคปริทันต์ อีกทั้งยังมีการศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นของฟันกรามน้อยที่มีการรักษาโรคเนื้อเยื่อและโรคปริทันต์ [13] การศึกษาดังกล่าวเป็นการแสดงให้เห็นว่าการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหายของฟันในกรณีต่าง ไม่ว่าจะเป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในฟันหรือการวิเคราะห์ความเค้น ความเครียดและการเสียรูปของฟันเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบูรณะฟันด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อไป

2.2.2 การศึกษาการรักษาคลองรากฟัน

ความเสียหายของฟันเกิดได้จากหลายสาเหตุ ยกตัวอย่างเช่น ฟันผุ ฟันที่เกิดการหักหรือแตก รวมถึงฟันตาย เป็นต้น ความเสียหายของฟันเหล่านี้ส่งผลให้ต้องมีการบูรณะฟันให้กลับมาใช้งานได้ อย่างเป็นปกติ มีประสิทธิภาพในการใช้งานและมีความสวยงาม วิธีการบูรณะฟันประกอบไปด้วยการอุดฟัน การครอบฟัน การรักษาคลองรากฟัน การถอดฟัน การฝังรากฟันเทียม และการใส่ฟันปลอม เป็น

ต้น โดยจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะความเสียหายของฟัน เช่น ถ้าผู้ชั้นเคลือบฟันจะบูรณะด้วยวิธีการอุดฟัน แต่ถ้าการผุนั้นมีการลุกลามจนถึงชั้นโพรงประสาทฟันก็จะทำการรักษาด้วยวิธีการรักษาคลองรากฟัน วิธีนี้เป็นวิธีการตัดส่วนที่ถูกทำลาย ส่วนที่มีการอักเสบและส่วนที่ตายออกจากโพรงประสาท จากนั้นทำความสะอาดโพรงประสาทแล้วอุดปิดคลองรากฟัน สุดท้ายจึงทำการบูรณะฟันด้วยวิธีต่าง ๆ ตามปริมาณเนื้อฟันที่เหลืออยู่ โดยถ้าฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วเหลือปริมาณเนื้อฟันมากพอก็ทำการอุดฟัน แต่ถ้าเนื้อฟันเหลือน้อยก็ทำการครอบฟันเพื่อป้องกันการแตกของฟันต่อไป แต่ถ้าฟันนั้นได้รับความเสียหายอย่างมากจนไม่สามารถรักษาได้ก็จะรักษาโดยการถอนฟันแล้วใส่ฟันปลอมมาทดแทนหรือการฝังรากฟันเทียม เป็นต้น

การประเมินสภาพฟันก่อนที่จะทำการรักษาคลองรากฟันว่าฟันนั้นสามารถบูรณะฟันได้หรือไม่ เพื่อประสบความสำเร็จในการรักษา โดยคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ในการรักษาที่มีผลต่อการเลือกวัสดุและรูปแบบในการรักษา ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณเนื้อฟันที่เหลือ รูปร่างและตำแหน่งของฟัน และความสวยงามในการรักษา เป็นต้น ในการรักษาเนื้อฟันให้เหลือปริมาณมากที่สุดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรง จากการศึกษาของ Reeh และ คณะ [14] แสดงให้เห็นว่าการกรอเปิดช่องทางเข้าสู่โพรงประสาทฟัน เพื่อรักษาคลองรากฟันมีผลให้ความแข็งแรงของฟันลดลงเพียง 5% ในขณะที่การกรอแต่งโพรงประสาทฟันด้านข้างส่วนล่างของด้านบดเคี้ยว (MOD) มีผลทำให้ฟันมีความแข็งแรงลดลง 63% เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mahmoud และคณะ [15] พบว่าการการเก็บเนื้อฟันในการรักษาคลองรากฟันร่วมกับเดือยฟันทำให้ความเค้นลดลง แสดงให้เห็นว่าสาเหตุของความแข็งแรงของฟันที่รักษาคลองรากฟันลดลงมาจากการสูญเสียเนื้อฟัน ส่วนรูปร่างและตำแหน่งของฟันที่ได้รับความเสียหายของฟันหน้าและฟันหลัง ทำให้รูปแบบในการรักษาแตกต่างกัน รวมถึงความสวยงามก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากฟันที่เนื้อเยื่อในตายหรือเส้นเลือดในโพรงประสาทฟันฉีกขาดส่งผลให้ฟันเกิดการเปลี่ยนสี ในการรักษาคลองรากฟันของฟันหน้าจะบูรณะด้วยแกนฟันคอมโพสิต (composite core) หรือครอบฟันด้วยเซรามิกล้วน ร่วมกับเดือยฟันชนิดที่มีสีเหมือนฟัน จากนั้นฟอกสีฟันในกรณีที่ฟันเปลี่ยนสีไปค่อนข้างมาก ในระหว่างการรักษาและภายหลังการรักษาคลองรากฟันจะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนจากเชื้อโรคในน้ำลาย ที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้การรักษาคลองรากฟันล้มเหลว [16] จากงานวิจัยของ Heling และคณะ [17] ได้มีการแนะนำให้บูรณะฟันทันทีที่รักษาคลองรากฟันเสร็จ แต่ถ้าไม่สามารถบูรณะได้ทันทีก็ควรมีการอุดปิดคลองรากและโพรงประสาทฟันด้วยวัสดุที่มีการยึดติดกับเนื้อฟัน เช่น คอมโพสิตเรซิน หรือกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

วัสดุที่ใช้ในการรักษาคลองฟันในกรณีมีปริมาณเนื้อฟันเหลือมากคือวัสดุคอมโพสิต เมื่อเปลี่ยนวัสดุในการรักษาคลองรากฟัน Coelho CS. [18] พบว่าความเค้นจะมีค่าสูงมากเมื่อใช้วัสดุที่เป็นโลหะ (metallic) ผสมกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ (non-metallic) เป็นวัสดุในการรักษาคลองรากฟัน แต่ถ้าใช้วัสดุที่เป็นไฟเบอร์กลาส (fiberglass) และคาร์บอนไฟเบอร์ (carbon fiber) เป็นวัสดุรักษาคลองรากฟันจะช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการบูรณะด้วยวิธีรักษาคลองรากฟันโดยวัสดุที่ไม่ใช่โลหะจะทำให้เกิดพฤติกรรมทางกลที่ดีขึ้น ในกรณีที่มีปริมาณเนื้อฟันเหลือน้อยจนไม่สามารถให้การยึดเกาะกับวัสดุที่ใช้ในการบูรณะจึงใช้เดือยฟันร่วมด้วยในการรักษา เดือยฟันจะทำหน้าที่ช่วยในการยึดติดกับแกนฟัน ปกป้องโครงสร้างเนื้อฟันที่เหลืออยู่ [19] เสริมเนื้อฟันที่สูญหายไป และรองรับการครอบฟัน [20] เมื่อทำการเปรียบเทียบความเค้นที่มีการบูรณะแบบมีเดือยและไม่มีเดือย [21-23] การบูรณะแบบมีเดือยฟันลดการเกิดความเค้นในวัสดุอุดได้ แต่ความเค้นในเนื้อฟันส่วนรากมีความเค้นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เดือยฟันไม่ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการแตกหัก [24] จะขึ้นอยู่กับปริมาณเนื้อฟันที่เหลืออยู่มากกว่า และขนาดรูปร่างของเดือยฟันมีผลต่อการบูรณะฟัน กล่าวคือ จากการศึกษาของ Hsu ML. และคณะ [25] แสดงให้เห็นว่าเดือยฟันที่สั้นเกิดความเค้นสูงกว่าเมื่อเทียบกับเดือยฟันที่ยาวกว่า และเดือยฟันที่ยาวสามารถกระจายแรงได้ดีกว่า [26] ดังนั้นควรเลือกเดือยฟันยาวอย่างน้อยเท่ากับหรือมากกว่าความยาวตัวฟัน [27] ส่วนรูปร่างของเดือยฟันจะมีรูปร่างขนาน (parallel-side) และรูปร่างสอบ (taper-side) มีลักษณะคล้ายลิ้ม จากการศึกษาของ Holmes และคณะ [26] พบว่าไม่มีความแตกต่างกันของการกระจายความเค้นระหว่างเดือยฟันที่มีรูปร่างทั้งสองแบบ แต่คุณสมบัติเชิงกลของเดือยฟันมีผลต่อการเกิดความเค้น [28-30] อีกทั้งยังศึกษาอุณหภูมิที่เกิดจากเดือยฟัน [31] โดยเดือยฟันที่ทำจากสแตนเลสทำให้อุณหภูมิและความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal stress) สูงกว่าเดือยฟันที่ทำมาจากไฟเบอร์

2.2.3 การศึกษาการอุดฟัน

การอุดฟันเป็นวิธีการบูรณะขั้นต้น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ฟันที่เกิดความเสียหายกลับคืนสู่สภาพเดิม มีความสวยงาม พร้อมทั้งสามารถกลับมาทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การอุดฟันเป็นการรักษาโดยการกรอส่วนที่เกิดการผุออกเพื่อเป็นการป้องกันการลุกลามของการผุในตัวฟันและเป็นการเก็บรักษาเนื้อฟันที่ดีเอาไว้ หลังจากนั้นนำวัสดุอุดลงไปแทนส่วนที่ถูกกรอไป ซึ่งมีวัสดุที่ใช้อุดได้แก่ทอง อะมัลกัม คอมโพสิตเรซิน กลาสไอโอโนเมอร์ (glass ionomer cement) เป็นต้น มีการศึกษาวัสดุที่ใช้อุดเพื่อเปรียบเทียบความเค้นในวัสดุที่ใช้อุด [32] โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวัสดุที่

มีคุณสมบัติความยืดหยุ่น (elastic module) มีค่าใกล้เคียงกับชั้นเคลือบฟันจะทำให้ความเค้นมีค่าน้อยลง สามารถรับแรงจากการบดเคี้ยวได้มากขึ้น เช่น วัสดุอะมัลกัม เป็นวัสดุที่ทำจากโลหะผสม (alloy) กับปรอท มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่สูง ทนทานต่อการรับภาระแรงได้มาก จึงเป็นเหตุให้มีการใช้วัสดุชนิดนี้อุดฟันในส่วนของฟันกราม แต่สีของอะมัลกัมเป็นสีเงิน ไม่เหมือนสีของฟัน การใช้วัสดุดังกล่าวจึงมีข้อด้อยในด้านความสวยงาม การศึกษาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุบูรณะฟันให้มีความแข็งแรงและมีสีของวัสดุบูรณะที่มีความใกล้เคียงหรือเหมือนสีฟันธรรมชาติมากยิ่งขึ้น

การบูรณะฟันด้วยวิธีการอุดสามารถแบ่งได้เป็น 6 วิธี [33] คือ การอุดบริเวณหลุมร่องฟัน (class I), การอุดด้านประชิดฟันหลัง (class II), การอุดด้านประชิดฟันหน้า (class III), การอุดฟันหน้าที่มีปลายฟันร่วมด้วย (class IV), การอุดผิวเรียบข้างฟันและรากฟัน (class V) และการอุดที่รวมยอดฟันหลัง (class VI) โดยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการอุดฟันแบบด้านประชิดฟันหลัง ซึ่งการอุดแบบ class II เป็นการรักษาฟันที่อยู่ในบริเวณผิวฟันด้านประชิดเนื่องจากผิวบริเวณนี้ยากต่อการทำความสะอาด ทำให้เป็นแหล่งสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดฟันผุ การรักษาแบบ class II จะทำการกรอบริเวณที่มีการผุแล้วทำการอุดด้วยวัสดุบูรณะ กรณีที่มีการผุเกิดขึ้นทั้งสองด้านของตัวฟันจะทำการกรอบริเวณที่ผุทั้งสองด้านโดยมีระยะห่างของโพรงที่ถูกรอ ซึ่งระยะห่างนี้ทำให้เกิดความเค้นขึ้น จึงได้มีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความเค้นจะมากขึ้นในชั้นเคลือบฟันเมื่อระยะห่างของโพรงแคบ ส่วนชั้นเนื้อฟันความเค้นจะไม่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างของโพรง [4] และถ้ามีการอุดลงไปถึงรากฟันจะส่งผลต่อความเค้นของฟัน [34] โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบูรณะฟันด้วยวิธีการอุดลงไปถึงรากฟัน ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นพบบริเวณคอฟัน เป็นสาเหตุทำให้มีการบูรณะฟันด้วยการอุดแบบต่างๆ เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้น

ในปัจจุบันเทคโนโลยีใหม่ๆ เริ่มเข้ามามีบทบาทในการบูรณะฟันยิ่งขึ้น มีการบูรณะแบบอินเลย์ (inlay) และแบบออนเลย์ (onlay) ซึ่งการบูรณะแบบ inlay และ onlay คือการบูรณะฟันที่คล้ายคลึงกับการอุดฟันแบบปกติ เพียงแต่มีการสร้างวัสดุบูรณะให้เสร็จเป็นชิ้นงานในห้องปฏิบัติการ ซึ่งชิ้นวัสดุบูรณะนี้มีขนาดที่พอดีกับโพรงที่กรอเตรียมไว้ ทำให้สามารถถอดใส่ได้และสามารถทดสอบความแนบชิดของวัสดุบูรณะกับผนังและขอบของโพรงฟันที่เตรียมไว้ ก่อนที่จะทำการอุดแบบถาวร แต่วิธีการบูรณะทั้งสองแบบนี้ต้องการขนาดเนื้อที่ของโพรงที่ใหญ่ โดยการบูรณะแบบ inlay เป็นการอุดที่มีขอบเขตบริเวณตัวฟัน ส่วนการบูรณะแบบ onlay เป็นการอุดคล้ายกับการบูรณะแบบ inlay แต่จะครอบคลุมขอบเขตบริเวณผิวนอกของตัวฟันด้วย วัสดุที่ใช้ในการบูรณะทั้งสองแบบได้แก่

เซรามิก ทองและเรซิน เป็นต้น จากการศึกษาการบูรณะฟันแบบ inlay โดย Topala F. [35] ใช้เซรามิกเป็นวัสดุบูรณะ เมื่อวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดจากการรับแรงบดเคี้ยวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเกิดความเค้นที่บริเวณรอยต่อของวัสดุบูรณะและความเค้นดังกล่าวจะมีค่าลดลงเมื่อลดขนาดของโพรงที่อุด ซึ่งทำให้มีการเปรียบเทียบวิธีการบูรณะแบบ inlay กับการบูรณะแบบอุดด้วยวิธีปกติ โดย Dejak B. and Mtotkowski A. [36] การศึกษาดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบความเค้นในฟันที่ถูกอุดด้วยวัสดุคอมโพสิตเรซิน เมื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าการบูรณะแบบ inlay เกิดความเค้นน้อยกว่าการอุดด้วยวิธีปกติ ดังนั้นการบูรณะแบบ inlay มีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงบดเคี้ยวมากกว่าการอุดฟันด้วยวิธีปกติ ซึ่งปัจจุบันการบูรณะแบบ inlay เป็นการอุดฟันอีกทางเลือกหนึ่งของการบูรณะฟัน

นอกจากการวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ยังมีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์หาอุณหภูมิภายในของฟันที่ถูกบูรณะด้วยการอุดฟันโดย Takahashi N. [37] เพื่อศึกษาวัสดุและความหนาของชั้นวัสดุที่มีผลต่ออาการเสียวฟันจากการตีเครื่องตีร้อนและเย็น พบว่าวัสดุที่กันความร้อนได้ดีคือวัสดุที่เป็นคอมโพสิตเรซิน และวัสดุซีเมนต์ (cement bases) ที่เป็นกาวเชื่อมระหว่างวัสดุบูรณะกับโพรงฟัน ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะมีส่วนช่วยกันความร้อน ลดอาการเสียวฟันจากการตีเครื่องตีร้อนและเย็นได้มากขึ้น

2.2.4 การศึกษาการครอบฟัน

การบูรณะฟันที่มีการผูกกลามลงไปถึงชั้นเนื้อฟันทำโดยการครอบฟัน การครอบฟันมีหลักการดังนี้ ทำการกรอส่วนที่เสียหายออกโดยกรอให้ซี่ฟันมีขนาดเล็กลง แต่มีรูปร่างของฟันเหมือนเดิม จากนั้นทำการพิมพ์ฟัน เพื่อสร้างวัสดุครอบฟันในห้องปฏิบัติการ แล้วนำมาครอบฟันที่ถูกกรอเตรียมไว้ ฟันที่ถูกบูรณะด้วยการครอบฟันจะกลับคืนสภาพปกติและมีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ต่อไป ในการรักษาด้วยวิธีการครอบฟันจะรวมวิธีการรักษาลongรากฟันเข้ามาช่วยในการบูรณะ ในกรณีที่ฟันมีความเสียหายไปถึงชั้นโพรงประสาท จะทำการรักษาโดยใช้เดือยฟัน (post) เป็นแกนยึดให้รากฟันมีความแข็งแรง รวมทั้งเป็นส่วนป้องกันไม่ให้เนื้อฟันที่เหลือเกิดการแตกหักแล้วจึงทำการครอบฟัน วัสดุที่ใช้ในการครอบฟันเช่น โลหะที่มีทองผสม เซรามิก พอร์ซเลน เซรามิกผสมโลหะพลาสติก ฯลฯ ในสมัยก่อนวัสดุที่ใช้ในการครอบฟันเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) เพราะมีคุณสมบัติความแข็งแรง สามารถต้านทานการเสีรูปร่างจากการรับแรงสูงสุดของการบดเคี้ยวได้ [38] ปัจจุบันวัสดุที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้แทนเหล็กไร้สนิมได้แก่ วัสดุจำพวกเซรามิก เพราะสีของ

เซรามิกเหมือนสีฟันธรรมชาติ แม้มีคุณสมบัติความแข็งแรงไม่เท่ากับคุณสมบัติความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนวัสดุที่ใช้ทำเดือยฟันมีหลายประเภทได้แก่ โลหะที่ผสมทอง กลาสไฟเบอร์ นิกเกิลโครเนียม ไททาเนียม เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าเดือยที่ทำมาจากนิกเกิลโครเนียมจะเกิดความเค้นมากที่สุดบริเวณส่วนบนของเนื้อฟันและปลายของเดือยที่อยู่ในส่วนราก เมื่อทำการเทียบกับวัสดุประเภทอื่นโดย Watanabe MU. [39] และอีกการศึกษาหนึ่งเป็นการเปรียบเทียบการใช้เดือยที่มีวัสดุคาร์บอนและไททาเนียม จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเดือยที่เป็นวัสดุ ไททาเนียมยอมให้มีค่าความเค้นมากกว่าเดือยที่เป็นวัสดุคาร์บอน [40] เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติวัสดุของเดือยฟันมีผลต่อการเกิดความเค้น [41] ซึ่งถ้าคุณสมบัติยืดหยุ่นสูงจะทำให้เกิดความเค้นมากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการครอบฟันแบบสะพานฟันโดย Kumar GA. [42] การครอบแบบสะพานฟันเป็นการรักษาอีกรูปแบบหนึ่งของการถอนฟัน เนื่องจากผู้ป่วยบางคนไม่ยอมใส่ฟันปลอมหรือไม่สามารถที่จะใส่ฟันปลอมได้จึงเกิดการรักษาแบบสะพานฟันขึ้น โดยจะทำการครอบฟันสองซี่ที่อยู่ระหว่างช่องว่างเพื่อรักษาระยะห่างของฟันไม่ให้เกิดการล้มของฟัน

งานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการแสดงการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาในกรณีต่าง ๆ ของแบบจำลองรูปฟัน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกรูปแบบในการรักษา การเลือกวัสดุบูรณะ รวมถึงการพัฒนาวิธีการรักษา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ในแบบจำลองโครงสร้างฟันที่สร้างขึ้น ซึ่งจะเป็ข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการบูรณะฟันทั้งการรักษาคลองรากฟันแล้วทำการอุดฟันและแบบครอบฟันต่อไป โดยเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการการรักษาและวัสดุอุปกรณ์ ให้มีความสะดวก รวดเร็ว ใช้งานง่ายและค่าใช้จ่ายในการรักษาที่ถูกลง

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน

บทที่แล้วได้กล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการบูรณะฟัน ไม่ว่าจะเป็นการรักษาคลองรากฟัน การอุดฟันและการครอบฟัน เนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการใช้วิเคราะห์ปัญหาในแบบจำลอง ประกอบไปด้วยทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ความเค้นและความเครียด คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น ถัดมาเป็นเนื้อหาเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่กล่าวถึงแนวในการแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาด้านของแข็ง โดยกล่าวถึงสมการเชิงอนุพันธ์และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะกล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในหัวข้อนี้จะอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์โดยกล่าวถึง ความหมายของความเค้นและความเครียด ที่เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงภาระภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของวัสดุตามลำดับ รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแข็งแรงและความแข็งแกร่งของวัสดุ ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

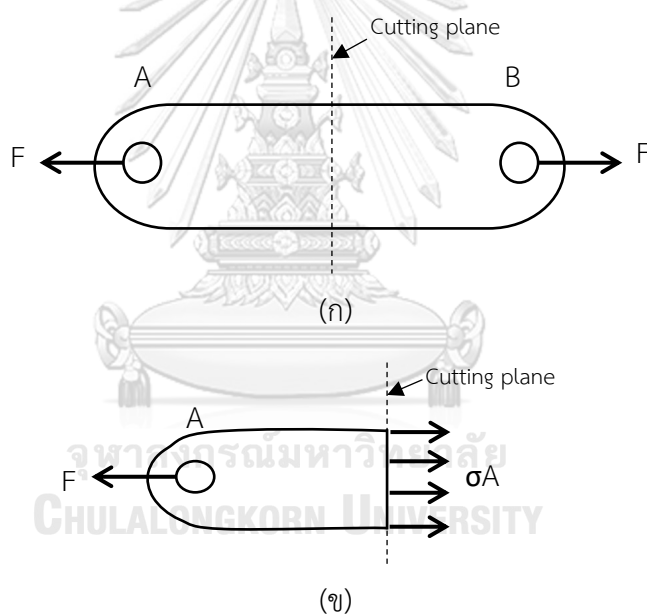
3.1.1 ความเค้นและความเครียด [43] รัชมหาวิทยาลัย

ความเค้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของโครงสร้างทางวิศวกรรม ความเค้นแสดงถึงภาระภายในที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในชิ้นส่วนทางกล โดยสามารถนิยามความเค้นได้คือ ความเข้มของแรงภายในที่ตำแหน่งนั้น ๆ ของชิ้นส่วนทางกล เพื่อให้เห็นนิยามความเค้นได้ชัดเจนขึ้น พิจารณาวัตถุที่รับแรงในแนวแกนในรูป 3.1 เมื่อใช้วิธีการตัดชิ้นส่วนทางกล (method of section) จะเห็นว่าแรงกระจายของแรงภายในมีค่าเท่ากับแรงกระทำจากภายนอก F ที่กระทำต่อวัสดุด้วยพื้นที่หน้าตัดที่เป็นชิ้นงาน A โดยทั่วไปการกระจายของแรงภายในบนระนาบไม่กระจายอย่างสม่ำเสมอ มีทิศทางไม่ตั้งฉากและไม่ขนานกับแนวระนาบที่จุดใด ๆ อย่างไรก็ตามแรงภายในเหล่านี้มีองค์ประกอบของแรงทั้งในทิศทางที่ตั้งฉากและทิศทางขนานกับแนวระนาบ ซึ่งองค์ประกอบแรงภายในทิศทางตั้งฉากกับระนาบจะเรียกว่า ความเค้นตั้งฉาก (normal stress) มีสัญลักษณ์ที่ใช้เป็นอักษรกรีก σ (อ่านว่า “ซิกมา”) ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

โดย F คือขนาดของภาระภายในลัฟท์ และ A คือพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณาหาความเค้น จากนั้นนิยามความเค้นจะเห็นว่าหน่วยของความเค้นอยู่ในรูปของแรงต่อพื้นที่ ดังนั้นจึงนิยมแสดงหน่วยของความเค้นในรูปนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปาสกาล (pascal)

ลักษณะของความเค้นตึงฉากสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ความเค้นตึง (tensile stress) และความเค้นกด (compressive stress) โดยความเค้นตึงฉากเป็นแบบดึงหรือแบบกดพิจารณาได้จากลักษณะของภาระภายในบนหน้าตัดนั้น ๆ หากความเค้นมีทิศทางพุ่งออกจากระนาบหน้าตัดจะพิจารณาเป็นความเค้นตึง กำหนดให้มีค่าเป็นบวก (+) ในทางตรงกันข้ามหากความเค้นมีทิศทางพุ่งเข้าหาระนาบหน้าตัดจะพิจารณาเป็นความเค้นกด กำหนดให้มีค่าเป็นลบ (-)



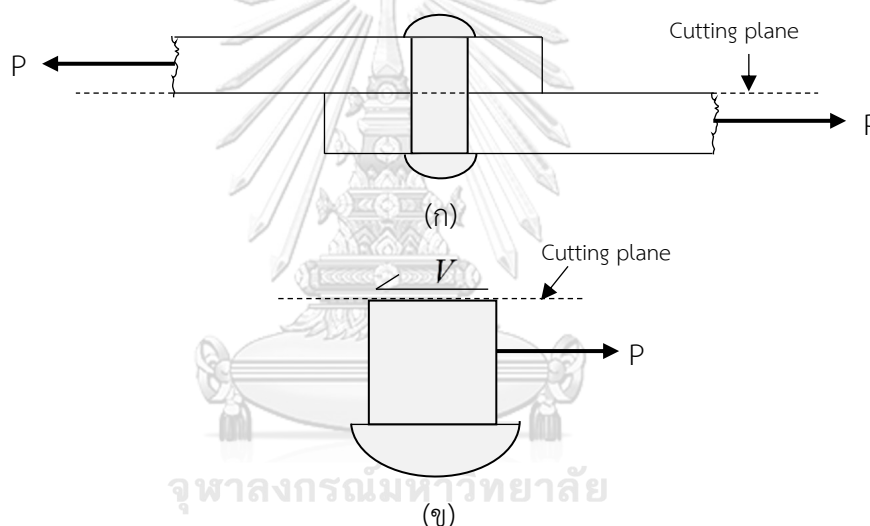
รูปที่ 3.1 แผนภาพของวัสดุที่รับภาระในแนวแกน

ความเค้นอีกประเภทหนึ่งคือ ความเค้นเฉือน (shear stress) มีสัญลักษณ์คือ τ ซึ่งมีนิยามว่าความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนของแรงภายในต่อพื้นที่ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการเกิดความเค้นเฉือนจะยกตัวอย่างชิ้นงานที่รับภาระดังแสดงในรูป 3.2 ชิ้นงาน 2 แผ่นยึดต่อกันด้วยสลักเกลียวที่รับแรงดึง P ดังรูป 3.2(ก) ชิ้นงานที่สนใจคือ สลักเกลียวที่รับแรงกระทำขวางกับแนวแกนของสลักเกลียว หากแรง P มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนสลักเกลียวไม่สามารถรับความเค้นเฉือนเพิ่มได้อีกต่อไป ทำให้สลักเกลียวฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งความเสียหายของสลักเกลียวเกิดจากการเฉือนขาดบนหน้าตัดของสลักเกลียว

เมื่อพิจารณาแผนภาพวัสดุอิสระของสลักเกลียวดังแสดงในรูป 3.2(ข) พบว่าแรง P คือแรงภายนอกที่เป็นแรงดึงกระทำกับสลักเกลียว เพื่อให้สลักเกลียวดังกล่าวอยู่ในสภาวะสมดุลจะต้องมีแรงภายในแกนสลักเกลียว ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยแรง V ดังแสดงในรูป จากนิยามความเค้นเฉือนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (3.2)$$

โดย V คือแรงเฉือนภายใน และ A คือพื้นที่หน้าตัด จากสมการความเค้นเฉือนจะเห็นได้ว่าหน่วยของความเค้นเฉือนมีหน่วยเหมือนความเค้นตั้งฉาก นั่นก็คือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปาสกาล (pascal)

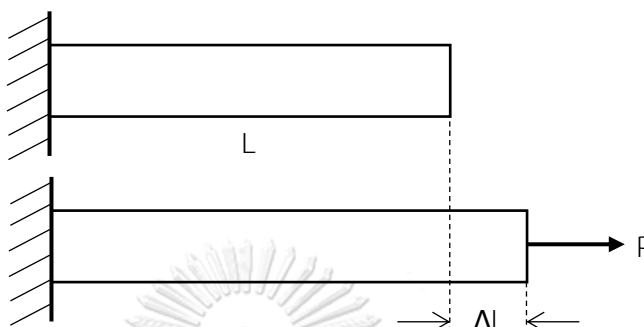


รูปที่ 3.2 แผนภาพความเค้นเฉือน

นอกจากความเค้นภายในที่เกิดขึ้นแล้วภาระภายนอกยังทำให้รูปร่างของวัสดุเปลี่ยนไปด้วย ไม่ว่าจะเป็นการยืดหดหรือการบิดเบี้ยว ดังนั้นจึงต้องมีพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ทางวิศวกรรมจึงได้นิยามพารามิเตอร์นี้ว่า ความเครียด (strain) เป็นสัดส่วนความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิมหรือรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปต่อรูปร่างเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีลักษณะแบบการยืดและการหดเป็นความเครียดตั้งฉาก (normal strain) ดังรูป 3.3 มีสัญลักษณ์คือ ε สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.3)$$

โดย ΔL คือความยาวที่เปลี่ยนแปลงหรือรูปร่างที่เปลี่ยนแปลง และ L คือความยาวเดิมหรือรูปร่างเดิม จากสมการเห็นได้ว่า ความเครียดเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย (dimensionless) และความเครียดตั้งฉากอาจมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุว่ามีการเปลี่ยนรูปลักษณะการยืดหรือการหด



รูปที่ 3.3 ระยะยืด ΔL ของแท่งวัตถุยาว L

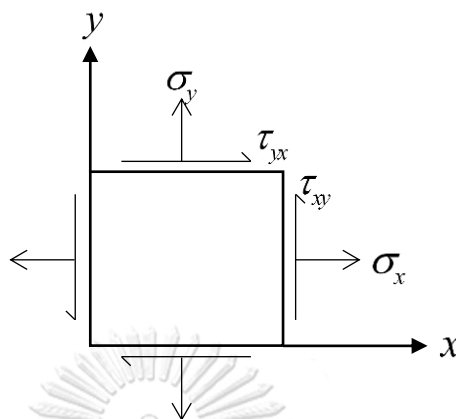
ความเค้นหลักในระนาบ

การวิเคราะห์ความเค้น (stress analysis) ในแบบจำลองอาจมีความเค้นหลายประเภทเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันและอาจอยู่บนเอลิเมนต์ที่วางตัวในทิศต่างกัน เมื่อพิจารณาแบบจำลอง 3 มิติจึงต้องมีการวิเคราะห์ความเค้นต่าง ๆ นี้รวมเข้าด้วยกัน วิธีการหาความเค้นมักใช้ระนาบสมมุติตัดผ่านจุดที่สนใจ โดยที่ความเค้นที่จุดใด ๆ บนระนาบที่ตัดมีค่าคงที่ หรือภาวะภายในบนระนาบมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอกรณีทั่ว ๆ ไปชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีความยาวด้านหนึ่งน้อยกว่าอีกสองด้านมากและความเค้นที่เกิดขึ้นมักเป็นความเค้นระนาบ (plane stress) ซึ่งแบบจำลอง 3 มิติมีเอลิเมนต์ความเค้นประกอบไปด้วยระนาบ 3 ระนาบ ซึ่งบนระนาบแต่ละระนาบมีความเค้นตั้งฉาก 1 ค่า และความเค้นเฉือนอีก 2 ค่ากระทำอยู่ ทำให้มีความเค้นกระทำที่จุดมีทั้งหมด 9 ค่า จากหลักการสมดุลของแรงและโมเมนต์สามารถแสดงได้ว่าค่าความเค้นต่อไปนี้มีความเท่ากัน นั่นคือ

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx} \text{ และ } \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

เพื่อเป็นการแสดงค่าเค้นที่จุดหนึ่งให้สมบูรณ์จะเห็นว่ามีค่าความเค้นจำนวน 6 ค่าด้วยกันคือ ความเค้นตั้งฉาก 3 ค่า และความเค้นเฉือนจำนวน 3 ค่า ได้แก่ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ และ τ_{yz} ดังนั้นการวิเคราะห์ความเค้นรวมที่เกิดจากภาวะหลายประเภทสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมสามารถสมมุติให้เป็น

การวิเคราะห์ความเค้นใน 2 มิติได้ ดังรูป 3.4 ซึ่งเป็นการแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นความเค้นระนาบ ทำให้ความเค้นที่อยู่นอกกระนาบคือ σ_z , τ_{xz} และ τ_{yz} มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด



รูปที่ 3.4 ความเค้น 2 มิติ

จากเอลิเมนต์ความเค้นดังรูป 3.4 เมื่อทำการหมุนแนวแกนเป็นมุม θ ในทิศทวนเข็มนาฬิกา จะเกิดความเค้น σ_n ตัดฉากกับหน้าตัด และความเค้นเฉือน τ_n ขนานกับหน้าตัดที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.5 ความเค้นทั้งสองค่านี้สามารถหาได้จากสมดุลของแรงและโมเมนต์ของเอลิเมนต์ดังนี้

$$[\Sigma F_x = 0] :$$

$$\sigma_n A - \sigma_x (A \cos \theta) \cos \theta - \tau_{xy} (A \cos \theta) \sin \theta - \sigma_y (A \sin \theta) \sin \theta - \tau_{xy} (A \sin \theta) \cos \theta = 0$$

เมื่อแก้สมการจะได้

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (3.4)$$

$$[\Sigma F_y = 0] :$$

$$\tau_n A + \sigma_x (A \cos \theta) \sin \theta - \tau_{xy} (A \cos \theta) \cos \theta - \sigma_y (A \sin \theta) \cos \theta + \tau_{xy} (A \sin \theta) \sin \theta = 0$$

โดย A คือขนาดพื้นที่บนด้านต่าง ๆ ของเอลิเมนต์

เมื่อแก้สมการจะได้

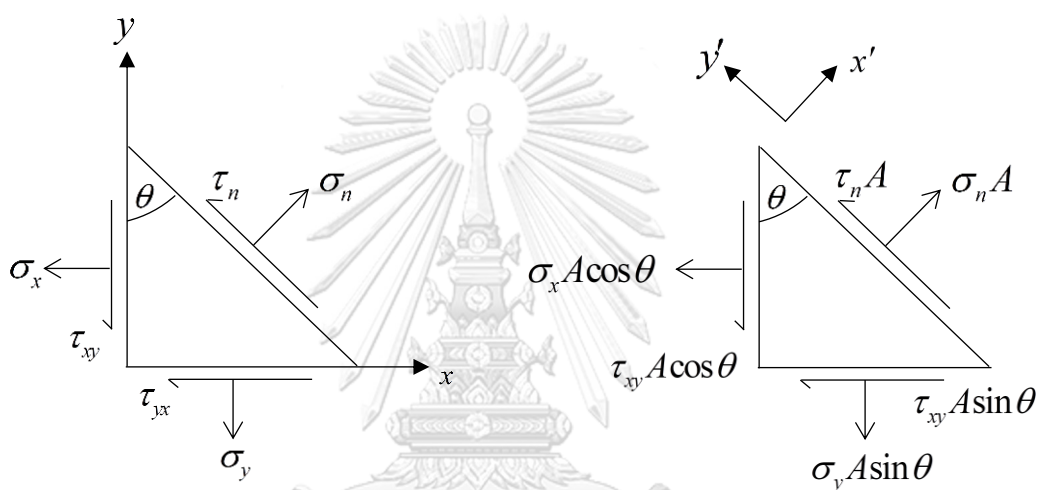
$$\tau_n = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (3.5)$$

จากตรีโกณมิติ $\cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$, $\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$ และ $2\sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$

ดังนั้นความเค้นตั้งฉากบนระนาบ x' หาได้จาก

$$\sigma_n = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3.6)$$

$$\tau_n = -\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.5 เอลิเมนต์ความเค้นบนระนาบ

การออกแบบชิ้นงานในด้านวิศวกรรมจะต้องคำนวณหาความเค้นสูงสุดหรือต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะเกิดก็ต่อเมื่อความเค้นสูงสุดหรือต่ำสุดมีค่าเกินความแข็งแรงของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบชิ้นงานให้มีค่าความเค้นไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งความเค้นตั้งฉากสูงสุดหรือต่ำสุดที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ความเค้นหลัก (principal stresses) ในการหาความเค้นหลักทำได้โดยพิจารณาความเค้นตั้งฉากบนระนาบใด ๆ โดยจะต้องหาค่ามุม θ ที่ทำให้ความเค้นตั้งฉาก σ_n มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ซึ่งมุม θ ดังกล่าวพิจารณาจากสมการ

$$\frac{d\sigma_n}{d\theta} = 0$$

จากการหาค่าความเค้นตั้งฉากบนระนาบ x' เมื่อแก้สมการข้างต้นจะได้มุมที่เกิดความเค้นหลัก (θ_p) โดยมุม θ_p หาได้จาก

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (3.8)$$

สมการ 3.8 ให้ค่า θ_p จำนวน 2 ค่า ได้มุมของระนาบหลัก θ_{p1} และ θ_{p2} ที่ทำมุมห่างกัน 90° ซึ่งกันและกัน จากมุมที่เกิดความเค้นหลัก θ_p สามารถหาค่าความเค้นหลักโดยการแทนค่า θ_p ลงในสมการ 3.6 ได้ความเค้นหลักจำนวน 2 ค่าดังนี้

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

โดยเรียกความเค้นหลักที่มีค่ามากกว่าว่า σ_1 และเรียกความเค้นหลักที่มีค่าน้อยกว่าว่า σ_2 ความเค้นทั้งสองอาจเป็นความเค้นดึงหรือเป็นความเค้นกดก็ได้ นอกจากนี้ความเค้นหลักสามารถมีค่าเป็นศูนย์

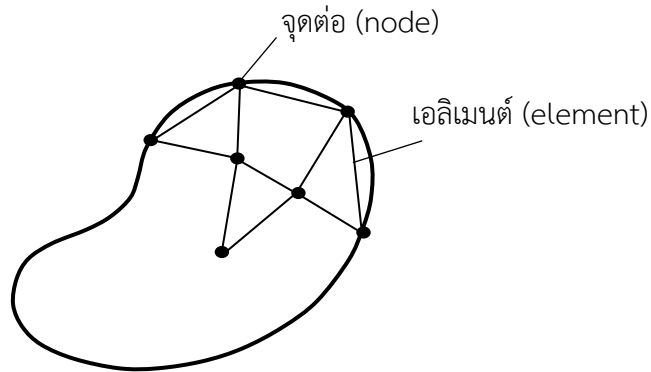
3.1.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (material properties)

คุณสมบัติของวัสดุเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเมื่อมีภาระภายนอกมากระทำ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป การหาคุณสมบัติของวัสดุหาได้จากการทดสอบวัสดุที่ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน โดยการดึงวัสดุในแนวแกนทำให้เกิดความเค้นดึงและความเครียดดึงในแนวแกน แล้วนำค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นมาเขียนกราฟจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุดังรูป 3.6 ซึ่งรูป 3.6(ก) แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว จากกราฟจะเห็นว่าช่วงแรกของกราฟมีความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ซึ่งช่วงนี้เป็นช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมยืดหยุ่น กล่าวคือระยะยืดแปรผันตรงกับขนาดของแรงกระทำ โดยความสัมพันธ์ที่กราฟเป็นเส้นตรงนี้เรียกว่า ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือค่ายังมอดูลัส (Young's modulus, E) และค่าสูงสุดที่กราฟยังคงเป็นเส้นตรงนี้ว่าขีดจำกัดการแปรผันตรง (proportional limit) แสดงด้วยจุด A เมื่อวัสดุรับภาระเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น วัสดุจะเกิดการคราก โดยความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือ ความเค้นคราก (yield stress, σ_y) ความเค้นครากนี้มักเป็นความแข็งแรงของวัสดุในการออกแบบชิ้นงาน ช่วงต่อมาเป็นช่วงที่วัสดุสามารถรับภาระได้มากขึ้น ทำให้เกิดความเค้นสูงสุด (ultimate stress, σ_u) หลังจากวัสดุผ่านจุดความเค้นสูงสุด มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชัดเจนและเปลี่ยนแปลงไปจนถึงจุดแตกหัก เป็นจุดที่ชิ้นงานขาดออกจากกัน สำหรับวัสดุเปราะ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังรูป 3.6(ข) เห็นได้ว่ากราฟเป็นเส้นตรงและ

ในรูปของสมการอินทิกรัล (integral equations) และสมการเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) แม้สมการที่ประดิษฐ์ขึ้นมาไม่ได้มีรูปแบบที่ซับซ้อน แต่การหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) โดยวิธีวิเคราะห์อาจทำได้ยากหรืออาจจะทำไม่ได้เลย ดังนั้นจึงมีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) การหาผลเฉลยโดยประมาณสามารถหาได้หลายแบบ วิธีหนึ่งที่ได้รับนิยามมากคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาโดยการแบ่งโดเมนของปัญหาที่มีความซับซ้อนออกเป็น ส่วน ๆ เนื่องจากผลเฉลยแม่นยำตรงที่วิเคราะห์ขึ้นมาจะประกอบไปด้วยค่าตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น กล่าวอีกแบบคือ ผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ เป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจำนวนมากจึงได้ทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนเป็นอนันต์ค่ามาเป็นจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างของปัญหานั้นเป็นเอลิเมนต์ (element) จากหลักการนี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพิจารณาจากเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ เพื่อให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ที่พิจารณาในปัญหานั้น ๆ แล้วนำมารวมกันในทุก ๆ เอลิเมนต์จะได้ระบบสมการรวม จากนั้นประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นลงในระบบสมการรวม พร้อมทั้งแก้ระบบสมการ จะได้ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์ได้

แนวทางการแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งรูปร่างเอลิเมนต์ เป็นการนำเอาปัญหามาแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังรูปที่ 3.7 เพื่อที่จะหาผลเฉลยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยประมาณตามตำแหน่งที่ต้องการ ในการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็น ส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยในแต่ละเอลิเมนต์จะมีจุดต่อ (node) เป็นตัวเชื่อม ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะใช้คำนวณหาค่าตัวแปรตามที่ต้องการ สำหรับปัญหาทางด้านของแข็ง พารามิเตอร์ที่ต้องการหาได้แก่ ความเค้น ความเครียดและการเคลื่อนที่ (displacement) ส่วนพารามิเตอร์ที่สนใจในปัญหาด้านความร้อนอาจเป็นอุณหภูมิ เป็นต้น

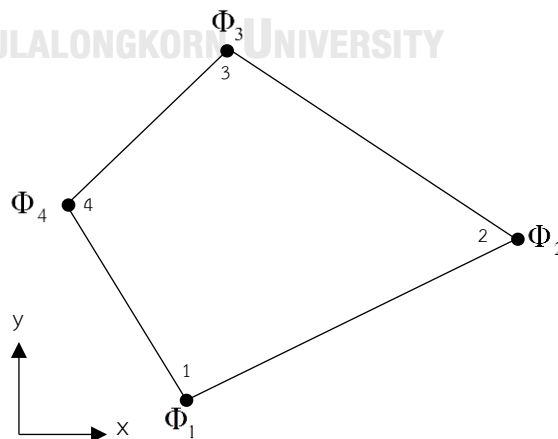


รูปที่ 3.7 การแบ่งรูปร่างเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) ถ้าการแบ่งรูปร่างเอลิเมนต์เป็นรูปแบบสามเหลี่ยมจะมี 3 จุดต่อ และถ้าเป็นสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็จะมี 4 จุดต่อ ซึ่งจุดต่อแต่ละจุดเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknown) จะกำหนดให้เป็น Φ_1, Φ_2, Φ_3 และ Φ_4 ตามลำดับ ดังรูป 3.8 ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปัญหาทางด้านของแข็ง ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าการเคลื่อนที่ หรืออาจจะเป็นค่าของอุณหภูมิสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านความร้อน เป็นต้น ทำให้ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าที่สนใจบนเอลิเมนต์รูปแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้คือ

$$\Phi(x,y) = N_1(x,y)\Phi_1 + N_2(x,y)\Phi_2 + N_3(x,y)\Phi_3 + N_4(x,y)\Phi_4 \quad (3.11)$$

เมื่อ $N_i(x,y), i = 1, 2, 3, 4$ เป็นฟังก์ชันประมาณค่าที่อยู่ภายในเอลิเมนต์ 1 เอลิเมนต์



รูปที่ 3.8 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าประกอบด้วยสี่จุดต่อ

จากสมการข้างบน สามารถนำมาเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\Phi(x, y) = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อ $[N]$ คือเมทริกซ์แถวอน (row matrix) ของฟังก์ชันการประมาณค่าในเอลิเมนต์

$\{\Phi\}$ คือเมทริกซ์แถวตั้ง (column matrix) ของจุดต่อที่ไม่รู้ค่าในเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equation) ในแต่ละปัญหาจะประกอบไปด้วยค่าเอลิเมนต์เมทริกซ์ (element matrix, $[K]$) ต่างกันตามตำแหน่งของจุดต่อ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.8 สมการของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

เมื่อ $\{F_i\}$, $i = 1, 2, 3, 4$ แทนแรงที่กระทำต่อจุดต่อ

ขั้นตอนที่ 4 การประกอบสมการ ขั้นตอนนี้เป็นการรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์รวมเข้าด้วยกัน ทำให้ได้ระบบสมการรวม (system of simultaneous equations) ได้ดังนี้

$$[K]_{\text{sys}} \{\Phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (3.14)$$

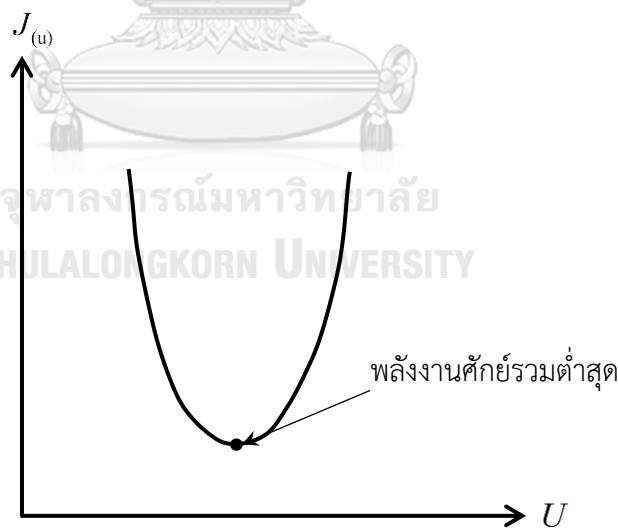
ขั้นตอนที่ 5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในระบบสมการรวม (3.14) แล้วแก้ระบบสมการรวม เพื่อหาค่า $\{\Phi\}_{\text{sys}}$ ที่ประกอบไปด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ยกตัวอย่างเช่น ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเคลื่อนที่ตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาของการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เมื่อรู้ค่าที่จุดต่อต่าง ๆ แล้วก็สามารถนำไปหาพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไป เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูปตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปหาค่าความเครียดและความเค้น ได้ตามลำดับ

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาด้านของแข็ง

การวิเคราะห์ในทางด้านของแข็งใช้หลักการพลังงานศักย์รวมต่ำสุด (minimum potential energy) กล่าวคือนอกจากการเคลื่อนที่ในระบบจะต้องมีความต่อเนื่อง (compatibility) และ สอดคล้อง (equivalence) กับเงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ในสภาวะสมดุล (equilibrium condition) พลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นในระบบจะต้องมีค่าน้อยที่สุดดังแสดงในรูป 3.9 การวิเคราะห์หาค่าเคลื่อนที่ และความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่สนใจจึงประยุกต์ใช้ในหลักการข้างต้นในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ พลังงานศักย์รวม (total potential energy) หรือฟังก์ชัน J ประกอบไปด้วยพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในระบบ (internal strain energy) และพลังงานศักย์ที่เกิดจากการกระทำของแรงภายนอก (potential energy due to external forces) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = U + V \quad (3.15)$$

- เมื่อ
- J = พลังงานศักย์รวม
 - U = พลังงานความเครียดในระบบ
 - V = พลังงานศักย์จากการกระทำของแรงภายนอก



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์รวมกับการเสียรูป

3.3.1 สมการเชิงอนุพันธ์

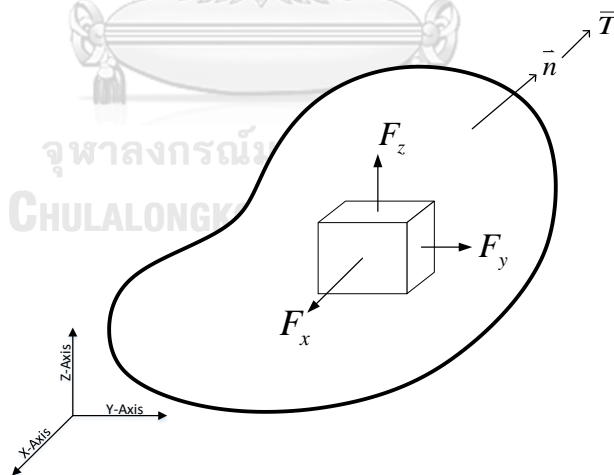
เมื่อพิจารณาจุดใดจุดหนึ่งในของแข็งยืดหยุ่นจะพบว่า มีแรง 2 ชนิดที่กระทำคือ แรงที่ผิว (surface tractions) หรือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของวัตถุ (body forces) ดังรูปที่ 3.10 เมื่อวัสดุอยู่ในสมดุล สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0\end{aligned}\quad (3.16)$$

และ สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นที่ผิวได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix}\quad (3.17)$$

โดย n_x, n_y, n_z เป็นทิศทางของเวกเตอร์ที่ตั้งฉาก (direction cosine) กับจุดที่สนใจบนพื้นผิว



รูปที่ 3.10 ของแข็งที่ยืดหยุ่นที่มีแรงกระทำ

เมื่อพิจารณาให้วัตถุเป็นของแข็งยืดหยุ่น สามารถหาความเครียดที่เกิดขึ้นภายในได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเขียนได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon - \varepsilon_0\} \quad (3.18)$$

โดย $\{\sigma\}$ = เวกเตอร์ความเค้น

$\{\varepsilon\}$ = เวกเตอร์ความเครียด

$\{\varepsilon_0\}$ = เวกเตอร์ความเครียดขั้นต้น

$[C]$ = เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เรียกว่า เมทริกซ์สติฟเนส (stiffness matrix)

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเสียรูปได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B]\{\delta\} \quad (3.19)$$

โดย $[B]$ = เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเสียรูป

$\{\delta\}$ = การเสียรูปทุกจุดในวัตถุของแข็ง

3.3.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาของแข็ง จะพิจารณาหาจากฟังก์ชันแปรผัน โดยจะต้องหาค่าต่ำสุดฟังก์ชันพลังงานศักย์รวมดังแสดงในสมการ (3.15) หรือ

$$J = U + V$$

โดย U คือพลังงานความเครียด หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังรูป 3.11 ทำให้เขียนสมการได้ดังนี้

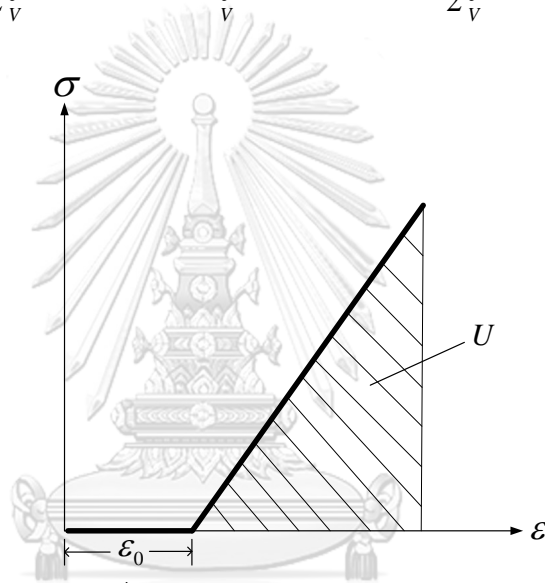
$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0] \{\sigma\} dv \quad (3.20)$$

เมื่อแทน $\{\sigma\}$ จากสมการ (3.18) ลงในสมการ (3.20) จะได้

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0] [C] \{\varepsilon - \varepsilon_0\} dv \quad (3.21)$$

เมื่อกระจายพจน์ จะได้

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon\} dv + \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon_0\} dv + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0] [C] \{\varepsilon_0\} dv \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.11 พลังงานความเครียด

ส่วน V คือพลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงภายนอก หาได้จากแรงที่เกิดจากน้ำหนักของวัตถุ ในรูปของปริมาตร V และแรงที่ผิว ที่พื้นที่ผิว S เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V &= - \int_V (F_x u + F_y v + F_z w) dv - \int_S (T_x u + T_y v + T_z w) ds \\ &= - \int_V [\delta] \{F\} dv - \int_S [\delta] \{T\} ds \end{aligned} \quad (3.23)$$

โดย $[\delta]$ คือเวกเตอร์การเสียรูปในทิศ x, y, z ตามลำดับ

นำสมการ (3.22) และ (3.23) แทนลงในสมการ (3.15) จะได้พลังงานศักย์รวมคือ

$$J = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon\} dv + \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon_0\} dv + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dv - \int_V [\delta]\{F\} dv - \int_S [\delta]\{T\} ds \quad (3.24)$$

สมการ (3.24) เป็นฟังก์ชันแปรผันที่สามารถนำไปสร้างสมการไฟไนต์สำหรับปัญหารูปแบบต่าง ๆ ในที่นี้จะวิเคราะห์วัตถุที่เป็น 3 มิติ โดยใช้วิธีฟังก์ชันแปรผัน อันดับแรกต้องกำหนดลักษณะการเสียรูปให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{u\} \\ v(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{v\} \\ w(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{w\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

เขียนเป็นเวกเตอร์รวมได้ว่า

$$\{\delta\} = [N]\{\delta\} \quad (3.26)$$

นำสมการที่ (3.19) และ (3.26) แทนลงในสมการ (3.24) จะได้พลังงานศักย์รวมของวัตถุที่เป็น 3 มิติ ดังนี้

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_V [\delta][B]^T [C][B]\{\delta\} dv - \int_V [\delta][B]^T [C]\{\varepsilon_0\} dv + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dv \\ &\quad - \int_V [\delta][N]^T \{F\} dv - \int_S [\delta][N]^T \{T\} ds \end{aligned} \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.27) สามารถเขียนสมการพลังงานศักย์ต่ำสุดแบบย่อได้ว่า

$$J = \frac{1}{2} [\delta][K]\{\delta\} - [\delta]\{F_0\} + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dv - [\delta]\{F_B\} - [\delta]\{F_t\} \quad (3.28)$$

เมื่อ $[K]$ คือ เอลิเมนต์เมทริกซ์ของความแข็งเกร็ง จะอยู่ในรูป $\int_V [B]^T [C][B] dv$

$\{F_0\}$ คือ เวกเตอร์ของความเครียดขั้นต้น จะอยู่ในรูป $\int_V [B]^T [C]\{\varepsilon_0\} dv$

$\{F_B\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงวัตถุ จะอยู่ในรูป $\int_V [N]^T \{F\} dv$

$\{F_t\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่ผิว จะอยู่ในรูป $\int_S [N]^T \{T\} ds$

จะเห็นว่า พลังงานศักย์ต่ำสุดหาได้จากสมการ $\frac{\partial J}{\partial \{\delta\}} = 0$ ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์พอนาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งระบบมารวมกัน แล้วประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต พร้อมทั้งแก้ระบบสมการ จะได้ผลลัพธ์หรือคำตอบตามจุดต่อทุก ๆ จุด ค่าความเค้นตามทิศทางต่าง ๆ สามารถหาได้จากสมการ (3.17) และ (3.19) ได้ค่าตามนี้

$$\{\sigma\} = [C][B]\{\delta\} - [C]\{\epsilon_0\} \quad (3.29)$$

3.3 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้แสดงแนวคิดพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมประกอบไปด้วย ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุจากภาระทางกลเท่านั้น และแสดงวิธีการหาความเค้นบนระนาบใด ๆ รวมถึงการหาความเค้นตั้งฉากสูงสุดซึ่งเรียกเฉพาะว่าความเค้นหลัก ความเค้นเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงภาระภายในที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งมีส่วนประกอบไปด้วยความเค้นตั้งฉากที่เป็นความเค้นดึงและความเค้นกด ส่วนความเครียดเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ โดยความเครียดตั้งฉากเป็นการแสดงถึงการยืดหดของวัสดุ หัวข้อ 3.1.2 เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงกลของวัสดุและนิยามพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ คุณสมบัติที่แสดงถึงความแข็งแรงและคุณสมบัติที่แสดงถึงความแข็งแกร่ง คุณสมบัติที่แสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ ได้แก่ ความเค้นคราก ความเค้นสูงสุด ส่วนคุณสมบัติที่แสดงถึงความแข็งแกร่ง ได้แก่ ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง หัวข้อถัดมาเป็นการกล่าวถึงภาพรวมของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในปัญหาด้านอื่น ๆ เริ่มตั้งแต่การแบ่งรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ การสร้างสมการเอลิเมนต์ รวมไปถึงกระบวนการแก้ระบบสมการเพื่อหาผลลัพธ์ที่ต้องการ ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านของแข็งโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการคำนวณหาค่าเคลื่อนตัว ความเครียดและความเค้น ซึ่งใช้ระเบียบวิธีหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมเพื่อสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้และนำไปประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการคำนวณและแก้ปัญหาวัตถุที่มีความซับซ้อนต่อไปได้

บทที่ 4 การวิเคราะห์ปัญหาเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ปัญหาความเค้นของชิ้นงาน ตัวอย่างที่มีวัสดุ 2 ชนิดเป็นส่วนประกอบ โดยเลือกศึกษาปัญหาที่มีผลเฉลยแม่นยำตรง เพื่อใช้ผลเฉลยแม่นยำตรงนั้น สอบทวนการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหา ในส่วนที่สองของบทนี้กล่าวถึงการศึกษาคอนแทค (Contact) กันของผิวต่างๆ ของวัสดุ เหตุที่ต้องมีการศึกษาคอนแทคกันของพื้นผิวต่าง ๆ ของวัสดุ เนื่องจากแบบจำลองของพื้นที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีส่วนประกอบที่เป็นวัสดุหลาย ๆ ประเภท วัสดุแต่ละประเภทไม่จำเป็นจะต้องยึดติดกัน ผิวสัมผัสบางผิวสัมผัสอาจเคลื่อนที่สัมพันธ์กันได้ การศึกษาในส่วนนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อให้สามารถเลือกใช้รูปแบบของผิวสัมผัสที่เหมาะสม ส่วนที่สามเป็นการเตรียมรูปพื้นที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ แบบจำลองพื้นผิวของพื้นกรามน้อยล่างของฟันแท้และแบบจำลองพื้นผิวของพื้นกรามล่างของฟันน้ำนม เนื้อหาส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาการลู่เข้า เพื่อให้แน่ใจว่าขนาดเอลิเมนต์เพียงพอที่ทำให้ผลเฉลยลู่เข้าสู่ค่าตอบที่แท้จริง

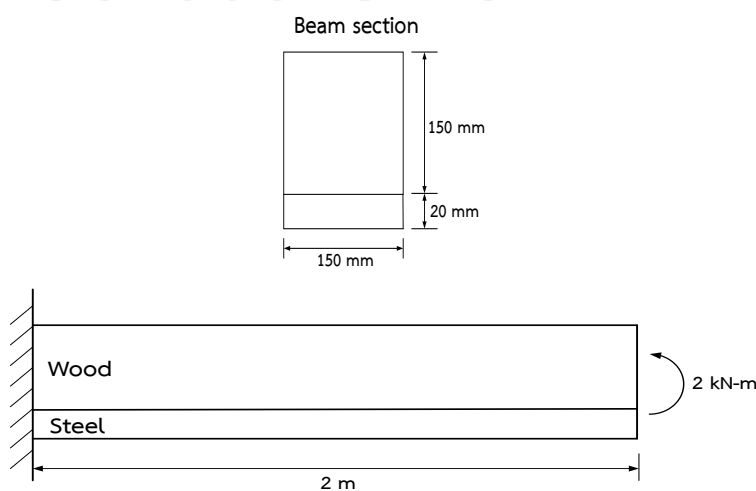
4.1 การทดสอบโปรแกรม ANSYS

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการหาผลลัพธ์กับปัญหาต่าง ๆ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากหาผลลัพธ์ในการคำนวณได้อย่างรวดเร็ว มีโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์หลายโปรแกรมที่สามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาได้ เช่น โปรแกรม MSC, LISA, ALGOR, ANSYS, AUTODESK ฯลฯ โปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวถูกประดิษฐ์ขึ้นมาบนรากฐานระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำมาแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่โดเมนมีรูปร่างซับซ้อน โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้งานได้ง่าย คำนวณผลที่ต้องการได้ในเวลาอันสั้นและสะดวกในการใช้งาน สำหรับปัญหาทางด้านของแข็งการใช้โปรแกรมทำได้ง่ายโดยการกำหนดแรงที่กระทำและเงื่อนไขขอบเขตของโครงสร้างที่ศึกษาลงในโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผล โดยผลที่ได้คือความเค้น ความเครียด และระยะการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์ต่าง ๆ การใช้โปรแกรมผู้ใช้ต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเข้าใจเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา หากไม่เข้าใจเมื่อนำโปรแกรมมาช่วยวิเคราะห์ปัญหา ผลลัพธ์ที่ได้จะเกิดความผิดพลาดหรือเกิดความคลาดเคลื่อนได้โดยง่าย งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS มาช่วยในการวิเคราะห์หาผลเฉลยโดยประมาณของแบบจำลองของฟัน เหตุผลที่เลือกใช้โปรแกรม ANSYS คือโปรแกรม

ANSYS ใช้งานง่าย ไม่มีความซับซ้อนในการใช้งานและเหมาะสมในการวิเคราะห์ด้านกลศาสตร์ของแข็ง

ก่อนที่จะวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างของพิน เนื้อหาในบทนี้จะแสดงการทดสอบการใช้โปรแกรม ANSYS ในการแก้ปัญหา 3 มิติ เพื่อแสดงให้เห็นว่าโปรแกรม ANSYS ให้ผลเฉลยถูกต้องตามทฤษฎี ซึ่งปัญหา 3 มิติที่ใช้คือปัญหาของคานคอมโพสิต (composite beam) ซึ่งเป็นคานที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด เหตุผลที่เลือกใช้ปัญหานี้เพราะแบบจำลองโครงสร้างพินที่มีการอุดหรือครอบพินด้วยวัสดุอื่นเป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด เพื่อเป็นการทดสอบว่าโปรแกรม ANSYS สามารถคำนวณผลลัพธ์จากปัญหาที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิดได้ตรงตามทฤษฎี จึงจะเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยการใช้โปรแกรม ANSYS กับผลเฉลยแม่นยำที่ได้ระเบียบวิธีการวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากคำนวณทั้งสองวิธีควรจะต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

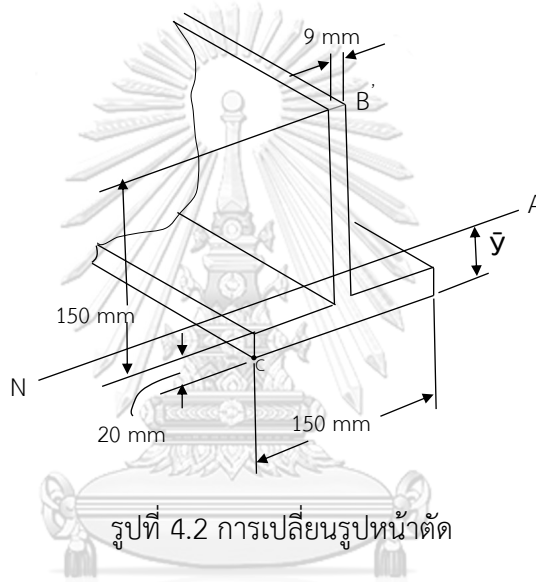
ปัญหาของคาน [45] ที่ใช้ในการสอบทวนผลลัพธ์โปรแกรม ANSYS เป็นคานแบบคอมโพสิต (composite beam) ที่ประกอบขึ้นจากสองวัสดุคือ เหล็กกล้า (steel) และไม้ (wood) มีค่าสมบัติของวัสดุดังนี้ ค่ามอดุลัส (Young's modulus) ของเหล็กกล้าเท่ากับ 200 GPa และค่ามอดุลัสของไม้คือ 12 GPa ปัญหาที่ศึกษาเป็นปัญหาการโก่งของคานที่มีความยาว 2 m โดยคานส่วนที่เป็นไม้มีพื้นที่หน้าตัด $150 \times 150 \text{ mm}^2$ คานส่วนที่เป็นเหล็กกล้ามีพื้นที่หน้าตัด $150 \times 20 \text{ mm}^2$ ประกบกกันอยู่ โดยมีคานส่วนที่เป็นเหล็กอยู่ด้านล่างของคานส่วนที่เป็นไม้ ดังรูปที่ 4.1 คานตัวอย่างนี้รับภาระที่เป็นโมเมนต์ (bending moment) ขนาด 2 kN/m ณ ตำแหน่งปลายของคาน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งมีการรองรับแบบยึดแน่น (fix support) ตลอดพื้นที่หน้าตัดของคาน ความเค้น (normal stress) ที่เกิดขึ้นในคานเหล็กกล้าและคานไม้เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการหา



รูปที่ 4.1 ปัญหาคานที่มี 2 วัสดุประกบกกัน

การแก้ปัญหาของคานคอมโพสิตโดยการวิเคราะห์ ทำได้โดยการแปลงรูป (transform) รูปหน้าตัดของคานคอมโพสิตให้เสมือนเป็นคานวัสดุประเภทเดียว เพื่อให้ปัญหานี้กลายเป็นปัญหาของคานวัสดุเดียว ในกรณีนี้ค่ามอดุลัสของเหล็กมีค่ามากกว่าค่ามอดุลัสของไม้ ($E_{st} > E_w$) ดังนั้นการแปลงรูปหน้าตัดจึงทำได้ โดยการลดขนาดของหน้าตัดไม้ แล้วเปลี่ยนวัสดุให้เป็นเหล็ก ในปัญหานี้ค่า transformation factor $n = \frac{E_w}{E_{st}} = \frac{12}{200}$ ดังนั้นความกว้างของลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ดังรูป 4.2 คือ

$$b_{st} = nb_w = \frac{12}{200}(150) = 9 \text{ mm}$$



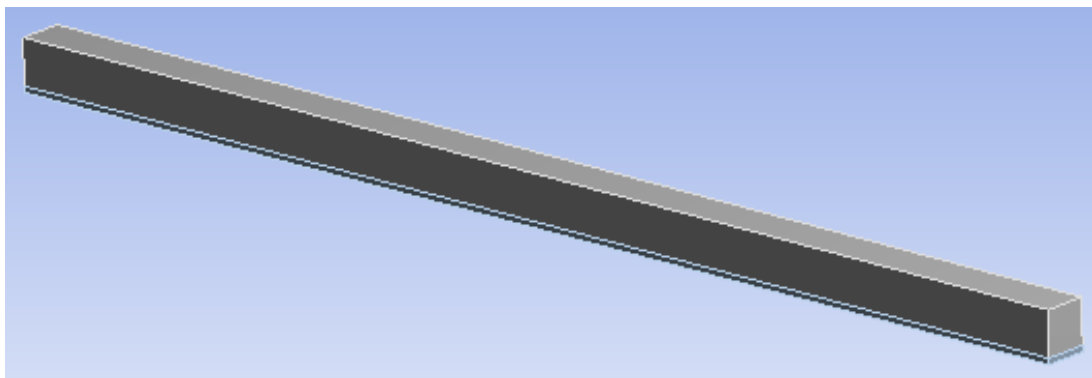
จากนั้นทำการคำนวณหาจุดเซนทร์ทรอยด์ (centroid) จากจุดกลางของคานเหล็ก

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y}A}{\sum A} = \frac{(0.01)(0.02)(0.150) + (0.095)(0.009)(0.150)}{(0.02)(0.150) + (0.009)(0.150)} = 0.03638 \text{ m}$$

และคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้ดังนี้

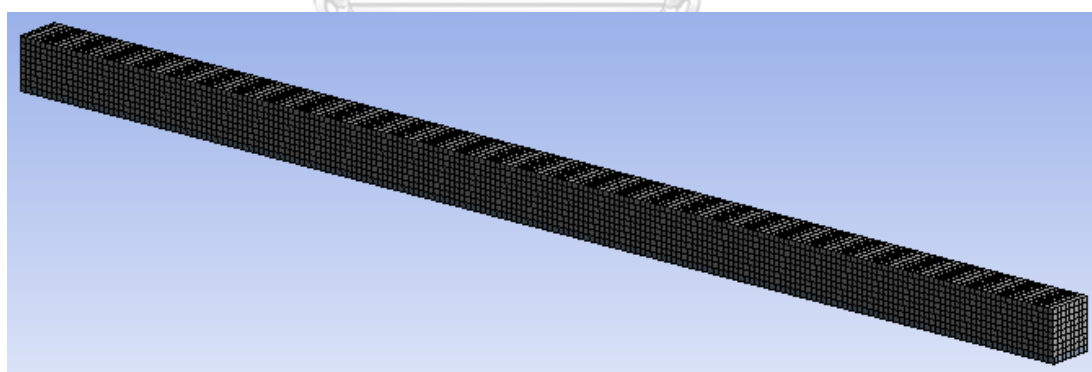
$$\begin{aligned} I_{NA} &= \left[\frac{1}{12}(0.150)(0.02)^3 + (0.150)(0.02)(0.03638 - 0.01)^2 \right] \\ &\quad + \left[\frac{1}{12}(0.009)(0.150)^3 + (0.009)(0.150)(0.095 - 0.03638)^2 \right] \\ &= 9.358(10^{-6}) \text{ m}^4 \end{aligned}$$

มีคานเหล็กประกบอยู่ด้านล่างซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด $150 \times 20 \text{ mm}^2$ และคานไม้ประกบอยู่ด้านบนมีพื้นที่หน้าตัด $150 \times 150 \text{ mm}^2$



รูปที่ 4.4 คานสามมิติ

กำหนดคุณสมบัติของคานในคำสั่ง Engineering data ของโปรแกรม ANSYS ซึ่งกำหนดให้ค่ามอดุลัสของเหล็กเท่ากับ 200 GPa และค่ามอดุลัสของไม้มีค่าเท่ากับ 12 GPa จากนั้นทำการสร้าง Mesh ทำให้ได้เอลิเมนต์ที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นและเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง ในปัญหานี้ใช้รูปร่างของเอลิเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 20 mm ดังรูปที่ 4.5 ผลที่ได้มีจำนวน เอลิเมนต์ที่เป็นรูปหกด้าน (hexahedral) จำนวน 14,400 เอลิเมนต์ และมีจำนวนจุดต่อ 73,668 จุดต่อ



รูปที่ 4.5 คานที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวน 14,400 เอลิเมนต์

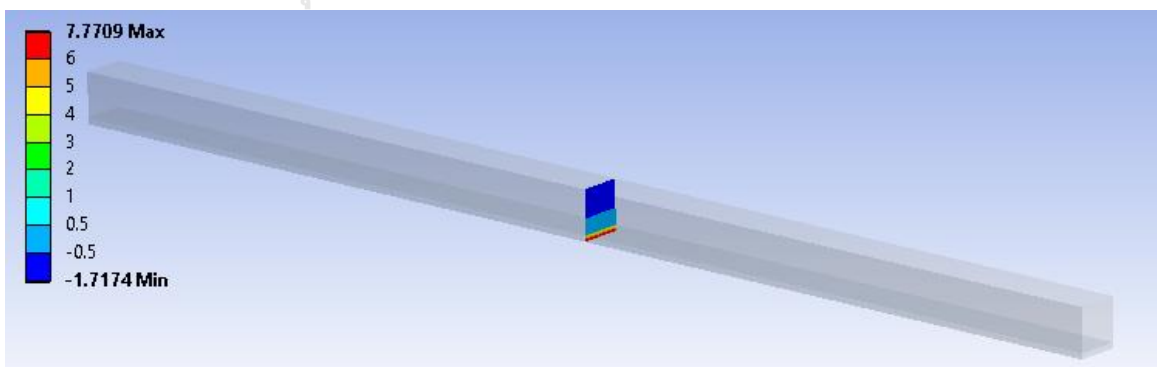
หลังจากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของคาน ดังรูป 4.6 โดยปลายด้านซ้ายของคานมีการรองรับแบบยึดแน่น และอีกปลายด้านหนึ่งมีโมเมนต์ขนาด 2 kN-m กระทำอยู่



รูปที่ 4.6 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของคาน

เมื่อทำการแก้ปัญหา (solve) ในโปรแกรม ANSYS และพิจารณาเฉพาะความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x เพื่อลดผลกระทบจากการรองรับแบบยึดแน่นที่ส่งผลต่อความเค้น จึงพิจารณาความเค้นที่จุดกึ่งกลางของคาน ดังรูป 4.7 พบว่าความเค้นของคานไม้ที่ตำแหน่งบนสุดคือ -1.7174 MPa และความเค้นของคานเหล็กที่ตำแหน่งล่างสุดคือ 7.7709 MPa แล้วนำไปพล็อตกราฟการกระจายความเค้น ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของคาน โดยกำหนดให้แกน x เป็นความเค้น มีหน่วยเป็น MPa และแกน y เป็นความสูงของคาน มีหน่วยเป็น mm ดังรูป 4.8 เมื่อนำความเค้นที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาพล็อตเป็นจุด เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟของผลเฉลยแม่นยำตรงที่เป็นเส้น พบว่าเส้นกับจุดนั้นซ้อนทับกันพอดี ทำให้สามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ให้คำตอบตรงกับผลเฉลยแม่นยำตรง

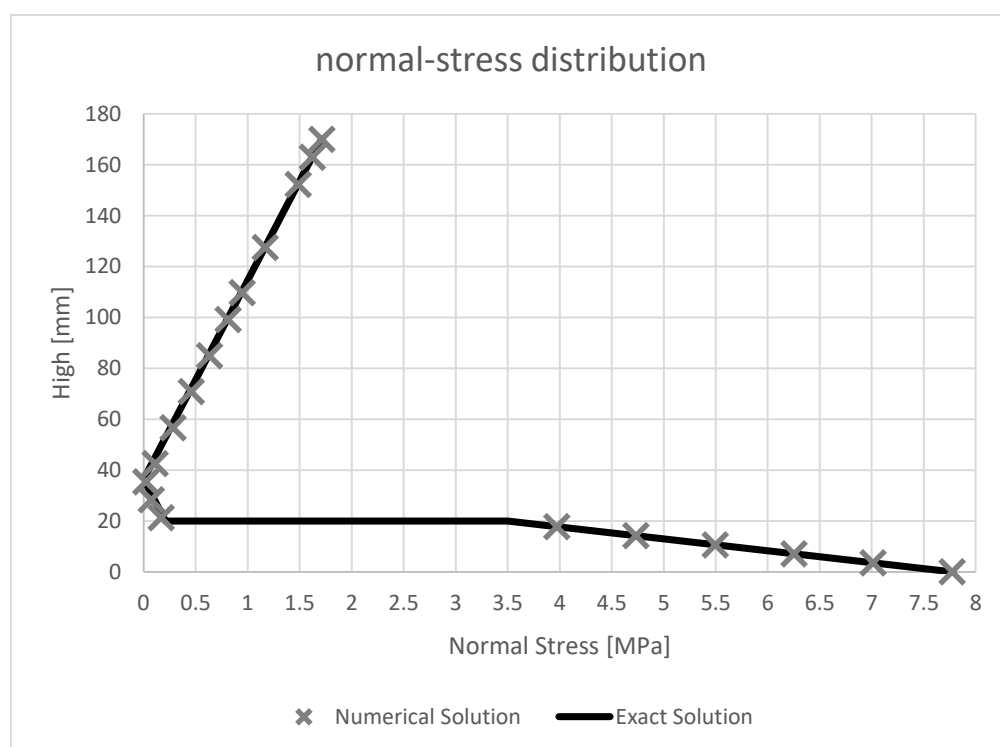
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการเปรียบเทียบกราฟการกระจายความเค้นที่กึ่งกลางคาน พบว่าการคำนวณหาผลลัพธ์โดยวิธีผลเฉลยแม่นยำตรงและโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าประมาณใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีค่า

เท่ากับ 7.7752 MPa และ 7.7709 MPa ตามลำดับสำหรับคานเหล็กกล้า ส่วนคานไม้คือ -1.7136 MPa และ -1.7174 MPa ตามลำดับ มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.06% และ 0.22% ตามลำดับ สำหรับคานเหล็กกล้าและคานไม้ ดังนั้นสามารถนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ ในที่นี้จะนำไปวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างพื้นแบบสามมิติที่มีการอุดพื้นด้วยวัสดุชนิดอื่นและการครอบพื้นด้วยวัสดุอื่น ๆ อีกเช่นกัน



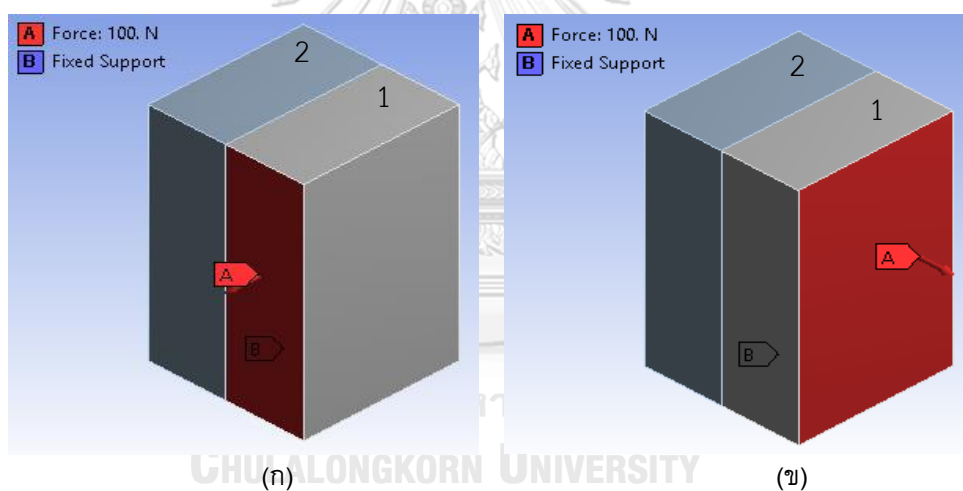
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความเค้นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลเฉลยแม่นยำตรง

4.2 การศึกษาผิวสัมผัส

แบบจำลองโครงสร้างพื้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นแบบจำลองที่ได้รับการรักษาคลองรากพื้นแล้วบูรณะด้วยการอุดพื้นหรือการครอบพื้น ซึ่งวิธีการรักษานี้มีกระบวนการที่ต้องเติมวัสดุอื่นเข้ามาแทนที่เนื้อพื้นและโพรงประสาทฟันในส่วนที่เกิดความเสียหาย จึงเกิดการสัมผัสกันระหว่างชั้นฟันกับวัสดุที่เติมเข้าไป การวิเคราะห์ปัญหาไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Ansys ทำให้ต้องกำหนดเงื่อนไขเกี่ยวกับการสัมผัสกันระหว่างชั้นวัสดุในโครงสร้างพื้น เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นเหมือนพื้นจริงของมนุษย์ โดยที่ผิวสัมผัสในระหว่างชั้นวัสดุแต่ละชนิดมีลักษณะแตกต่างกันออกไป การศึกษาในหัวข้อนี้

เป็นการสอบทวนฟังก์ชันการสัมผัสระหว่างพื้นผิวแบบต่าง ๆ ในโปรแกรม Ansys ได้แก่ การสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกัน (Bonded), การสัมผัสแบบไม่แยกออกจากกัน (No Separation), การสัมผัสแบบไม่มีความฝืด (Frictionless), การสัมผัสแบบแรงเสียดทาน (Frictional) และการสัมผัสแบบขรุขระ (Rough) เพื่อจะได้เลือกใช้ให้เหมาะสมและให้เหมือนกับพื้นของมนุษย์ที่จะศึกษาต่อไป

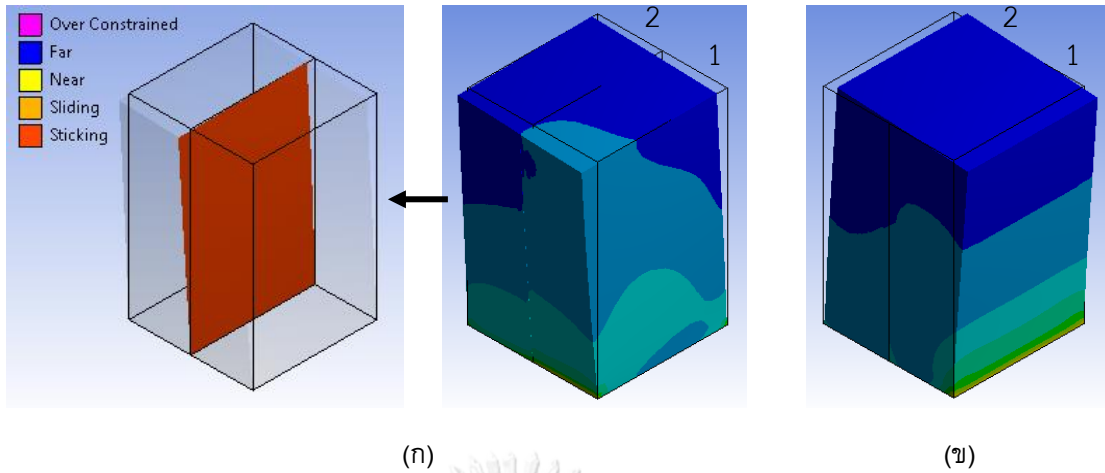
ในการทดสอบฟังก์ชันการสัมผัสในโปรแกรมเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลอง คือแท่งสี่เหลี่ยมสองแท่งติดกัน โดยที่แท่งทั้งสองนี้มีค่ามอดุลัสแตกต่างกัน กล่าวคือแท่งที่ 1 มีค่ามอดุลัสสูงกว่าแท่งที่ 2 และการทดสอบนี้แบ่งตามลักษณะภาระกระทำออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่หนึ่งเป็นการกำหนดแรงกระทำลงบนพื้นผิวด้านหน้าของแท่งที่ 1 ดังรูป 4.9(ก) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการณ์การเลื่อน (slide) ของแท่งวัสดุสองชนิด และแบบที่สองเป็นการกำหนดแรงด้านข้างของแท่งที่ 1 ดังรูป 4.9(ข) การกำหนดแรงในแบบที่ 2 นี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการณ์การแยกออกจากกัน และการศึกษาทั้งสองกรณีได้มีการกำหนดให้พื้นผิวด้านล่างมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบยึดติดฝืนแน่น (fix support)



รูปที่ 4.9 การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง, (ก) ให้ภาระแบบที่ 1, (ข) ให้ภาระแบบที่ 2

การสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกัน (Bonded)

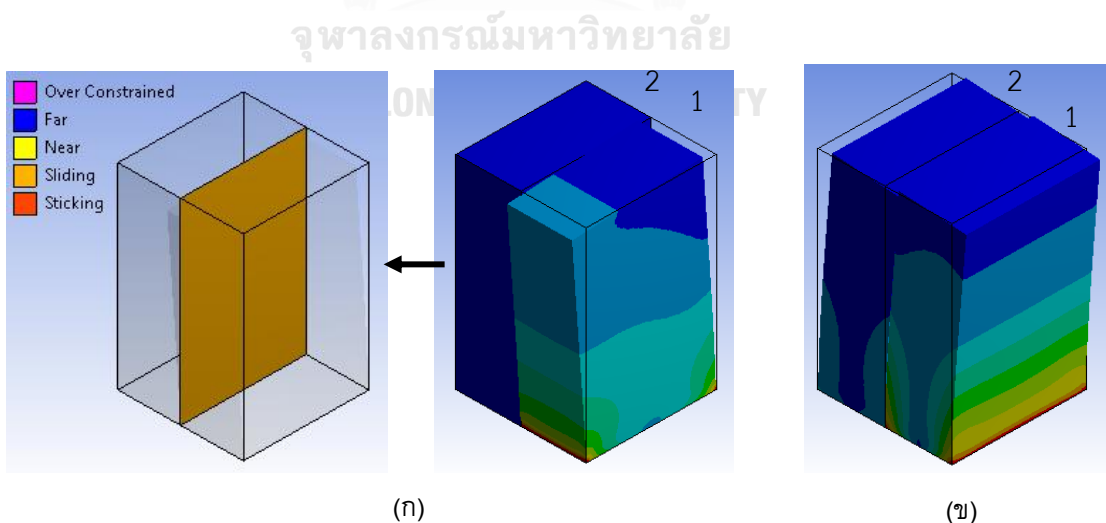
เมื่อกำหนดให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างแท่งสี่เหลี่ยมแท่งที่ 1 และแท่งที่ 2 มีการสัมผัสกันแบบยึดติดไปด้วยกัน จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองแบบจำลองมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดกันไปโดยที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของผิวสัมผัสมีลักษณะติดกัน (sticking) ดังรูปที่ 4.10(ก) และไม่เกิดการแยกออกจากกัน เมื่อมีการให้ภาระในแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.10(ข) ดังนั้นการสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกันมีพฤติกรรมเป็นแบบเคลื่อนที่ติดกันไปและไม่มีการแยกออกจากกัน



รูปที่ 4.10 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Bonded, (ก) ให้ภาระแบบที่ 1, (ข) ให้ภาระแบบที่ 2

การสัมผัสแบบไม่แยกออกจากกัน (No Separation)

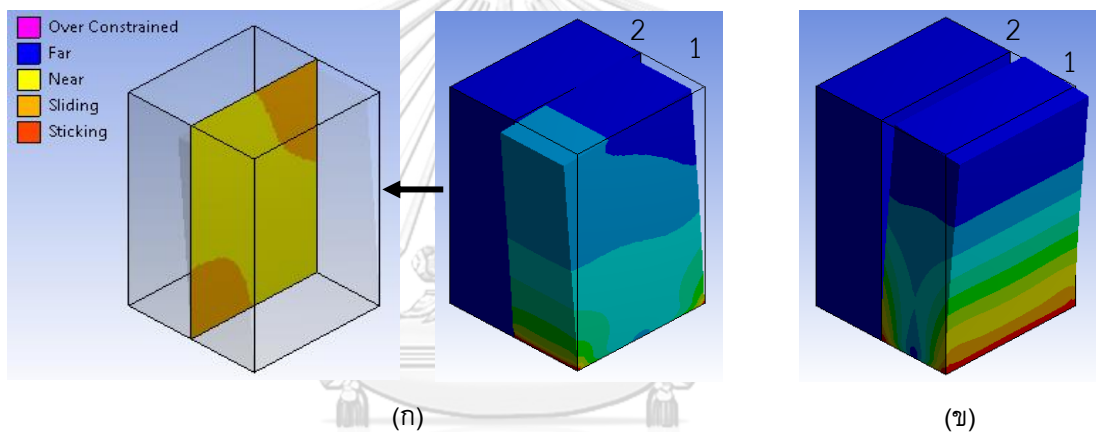
จากการศึกษาการสัมผัสแบบไม่แยกออกจากกันพบว่า เมื่อกำหนดให้แท่งที่ 1 มีผิวสัมผัสแบบไม่แยกออกจากกันกับแท่งที่ 2 จากการทดสอบโดยกำหนดแรงดึงในแท่งที่ 1 จะเห็นว่าผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองมีการเลื่อนออก (sliding) จากกันโดยที่แท่งที่ 1 เลื่อนออกจากแท่งที่ 2 ดังรูปที่ 4.11(ก) แต่ทั้งสองแท่งนี้ไม่มีการแยกออกจากกันและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันตามในระนาบของผิวสัมผัส ดังรูปที่ 4.11(ข) ดังนั้นการสัมผัสแบบไม่แยกออกจากกันมีพฤติกรรมคือสามารถเลื่อนออกจากกันได้แต่ไม่สามารถแยกออกจากกัน



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ No Separation, (ก) ให้ภาระแบบที่ 1, (ข) ให้ภาระแบบที่ 2

การสัมผัสแบบไม่มีความฝืด (Frictionless)

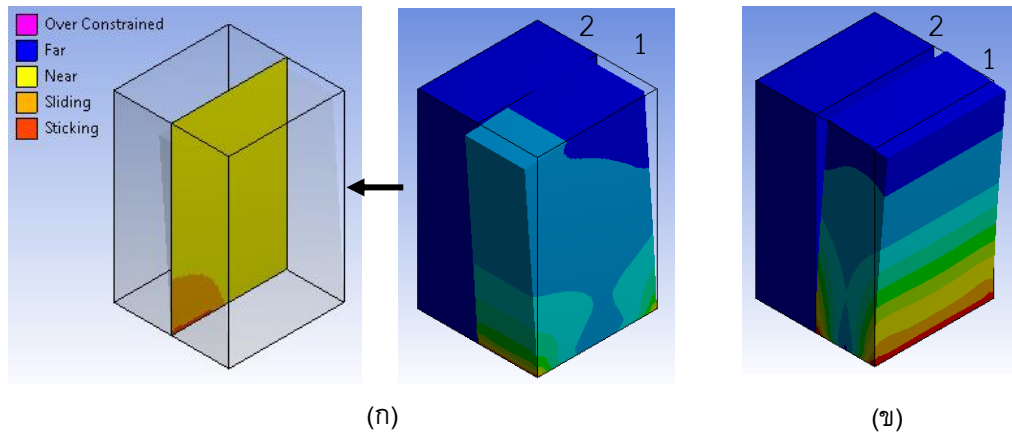
เมื่อกำหนดผิวสัมผัสระหว่างแท่งที่ 1 และแท่งที่ 2 เป็นแบบไม่มีความฝืดพบว่า จากการทดสอบโดยให้ภาระแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าผิวสัมผัสทั้งสองแท่งนี้มีการเลื่อนออกจากด้านมุมขวาบน และมุมด้านซ้ายล่างของผิวสัมผัสในลักษณะเป็นวงกว้างและตำแหน่งต่าง ๆ นอกเหนือจากนั้นของ ผิวสัมผัสมีลักษณะเป็นการเลื่อนออกแบบใกล้เคียงกัน (near) ดังรูปที่ 4.12(ก) ทำให้การสัมผัสแบบไม่มีความฝืดมีการเคลื่อนที่ออกจากกัน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคือ 0 และผลการทดสอบนี้ สอดคล้องกับการทดสอบโดยให้ภาระแบบที่ 2 คือแท่งที่ 1 มีการเคลื่อนที่แยกออกจากแท่งที่ 2 ดังรูปที่ 4.12(ข) ดังนั้นการสัมผัสแบบไม่มีความฝืดมีพฤติกรรมคือ ผิวสัมผัสทั้งสองด้านมีการแยกออกจากกันและมีการเลื่อนออกจากกัน นั้นหมายความว่า การสัมผัสแบบนี้มีลักษณะแบบแรงเสียดทานที่ไม่มีภาระด้าน



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Frictionless, (ก) ให้ภาระแบบที่ 1, (ข) ให้ภาระแบบที่ 2

การสัมผัสแบบแรงเสียดทาน (Frictional)

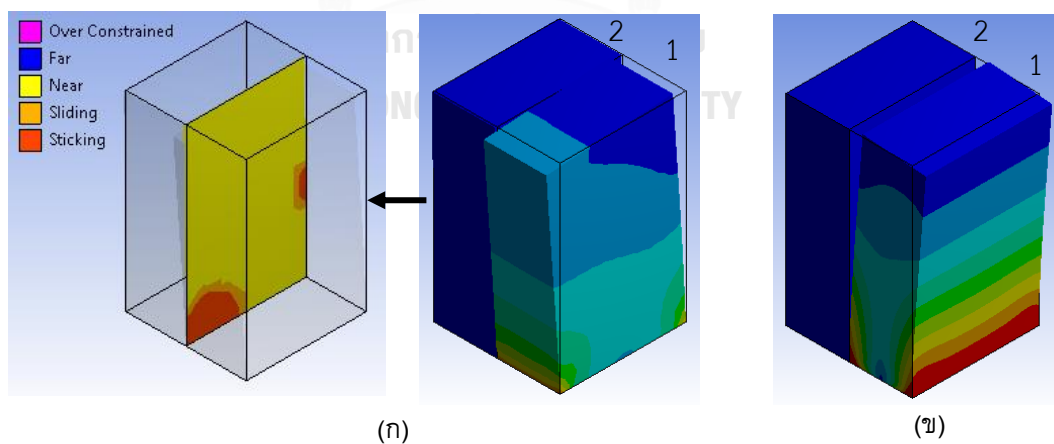
จากผลการศึกษาการสัมผัสแบบแรงเสียดทาน โดยมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการศึกษานี้คือ 0.4 พบว่าการทดสอบโดยการให้ภาระแบบที่ 1 ลักษณะของผิวสัมผัสทั้งสองแท่งนี้มีการเลื่อนที่มุมด้านขวาบนและมุมด้านซ้ายล่าง โดยที่ตำแหน่งขอบด้านล่างของมุมด้านซ้ายของผิวสัมผัสมีลักษณะติดกันไป ดังรูปที่ 4.13(ก) นอกจากนั้นตำแหน่งผิวสัมผัสที่เหลือเป็นการแยกออกจากกันในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และจากรูป 4.13(ข) เป็นการทดสอบโดยการให้ภาระแบบที่ 2 จะเห็นว่าแท่งที่ 1 มีการเคลื่อนที่แยกออกจากแท่งที่ 2 ดังนั้นการสัมผัสแบบแรงเสียดทานมีพฤติกรรมคือ ผิวสัมผัสทั้งสองด้านมีการแยกออกจากกันและมีการเลื่อน แต่การเลื่อนของแท่งที่หนึ่งเลื่อนได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสัมผัสแบบไม่มีความฝืด เนื่องจากมีแรงต้านกับแรงกระทำ



รูปที่ 4.13 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Frictional, (ก) ให้ภาวะแบบที่ 1, (ข) ให้ภาวะแบบที่ 2

การสัมผัสแบบขรุขระ (Rough)

เมื่อกำหนดให้ผิวสัมผัสของทั้งสองแท่งเป็นแบบขรุขระ จากผลการทดสอบพบว่า แท่งที่ 1 เลื่อนออกจากแท่งที่ 2 โดยตำแหน่งผิวสัมผัสส่วนใหญ่แยกออกจากกันในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน บางบริเวณผิวสัมผัสโดยเฉพาะมุมล่างด้านซ้ายและขอบตรงกลางด้านขวามีลักษณะติดกันไป ดังรูปที่ 4.14(ก) ส่วนรูป 4.14(ข) แสดงให้เห็นว่าการสัมผัสแบบขรุขระเกิดการแยกออกจากกันของแท่งทั้งสอง ดังนั้นการสัมผัสแบบขรุขระมีพฤติกรรมคือ ผิวสัมผัสมีการเคลื่อนที่ติดไปด้วยกัน ส่วนบริเวณอื่นเกิดการแยกออกจากกัน



รูปที่ 4.14 พฤติกรรมของผิวสัมผัสแบบ Rough, (ก) ให้ภาวะแบบที่ 1, (ข) ให้ภาวะแบบที่ 2

จากการทดสอบฟังก์ชันการสัมผัสที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจึงขอสรุปเป็นแบบตาราง ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันการสัมผัสและพฤติกรรม

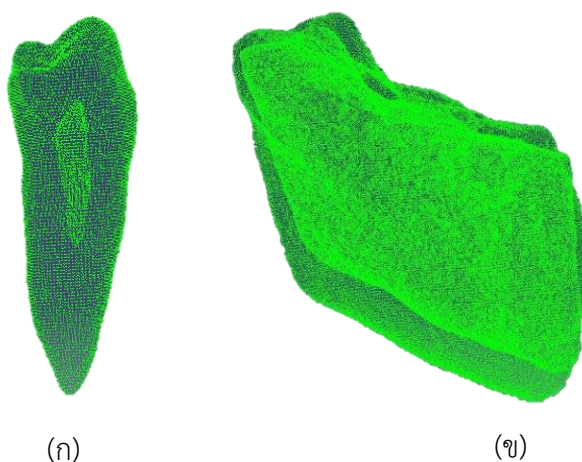
ฟังก์ชันการสัมผัส	การเลื่อน	การแยกออกจากกัน
Bonded	ไม่มีการเลื่อน	ไม่แยกออกจากกัน
No Separation	มีการเลื่อน, $\mu = 0$	ไม่แยกออกจากกัน
Frictionless	มีการเลื่อน, $\mu = 0$	เกิดการแยกออกจากกัน
Frictional	มีการเลื่อน, เมื่อ $F_{\text{sliding}} > F_{\text{friction}}$	เกิดการแยกออกจากกัน
Rough	ไม่มีการเลื่อน, $\mu = \infty$	เกิดการแยกออกจากกัน

4.3 การเตรียมรูปพื้น

การวิเคราะห์ความเค้นในฟันในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องมีการสร้างแบบจำลองก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นของแข็ง (solid) ในขณะที่ไฟล์ที่ได้จากการสแกน (Scan) เป็นไฟล์ที่ประกอบด้วยจุดที่อยู่บนพื้นผิวของฟันเป็นส่วนใหญ่ จึงต้องมีการเปลี่ยนไฟล์จากการสแกนให้เป็นไฟล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ การเตรียมรูปเริ่มจากการถ่ายภาพเอกซเรย์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CT scan) ดังรูปที่ 4.15 ภาพถ่ายดังกล่าวมีลักษณะเป็นจุดจำนวนมากประกอบเข้าด้วยกัน (cloud point) จากนั้นทำการปรับแต่งแบบจำลองให้กลายเป็นของแข็ง โดยใช้โปรแกรม CATIA เป็นโปรแกรมช่วยในการสร้างรูปจำลองฟัน ฟันที่นำมาแสดงในหัวข้อนี้คือฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้และฟันกรามล่างของฟันน้ำนม

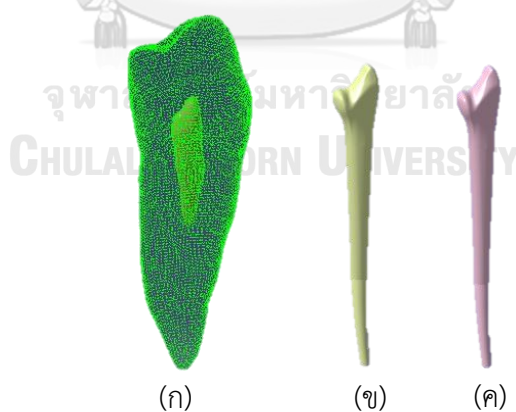
ฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้

ฟันของมนุษย์มีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ คือ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน โพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่อยู่ส่วนนอกของรากฟันและชั้นกระดูกขากรรไกร ดังนั้นจึงต้องปรับเปลี่ยนไฟล์สแกนนี้ให้ได้แบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีลักษณะแบ่งเป็นส่วนให้เสมือนของจริงมากที่สุด เริ่มจากตัดชิ้นส่วนบนและส่วนล่างของตัวฟันของฟันออกจากกัน เพื่อที่จะทำการแยกชั้นโพรงประสาทฟันออกจากตัวฟัน ดังรูปที่ 4.16(ก) เพราะว่าโพรงประสาทฟันเป็นชั้นที่มีเส้นประสาทและหลอดเลือดอยู่เป็นจำนวนมากและยังมีคุณสมบัติที่ต่างจากชั้นอื่น ๆ



รูปที่ 4.15 ไฟล์สแกน (CT scan) ฟันกรามน้อยล่างและชั้นกระดูก

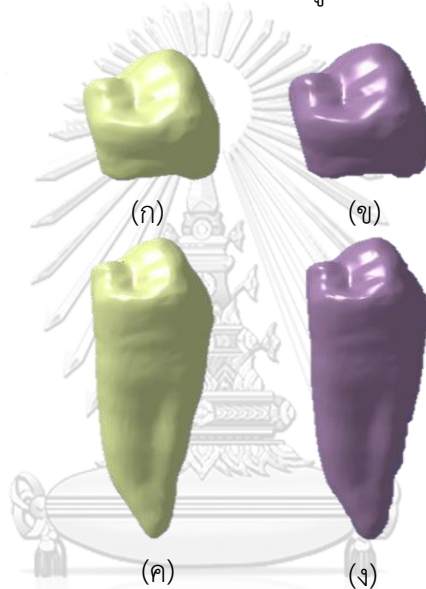
ส่วนโพรงประสาทฟันของมนุษย์จะมีความยาวทะลุจนไปถึงรากฟัน ซึ่งมีรูปร่างลักษณะที่มีความยาวลู่ลงจนไปถึงรากฟัน แต่ในไฟล์ CT Scan บางครั้งไม่สามารถสแกนภายในตัวฟันได้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องทำการวาดโพรงประสาทฟันส่วนล่างที่ยื่นออกจากตัวโพรงประสาทฟันลงสู่รากและปรับแต่งโพรงประสาทส่วนด้านบนให้มีลักษณะคล้ายกับด้านบนของตัวฟัน ดังรูปที่ 4.16(ข) จากนั้นจึงสร้างพื้นผิวให้โพรงประสาทฟัน แล้วจึงทำการเปลี่ยนให้มีลักษณะเป็นของแข็งต่อไป ดังรูปที่ 4.16(ค)



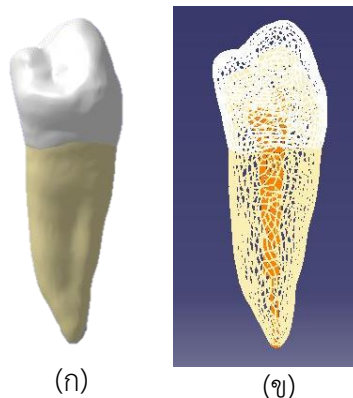
รูปที่ 4.16 การสร้างโพรงประสาทฟัน, (ก) การแยกโพรงประสาทฟันออกจากตัวฟัน, (ข) โพรงประสาทฟันที่มีความยาวจนถึงรากฟัน, (ค) แบบจำลองโพรงประสาทฟันที่เป็นของแข็ง

ฟันของมนุษย์โดยปกติมีส่วนประกอบอยู่สองส่วนคือส่วนที่ยื่นออกจากเหงือกและส่วนรากที่ติดอยู่กับกระดูกขากรรไกร ส่วนที่ยื่นออกมาจากเหงือกมีชั้นเนื้อฟันและมีชั้นเคลือบฟันที่ห่อหุ้มชั้น

เนื้อฟันอยู่ ทั้งสองชั้นนี้มีคุณสมบัติที่ต่างกัน เพื่อให้แบบจำลองโครงสร้างฟันมีลักษณะที่เหมือนจริงมากที่สุด จึงทำการแยกชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟันออกจากกัน ดังรูปที่ 4.17(ก) และ 4.17(ค) ซึ่งรอยต่อระหว่างชั้นทั้งสองนี้มีส่วนโค้งเว้าตามแนว CEJ (Cemento-Enamel junction) ซึ่งเป็นแนวรอยต่อเคลือบฟันกับเนื้อฟันส่วนรากของฟันมนุษย์ จากนั้นนำแบบจำลองทั้งสองชั้นมาสร้างเป็นของแข็งต่อไป ดังรูปที่ 4.17(ข) และ 4.17(ง) จากนั้นนำมาประกอบรวมเข้าด้วยกันให้เป็นตัวฟัน ดังรูปที่ 4.18(ก) เพื่อที่นำไปวิเคราะห์ปัญหาทางด้านของฟันต่อไป โดยภายในชั้นเนื้อฟันจะมีชั้นโพรงประสาทฟันอยู่และเมื่อมองแบบโครงสร้าง (wireframe) ของแบบจำลองจะได้ ดังรูปที่ 4.18(ข) เห็นได้ว่าแบบจำลองโครงสร้างฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้มีรูปร่างที่เหมือนในโครงสร้างฟันของมนุษย์

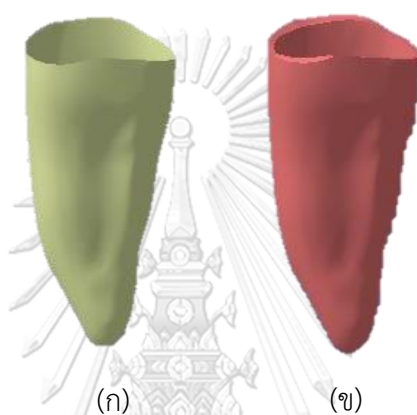


รูปที่ 4.17 การแยกชั้นฟัน, (ก) ผิวของชั้นเคลือบฟัน, (ข) ผิวของชั้นเนื้อฟัน, (ค) ชั้นเคลือบฟันที่มีลักษณะเป็นของแข็ง (ง) ชั้นเนื้อฟันที่มีลักษณะเป็นของแข็ง



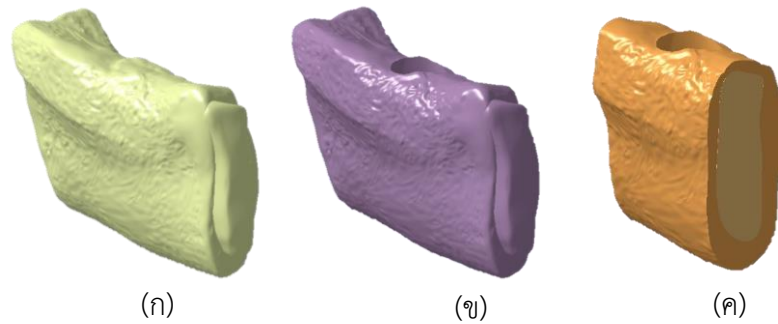
รูปที่ 4.18 แบบจำลองโครงสร้างของตัวฟัน, (ก) ภาพรวมของแบบจำลองตัวฟัน, (ข) การแสดงแบบ wireframe

โครงสร้างฟันของมนุษย์มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นเอ็นเส้นเล็กกระจายตามเนื้อฟัน เพื่อยึดส่วนของเนื้อฟันให้ติดกับกระดูกขากรรไกร ในวิทยานิพนธ์จึงได้มีการสร้างชั้นเอ็นยึดปริทันต์ขึ้น โดยให้มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่ห่อหุ้มส่วนรากของชั้นเนื้อฟันและอยู่ระหว่างชั้นเนื้อฟันกับกระดูกขากรรไกร เอ็นยึดปริทันต์ในแบบจำลองสร้างมาจากการตัดผิวของชั้นเนื้อฟันออก ให้เหลือแผ่นผิวชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง การตัดผิวชั้นเนื้อฟันนี้ตัดตามรอย CEJ ซึ่งผิวด้านบนของชั้นเอ็นยึดปริทันต์มีระยะห่างจาก CEJ 2 mm ดังรูป 4.19(ก) จากนั้นทำการเพิ่มความหนาให้กับผิวของชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ดังรูป 4.19(ข)



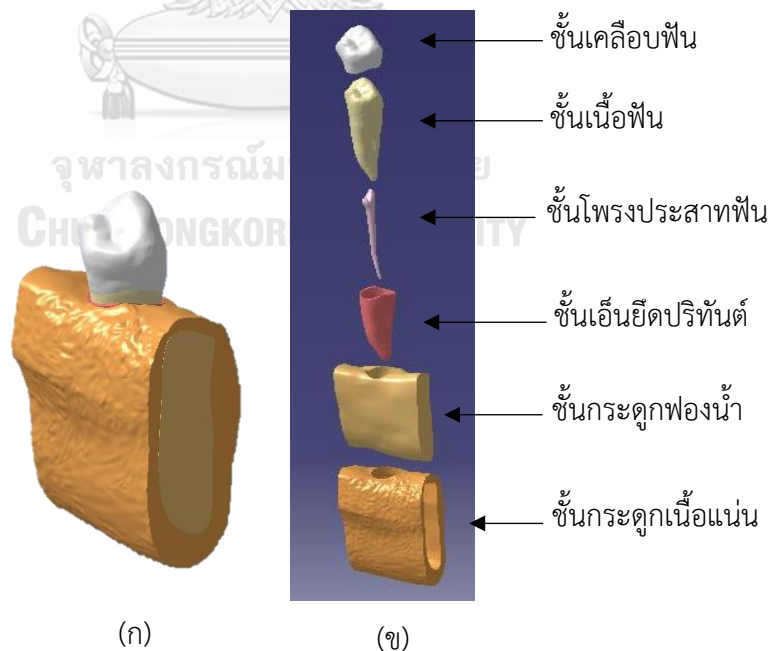
รูปที่ 4.19 แบบจำลองเอ็นยึดปริทันต์, (ก) ลักษณะการตัด, (ข) เอ็นยึดปริทันต์ที่มีความหนา

กระดูกของมนุษย์ประกอบไปด้วยกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกฟองน้ำ จากภาพถ่าย CT scan ดังรูป 4.15 จะเห็นว่าภาพถ่ายนี้มีกระดูกสองชั้น จึงทำการสร้างพื้นที่ผิวของกระดูกทั้งสองชั้นนี้ ดังรูป 4.20(ก) จากนั้นทำให้เกิดช่องว่างด้านบนผิวกระดูกทั้งสองชั้นนี้ เพื่อให้แบบจำลองตัวฟันและแบบจำลองเอ็นยึดปริทันต์มาใส่ในแบบจำลองกระดูกได้แนบชิดติดกัน แล้วนำมาสร้างเป็นแบบจำลองของแข็ง ดังรูป 4.20(ข) จากนั้นทำการตกแต่งและตัดกระดูกด้านข้างทั้งสองด้านออก เพราะว่ากระดูกขากรรไกรมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวฟันและเมื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์กระดูกในส่วนที่ตัดออกมีผลต่อผลการวิเคราะห์น้อยมากจึงตัดออกได้ แบบจำลองกระดูกในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยกระดูกชั้นเนื้อแน่นและกระดูกชั้นฟองน้ำตามโครงสร้างกระดูกของมนุษย์ ดังแสดงในรูป 4.20(ค)



รูปที่ 4.20 แบบจำลองกระดูก, (ก) การสร้างผิวกระดูก, (ข) แบบจำลองกระดูกที่มีลักษณะเป็นของแข็ง, (ค) แบบจำลองกระดูกที่ใช้ในการวิเคราะห์

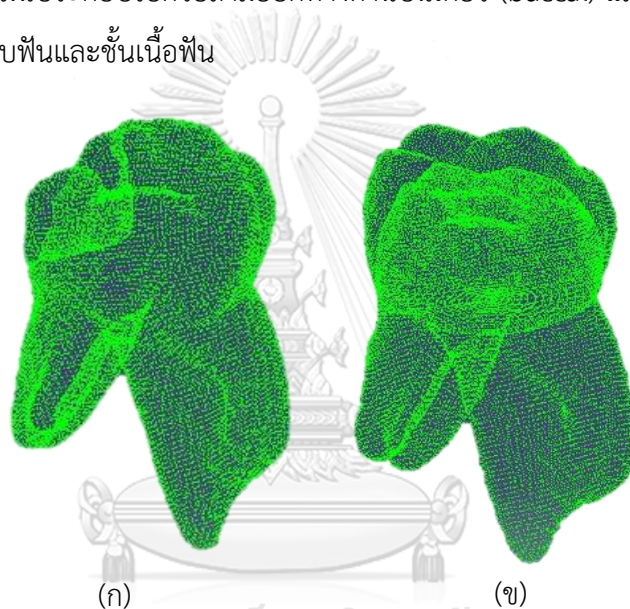
เมื่อได้แบบจำลองของโครงสร้างฟันในแต่ละส่วนที่มีลักษณะเป็นของแข็งครบตามที่ต้องการ จากนั้นนำแบบจำลองส่วนต่าง ๆ มาประกอบรวมกันจะได้ลักษณะโครงสร้างฟัน ดังรูปที่ 4.21(ก) ตามที่ต้องการ เพื่อให้แบบจำลองเหมือนกับฟันมนุษย์มากที่สุด การเรียงลำดับของแบบจำลองโครงสร้างฟันเรียงจากชั้นด้านบนสุดเป็นชั้นเคลือบฟัน รองลงมาเป็นชั้นเนื้อฟัน โพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ กระดูกฟองน้ำและกระดูกเนื้อแน่นตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21(ข) แบบจำลองนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ความเค้นและใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ของฟันต่อไป



รูปที่ 4.21 แบบจำลองฟันที่มีโครงสร้างเหมือนฟันมนุษย์, (ก) แบบจำลองโครงสร้างของฟันกรามน้อยล่างที่เป็นฟันแท้, (ข) การเรียงตัวของแบบจำลอง

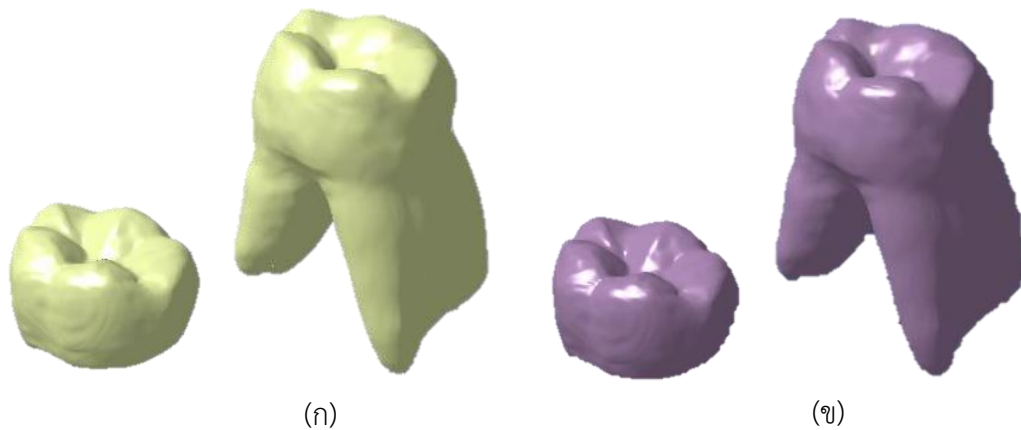
ฟันกรามล่างของฟันน้ำนม

แบบจำลองโครงสร้างฟันดีอีกแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ แบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนม จากถ่ายภาพเอ็กซเรย์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม พบว่าภาพถ่ายนั้นเป็นไฟล์ฟันที่ไม่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.22(ก) อาจเป็นเพราะฟันที่ใช้ในการสแกนได้รับความเสียหายหรือการสแกนไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีการต่อเติมปรับแต่งให้สมบูรณ์และเพิ่มขึ้นเนื้อฟันเข้ามา เพื่อให้เหมือนโครงสร้างฟันมนุษย์มากที่สุด ดังรูปที่ 4.22(ข) โดยยอดของชั้นเนื้อฟันมีลักษณะเป็นไปตามยอดของชั้นเคลือบฟัน ดังนั้นแบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนมนี้ประกอบไปด้วยสามยอดทางด้านบนเคี้ยว (buccal) และสองยอดทางด้านลิ้น (lingual) ทั้งชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟัน



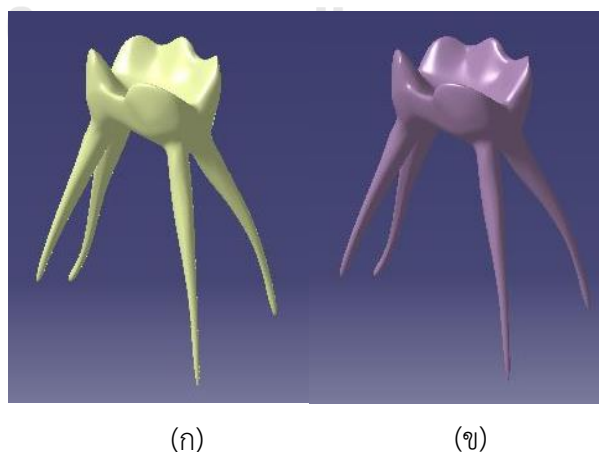
รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย CT scan ของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม, (ก) ไฟล์สแกนต้นฉบับ, (ข) ไฟล์สแกนที่มีการปรับปรุง

หลังจากปรับปรุงไฟล์สแกนของฟันกรามล่างของฟันน้ำนมแล้ว จึงสร้างพื้นผิวของฟันและแยกชั้นเคลือบฟันออกจากชั้นเนื้อฟันตามรอยแนว CEJ ดังรูปที่ 4.23(ก) และ 4.23(ข) เพื่อให้ได้แบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีลักษณะแบ่งเป็นชั้นเหมือนชั้นของฟันมนุษย์มากที่สุด เนื่องจากฟันมนุษย์มีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ คือ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน โพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูกขากรรไกร จากนั้นเปลี่ยนผิวของทั้งสองชั้นนี้ให้กลายเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นของแข็ง



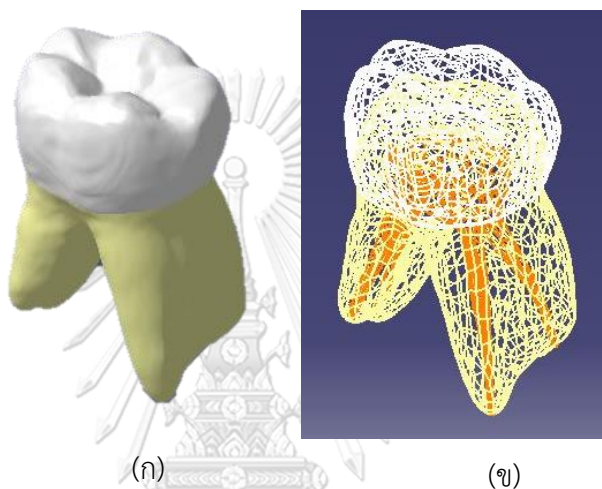
รูปที่ 4.23 แบบจำลองตัวฟันของฟัน, (ก) ผิวของชั้นฟัน, (ข) แบบจำลองที่มีลักษณะเป็นของแข็ง

จากภาพถ่าย CT scan ของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม จะเห็นได้ว่าภาพถ่ายนี้ไม่มีชั้นโพรงประสาทฟันจึงได้มีการวาดโพรงประสาทฟันขึ้นมา โดยส่วนยอดของโพรงประสาทฟันมีลักษณะตามยอดของชั้นเคลือบฟันกล่าวคือ สามยอดในด้านบดเคี้ยวและสองยอดในด้านลิ้น ดังรูปที่ 4.24(ก) ส่วนรากของโพรงประสาทฟันในฟันฟันกรามล่างของฟันน้ำนมมีลักษณะเป็นท่อที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลงไปตามรากฟันและมีทั้งหมด 4 รากโพรงประสาทฟัน ดังนั้นจึงวาดรากของโพรงประสาทฟันเป็นท่อและมีขนาดเล็กลงไปตามรากฟันและมี 4 รากฟันตามโพรงประสาทฟันของมนุษย์ พอได้แบบจำลองโพรงประสาทฟันตามที่ต้องการแล้วจึงเปลี่ยนแบบจำลองโพรงประสาทฟันนี้ให้กลายเป็นแบบจำลองของแข็ง ดังรูปที่ 4.24(ข) จากนั้นนำชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟันและโพรงประสาทฟันมาประกอบรวมกัน ดังรูป 4.25(ก) โดยที่ชั้นเนื้อฟันมีชั้นโพรงประสาทฟันอยู่ด้านใน ดังรูปที่ 4.25(ข)

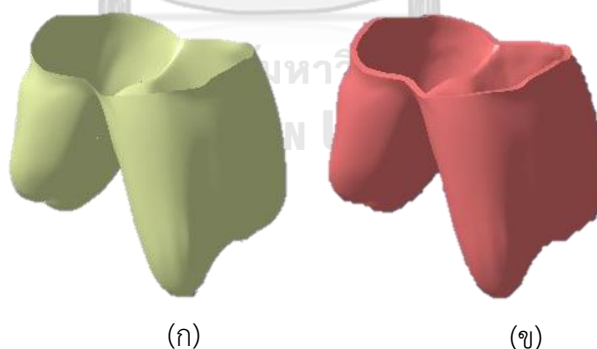


รูปที่ 4.24 แบบจำลองโพรงประสาทฟัน, (ก) ผิวชั้นโพรงประสาทฟัน, (ข) แบบจำลองของแข็ง

โครงสร้างฟันของมนุษย์มีเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นเอ็นเป็นจำนวนมากที่กระจายตามรากของเนื้อฟัน มีหน้าที่ช่วยในการยึดติดระหว่างตัวเนื้อฟันและกระดูกขากรรไกร ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างชั้นเอ็นยึดปริทันต์ขึ้น โดยทำการตัดส่วนบนของชั้นเนื้อฟันออกให้มีระยะต่ำกว่าขอบ CEJ 2 mm และมีส่วนโค้งเว้าตามขอบ CEJ ดังรูปที่ 4.26(ก) จากรูป 4.26(ก) จะเห็นได้ว่าผิวของชั้นเอ็นยึดปริทันต์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง เพื่อจำลองชั้นนี้ตามโครงสร้างฟันของมนุษย์จึงทำการเพิ่มความหนาให้กับผิวชั้นเอ็นยึดปริทันต์ จากนั้นทำการสร้างให้อยู่ในรูปของของแข็ง ดังรูปที่ 4.26(ข)



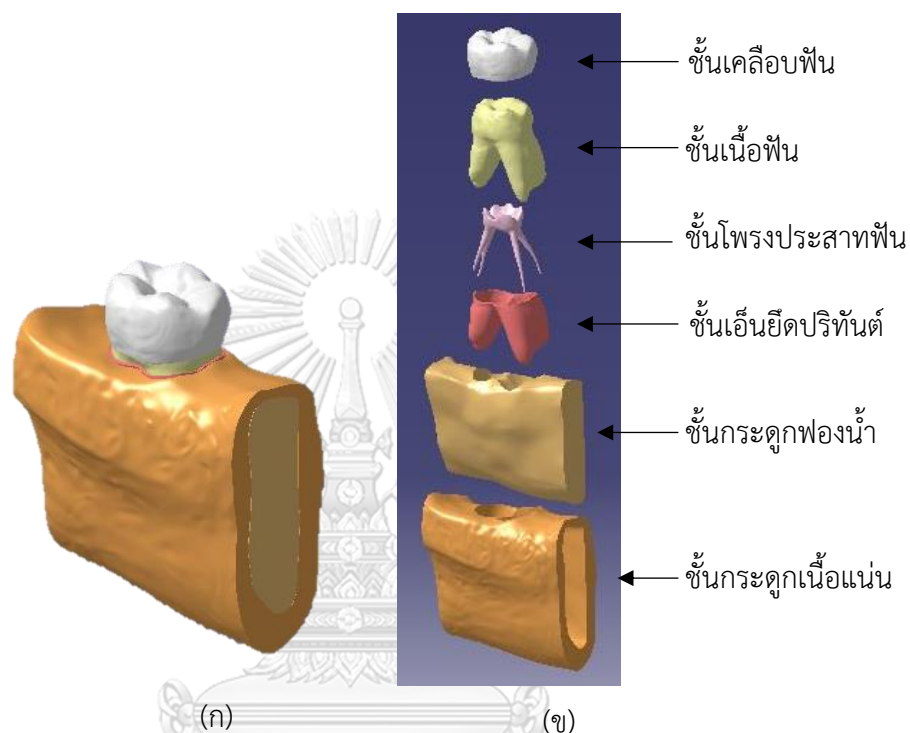
รูปที่ 4.25 แบบจำลองโครงสร้างตัวฟัน, (ก) ภาพรวมตัวฟัน, (ข) ภาพโครงสร้างตัวฟัน



รูปที่ 4.26 ชั้นเอ็นยึดปริทันต์, (ก) ผิวชั้นเอ็น, (ข) ชั้นเอ็นที่มีความหนา

เมื่อได้แบบจำลองแต่ละส่วนในโครงสร้างครบตามที่ต้องการและเป็นรูปแบบของแข็งมาเรียงลำดับให้เหมือนตามฟันของมนุษย์ เริ่มจากชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน โพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ โดยชั้นโพรงประสาทฟันอยู่ด้านในของชั้นเนื้อฟัน จากนั้นนำชั้นกระดูกขากรรไกรที่ได้กล่าว

ไปในหัวข้อก่อนหน้านี้มาประกอบรวมอยู่ในแบบจำลองโครงสร้างนี้ด้วย ดังรูปที่ 4.27(ข) โดยในชั้นกระดูกนี้ประกอบด้วย 2 ชั้นคือ กระดูกหนาแน่นที่อยู่ด้านนอกสุดของกระดูกขากรรไกรและกระดูกฟองน้ำที่อยู่ด้านในของกระดูกหนาแน่น เมื่อนำแต่ละส่วนประกอบเข้าด้วยกันจะได้ลักษณะโครงสร้างฟัน ดังรูปที่ 4.27(ก) ตามที่ต้องการ เพื่อนำไปวิเคราะห์ที่ในการแก้ปัญหาของฟันต่อไป



รูปที่ 4.27 แบบจำลองโครงสร้างฟัน, (ก) แบบจำลองโครงสร้างของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม,

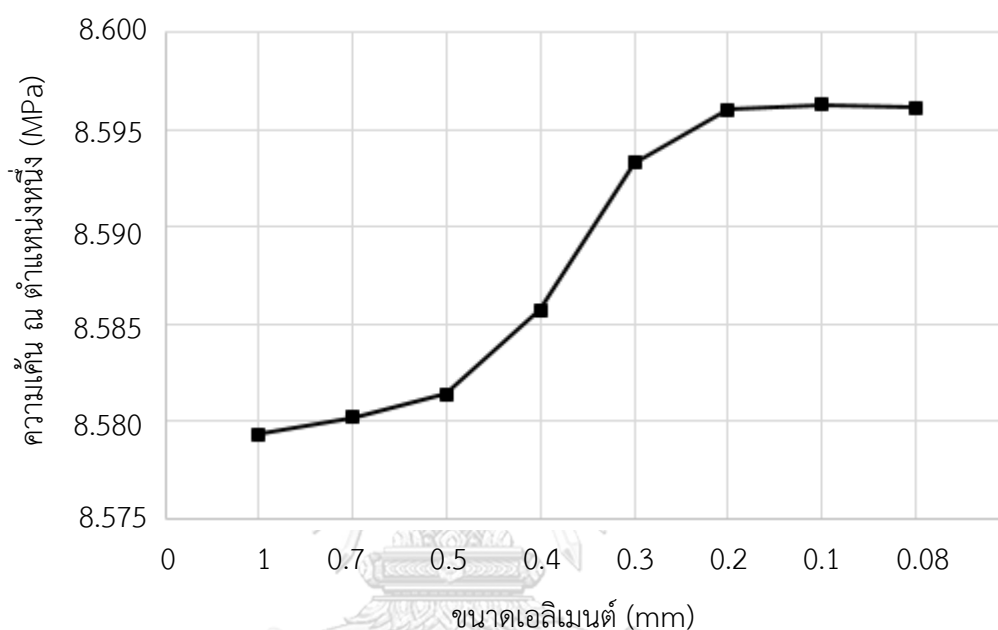
(ข) การเรียงตัวของแบบจำลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 การศึกษาการลู่เข้า

การศึกษาปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องมีการศึกษาการลู่เข้าของคำตอบที่ได้ การศึกษาการลู่เข้าของแบบจำลองทำให้แน่ใจว่าการวิเคราะห์ดังกล่าว มีการใช้จำนวน เอลิเมนต์มากพอและผลเฉลยที่ได้ลู่เข้าสู่คำตอบที่ถูกต้อง การศึกษานี้เป็นการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในแบบจำลองฟัน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเอ็นยึดปริทันต์ โดยมีการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของชั้นต่าง ๆ ได้แก่ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟันและโพรงประสาทฟันไว้ที่ 0.3 mm และกระดูกกำหนดขนาดไว้ที่ 1 mm เมื่อพิจารณาความเค้นที่ตำแหน่งหนึ่งในแบบจำลองฟัน พบว่าเมื่อขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเอ็น

ยึดปริพันธ์มีขนาดเล็กลง ความเค้นที่ได้มีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จะเห็นว่า การวิเคราะห์ปัญหาโดยกำหนดให้เอลิเมนต์มีขนาด 0.2 mm, 0.1 mm หรือ 0.08 mm จะให้ผลของความเค้นที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าที่สามารถถือได้ว่าคงที่ และอาจกล่าวได้ว่าการใช้เอลิเมนต์ขนาด 0.2 mm จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ลู่เข้าคำตอบที่ต้องการแล้ว

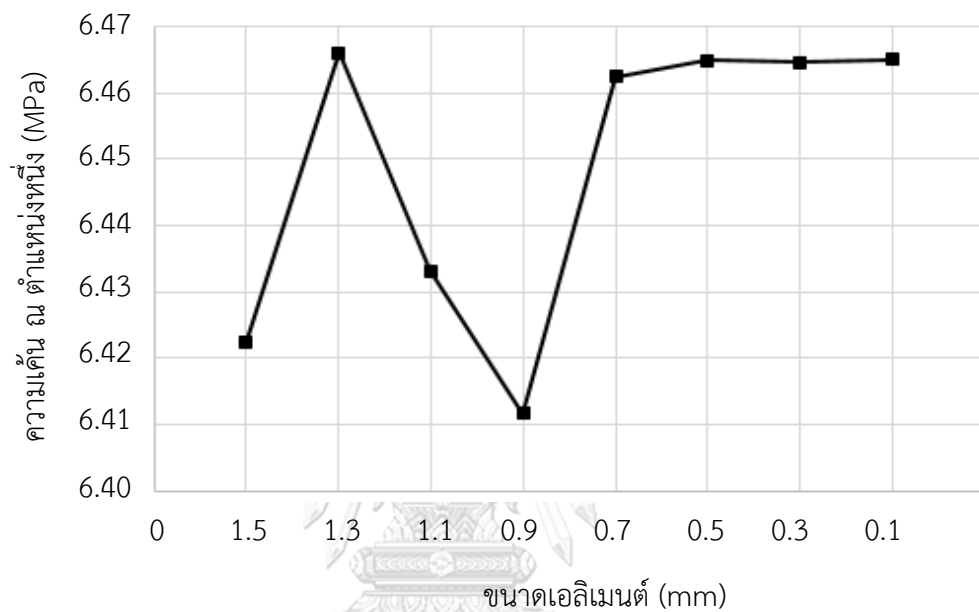


รูปที่ 4.28 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเอ็นยึดปริพันธ์

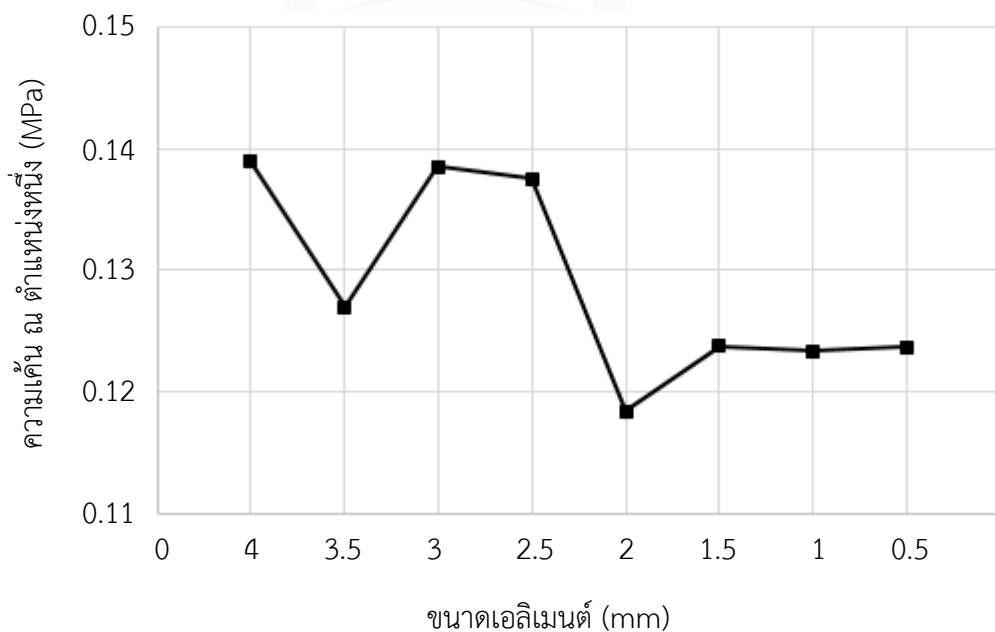
กรณีที่ 2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์ของชั้นพื้น ได้แก่ ชั้นเคลือบพื้น ชั้นเนื้อพื้นและโพรงประสาทพื้น โดยกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ไว้ที่ 0.1 mm และชั้นกระดูกไว้ที่ 1 mm แล้วเปลี่ยนขนาดเอลิเมนต์ของชั้นพื้น จากนั้นพิจารณาความเค้นที่ตำแหน่งหนึ่งในแบบจำลองพื้น พบว่าเมื่อขนาดเอลิเมนต์ของชั้นพื้นทั้ง 3 ชั้นนี้มีขนาดเล็กลง ค่าความเค้นที่ได้เริ่มมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จากรูปดังกล่าวพบว่าขนาดของเอลิเมนต์ในชั้นเคลือบพื้น ชั้นเนื้อพื้นและโพรงประสาทพื้นที่มีขนาด 0.5 mm, 0.3 mm หรือ 0.1 mm ทำให้ค่าความเค้นที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าที่ถือได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจหมายความว่า การใช้เอลิเมนต์ขนาด 0.5 mm ทำให้ได้ความเค้นในพื้นที่ลู่เข้าสู่คำตอบที่ต้องการ

กรณีสุดท้ายเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นกระดูก โดยมีการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของชั้นตัวพื้นที่ประกอบไปด้วยชั้นเคลือบพื้น ชั้นเนื้อพื้นและโพรงประสาทพื้นไว้ที่ 0.3

mm และขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ไว้ที่ 0.1 mm เมื่อพิจารณาความเค้นที่ตำแหน่งหนึ่งในแบบจำลองฟัน พบว่าเมื่อขนาดเอลิเมนต์ของชั้นกระดูกมีขนาดเล็กลง ความเค้นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าขนาดเอลิเมนต์ในชั้นกระดูกได้ที่ขนาด 1.5 mm, 1 mm หรือ 0.5 mm ให้ผลค่าความเค้นที่ถือได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่าการใช้เอลิเมนต์ขนาด 1.5 mm ทำให้ผลการวิเคราะห์หู่เข้าคำตอบที่ต้องการแล้ว



รูปที่ 4.29 ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟันและโพรงประสาทฟัน



รูปที่ 4.30 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ของชั้นกระดูก

จากการศึกษาทั้ง 3 กรณี ทำให้สรุปได้ว่าในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ เลือกขนาดเอลิเมนต์ในชั้นเอ็นยึดปริทัศน์มีขนาด 0.1 mm. ส่วนในชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟันและโพรงประสาทฟันมีขนาดเอลิเมนต์ 0.3 mm. และส่วนชั้นกระดูกเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 1 mm.

4.5 บทสรุป

เนื้อหาของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีเนื้อหาออกเป็นสี่ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการกล่าวถึงการทดสอบโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่วิเคราะห์ปัญหาความเค้นของชิ้นงานตัวอย่างที่มีวัสดุ 2 ชนิดเป็นส่วนประกอบพบว่า การคำนวณหาผลลัพธ์ทั้งโดยวิธีผลเฉลยแม่นยำตรงและโดยใช้โปรแกรมมีค่าประมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้ เนื้อหาส่วนที่สองเป็นการศึกษาผิวสัมผัส ซึ่งเป็นฟังก์ชันของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบไปด้วยการสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกัน (Bonded) มีพฤติกรรมคือเคลื่อนที่ติดกันไปและไม่มีการแยกออกจากกัน, การสัมผัสแบบไม่แยกออกจากกัน (No Separation) มีพฤติกรรมคือสามารถเกิดการเลื่อนได้ แต่ไม่สามารถแยกออกจากกัน, การสัมผัสแบบไม่มีความเสียดทาน (Frictionless) มีลักษณะคล้ายการสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน โดยผิวสัมผัสทั้งสองด้านแยกออกจากกันและมีการเลื่อนออกจากกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0, การสัมผัสแบบแรงเสียดทาน (Frictional) เกิดการแยกออกจากกันและมีการเลื่อน ซึ่งการสัมผัสแบบนี้ต้องมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการสัมผัสแบบขรุขระ (Rough) มีพฤติกรรมคือสามารถแยกออกจากกันได้และไม่เกิดการเลื่อน จากผลการศึกษาฟังก์ชันการสัมผัสของโปรแกรมทั้ง 5 แบบ จึงเลือกใช้การสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกันในระหว่างทุก ๆ ชั้นของแบบจำลองโครงสร้างฟันที่ได้แก่ ชั้นเคลือบฟันกับชั้นเนื้อฟัน ชั้นเนื้อฟันกับโพรงประสาทฟัน ชั้นเนื้อฟันกับชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ และชั้นเอ็นยึดปริทัศน์กับกระดูกขากรรไกร ส่วนแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาแล้วบูรณะด้วยการอุดและการครอบนั้น ลักษณะการสัมผัสของผิวสัมผัสจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่เติมลงไป ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 6 เรื่องการศึกษาฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดและบทที่ 7 เรื่องการศึกษาแบบจำลองการครอบต่อไป ส่วนต่อมาเป็นการเตรียมรูปฟันที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยฟันกรามน้อยล่างที่เป็นฟันแท้และฟันกรามล่างของฟันน้ำนม และเนื้อหาส่วนสุดท้ายเป็นการกล่าวถึงการศึกษารูปร่างของการหาขนาดเอลิเมนต์ จากการศึกษาก็ได้มีการเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ในชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ขนาด 0.1 mm ส่วนชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟันและชั้นอื่น ๆ นอกจากชั้นกระดูกมีขนาด 0.3 mm และชั้นกระดูกกำหนดให้มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 1 mm

บทที่ 5 การศึกษาแบบจำลองเอ็นยึดปริทัศน์

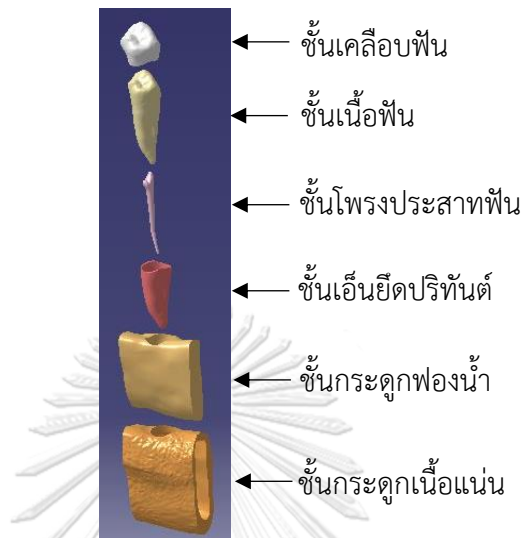
5.1 บทนำ

การศึกษาการกระจายความเค้นในฟันหลาย ๆ งานวิจัยไม่มีการจำลองเอ็นยึดปริทัศน์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากอาจคิดว่าชั้นเอ็นยึดปริทัศน์มีความหนาน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นของฟันชั้นอื่น ๆ จึงสมมุติให้มีผลกับการกระจายความเค้นในเนื้อฟันน้อย อย่างไรก็ตามชั้นเอ็นยึดปริทัศน์มีค่ามอดูลัสที่แตกต่างกับส่วนที่เป็นเนื้อฟันและกระดูกมาก จึงน่าสนใจที่จะศึกษาการหาความเค้นในฟันที่มีการจำลองและไม่มีการจำลองชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ในแบบจำลองเนื้อหาในบทนี้นำเสนอค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในการจำลองที่ได้จากแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทัศน์และไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ โดยจะพิจารณาความเค้นที่เกิดในภาพรวมและความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณเนื้อฟันและกระดูกที่อยู่ใกล้กับชั้นเอ็นยึดปริทัศน์และศึกษาว่าชั้นเอ็นยึดปริทัศน์มีอิทธิพลต่อแบบจำลองโครงสร้างฟันมากน้อยเพียงใดในแบบจำลองโครงสร้างฟันเพื่อเป็นแนวทางในการจำลองฟันที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป

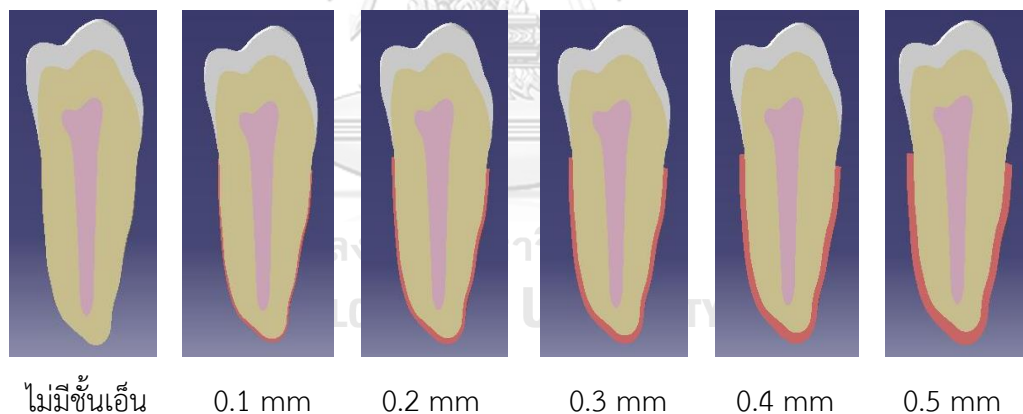
5.2 แบบจำลองและสมบัติเชิงกลวัสดุ

แบบจำลองฟันที่ใช้ในการศึกษาคือแบบจำลองฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้ เนื่องจากฟันของมนุษย์มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทัศน์และชั้นกระดูกขากรรไกร การสร้างแบบจำลองทำโดยการนำภาพถ่ายเอ็กซเรย์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CT scan) ซึ่งภาพถ่ายดังกล่าวมีลักษณะเป็นจุดจำนวนมากประกอบเข้าด้วยกัน (cloud point) จากนั้นนำภาพถ่ายมาปรับแต่งให้มีโครงสร้างตามโครงสร้างฟันของมนุษย์และเปลี่ยนเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติในรูปแบบของแข็ง (solid) ซึ่งได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.3 ในบทที่ 4 ดังนั้นแบบจำลองประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ ชั้นกระดูกเนื้อแน่นและชั้นกระดูกฟองน้ำ ซึ่งภายในชั้นเนื้อฟันจะมีชั้นโพรงประสาทฟันอยู่และชั้นกระดูกฟองน้ำที่ห่อหุ้มด้วยกระดูกเนื้อแน่น ดังรูปที่ 5.1 การศึกษาอิทธิพลของเอ็นยึดปริทัศน์เป็นการศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่มีความหนาของเอ็นยึดปริทัศน์ขนาดต่าง ๆ กันโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาจึงสร้างแบบจำลองโครงสร้างฟันที่เอ็นยึดปริทัศน์มีความหนาเป็น 0.5 mm, 0.4 mm, 0.3 mm, 0.2 mm, 0.1 mm และแบบจำลองโครงสร้าง

ฟันที่ไม่มีเอ็นยึดปริทันต์ ดังรูปที่ 5.2 หลังจากนั้นนำแบบจำลองโครงสร้างฟันที่สร้างขึ้นไปวิเคราะห์หาความเค้นและการเสียรูปโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองโครงสร้างฟัน



รูปที่ 5.2 แบบจำลองความหนาของเอ็นยึดปริทันต์

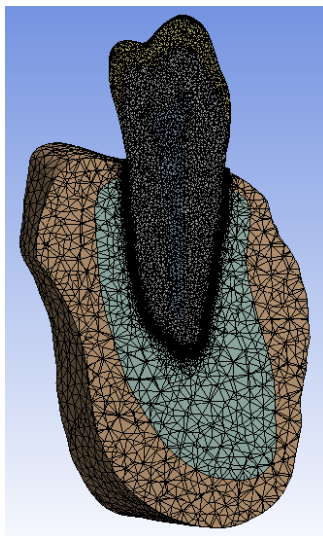
การวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างฟันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุที่ประกอบไปด้วยค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของฟัน เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีส่วนประกอบไปด้วยชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูก

ชากรรไกรที่ประกอบด้วยกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกฟองน้ำ ตามโครงสร้างของฟันมนุษย์ ใน การศึกษานี้จึงกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของฟันเป็นดังแสดงในตารางที่ 5.1

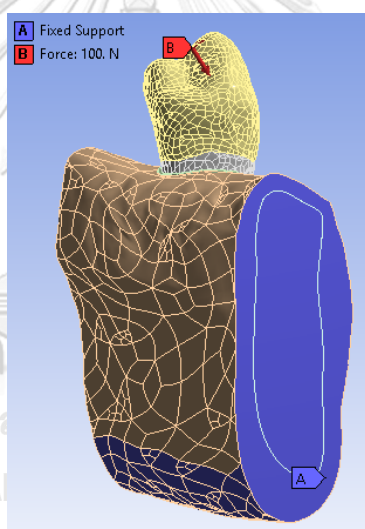
ตารางที่ 5.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุในแบบจำลองฟัน [46]

วัสดุในแบบจำลองฟัน	มอดุลัสของความยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
ชั้นเคลือบฟัน	84,100	0.20
ชั้นเนื้อฟัน	18,600	0.31
โพรงประสาทฟัน	2	0.45
ชั้นเอ็นยึดปริทันต์	68.9	0.45
กระดูกเนื้อแน่น	13,700	0.30
กระดูกฟองน้ำ	1,370	0.30

การกำหนดเงื่อนไขของปัญหาในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งขั้นตอนได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง โดยจะต้องกำหนด คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างฟันชั้นต่าง ๆ ในแบบจำลองโครงสร้างฟันตามคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ชั้นนั้น ๆ ขั้นตอนที่สองเป็นการกำหนดขนาดเอลิเมนต์และลักษณะการสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสของ ส่วนประกอบของฟันส่วนต่าง ๆ จากการศึกษาการลู่อื่นในหัวข้อ 4.4 ของบทที่ 4 ขนาดเอลิเมนต์ที่ เลือกใช้สำหรับแบบจำลองฟันส่วนต่าง ๆ เป็นดังนี้ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์มีขนาดเอลิเมนต์ 0.1 mm ชั้น เคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟันและชั้นโพรงประสาทฟันมีขนาดเอลิเมนต์ 0.3 mm ส่วนขนาดเอลิเมนต์ของชั้น กระดูกขากรรไกรมีค่าเป็น 1 mm ดังรูปที่ 5.3 ส่วนการกำหนดผิวสัมผัสของแบบจำลองในบทนี้เป็น แบบยึดติดไปด้วยกันที่ทุก ๆ ผิวสัมผัสไม่ว่าจะเป็นผิวสัมผัสระหว่างชั้นเคลือบฟันกับชั้นเนื้อฟัน ชั้น เนื้อฟันกับชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเนื้อฟันกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ชั้นโพรงประสาทฟันกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์ และชั้นเอ็นยึดปริทันต์กับชั้นกระดูกขากรรไกร ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการกำหนดเงื่อนไขในการ วิเคราะห์ ในการศึกษาที่กำหนดให้ภาระทางกลเป็นแรงกดขนาด 100 N [47] กระทำบนแบบจำลองที่ ยอดฟันในส่วนด้านในของด้านแก้ม โดยกระทำทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของฟัน ดังรูปที่ 5.4 นอกจากนี้ ยังกำหนดให้พื้นที่ผิวด้านล่างและด้านข้างของชั้นกระดูกเป็นการยึดแบบยึดแน่น เมื่อกำหนด พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ครบตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการ วิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นและระยะการเปลี่ยนรูปของ แบบจำลองโครงสร้างฟันต่อไป



รูปที่ 5.3 ภาพตัดแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการแบ่งเอลิเมนต์

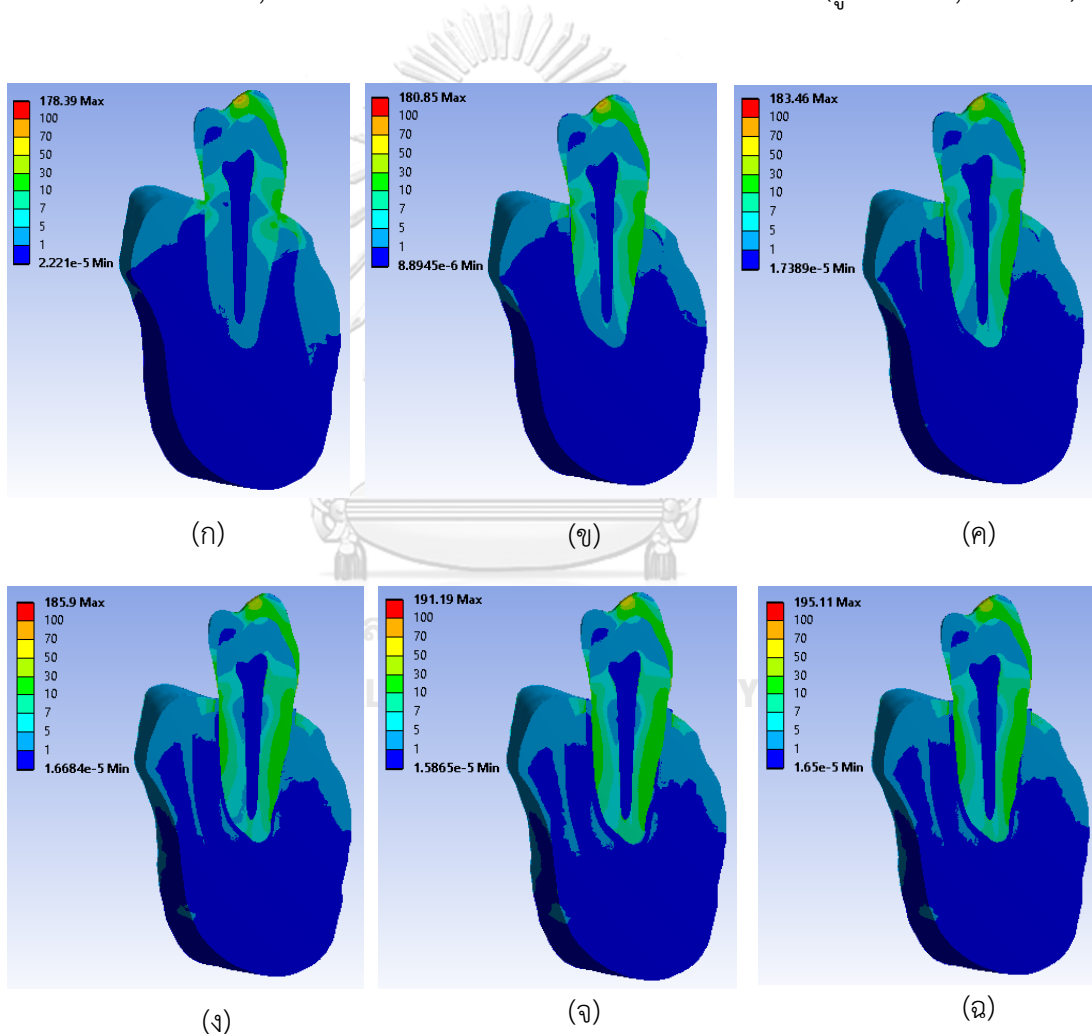


รูปที่ 5.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

5.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปในแบบจำลองเอ็นยึดปริทัศน์

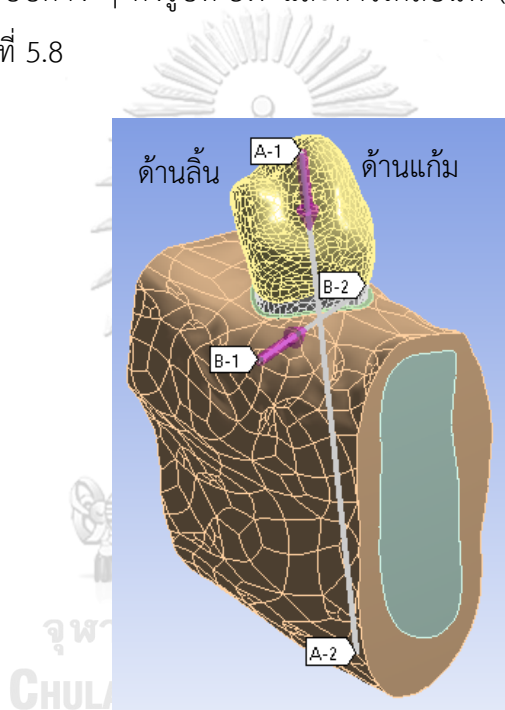
ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงได้ในการกระจายของความเค้น von Mises ที่ส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองฟันดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่า เกิดความเค้นสูงสุดที่บริเวณคอฟัน ในแบบจำลองที่มีเอ็นยึดปริทัศน์หนา 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm และแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ เท่ากับ 180.85 MPa, 183.46 MPa, 185.90 MPa, 191.19 MPa, 195.11 MPa และ 178.39 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าลักษณะการกระจายความเค้น

ในภาพรวมสำหรับแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่ความหนา 0.3 mm, 0.4 mm และ 0.5 mm (รูปที่ 5.5 ค, ง และ จ) มีลักษณะการกระจายที่ใกล้เคียงกัน ส่วนแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่หนา 0.1 mm และ 0.2 mm (รูปที่ 5.5 ก และ ข) ความเค้นตรงเนื้อฟันที่อยู่ในส่วนรากฟันมีค่าความเค้นที่ต่ำกว่าแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นหนากว่า และความเค้นในชั้นเนื้อฟันส่วนที่เป็นรากฟันของแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ (รูปที่ 5.5 ก) มีความเค้นต่ำกว่าแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกพบว่าแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่ความหนา 0.3 mm, 0.4 mm และ 0.5 mm (รูปที่ 5.5 ง, จ และ ฉ) มีความเค้นเกิดขึ้นสูงกว่าแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่หนา 0.1 mm, 0.2 mm และแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ (รูปที่ 5.5 ก, ข และ ค)



รูปที่ 5.5 การกระจายความเค้นในแบบจำลอง, (ก) ไม่มีชั้นเอ็น (ข) ชั้นเอ็นหนา 0.1 mm, (ค) ชั้นเอ็นหนา 0.2 mm, (ง) ชั้นเอ็นหนา 0.3 mm, (จ) ชั้นเอ็นหนา 0.4 mm, (ฉ) ชั้นเอ็นหนา 0.5 mm,

เมื่อพิจารณาความเค้นในพื้ตามแนวเส้นตรง 2 เส้นคือเส้นตรง A และ เส้นตรง B ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เส้นตรง A เป็นเส้นตรงแนวตั้งที่ลากจากจุด A-1 ถึง A-2 เส้นตรงดังกล่าวลากผ่านตั้งแต่ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูกตามลำดับ ในขณะที่เส้นตรงอีกเส้นคือเส้นตรง B เป็นเส้นตรงแนวอนที่ลากจากจุด B-1 ถึง B-2 ซึ่งเป็นเส้นตรงที่ลากจากทางด้านลิ้นตั้งแต่ชั้นกระดูกผ่านชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ไปยังด้านแก้มที่ผ่านชั้นเนื้อฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูกอีกครั้งหนึ่งตามลำดับ เมื่อนำความเค้นสมมูล (von Mises Equivalent Stress) ในพื้ตามแนวเส้นตรงทั้งสองมาพล็อต จะได้การกระจายความเค้นสำหรับแบบจำลองแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.7 และการเคลื่อนที่ (displacement) บนเส้นตรง A สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



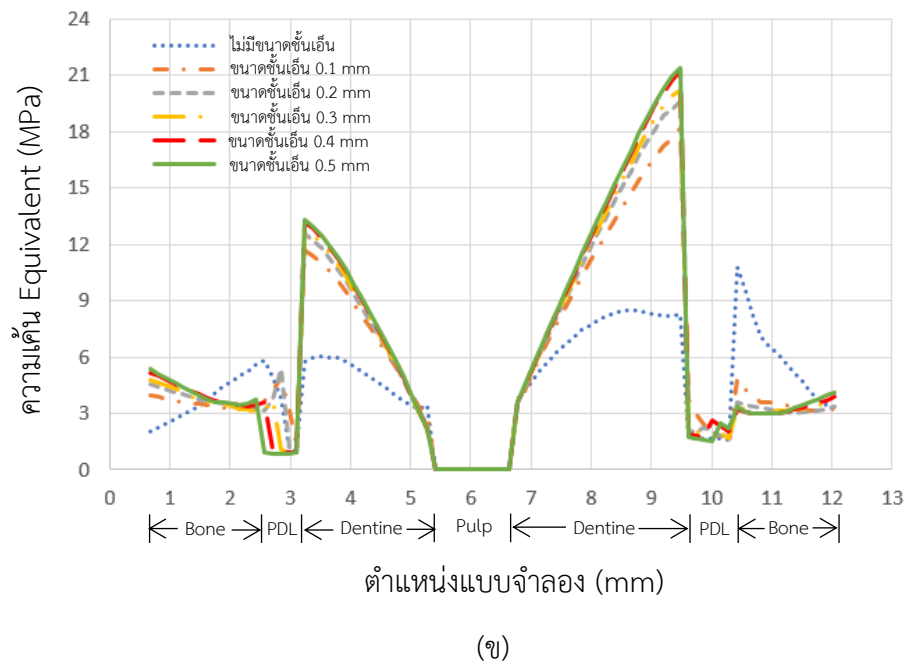
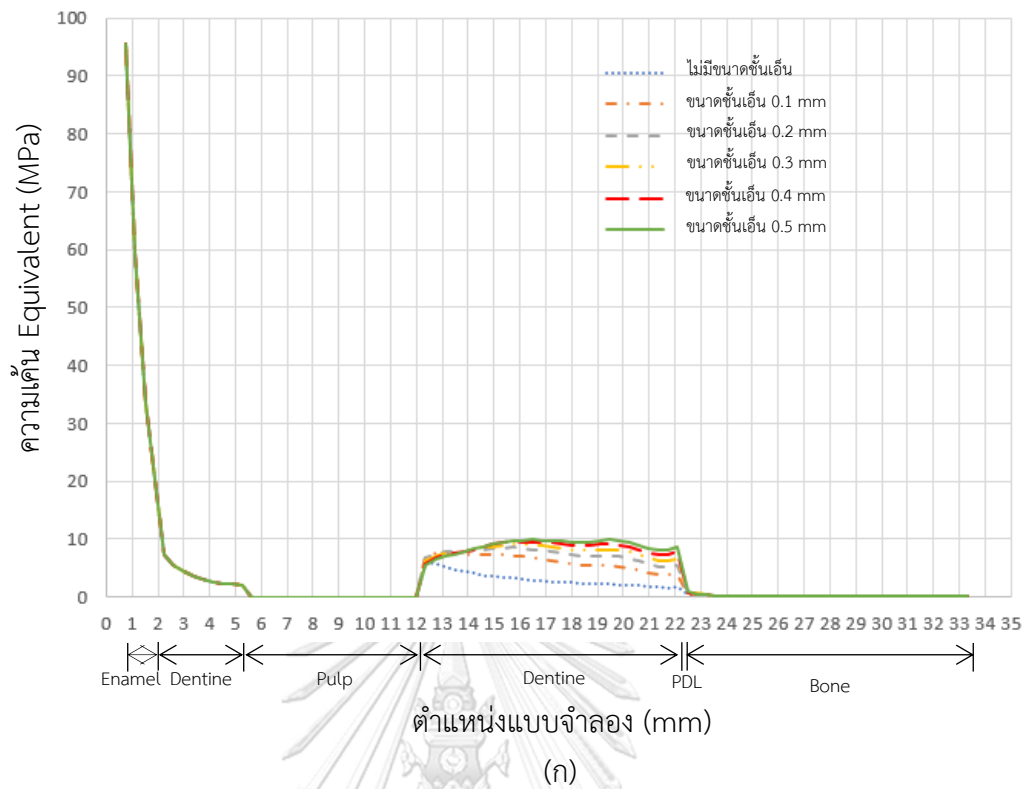
รูปที่ 5.6 เส้นตรงที่กำหนดตำแหน่ง

จากลักษณะความเค้นตามเส้นตรง A ในรูปที่ 5.7(ก) กราฟในช่วงแรกเป็นกราฟความเค้นในชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟันและชั้นโพรงประสาทฟัน จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงเคลือบฟันมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ในพื้ เนื่องจากเป็นส่วนที่มีแรงกระทำโดยตรง ความเค้นในชั้นเคลือบฟันและส่วนบนของชั้นเนื้อฟันรวมถึงชั้นโพรงประสาทฟันมีค่าคงที่ไม่ว่าแบบจำลองจะมีชั้นเอ็นยึดปริทันต์หนาเพียงใดหรือแม้จะไม่มีเอ็นยึดปริทันต์ จะเห็นว่าเส้นกราฟในทุกกรณีศึกษาทับกันพอดี ความเค้นเริ่มมีความแตกต่างกันในบริเวณส่วนรากของชั้นเนื้อฟัน โดยความเค้นมีค่าสูงขึ้นสำหรับแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ช่วงกราฟต่อมาเป็นความเค้นในชั้นเอ็นยึดปริทันต์ ลักษณะความเค้นในชั้นเอ็นยึด

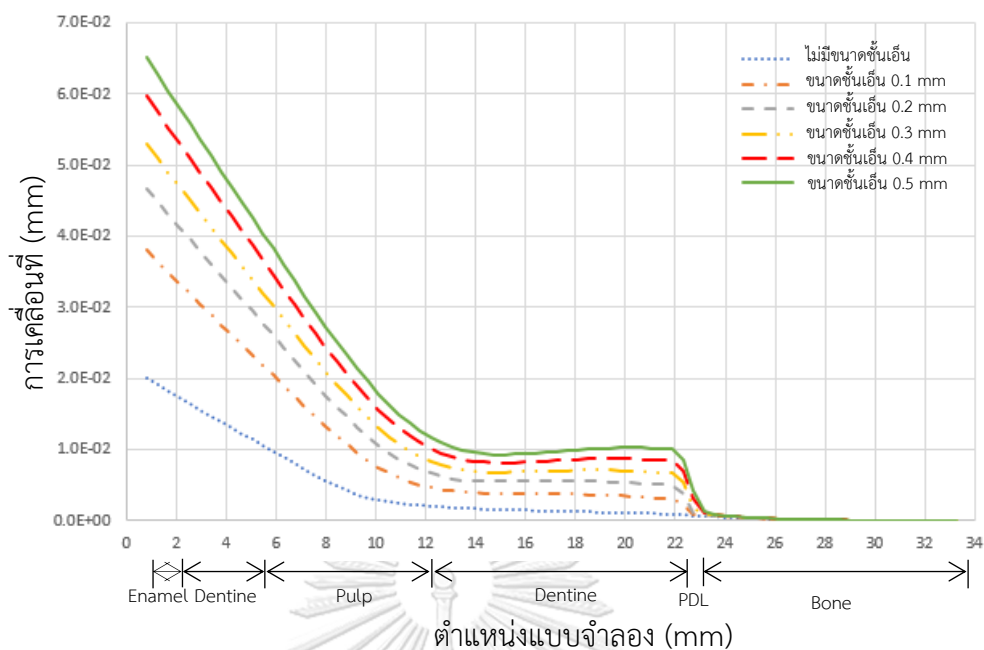
ปริพันธ์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นในชั้นเนื้อฟัน เนื่องจากค่ามอดุลัสของชั้นเอ็นยึด ปริพันธ์มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับชั้นเนื้อฟัน การเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างกะทันหัน ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่รอยต่อระหว่างชั้นเนื้อฟันกับชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์มีการกระจายความเค้นที่สม่ำเสมอ (uniform) บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเนื้อฟันกับชั้นกระดูก เนื่องจากค่ามอดุลัสของชั้นเนื้อฟันและชั้นกระดูก ต่างกันไม่มากนัก กราฟในช่วงสุดท้ายคือความเค้นในกระดูก ช่วงนี้มีความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่มีความหนาของเอ็นยึดปริพันธ์แบบต่าง ๆ มีค่าไม่ต่างกัน ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟในทุกกรณีศึกษาทับกันและมีค่าต่ำลง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ห่างจากแรงกระทำด้านบน

กราฟความเค้นตามเส้นตรง B แสดงในรูป 5.7(ข) จะเห็นว่าความเค้นในกระดูกของแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ทั้งทางด้านลิ้นและด้านแก้มมีค่าสูงกว่าความเค้นในกระดูกที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ ซึ่งความเค้นในกระดูกที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่รอยต่อระหว่างชั้นเอ็นยึดปริพันธ์กับกระดูก เนื่องจากสมบัติเชิงกลระหว่างชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่ระหว่างรอยต่อของชั้นเอ็นยึดปริพันธ์กับกระดูกที่ติดกัน ส่วนความเค้นของแบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ในชั้นเนื้อฟันทางด้านแก้มมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ ในแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ในแบบจำลอง ทำให้ความเค้นในชั้นเนื้อฟันสูงขึ้นเปรียบเทียบกับกรณีแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์และยังพบการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเนื้อฟันกับชั้นเอ็นยึดปริพันธ์และบริเวณกระดูกกับชั้นเอ็นยึดปริพันธ์อีกด้วย

รูปที่ 5.8 แสดงค่าการเคลื่อนที่ (displacement) ของจุดต่าง ๆ บนเส้นตรง A จะเห็นว่า การเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟันที่มีชั้นเอ็นหนา 0.5 mm มีค่ามากที่สุด ส่วนค่าการเคลื่อนที่ต่ำสุดคือแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อความหนาของชั้นเอ็นยึดปริพันธ์มีค่ามากขึ้น ระยะการเคลื่อนที่หรือการยุบตัวของชั้นเอ็นดังกล่าวก็มีค่ามากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของส่วนต่าง ๆ ที่อยู่เหนือชั้นเอ็นยึดปริพันธ์มีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์จะมีการเคลื่อนที่ในส่วนบนของฟันสูงสุดและมีค่าลดลงตามลำดับในชั้นเนื้อฟันและโพรงประสาทฟัน และเนื่องจากแบบจำลองไม่มีชั้นเอ็นยึดปริพันธ์ทำให้เนื้อสัมผัสกับกระดูกโดยตรง แบบจำลองแบบนี้จึงไม่มีการยุบตัวของเอ็นยึดปริพันธ์



รูปที่ 5.7 แผนภาพความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลอง, (ก) ความเค้นบนเส้นตรง A, (ข) ความเค้นบนเส้นตรง B



รูปที่ 5.8 แผนภาพการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลอง

5.4 บทสรุป

การศึกษาความเค้นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันที่มีและไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ โดยแบบจำลองนี้รับแรงขนาด 100 N กระทำที่ค้ำตั้งฉากกับผิวฟันที่ด้านในของด้านติดแก้ม จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การกระจายความเค้นที่ผิวด้านนอกของฟันมีลักษณะคล้ายกันในภาพรวมและความเค้นสมมูลสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณคอฟัน เมื่อพิจารณาบนเส้นตรงที่ลากผ่านแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์มีค่าความเค้นในเนื้อฟันและระยะการเคลื่อนที่สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทันต์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความเค้นในชั้นกระดูกบริเวณที่ติดกับเอ็นยึดปริทันต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติเชิงกลของชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นเนื้อฟันหรือชั้นกระดูก ดังนั้นในการศึกษาการตอบสนองเชิงกลของฟันเมื่อมีแรงมากระทำควรจะรวมชั้นเอ็นยึดปริทันต์ไว้ในแบบจำลองด้วยหากต้องการศึกษาความเค้นและความเครียดบริเวณใกล้ๆ รอยต่อของเนื้อฟันและกระดูก แต่ถ้าตำแหน่งที่สนใจไม่ได้อยู่ในบริเวณดังกล่าว เช่นอยู่ในชั้นเคลือบฟัน ก็อาจจะไม่จำเป็นต้องรวมชั้นเอ็นยึดปริทันต์ในแบบจำลองก็ได้

บทที่ 6 ฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วบรูณะด้วยการอุด

6.1 บทนำ

การรักษาคลองรากฟันเป็นวิธีการหนึ่งในการรักษาฟันที่ได้รับความเสียหาย ซึ่งความเสียหายของฟันอาจจะเกิดจากฟันผุที่ปล่อยให้ลุกลามไปจนถึงโพรงประสาทฟันหรือฟันที่เกิดจากการกระทบกจนทำให้โพรงประสาทเกิดความเสียหาย เป็นผลทำให้ชั้นโพรงประสาทฟันเกิดการอักเสบ ส่งผลให้ปวดฟันและไม่สามารถรับประทานอาหารหรือดื่มเครื่องดื่มเย็นได้ ทำให้ต้องมีการรักษาคลองรากฟันเพื่อเก็บเนื้อฟันที่ยังใช้ได้เอาไว้โดยไม่ต้องถอนทิ้งและสามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติ หลังจากผ่านการรักษาคลองรากฟันแล้วจะบรูณะฟันตามลักษณะของเนื้อฟันที่เหลืออยู่ ในกรณีที่เหลือเนื้อฟันมากพอก็ทำการบรูณะด้วยการอุด แต่ถ้าเนื้อฟันเหลือน้อยก็ทำการครอบฟันแทนเพื่อป้องกันการแตกของฟัน ทำให้ต้องมีการเลือกวิธีการบรูณะฟันให้เหมาะสมกับลักษณะความเสียหายของฟันนั้น ๆ เพื่อให้ฟันที่ผ่านการบรูณะสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม พร้อมทั้งมีประสิทธิภาพและมีความสวยงามอีกด้วย

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้ที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบรูณะด้วยการอุด โดยเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้อุดที่แตกต่างกันออกไป และการอุดด้วยรูปแบบการอุดต่าง ๆ กัน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการบรูณะและวัสดุที่ใช้อุดฟันให้เหมาะสมกับผู้ป่วยที่ฟันได้รับการรักษาคลองรากฟันต่อไป

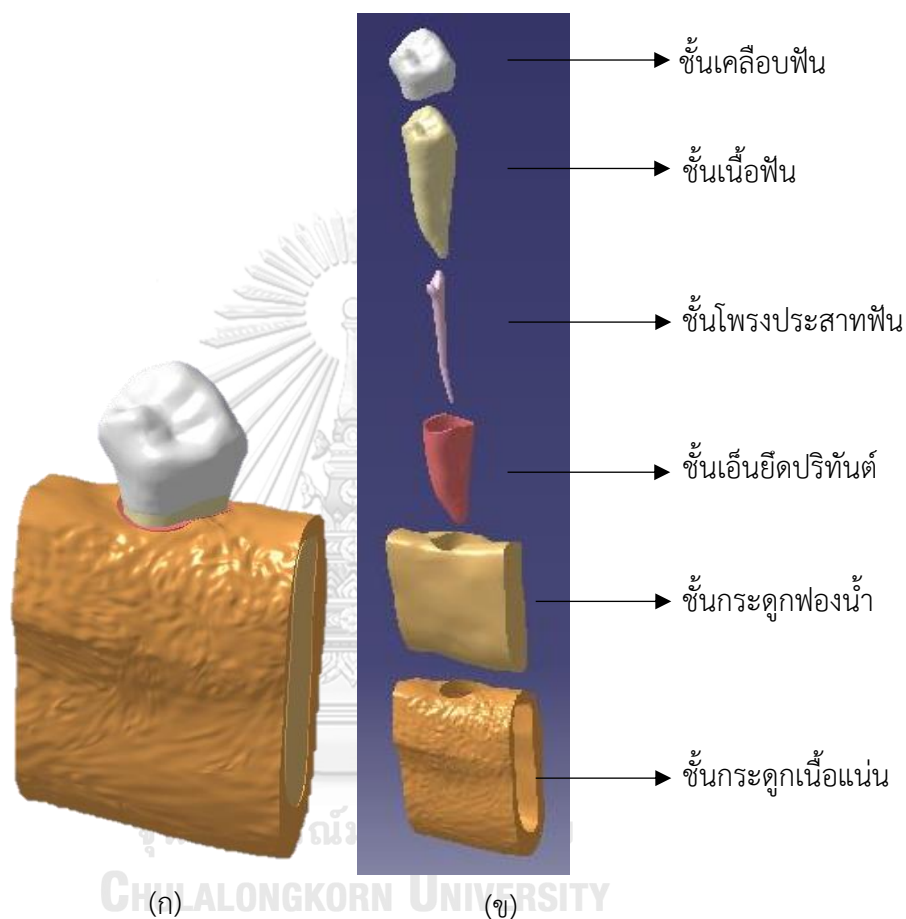
6.2 แบบจำลองและสมบัติของวัสดุ

การบรูณะฟันโดยการรักษาคลองรากฟันเป็นวิธีการรักษาฟันผุที่ทะลุไปยังชั้นโพรงประสาทฟันหรือฟันที่ได้รับการกระทบกจนมีความเสียหายถึงโพรงประสาทฟัน ในสมัยก่อนเมื่อโพรงประสาทฟันเกิดการอักเสบ ทันตะแพทย์รักษาด้วยการถอนฟันแล้วใส่ฟันปลอมแทน แต่ปัจจุบันใช้วิธีการรักษาคลองรากฟันแทน เนื่องจากชั้นโพรงประสาทฟันเป็นแหล่งที่อยู่ของเส้นประสาทและเส้นเลือดที่มาหล่อเลี้ยงเนื้อฟัน เมื่อชั้นโพรงประสาทฟันเกิดความเสียหาย ทำให้เนื้อฟันขาดการหล่อเลี้ยง ส่งผลให้สีของฟันมีสีที่คล้ำขึ้นหรือกล่าวได้ว่าเป็นฟันตาย ดังนั้นวิธีการรักษาในลักษณะนี้เป็นวิธีการตัดส่วนที่ถูกทำลาย ส่วนที่มีการอักเสบและส่วนที่ตายออกจากโพรงประสาท แล้วทำความสะอาดโพรงประสาทแล้วอุดปิดคลองรากฟันด้วยวัสดุอุดรากฟันลงไปก่อน เพื่อเป็นการป้องกันเชื้อโรคและสิ่งสกปรกที่อาจเข้ามาภายในตัวฟัน ซึ่งวัสดุอุดฟันที่ผู้มีชื่อว่า กัดตาเปอร์ชา (gutta-percha) โดยกัดตาเปอร์ชาเป็น

วัสดุที่ทำมาจากยางไม้ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติคือ ไม่ระคายเคืองเนื้อเยื่อปลายราก สามารถรี้ออกได้ง่ายโดยการทำให้ نرم และอ่อนตัวได้ด้วยความร้อน [48] หลังจากอุดวัสดุรากฟันเสร็จก็ทำการบูรณะฟันด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การอุดฟัน การใส่เดือยฟัน การครอบฟัน ซึ่งวิธีการบูรณะนี้ขึ้นกับสภาพของเนื้อฟันที่เหลืออยู่หลังจากการรักษาคลองรากฟันแล้ว

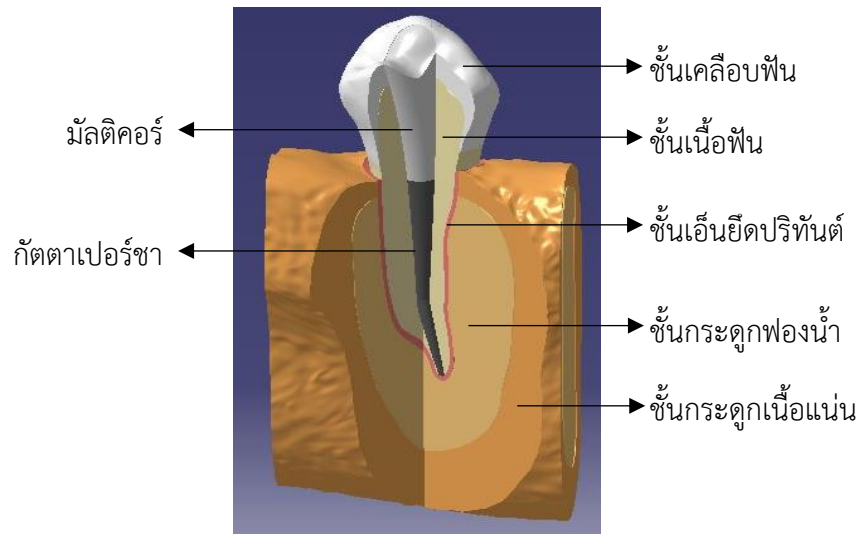
ในการศึกษาเรื่องฟันที่มีการรักษาคลองรากฟันในบทนี้แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยแบบจำลองฟันดี โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูกขากรรไกรที่มีชั้นเนื้อแน่นและชั้นกระดูกฟองน้ำ โดยชั้นโพรงประสาทฟันจะอยู่ข้างในของชั้นเนื้อฟันตามโครงสร้างฟันของมนุษย์ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.3 ของบทที่ 4 ดังรูปที่ 6.1 และแบบจำลองโครงสร้างฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดจะประกอบไปด้วยการอุดทั้งหมด 5 รูปแบบ ได้แก่ การอุดแบบที่ 1 เป็นแบบจำลองฟันที่มีการรักษาคลองรากฟันแล้วเติมวัสดุอุดรากฟัน (กัตตาเปอร์ชา) เข้าไปตั้งแต่รากโพรงประสาทฟันด้านล่างสุดจนถึงระดับต่ำกว่าแนวรอยต่อเคลือบฟันกับ เคลือบรากฟัน (cemento-enamel junction, CEJ) 2 mm จากนั้นใส่วัสดุอุดฟันจนถึงชั้นเคลือบฟัน ในแบบจำลองนี้ใช้วัสดุอุดฟันเป็นมัลติคอร์ (multicore) ดังรูปที่ 6.2(ก) ซึ่งมัลติคอร์เป็นคอมโพสิตเรซินชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติสามารถยึดแน่นกับฟันโดยสารยึดทางเคมี มีสีเหมือนฟันเพื่อความสวยงามเหมือนธรรมชาติ [49] และเพื่อง่ายในการเรียกชื่อจึงขอเรียกวัดอุดชนิดนี้ว่า “มัลติคอร์” แบบจำลองต่อมาเป็นการอุดแบบที่ 2 ซึ่งการอุดแบบนี้เป็นการอุดที่เติมวัสดุเข้าไป 3 ชนิด โดยเรียงลำดับดังนี้ กัตตาเปอร์ชาที่ใส่ลงไปตั้งแต่ปลายรากจนถึงระดับต่ำกว่า CEJ 2 mm ชั้นต่อมาใส่วัสดุรองฟันที่เรียกว่ากลาสไอโอโนเมอร์เบส (Glass Ionomer Base, GI base) ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถปล่อยฟลูออไรด์ ช่วยในเกิดการ Remineralization พร้อมทั้งช่วยลดการอักเสบได้ [50] และชั้นสุดท้ายคือมัลติคอร์ ตามลำดับ ในการเติมกลาสไอโอโนเมอร์เบสเข้าไปมีความสูงชันมาจากชั้นกัตตาเปอร์ชา 2 mm ดังรูปที่ 6.2(ข) การอุดแบบที่ 3 เหมือนการอุดแบบที่ 2 แต่เปลี่ยนวัสดุอุดฟันจากมัลติคอร์เป็นอะมัลกัม ดังนั้นการอุดแบบที่ 3 มีวัสดุที่ใช้อุดคือ กัตตาเปอร์ชา กลาสไอโอโนเมอร์เบส และอะมัลกัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 6.2(ข) การอุดฟันแบบที่ 4 เป็นแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันโดยวัสดุเติมเข้าไปประกอบด้วยวัสดุอุดรากฟันแล้วตามด้วยวัสดุอุดฟัน วัสดุอุดรากฟันคือกัตตาเปอร์ชาซึ่งอุดเข้าไปจากรากของโพรงประสาทฟันสูงขึ้นมา 5 mm และวัสดุอุดฟันที่ใช้ในการอุดในแบบจำลองนี้เป็นมัลติคอร์ ดังรูปที่ 6.2(ค) และแบบจำลองสุดท้ายคือ การอุดแบบที่ 5 เป็นแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วมีการใส่เดือยฟัน (post) เป็นแกนยึดให้รากฟันมีความแข็งแรง รวมทั้งเป็นส่วนป้องกันไม่ให้เนื้อฟันที่เหลือเกิด

การแตกหัก [28] ดังรูปที่ 6.2(ง) โดยเรียงลำดับจากกัตตาเปอร์ซาที่อยู่สูงขึ้นมาจากรากของโพรงประสาทฟัน 5 mm แล้วใส่เดือยฟันลงไป จากนั้นอุดด้วยวัสดุอุดรากฟัน ซึ่งในแบบจำลองนี้ใช้วัสดุอุดรากฟันเป็นมัลติคอร์ การเตรียมแบบจำลองที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดแบบต่าง ๆ ที่ศึกษาในบทนี้แสดงในภาคผนวกที่ ก.

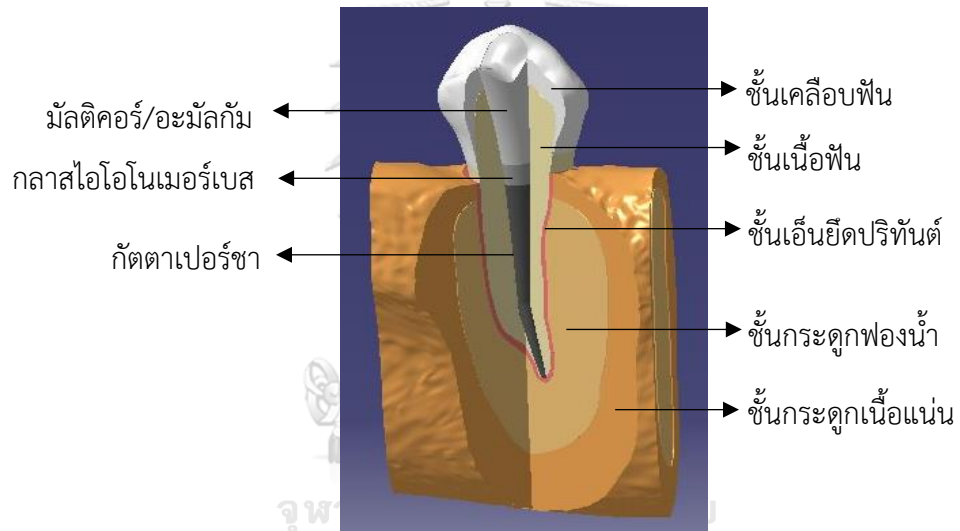


รูปที่ 6.1 แบบจำลองฟันดี, (ก) ภาพรวมแบบจำลองฟันดี, (ข) การเรียงลำดับชั้นของแบบจำลอง

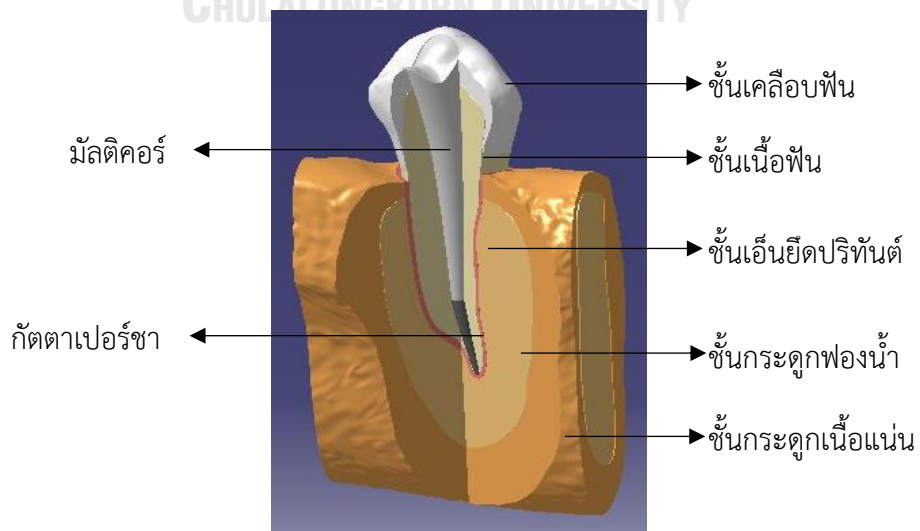
การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคนิคหนึ่งในงานทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยในการหาค่าความเค้น ความเครียดและการเคลื่อนที่ การศึกษานี้จึงนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์แบบจำลองฟันดีและแบบจำลองฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันโดยการได้รับการบูรณะตัวฟัน เพื่อหาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง



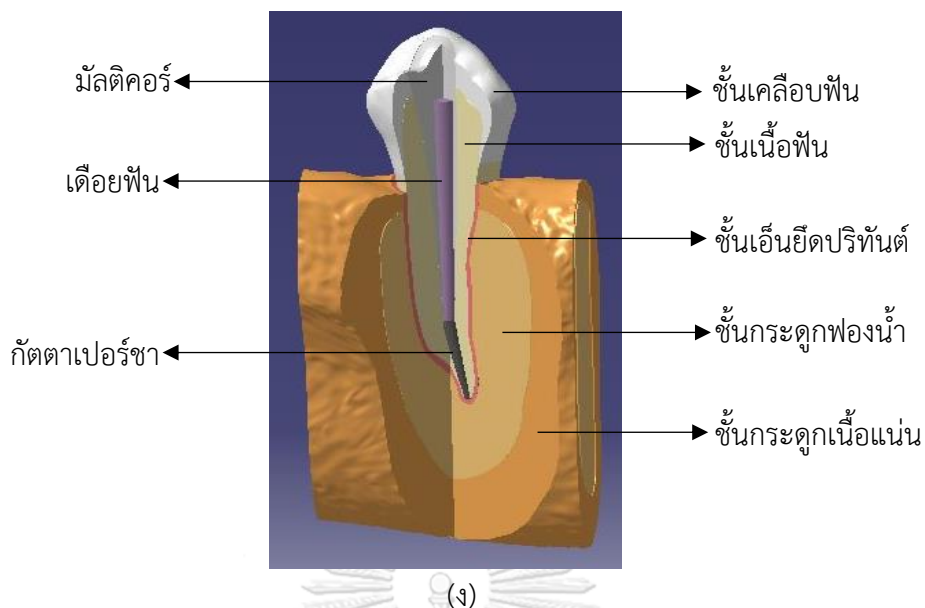
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 6.2 แบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟัน, (ก) ภาพตัดและการเรียงลำดับของการอุดแบบที่ 1, (ข) ภาพตัดและการเรียงลำดับของการอุดแบบที่ 2 และ 3, (ค) ภาพตัดและการเรียงลำดับของการอุดแบบที่ 4, (ง) ภาพตัดและการเรียงลำดับของการอุดแบบที่ 5

หลักการในการวิเคราะห์ปัญหาของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งคุณสมบัตินี้ประกอบไปด้วยค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุต่าง ๆ ลงในแบบจำลอง สมบัติเชิงกลของเนื้อฟันส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และสมบัติเชิงกลของวัสดุอุดฟันที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 6.1

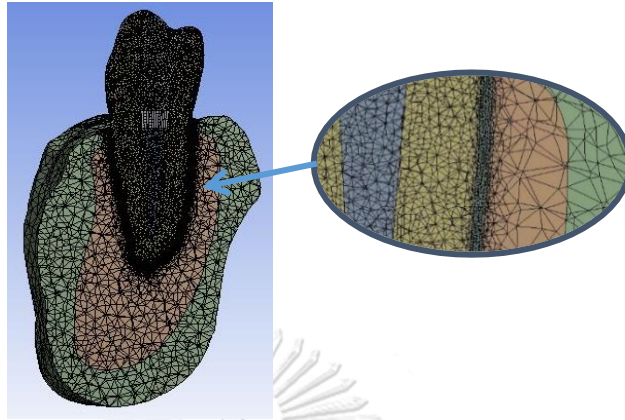
ตารางที่ 6.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุอุดในแบบจำลองฟัน [46]

วัสดุในแบบจำลองฟัน	มอดูลัสของความยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
มัลติคอร์	16,000	0.26
อะมัลกัม	55,500	0.33
กลาสไอโอโนเมอร์เบส	3,658	0.36
กัดตาเปอร์ชา	0.69	0.45
เดือยฟัน	15,000	0.45

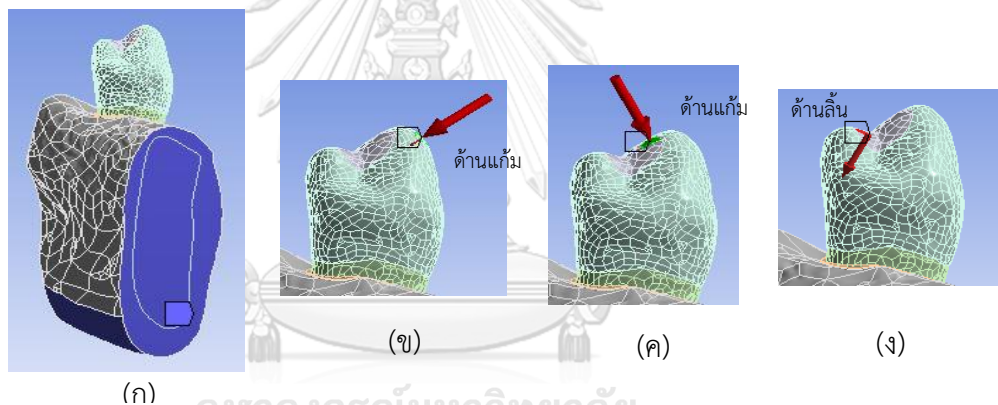
ขั้นตอนที่สองเป็นการเลือกขนาดและการสัมผัสของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุส่วนต่าง ๆ จากการศึกษาการลู่เข้าขนาดเอลิเมนต์ในหัวข้อที่ 4.4 ของบทที่ 4 ขนาดเอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์มีขนาดเอลิเมนต์ 0.1 mm ชั้นกระดูกขากรรไกรมีขนาดเอลิเมนต์เป็น 1 mm และส่วนชั้นที่เหลือไม่ว่าจะเป็นชั้นเคลือบฟัน, ชั้นเนื้อฟัน, โพรงประสาทฟันหรือการอุดด้วยวัสดุต่าง ๆ เช่น มัลติคอร์ อะมัลกัม กลาสไอโอโนเมอร์เบส กัดตาเปอร์ชาและเดือยฟัน เป็นต้น มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 0.3 mm ดังรูป 6.3 ส่วนการกำหนดการสัมผัสของผิวสัมผัสคือ แบบจำลองฟันที่มีการสัมผัสระหว่างชั้นต่าง ๆ เป็นแบบยึดติดไปด้วยกัน (bonded) ส่วนแบบจำลองที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดแบบต่าง ๆ การสัมผัสระหว่างชั้นเป็นไปดังนี้ ชั้นเคลือบฟันกับชั้นเนื้อฟัน, ชั้นเนื้อฟันกับชั้นโพรงประสาทฟัน, ชั้นโพรงประสาทฟันกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์, ชั้นเนื้อฟันกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์, ชั้นเอ็นยึดปริทันต์กับชั้นกระดูกเนื้อแน่น, ชั้นเอ็นยึดปริทันต์กับชั้นกระดูกฟองน้ำ, ชั้นกระดูกเนื้อแน่นกับชั้นกระดูกฟองน้ำ, ชั้นเนื้อฟันกับชั้นกลาสไอโอโนเมอร์เบส, ชั้นเนื้อฟันกับชั้นมัลติคอร์และชั้นมัลติคอร์กับเดือยฟัน เป็นแบบยึดติดไปด้วยกัน ส่วนชั้นที่ติดกับชั้นอะมัลกัม ไม่ว่าจะเป็นชั้นเคลือบฟัน, ชั้นเนื้อฟัน, ชั้นกลาสไอโอโนเมอร์เบส มีการสัมผัสกันแบบมีแรงเสียดทาน (frictional) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.2 [51] และการสัมผัสกันในชั้นของกัดตาเปอร์ชาที่มีการสัมผัสกับชั้นกลาสไอโอโนเมอร์เบส, ชั้นเนื้อฟัน, ชั้นเอ็นยึดปริทันต์, ชั้นมัลติคอร์และชั้นเดือยฟัน เป็นการสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 [48] ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ในแบบจำลอง โดยกำหนดให้ภาระเชิงกลเป็นแรงขนาด 100 N [52] ลักษณะของแรงกระทำมี 3 รูปแบบคือ แรงกระทำทางด้านติดแก้ม (buccal) ดังรูป 6.4(ข), แรงกระทำด้านในของด้านติดแก้ม ดังรูป 6.4(ค) และแรงกระทำด้านในของด้านลิ้น (Lingual) ดังรูป 6.4(ง) ซึ่งแรงทั้ง 3 แบบนี้กระทำพร้อมกันและมีทิศทางตั้งฉากกับผิวของฟัน สำหรับแบบจำลองฟันดีและแบบจำลองที่มีการอุดแบบที่ 1 ถึงแบบที่ 5 นอกจากนี้ยังกำหนดพื้นที่ผนังของกระดูกขากรรไกรเป็นแบบยึดแบบยึดแน่น (fix support) ทางด้านล่างและด้านข้างทั้งสองด้านของกระดูกขากรรไกร ดังรูป 6.4(ก)

เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ครบตามที่ต้องการแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป โดยการศึกษาฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาความเค้นที่เกิดในฟันและในวัสดุอุดระหว่างฟันดีและฟันที่มีการอุดด้วยวัสดุอุดที่ต่างกัน โดยในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบวัสดุอุดที่เป็นมัลติคอร์

และอะมัลกัม การศึกษาในอีกส่วนหนึ่งจะเป็นการศึกษาลักษณะการกระจายความเค้นของฟันที่มีการรักษาคลองรากฟันและมีการอุดด้วยรูปแบบการอุดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 6.3 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์

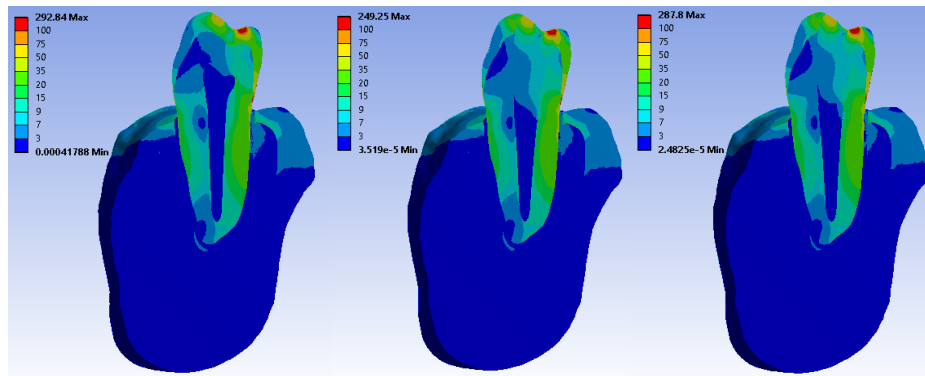
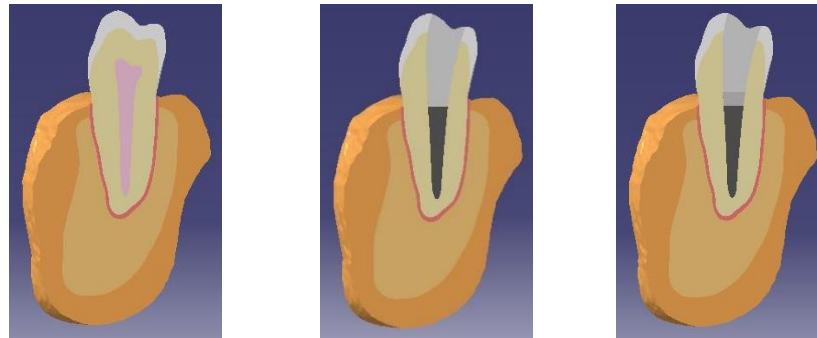


รูปที่ 6.4 ทิศทางของแรงกระทำกับฟันในรูปแบบต่าง ๆ, (ก) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต, (ข) แรงกระทำบนฟันทางด้านติดแก้ม, (ค) แรงกระทำบนฟันด้านในของด้านติดแก้ม, (ง) แรงกระทำบนฟันด้านในของด้านลิ้น

6.3 การวิเคราะห์แบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุด

การศึกษาความเค้นที่เกิดในฟันและในวัสดุอุดของฟันดีและฟันที่มีการอุดด้วยวัสดุอุดแบบต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองฟันดีและแบบจำลองที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะตัวฟันด้วยการอุดแบบที่ 2 (อุดด้วยมัลติคอร์) และการอุดแบบที่ 3 (อุดด้วยอะมัลกัม) ตามลำดับพบว่า ความเค้นสูงสุดเกิดที่บริเวณคอฟันและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 292.84 MPa, 287.8 MPa และ 270.95 MPa สำหรับแบบจำลองฟันดีและแบบจำลองของฟันที่มีการอุดแบบ

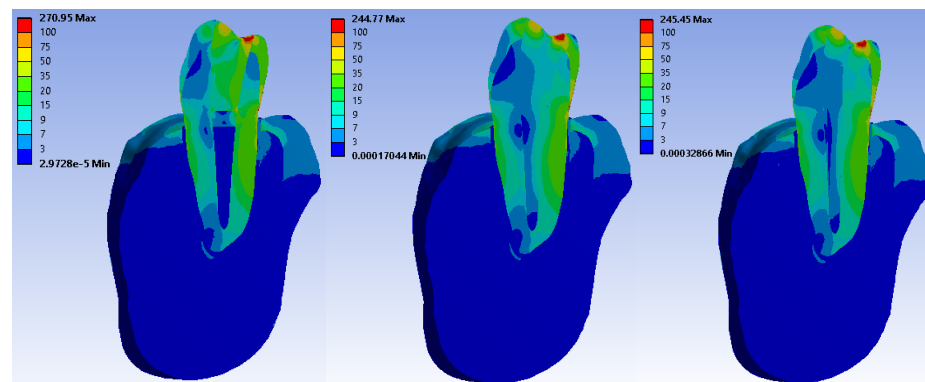
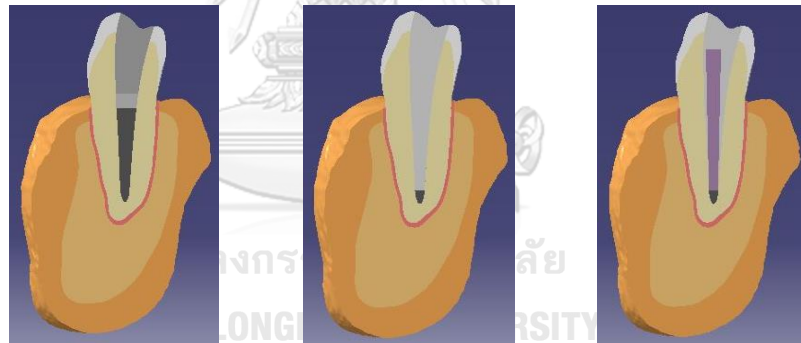
ที่ 2 และการอุดแบบที่ 3 ตามลำดับ จะเห็นว่าความเค้นสูงสุดที่ได้ในแบบจำลองฟันการอุดแบบที่ 2 และการอุดแบบที่ 3 มีค่าต่างจากความเค้นสูงสุดในแบบจำลองฟันดีประมาณ 8.08% และ 6.22% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าไม่ต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ซึ่งแสดงภาพตัดของความเค้นในแบบจำลองต่าง ๆ พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในฟันที่มีการบูรณะด้วยการอุดแบบที่ 2 ในรูปที่ 6.5(ค) มีความเค้นที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันดี ในรูปที่ 6.5(ก) นอกจากนี้ยังพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันที่มีการบูรณะด้วยการอุดแบบที่ 2 ในรูปที่ 6.5(ค) มีการกระจายของความเค้นอย่างสม่ำเสมอในเนื้อฟันและในวัสดุวัสดุคัลเลอร์ ซึ่งแตกต่างจากกรณีของการบูรณะด้วยการอุดแบบที่ 3 ในรูปที่ 6.5(ง) ที่ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันมีความแตกต่างจากความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอุดฟันอย่างชัดเจน โดยพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอุดที่เป็นอะมัลกัมมีค่าสูงชันอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันหรือความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอุดที่เป็นวัสดุคัลเลอร์ เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันในระนาบต่าง ๆ ดังรูป 6.6 พบว่าในภาพรวมความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชั้นเนื้อฟันการอุดแบบที่ 2 ที่อุดด้วยวัสดุคัลเลอร์ มีค่าสูงกว่าความเค้นสูงสุดของการอุดแบบที่ 3 ที่อุดด้วยอะมัลกัม เนื่องจากอะมัลกัมมีค่ามอดุลัสสูง ส่งผลให้แบบจำลองที่ 3 มีความแข็งเกร็งสูงกว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันจึงมีค่าต่ำ แต่การอุดแบบที่ 2 มีค่ามอดุลัสของชั้นเนื้อฟันและวัสดุคัลเลอร์มีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่าการอุดแบบที่ 3 ทำให้เกิดความเค้นในเนื้อฟันสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาความเค้นรอบ ๆ รอยต่อระหว่างชั้นเนื้อฟันและวัสดุอุด ในรูป 6.6 พบว่าทุก ๆ ระนาบ ความเค้นในเนื้อฟันของการอุดแบบที่ 3 มีค่าสูงกว่าการอุดแบบที่ 2 จะเห็นว่าความเค้นที่รอยต่อของวัสดุอุดฟันระหว่างอะมัลกัมกับกลาสไอโอโนเมอร์เบสของการอุดแบบที่ 3 มีค่าความเค้นสูงชันอย่างกะทันหัน เนื่องจากอะมัลกัมเกิดการเสียรูปน้อย และค่ามอดุลัสของกลาสไอโอโนเมอร์เบสมีค่าต่ำและสามารถเกิดการเสียรูปได้มากกว่า ทำให้ความเค้นที่รอยต่อระหว่างชั้นของวัสดุมีค่าสูงและเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่รอยต่อระหว่างชั้นของวัสดุ ในขณะที่รอยต่อของวัสดุอุดของการอุดแบบที่ 2 คือวัสดุคัลเลอร์กับกลาสไอโอโนเมอร์เบสมีค่าการกระจายความเค้นอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในวัสดุอุดฟันและในเนื้อฟันอย่างชัดเจน จึงเขียนกราฟของความเค้น von Mises ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นตรงระหว่างจุด 1 และจุด 2 ที่แสดงในรูปที่ 6.7



ฟันดี
(ก)

การอุดแบบที่ 1
(ข)

การอุดแบบที่ 2
(ค)

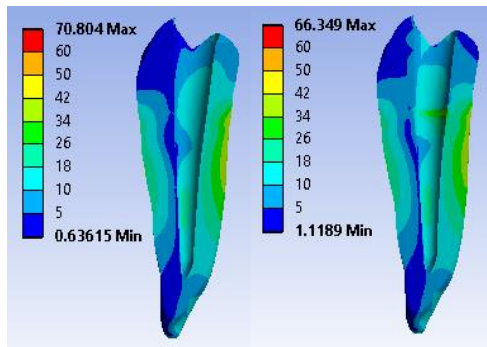


การอุดแบบที่ 3
(ง)

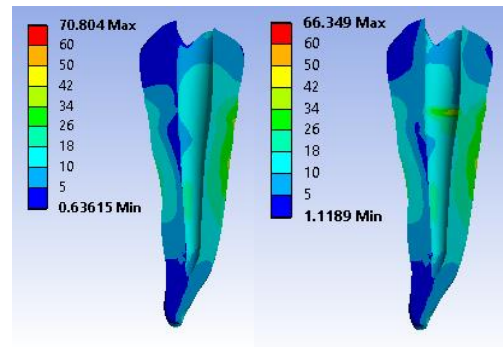
การอุดแบบที่ 4
(จ)

การอุดแบบที่ 5
(ฉ)

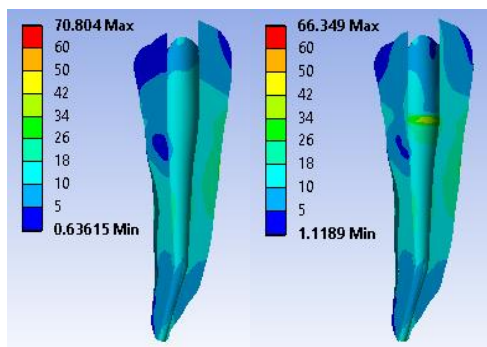
รูปที่ 6.5 ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง



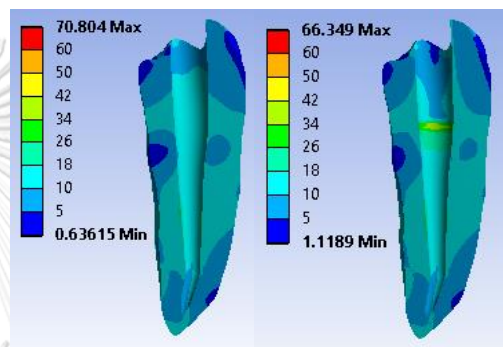
การออกแบบที่ 2 การออกแบบที่ 3
(ก)



การออกแบบที่ 2 การออกแบบที่ 3
(ข)

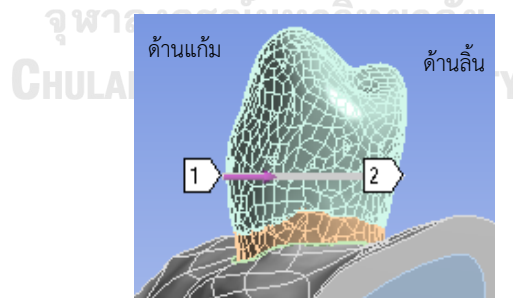


การออกแบบที่ 2 การออกแบบที่ 3
(ค)



การออกแบบที่ 2 การออกแบบที่ 3
(ง)

รูปที่ 6.6 ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิน, (ก) มุมระนาบ 30 องศา, (ข) มุมระนาบ 60 องศา, (ค) มุมระนาบ 90 องศา, (ง) มุมระนาบ 120 องศา

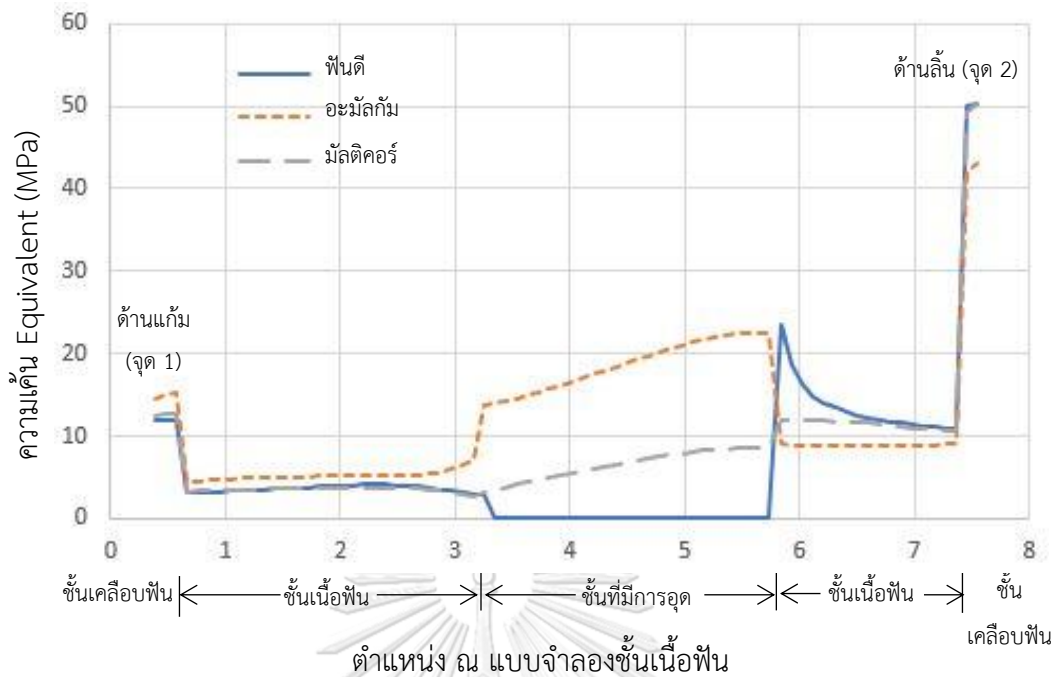


รูปที่ 6.7 เส้นระหว่างจุด 1 และ 2 ซึ่งจะวิเคราะห์หาความเค้นอย่างละเอียด

รูปที่ 6.8 แสดงค่าความเค้น von Mises ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นตรงระหว่างจุด 1 ทางด้านแก้มและจุด 2 ทางด้านลิ้นในรูปที่ 6.7 จากกราฟสามารถแบ่งข้อมูลความเค้นที่ได้ ออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ความเค้นในชั้นเคลือบฟิน ความเค้นในชั้นเนื้อฟิน และความเค้นในวัสดุจุด สำหรับในชั้นเคลือบ

ฟัน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นเคลือบฟันทางด้านแก้มและชั้นเคลือบฟันทางด้านลิ้น จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบฟันทางด้านลิ้นมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ในฟัน รวมทั้งในตำแหน่งที่มีวัสดุอุดด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบฟันของแบบจำลองฟันดีและแบบจำลองฟันที่มีการอุดแบบที่ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันนัก ในทางตรงข้ามความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบฟันที่มีการอุดแบบที่ 3 มีความเค้นที่สูงกว่าแบบจำลองอื่นในด้านแก้มและมีค่าเค้นต่ำกว่าในด้านลิ้น สำหรับในช่วงของชั้นเนื้อฟัน ความเค้นที่เกิดขึ้นทางด้านแก้มในแบบจำลองฟันที่มีการอุดแบบที่ 3 มีค่าสูงกว่าความเค้นในแบบจำลองฟันดีและแบบจำลองที่มีการอุดแบบที่ 2 ส่วนทางด้านลิ้นความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันดีมีค่าสูงกว่าความเค้นในแบบจำลองที่อุดด้วยวัสดุทั้งสองแบบ กราฟในส่วนสุดท้ายคือชั้นโพรงประสาทฟันหรือชั้นวัสดุอุด โดยแบบจำลองฟันดีจำลองให้เป็นชั้นโพรงประสาทฟัน ดังรูป 6.1 ส่วนแบบจำลองที่มีการอุดแบบที่ 2 และแบบที่ 3 จำลองให้เป็นวัสดุอุดตามที่แสดงในรูปที่ 6.2 สำหรับแบบจำลองของฟันที่มีการบูรณะ จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดในวัสดุอุดแบบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับความเค้นที่เกิดในเนื้อฟัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างกะทันหันในวัสดุวัสดุเคลือบและในเนื้อฟัน ในทางตรงข้ามการอุดแบบที่ 3 พบว่าความเค้นในอะลัมกัมมีค่าสูงกว่าความเค้นในเนื้อฟันอย่างเห็นได้ชัด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการที่อะลัมกัมมีค่ามอดุลัสสูงกว่าค่ามอดุลัสของชั้นเนื้อฟันมาก เมื่อตัวฟันได้รับแรงและมีการเปลี่ยนรูป (deformation) ที่ไม่แตกต่างกันนัก ทำให้ความเค้นที่เกิดในอะลัมกัมที่มีค่ามอดุลัสสูงกว่ามีค่าสูงกว่าความเค้นในเนื้อฟัน

จากการพิจารณาความเค้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเนื้อฟันและบนวัสดุที่ใช้อุดพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอุดที่เป็นอะลัมกัมมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อฟันที่อยู่ใกล้ ๆ กัน และสูงกว่าวัสดุอุดที่เป็นวัสดุเคลือบอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ความเค้นที่เกิดในวัสดุอุดที่เป็นวัสดุเคลือบมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อฟันบริเวณที่อยู่ใกล้ ๆ เนื่องจากค่ามอดุลัสของวัสดุเคลือบและเนื้อฟันมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่ามอดุลัสของอะลัมกัมมีค่าต่างจากเนื้อฟันอย่างมาก ความเค้นบริเวณวัสดุบูรณะที่เป็นอะลัมกัมที่มีค่าสูงอาจไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุอุดดังกล่าวโดยตรง เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความแข็งแรง (strength) สูงกว่าเนื้อฟันและวัสดุเคลือบพอสมควร แต่ค่าความเค้นที่สูงขึ้นอย่างกะทันหันนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่รอยต่อระหว่างอะลัมกัมและเนื้อฟันได้ ด้วยเหตุนี้จึงมักมีข้อเสนอแนะให้ใช้วัสดุอุดที่เป็นอะลัมกัมในฟันซี่ที่มีการบดเคี้ยว ซึ่งวัสดุอุดจะต้องรับความเค้นสูง ๆ ในขณะที่สามารถใช้วัสดุเคลือบเป็นวัสดุอุดในฟันที่มีการบดเคี้ยวน้อย และมักเกิดความเค้นบนวัสดุอุดไม่มากเท่าไรนัก

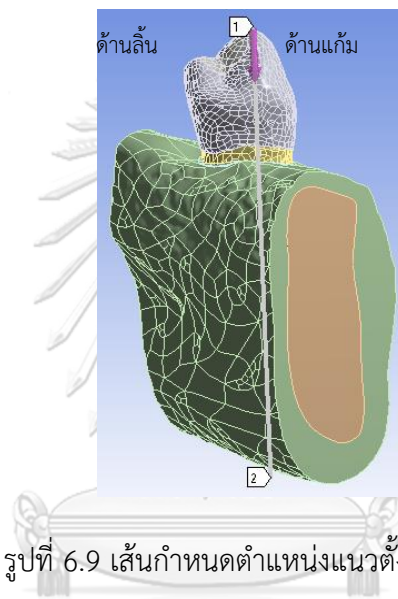


รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งในแบบจำลอง

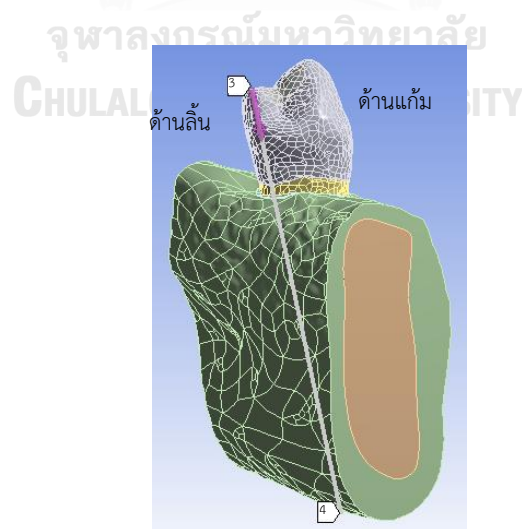
ในส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในฟันที่มีการรักษาลงรากฟันและบูรณะด้วยการอุดรูปแบบต่าง ๆ และใช้วัสดุต่าง ๆ กัน ซึ่งวิธีการอุดนั้นแตกต่างกันไป ได้แก่ แบบจำลองที่ 1, แบบที่ 2, แบบที่ 4 และแบบที่ 5 พบว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 292.84 MPa, 249.25 MPa, 287.8 MPa, 244.77 MPa และ 245.45 MPa สำหรับแบบจำลองฟันดี, แบบจำลองฟันที่มีการอุดแบบที่ 1, แบบที่ 2, แบบที่ 4 และแบบที่ 5 ตามลำดับ ค่าความเค้นสูงสุดที่กล่าวมาข้างต้นเกิดในบริเวณคอฟันและความเค้นในแบบจำลองฟันดีมีค่ามากกว่าแบบจำลองที่บูรณะด้วยการอุดแบบที่ 2, แบบที่ 1, แบบที่ 5 และแบบที่ 4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเค้นสูงสุดที่ได้ในแบบจำลองฟันดีและการอุดแบบที่ 2 มีค่าสูงกว่าความเค้นสูงสุดแบบจำลองฟันที่มีการอุดแบบที่ 1, แบบที่ 4 และแบบที่ 5 และเมื่อพิจารณาการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 พบว่าความเค้นในภาพรวมสำหรับแบบจำลองฟันดีและการอุดแบบต่าง ๆ กัน มีลักษณะการกระจายที่ใกล้เคียงกัน โดยจะแตกต่างกันตรงที่ ชั้นโพรงประสาทฟันกับชั้นวัสดุที่เติมเข้ามา จะเห็นได้ว่าในส่วนรากการอุดแบบที่ 4 และแบบที่ 5 มีการกระจายความเค้นสูงกว่าการอุดแบบที่ 1 และแบบที่ 2

เมื่อพิจารณาความเค้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในเนื้อฟันอย่างชัดเจนในแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาลงรากฟันแล้วมีการอุดแบบต่าง ๆ จึงเขียน

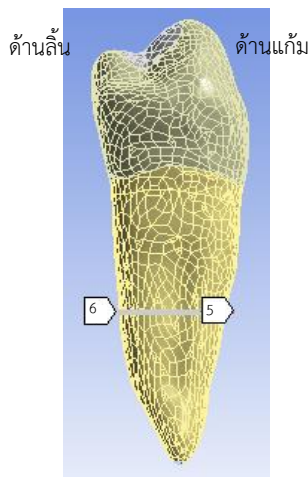
กราฟความเค้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวเส้นตรง 3 เส้นคือ เส้นตรงแนวตั้งทางด้านแก้ม เส้นตรงแนวตั้งทางด้านลิ้น และเส้นตรงแนวนอนในส่วนราก เส้นตรงแนวตั้งทางด้านแก้มและด้านลิ้นเป็นการลากเส้นจากจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2 และจุดที่ 3 ถึงจุดที่ 4 ตามลำดับ ในลักษณะแนวตั้งกับตัวฟันทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 ส่วนเส้นที่ 3 เป็นเส้นตรงแนวนอนที่ลากตรงส่วนราก เริ่มจากจุดที่ 5 ทางด้านแก้มไปยังจุดที่ 6 ที่เป็นด้านลิ้น ดังรูปที่ 6.11 เมื่อนำความเค้นในฟันตามแนวเส้นตรงทั้งสามมาพล็อต จะได้ความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแบบจำลองฟัน สำหรับการจำลองแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 6.12 – 6.14 โดยแสดงเฉพาะความเค้นในตัวฟันเท่านั้น ไม่แสดงความเค้นในกระดูก



รูปที่ 6.9 เส้นกำหนดตำแหน่งแนวตั้งด้านแก้ม



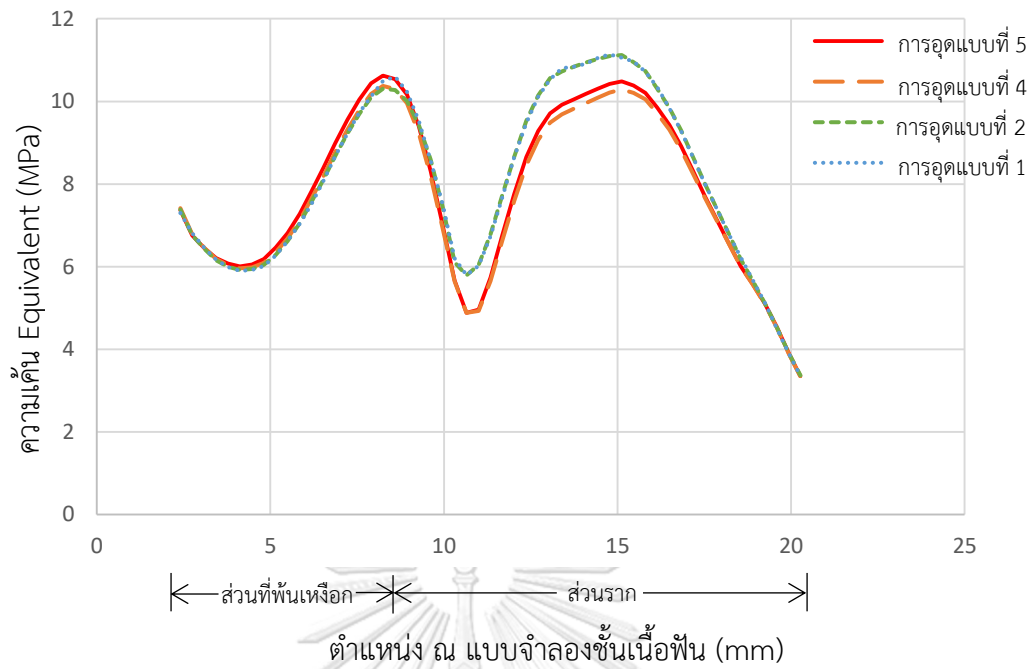
รูปที่ 6.10 เส้นกำหนดตำแหน่งแนวตั้งด้านลิ้น



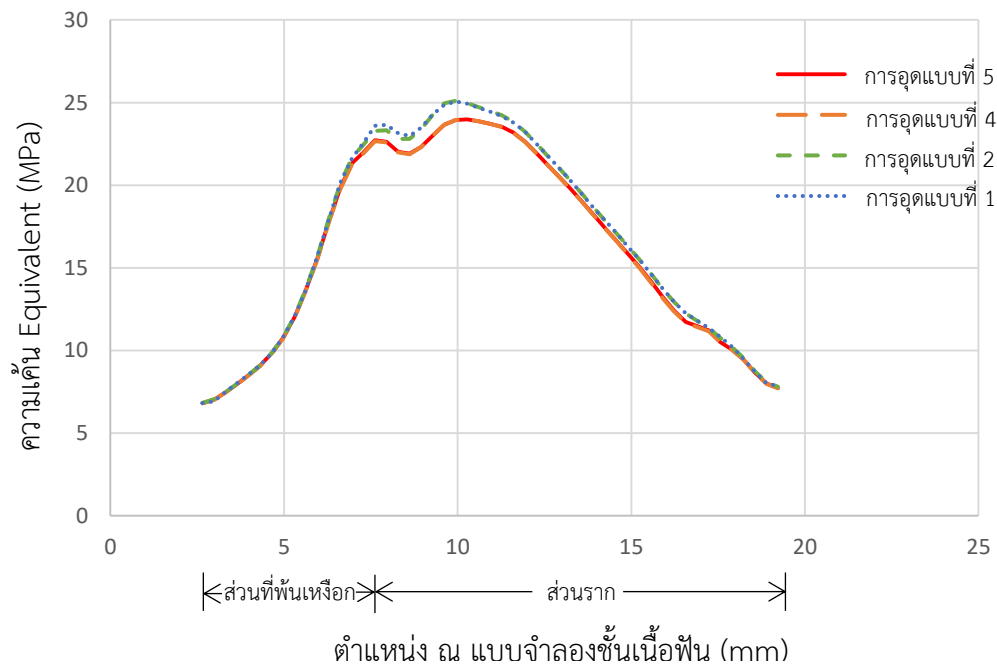
รูปที่ 6.11 เส้นกำหนดตำแหน่งแนวอนส่วนราก

ลักษณะของความเค้นตามเส้นตรงแนวตั้งทางด้านแก้มและด้านลิ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งเป็นความเค้นในส่วนที่พ้นจากเหงือก ในช่วงนี้ความเค้นในการอุดแบบต่าง ๆ มีเส้นกราฟใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูป 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ ลักษณะความเค้นในช่วงที่ 2 ที่เป็นส่วนรากที่เริ่มตั้งแต่ระดับ CEJ จนถึงปลายรากของฟัน พบว่าความเค้นเริ่มมีค่าต่างกัน โดยที่แบบจำลองที่มีการอุดแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีความเค้นสูงกว่าการอุดแบบที่ 4 และแบบที่ 5 สำหรับรูป 6.12 จะเห็นว่าเส้นกราฟของการอุดแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีเส้นกราฟที่ทับกัน และเส้นกราฟการอุดแบบที่ 4 และแบบที่ 5 เส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน ส่วนรูป 6.13 เส้นกราฟของการอุดแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีเส้นกราฟที่ทับกัน และเส้นกราฟการอุดแบบที่ 4 และแบบที่ 5 มีเส้นกราฟที่ทับกัน

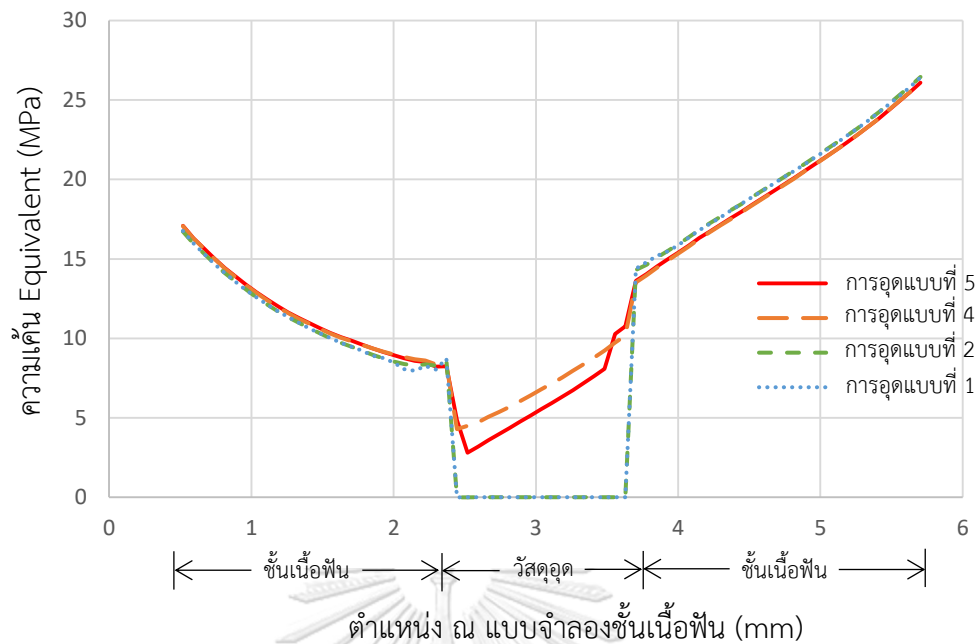
รูปที่ 6.14 แสดงความเค้นในเส้นตรงแนวอนส่วนราก ตามเส้นตรงที่แสดงในรูป 6.11 ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่มีการอุดแบบต่าง ๆ จากกราฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 เป็นช่วงเนื้อฟัน ในช่วงนี้ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่มีการอุดทั้ง 4 แบบมีค่าใกล้เคียงกันและความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงนี้มีค่าสูงกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีวัสดุที่ใช้อุด ในกลุ่มที่ 2 เป็นช่วงของวัสดุอุด จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดในวัสดุอุดที่เป็นการอุดแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นอย่างกะทันหันในวัสดุอุดและในเนื้อฟัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลระหว่างชั้นอย่างทันทีทันใด กล่าวคือค่ามอดุลัสของกัตตาเปอร์ชามีต่ำกว่าค่ามอดุลัสของชั้นเนื้อฟันอย่างมาก ส่วนการอุดแบบที่ 4 มีความเค้นในวัสดุอุดสูงกว่าเมื่อเทียบวัสดุอุดในการอุดแบบต่าง ๆ ซึ่งการอุดแบบที่ 4 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างกะทันหันในวัสดุอุดมัลติคอร์ ในทางตรงข้ามการอุดแบบที่ 5 เป็นการอุดที่มีเนื้อฟัน ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองที่ 4 ที่มีการอุดด้วยมัลติคอร์อย่างเดียว



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งทางด้านแก้ม



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งทางด้านลิ้น



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งแนวนอนส่วนราก

6.4 บทสรุป

จากการศึกษาการกระจายความเค้นในฟันที่มีการรักษาลงรากฟันและบูรณะตัวฟันด้วยการอุดแบบที่ 2 และแบบที่ 3 โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในฟันดี และฟันที่มีการบูรณะด้วยวัสดุทั้งสองชนิดเกิดขึ้นบริเวณคอฟันเหมือนกันทั้ง 3 กรณีศึกษา โดยค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในฟันดีมีค่าสูงกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในฟันที่มีการบูรณะ โดยมีค่ามากกว่าอยู่ในช่วง 3-11% ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในฟันที่มีการบูรณะมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในอุดฟันช่วยให้ตัวฟันมีความแข็งแรง (Stiffness) มากขึ้น และความเค้นในการอุดแบบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับฟันดี นอกจากนี้ยังพบว่าความเค้นในตัวฟันและในวัสดุอุดที่เป็นอะมัลกัมมีค่าสูงกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอุดที่เป็นมัลติคอร์และเนื้อฟันปกติที่ไม่มีการอุด เนื่องจากอะมัลกัมมีความแข็งแรงสูงกว่าเนื้อฟันมาก การที่รอยต่อระหว่างฟันกับอะมัลกัมมีความเค้นสูงกว่ารอยต่อระหว่างฟันกับมัลติคอร์ อาจส่งผลให้ฟันที่บูรณะด้วยอะมัลกัมมีโอกาสแตกหักได้ง่ายกว่าฟันที่บูรณะด้วยมัลติคอร์ ส่วนการศึกษารูปแบบของการอุด พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันของแบบจำลองที่มีเนื้อฟันมีความเค้นต่ำกว่าในแบบจำลองอื่น ๆ และความเค้นในเนื้อฟันมีค่ามากกว่าความเค้นในกัตาเปอร์ชา ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุใดเป็นวัสดุอุดฟันและรูปแบบการอุดจะต้องคำนึงถึงการใช้งาน ลักษณะการรับภาระของฟันชิ้นนั้น ๆ และลักษณะความเสียหายของฟันที่อาจจะเกิดขึ้นด้วย

บทที่ 7 แบบจำลองการครอบฟัน

7.1 บทนำ

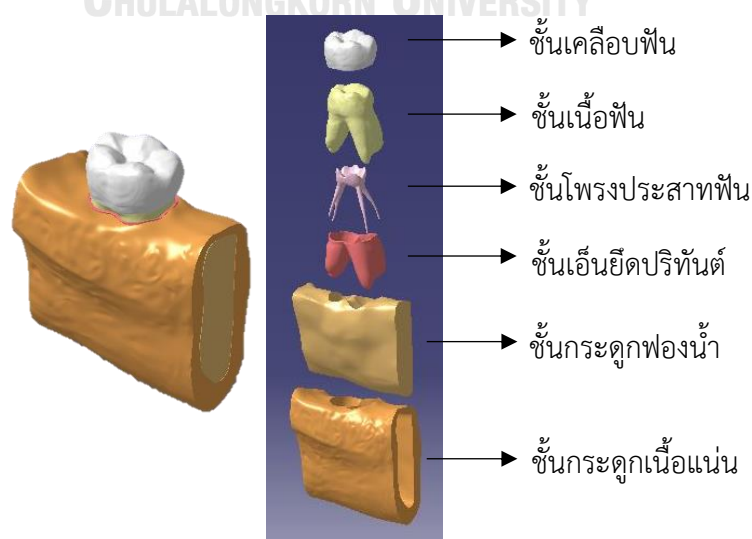
การครอบฟันเป็นการบูรณะฟันที่ได้รับความเสียหายมากหรือมีการแตกหักของฟัน ยกตัวอย่างเช่น ฟันคู่ที่มีรูขนาดใหญ่จนไม่สามารถบูรณะด้วยวิธีการอุดได้ ฟันที่โดนกระแทกอย่างรุนแรงจนเกิดการแตกหัก รวมไปถึงฟันที่มีการรักษารากฟันแล้วมีเนื้อฟันเหลือน้อยมาก เป็นต้น วิธีการครอบฟันเป็นการสร้างที่ครอบฟันแบบติดแน่นมาทดแทนและเสริมสร้างให้กับตัวฟัน ซึ่งอาจทำมาจากโลหะล้วนทั้งซี่ เซรามิคล้วน หรือทั้งโลหะและเซรามิค โดยมีวิธีการดังนี้ ทำการกรอส่วนที่เสียหายออกและกรอให้เนื้อฟันมีขนาดเล็กลง จากนั้นทำการพิมพ์ฟัน เพื่อสร้างวัสดุในการครอบฟัน เมื่อได้ที่ครอบฟันตามที่ต้องการแล้วนำมาครอบฟันในส่วนที่กรอเตรียมไว้ เพื่อให้ฟันกลับมาแข็งแรง มีความสวยงามและมีประสิทธิภาพใช้งานได้ดังเดิม

เนื้อหาบทนี้เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนมที่มีการครอบโดยมีการสร้างแกนฟันด้วยวัสดุที่ต่างกัน แล้วบูรณะด้วยการครอบฟันแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย แบบจำลองฟันดี แบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นแบบมัลติคอร์กับแบบจำลองที่มีแกนเป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (Glass ionomer cements: GIC) โดยที่แบบจำลองการครอบทั้งสองแบบนี้ครอบฟันทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)

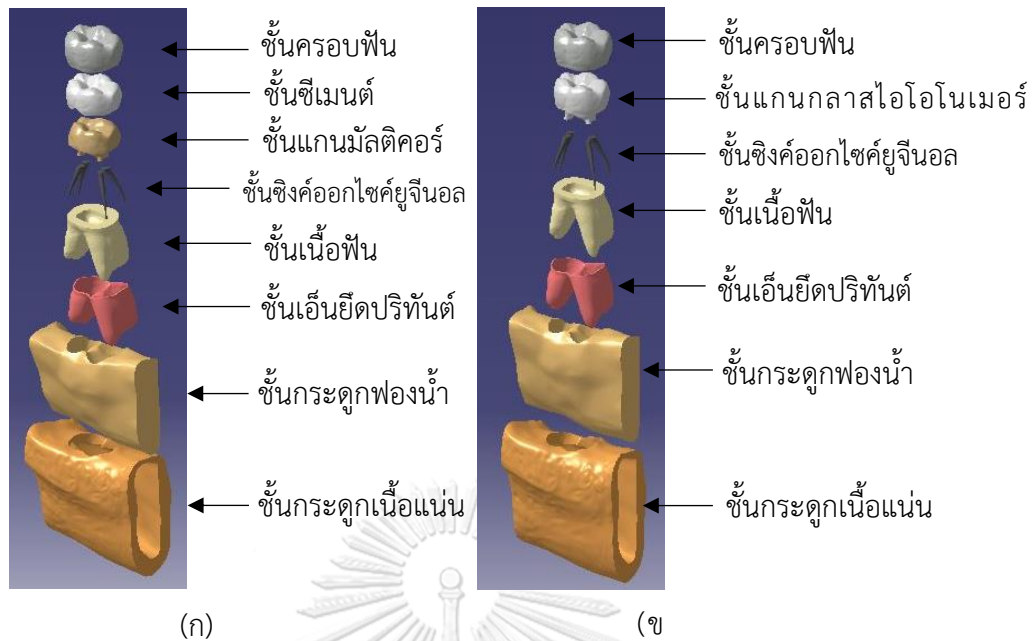
7.2 แบบจำลองและสมบัติของวัสดุ

แบบจำลองฟันที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทนี้คือ แบบจำลองฟันดีของฟันกรามล่างของฟันน้ำนม โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูกขากรรไกร ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.1 และแบบจำลองที่มีการครอบ ดังรูปที่ 7.2 ซึ่งเป็นการนำแบบจำลองฟันดีมาปรับเปลี่ยนโครงสร้าง เพื่อจำลองฟันที่รักษารากฟันแล้วบูรณะด้วยวิธีการครอบ การสร้างแบบจำลองการครอบฟันแสดงอยู่ในภาคผนวก ข. วิธีการรักษารากฟันแล้วบูรณะด้วยวิธีการครอบเป็นการรักษาเนื้อฟันจริงให้ได้มากที่สุด เพื่อที่จะให้เนื้อฟันเป็นแกนยึดกับกระดูกและเป็นฐานของการครอบ รวมถึงจะได้ไม่ต้องรักษาด้วยวิธีถอนฟัน เนื่องจากการถอนฟันอาจส่งผลต่อกระดูกได้ แบบจำลองการครอบมีอยู่ 2 แบบจำลองคือ การครอบแบบที่ 1 เป็นการจำลองฟันที่มีแกนฟันเป็นมัลติคอร์ โดยทำการตัดฟันส่วนด้านบนของตัวฟันออกและทำความสะอาดโพรงประสาทฟัน การตัดส่วนด้านบนของตัวฟันออก เนื่องจากฟันเกิดความเสียหายมากหรือไม่

สามารถบูรณะด้วยวิธีการอุดได้ จากนั้นอุดรากโพรงประสาทฟันด้วยวัสดุอุดรากฟันแล้วสร้างชั้นมัลติคอร์ขึ้นมาเป็นแกนฟันแทนส่วนเนื้อฟันที่ถูกตัดทิ้งและทำการครอบฟันต่อไป การสร้างชั้นแกนฟันขึ้นมาเพื่อเป็นฐานสำหรับการครอบฟันและช่วยเพิ่มเติมในส่วนที่ถูกตัดทิ้ง ส่วนมัลติคอร์ที่ใช้ทำแกนฟันเป็นวัสดุชนิดเดียวกับที่กล่าวไปในหัวข้อ 6.2 ของบทที่ 6 และวัสดุอุดรากฟันที่ใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (Zinc Oxide Eugenol) ซึ่งเป็นวัสดุอุดฟันแบบชั่วคราว เหตุผลที่ใช้วัสดุอุดรากฟันชนิดนี้เพราะว่าเป็นวัสดุที่หลุดหรือแตกภายในระยะเวลาสั้น ๆ ประกอบกับฟันน้ำนมจะหลุดออกจากกระดูกขากรรไกรเมื่อเด็กโตขึ้นและมีฟันแท้ขึ้นมาทดแทน [53] ดังนั้นการครอบแบบที่ 1 มีโครงสร้างประกอบไปด้วย ชั้นครอบฟัน ชั้นซีเมนต์ (cement) ชั้นแกนมัลติคอร์ ชั้นวัสดุอุดรากฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูก ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7.2(ก) โดยชั้นซีเมนต์เป็นชั้นที่ยึดระหว่างชั้นครอบฟันกับชั้นแกนมัลติคอร์ การครอบแบบที่ 2 คล้ายกับการครอบแบบที่ 1 เพียงแต่ต่างกันตรงที่ชั้นแกนฟันคือ ชั้นแกนฟันของการครอบแบบที่ 2 เป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ซึ่งกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถยึดติดเนื้อฟันและโลหะได้ดี มีคุณสมบัติในการปลดปล่อยฟลูออไรด์ (fluoride) ออกมาเพื่อช่วยป้องกันฟันผุ [54] ดังนั้นการครอบแบบที่ 2 มีโครงสร้างประกอบไปด้วย ชั้นครอบฟัน ชั้นแกนกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ชั้นวัสดุอุดรากฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูก ตามลำดับ ดังรูป 7.2(ข) ชั้นครอบฟันทั้ง 2 แบบจำลองเป็นการครอบฟันด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Crown: SSC) การครอบฟันแบบนี้เป็นการครอบฟันสำเร็จรูป ทำมาจากสแตนเลส โดยส่วนใหญ่มักใช้กับฟันน้ำนม ซึ่งไม่ได้เน้นความสวยงามเนื่องจากฟันน้ำนมหลุดออกไปในภายหลัง และใช้เวลาทำเพียงครั้งเดียว ไม่ต้องพิมพ์ปาก เนื่องจากเด็กไม่สามารถทนการทำฟันนาน ๆ และซ้าซ้อนได้ [38]



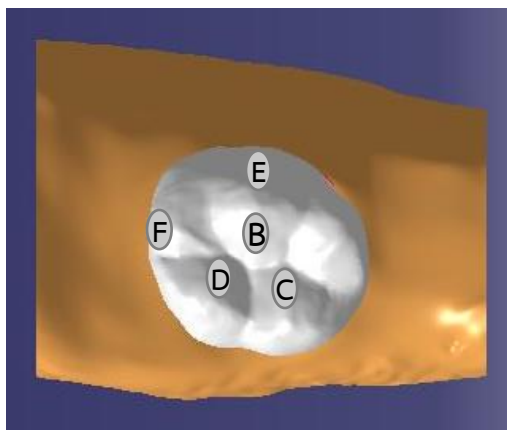
รูปที่ 7.1 โครงสร้างแบบจำลองฟันดี



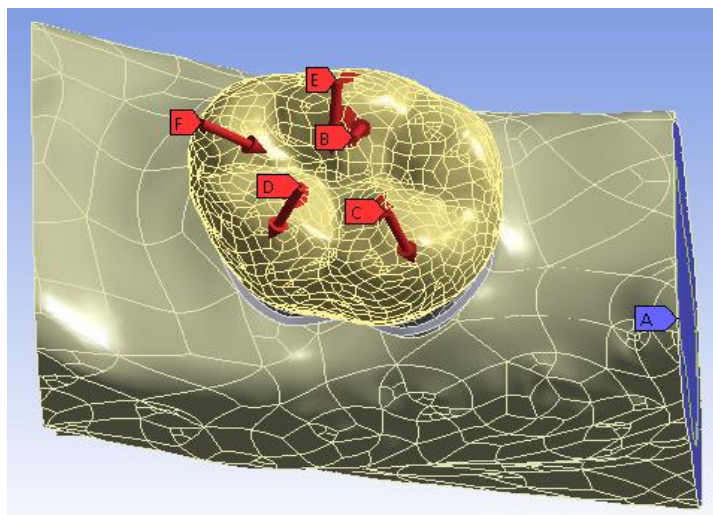
รูปที่ 7.2 การเรียงลำดับชั้นของแบบจำลองการครอบฟัน, (ก) การครอบแบบที่ 1, (ข) การครอบแบบที่ 2

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการกำหนดค่าข้มอดุลัสและอัตราส่วนปัวซองของส่วนต่าง ๆ ในแบบจำลอง ซึ่งสมบัติเชิงกลของแบบจำลองฟันดีแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1 และสมบัติเชิงกลของวัสดุครอบฟันแสดงในตารางที่ 7.1 ขั้นตอนที่สองเป็นการเลือกขนาดเอลิเมนต์และการสัมผัสของผิวสัมผัส โดยกำหนดให้ขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ตามการศึกษาการรู่เข้าในหัวข้อที่ 4.4 ของบทที่ 4 คือขนาดเอลิเมนต์ 0.1 mm และ 1 mm สำหรับชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดุกขากรรไกรตามลำดับ ส่วนในชั้นอื่น ๆ ได้แก่ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาท ชั้นครอบฟัน ชั้นซีเมนต์ ชั้นวัสดุอุดรากฟัน รวมไปถึงชั้นแกนฟัน กำหนดให้มีขนาดเอลิเมนต์ 0.3 mm. และการกำหนดการสัมผัสของผิวสัมผัสเป็นไปดังนี้ แบบจำลองฟันดีมีการสัมผัสผิวระหว่างวัสดุชั้นต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ชั้นเคลือบฟันกับชั้นเนื้อฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์กับชั้นกระดุก ฯลฯ เป็นการสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกัน การกำหนดผิวสัมผัสของแบบจำลองการครอบแบบที่ 1 ประกอบด้วย การสัมผัสระหว่างชั้นครอบฟันกับชั้นซีเมนต์และชั้นซีเมนต์กับชั้นแกนมัลติคอร์ เป็นการสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.2 [55] ส่วนชั้นที่มีการสัมผัสกับวัสดุอุดรากฟัน ได้แก่ แกนมัลติคอร์ ชั้นเนื้อฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์เป็นแบบมีแรงเสียดทานและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 0.1 [52] นอกจากนั้นชั้นเนื้อฟันกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นเอ็นยึดปริทันต์กับชั้นกระดุก

กำหนดให้มีการสัมผัสเป็นแบบยึดติดไปด้วยกัน และการกำหนดผิวสัมผัสของแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 คือ การสัมผัสระหว่างชั้นเหมือนการครอบแบบที่ 1 แต่แตกต่างกันที่ชั้นแกน กล่าวได้ว่าการครอบแบบที่ 2 มีแกนพื้นเป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ จากการเรียงลำดับชั้นของโครงสร้างแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 ทำให้แกนพื้นแบบกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์มีการสัมผัสกับชั้นครอบฟันและวัสดุอุดรากฟันโดยตรง ดังนั้นกำหนดให้การสัมผัสระหว่างแกนพื้นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์กับชั้นครอบฟันเป็นแบบแรงเสียดทานและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 0.2 ส่วนการสัมผัสระหว่างแกนพื้นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์กับวัสดุอุดรากฟันกำหนดให้เป็นแบบแรงเสียดทานและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 0.1 ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลองการศึกษานี้ได้มีการกำหนดแรงแต่ละตำแหน่งด้วยแรงกระทำขนาด 100 N กระทำตั้งฉากกับผิวด้านบนของชั้นเคลือบฟันในแบบจำลองฟันดีหรือชั้นครอบฟันในแบบจำลองการครอบทั้งสองแบบ [56] ซึ่งมีการกำหนดตำแหน่งแรงอยู่ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 7.3 ประกอบไปด้วย ตำแหน่งที่หนึ่งคือ ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งตรงสันยอดของฟันด้านแก้ม ตำแหน่งที่สองและสามคือ ตำแหน่ง C และ D โดยตำแหน่งทั้งสองนี้อยู่บริเวณสันยอดฟันทางด้านลิ้นทั้ง 2 สันยอด ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งที่สี่คือ ตำแหน่ง E เป็นตำแหน่งที่บริเวณผิวด้านข้างของสันยอดกลางทางด้านแก้ม และตำแหน่งสุดท้ายคือ ตำแหน่ง F อยู่บริเวณผิวด้านข้างของสันยอดด้านซ้ายทางด้านแก้ม แรงกระทำทั้ง 5 ตำแหน่งนี้กระทำพร้อมกัน นอกจากนั้นมีการกำหนดพื้นที่ผืนของกระดูกขากรรไกรเป็นแบบยึดแบบยึดแน่นทางด้านล่างและด้านข้างทั้งสองด้านของกระดูกขากรรไกร เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ครบตามที่ต้องการแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป โดยเป็นการศึกษาการครอบฟันด้วยวัสดุที่ใช้ในการก่อแกนพื้นแบบต่าง ๆ ในแบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนม เพื่อเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการครอบฟัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.3 แรงกระทำ, (ก) ตำแหน่งแรงกระทำ, (ข) ทิศทางแรงกระทำ

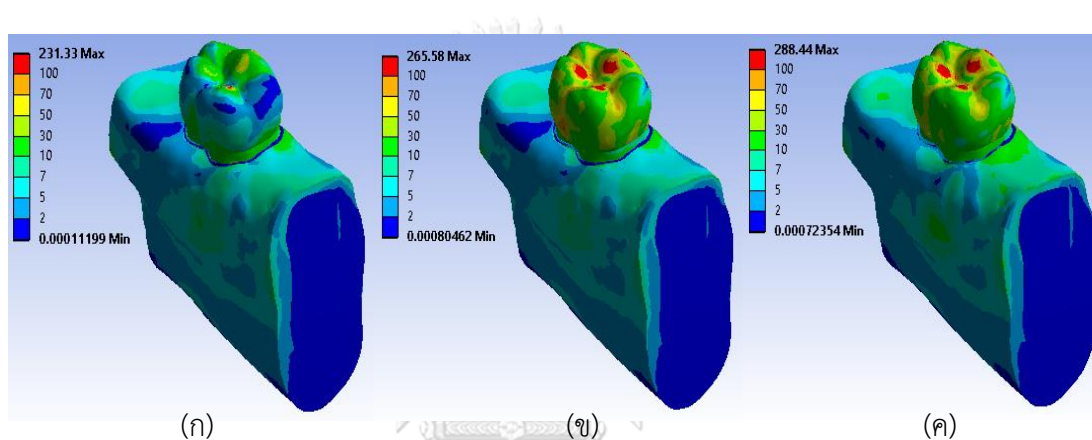
ตารางที่ 7.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุกรอบในแบบจำลองพื้น [46]

วัสดุในแบบจำลองพื้น	มอดุลัสของความยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
อะลูมิเนียมไร้สนิม	200,000	0.33
กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์	10,800	0.30
ซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล	2,140	0.28

7.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นในแบบจำลองโครงสร้างพื้นที่มีการครอบ

การวิเคราะห์ความเค้นในแบบจำลองโครงสร้างพื้นดีและแบบจำลองที่มีการครอบ พบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นในแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 288.44 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่มีการครอบแบบที่ 1 และแบบจำลองพื้นดีที่มีค่าเท่ากับ 265.58 MPa และ 231.33 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเค้นสูงสุดในแบบจำลองการครอบพื้นแบบที่ 2 มีค่าต่างกับแบบจำลองการครอบแบบที่ 1 ประมาณ 8.61% ซึ่งถือว่าไม่ต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาการกระจายของความเค้นที่เกิดในแบบจำลองพื้นที่แสดงในรูป 7.4 พบว่าการครอบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ความเค้นสูงสุดเกิดในบริเวณชั้นครอบพื้น ดังรูป 7.4(ข) และ (ค) เนื่องจากชั้นครอบพื้นมีค่ามอดุลัสที่สูงมากจึงเป็นเหตุให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงตาม ส่วนแบบจำลองพื้นดีดังรูป 7.4(ก) ความเค้นสูงสุดเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบพื้นและชั้นเนื้อพื้น และพบว่าความเค้นที่

เกิดขึ้นบริเวณกระตุกรอบ ๆ ตัวฟันในการครอบแบบที่ 2 เกิดความเค้นมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ส่วนแบบจำลองฟันดีและการครอบแบบที่ 1 มีลักษณะการกระจายความเค้นใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาการกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่แสดงในรูปที่ 7.5 ซึ่งแสดงภาพตัดความเค้นในแบบจำลองต่าง ๆ พบว่าการกระจายความเค้นของการครอบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีการกระจายมากที่สุดบริเวณชั้นครอบฟัน ดังรูป 7.5(ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมากเมื่อทำเปรียบเทียบกับแบบจำลองฟันดี ดังรูป 7.5(ก) และบริเวณส่วนรากตรงขอบกระตุกของแบบจำลองฟันดีและการครอบแบบที่ 1 เกิดการกระจายความเค้นมากกว่าการครอบแบบที่ 2

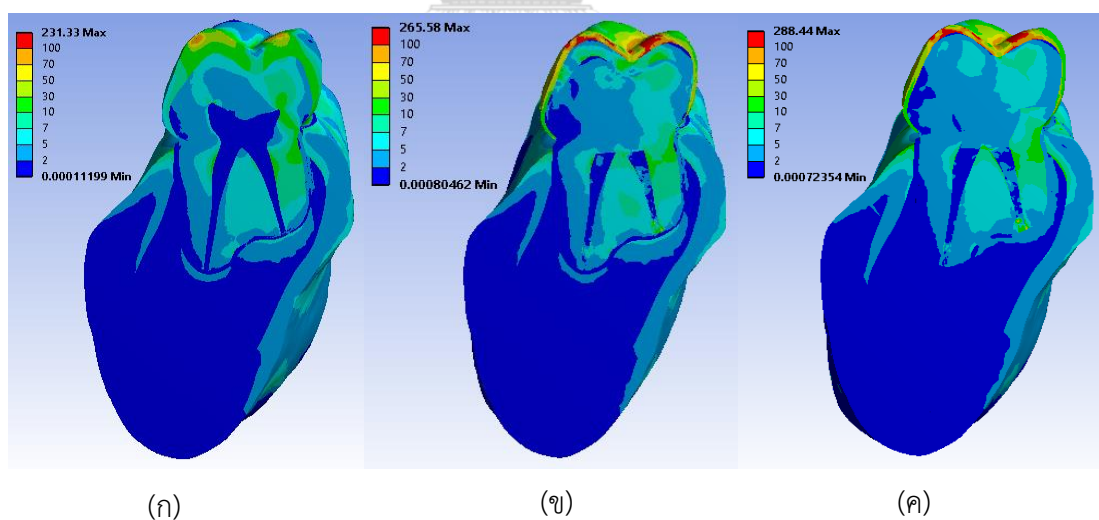


รูปที่ 7.4 การกระจายความเค้นในแบบจำลอง, (ก) แบบจำลองฟันดี, (ข) การครอบแบบที่ 1, (ค) การครอบแบบที่ 2

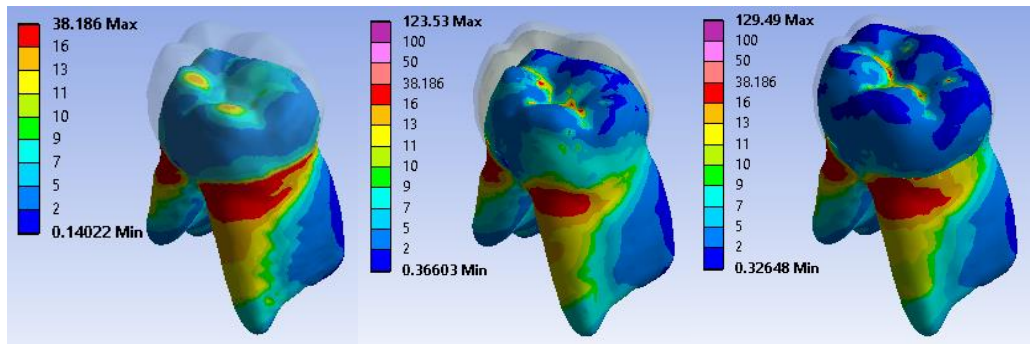
จากรูป 7.6 แสดงการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันในชั้นเนื้อฟันและชั้นแกนฟัน จะเห็นว่าแบบจำลองฟันดี แบบจำลองที่มีการครอบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีความเค้นที่เกิดขึ้นเกิดมากที่สุดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบฟันกับชั้นเนื้อฟัน อีกทั้งแบบจำลองฟันดีมีการกระจายความเค้นสูงกว่าการครอบแบบที่ 2 และแบบที่ 1 ตามลำดับ และความเค้นส่วนบนแกนฟันของการครอบแบบที่ 2 มีความเค้นต่ำกว่าแบบจำลองทั้งสองแบบ เนื่องจากค่ามอดุลัสของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์มีค่าน้อยกว่าค่ามอดุลัสของอัลติคอร์และของชั้นเนื้อฟัน เมื่อนำแกนฟันทั้งสองวัสดุมาเปรียบเทียบความเค้นกัน ดังรูป 7.7 พบว่า แกนฟันของการครอบแบบที่ 1 มีค่าความเค้นเท่ากับ 46.078 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าแกนฟันของการครอบแบบที่ 2 ที่มีค่าความเค้นเท่ากับ 20.651 MPa ทำให้แกนฟันของการครอบแบบที่ 1 มีความแข็งแรงมากกว่าแกนฟันของการครอบแบบที่ 2 เนื่องจากมอดุลัสของอัลติคอร์สูงกว่าค่ามอดุลัสของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และจากรูป 7.7(ก) ความเค้นที่เกิดขึ้นในแกน

ฟันของการครอบแบบที่ 1 บริเวณขอบด้านล่างของแกนฟันมีการกระจายความเค้นที่สูงกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในการครอบแบบที่ 2 อยู่หลายตำแหน่ง

นอกจากนี้พิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นเนื้อฟันที่เหลือหลังจากการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยวิธีการครอบฟันพบว่า ความเค้นของชั้นเนื้อฟันในการครอบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 123.53 MPa และ 129.49 MPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูป 7.8 เป็นการแสดงการกระจายความเค้นในเนื้อฟันจะเห็นได้ว่า ภาพรวมของการกระจายความเค้นของการครอบแบบที่ 2 มีค่าสูงกว่าการครอบแบบที่ 1 เนื่องจากการครอบแบบที่ 2 ค่ามอดุลัสระหว่างชั้นเนื้อฟันและชั้นแกนกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์แตกต่างกัน ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูง และเมื่อพิจารณาความเค้นจากรูปที่ 7.9 ซึ่งเป็นมุมมองด้านบนของการกระจายความเค้นในเนื้อฟันพบว่า การกระจายความเค้นบริเวณขอบด้านบนของเนื้อฟันของการครอบแบบที่ 2 มีการกระจายความเค้นสูงกว่าการครอบแบบที่ 1 ในทางตรงกันข้ามการกระจายความเค้นบริเวณง่ามฟันของการครอบแบบที่ 1 เกิดความเค้นสูงกว่าการครอบฟันแบบที่ 2 และจากรูป 7.10 ซึ่งเป็นการแสดงการกระจายความเค้นในมุมมองด้านล่างของเนื้อฟัน จะเห็นได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรากฟันทั้งสองรากของการครอบแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าการครอบแบบที่ 2



รูปที่ 7.5 ภาพตัดความเค้นในแบบจำลอง, (ก) แบบจำลองฟันดี, (ข) การครอบแบบที่ 1, (ค) การครอบแบบที่ 2

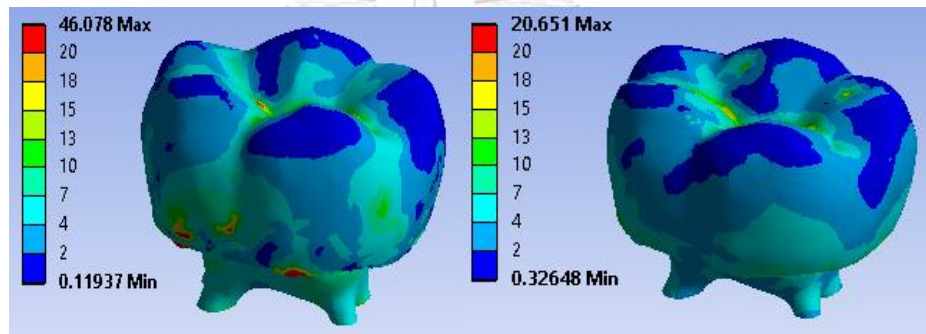


(ก)

(ข)

(ค)

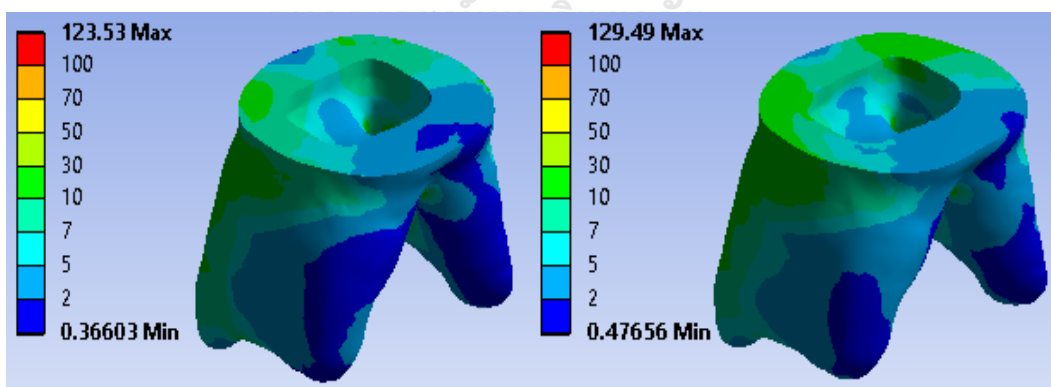
รูปที่ 7.6 การกระจายความเค้นของเนื้อฟันและแกนฟัน, (ก) แบบจำลองฟันดี, (ข) การครอบแบบที่ 1, (ค) การครอบแบบที่ 2



(ก)

(ข)

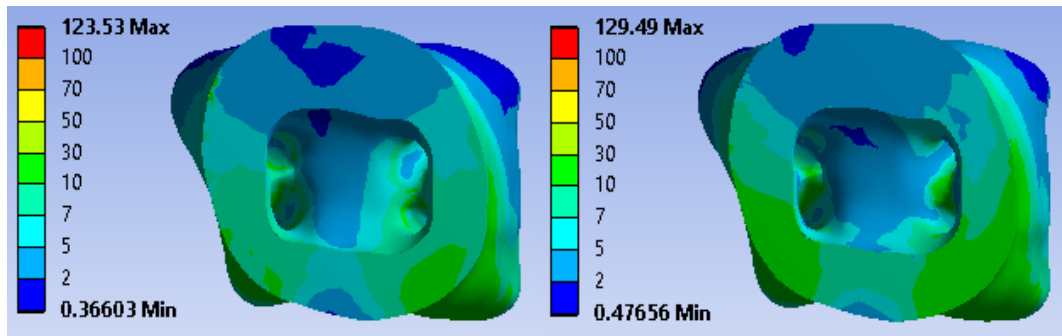
รูปที่ 7.7 การกระจายความเค้นในแกนฟัน, (ก) การครอบแบบที่ 1, (ข) การครอบแบบที่ 2



(ก)

(ข)

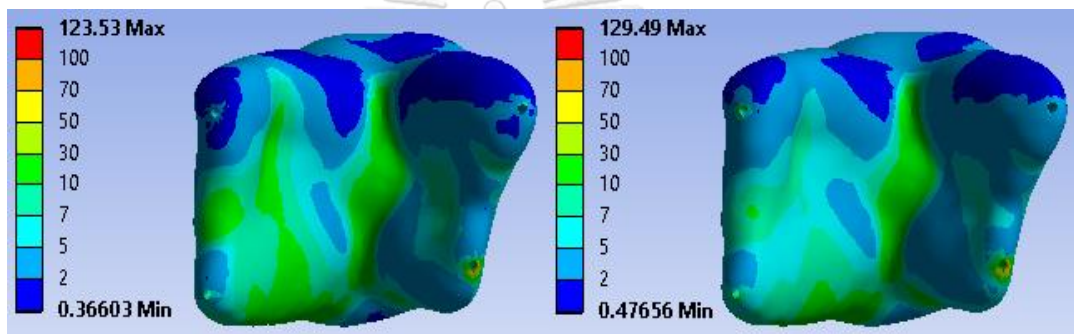
รูปที่ 7.8 การกระจายความเค้นในเนื้อฟัน, (ก) การครอบแบบที่ 1, (ข) การครอบแบบที่ 2



(ก)

(ข)

รูปที่ 7.9 มุมมองด้านบนของการกระจายความเค้นในเนื้อพิน, (ก) การครอบแบบที่ 1, (ข) การครอบแบบที่ 2

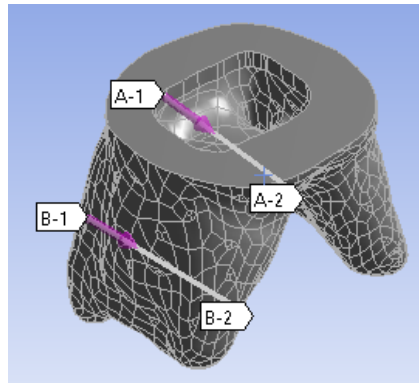


(ก)

(ข)

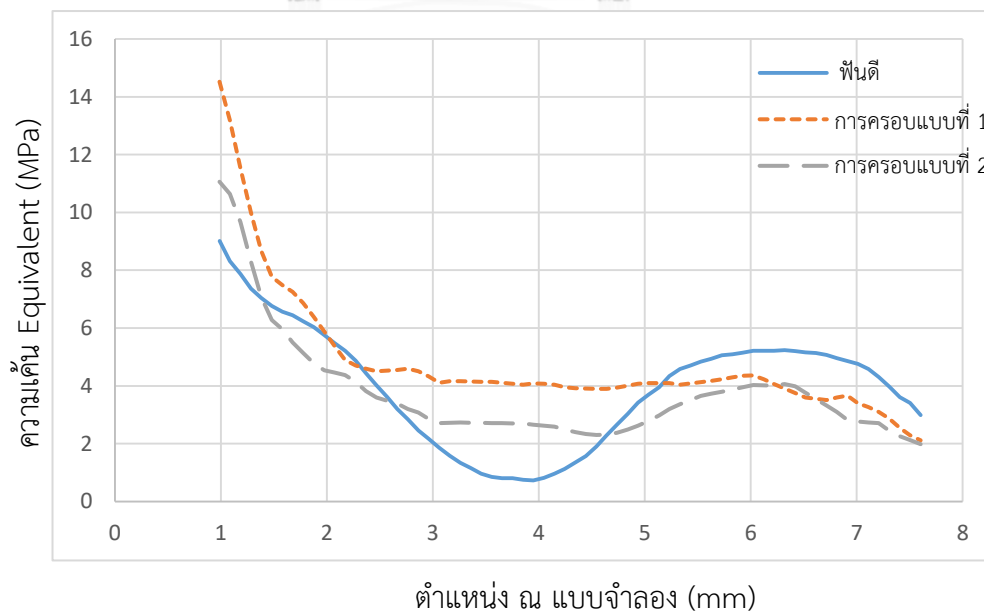
รูปที่ 7.10 มุมมองด้านล่างของการกระจายความเค้นในเนื้อพิน, (ก) การครอบแบบที่ 1, (ข) การครอบแบบที่ 2

เมื่อพิจารณาความเค้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเค้นในเนื้อพินตรงบริเวณง่ามพินและรากพินอย่างชัดเจนในแบบจำลองการครอบพิน จึงเขียนกราฟความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวเส้นตรง 2 เส้นคือ เส้นตรง A และเส้นตรง B ดังแสดงในรูปที่ 7.11 เส้นตรง A เป็นเส้นตรงที่ลากจากจุดที่ A-1 ไปยังจุดที่ A-2 ซึ่งลากผ่านบริเวณง่ามพิน เนื่องจากบริเวณส่วนนี้มีโอกาสในการแตกหักได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น ในขณะที่อีกเส้นตรงคือ เส้นตรง B เป็นเส้นตรงที่ลากจากจุด B-1 ถึงจุด B-2 โดยลากผ่านบริเวณรากพิน เมื่อนำความเค้นตามเส้นตรงทั้งสองเส้นมาพล็อต จะได้การกระจายความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแบบจำลองพิน ดังรูป 7.12 และ 7.13 โดยเป็นกราฟที่แสดงเฉพาะชั้นเนื้อพิน

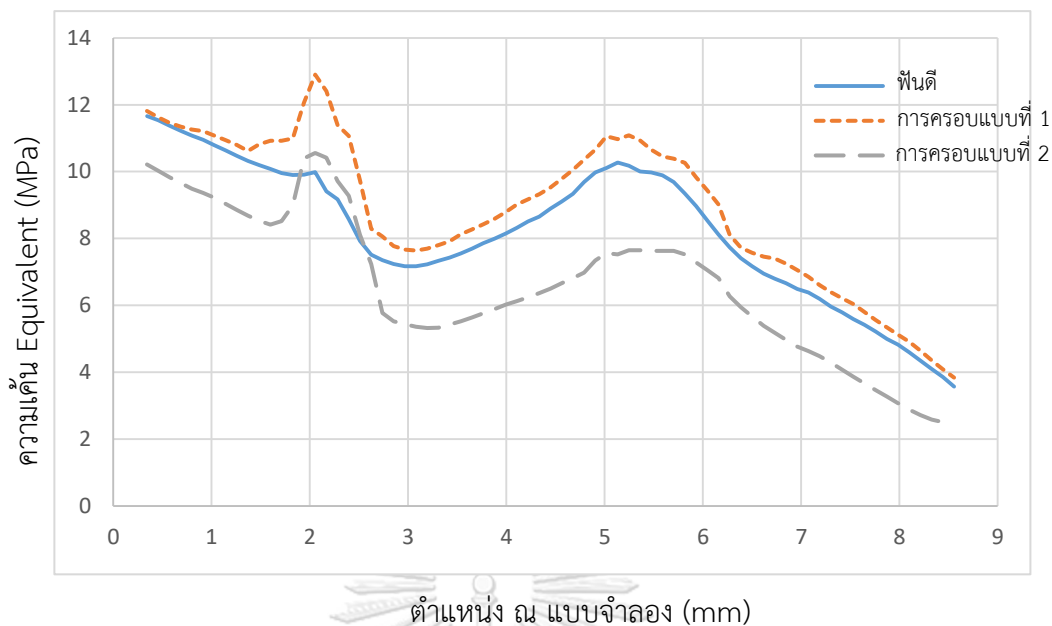


รูปที่ 7.11 เส้นตรงกำหนดตำแหน่ง

จากลักษณะความเค้นตามแนวเส้นตรงบริเวณง่ามพื้น ดังรูป 7.12 พบว่า แบบจำลองการครอบแบบที่ 1 มีความเค้นสูงกว่าแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 แต่ความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลองพื้นดินมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการครอบทั้งสองแบบตรงบริเวณกึ่งกลางของง่ามพื้น เนื่องจากโครงสร้างของแบบจำลองพื้นดินมีโพรงประสาทพื้นที่มีค่ามอดุลัสน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่ามอดุลัสของชั้นอื่น ๆ ในทำนองเดียวกันความเค้นบริเวณรากพื้นของแบบจำลองการครอบแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าแบบจำลองพื้นดินและการครอบแบบที่ 2 ตามลำดับ ดังรูป 7.13 โดยความเค้นของการครอบแบบที่ 1 และแบบจำลองพื้นดินมีค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกับการครอบแบบที่ 2 เนื่องจากค่ามอดุลัสของแกนมัลติคอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่ามอดุลัสของเนื้อพื้น



รูปที่ 7.12 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งในแบบจำลองตรงง่ามพื้น



รูปที่ 7.13 กราฟแสดงความเค้น ณ ตำแหน่งในแบบจำลองบริเวณรากฟัน

7.4 บทสรุป

จากการศึกษาการครอบฟันด้วยวัสดุที่ใช้ในการก่อแกนฟันแบบต่าง ๆ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความเค้นสูงสุดเกิดในแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 รองลงมาคือการครอบแบบที่ 1 และแบบจำลองฟันดี ตามลำดับ ซึ่งความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่ชั้นครอบฟันของแบบจำลองการครอบทั้งสองแบบ แต่แบบจำลองฟันดีเกิดความเค้นสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟัน จากการเปรียบเทียบกระจายความเค้นของเนื้อฟันของการครอบ ในภาพรวมจะเห็นว่าแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 มีการกระจายความเค้นสูงกว่าแบบจำลองการครอบแบบที่ 1 แต่เมื่อพิจารณาความเค้นบริเวณง่ามฟันและรากฟันพบว่า แบบจำลองการครอบแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 เนื่องจากแกนฟันที่สร้างขึ้นช่วยให้ตัวฟันมีความแข็งแรงมากขึ้นและค่า Young's Modulus ของวัสดุเคลือบฟันมีค่ามากกว่าค่า Young's Modulus ของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าความเค้นในเนื้อฟันบริเวณที่มีฟันที่ที่แคบในแบบจำลองการครอบแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าแบบจำลองการครอบแบบที่ 2

บทที่ 8 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการศึกษา

ปัจจุบันระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาความเค้นในฟันมากขึ้น เนื่องจากวิธีนี้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการศึกษา สะดวกในการใช้งานและหาผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็ว ถึงแม้คำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์จะไม่แม่นยำ เนื่องจากการกำหนดพารามิเตอร์และเงื่อนไขต่าง ๆ ให้เหมือนกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงนั้นทำได้ยาก แต่ก็สามารถหาคำตอบได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางใด เพื่อเป็นการเลือกรูปแบบในการรักษา เลือกใช้วัสดุบูรณะ และยังช่วยในการพัฒนาวิธีการรักษาให้เหมาะสมต่อไป ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์หาความเค้นในแบบจำลองฟัน แบบจำลองฟันที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้และฟันกรามล่างของฟันน้ำนม ซึ่งฟันของมนุษย์หนึ่งซี่ประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ คือชั้นเคลือบฟัน เป็นชั้นปกคลุมด้านนอกสุดของตัวฟันและเป็นชั้นที่แข็งแรงที่สุด ชั้นต่อมาคือชั้นเนื้อฟัน เป็นส่วนประกอบหลักของฟัน ภายในของชั้นเนื้อฟันนี้มีโพรงประสาทฟันประกอบอยู่ ทำหน้าที่เป็นแหล่งที่อยู่ของเส้นเลือดและเส้นประสาท ถัดจากชั้นเนื้อฟันจะเป็นส่วนที่ฝังตัวอยู่ในกระดูกขากรรไกร เรียกส่วนนี้ว่า ส่วนราก (root) ในส่วนนี้มีชั้นเอ็นยึด ปริทันต์เป็นตัวยึดและพยุงให้ชั้นเนื้อฟันคงอยู่ในกระดูกขากรรไกรได้ และกระดูกขากรรไกรมีกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกฟองน้ำประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นในแบบจำลองฟันจึงมีการปรับแต่งโครงสร้างแบบจำลองให้เหมือนตามโครงสร้างของฟันมนุษย์ แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มาจากการสแกนฟันด้วยวิธีภาพถ่ายคอมพิวเตอร์ (CT scan) แล้วนำไฟล์สแกนมาปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของแข็งก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อได้แบบจำลองฟันตามโครงสร้างฟันของมนุษย์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสอบทวนโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลเฉลยตรงตามทฤษฎี การสอบทวนใช้ปัญหาของคานคอมโพสิตที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด เนื่องจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด การเลือกปัญหาของคานคอมโพสิตเนื่องจากการสอบทวนว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถคำนวณผลลัพธ์จากปัญหาที่มีวัสดุหลายชนิดได้ตรงตามระเบียบวิธีการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีหรือไม่ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1 ของบทที่ 4 จากการสอบทวนพบว่าการคำนวณหาผลลัพธ์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีผลเฉลยแม่นยำตรงมีค่าประมาณใกล้เคียงกันคือ มีค่าผิดพลาดมากที่สุดอยู่ที่ 0.22%

ดังนั้นสามารถใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้ ซึ่งโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ ได้แก่ สมบัติเชิงกลของวัสดุ การสัมผัสของผิวสัมผัส ขนาดเอลิเมนต์ เงื่อนไขขอบเขต เป็นต้น การกำหนดพารามิเตอร์เหล่านี้จึงต้องมีการศึกษา เพื่อให้ผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ลู่เข้าสู่คำตอบที่ถูกต้อง จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.4 ของบทที่ 4 มีการกำหนดให้การสัมผัสของผิวสัมผัสในทุก ๆ ชั้นของแบบจำลองฟันดีเป็นการสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกัน ส่วนแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาแล้ว บุรณะด้วยการอุดมีการกำหนดการสัมผัสต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับวัสดุที่เติมลงไป กล่าวคือชั้นที่มีการสัมผัสกับชั้นมัลติคอร์จะเป็นการสัมผัสแบบยึดติดไปด้วยกัน ชั้นที่มีการสัมผัสกับชั้นอะมัลกัมจะเป็นการสัมผัสกันแบบมีแรงเสียดทาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.2 และชั้นที่มีการสัมผัสกับชั้นกัตตาเปอร์ซามีการสัมผัสกันแบบมีแรงเสียดทาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 แบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาแล้วบุรณะด้วยการครอบ โดยชั้นที่มีการสัมผัสกับแกนฟันมัลติคอร์ และวัสดุอุดรากฟันเป็นแบบมีแรงเสียดทานและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 0.1 ส่วนชั้นที่สัมผัสกับชั้นครอบฟันและชั้นแกนกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์เป็นการสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.2 นอกจากนี้กำหนดการสัมผัสของผิวสัมผัสเป็นแบบยึดติดไปด้วยกัน ไม่ว่าจะแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาแล้วบุรณะด้วยการอุดหรือการครอบ และจากการศึกษาการลู่เข้าของการหาขนาดเอลิเมนต์ จึงเลือกขนาดเอลิเมนต์ดังนี้ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์มีขนาดเอลิเมนต์ 0.1 mm ชั้นกระดูกขากรรไกรมีขนาดเอลิเมนต์ 1 mm และชั้นอื่น ๆ ได้แก่ ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน วัสดุอุดต่าง ๆ ฯลฯ กำหนดให้มีขนาดเอลิเมนต์ 0.3 mm

วิทยานิพนธ์นี้บรรลุดูวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ที่ตั้งไว้ 2 ข้อคือ วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 งานวิจัยนี้สามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้างฟันของฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้และฟันกรามล่างของฟันน้ำนมได้ โดยแบบจำลองประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ตามโครงสร้างฟันของมนุษย์ ดังเช่น ชั้นเคลือบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และชั้นกระดูก แบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นมานำไปวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาการสร้างแบบจำลองพบว่า การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากฟันมีรูปร่างที่แตกต่างจากชิ้นงานอื่น ๆ กล่าวคือฟันของมนุษย์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ ได้แก่ ผิวเคลือบฟัน เนื้อฟัน เคลือบรากฟันและเอ็นยึดปริทันต์ ทำให้การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ส่วนประกอบของฟันบางส่วนไม่ได้รับรวมไว้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นได้มีการศึกษาวิเคราะห์หาความเค้นและการเสียรูปที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันที่มีและไม่มีเอ็นยึดปริทันต์ ดังแสดง

การศึกษาในบทที่ 5 โดยแบบจำลองนี้รับภาระทางกลขนาด 100 N กระทำทิศตั้งฉากกับผิวพื้นที่ด้านในของด้านติดแก้ม จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า แบบจำลองที่มีชั้นเอ็นยึดปริทัศน์มีค่าความเค้นในเนื้อฟันและระยะการเคลื่อนที่สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่มีชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ ทำให้การศึกษาการตอบสนองเชิงกลของฟันที่มีแรงมากระทำควรจะรวมชั้นเอ็นยึดปริทัศน์ไว้ในแบบจำลองด้วย สำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาความเค้นของแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดสำหรับฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้และบูรณะด้วยการครอบสำหรับฟันกรามล่างของฟันน้ำนม โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในส่วนของการศึกษาฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุดในแบบจำลองฟันกรามน้อยล่างของฟันแท้ได้มีการเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้อุดและรูปแบบในการอุด เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการบูรณะให้เหมาะสมกับผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้ว พบว่าการอุดแบบที่ 3 คือการอุดด้วยวัสดุอะมัลกัมมีค่าความเค้นในตัวฟันและในวัสดุอุดสูงกว่าการอุดแบบที่ 2 ที่เป็นการอุดด้วยวัสดุอมัลติคอร์และเนื้อฟันปกติที่ไม่มีการอุด นอกจากนี้การอุดแบบที่ 5 การอุดแบบมีเดือยฟันทำให้ค่าความเค้นต่ำกว่าในการอุดแบบอื่น ๆ จึงเป็นเหตุให้ต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเลือกวัสดุและวิธีการในการบูรณะ ได้แก่ การใช้งาน การรับภาระของฟันซี่นั้น ๆ รวมถึงความสวยงาม ต่อมาเป็นการศึกษาฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยการครอบในแบบจำลองฟันกรามล่างของฟันน้ำนม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเค้นของการครอบฟันที่มีการสร้างแกนฟันแบบต่างวัสดุกัน จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า แบบจำลองการครอบแบบที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองสูงกว่าการครอบแบบที่ 1 ที่แบบจำลองมีแกนฟันเป็นอมัลติคอร์ แต่บริเวณเนื้อฟันที่มีพื้นที่ที่แคบความเค้นที่เกิดขึ้นในการครอบแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 การบรรลุวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ทั้งหมดเป็นการยืนยันได้ชัดเจนว่าการศึกษานี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาโดยการทดลองทางด้านทันตกรรม การเลือกรูปแบบและวัสดุในการบูรณะ รวมถึงช่วยในการพัฒนาวิธีการรักษาได้อย่างเหมาะสมต่อไป

8.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยอนาคต

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันนี้มีข้อจำกัดบางประการในการกำหนดพารามิเตอร์ ข้อจำกัดเหล่านี้จึงควรที่จะต้องมีการแก้ไขปรับปรุง เพื่อผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการรักษาฟันจริงมาก

ยิ่งขึ้น ดังเช่น การกำหนดภาระเชิงกล ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้ภาระเชิงกลที่กำหนดเป็นการจำลองแรงกระทำเพียงครั้งเดียว แต่การเคี้ยวของมนุษย์เป็นการกระทำแบบวนรอบ ดังนั้นควรมีการกำหนดภาระเชิงกลเป็นแบบไดนามิกส์ เพื่อให้เสมือนเป็นการจำลองการเคี้ยว



รายการอ้างอิง

1. ศูนย์วิจัยระบบบริการสุขภาพช่องปากโดยความร่วมมือขององค์การอนามัยโลก มหาวิทยาลัยกรอนนิงเกน ประเทศเนเธอร์แลนด์, คู่มือการบูรณะฟันโดยสูญเสียเนื้อฟันน้อยที่สุด. 2538, ขอนแก่น: บริษัท ธเนศพัฒนา จำกัด.
2. Neves, A.A., et al., *Stress and Strain Distribution in Demineralized Enamel: A Micro-CT Based Finite Element Study*. *Microscopy Research and Technique*, 2015. **78**(10): p. 865-872.
3. Magne, P., *Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data*. *Dent Mater*, 2007. **23**(5): p. 539-48.
4. Valian, A., et al., *Effect of Extension and Type of Composite-Restored Class II Cavities on Biomechanical Properties of Teeth: A Three Dimensional Finite Element Analysis*. *Journal of Dentistry (Tehran, Iran)*, 2015. **12**(2): p. 140-150.
5. Geramy, A., M.J. Eghbal, and S. Ehsani, *Stress Distribution Changes after Root Canal Therapy in Canine Model: A Finite Element Study*. *Iranian Endodontic Journal*, 2008. **3**(4): p. 113-118.
6. Navimipour, E.J., M. Firouzmandi, and F.S. Mirhashemi, *Finite Element Analysis of the Endodontically-treated Maxillary Premolars restored with Composite Resin along with Glass Fiber Insertion in Various Positions*. *J Contemp Dent Pract*, 2015. **16**(4): p. 284-90.
7. Chieruzzi, M., et al., *Effect of fibre posts, bone losses and fibre content on the biomechanical behaviour of endodontically treated teeth: 3D-finite element analysis*. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2017. **74**: p. 334-346.
8. Sarrafpour, B., et al., *Finite element analysis suggests functional bone strain accounts for continuous post-eruptive emergence of teeth*. *Archives of Oral Biology*, 2012. **57**(8): p. 1070-1078.
9. Bahrami, B., et al., *Effect of surface treatment on stress distribution in immediately loaded dental implants—A 3D finite element analysis*. *Dental Materials*, 2014. **30**(4): p. e89-e97.

10. Verri, F., et al., *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Anterior Single Implant-Supported Protheses with Different Bone Anchorages*. Vol. 2015. 2015.
11. Tanaka, O.M., et al., *A finite element analysis of the maxillary first molar PDL with maxillary protraction in a mixed dentition Class III malocclusion*. *Orthod Craniofac Res*, 2015. **18**(4): p. 242-50.
12. Dabla, N., et al., *Stress appraisal in periodontium of maxillary first molar using various intrusive forces: A finite element analysis study*. *Journal of Orthodontic Research*, 2014. **2**(2): p. 90-96.
13. Belli, S., O. Eraslan, and G. Eskitascioglu, *Effect of Root Filling on Stress Distribution in Premolars with Endodontic-Periodontal Lesion: A Finite Elemental Analysis Study*. *J Endod*, 2016. **42**(1): p. 150-5.
14. Reeh, E.S., H.H. Messer, and W.H. Douglas, *Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures*. *Journal of Endodontics*, 1989. **15**(11): p. 512-516.
15. Al-Omiri, M.K., M.R. Rayyan, and O. Abu-Hammad, *Stress analysis of endodontically treated teeth restored with post-retained crowns: A finite element analysis study*. *J Am Dent Assoc*, 2011. **142**(3): p. 289-300.
16. Saunders, W.P. and E.M. Saunders, *Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review*. *Endod Dent Traumatol*, 1994. **10**(3): p. 105-8.
17. Heling, I., et al., *Endodontic failure caused by inadequate restorative procedures: review and treatment recommendations*. *J Prosthet Dent*, 2002. **87**(6): p. 674-8.
18. Coelho, C.S., et al., *Finite element analysis of weakened roots restored with composite resin and posts*. *Dent Mater J*, 2009. **28**(6): p. 671-8.
19. Peroz, I., et al., *Restoring endodontically treated teeth with posts and cores-- a review*. *Quintessence Int*, 2005. **36**(9): p. 737-46.
20. Cheung, W., *A review of the management of endodontically treated teeth. Post, core and the final restoration*. *J Am Dent Assoc*, 2005. **136**(5): p. 611-9.
21. Amarante, M.V., et al., *Virtual analysis of stresses in human teeth restored with esthetic posts*. *Materials Research*, 2008. **11**: p. 459-463.

22. Mattos, C.M.A., et al., *Numerical analysis of the biomechanical behaviour of a weakened root after adhesive reconstruction and post-core rehabilitation*. Journal of Dentistry, 2012. **40**(5): p. 423-432.
23. Durmus, G. and P. Oyar, *Effects of post core materials on stress distribution in the restoration of mandibular second premolars: a finite element analysis*. J Prosthet Dent, 2014. **112**(3): p. 547-54.
24. Soares, C.J., et al., *The influence of cavity design and glass fiber posts on biomechanical behavior of endodontically treated premolars*. J Endod, 2008. **34**(8): p. 1015-9.
25. Hsu, M.L., et al., *Effects of post materials and length on the stress distribution of endodontically treated maxillary central incisors: a 3D finite element analysis*. J Oral Rehabil, 2009. **36**(11): p. 821-30.
26. Holmes, D.C., A.M. Diaz-Arnold, and J.M. Leary, *Influence of post dimension on stress distribution in dentin*. J Prosthet Dent, 1996. **75**(2): p. 140-7.
27. Sorensen, J.A. and J.T. Martinoff, *Clinically significant factors in dowel design*. J Prosthet Dent, 1984. **52**(1): p. 28-35.
28. Ausiello, P., et al., *Mechanical behavior of post-restored upper canine teeth: a 3D FE analysis*. Dent Mater, 2011. **27**(12): p. 1285-94.
29. Madfa, A.A., et al., *Stress distributions in maxillary central incisors restored with various types of post materials and designs*. Med Eng Phys, 2014. **36**(7): p. 962-7.
30. Asmussen, E., A. Peutzfeldt, and A. Sahafi, *Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth*. J Prosthet Dent, 2005. **94**(4): p. 321-9.
31. Deger, Y., et al., *Evaluation of Temperature and Stress Distribution on 2 Different Post Systems Using 3-Dimensional Finite Element Analysis*. Med Sci Monit, 2015. **21**: p. 3716-172.
32. Sengul, F., T. Gurbuz, and S. Sengul, *Finite element analysis of different restorative materials in primary teeth restorations*. Eur J Paediatr Dent, 2014. **15**(3): p. 317-22.

33. วรยา มณีลังกา, ความรู้พื้นฐานทางทันตกรรมบูรณะ. 3th ed. 2556, นนทบุรี: บริษัท ธนาเพรส จำกัด.
34. Wang, C.H., et al., *Factorial analysis of variables influencing mechanical characteristics of a post used to restore a root filled premolar using the finite element stress analysis combined with the Taguchi method*. Int Endod J, 2016. **49**(7): p. 690-9.
35. Topala, F.I., et al., *3D modeling and simulation of inlay restored posterior teeth*. Vol. 60. 2010. 69-73.
36. Dejak, B. and A. Mlotkowski, *A comparison of stresses in molar teeth restored with inlays and direct restorations, including polymerization shrinkage of composite resin and tooth loading during mastication*. Dent Mater, 2015. **31**(3): p. e77-87.
37. Takahashi, N., *Thermal conductive analysis of restored teeth by finite element method*. Journal of Oral Rehabilitation, 1982. **9**(1): p. 83-88.
38. Prabhakar, A.R., et al., *Finite element stress analysis of stainless steel crowns*. J Indian Soc Pedod Prev Dent, 2015. **33**(3): p. 183-91.
39. Watanabe, M.U., et al., *Influence of crown ferrule heights and dowel material selection on the mechanical behavior of root-filled teeth: a finite element analysis*. J Prosthodont, 2012. **21**(4): p. 304-11.
40. ADIGÜZEL, Ö., et al., *Three-dimensional Finite Element Analysis of Endodontically Treated Tooth Restored with Carbon and Titanium Posts*. International Dental Research, 2011(2): p. 55-59%V 1.
41. Mahmoudi, M., et al., *A three-dimensional finite element analysis of the effects of restorative materials and post geometry on stress distribution in mandibular molar tooth restored with post-core crown*. Dent Mater J, 2012. **31**(2): p. 171-9.
42. Kumar, G.A., L.C. Kovoov, and V.M. Oommen, *Three-dimensional finite element analysis of the stress distribution around the implant and tooth in tooth implant-supported fixed prosthesis designs*. Journal of Dental Implants, 2011. **1**(2): p. 75-79.

43. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, กลศาสตร์ของวัสดุ. 2nd ed. 2557, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
44. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. 5th ed. 2555, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
45. Hibbeler, R.C., *Mechanics of Materials*. 2004, Singapore: Prentice Hall Pearson Education South Asia Pte Ltd.
46. WJ, O.B., *Dental Materials and Their selection*. 4th ed. 2008, Chicago: Quintessence Publishing Co.
47. Dal Piva, A.M.O., et al., *Influence of Alveolar Bone Loss and Cement Layer Thickness on the Biomechanical Behavior of Endodontically Treated Maxillary Incisors: A 3-dimensional Finite Element Analysis*. J Endod, 2017. **43**(5): p. 791-795.
48. Chai, H. and A. Tamse, *Fracture mechanics analysis of vertical root fracture from condensation of gutta-percha*. Journal of Biomechanics, 2012. **45**(9): p. 1673-1678.
49. Wattanasukchai, P., R. Sakoolnamarka, and M. Arksornnukit, *Adhesion of resin core foundation composites to root canal dentin using different dentin adhesives*. Am J Dent, 2010. **23**(2): p. 98-102.
50. Anussavic, K., *Phillips' Science of Dental Materials*. 11th ed. 2003, Philadelphia: W.B. Saunders Co.
51. PUSTAN, M. and O. BELCIN, *Application of Atomic Force Microscope for Mechanical and Tribological Characterization of Teeth and Biomaterials*. Tribology in industry, 2009. **31**(1): p. 43-46.
52. Katona, T.R., *A mathematical analysis of the role of friction in occlusal trauma*. J Prosthet Dent, 2001. **86**(6): p. 636-43.
53. Anita Rao, S., *Finite Element Analysis to Determine Reinforcement of Root Strength using Different Sealers*. Journal of Dental Materials characterization, 2016. **1**(1): p. 6-13.
54. Zhou, Z.R. and J. Zheng, *Tribology of dental materials: a review*. Journal of Physics D-Applied Physics, 2008. **41**(11).

55. Benazzi, S., et al., *Unravelling the Functional Biomechanics of Dental Features and Tooth Wear*. PLOS ONE, 2013. **8**(7): p. e69990.
56. Ha, S.R., et al., *Effects of coping designs on stress distributions in zirconia crowns: Finite element analysis*. Ceramics International, 2016. **42**(4): p. 4932-4940.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

การเตรียมแบบจำลองพื้นที่ได้รับการรักษาลงรากฟันแล้วบูรณะด้วยการอุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การรักษาคลองรากฟันเป็นการรักษาโดยตัดส่วนที่เกิดการอักเสบ ที่ถูกทำลายหรือส่วนที่ตายออกจากโพรงประสาทฟัน แล้วทำความสะอาดและจัดรูปทรง แล้วอุดปิดคลองรากฟัน จากนั้นทำการบูรณะฟันด้วยวิธีต่าง ๆ ตามสภาพเนื้อฟันที่เหลืออยู่ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเตรียมแบบจำลองฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วบูรณะด้วยวิธีการอุดในฟันกรามน้อยส่วนล่างของฟันแท้ ซึ่งประกอบไปด้วยการอุดทั้งหมด 5 รูปแบบ ดังที่อธิบายในหัวข้อที่ 6.2

แบบจำลองการอุดทั้ง 5 รูปแบบใช้หลักการในการเตรียมแบบจำลองคล้ายกัน จะแตกต่างกันที่วัสดุที่นำมาอุดตามการอุดแบบต่าง ๆ ขั้นตอนในการเตรียมแบบจำลองประกอบไปด้วย การนำชั้นโพรงประสาทฟันออกจากแบบจำลองฟันดี แล้วตัดชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟันตามรอยเส้นประออก ดังรูป ก-1 เพื่อเปิดช่องว่างของแบบจำลอง เนื่องจากในการรักษาคลองรากฟัน ทันตแพทย์จะเปิดช่องว่างโดยการเจาะลงไปให้ถึงชั้นโพรงประสาทฟัน เพื่อที่ตัดส่วนที่เสียหายออกแล้วทำความสะอาดโพรงประสาทฟัน ดังนั้นแบบจำลองที่เตรียมขึ้นเพื่อเป็นแบบจำลองพื้นฐานในการบูรณะด้วยวิธีการอุดจึงแสดงได้ตามรูป ก-2



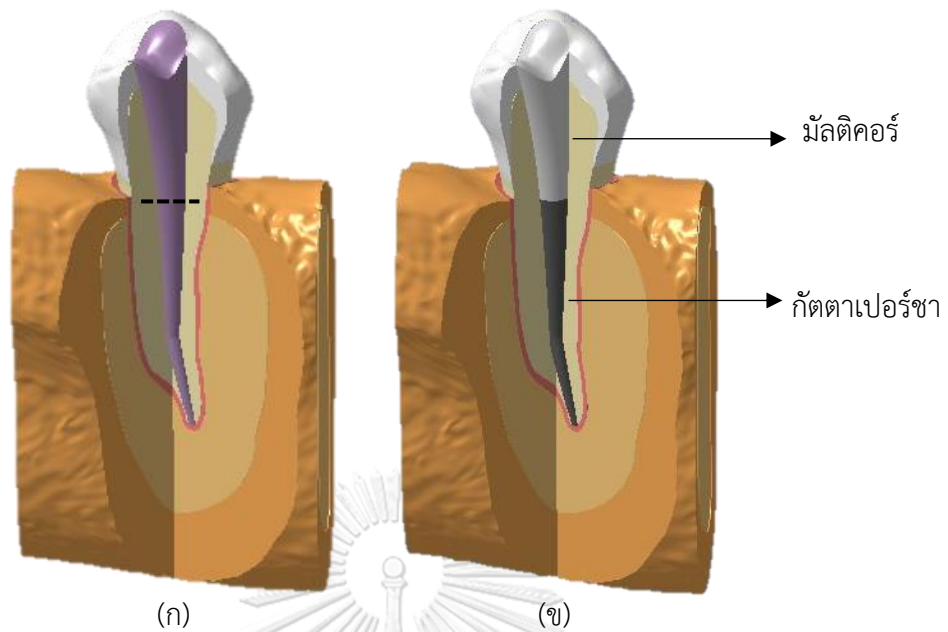
รูปที่ ก-1 เส้นแนวการเปิดช่องว่าง



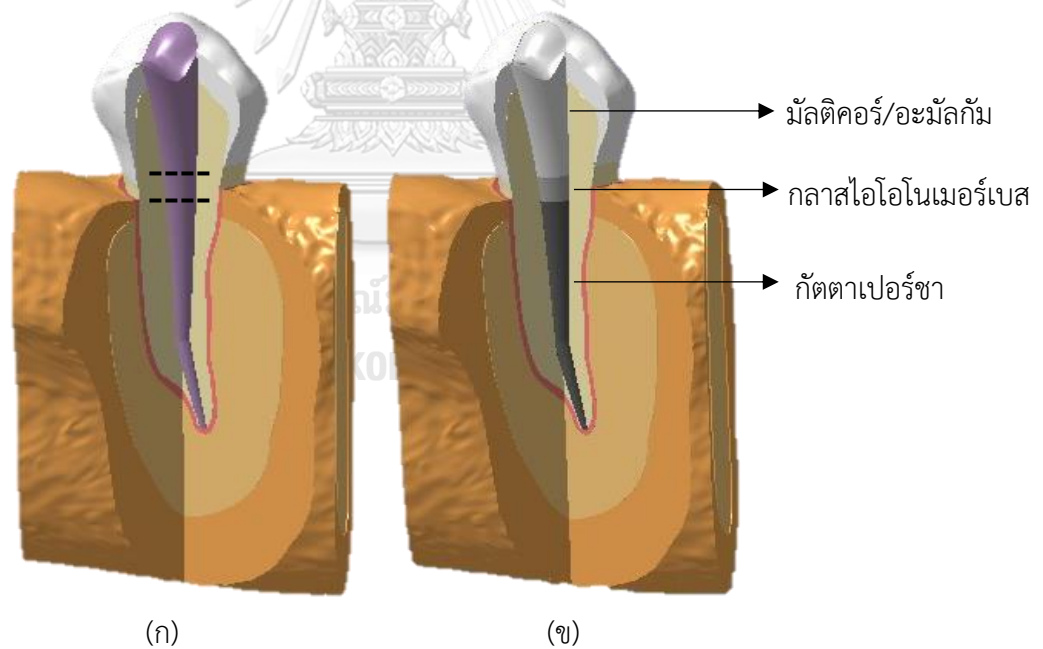
รูปที่ ก-2 แบบจำลองเนื้อฟันที่มีช่องว่าง

การออกแบบที่ 1 เป็นการถอดที่ประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดคือกัตาเปอร์ชาและมัลติคอร์ โดยขั้นตอนแรกเป็นการเติมกัตาเปอร์ชาที่เป็นวัสดุอุดรากฟันลงไป จากด้านล่างสุดของโพรงรากฟัน จนถึงระดับต่ำกว่าแนวรอยต่อ CEJ 2 mm ชั้นต่อมาเป็นมัลติคอร์ที่เติมลงไปจนถึงชั้นเคลือบฟัน ในแบบจำลองการออกแบบที่ 1 ได้นำแบบจำลองพื้นฐานที่ได้เตรียมมาก่อนหน้านี้มากำหนดให้ช่องว่างนั้นมีลักษณะเป็นของแข็ง เพื่อแทนวัสดุที่เติมเข้าไป ดังรูป ก-3(ก) จากนั้นตัดช่องว่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งออกเป็นสองส่วนตามการออกแบบที่ 1 จะได้ดังรูป ก-3(ข)

การออกแบบที่ 2 วัสดุที่ใช้เติมประกอบไปด้วย 3 วัสดุ โดยเรียงลำดับจาก กัตาเปอร์ชา กลาสไอโอโนเมอร์เบส และมัลติคอร์ ตามลำดับจากด้านล่างของโพรงรากฟันจนถึงชั้นเคลือบฟัน ในการเตรียมแบบจำลองการออกแบบที่ 2 ได้นำแบบจำลองพื้นฐานมาเปลี่ยนช่องว่างให้มีลักษณะเป็นของแข็งดังรูป ก-4(ก) จากนั้นตัดแบ่งของแข็งนี้ออกเป็น 3 ชั้นคือ ชั้นล่างสุดเป็นกัตาเปอร์ชา โดยมีความสูงจากปลายรากขึ้นมาจนถึงระดับต่ำกว่า CEJ 2 mm ชั้นต่อมาเป็นชั้นกลาสไอโอโนเมอร์เบส ซึ่งมีความสูงต่อจากชั้นกัตาเปอร์ชา 2 mm และชั้นสุดท้ายเป็นมัลติคอร์ ดังแสดงในรูป ก-4(ข) ส่วนการออกแบบที่ 3 เหมือนแบบจำลองการออกแบบที่ 2 แต่เปลี่ยนมัลติคอร์เป็นอะมัลกัม



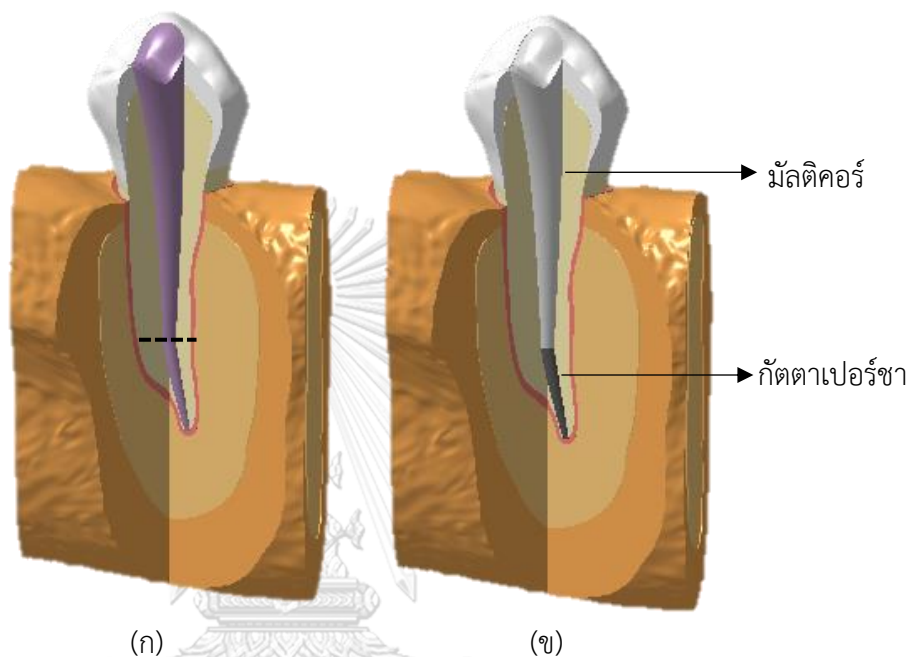
รูปที่ ก-3 แบบจำลองการอุดแบบที่ 1, (ก) ช่องว่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งและเส้นแบ่งวัสดุ, (ข) การเรียงลำดับวัสดุที่ใช้อุด



รูปที่ ก-4 แบบจำลองการอุดแบบที่ 2 และแบบที่ 3, (ก) ช่องว่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งและเส้นแบ่งวัสดุ, (ข) การเรียงลำดับวัสดุที่ใช้อุด

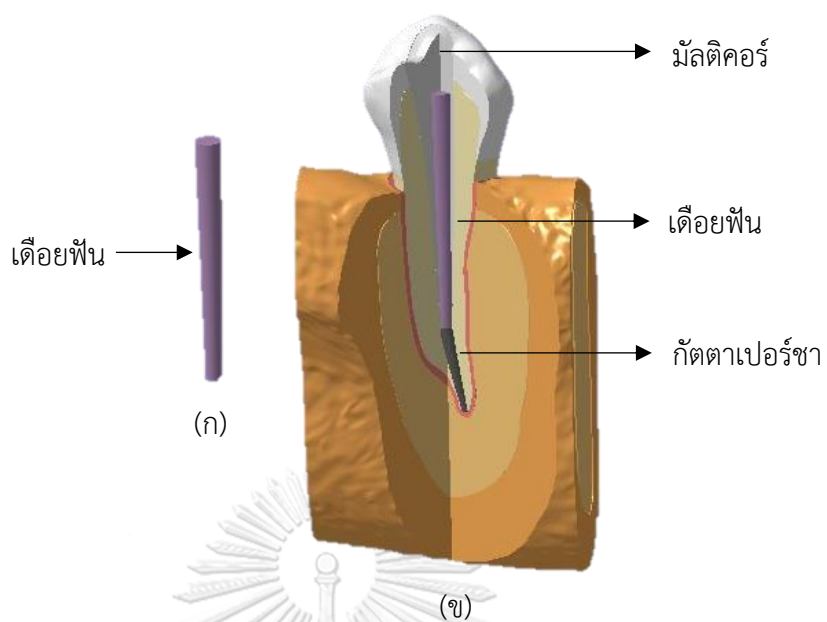
การอุดแบบที่ 4 เป็นการอุดด้วยวัสดุคล้ายการอุดแบบที่ 1 เพียงแต่แตกต่างกันที่ระยะความสูงของชั้นกัตตาเปอร์ชา โดยความสูงของกัตตาเปอร์ชาสูงขึ้นมาจากกรากของโพรงประสาทฟัน 5 mm

ส่วนที่เหลือเป็นมัลติคอร์ทั้งหมด ในการเตรียมแบบจำลองการอุดแบบที่ 4 เริ่มจากการเปลี่ยนช่องว่างของแบบจำลองพื้นฐานให้มีลักษณะเป็นของแข็ง แล้วแบ่งของแข็งนี้ออกเป็น 2 ชั้นคือ ชั้นกัตตาเปอร์ซาที่มีความสูงขึ้นมาจากรากของโพรงประสาทฟัน 5 mm ตามแนวรอยเส้นประ ดังรูป ก-5(ก) และชั้นต่อมากำหนดให้เป็นมัลติคอร์ จะได้แบบจำลองดังรูป ก-5(ข)



รูปที่ ก-5 แบบจำลองการอุดแบบที่ 4, (ก) ช่องว่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งและเส้นแบ่งวัสดุ, (ข) การเรียงลำดับวัสดุที่ใช้อุด

การจำลองการอุดแบบที่ 5 ซึ่งเป็นแบบสุดท้ายในแบบจำลองนี้มีการเพิ่มเดือยฟันเข้ามา โดยเดือยฟันเป็นวัสดุที่ทำจากไฟเบอร์หลาย ๆ เส้นรวมกันเป็นแท่ง ทำหน้าที่เป็นแกนยึดให้รากฟันมีความแข็งแรงมากขึ้น ในการเตรียมแบบจำลองการอุดแบบที่ 5 เริ่มจากการสร้างเดือยฟันให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก โดยมีขนาดเล็กกลางตามความยาวของราก ซึ่งรัศมีด้านบนสุดของท่อคือ 0.75 mm และรัศมีของท่อด้านล่างสุดคือ 0.45 mm จากนั้นกำหนดให้แบบจำลองเดือยฟันมีลักษณะเป็นของแข็ง ดังรูป ก-6(ก) เมื่อได้แบบจำลองเดือยฟันที่ต้องการ แล้วนำไปประกอบรวมกับแบบจำลองการอุดแบบที่ 4 ที่ได้สร้างไปก่อนหน้านี้ โดยที่ปลายที่มีขนาดเล็กที่สุดของเดือยฟันอยู่บริเวณด้านบนของชั้นกัตตาเปอร์ซาและแบบจำลองเดือยฟันจะอยู่ด้านบนในของชั้นมัลติคอร์ ดังรูป ก-6(ข) ดังนั้นแบบจำลองการอุดแบบที่ 5 ประกอบไปด้วย ชั้นกัตตาเปอร์ซา ชั้นเดือยฟัน และชั้นมัลติคอร์ตามลำดับ



รูปที่ ก-6 แบบจำลองการถอดแบบที่ 5, (ก) แบบจำลองเดือยฟัน, (ข) การเรียงลำดับวัสดุที่ใช้ถอด



ภาคผนวก ข
การเตรียมแบบจำลองการครอบฟัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แบบจำลองโครงสร้างฟันที่มีการครอบที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นฟันกรามล่างของฟันน้ำนม โดยในการบูรณะด้วยวิธีครอบฟันเป็นการรักษาฟันโดยที่ฟันนั้นมีขนาดความเสียหายใหญ่มากและมีการผุที่ลุกลามจนถึงชั้นโพรงประสาท รวมถึงการมีเนื้อฟันเหลือน้อยมาก ทำให้ต้องรักษาคลองรากฟันก่อนแล้วก่อแกนฟันขึ้น เพื่อเป็นตัวเชื่อมและรองรับให้ชั้นครอบฟันยึดติดกับฟัน จากนั้นจึงบูรณะด้วยวิธีครอบฟันตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองการครอบที่ใช้ศึกษามีอยู่ 2 แบบตามวัสดุที่ก่อแกนฟันคือ การครอบแบบที่ 1 เป็นแบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นมัลติคอร์ และการครอบแบบที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์

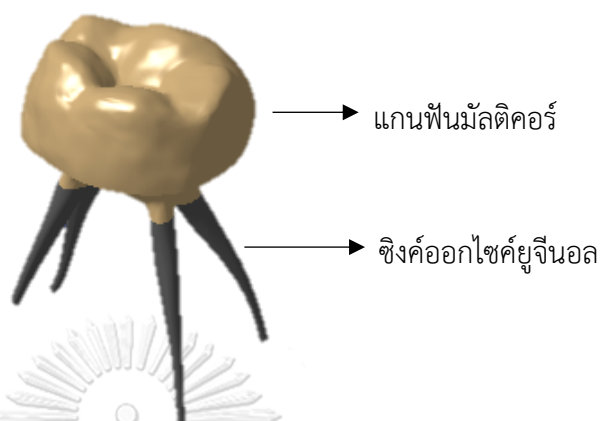
การเตรียมแบบจำลองเริ่มต้นจากการนำแบบจำลองฟันดีของฟันกรามล่างของฟันน้ำนมที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.3 มาเป็นแบบจำลองพื้นฐานของการสร้างแบบจำลองครอบฟัน จากนั้นนำชั้นโพรงประสาทฟันออกจากแบบจำลองพื้นฐาน แล้วตัดชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟันส่วนหัวออกเหลือไว้เพียงส่วนของรากฟันของชั้นเนื้อฟัน ดังรูป ข-1 การเตรียมแบบจำลองเริ่มจากชั้นเนื้อฟันก่อน เพราะว่าการรักษาคลองรากฟันเป็นการรักษาเนื้อฟันจริงให้ได้มากที่สุดเพื่อที่จะได้ไม่ต้องถอนฟันออก เนื่องจากการถอนฟันอาจส่งผลกระทบต่อเข้าของกระดูกและอาจทำให้ฟันข้างเคียงเกิดการเคลื่อนได้ ในการรักษาคลองรากฟันจะทำการกรอส่วนที่เกิดความเสียหายออกแล้วทำการบูรณะด้วยวิธีครอบฟันในกรณีที่เนื้อฟันเหลือน้อย โดยใช้เนื้อฟันเป็นแกนยึดติดกับกระดูกและเป็นส่วนฐานของการครอบ



รูปที่ ข-1 แบบจำลองเนื้อฟันที่ถูกตัด

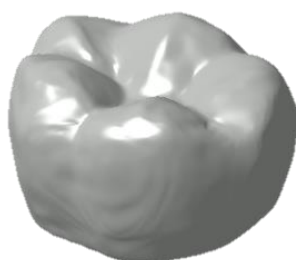
ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างแกนฟัน โดยแกนฟันที่สร้างขึ้นมี 2 แบบประกอบด้วย แกนฟันที่เป็นมัลติคอร์และแกนฟันที่เป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ หลักในการสร้างชั้นแกนฟันที่เป็นมัลติคอร์คือ นำส่วนหัวของชั้นเนื้อฟันและของชั้นโพรงประสาทฟันมารวมเข้าด้วยกัน จากนั้นนำชั้นแกนฟันนี้

และช่องว่างที่ปลายรากโพรงประสาทฟันมาเปลี่ยนให้มีลักษณะเป็นของแข็ง ดังรูป ข-2 โดยกำหนดให้ช่องว่างที่ปลายรากเป็นซิงค์ออกไซด์ยูจินอลและแกนฟันเป็นมัลติคอร์

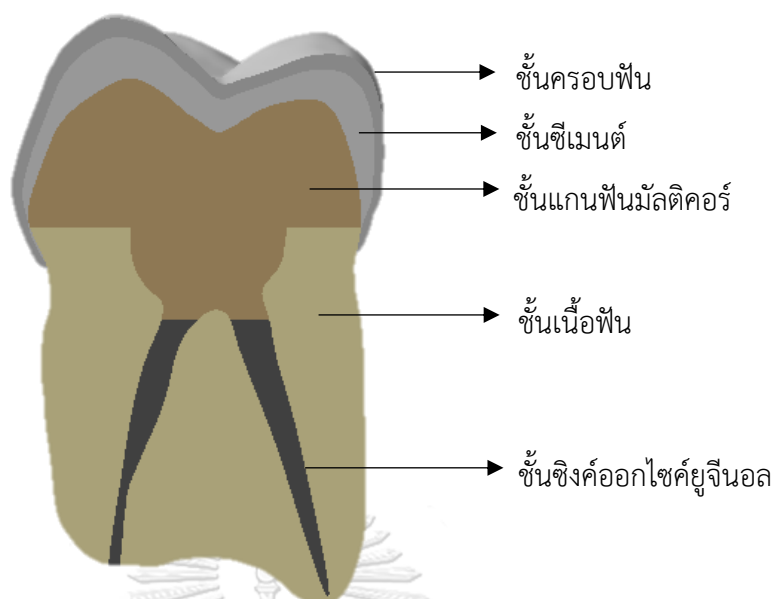


รูปที่ ข-2 ชั้นแกนฟันมัลติคอร์และชั้นซิงค์ออกไซด์ยูจินอล

ในส่วนชั้นครอบฟันสร้างขึ้นมาจากการนำชั้นเคลือบฟันของแบบจำลองฟันดีของฟันกรามล่างของฟันน้ำนมลดความหนาของชั้นเคลือบฟัน เนื่องจากชั้นครอบฟันที่ใช้เป็นแบบสำเร็จรูป มักใช้กับฟันน้ำนมและมีวัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม จากการวัดสัดส่วนของที่ครอบฟันของจริงทำให้ได้ขนาดดังนี้ ส่วนยอดมีความหนาขนาด 0.38 mm และด้านข้างมีขนาด 0.24 mm ดังนั้นที่ครอบฟันในแบบจำลองมีสัดส่วนตามที่กล่าวไป ดังรูป ข-3 หลังจากนั้นจึงสร้างชั้นซีเมนต์ เนื่องจากชั้นซีเมนต์เป็นชั้นที่เชื่อมระหว่างชั้นครอบฟันและชั้นแกนฟันติดกัน ในการสร้างจะนำช่องว่างระหว่างชั้นครอบฟันกับชั้นแกนฟันมาเปลี่ยนให้มีลักษณะเป็นแบบของแข็งแล้วกำหนดให้ชั้นนี้เป็นชั้นซีเมนต์ และเมื่อมองแบบภาพตัดดังรูป ข-4 จะเห็นว่าชั้นซิงค์ออกไซด์ยูจินอล ชั้นแกนฟันมัลติคอร์และชั้นซีเมนต์อยู่ด้านในของชั้นเนื้อฟันและชั้นครอบฟัน ตามลำดับ เรียกแบบจำลองที่มีแกนฟันเป็นมัลติคอร์ว่า การครอบแบบที่ 1

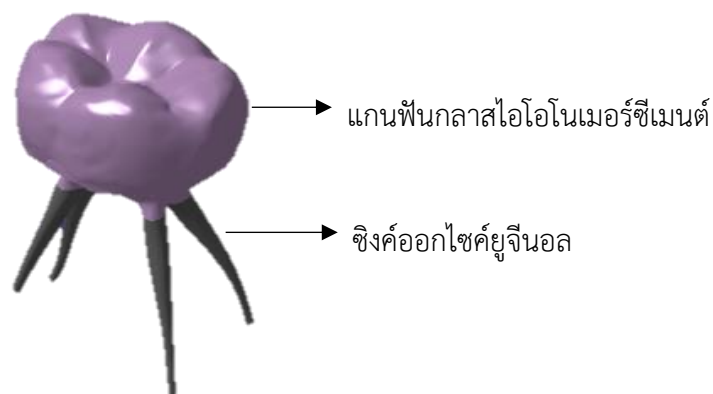


รูปที่ ข-3 แบบจำลองที่ครอบฟัน

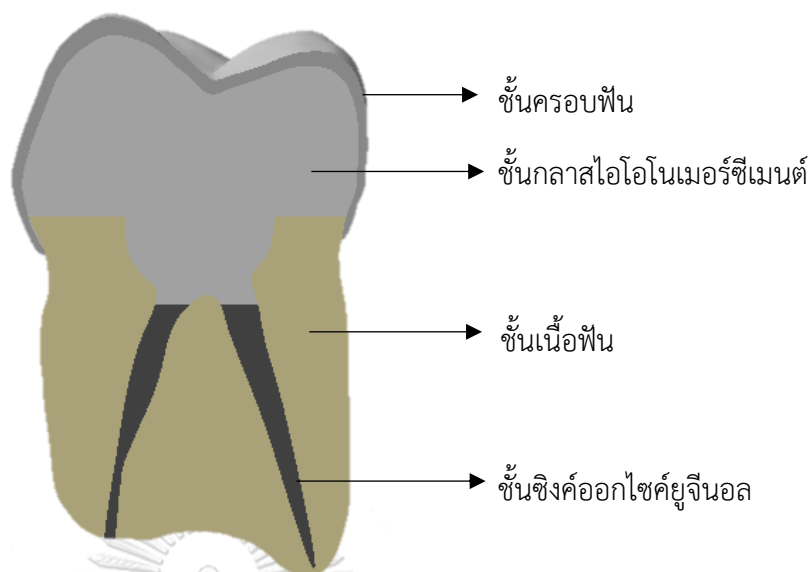


รูปที่ ข-4 ภาพตัดของแบบจำลองการครอบแบบที่ 1

แบบจำลองการครอบแบบที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีแกนเป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ โดยวิธีการสร้างชั้นแกนฟันคือ การนำชั้นแกนฟันมัลติคอร์และชั้นซีเมนต์ในแบบจำลองการครอบแบบที่ 1 ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้มารวมกัน จะได้แบบจำลองแกนฟันมีลักษณะดังรูป ข-5 และเรียกรวมกันของชั้นนี้ว่า ชั้นแกนฟันกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ จากนั้นนำชั้นครอบฟัน ชั้นเนื้อฟัน ชั้นแกนกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และชั้นซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลมาประกอบเข้าด้วยกัน จะได้แบบจำลองการครอบแบบที่ 2 เมื่อมองภาพตัดของแบบจำลองการครอบแบบที่ 2 ดังรูป ข-6 เห็นได้ว่าชั้นแกนฟันที่เป็นกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และ ซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลอยู่ด้านในของชั้นเนื้อฟันและชั้นครอบฟัน ตามลำดับ



รูปที่ ข-5 ชั้นแกนฟันกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์และชั้นซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล



รูปที่ ข-6 ภาพตัดของแบบจำลองการครอบแบบที่ 2



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัญยวันต์ ดวงวิไล เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2532 ที่เชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีการศึกษา 2556 และเข้าต่อศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และมีผลงานวิชาการที่ได้เผยแพร่ดังนี้

กัญยวันต์ ดวงวิไล และ ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, การตอบสนองเชิงกลของพื้ที่มีรูปแบบการจำลองต่างกันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 วันที่ 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

กัญยวันต์ ดวงวิไล, วีรชัย สิงหนัดกิจ และ ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, ผลของเทคนิคการบูรณะตัวพื้ภายหลังการรักษาคลองรากพื้ในพื้กรามน้อยล่างต่อการกระจายความเค้น: การศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31 วันที่ 4-7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก