

การประเมินความล้ำของพื้นที่ผ่านการบูรณะโดยใช้วิธีระนาบวิกฤตและเกณฑ์ของ Findley โดยใช้
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FATIGUE ASSESSMENT OF A RESTORED TOOTH USING THE CRITICAL PLANE APPROACH
AND FINDLEY CRITERION UTILIZING THE FINITE ELEMENT METHOD



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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความล่าช้าของพินที่ผ่านการบูรณะโดยใช้วิธี ระนาบวิกฤตและเกณฑ์ของ Findley โดยใช้ระเบียบวิธีไฟ ไนต์เอลิเมนต์
โดย	นายวิรเดช ธารณเจษฎา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นัดกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นัดกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วีรชัย สิงห์นัดกิจ)

วิรัช ชารณเจษฎา : การประเมินความล้าของฟันที่ผ่านการบูรณะโดยใช้วิธีระนาบ
 วิกฤตและเกณฑ์ของ Findley โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. (FATIGUE
 ASSESSMENT OF A RESTORED TOOTH USING THE CRITICAL PLANE
 APPROACH AND FINDLEY CRITERION UTILIZING THE FINITE ELEMENT
 METHOD) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ไพโรจน์ สิงห์นาคกิจ

วิทยานิพนธ์นี้ประยุกต์ความรู้ด้านความล้าโดยวิธีการวิเคราะห์ระนาบวิกฤต (critical plane analysis) ตามแบบจำลองของฟินเลย์ (Findley's model) เพื่อหาอายุการใช้งานในรูปจำนวนรอบและรูปการแตกหักของฟันที่ได้รับการบูรณะ การศึกษานี้สร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบฟันที่ทำจากเซรามิก 2 ชนิด คือลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนีย ด้วยวิธีภาพถ่ายคอมพิวเตอร์ (CT scan) และการปรับแต่งรูปร่างด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ (computer-aided design program) ก่อนนำแบบจำลองมาวิเคราะห์การกระจายความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วนำความเค้นดังกล่าวมาวิเคราะห์ความล้าในรูปพารามิเตอร์ฟินเลย์ การศึกษานี้ใช้โปรแกรม COMSOL และ MATLAB วิเคราะห์หาระนาบรอยแตกหักและจำนวนรอบการที่เนื้อฟันและวัสดุครอบฟันสามารถรับได้ แรงบดเคี้ยวที่สนใจคือแรงจากการบดเคี้ยวปกติหรือการกัดฟันที่ไม่ปกติ เช่นแรงจากการกัดฟันในผู้ที่มีภาวะนอนกัดฟัน ผลการศึกษาพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีฟันครอบด้วยลิเทียมไดซิลิเกตมีค่าน้อยกว่าฟันที่ครอบด้วยเซอร์โคเนีย เนื่องจากลิเทียมไดซิลิเกตมีความหนาแน่นน้อยกว่าเซอร์โคเนีย ทำให้ได้รับผลของแรงพลศาสตร์น้อยกว่า เมื่อพิจารณาพฤติกรรมความล้าพบว่าลักษณะการแตกหักที่ระนาบวิกฤตในเนื้อฟันหรือครอบฟันมีลักษณะคล้ายกับการแตกหักที่พบได้จากการทดลองหรือจากรายงานทางคลินิกที่มีเงื่อนไขขอบเขตใกล้เคียงกัน ฟันที่ครอบด้วยวัสดุทั้งสองชนิดสามารถทนต่อแรงบดเคี้ยวปกติได้มากกว่า 10^6 รอบ สำหรับกรณีการกัดฟันที่ไม่ปกติ พบว่าครอบฟันที่เป็นลิเทียมไดซิลิเกตเกิดการรอยแตกที่ครอบฟันก่อน ในขณะที่ครอบฟันที่เป็นเซอร์โคเนียเกิดรอยแตกที่บริเวณเนื้อฟันก่อน การพิจารณาความเสียหายโดยพิจารณาเกณฑ์ความเค้น von Mises และพิจารณาพารามิเตอร์ฟินเลย์ให้ผลการทำนายความเสียหายที่ต่างกัน เนื่องจากการพิจารณาความเค้น von Mises พิจารณาขนาดความเค้นที่จะทำให้เกิดการเสียหายเป็นหลัก ในขณะที่การพิจารณาพารามิเตอร์ฟินเลย์พิจารณาความเค้นในรูปที่ทำให้เกิดรอยแตกเป็นหลัก

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170405821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: finite element method, ceramic crown, stress, fatigue

Viradet Taranajetsada : FATIGUE ASSESSMENT OF A RESTORED TOOTH USING THE CRITICAL PLANE APPROACH AND FINDLEY CRITERION UTILIZING THE FINITE ELEMENT METHOD. Advisor: Prof. PAIROD SINGHATANADGID, Ph.D.

This thesis applies basic principles of fatigue using critical plane analysis according to Findley's model to determine fatigue life and failure formations of a restored tooth. A tooth with ceramic crown, e.g. lithium disilicate or zirconia was modeled from CT scan images. A CAD program was modified the model before it was analyzed for stress distribution using finite element method (FEM). Stress was analyzed for fatigue life using Findley's parameter. COMSOL and MATLAB programs were employed to determine the critical plane and numbers of loading cycle for restored tooth. The loadings of interest include physiologic force and parafunctional occlusal force (e.g. in bruxism). The study found that stress in case of lithium disilicate crown is less than that of in zirconia crown because the density of lithium disilicate is lower, so the effect of dynamic load is lower in case of lithium disilicate crown. Failure formation at the critical plane in crown and dentin is like crack initiation in other researches or clinical reports. Crowned tooth with both materials can sustain physiologic force of more than 10^6 loading cycles. In case of parafunctional force, crack in lithium disilicate crowned tooth initiates at the crown first but crack in zirconia crowned tooth begins at the dentin first. Damage analysis using von Mises stress criterion and Findley's parameter results in different damage prediction because von Mises stress criterion concerns about the magnitude of the stress, but Findley's parameter considers stresses generating crack.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาตลอดการดำเนินการจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและการดำเนินชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพ. ดร.วีรชัย สิงหนัดกิจ และอาจารย์ทันตแพทย์ ดร.ธีรวัฒน์ ไตสิริวัฒน์พงศ์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำทางด้านวิชาการเกี่ยวกับทันตกรรม

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัด รัตนสุมาวงศ์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และถ่ายทอดประสบการณ์ในการทำงานวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้การเลี้ยงดู และอบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดจนสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ อนึ่งประโยชน์และคุณค่าใดที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิรเดช ธารณเกษฎา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	6
2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์พื้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	6
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการบูรณะแบบการครอบพื้น.....	7
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าโดยใช้การวิเคราะห์ระนาบวิกฤต	8
2.5 บทสรุป.....	9
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	10
3.1 ความรู้ทางทันตกรรม.....	10
3.1.1 โครงสร้างของฟัน [23]	10

3.1.2	พินกรรมน้อยซีเบน	11
3.1.3	ทิศของพิน [24].....	11
3.1.4	การครอบพิน [25].....	12
3.2	ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์กับวัสดุ.....	13
3.2.1	ความเค้นและความเครียด [26].....	13
3.2.2	สมบัติทางกลของวัสดุ [27].....	16
3.2.3	ความเค้นหลักในระนาบ	17
3.2.4	ความเค้น von Mises	21
3.2.5	ความล้า [13]	22
3.2.6	การพิจารณาระนาบวิกฤต (Critical plane damage) [28].....	25
3.2.7	แนวคิดของพินเลย์ [29]	26
3.3	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [30].....	30
3.3.1	สัมผัสในแบบจำลองของแข็ง [5]	33
บทที่ 4	การสร้างแบบจำลอง.....	35
4.1	การสร้างแบบจำลองพิน	36
4.2	การสร้างแบบจำลองครอบพินเซรามิก.....	39
บทที่ 5	พารามิเตอร์พินเลย์ (Findley’s parameter).....	43
5.1	หลักการคำนวณพารามิเตอร์พินเลย์	43
5.2	การคำนวณพารามิเตอร์สำหรับแนวคิดของพินเลย์	53
บทที่ 6	วิธีการศึกษา	57
6.1	สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์	57
6.2	แบบจำลองและระบบแกนพิกัดของแบบจำลอง.....	57
6.3	สมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	58
6.4	ผิวสัมผัส.....	59

6.5 Mesh 59	
6.6 เส้นไขขอบเขต	60
6.7 ผลการศึกษาที่สนใจ.....	62
บทที่ 7 ผลการศึกษา.....	64
7.1 กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกต	64
7.1.1 กรณีแรงกด 100 นิวตัน กระทำบนยอดสูง.....	64
7.1.2 กรณีแรง 800 นิวตัน กดยอดสูง.....	71
7.2 กรณีครอบฟันทำจากเซอร์โคเนีย.....	80
7.2.1 กรณี 100 นิวตัน กดยอดสูง.....	80
7.2.2 กรณีแรง 800 นิวตัน กดยอดสูง.....	87
บทที่ 8 การวิเคราะห์ผล.....	96
8.1 การวิเคราะห์ความเค้นในแบบจำลอง	96
8.2 การวิเคราะห์ความล้า	100
8.2.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟินเลย์และเปรียบเทียบระนาบวิกฤตกับการแตกหัก.....	100
8.2.2 จำนวนรอบที่วัสดุครอบและเนื้อฟันสามารถรับได้	107
อิทธิพลของวัสดุครอบที่แตกต่าง	108
8.3 การเปรียบเทียบผลของความเค้น von Mises กับพารามิเตอร์ฟินเลย์.....	110
บทที่ 9 สรุป.....	112
9.1 สรุปผลการศึกษา.....	112
9.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	114
9.3 ข้อเสนอแนะ.....	114
บรรณานุกรม.....	115
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก. โปรแกรมในการคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์.....	121

ภาคผนวก ข. การพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักของพินyleย์ของแต่ละวัสดุ	122
การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินyleย์ของลิเทียมไดซลิเกต	123
การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินyleย์ของเซอร์โคเนีย	123
การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินyleย์ของเนื้อฟัน	123
ประวัติผู้เขียน	131



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นตึงฉากสูงสุดที่ระนาบต่าง ๆ.....	45
ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการคำนวณหาช่วงของความเค้นเฉือนที่ระนาบต่าง ๆ	46
ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างการคำนวณหา $\frac{\Delta T}{2} + k\sigma$ ที่ระนาบต่าง ๆ.....	47
ตารางที่ 5.4 สมบัติทางกลด้านความล้าของวัสดุต่าง ๆ.....	54
ตารางที่ 6.1 สมบัติทางกลของวัสดุในแบบจำลอง [19] [37] [38].....	58
ตารางที่ 6.2 คู่สัมผัสในแบบจำลองพื้นที่ผ่านการครอบ	59
ตารางที่ 6.3 จำนวน mesh และ node ในแบบจำลองพื้นที่ผ่านการครอบ	60
ตารางที่ 7.1 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบพื้นทำจาก ลิเทียมไดซลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน.....	66
ตารางที่ 7.2 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบพื้นทำจาก ลิเทียมไดซลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน.....	74
ตารางที่ 7.3 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบพื้นทำจาก เซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน	82
ตารางที่ 7.4 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบพื้นทำจาก เซอโรโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน	90
ตารางที่ 8.1 จำนวนรอบที่สามารถรับได้ของครอบพื้นและเนื้อพื้นในกรณีที่ถูกกระทำด้วยแรง 800 นิวตัน	108
ตารางที่ 8.2 การเปรียบเทียบความเค้น von Mises และพารามิเตอร์ความล้า f กรณี 800 นิวตัน ที่มี วัสดุครอบเป็นลิเทียมไดซลิเกต	111
ตารางที่ ก.1 สรุปคุณสมบัติทางความล้าของวัสดุครอบและเนื้อพื้น	122
ตารางที่ ข.2 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของลิเทียมไดซลิเกตช่วง 0.02 ถึง 1.12 ช่วงละ 0.02	125

ตารางที่ ข.3 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของลิเทียมไดซิลิเกตช่วง 1.061 ถึง 1.099 ช่วงละ 0.001 126

ตารางที่ ข.4 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนียช่วง 0.02 ถึง 1.12 ช่วงละ 0.02 127

ตารางที่ ข.5 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนียช่วง 0.981 ถึง 1.019 ช่วงละ 0.001 128

ตารางที่ ข.6 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเนื้อฟันช่วง 0.02 ถึง 1.12 ช่วงละ 0.02..... 129

ตารางที่ ข.7 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนียช่วง 0.201 ถึง 0.239 ช่วงละ 0.001 130



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของฟัน [23].....	11
รูปที่ 3.2 ฟันกรามน้อยซี่แรกส่วนล่าง.....	11
รูปที่ 3.3 ด้านของฟันตามหลักการทางทันตกรรม	12
รูปที่ 3.4 การแบ่งทิศฟัน ฟันใกล้กลางและไกลกลาง	12
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนในการครอบฟัน (ก) ฟันก่อนการกรอฟัน (ข) ฟันที่ผ่านการกรอแล้ว (ค) การครอบฟันด้วยวัสดุบูรณะ และ (ง) ฟันที่ผ่านการครอบแล้ว	13
รูปที่ 3.6 ความเค้นดึง	14
รูปที่ 3.7 ความเค้นกด.....	14
รูปที่ 3.8 ความเค้นเฉือน	15
รูปที่ 3.9 วัสดุยึดออก ΔL จากความยาวเดิม L เมื่อรับภาระ P	15
รูปที่ 3.10 เอลิเมนต์ที่เกิดความเครียดเฉือน.....	16
รูปที่ 3.11 ความเค้นใน 3 มิติ และ ความเค้นในกรณีความเค้นในระนาบ.....	17
รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่ถูกแรงดึง P กระทำทั้งสองด้าน	18
รูปที่ 3.13 แรงภายในชิ้นงานที่ถูกแรงดึง P เมื่อพิจารณา ระนาบ a และ b	18
รูปที่ 3.14 ความเค้นในระนาบ $x-y$	18
รูปที่ 3.15 แผนภาพการแปลงความเค้นในระนาบเป็นความเค้นหลัก	19
รูปที่ 3.16 การแปลงระบบพิกัด $x-y-z$ เป็น $x'y'z'$	20
รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงความเค้นตามทฤษฎี distortion energy theory	21
รูปที่ 3.18 ความเค้นเป็นคาบ ที่มีรูปแบบและความกว้างของความเค้นมีขนาดคงที่.....	23
รูปที่ 3.19 ลักษณะของความเค้นเป็นคาบที่มีอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ.....	24
รูปที่ 3.20 ลักษณะของกราฟ S-N curve ที่แสดงขีดจำกัดความล้า	25

รูปที่ 3.21 รอยแตกที่เกิดจากความเค้นตึงฉากและเฉือน	26
รูปที่ 3.22 ความเค้นที่เกิดในชิ้นงาน ในการทดสอบแบบดึงหรือแบบโค้งงอ	27
รูปที่ 3.23 การแบ่งเอลิเมนต์ของปัญหาที่ต้องการ	30
รูปที่ 3.24 เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมจากจุดต่อ 3 จุด	31
รูปที่ 4.1 แผนภาพการแปลงข้อมูลเพื่อให้ได้แบบจำลองฟิน	36
รูปที่ 4.2 ไฟล์สแกน (CT scan) ฟันกรามน้อยส่วนล่างและชั้นกระดูก.....	36
รูปที่ 4.3 การสร้างเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน, (ก) การแยกเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันออกจากตัวฟัน, (ข) เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันที่มีความยาวจนถึงรากฟัน	37
รูปที่ 4.4 แบบจำลอง (ก) ชั้นเคลือบฟัน (ข) เนื้อฟัน.....	38
รูปที่ 4.5 แบบจำลองเอ็นยึดปริทันต์, (ก) ลักษณะการตัด, (ข) เอ็นยึดปริทันต์ที่มีความหนา.....	38
รูปที่ 4.6 แบบจำลองกระดูก, (ก) การสร้างผิวกระดูก, (ข) แบบจำลองกระดูกที่มีลักษณะเป็นของแข็ง, (ค) แบบจำลองกระดูกที่ใช้ในการวิเคราะห์	39
รูปที่ 4.7 แบบจำลองฟันที่มีโครงสร้างเหมือนฟันมนุษย์, (ก) แบบจำลองโครงสร้างของฟันกรามน้อย ส่วนล่างที่เป็นฟันแท้, (ข) การเรียงตัวของแบบจำลอง	39
รูปที่ 4.8 แบบจำลองเนื้อฟันที่ผ่านการกรอ (ก) ภาพมุมกว้าง (ข) มุมมองจากยอดฟัน	40
รูปที่ 4.9 แบบจำลองซีเมนต์.....	41
รูปที่ 4.10 แบบจำลองครอบฟัน.....	41
รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางของแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบเซรามิก.....	42
รูปที่ 5.1 การแปลงความเค้นในระนาบ 2 มิติ.....	44
รูปที่ 5.2 กราฟความเค้นตึงฉากที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาใน 1 รอบการะ	44
รูปที่ 5.3 ความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติ	48
รูปที่ 5.4 (ก) การหมุนแกนพิกัดตามแกน z (ข) จุดที่แสดงการเปลี่ยนของแกนพิกัดที่หมุนตามแกน z	49
รูปที่ 5.5 (ก) การหมุนแกนพิกัดตามแกน y' (ข) จุดที่แสดงการเปลี่ยนของแกนพิกัดที่หมุนตามแกน y	49

รูปที่ 5.6 จุดทั้งหมดที่ทำการหาจะเป็นการประมาณที่ทุกมุมของระนาบ 3 มิติ	50
รูปที่ 5.7 การแปลงระบบแกนพิกัด x'' เมื่อเทียบกับระบบพิกัด x-y-z	50
รูปที่ 5.8 ผลการคำนวณโดยโปรแกรม COMSOL (ก) ความเค้น von Mises (ข) พารามิเตอร์พินเลย์ ของคาน	51
รูปที่ 5.9 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนตามเวลาที่จุดที่มี f สูงสุดบริเวณกึ่งกลางของคานด้านล่าง กรณีการสอบทวน	52
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ θ_1, θ_2 และ $\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$	53
รูปที่ 5.11 ระนาบวิกฤตที่คำนวณจากโปรแกรม MATLAB.....	53
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ และ k.....	55
รูปที่ 5.13 f-N curve ของ (ก) ลิเทียมไดซิลิเกต และ (ข) เซอร์โคเนีย (ค) เนื้อฟัน	56
รูปที่ 6.1 ระบบพิกัด 3 มิติของแบบจำลองฟันที่ผ่านการกรอ	58
รูปที่ 6.2 ตำแหน่งของขอบเขตกำหนด (ก) ตำแหน่งที่ถูกยึดนิ่ง (ข) ตำแหน่งที่แรงกดกระทำ.....	61
รูปที่ 6.3 ขนาดของแรงกดที่เปลี่ยนไปตามเวลา (ก) แรงกดสูงสุด 100 นิวตัน (ข) แรงกดสูงสุด 800 นิวตัน	61
รูปที่ 7.1 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำ จากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน	65
รูปที่ 7.2 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่งกรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิ เกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน	66
รูปที่ 7.3 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ (ก) ระนาบเอียงลงไปยัง บ่าฟัน (ข) ระนาบเอียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม กรณีแรงกด 100 นิวตัน กระทำบนยอดสูง.....	67
รูปที่ 7.4 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรง กระทำ กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน	67
รูปที่ 7.5 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระนาบจากร่องกลางครอบฟัน ลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน.....	68

รูปที่ 7.6 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน กรณี
 ครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 68

รูปที่ 7.7 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระนาบวิกฤต
 บริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระนาบเอียงขึ้นไปทาง ครอบฟัน กรณี
 ครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 69

รูปที่ 7.8 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอด
 ฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 69

รูปที่ 7.9 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระนาบเอียงขึ้นไป
 ทางยอดฟันต่ำ (ข) ระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกต
 และถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 70

รูปที่ 7.10 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอด
 ฟันสูง กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 70

รูปที่ 7.11 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดบริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระนาบผ่า
 กลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระนาบตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกตและ
 ถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 71

รูปที่ 7.12 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนว
 ยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน 71

รูปที่ 7.13 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่งกรณีครอบฟันทำ
 จากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 72

รูปที่ 7.14 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่งกรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิ
 เกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 73

รูปที่ 7.15 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ (ก) ระนาบเอียงลง ไปยัง
 บ่าฟัน (ข) ระนาบเอียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิ เกตและถูกแรงกด
 800 นิวตัน 75

รูปที่ 7.16 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดน แรง
 กระทำ..... 75

รูปที่ 7.17 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระนาบที่จากร่องกลางครอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 76

รูปที่ 7.18 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน 76

รูปที่ 7.19 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระนาบเอียงขึ้นไปทางครอบฟัน 77

รูปที่ 7.20 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอดฟันต่ำ..... 77

รูปที่ 7.21 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ (ข) ระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกต และถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 78

รูปที่ 7.22 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอดฟันสูง กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 78

รูปที่ 7.23 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระนาบผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระนาบตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกต และถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 79

รูปที่ 7.24 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนว ยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน 79

รูปที่ 7.25 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำ จากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 80

รูปที่ 7.26 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนีย และถูกแรงกด 100 นิวตัน..... 81

รูปที่ 7.27 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่มีแรงกระทำ (ก) ระนาบเอียงลงไปยัง บ่าฟัน (ข) ระนาบเอียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม สำหรับครอบฟันที่เป็นเซอริโคเนียและมีแรงกด 100 นิว ตัน..... 83

รูปที่ 7.28 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โตน แรงกระทำ.....	83
รูปที่ 7.29 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระบายที่จากร่องกลางครอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระบายผ่ากลางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน	84
รูปที่ 7.30 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟันเนื้อฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน.....	84
รูปที่ 7.31 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระบายวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระบายเอียงขึ้นไปทางครอบฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน.....	85
รูปที่ 7.32 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน	85
รูปที่ 7.33 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระบายเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ (ข) ระบายเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน.....	86
รูปที่ 7.34 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอดฟันสูง	86
รูปที่ 7.35 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระบายผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระบายตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน	87
รูปที่ 7.36 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน	87
รูปที่ 7.37 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน.....	88
รูปที่ 7.38 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน.....	89

รูปที่ 7.39 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ (ก) ระนาบเอียงลงไปยัง บ่าฟัน (ข) ระนาบเอียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 91

รูปที่ 7.40 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดน แรงกระทำ..... 91

รูปที่ 7.41 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระนาบที่จากร่องกลางครอบ ฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจาก เซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน 92

รูปที่ 7.42 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน กรณี ครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 92

รูปที่ 7.43 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระนาบวิกฤต บริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระนาบเอียงขึ้นไปทางครอบฟัน กรณี ครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 93

รูปที่ 7.44 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอด ฟันสูง กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน 93

รูปที่ 7.45 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระนาบเอียงขึ้นไป ทางยอด ฟันต่ำ (ข) ระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและ ถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 94

รูปที่ 7.46 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอด ฟันต่ำ..... 94

รูปที่ 7.47 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระนาบ ผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระนาบตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูก แรงกด 800 นิวตัน 95

รูปที่ 7.48 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนว ยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน..... 95

รูปที่ 8.1 แผนภาพแสดงแนวแรงที่กระทำต่อครอบฟัน..... 97

รูปที่ 8.2 ลักษณะกราฟความเค้นที่เปลี่ยนตามเวลาบริเวณร่องฟัน..... 97

รูปที่ 8.3 ความเค้นที่เกิดด้านยอดฟันใหญ่เป็นวง.....	98
รูปที่ 8.4 ลักษณะความเค้นที่เกิดจากแรงที่กระทำ	99
รูปที่ 8.5 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นบริเวณร่องตามรากฟัน	99
รูปที่ 8.6 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณที่ถูกแรงกระทำ.....	101
รูปที่ 8.7 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณที่ถูกแรงกระทำ (ข) รอยแตกบริเวณจุดสัมผัสของฟัน [40].....	102
รูปที่ 8.8 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณที่ร่องฟัน	102
รูปที่ 8.9 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณร่องฟัน (ข) รอยแตกบริเวณร่องฟัน [41]	103
รูปที่ 8.10 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง	104
รูปที่ 8.11 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง (ข) รอยแตกบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ [42].....	104
รูปที่ 8.12 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ	105
รูปที่ 8.13 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง (ข) รอยแตกบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง [43] (ค) รอยแตกของคอฟันลึก [44]	106
รูปที่ 8.14 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณร่องตามรากฟัน	106
รูปที่ 8.15 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณตามรากฟัน (ข) การแตกหักของรากฟันตามแนวยาว [45] (ค) รอยแตกบริเวณตามรากฟัน [46].....	107
รูปที่ 8.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้ง S-N ของลิเทียมไดซิเกตและเซอร์โคเนีย.....	109

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ฟันเป็นอวัยวะที่มีสำคัญอย่างมากของมนุษย์ เนื่องจากมีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง เช่น การบดเคี้ยวอาหารให้มีขนาดเล็กกลืนหรือช่วยในการพูดและออกเสียง อีกทั้งฟันยังส่งผลทางด้านความสวยงาม เนื่องจากรูปร่างการเรียงตัวของฟันส่งผลต่อโครงสร้างและลักษณะของใบหน้า นอกจากนี้สีของฟันที่มีผลต่อความมั่นใจในบุคลิกภาพของบุคคลนั้น ๆ ดังนั้นหากฟันเกิดความเสียหายหรือผิปกติจะส่งผลต่อชีวิตประจำวัน ผู้ที่มีฟันผุ ฟันแตกบิ่นและสูญเสียโครงสร้างฟัน ซึ่งสร้างความเจ็บปวดแก่ผู้ป่วย ดังนั้นฟันที่ความเสียหายจำเป็นต้องได้รับการรักษาด้วยวิธีต่าง ๆ ทางทันตกรรม เช่น การอุดฟัน การครอบฟัน หรือการใส่ฟันปลอมเพื่อให้ฟันสามารถทำหน้าที่ได้อย่างปกติ

การรักษาทางทันตกรรมด้วยการบูรณะฟันที่มีความเสียหาย เช่น ฟันผุ ฟันแตก ยังคงเป็นประเด็นที่ทันตแพทย์ยังต้องการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการรักษาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการนำเสนอวิธีการบูรณะฟันแบบต่าง ๆ เช่น การอุดฟัน (filling) การครอบฟัน (crowns) นอกจากนี้วิธีที่หลากหลายแล้ว วัสดุที่นำมาใช้ในบูรณะฟันก็มีความหลากหลายด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น วัสดุที่ใช้แทนเนื้อฟันหรือวัสดุที่ใช้ครอบฟันเพื่อทดแทนเคลือบฟันที่เสียหายและป้องกันเนื้อฟันและเนื้อเยื่อโพรงประสาทภายในวัสดุที่ใช้ในการบูรณะฟันมีหลายประเภทเช่น โลหะ เซรามิก และ คอมโพสิตเรซิน

วิธีการบูรณะฟันที่เกิดความเสียหายขึ้นอยู่กับความรุนแรงของความเสียหาย ถ้าความเสียหายของเนื้อฟันมีขนาดเล็ก ไม่รุนแรง สามารถบูรณะด้วยการอุด หากขนาดของความเสียหายมีขนาดใหญ่ ทันตแพทย์จะเลือกบูรณะโดยการครอบฟันทั้งซี่ หรือการบูรณะแบบครอบฟันบางส่วนด้วยวัสดุบูรณะ โดยวัสดุบูรณะที่ทดแทนเนื้อฟันต้องสามารถรับแรงจากการบดเคี้ยวของฟันโดยตรง ดังนั้นวัสดุบูรณะจำเป็นต้องสามารถรับภาระทางกล ซึ่งมาจากแรงบดเคี้ยวได้ในระดับหนึ่ง

การครอบฟันมีทั้งการครอบทั้งซี่และการครอบฟันบางส่วน การครอบฟันทั้งซี่เป็นวิธีการบูรณะฟันที่ความเสียหายของฟันทั้งซี่ จำเป็นต้องกรอเนื้อฟันที่เสียหายออกทั้งซี่ และทดแทนด้วยวัสดุบูรณะ สำหรับฟันที่ได้รับความเสียหายเพียงบางส่วนหรือบางด้านของฟัน ทันตแพทย์จะกรอฟันส่วนที่เสียหายและเหลือเนื้อฟันที่มีสภาพดีไว้ และทดแทนเนื้อฟันด้วยวัสดุบูรณะในส่วนที่เสียหายไป จากที่กล่าวมาการครอบฟันบางส่วนทำให้เหลือเนื้อฟันส่วนที่ตีมากกว่าการครอบฟันทั้งซี่ อย่างไรก็ตามการกรอฟันและวัสดุทดแทนของการครอบฟันแบบต่าง ๆ ควรมีลักษณะอย่างไรจึงเหมาะสมต่อการรับแรงบดเคี้ยวจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

นอกจากวิธีการรักษาที่หลากหลายแล้ว วัสดุบูรณะที่ใช้เพื่อนำมาทดแทนตัวฟันที่เสียหายก็มีความสำคัญเช่นกัน วัสดุบูรณะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถทนต่อสภาวะในช่องปากที่เกิดจากแรงทางกลได้แก่ แรงบดเคี้ยว ปฏิกริยาทางเคมีที่มาจากกรดหรือแบคทีเรียที่อยู่ในช่องปาก โดยชนิดวัสดุที่นิยมใช้ทำวัสดุครอบ เช่น โลหะ โลหะผสม เซรามิก และคอมโพสิตเรซิน ซึ่งแต่ละชนิดต่างมีข้อเด่นและด้อยที่ต่างกัน

ในปัจจุบันเซรามิกเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการบูรณะฟัน เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีข้อดีเหนือโลหะ เนื่องจากเซรามิกมีความเข้ากันทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์ได้มากกว่าโลหะ ซึ่งเหมาะสมกับคนไข้บางรายที่มีอาการแพ้โลหะ นอกจากนี้เซรามิกมีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับลักษณะของเคลือบฟันตามธรรมชาติ และยังมีลักษณะภายนอกที่เหมือนฟัน ทำให้ฟันที่ผ่านการบูรณะมีความสวยงามเป็นธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเซรามิกเป็นวัสดุเปราะจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักได้ง่าย จากการรายงานทางคลินิกการแตกหักของฟันส่วนใหญ่เกิดจากแรงที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ดังนั้นกลไกความเสียหายชนิดหนึ่งทางวิศวกรรมที่ควรต้องพิจารณาคือความล้า (fatigue) ของวัสดุ การนำความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมความล้าของวัสดุซึ่งเป็นศาสตร์ทางวิศวกรรมมาใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของวัสดุทางทันตกรรมจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ และจะเป็นประโยชน์โดยตรงแก่ทันตแพทย์ในการวางแผนทางการดูแลฟันที่ได้รับการบูรณะแล้ว หรือศึกษาการออกแบบวิธีการบูรณะฟันที่เหมาะสมต่อไปได้

การศึกษาเกี่ยวกับฟันในอดีตไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมของฟัน หรือวิธีการบูรณะฟันแบบต่าง ๆ การทดลองเป็นแนวทางการศึกษาที่เป็นที่นิยม เนื่องจากฟันมีความซับซ้อนในหลาย ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นรูปร่างของฟันที่ซับซ้อน และความหลากหลายของตัวฟันและวัสดุ ส่งผลให้แนวทางการศึกษาวิจัยต้องทำกับฟันจริงเท่านั้น เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่แม่นยำที่สุด แต่วิธีนี้มีจุดอ่อนที่ความเสี่ยงทางด้านทรัพยากรน้อยที่สุด ทั้งจำนวนตัวอย่างฟันที่นำมาทดลองและเวลาที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้การเตรียมการทดลองและการสอบสวนผลการศึกษาทำได้ยากเนื่องจากฟันของแต่ละคนมีลักษณะไม่เหมือนกันทั้งหมด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการนำความรู้ทางวิศวกรรมมาใช้ในการทันตกรรมมากขึ้น เช่น การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการทำนายพฤติกรรมของฟัน เช่น ความเค้นที่เกิดขึ้น เพื่อช่วยลดเวลาในการศึกษาและทรัพยากรที่ใช้ในการศึกษา เพราะว่าวิธีการนี้สามารถศึกษาผลของรูปร่างหรือสมบัติของวัสดุบูรณะฟันหรือเงื่อนไขอื่น ๆ ที่ทันตแพทย์สนใจได้โดยง่าย

จำนวนรอบภาระใช้งานที่วัสดุเกิดการแตกหักเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาความทนทานของวัสดุและการบูรณะที่ทางทันตแพทย์ให้ความสนใจ การคำนวณอายุการใช้งานในรูปแบบ

พารามิเตอร์ของจำนวนครั้งที่สามารถรับภาระได้ของวัสดุบุรณะสามารถทำได้โดยใช้หลักความล้าของวัสดุตามหลักการทางวิศวกรรม การวิเคราะห์ความล้าสามารถทำได้โดยพิจารณาข้อมูลของความเค้นและ/หรือความเครียดที่เกิดขึ้นในการทำนายอายุการใช้งาน การหาความเค้นหรือความเครียดในการทดลองกับฟันโดยทั่วไปทำได้ยาก เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็ก และใช้ทรัพยากรและเวลาจำนวนมาก ในขณะที่ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงผลของความเค้นหรือความเครียดได้โดยง่าย เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวใช้ร่วมกับความรู้ด้านความล้า ทำให้สามารถทำนายอายุการใช้งานของวัสดุบุรณะฟันได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาวิเคราะห์ความเค้นและความล้าของแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบฟันที่ทำจากเซรามิก เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเรื่องอื่น ๆ ที่ซับซ้อนต่อไป

1.2 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. วิเคราะห์ความเค้น และพยากรณ์ลักษณะการแตกหัก และจำนวนรอบก่อนการเสียหายที่เกิดจากความล้าของวัสดุบุรณะสำหรับการบุรณะฟันแบบการครอบฟัน ด้วยวัสดุบุรณะประเภทเซรามิกบุรณะฟัน เพื่อเป็นการแนะนำทันตแพทย์และผู้ทำวิจัยในอนาคตถึงการเลือกวัสดุบุรณะและรูปแบบการบุรณะฟัน
2. เสนอการใช้ความรู้ด้านความล้าโดยวิธีการวิเคราะห์ระนาบวิกฤต (critical plane analysis) โดยใช้แบบจำลองของฟินเลย์ (Findley's model) ในการหาอายุความล้าในรูปจำนวนรอบและรูปแบบการแตกหักในวัสดุบุรณะฟันทางทันตกรรม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

วิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตในการวิเคราะห์ความเค้น และอายุการใช้งานของแบบจำลองฟันกรามน้อยซี่บนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสิ่งที่สนใจคือศึกษาแบบจำลองโครงสร้างฟันที่ผ่านการบุรณะฟันแบบการครอบฟัน โดยเปรียบเทียบวัสดุครอบ 2 ชนิด คือเซอร์โคเนีย (zirconia) และลิเทียมไดซิลิเกต (lithium disilicate) วิทยานิพนธ์นี้จะเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในฟันและอายุการใช้งานของวัสดุที่ต่างกันของแบบจำลองและเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุที่ใช้ในบุรณะแบบครอบฟัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการศึกษานี้คาดว่าจะสามารถวิเคราะห์การแตกหักที่เกิดจากความล้าของฟันและจำนวนรอบที่วัสดุบุรณะและเนื้อฟันจะสามารถรับความล้าได้ วิทยานิพนธ์นี้คำนวณความเค้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากการศึกษาจากวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นเกี่ยวกับแนวทางในการ

รักษาฟันให้แก่ทันตแพทย์ เช่น ลักษณะการออกแบบอุปกรณ์บูรณะ หรือวางแผนการรักษาฟันในผู้ป่วยที่มีปัจจัยที่ต่างกัน

1.5 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 9 บทและภาคผนวก 2 บท มีการลำดับเนื้อหาและรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฟันและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบูรณะฟันโดยการครอบ เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนคือ งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ฟันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การบูรณะฟันโดยการครอบ การวิเคราะห์ความล้มโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวิเคราะห์ความล้มโดยใช้การวิเคราะห์ระนาบวิกฤต

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือความรู้พื้นฐานทางทันตกรรม ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของฟันและการบูรณะโดยการครอบฟันเซรามิก ส่วนที่สองเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์กับวัสดุ ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีความเค้นและความล้ม และส่วนสุดท้ายคือการอธิบายทฤษฎีพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4 เป็นการสร้างแบบจำลองของฟันกรามน้อยส่วนบนและแบบจำลองของฟันที่ผ่านการบูรณะครอบฟันเซรามิก โดยบทนี้อธิบายหลักการในการสร้างแบบจำลอง

บทที่ 5 การศึกษาพารามิเตอร์ฟันเลย โดยอธิบายหลักการพิจารณาระนาบวิกฤตในระนาบ 2 มิติ และพิจารณาในระนาบ 3 มิติ โดยสอบเทียบพารามิเตอร์ฟันเลยที่หาจากโปรแกรม MATLAB กับพารามิเตอร์ที่หาจากโปรแกรม COMSOL

บทที่ 6 เป็นการอธิบายขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งเนื้อหาได้เป็น 7 ส่วนคือ สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ แบบจำลองและการตั้งแกน สมบัติทางกลของวัสดุ ผิวสัมผัส mesh เงื่อนไขขอบเขต และผลการวิเคราะห์ที่สนใจ

บทที่ 7 เป็นผลจากการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ โดยแบ่งเป็น 4 กรณี คือฟันที่ครอบฟันด้วยลิเทียมไดซิลิเกตหรือเซอร์โคเนีย โดยแต่ละแบบถูกกระทำด้วยแรงบดเคี้ยวปกติ และแรงบดเคี้ยวที่เกิดในผู้มีอาการนอนกัดฟัน

บทที่ 8 เป็นการวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์ความล้าที่เกิดในแบบจำลอง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือเรื่องระนาบการแตกหักและเรื่องจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับความล้าได้

บทที่ 9 เป็นการนำเสนอข้อสรุปของวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้รับและแนวทางการทำวิจัยในอนาคต

ส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์เป็นส่วนของภาคผนวก ที่กล่าวถึงการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์และโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์พินเลย์และระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้น



บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาความล้าของวัสดุบุรณะในแบบจำลองของฟันที่ผ่านการบุรณะโดยการครอบ โดยวิเคราะห์ความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และประยุกต์ความรู้เรื่องความล้าของวัสดุเมื่อรับภาระทางกล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ปัญหาความเสียหายในวัสดุบุรณะและฟัน ร่วมกับความรู้ด้านทันตกรรม วัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์คือใช้ในการพยากรณ์ความเสียหายของฟันหรือความเสียหายของวัสดุทดแทนที่ใช้ในการบุรณะฟัน ซึ่งมีส่วนช่วยในการประเมินระยะเวลาในการตรวจสอบการบุรณะฟันทางทันตกรรมต่อไป ดังนั้นเนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ฟันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความล้าในฟันทางทันตกรรม งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และงานวิจัยเกี่ยวกับบรรณาการวิกฤต เพื่อนำข้อมูลมาศึกษาและเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ฟันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยที่วิเคราะห์การรับภาระของฟันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มมีแพร่หลายในปัจจุบัน การศึกษาในลักษณะนี้เริ่มจากการสร้างแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติ แล้วคำนวณความเค้นและความเครียดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะก่อให้เกิดความเสียหายกับแบบจำลองฟันที่สนใจ เช่น ความเค้น ความเครียดและการเสียรูปของวัสดุ

งานวิจัยที่มีแนวทางดังกล่าวส่วนมากให้ความสนใจกับฟันที่ผ่านการบุรณะ เช่น รากฟันเทียม ฟันที่ผ่านการครอบฟัน ฟันที่ผ่านการอุด เนื่องจากการบุรณะเหล่านี้ต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ ซึ่งทำหน้าที่ทดแทนฟันที่สูญเสียไป จึงมีตัวแปรเป็นจำนวนมากที่ต้องการตรวจสอบความเหมาะสมของการออกแบบ ดังเช่นงานวิจัยที่เกี่ยวกับรากฟันเทียม เช่น การวิเคราะห์แบบจำลองรากฟันเทียมได้แก่การศึกษาโดย Merdji et al. [1] ที่ต้องการศึกษาบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดบนรากฟันเทียมภายใต้แรงแบบพลวัต (dynamic load) หรือแรงที่มีขนาดเปลี่ยนไปตามเวลา ผลการศึกษาพบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณคอฟันของรากฟันเทียม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อการออกแบบลักษณะของรากฟันเทียม เช่น ศึกษาผลของมุมของเกลียวสกรูของรากฟันเทียมที่เหมาะสมโดย Uttamchand et al. [2] และการเปรียบเทียบความเค้นของรากฟันเทียมที่มีรูปแบบของรากฟันเทียมที่แตกต่างกันโดย Chang et al. [3]

นอกจากงานวิจัยเกี่ยวกับรากฟันเทียมแล้ว ยังมีการศึกษาแบบจำลองฟันที่ผ่านการบุรณะวิธีต่าง ๆ เช่น การครอบฟันและการอุดฟัน ซึ่งนอกจากจะศึกษาการออกแบบการบุรณะแล้ว การศึกษาว่าวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลอย่างไรจึงจะเหมาะสมกับวิธีการรักษาฟันที่เลือกใช้ปรากฏให้เห็นอย่างแพร่หลาย เช่น Al-Omiri et al. [4] ศึกษาความเค้นในฟันที่ผ่านการครอบฟันโดยเปลี่ยนสมบัติทาง

กลของวัสดุครอบฟัน ผลการศึกษาพบว่าวัสดุครอบฟันที่มีความอดุลย์ใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาทดแทน จะทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นที่ดีกว่า และกันยวันต์ ตวงวิไล [5] สร้างแบบจำลองฟันที่มีการอุดเพื่อเปรียบเทียบความเค้นในกรณีที่มีการอุดแบบเดียวกันโดยใช้วัสดุบูรณะที่แตกต่างกัน

จากงานวิจัยที่กล่าวในข้างต้นพบว่า งานวิจัยที่วิเคราะห์ฟันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถูกใช้เพื่อการเปรียบเทียบตัวแปรที่ก่อความเสียหาย เช่น ความเค้น ในกรณีที่ลักษณะการออกแบบของอุปกรณ์บูรณะหรือสมบัติของวัสดุบูรณะแตกต่างกัน เพื่อนำมาประยุกต์ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดกับฟันและศึกษาแนวทางในการรักษาฟันต่อไป

2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการบูรณะแบบการครอบฟัน

การบูรณะฟันที่สนใจในวิทยานิพนธ์นี้คือการบูรณะแบบครอบฟัน ซึ่งเป็นการทดแทนเนื้อฟันที่เสียไปจากการแตกหัก หรือฟันผุ โดยทั้งสองกรณีจะต้องมีการตกแต่งเนื้อฟันเดิมให้สามารถใส่วัสดุทดแทนลงไปได้ วัสดุทดแทนหรือวัสดุบูรณะในที่นี้คือครอบฟันที่ใช้ครอบหรือคลุมฟันที่อ่อนแอ โดยรายละเอียดเชิงลึกจะกล่าวถึงในบทต่อ ๆ ไป

วัสดุบูรณะทั้งสองกรณีมีความหลากหลาย เช่น โลหะและเซรามิก แต่ด้วยเหตุผลทางด้านความสวยงาม [6, 7] ทำให้เซรามิกได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งเซรามิกสามารถขึ้นรูปโดยใช้วิธี CAD/CAM ที่ให้คุณภาพคงที่และใช้เวลาในการผลิตน้อยกว่า [8] แม้เซรามิกมีข้อดีหลายประการและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่เซรามิกโดยทั่วไปยังคงมีความเปราะ ทำให้อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการครอบฟันที่รับภาระมาก ๆ เช่น ฟันกราม [9] โดยวัสดุบูรณะประเภทเซรามิกที่นิยมในปัจจุบันคือเซอร์โคเนีย และลิเทียมไดซิลิเกต [6]

งานวิจัยจำนวนหนึ่งทดลองเก็บข้อมูลจากฟันทั้งในกรณีของฟันที่สมบูรณ์และฟันที่บูรณะด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น Guess et al. [10] ทดลองศึกษาความล้มและการแตกหักของครอบฟันที่ทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกต ด้วย CAD/CAM พบว่ามีความสามารถต้านทานการแตกหักได้ดีกว่าครอบฟันที่มาจากการกด หรือ Shuhei Ankyua [11] ศึกษาโดยการทดลองเพื่อเปรียบเทียบครอบฟันจากเรซินและเซรามิก สิ่งที่น่าสนใจคือผลของความล้มที่เกิดจากความร้อนและแรงทางกล แต่การทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงสถิติที่มีความแม่นยำจำเป็นต้องมีข้อมูลจำนวนมาก หมายถึงฟันที่ใช้ทดลองรับภาระจนแตกหักต้องมีจำนวนมากตามไปด้วย อีกทั้งรูปร่างของฟันที่หลากหลายทำให้เกิดการแตกหักได้หลายรูปแบบ จึงจำเป็นต้องทดลองฟันจำนวนมากขึ้น [12]

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้มโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในขณะที่เดียวกันมีความพยายามในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถบอกถึงความเค้นและความเครียดในวัตถุ ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับความรู้ด้านความล้มเพื่อคำนวณอายุการใช้งานที่มีผล

มาจากภาระทางกล แต่แน่นอนว่าการศึกษาโดยวิธีการนี้ต้องการข้อมูลด้านความล้าของวัสดุที่เพียงพอ [12] เช่น ความแข็งแรงต่อความล้า (fatigue strength) ขีดจำกัดความล้า (fatigue limit) และเส้นโค้ง S-N (S-N curve) เป็นต้น การทดสอบหาข้อมูลดังกล่าวส่วนใหญ่จะต้องนำชิ้นงานตัวอย่าง (specimen) ของวัสดุที่สนใจมาทดสอบภายใต้ภาระแบบคาบ (cyclic loading) ด้วยเครื่องจำลองภาระรูปแบบต่าง ๆ เช่น การดัดสามจุด (three point bending) หรือเครื่องหมุน (rotating machine) [13] ซึ่งแต่ละวิธีแม้จะสร้างภาระเป็นคาบได้เช่นเดียวกัน แต่ทำให้เกิดลักษณะความเค้นในชิ้นงานตัวอย่าง (specimen) แตกต่างกัน กล่าวคือแต่ละวิธีทำให้เกิดความเค้นสูงสุดและต่ำสุดที่ต่างกัน ซึ่งงานวิจัยเชิงทดลองนี้มีจำนวนน้อย เพราะต้องใช้ทรัพยากรและเวลาในการศึกษามาก Ehsan Homaei [14] ศึกษาพฤติกรรมความล้าของลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนียจากวิธีการดัดสามจุด หรือ Studart [15] ศึกษาพฤติกรรมความล้าในรูปเส้นโค้ง S-N จากวิธีการดัดแบบตรงกันข้าม (fully reverse bending)

งานวิจัยที่กล่าวมาถูกนำมาใช้ในการศึกษาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างแบบจำลองของฟันขึ้น Sailer et al. [16] นำข้อมูลของ Homaei et al. [14] มาใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาอายุการใช้งานด้วยวิธี stress life ซึ่งทำโดยการนำความเค้นหลักสูงสุด (maximum principal stress) ของชิ้นงานที่สนใจมาหาอายุชิ้นงานจากเส้นโค้ง S-N โดยตรง แม้ Sailer et al. [16] จะมีการเปรียบเทียบของการทดลอง Ehsan Homaeia et al. [17] และมีความผิดพลาดต่ำในการพิจารณาอายุการใช้งานของความล้า แต่รูปแบบการแตกหักที่ยังไม่ชัดเจนว่ามีความถูกต้อง นอกจากนี้งานวิจัยของ Kayabasi et al. [18] ยังศึกษาอายุการใช้งานของฟันที่บูรณะแบบออนเลย์ (onlay) โดยใช้ stress life และ Pietro Ausiello et al. [19] หาอายุการใช้งานของฟันที่บูรณะแบบอินเลย์ (inlay) โดยใช้วิธี stress life เมื่อพิจารณาแล้ว stress life มีความเหมาะสมเมื่อโหลดที่ใส่ทำให้เกิดความเค้นในช่วงยืดหยุ่น (elastic region) และความเค้นหลัก (principal stress) ในระนาบมีทิศทางที่คงที่ [13] ทำให้วิธีการดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับกรณีรับภาระแบบไม่เชิงเส้น (non proportional) ที่มีระนาบของความเค้นหลักที่เปลี่ยนไปตามเวลา อีกทั้งการเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลนอกจากจำนวนรอบการใช้งานแล้ว ระนาบที่เกิดการแตกหักก็เป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการสอบสวนผลการวิจัยเพื่อออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม วิธีการซึ่งอาจมีความแม่นยำที่เหมาะสมกว่าคือการวิเคราะห์ระนาบวิกฤต (critical plane analysis) [13] ซึ่งมีแนวคิดที่ระนาบที่เกิดความเสียหายเกิดจากตัวแปรความเสียหายที่เกิดจากความเค้นและ/หรือความเครียด

2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าโดยใช้การวิเคราะห์ระนาบวิกฤต

การวิเคราะห์ระนาบวิกฤตคือการหาระนาบที่มีพารามิเตอร์ความเสียหายล้ามากที่สุดและกำหนดว่าระนาบนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าวล้า (fatigue crack) โดยส่วนมากการพิจารณาระนาบ

ที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบภาระ ทำให้การพิจารณาโดยใช้ระนาบวิกฤตจากการทดลองพบว่า สามารถใช้กับกรณีภาระแบบ proportional และ non proportional ได้ การพิจารณาระนาบวิกฤตสามารถพิจารณาในรูปของความเค้นและความเครียด ในการพิจารณาในรูปของความเค้นนั้นถูกใช้ในกรณีที่วัสดุที่เกิดความเค้นอยู่ในช่วงที่ยืดหยุ่นได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเค้นมีขนาดใหญ่ต่อการวัด ในขณะที่ในรูปความเครียดถูกใช้ในกรณีที่วัสดุเกิดความเค้นในช่วงพลาสติก เนื่องจากในช่วงดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่น้อยยากต่อการเปรียบเทียบและสังเกต ในขณะที่ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดกว่าในช่วงนี้ ความเค้นที่เกิดในพินจากงานวิจัย [5] พบว่ายังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ดังนั้นขออภิปรายเกี่ยวกับระนาบวิกฤตในรูปความเค้น

การวิเคราะห์ระนาบวิกฤตในรูปความเค้นมีการสร้างตัวแปรความเสียหายมากมาย แต่ทฤษฎีที่มีการความน่าเชื่อถืออย่างแพร่หลายคือ ทฤษฎีของ Findley, McDiarmid และ Dang van โดย Findley ให้ความแม่นยำในการพิจารณาจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ทั้งในกรณีของ proportional และ non proportional ปรากฏในงานวิจัยเกี่ยวกับงานเชื่อม [20],[21] และพินของเฟือง [22] ที่ทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของการใช้ทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบในแง่ของรอยแตกและอายุการใช้งานของวัสดุตัวอย่าง

2.5 บทสรุป

ในการวิเคราะห์อายุการใช้งานของพินที่ผ่านการบูรณะโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กล่าวมา ใช้วิธี stress life ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความเค้นที่เกิดภายในพิน ทำให้ได้ระนาบที่เกิดความเค้นหลัก (principal stress plane) ที่ไม่เหมาะสมตามทฤษฎี ซึ่งอาจส่งผลต่อการทำนายทั้งอายุการใช้งานและลักษณะการแตกหักของวัสดุ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ระนาบวิกฤต (critical plane damage) โดยใช้ตัวแปรความเสียหายของ Findley เพื่อให้สามารถทำนายอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะของพินสำหรับการเลือกวัสดุที่เหมาะสม และวางแผนการรักษาเพื่อซ่อมแซมบูรณะพิน

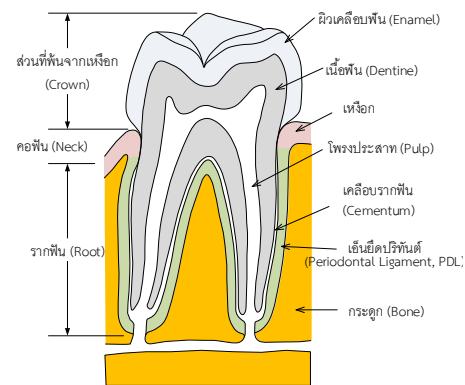
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้สนใจความเสียหายทางกลของฟันที่มีการบูรณะแบบต่าง ๆ โดยสนใจความเสียหายที่เกิดจากความล้า ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้ นอกจากจะเกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของแข็งแล้ว เนื้อหาในส่วนต้นจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานทางด้านทันตกรรม ได้แก่ โครงสร้างของฟันและการบูรณะฟัน หลังจากนั้นจะอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาประยุกต์ใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้เข้าใจถึงที่มา วิธีการและข้อจำกัดของผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื้อหาในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับหลักการทางวิศวกรรมที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุซึ่งประกอบด้วย ความหมายของความเค้น, ความเครียด, von Mises stress, การแปลงความเค้นในระนาบและความล้า [13] รวมถึงหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น

3.1 ความรู้ทางทันตกรรม

3.1.1 โครงสร้างของฟัน [23]

ฟันเป็นอวัยวะที่ใช้ในการบดเคี้ยวอาหารเพื่อให้อาหารมีขนาดเล็กลง โดยฟันมีด้วยกันหลายประเภท เช่น ฟันตัดที่มีหน้าที่ตัดอาหาร ฟันเขี้ยว ฟันกราม ฟันกรามน้อยที่มีหน้าที่บดเคี้ยวอาหาร ฟันจึงเป็นอวัยวะที่สำคัญในการย่อยอาหาร แม้ฟันมีหลายประเภท หลายรูปทรงขึ้นกับหน้าที่ในการบดเคี้ยวอาหาร แต่องค์ประกอบของฟัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ยังคงเหมือนกันโดยฟันประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ เนื้อฟัน เป็นส่วนที่มีปริมาตรมากที่สุดของฟัน มีลักษณะแข็ง มีส่วนในการรับแรงกระแทก ส่วนต่อมาก็คือ เคลือบฟัน อยู่ส่วนนอกสุดของฟัน หุ้มบนเนื้อฟันจากยอดฟันถึงบริเวณเหงือกที่อยู่ติดกับฟันทำให้มีรูปทรงคล้ายกับเนื้อฟันแต่มีสัดส่วนที่ใหญ่ขึ้น มีความหนาประมาณ 0.3 มิลลิเมตร เป็นส่วนที่สัมผัสกับอาหารหรือฟันที่บดเคี้ยวโดยตรง มีความแข็งแรง ทนทานต่อการขีดข่วน ส่วนถัดมาก็คือเนื้อเยื่อโพรงประสาทซึ่งเป็นโพรงที่อยู่ในฟันภายในเนื้อฟัน เป็นที่อยู่ของเส้นเลือดและเส้นประสาท แน่นอนว่าฟันยึดอยู่ในกระดูกกรามของมนุษย์ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์เป็นชั้นระหว่างเนื้อฟันกับกระดูกกรามซึ่งฟันวางตัวอยู่ มีหน้าที่ช่วยลดภาวะที่เกิดระหว่างฟันและกระดูก

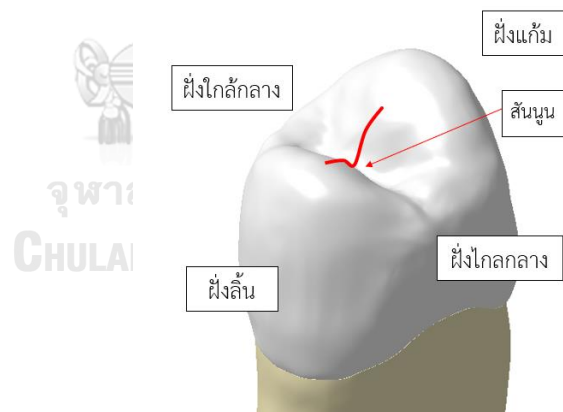


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของฟัน [23]

3.1.2 ฟันกรามน้อยซี่บน

ฟันที่สนใจศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้คือฟันกรามน้อยซี่แรกส่วนล่าง มีหน้าที่ขบและฉีกอาหาร โดยมีลักษณะเป็นยอดฟัน 2 ยอด ซึ่งสามารถแบ่งเป็นฝั่งกระพุ้งแก้ม 1 ยอด ฝั่งลิ้น 1 ยอด โดยยอดฟันตรงกลางเป็นส่วนที่สูงที่สุด สำหรับฟันล่างมียอดฟันฝั่งกระพุ้งแก้มใหญ่กว่า ซึ่งตรงข้ามกับฟันด้านบน ฟันกรามน้อยซี่แรกส่วนล่างแสดงใน

รูปที่ 3.2

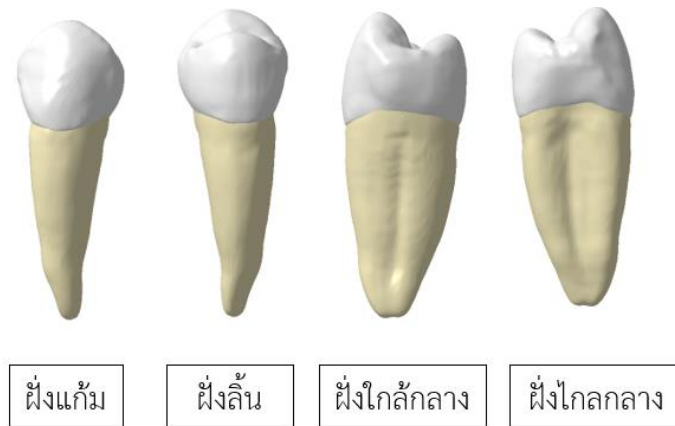


รูปที่ 3.2 ฟันกรามน้อยซี่แรกส่วนล่าง

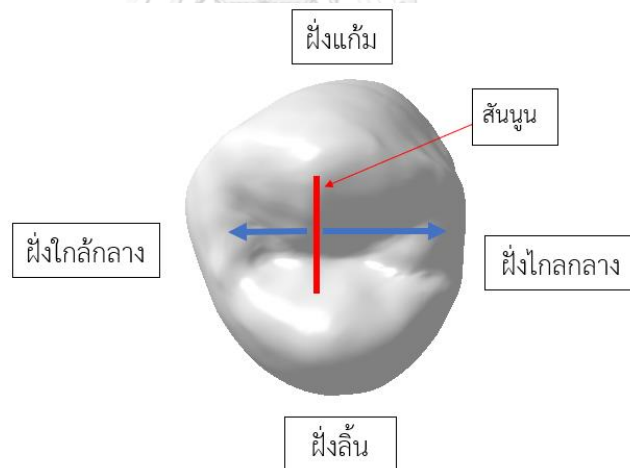
3.1.3 ทิศของฟัน [24]

ทิศของฟันสามารถแบ่งได้เป็น 4 ทิศ คือ ฝั่งแก้ม (buccal side) ฝั่งลิ้น (lingual side) ฝั่งใกล้กลาง (mesial side) และ ฝั่งไกลกลาง (distal side) ด้าน buccal ที่แสดงใน

รูปที่ 3.2 คือด้านฟันที่ติดกับกระพุ้งแก้ม ด้าน lingual คือด้านฟันที่ติดกับลิ้น โดยระหว่าง ด้าน buccal และ ด้าน lingual มีร่องฟันอยู่ตรงกลางฟันแสดงในรูปที่ 3.3 โดยด้านที่ใกล้ร่องฟันมากที่สุด เรียกว่าด้าน mesial และไกลจากร่องฟันเรียกว่าด้าน distal ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ด้านของฟันตามหลักการทางทันตกรรม

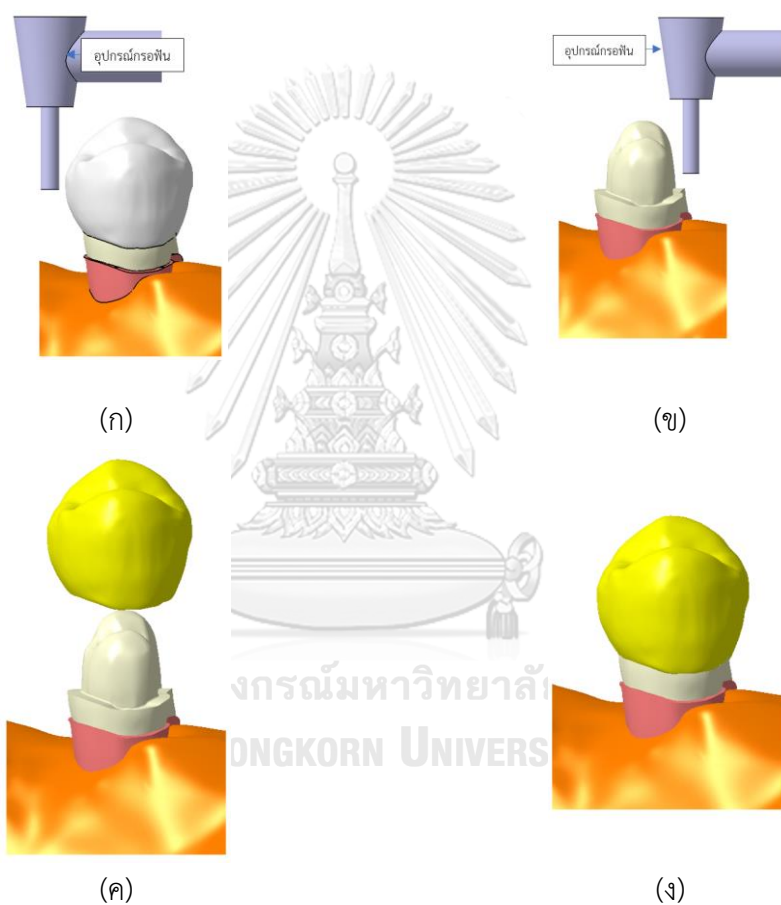


รูปที่ 3.4 การแบ่งทิศฟัน ฝั่งใกล้กลางและไกลกลาง

3.1.4 การครอบฟัน [25]

เมื่อฟันเกิดความเสียหาย วิธีรักษาทางหนึ่งคือการบูรณะฟันโดยทดแทนส่วนที่เสียหายด้วยวัสดุอื่น รูปแบบการรักษาของการรักษาอาจเป็น การอุดฟัน, การครอบฟัน และการบูรณะแบบครอบฟันบางส่วน ตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จึงขออธิบายส่วนที่สำคัญคือการครอบฟันเท่านั้น

การครอบฟันเป็นการบูรณะฟันชนิดหนึ่ง หลักการคือครอบหรือคลุมฟันทั้งซึ่งที่มีปัญหาด้วยครอบฟันที่ผลิตขึ้น โดยฟันที่มีปัญหา เช่น ฟันผุที่เสียเนื้อฟันไปเป็นจำนวนมาก ฟันที่อ่อนแอจากการแตกร้าว หรือรูปร่างและสีของฟันที่ผิดปกติ เป็นต้น รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการครอบฟัน เริ่มต้นจากเมื่อทันตแพทย์ประเมินว่าจะบูรณะด้วยการครอบฟัน ทันตแพทย์ต้องกรอฟันเพื่อนำส่วนที่เสียหายออกจากฟันที่ดีและ/หรือจัดแต่งรูปร่างของฟันให้เหมาะกับการครอบฟัน ต่อมาทำการติดครอบฟันที่ทดแทนเนื้อฟันที่เสียหาย ซึ่งควรมีรูปร่างที่ทำให้ใช้ฟันได้ตามปกติ โดยซีเมนต์เป็นสิ่งที่ยึดติดครอบฟันกับฟันที่ถูกตกแต่งเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนในการครอบฟัน (ก) ฟันก่อนการกรอฟัน (ข) ฟันที่ผ่านการกรอแล้ว (ค) การครอบฟันด้วยวัสดุบูรณะ และ (ง) ฟันที่ผ่านการครอบแล้ว

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์กับวัสดุ

3.2.1 ความเค้นและความเครียด [26]

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลที่เกิดจากภาระแบบต่าง ๆ ในทางวิศวกรรมเป็นการวิเคราะห์ความเสียหายผ่านตัวแปรที่อธิบายลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่รับภาระทางกล โดยตัว

แปรพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากภาระทางกลคือความเค้นและความเครียด ดังนั้นเนื้อหาในหัวข้อนี้จึงการอธิบายความหมายของความเค้นและความเครียด

ความเค้นคือแรงภายในที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย โดยความเค้นสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ความเค้นตั้งฉาก (normal stress) และความเค้นเฉือน (shear stress) ความเค้นตั้งฉากเป็นความเค้นที่เกิดจากแรงภายในที่เป็นแรงตั้งฉากกับพื้นที่ที่พิจารณา ความเค้นตั้งฉากสามารถนิยามได้ในรูปสมการคือ

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

เมื่อ σ คือความเค้นตั้งฉาก

F คือแรงที่มีทิศตั้งฉากกับพื้นที่

A คือพื้นที่ที่แรงกระทำ

ความเค้นตั้งฉากคือความเค้นที่เกิดจากแรงภายในตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ และยัง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือความเค้นดึง (tensile stress) ซึ่งเป็นความเค้นที่แรงภายในชี้ออกจากพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ และความเค้นกด (compressive stress) ซึ่งเป็นความเค้นที่แรงภายในมีทิศเข้าหาพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ รูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 เอลิเมนต์ความเค้นที่แสดงความเค้นตั้งฉากดึงและความเค้นตั้งฉากกด ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ความเค้นดึง

รูปที่ 3.7 ความเค้นกด

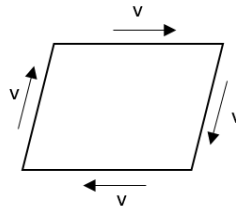
นอกจากความเค้นตั้งฉากแล้วยังมีความเค้นเฉือนซึ่งเป็นความเค้นที่เกิดจากแรงภายในที่เป็นแรงเฉือนหรือแรงที่มีทิศขนานกับพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ ดังนั้นในเอลิเมนต์ความเค้นแสดงในรูปที่ 3.8 และเป็นไปตามสมการ

$$\tau = \frac{V}{A}$$

เมื่อ τ คือความเค้นเฉือน

V คือแรงเฉือนที่กระทำบนพื้นที่

A คือพื้นที่ที่แรงกระทำ



รูปที่ 3.8 ความเค้นเฉือน

จากนิยามของความเค้น จะเห็นว่าหน่วยของความเค้นอยู่ในรูปของแรงต่อพื้นที่ ซึ่งนิยามแสดงหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือเรียกอีกชื่อว่า ปาสกาล (Pascal, Pa)

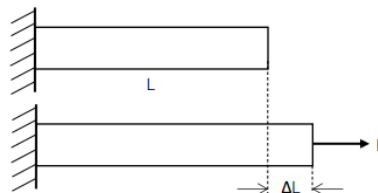
เมื่อวัตถุรับความเค้น วัตถุจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปทำให้เกิดความเครียด ความเครียดแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เป็นสัดส่วนความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิม นอกจากนี้ความเครียดยังแสดงถึงรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากรูปร่างเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีลักษณะเป็นการยืดและการหดเรียกว่าความเครียดตั้งฉาก (normal strain) แสดงในรูปที่ 3.9 ความเครียดตั้งฉากสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดตั้งฉาก

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปเมื่อได้รับภาระ

L คือ ความยาวเดิม



รูปที่ 3.9 วัสดุยืดออก ΔL จากความยาวเดิม L เมื่อรับภาระ P

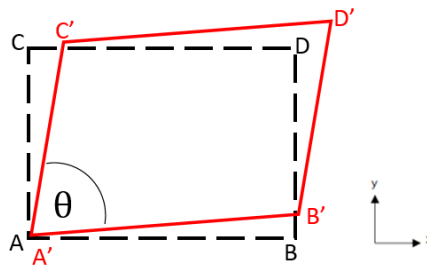
นอกจากความเครียดตั้งฉากแล้ว ยังมีความเครียดเฉือนเป็นความเค้นที่ทำให้วัตถุเกิดจากบิดเบี้ยว โดยการบิดเบี้ยวสามารถอธิบายได้ด้วยการวาดเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมุมฉาก ABCD ดังแสดงในรูปที่

3.10 เมื่อถูกแรงกระทำเอลิเมนต์ ABCD เปลี่ยนรูปไปเป็นเอลิเมนต์ A'B'C'D' นอกจากเอลิเมนต์ยืดหรือหดแล้วยังเกิดการบิดเบี้ยวหรือเปลี่ยนจากมุมฉากไปเป็นมุมอื่น การเปลี่ยนรูปร่างดังกล่าวทำให้เกิดความเครียดเฉือน นิยามดังนี้

$$\gamma_{xy} = \frac{\pi}{2} - \theta$$

โดย γ_{xy} คือความเครียดเฉือน

θ คือมุมของเอลิเมนต์ที่เปลี่ยนไปหลังเกิดการบิดเบี้ยว



รูปที่ 3.10 เอลิเมนต์ที่เกิดความเครียดเฉือน

3.2.2 สมบัติทางกลของวัสดุ [27]

ในวิชานี้มีสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 ค่า คือ ค่ามอดุลัสของวัสดุและอัตราส่วนปัวซอง โดยพารามิเตอร์ทั้งสองมีความหมายดังนี้ ค่ามอดุลัสของวัสดุคืออัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดของวัสดุที่บอกถึงความยากง่ายในการทำให้วัสดุยืดออกตามแรงดึงหรือหดสั้นลงตามแรงกด ค่ามอดุลัสสามารถนิยามได้ตามสมการนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

อัตราส่วนปัวซองคืออัตราส่วนระหว่างความเครียดตั้งฉากในแนวขวางกับภาระที่ให้แก่อัตราส่วนของความเครียดตั้งฉากตามแนวที่ให้ภาระ เมื่อมีการให้ภาระในแนวเดียวเท่านั้น อัตราส่วนปัวซองสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}}$$

เมื่อ ν คืออัตราส่วนปัวซอง

ϵ_{long} คือความเครียดตั้งฉากตามแนวที่ให้ภาระ

ε_{lat} คือความเครียดตั้งฉากในแนวขวางกับภาระที่ให้แก่อื่นงาน

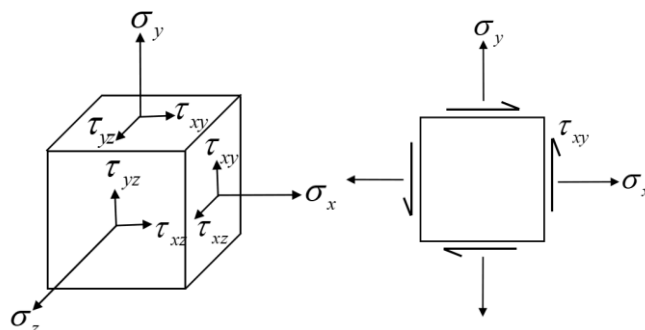
ในวิชยานิพนธ์นี้กำหนดให้สมบัติทางกลของวัสดุอยู่ภายใต้เงื่อนไขไอโซทรอปิก (isotropic) สารเนื้อเดียว (homogeneous) และอีลาสติคเชิงเส้น (linear-elastic) โดยสมบัติของวัสดุที่กล่าวมา ทั้งสามมีความหมายดังนี้

วัสดุไอโซทรอปิกคือวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่เท่ากันไม่ว่าจะพิจารณาในทิศทางใดก็ตาม ส่วนวัสดุเนื้อเดียวเป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวและมีสมบัติทางกลเท่ากันที่ทุก ๆ ตำแหน่งของวัสดุ ส่วนวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสติคเชิงเส้น หมายถึง วัสดุที่ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุแปรผันตรงกับความเค้นที่วัสดุรับ จากเงื่อนไขที่กล่าวมาทำให้สมบัติทางกลของวัสดุชนิดหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือค่ามอดูลัสและอัตราส่วนปัวซองของวัสดุ

อย่างไรก็ตามความเค้นใน 3 มิตินั้นมีทั้งหมด 6 องค์ประกอบ จึงมีการพิจารณาทฤษฎีความเสียหาย (theory of failure) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องกับความเค้นอีก เพื่อทำนายความเสียหาย เช่น ความเค้นหลัก (principal stress), ความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shearing stress) หรือพารามิเตอร์ความเค้นที่เกี่ยวกับเกณฑ์ความเสียหายของวัสดุอย่างความเค้น von Mises

3.2.3 ความเค้นหลักในระนาบ

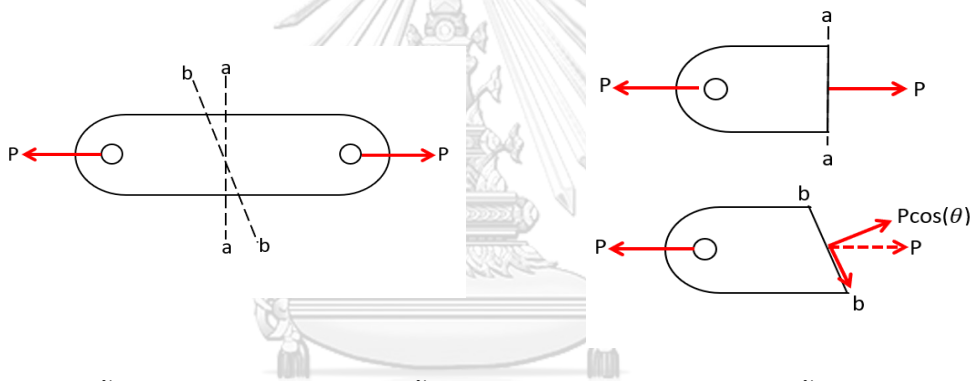
องค์ประกอบของความเค้นที่กล่าวไปเป็นความเค้นในระนาบ 2 มิติที่มีความกว้างและยาว แต่ในชิ้นงานจริงที่มี 3 มิติ ทำให้ความเค้นมีเพิ่มขึ้นตามมิติที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความเค้นใน 3 มิติ เอลิเมนต์ความเค้นจะมีองค์ประกอบ 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) แต่เพื่อให้เข้าใจในความเข้าใจในหัวข้อนี้ ดังนั้นจึงขออธิบายในกรณีของความเค้นในระนาบ (plane stress) ซึ่งคือกรณีที่เกิดความเค้นในระนาบเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) โดยมีองค์ประกอบความเค้นคือ ความเค้นตั้งฉากในทิศแกน x, y และ ความเค้นเฉือนบนระนาบ $x-y$



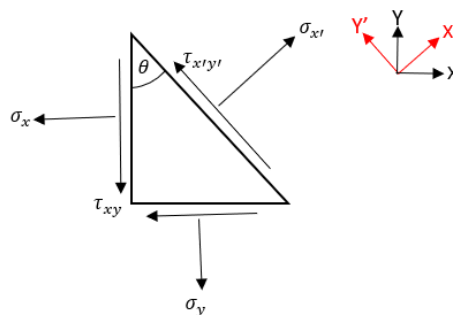
รูปที่ 3.11 ความเค้นใน 3 มิติ และ ความเค้นในกรณีความเค้นในระนาบ

เมื่อเข้าใจถึงนิยามของความเค้นและความเครียด สำหรับความเค้นแล้วมีสมบัติสำคัญต่อการพิจารณาคือการแปลงรูปความเค้นระนาบ ซึ่งคือการเปลี่ยนองค์ประกอบความเค้นที่เอลิเมนต์เดิมที่มีหน้าตัดเปลี่ยนไป อย่างที่กล่าวในข้างต้นความเค้นเท่ากับแรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามระนาบหน้าตัดที่พิจารณา โดยขอยกตัวอย่างเพื่ออธิบายคุณสมบัติดังกล่าวดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ถูกแรงดึงทั้งสองด้านดังแสดงในรูปที่ 3.12 เมื่อพิจารณาแรงภายในชิ้นงานที่ระนาบ a และ b แรงที่เกิดขึ้นตามกฎข้อ 1 ของนิวตันจะต้องมีค่าเท่ากัน แสดงในรูปที่ 3.13 ดังนั้นเมื่อพิจารณาเอลิเมนต์ย่อยที่ถูกตัดตามระนาบ a และ b ที่จุดเดียวกัน จะมีความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนดังแสดงในรูปที่ 3.14 เอลิเมนต์ย่อยดังกล่าวยังคงต้องเป็นไปตามกฎข้อ 1 ของนิวตันที่ว่าผลลัพธ์ของแรงต้องเท่ากับศูนย์เมื่อชิ้นงานหยุดนิ่ง ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแกน x โดยพิจารณาหาผลลัพธ์จากความเค้นคูณด้วยพื้นที่หน้าตัด ตามสมการ



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่ถูกแรงดึง P กระทำทั้งสองด้าน รูปที่ 3.13 แรงภายในชิ้นงานที่ถูกแรงดึง P เมื่อพิจารณา ระนาบ a และ b



รูปที่ 3.14 ความเค้นในระนาบ x - y

$$[\Sigma F_{x'} = 0]$$

$$\sigma_{x'}A - \sigma_x (A \cos \theta) \cos \theta - \tau_{xy} (A \cos \theta) \sin \theta - \sigma_y (A \sin \theta) \cos \theta = 0 \quad (3-1)$$

เมื่อจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$\sigma_{x'} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos(2\theta) + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3-2)$$

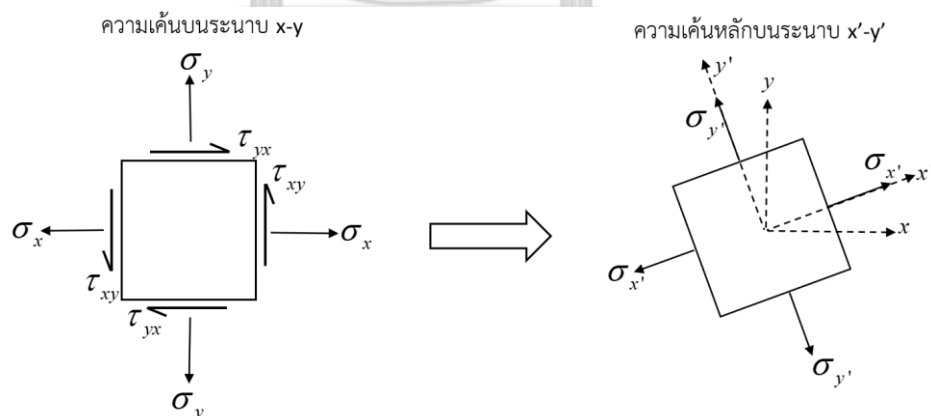
และเมื่อพิจารณาแกน y' ที่เปลี่ยนไปจะได้ว่า

$$\sigma_{y'} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos(2\theta) - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3-3)$$

เมื่อพิจารณาความเค้นเฉือนรวมกับกฎข้อ 1 ของนิวตันจะได้สมการความเค้นเฉือนที่เปลี่ยนไปของระนาบที่เปลี่ยนไป

$$\tau_{x'y'} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \sin(2\theta) + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (3-4)$$

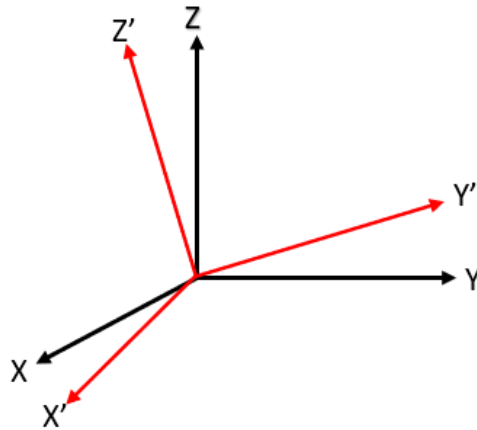
โดยสมการข้างต้นที่กล่าวมาแสดงถึงความเค้นที่สามารถเปลี่ยนไปตามระนาบที่สนใจ โดยการเปลี่ยนระนาบจะทำให้องค์ประกอบความเค้นแต่ละแกนเปลี่ยนไป แต่ยังคงความหมายเดิม โดยกรณีที่มีความเค้นทำให้เกิดความเค้นตึงฉากสูงสุด และไม่มีความเค้นเฉือนในระนาบนั้นเรียกว่า ความเค้นหลัก (principal stress) แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพการแปลงความในระนาบเป็นความเค้นหลัก

การแปลงความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติ

การแปลงความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติมีความซับซ้อนมากขึ้นจากองค์ประกอบความเค้นที่มีจำนวนมากขึ้น โดยการแปลงความเค้นจากระบบพิกัด x - y - z เป็น x' - y' - z' ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การแปลงระบบพิกัด x - y - z เป็น x' - y' - z'

ในที่นี้จะไม่แสดงวิธีการตั้งสมการและการแก้สมการ แต่แสดงความเค้นที่แปลงในระบบพิกัด 3 มิติในรูปเมทริกซ์ (Matrix form) เพื่อสามารถใช้ในการคำนวณโดยโปรแกรม เช่น Excel, MATLAB ดังนี้

องค์ประกอบความเค้นในระบบพิกัด x - y - z สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ ดังนี้

$$[\sigma_{xyz}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

โดยการแปลงความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติ สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$[\sigma_{x'y'z'}] = \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} & \tau_{x'z'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} & \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} & \tau_{z'y'} & \sigma_{z'} \end{bmatrix} = [T]^T [\sigma_{xyz}] [T]$$

โดย $[\sigma_{x'y'z'}]$ คือ เมทริกซ์ความเค้นในระบบพิกัด x' - y' - z'

$[T]$ คือ เมทริกซ์แปลงพิกัด (Transform matrix) สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(x',x) & \cos(x',y) & \cos(x',z) \\ \cos(y',x) & \cos(y',y) & \cos(y',z) \\ \cos(z',x) & \cos(z',y) & \cos(z',z) \end{bmatrix} ; \text{ โดย } \cos(i, j) \text{ คือค่าโคไซน์ของมุมระหว่างแกน } i \text{ และแกน } j$$

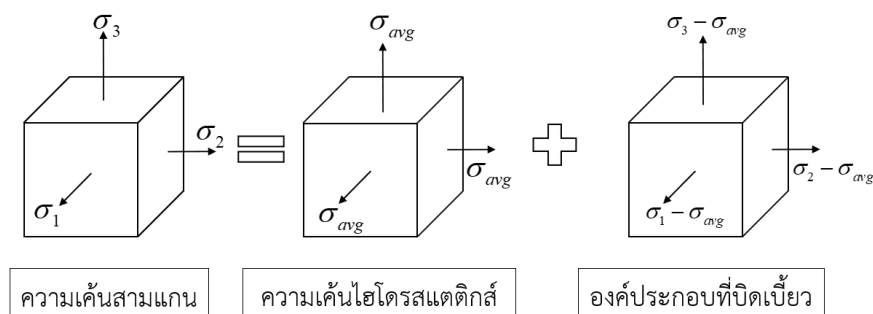
จากสมการจะเห็นได้ว่าความเค้นที่จุดจุดหนึ่งสามารถเปลี่ยนรูปตามระนาบที่เปลี่ยนไป คุณสมบัติที่มีความสำคัญเมื่อพิจารณาความเค้นที่มีหลายองค์ประกอบ เช่น ความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x, y และ ความเค้นเฉือนในระนาบ $x-y$ เมื่อพิจารณาความเสียหายของวัสดุที่มีความเปราะ ซึ่งมีพฤติกรรมความเสียหายโดยส่วนใหญ่มาจากความเค้นตั้งฉากของวัสดุ ดังนั้นเมื่อต้องการเปรียบเทียบความเค้นที่ทำให้วัสดุเปราะ (brittle material) เสียหายจึงมักใช้ความเค้นหลัก (principal stress) ในการเปรียบเทียบเนื่องจากเป็นความเค้นตั้งฉากสูงสุดในระนาบทั้งหมด

3.2.4 ความเค้น von Mises

ความเค้น von Mises เป็นความเค้นที่เกิดจากการพิจารณาความเค้นทั้งสามแกนพร้อม ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ความเค้นสามแกน (triaxial stress) คือความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติ โดยเกิดจากความเค้นไฮโดรสแตติกส์ (hydrostatic stress) หรือความเค้นที่ทำให้เกิดการขยายหรือหดตัวของเอลิเมนต์ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร และ องค์ประกอบที่บิดเบี้ยว (distortion component) หรือความเค้นที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวโดยปริมาตรของเอลิเมนต์ไม่เปลี่ยน ส่วน von Mises stress คือความเค้นที่นิยามจากแนวคิดของ distortion energy theory ที่ว่าความเสียหายในวัสดุเกิดจากองค์ประกอบที่บิดเบี้ยว (distortion component) โดยความเค้น von Mises นิยามตามสมการ

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

เมื่อ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเค้นหลัก (principal stress)



รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงความเค้นตามทฤษฎี distortion energy theory

โดยความเค้น von Mises เมื่อพิจารณาความเสียหายของวัสดุที่มีความเหนียว (ductile) ซึ่งมีพฤติกรรมการเสียหายโดยส่วนใหญ่มาจากความเค้นเฉือนของวัสดุ ดังนั้นเมื่อต้องการเปรียบเทียบความเค้นที่ทำให้วัสดุเหนียวเสียหาย จึงมักใช้ความเค้น von Mises ในการพิจารณาความเสียหาย

3.2.5 ความล้า [13]

ในวิทยานิพนธ์นี้สนใจการทำนายจำนวนรอบที่รับภาระจนเกิดวัสดุความเสียหายล้า ดังนั้นต้องเข้าใจความหมายของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพฤติกรรมความล้าของวัสดุ รวมถึงวิธีการทำนายความเสียหายแต่ละวิธี

ความล้า คือความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการรับแรงซ้ำ ๆ โดยภาระที่กระทำยังไม่ได้มากพอที่จะทำให้ชิ้นงานเสียหายทันที ความล้าเกิดเมื่อวัสดุรับแรงที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงที่เข้าไปซ้ำมาเรียกว่าภาระแบบเป็นคาบ (cyclic load) ภาระหนึ่งจะเกิดการแตกหักในระดับจุลภาค ซึ่งเริ่มจากจุดที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง (stress concentration) เช่น ที่ผิวของชิ้นงาน เมื่อรอยแตก (crack) เกิดขึ้นถึงจุดหนึ่งจะเกิดการแพร่ขยาย (propagate) จนทำให้วัสดุแตกหัก (failure) โดยการศึกษาความล้าส่วนใหญ่คือค่า N_f หรือ fatigue life ซึ่งคือจำนวนรอบของภาระ ตั้งแต่วัสดุมีสภาพดีจนถึงวัสดุเกิดการแตกหัก ในทางทฤษฎีความเค้นที่ไม่ทำให้เกิดการแตกหักไม่ว่าจำนวนรอบภาระจะสูงเพียงใดเรียกว่าขีดจำกัดของความล้า (fatigue limit or endurance limit)

ความแข็งแรงล้ามีสหพันธ์กับแอมพลิจูดความเค้นหรือความเครียดที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาระที่กระทำ ถ้าวัสดุเกิดความเค้นในช่วงยืดหยุ่น (elastic region) ของวัสดุ หมายถึงช่วงที่วัสดุสามารถคืนตัวกลับมาสภาพเดิมได้เมื่อปลดแรงที่กระทำออกหมด ควรพิจารณาพฤติกรรมการล้าในรูปของความเค้น ซึ่งส่วนใหญ่มีจำนวนรอบที่สูงประมาณมากกว่า 10^4 รอบ เรียกความล้าประเภทนี้ว่าความล้ารอบสูง (high cycle fatigue) ในขณะที่ถ้าความเค้นถึงช่วงพลาสติก (plastic region) ซึ่งเป็นช่วงที่เกินช่วงยืดหยุ่นและเป็นช่วงที่วัสดุเมื่อเกิดความเค้นค่าหนึ่งและไม่สามารถคืนตัวกลับมาเป็นรูปเดิมเมื่อไม่มีแรงมากระทำ ควรวิเคราะห์ความแข็งแรงล้าในรูปของความเครียด ซึ่งจะมี N_f ประมาณน้อยกว่า 10^4 รอบเรียกว่าความล้ารอบต่ำ (low cycle fatigue)

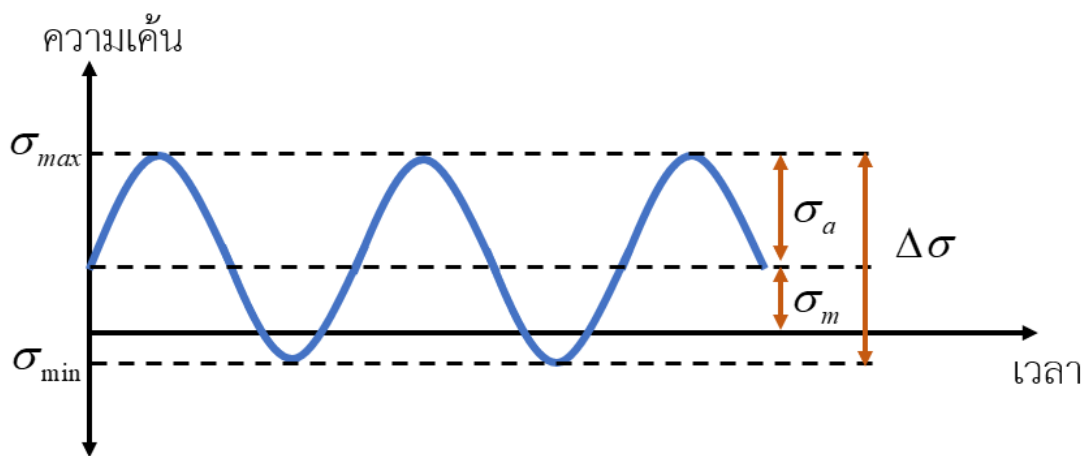
ภาระเป็นคาบมีหลายรูปแบบ ทั้งภาระเป็นคาบที่มีแอมพลิจูดขนาดคงที่และไม่คงที่ หรือภาระเป็นคาบที่มีรูปแบบเปลี่ยนแปลงและไม่เปลี่ยนแปลง โดยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีขนาดและรูปแบบคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะของภาระเป็นคาบ และมีผลต่อความล้าคือความเค้นกลางเฉลี่ย (mean stress) และแอมพลิจูดความเค้น (amplitude stress/ alternating stress) โดยความเค้นเฉลี่ย, σ_m คือคเฉลี่ยเลขคณิตของความเค้นสูงสุด σ_{max} และความเค้นต่ำสุด σ_{min} โดย พิสัยความเค้น $\Delta\sigma$ คือผลต่างระหว่างความเค้นสูงสุดและ

ความเค้นต่ำสุด และ แอมพลิจูดความเค้น σ_a คือค่าความแตกต่างของความเค้นสูงสุดและความเค้นเฉลี่ย โดยสามารถเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3-5)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3-6)$$

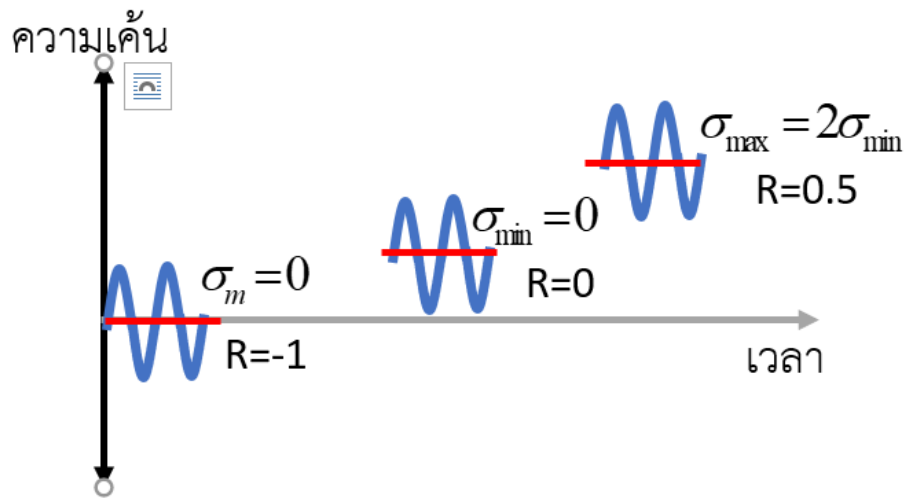
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3-7)$$



รูปที่ 3.18 ความเค้นเป็นคาบ ที่มีรูปแบบและความกว้างของความเค้นมีขนาดคงที่

ทั้งนี้แอมพลิจูดความเค้นเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้มากกว่า ในขณะที่ค่าความเค้นกลางอาจแสดงในรูปของอัตราส่วนความเค้น (stress ratio, R) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดและความเค้นสูงสุด โดยตัวอย่างของลักษณะของ ความเค้นเป็นคาบ ที่มีอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 3.19 ค่าอัตราส่วนความเค้นเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3-8)$$



รูปที่ 3.19 ลักษณะของความเค้นเป็นคาบที่มีอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ

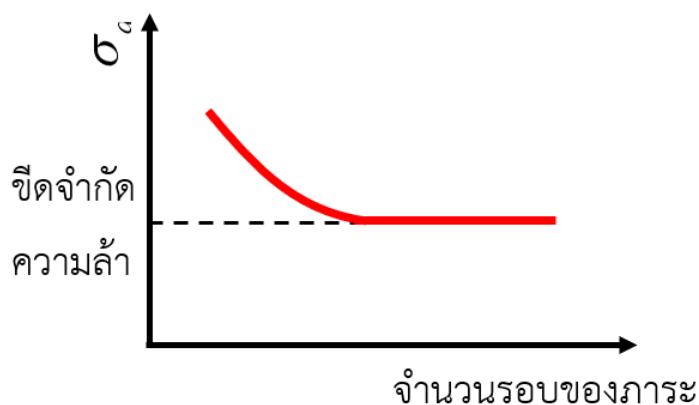
ที่มาของการศึกษาความล้าเริ่มมาจากการวิเคราะห์ความล้าที่เกิดจากความเค้นแนวเดียว (uniaxial stress) ซึ่งข้อมูลความล้าไม่ว่าจะเป็น การทนทานต่อความล้า เส้นโค้ง S-N มาจากการทดสอบชิ้นงานที่อยู่ในสภาวะที่รับความเค้นในทิศเดียว อย่างไรก็ตามความเค้นที่เกิดในชิ้นงานจริงมักได้รับแรงกระทำในหลายทิศทาง หรือเกิดความเค้นในหลายทิศทาง แนวทางการวิเคราะห์มี 2 วิธี คือ การทดสอบชิ้นงานในสภาวะที่มีความเค้นหลายทิศทางหรือสร้างทฤษฎีบทหรือแนวคิดแบบต่าง ๆ ที่นำข้อมูลการทดสอบภายใต้ความเค้นแนวเดียวมาใช้กับกรณีความเค้นในหลายทิศทาง อย่างไรก็ตามการทดสอบสภาวะที่มีความเค้นต่าง ๆ เกิดขึ้นได้หลายกรณีตามระบบแกนพิกัด 3 มิติ ซึ่งเป็นการทดสอบที่ใช้ทรัพยากรมาก ทำให้การใช้ทฤษฎีในการพิจารณาความล้าเป็นที่นิยมมากกว่า

วิธีการที่ใช้ในการทำงาน N_f มีหลากหลายวิธี เช่น stress/strain life, critical plane damage โดยสำหรับวิธีที่นิยมคือ stress/strain life และ critical plane damage

Stress/strain life คือความแข็งแรงล้าของวัสดุที่ได้จากการนำตัวอย่างชิ้นงาน มาให้รับภาระเป็นคาบ ค่าต่าง ๆ แต่ละชิ้นจะรับแอมพลิจูดความเค้นที่ต่างกันจนกระทั่งเสียหาย ดังนั้นเราจะทราบข้อมูล N_f ของแอมพลิจูดความเค้นต่าง ๆ เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์แอมพลิจูดความเค้น และ N_f จะได้เส้นโค้ง S-N (S-N curve) แสดงในรูปที่ 3.20 แนวโน้มความแข็งแรงล้าช่วงก่อนถึงขีดจำกัดความล้าสามารถแสดงในรูปสมการ Basquin ได้ดังนี้

$$\sigma_a = AN_f^b \quad \text{โดย } A \text{ และ } b \text{ เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง}$$

เมื่อต้องการหาค่า N_f สำหรับชิ้นงานรูปทรงอื่น สามารถทำได้โดยคำนวณความเค้นที่ในชิ้นงานนั้น จากนั้นแปลงความเค้นหลายทิศทางให้อยู่ในรูปความเค้นหลัก หรือความเค้น von Mises ก็ได้ก่อนจะเทียบกับเส้นโค้ง S-N เพื่อหา N_f



รูปที่ 3.20 ลักษณะของกราฟ S-N curve ที่แสดงขีดจำกัดความล้า

3.2.6 การพิจารณาหน้าวิกฤต (Critical plane damage) [28]

อย่างที่กล่าวมาแล้วว่าวิธี stress/strain life ใช้กราฟ S-N ที่มาจากการทดลอง โดยในกราฟดังกล่าวจะมีค่าอัตราส่วนความเค้นค่าหนึ่งขึ้นกับวิธีทดลอง ซึ่งแสดงถึงความเค้นเฉลี่ยที่ต่างกัน ดังนั้นแสดงว่าการใช้เส้นโค้ง S-N กราฟเดียวเพื่อทำนาย N_f อาจทำให้ผลที่ได้แตกต่างไป เนื่องจากผลของความเค้นเฉลี่ยที่ต่างกัน

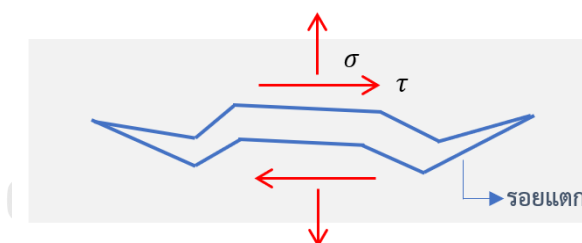
นอกจากผลของความเค้นเฉลี่ยแล้ว การเปลี่ยนแปลงความเค้นเทียบกับเวลาก็มีผลด้วยเช่นกัน เช่นในกรณีภาระแบบไม่ตามสัดส่วน (non-proportional loading) ซึ่งระนาบของความเค้นหลักจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้การทำนายอายุการใช้งานจากความเค้นหรือความล้า (stress/strain life) ที่ต้องมีการใช้ความเค้นหลัก และความเค้น von Mises ในการหาจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ N_f มีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการเสนอวิธีการใหม่ ได้แก่การพิจารณาหน้าวิกฤตซึ่งเป็นความพยายามในการสร้างพารามิเตอร์ความเสียหายที่คิดรวมผลของความเค้นเฉลี่ยและการเปลี่ยนไปของความเค้นในเวลาเดียวกัน

แนวคิดของวิธีหน้าวิกฤต (Critical plane approach) คือความเสียหายล้าของวัตถุจะถูกกำหนดโดยระนาบที่ได้รับผลของภาระล้ามากที่สุด โดยผลดังกล่าวแสดงในรูปของพารามิเตอร์ความเสียหายซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันของความเค้นและ/หรือความเครียด ระนาบที่พารามิเตอร์ความเสียหายมีค่ามากที่สุดเรียกว่า หน้าวิกฤต (critical plane) หน้าวิกฤตจึงเป็นระนาบของรอยแตกเริ่มต้น

วิธีการนี้เหมาะสมกว่าวิธี stress/strain life ในกรณีที่ภาระเป็นแบบไม่ตามสัดส่วน เนื่องจากเป็นการคำนวณพารามิเตอร์ความเสียหายของทั้งคาบ พารามิเตอร์ความเสียหายมีการสร้างจากแนวคิดหลายรูปแบบ เช่น การทดสอบวัสดุเพื่อหาข้อมูลสำหรับพารามิเตอร์ความเสียหาย ทั้งที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของความเค้นที่เรียกว่าการวิเคราะห์ระนาบวิกฤตในความเค้น (stress-based critical plane analysis) และในรูปฟังก์ชันของความเครียดที่เรียกว่าการวิเคราะห์ระนาบวิกฤตในความเครียด (strain-based critical plane analysis) ทั้งนี้วิทยานิพนธ์นี้มีความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินค่าความแข็งแรงคราก ของวัสดุ ดังนั้นการวิเคราะห์ระนาบวิกฤตในความเค้นจึงเหมาะสม โดยโมเดลความเสียหายที่เลือกใช้คือ แนวคิดของฟินเลย์ (Findley's approach)

3.2.7 แนวคิดของฟินเลย์ [29]

แนวคิดของฟินเลย์สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า การแตกหักจะเกิดขึ้นบนระนาบวิกฤต (critical plane) ซึ่งคือระนาบที่เกิดความเสียหายสูงสุด แนวคิดของฟินเลย์ระบุว่าความเสียหายที่เกิดจากความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนก่อให้เกิดรอยแตกหักที่แตกต่างกัน โดยความเค้นตั้งฉากจะก่อให้เกิดรอยแตกที่มีลักษณะเปิดออก ในขณะที่ความเค้นเฉือนจะก่อให้เกิดรอยแตกที่มีลักษณะเลื่อนไถล ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนพร้อมกัน ชิ้นงานที่รับความเค้นตั้งฉากที่เป็นความเค้นดึงและความเค้นเฉือนพร้อม ๆ กันจะรุนแรงมากกว่ากรณีความเค้นตั้งฉากเป็นความเค้นกด



รูปที่ 3.21 รอยแตกที่เกิดจากความเค้นตั้งฉากและเฉือน

จากแนวคิดดังกล่าวกับผลการทดลอง ฟินเลย์นิยามพารามิเตอร์ความเสียหายของฟินเลย์ (Findley's parameter) ซึ่งเป็นผลรวมแบบเชิงเส้นของแอมพลิจูดความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากสูงสุด (maximum normal stress) ในหนึ่งรอบภาระที่ทำให้พารามิเตอร์ความเสียหายมีค่าสูงสุด โดยเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$f = \left(\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma \right)_{\max} \quad (3-9)$$

โดย f คือ พารามิเตอร์ความเสียหายของฟินเลย์

$\frac{\Delta\tau}{2}$ คือ แอมพลิจูดความเค้นเฉือนในหนึ่งรอบ (shear stress amplitude)

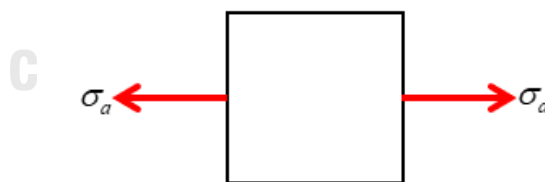
k คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟินเลย์

σ คือ ความเค้นตั้งฉากในหนึ่งรอบ

โดย k เป็นค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างผลของความเค้นตั้งฉากและผลของความเค้นเฉือนที่มีต่อพารามิเตอร์ความเสียหายของฟินเลย์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง สมการ (3-9) แสดงให้เห็นว่าระนาบวิกฤตของแบบจำลองนี้เกิดขึ้นที่ระนาบที่ $\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$ มีค่าสูงสุด

ค่า f และ k หามาจากการทดลองโดยใช้ข้อมูลชีวิตจำกัดความล้า และเส้นโค้ง S-N ของความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน หรือความเค้นตั้งฉากที่มีค่าอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ กัน เนื้อหาต่อจากนี้จะอธิบายในกรณีของการใช้ข้อมูลความเค้นตั้งฉากที่มีค่าอัตราส่วนความเค้นต่างกัน

สำหรับการทดสอบหาความแข็งแรงทางความล้า (fatigue strength) ของชิ้นงานที่รับความเค้นตั้งฉากในทิศเดียวสามารถทำได้โดยการให้ภาระเป็นคาบในการทดสอบแบบดึง (tension test) หรือแบบดัด (bending test) การทดสอบดังกล่าวจะทำให้เกิดแอมพลิจูดความเค้นตั้งฉาก ในแนวเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.22 เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นตามระนาบที่เปลี่ยนไปโดยการแปลงความเค้นโดยแทน σ_{max} ไปในสมการ (3-2) และแทน σ_a ในสมการ (3-4) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการแปลงความเค้น เขียนในรูปสมการได้ว่า



รูปที่ 3.22 ความเค้นที่เกิดในชิ้นงาน ในการทดสอบแบบดึงหรือแบบโค้งงอ

$$\sigma_{\max, @\theta} = \frac{\sigma_{\max}}{2} + \frac{\sigma_{\max}}{2} \cos 2\theta \quad (3-10)$$

$$\tau_{a, @\theta} = \frac{\sigma_a}{2} \sin 2\theta \quad (3-11)$$

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการหาความกว้างของความเค้นที่เปลี่ยนระนาบไป หลังจากนั้นจึงนำสมการ (3-10) และ (3-11) ไปแทนในสมการความเสียหายของฟินเลย์สมการ (3-9) จะได้ว่า

$$f = \frac{\sigma_a}{2} \sin 2\theta + k \left(\frac{\sigma_{\max}}{2} + \frac{\sigma_{\max}}{2} \cos 2\theta \right) \quad (3-12)$$

โดยที่ $\Delta\tau$ ในสมการ (3-9) มีค่าเท่ากับ $2\tau_{a,@\theta}$ และ $\sigma_a \sin 2\theta$ ในสมการ (3-9) ที่ทำให้ $\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$

$$\text{มีค่ามากที่สุดคือ } \sigma_{\max,@\theta} = \frac{\sigma_{\max}}{2} + \frac{\sigma_{\max}}{2} \cos 2\theta$$

ซึ่งจากนิยามพารามิเตอร์ความเสียหายของพินเลย์จะได้ว่าความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นทำให้ตัวแปร f มีค่าสูงสุด ดังนั้นการหาระนาบที่ทำให้ f มีค่าสูงสุดสามารถทำได้โดยหาระนาบหรือค่า θ ที่ทำให้ f มีค่ามากที่สุด นั่นคือค่า $\frac{df}{d\theta}$ จะต้องมามีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{df}{d\theta} = \sigma_a \cos 2\theta + k(0 - \sigma_{\max} \sin 2\theta) = 0 \quad (3-13)$$

เมื่อแก้สมการหาค่า θ ที่ทำให้ได้มีค่า f สูงสุดจากสมการ (3-13) จะได้ว่า

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{1}{k} \times \frac{\sigma_a}{\sigma_{\max}} \right) \quad (3-14)$$

เมื่อแทน θ ในสมการเพื่อหา f สูงสุดจากสมการ (3-12) จะได้ว่า

$$f = \frac{\sigma_a}{2} \sin \left(\arctan \left(\frac{\sigma_a}{k\sigma_{\max}} \right) \right) + k \left(\frac{\sigma_{\max}}{2} + \frac{\sigma_{\max}}{2} \cos \left(\arctan \left(\frac{\sigma_a}{k\sigma_{\max}} \right) \right) \right) \quad (3-15)$$

เมื่อจัดรูปแล้วจะได้ว่า

$$\sqrt{(\sigma_a)^2 + k^2 (\sigma_{\max})^2} + k\sigma_{\max} = 2f \quad (3-16)$$

และใช้สมการ (3-6) และ (3-8)

เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_a และ σ_{\max} จะได้ว่า

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{1-R} \sigma_a \quad (3-17)$$

เมื่อใช้สมการ (3-17) เพื่อจัดรูปสมการ (3-16) ให้อยู่ในรูป σ_a จะได้ว่า

$$\sqrt{(\sigma_a)^2 + k^2 \left(\frac{2}{1-R} \sigma_a \right)^2} + k \sigma_{\max} = 2f \quad (3-18)$$

โดยสมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการหาค่า f และ k ได้ โดยการนำข้อมูลการทดลองเช่น ซีดจำกัดความล้า หรือ S-N curve ที่มีค่าอัตราส่วนความเค้นต่าง ๆ กัน เช่นมีข้อมูลซีดจำกัดความล้า กรณีที่ $R=-1$ และ $R=0$ ไปแทนในสมการ (3-16) ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\sqrt{(\sigma_{a,R=-1})^2 + k^2 (\sigma_{a,R=-1})^2} + k\sigma_{a,R=-1} = 2f \quad (3-19)$$

$$\sqrt{(\sigma_{a,R=0})^2 + (2k\sigma_{a,R=0})^2} + k\sigma_{a,R=0} = 2f \quad (3-20)$$

เมื่อได้สมการข้างต้น ขั้นตอนต่อมาเป็นการหาค่า k จากซีดจำกัดความล้าที่มีอัตราส่วนความเค้นต่างกัน เช่นการเทียบ f ในสมการ (3-19) และ (3-20) เนื่องจาก f คือตัวแปรที่แสดงถึงความเสียหาย ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าถ้า f มีค่าเท่ากัน ความเสียหายที่เกิดควรเท่ากัน โดยมีแนวความคิดการเปรียบเทียบ f คือซีดจำกัดความล้า ที่มีค่าอัตราส่วนความเค้นต่างกัน ควรทำให้เกิดความเสียหายใกล้เคียงกัน ดังนั้น f ทั้งสองสมการควรมีค่าเท่ากันที่ซีดจำกัดความล้า แม้ว่าความเค้นที่เกิดจะต่างกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาให้ f ของทั้ง 2 กรณีเท่ากันในสมการ (3-19) และ (3-20) โดยแทนความเค้นในสมการเป็นความเค้นที่ ซีดจำกัดความล้า และจัดรูป จะได้ว่า

$$\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}} = \frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}} \quad (3-21)$$

เมื่อแทนข้อมูลจากการทดลองในสมการแล้วหาค่า k ที่ทำให้สมการถูกต้อง และเมื่อนำค่า k กลับไปแทนค่า จะสามารถหาค่า f ได้ โดย Findley's model ถูกนำไปใช้รูปของ N_f ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$f = \left(\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma \right)_m = A(N_f)^b \quad (3-22)$$

โดยค่า A , b เป็นค่าคงที่ที่มาจาก S-N curve และค่า k หามาจากการคำนวณข้างต้น f สามารถนำไปพิจารณาจำนวนรอบการใช้งานได้จากสมการของเส้นโค้ง S-N ของความเค้นตั้งฉากที่มีอัตราส่วนความเค้นเท่ากับ -1 [21] ถูกจัดในรูปสมการว่า

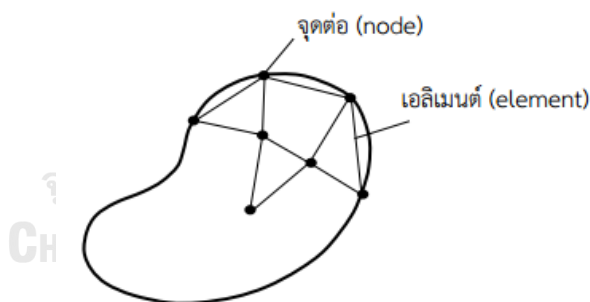
$$f = \left(\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma \right)_m = \left(k + \sqrt{1+k^2} \right) A^* (N_f)^{b^*} \quad (3-23)$$

โดย A^* และ b^* คือค่าคงที่ของเส้นโค้ง S-N ในกรณีอัตราส่วนความล้าเท่ากับ -1

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [30]

โดยทั่วไปพฤติกรรมทางกลไม่ว่าจะเป็นปัญหาของแข็ง ความร้อน หรือของไหล สามารถอธิบายและหาผลเฉลยตามทฤษฎีผ่านสมการต่าง ๆ ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสมการ PDE แต่ด้วยความที่เป็นสมการ PDE ทำให้การหาผลเฉลยแม่นยำตรงมีความยุ่งยากหรือไม่สามารถหาได้ จึงต้องมีการตั้งสมมุติฐานต่าง ๆ เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ แต่ก็ก็เป็นเหตุทำให้เกิดข้อจำกัดในการหาคำตอบ เช่น การหาความเค้นในชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ไม่สามารถคำนวณได้ด้วยทฤษฎีหรือสมการอย่างง่ายอย่างเช่นทฤษฎีของคานได้ หลักการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการนำสมการ PDE มาลดรูปด้วยวิธีทางการตัวเลขให้เป็นสมการพีชคณิต แล้วนำสมการที่ได้มาคำนวณตามเอลิเมนต์ที่แบ่งไว้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงสามารถขยายขอบเขตในการศึกษาปัญหาที่มีความซับซ้อนที่ต้องมีการแก้สมการ PDE ได้มากขึ้น แนวทางการแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งรูปร่างเอลิเมนต์ ขั้นตอนแรกเป็นการนำเอาโดเมนของปัญหา มาแบ่งออกเป็นส่วน ๆ เพื่อที่จะหาผลเฉลยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยประมาณตามตำแหน่งที่ต้องการ ในการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์เชื่อมกันที่จุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะใช้คำนวณหาค่าตัวแปรตามที่ต้องการดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การแบ่งเอลิเมนต์ของปัญหาที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) ฟังก์ชันในที่นี้คือฟังก์ชันประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยมีแนวคิดหาคำตอบของปัญหาสามารถประมาณให้เข้ากับฟังก์ชันประมาณค่าได้ ถ้ามีจำนวนของฟังก์ชันประมาณค่าที่สามารถลู่อู่เข้าสู่คำตอบที่เป็นผลเฉลยของสมการที่ต้องการแก้ การแบ่งเอลิเมนต์จึงเป็นการเลือกฟังก์ชันที่ใช้ประมาณคำตอบที่มาจาก PDE เพื่อให้ได้คำตอบโดยประมาณที่ถูกต้อง ตามฟังก์ชันประมาณค่าต่าง ๆ ไม่ว่าจะมีการแบ่งเอลิเมนต์เป็นรูปร่างสามเหลี่ยมตาม รูปที่ 3.24 หรือรูปร่างอื่น ๆ โดยการเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมก็มีผลต่อความแม่นยำของผลเฉลยที่ต้องการหาด้วย คำตอบของปัญหาสามารถเขียนในรูป

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3$$

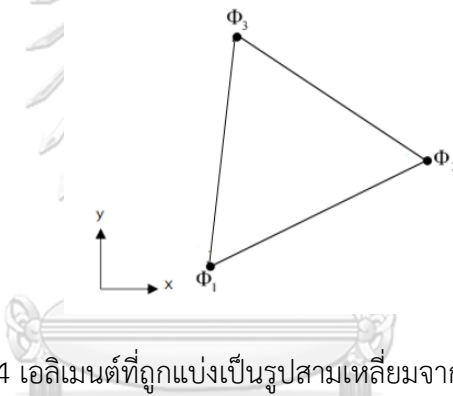
เมื่อ $N_i(x, y)\phi_i$ $i=1,2,3$ แทนฟังก์ชันการประมาณค่าในเอลิเมนต์

$$\text{หรือ} \quad \phi(x, y) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}$$

เมื่อ $[N]$ คือเมทริกซ์แถวของฟังก์ชันการประมาณค่าในเอลิเมนต์

$\{\phi\}$ คือเมทริกซ์แถวตั้งของ node ที่ไม่ทราบค่า

เมื่อนำคำตอบในรูปแบบสมการข้างต้นมาคำนวณจะได้ค่าที่สนใจที่ node และเมื่อนำค่าที่ node มารวมกับฟังก์ชันประมาณ จะได้คำตอบโดยประมาณของปัญหาที่ต้องการ



รูปที่ 3.24 เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมจากจุดต่อ 3 จุด

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equation) เนื่องจากการแบ่งเอลิเมนต์จำนวนมากในแต่ละปัญหาเพื่อให้ฟังก์ชันประมาณค่าที่เลือกสามารถเข้าสู่คำตอบได้ ทำให้สมการที่ใช้มีจำนวนมาก ดังนั้นต้องจัดสมการให้อยู่ในรูป matrix โดยโดเมนของปัญหาจะประกอบไปด้วยค่าเอลิเมนต์เมทริกซ์ (element matrix) ต่างกันตามตำแหน่งของจุดต่อ เช่นรูปแบบเมทริกซ์ที่แสดงต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$

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

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

$$[k]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys}$$

ขั้นตอนที่ 5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในระบบสมการรวม เพื่อกำหนดกรณีที่ต้องหาคำตอบจากสมการ PDE ที่ต้องการ โดยการใส่เงื่อนไขในสมการให้ขึ้นกับสมการ PDE ที่แปลงมาด้วย

ที่กล่าวมาคือหลักการเบื้องต้นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ปัญหาที่สนใจในโครงการนี้เป็นปัญหาของแข็ง เมื่อวัสดุอยู่ในสมดุลและไม่คิดผลของเวลาสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} + F_x = 0$$

$$\frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\tau_{yz}}{dz} + F_y = 0$$

$$\frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{d\sigma_z}{dz} + F_z = 0$$

เมื่อได้คำตอบของสมการแล้ว ค่าที่ได้คือตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของแต่ละ node ดังนั้นเมื่อพิจารณาให้วัตถุเป็นของแข็งยืดหยุ่นสามารถหาความเครียดที่เกิดขึ้นภายในได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเขียนได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon - \varepsilon_0\}$$

โดย $\{\sigma\}$ = เวกเตอร์ความเค้น

$[C]$ = เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดหรือเมทริกซ์สติเฟเนส

$\{\varepsilon\}$ = เวกเตอร์ความเครียด

$\{\varepsilon_0\}$ = เวกเตอร์ความเครียดเริ่มต้น

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเสียรูปได้ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนรูบน้อยมาก เป็น

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix}$$

แต่ถ้าต้องการพิจารณาปัญหาที่มีการเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ (large deformation) ต้องมีการพิจารณาพจน์ที่เพิ่มเข้ามาตามสมการ

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2$$

แบบจำลองที่สนใจในโครงงานนี้มีส่วนประกอบหลายส่วน เช่น เคลือบฟัน เนื้อฟัน ฯลฯ ทำให้ต้องมีการกำหนดผิวสัมผัสระหว่างส่วนประกอบเช่น เคลือบฟันกับเนื้อฟัน เพื่อกำหนดขอบเขตของปัญหาได้ โดยลักษณะผิวสัมผัสสามารถแบ่งได้ดังนี้

3.3.1 สัมผัสในแบบจำลองของแข็ง [5]

การเลือกผิวสัมผัสมีความสำคัญมากต่อการสร้างแบบจำลองของแข็ง โดยรูปแบบของผิวสัมผัสส่งผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่ได้ เนื่องจากลักษณะการสัมผัสที่ต่างกันส่งผลต่อแรงที่เกิดขึ้น เช่น แรงเสียดทาน เป็นต้น โดยผิวสัมผัสในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1. แบบยึดติด (Bond) เป็นผิวสัมผัสแบบยึดติด เงื่อนไขคือไม่อนุญาตให้เกิดการไถลหรือการแยกตัวของจุดที่สัมผัสกัน สำหรับผิวสัมผัสแบบนี้ จุดเดียวกันบนวัตถุแต่ละส่วนต้องเคลื่อนที่ไปด้วยกัน และเกิดแรงตั้งฉากและแรงเฉือนบนผิวสัมผัส
2. แบบไม่เกิดการแยก (No separation) เป็นผิวสัมผัสที่เกิดการไถลได้โดยสัมผัสประสิทธิผลแรงเสียดทานเท่ากับศูนย์ แต่ไม่เกิดการแยกตัว นั่นคือเกิดแรงตั้งฉากระหว่างพื้นผิวทั้งสองเท่านั้น

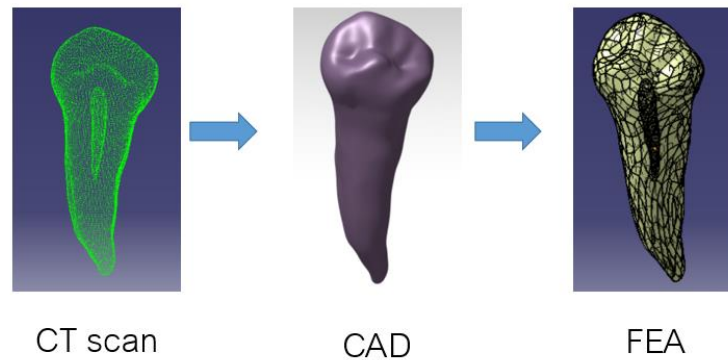
3. แบบไร้แรงเสียดทาน (Frictionless) เป็นผิวสัมผัสแบบไม่มีแรงเสียดทานโดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับศูนย์ และสามารถเกิดการแยกตัวได้ ความหมายทางกายภาพคือเกิดแรงตั้งฉากและเมื่อวัตถุทั้งสองไม่มีการสัมผัสกันจะไม่มีแรงกระทำต่อกันที่จุดนั้น
4. แบบมีแรงเสียดทาน (Fictional) เป็นผิวสัมผัสแบบมีแรงเสียดทานโดยต้องกำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสามารถเกิดการแยกตัวได้ ความหมายทางกายภาพคือเกิดแรงตั้งฉากและแรงเสียดทานได้ แต่เมื่อวัตถุทั้งสองไม่มีการสัมผัสกันจะไม่มีแรงกระทำต่อกันที่จุดนั้น
5. แบบผิวขรุขระ (Roughness) เป็นผิวสัมผัสแบบมีแรงเสียดทานโดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเข้าใกล้อนันต์ และสามารถเกิดการแยกตัวได้ ความหมายทางกายภาพคือเกิดแรงตั้งฉากและแรงเสียดทานด้านจนไม่เกิดการเลื่อนและเมื่อวัตถุทั้งสองไม่มีการสัมผัสกันจะไม่มีแรงกระทำต่อกันที่จุดนั้น



บทที่ 4 การสร้างแบบจำลอง

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาฟันกรามน้อยส่วนล่างที่ผ่านการครอบฟันที่ทำจากวัสดุเซรามิก ดังนั้นจึงมีการสร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบ อย่างไรก็ตามฟันที่ผ่านการครอบมีรูปทรงพื้นฐานมาจากฟันกรามน้อยที่มีสภาพสมบูรณ์ นั่นคือ ครอบฟันที่ทำขึ้นต้องมีพื้นผิวสัมผัสเหมือนฟันเดิม ส่วนเนื้อฟันที่ถูกครอบต้องขึ้นกับลักษณะรูปร่างเดิมของฟันนั้น ดังนั้นก่อนที่จะสร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบต้องมีการสร้างแบบจำลองฟันกรามน้อยเสียก่อน เนื้อหาส่วนนี้จึงขออธิบายพอสังเขปเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองฟันกรามน้อยส่วนล่าง วิธีดังกล่าวอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของนางสาวกัญยวันต์ [5] ซึ่งวิธีการนี้ใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายในการสร้างแบบจำลอง [31] โดยวิธีการนี้ถูกใช้ในงานวิศวกรรมประเภทอื่นอีกด้วย [32]

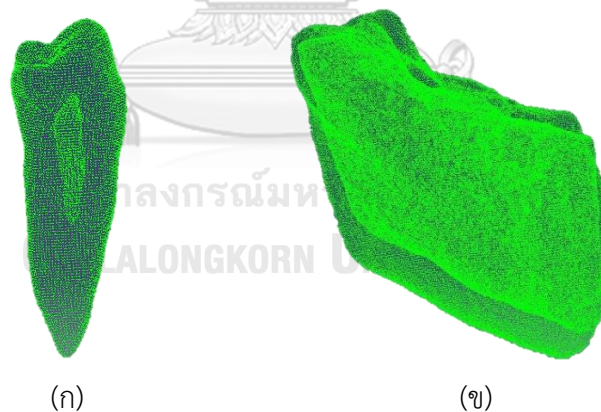
แบบจำลองฟันกรามส่วนล่างในวิทยานิพนธ์นี้ มีองค์ประกอบคือเคลือบฟัน เนื้อฟัน เนื้อเยื่อโพรงประสาท ชั้นเอ็นยึดปริทันต์และกระดูกกรามที่เป็นที่ยึดของฟัน โดยกระดูกกรามประกอบด้วยกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกฟองน้ำ ฟันเป็นอวัยวะที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ฟันซี่เดียวกันของแต่ละคนก็มีความแตกต่างกันทำให้การสร้างแบบจำลองเสมือนจริงโดยการวาดโดยเทคนิคพื้นฐานทำได้ยาก ดังนั้นการสร้างแบบจำลองฟันจึงใช้เทคนิคที่เรียกว่าการย้อนกลับทางวิศวกรรม คือการนำฟันจริงที่ทางทันตแพทย์เห็นว่าเป็นฟันที่มีสุขภาพแข็งแรงมาสแกนเพื่อนำมาขึ้นแบบ 3 มิติ การสร้างแบบจำลองฟันทำได้ตามขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการทำ CT scan ฟันจริงของมนุษย์ที่มีส่วนประกอบคือเคลือบฟัน เนื้อฟันและเนื้อเยื่อโพรงประสาท ข้อมูลรูปร่างของฟันมนุษย์ที่ได้ยังไม่สามารถใช้ได้โดยตรง เนื่องจากข้อมูลที่ได้ยังคงเป็นข้อมูลจุดเมฆ (cloud point data) หรือเป็นจุดข้อมูลหลาย ๆ จุดบนแกนสามมิติที่สามารถมองเป็นรูปทรงของฟันได้ การสร้างแบบ 3 มิติในลักษณะนี้ได้เพียงความละเอียดของผิวฟันด้านนอกกับเนื้อเยื่อโพรงประสาทภายในเท่านั้น จึงต้องมีการปรับปรุงข้อมูลที่นำมาสร้างฟันในรูปแบบ 3 มิติโดยผ่านโปรแกรมช่วยในการออกแบบ (computer aided design, CAD) เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรม (computer aided engineer, CAE) เช่น โปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วจึงสร้างชั้นฟันแต่ละชั้นให้สมจริงตามหลักกายภาพต่อไป รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้วิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.1 แผนภาพการแปลงข้อมูลเพื่อให้ได้แบบจำลองฟัน

4.1 การสร้างแบบจำลองฟัน

การวิเคราะห์ความเค้นในของแข็งโดยใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองก่อน แบบจำลองที่ใช้ต้องมีลักษณะเป็นของแข็ง (solid) อย่างที่กล่าวในข้างต้นว่า วิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจฟันกรามน้อยล่างของมนุษย์ ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองเริ่มจากการสแกน (scan) ฟัน และกระดูกกรามจริงของมนุษย์ เพื่อให้ได้ลักษณะรูปร่างของฟันและกระดูกขากรรไกรที่แท้จริง โดยผลการสแกนแสดงในรูปที่ 4.2



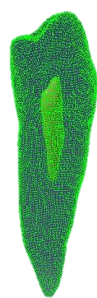
รูปที่ 4.2 ไฟล์สแกน (CT scan) ฟันกรามน้อยส่วนล่างและชั้นกระดูก

ผล

จากการสแกนออกมาในรูปแบบของจุดในระบบตำแหน่ง 3 มิติหรือเรียกว่าข้อมูลจุดเมฆ (cloud point data) ซึ่งมาจากพื้นผิวของฟันและกระดูกที่ถูกสแกน จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวภายนอกโดยรวมและพื้นผิวภายในบางส่วน เกิดจากการสแกนที่ไม่สมบูรณ์หรือมีองค์ประกอบภายในขัดขวางกระบวนการ ทำให้การนำข้อมูลจุดเมฆมาสร้างแบบจำลองโดยตรง จะได้แบบจำลองที่ไม่มืองค์ประกอบที่ถูกต้องครบถ้วน อย่างไรก็ตามฟันกรามน้อยล่างมีองค์ประกอบที่เหมือนกันกับฟันชนิดอื่น คือ ชั้นเคลือบฟัน

ชั้นเนื้อฟัน เนื้อเยื่อโพรงประสาท ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ รวมถึงกระดูกกรามที่มีชั้นกระดูก 2 ชั้น คือ กระดูกหนาแน่นและกระดูกฟองน้ำ ในขณะที่ข้อมูลจุดเมฆที่ได้แสดงพื้นผิวนอกบริเวณเนื้อฟันและเคลือบฟันรวมกัน และแสดงเนื้อเยื่อโพรงประสาทภายในบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นต้องมีการใช้โปรแกรม CAD เพื่อสร้างรูปร่างและองค์ประกอบที่ถูกต้อง

เริ่มจากการนำพื้นผิวนำเนื้อเยื่อโพรงประสาท มาสร้างแบบจำลองเนื้อเยื่อโพรงประสาท เนื่องจากเนื้อเยื่อโพรงประสาทมีเส้นประสาทและเส้นเลือด ทำให้ชั้นนี้มีลักษณะที่ต่างจากชั้นอื่น ส่วนเนื้อเยื่อโพรงประสาทของมนุษย์มีลักษณะยาวทะลุไปยังรากฟัน โดยพื้นที่หน้าตัดตามเนื้อเยื่อโพรงประสาทมีขนาดเล็กลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลสแกน ให้ลักษณะเนื้อเยื่อโพรงประสาทที่ไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการดังกล่าวรวมกับการใช้โปรแกรม CAD เพื่อสร้างแบบจำลอง แสดงในรูปที่ 4.3



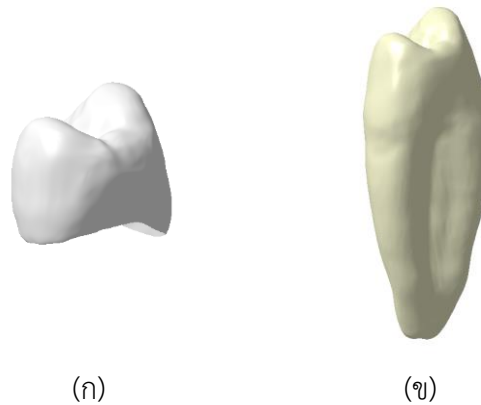
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 การสร้างเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน, (ก) การแยกเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันออกจากตัวฟัน, (ข) เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันที่มีความยาวจนถึงรากฟัน

ต่อมาเป็นชั้นเคลือบฟันและเนื้อฟัน โดยสร้างมาจากผลการสแกนจากพื้นผิวนอกของฟัน ซึ่งเป็นส่วนที่ยื่นจากเหงือกของเคลือบฟันและส่วนรากของเนื้อฟันรวมกัน ส่วนที่ยื่นจากเหงือกมีเนื้อฟันที่ถูกห่อหุ้มด้วยเคลือบฟัน ที่มีคุณสมบัติต่างกัน ดังนั้นเพื่อการสร้างแบบจำลองที่เหมือนจริงที่สุดจึงต้องมีการแบ่งเคลือบฟันและเนื้อฟัน โดยใช้ CEJ ที่เป็นส่วนโค้งเว้าซึ่งเป็นรอยต่อเคลือบฟันและเนื้อฟันส่วนราก ดังแสดงในรูปที่ 4.4



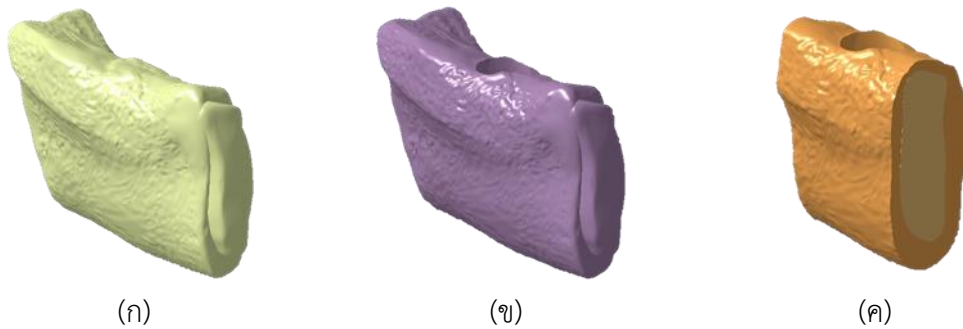
รูปที่ 4.4 แบบจำลอง (ก) ชั้นเคลือบฟัน (ข) เนื้อฟัน

ส่วนต่อมาคือชั้นเอ็นอีตปริทันต์มีลักษณะเป็นเส้นเอ็นขนาดเล็กกระจายตามส่วนราก เพื่อยึดเนื้อฟันให้ติดกับกระดูกขากรรไกร ในวิทยานิพนธ์นี้ลักษณะของชั้นเอ็นอีตปริทันต์มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่หุ้มส่วนรากของเนื้อฟัน ชั้นเอ็นอีตปริทันต์สร้างมาจากพื้นผิวส่วนรากของเนื้อฟัน เมื่อได้พื้นผิวแล้วให้ทำการเพิ่มความหนาจากพื้นผิวของเนื้อฟัน 2 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.5



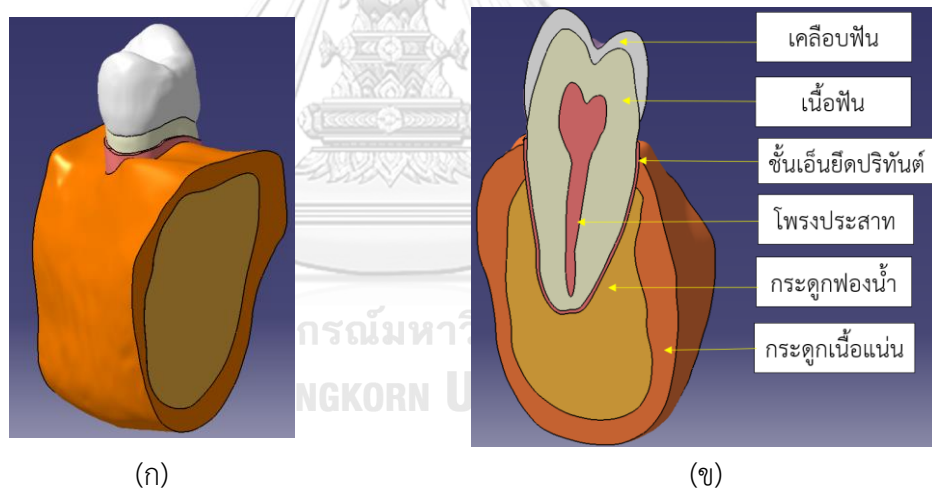
รูปที่ 4.5 แบบจำลองเอ็นอีตปริทันต์, (ก) ลักษณะการตัด, (ข) เอ็นอีตปริทันต์ที่มีความหนา

ส่วนสุดท้ายคือการสร้างกระดูกขากรรไกร โดยทั่วไปกระดูกมนุษย์ประกอบด้วยกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกฟองน้ำ จากผลการสแกน พบลักษณะของกระดูกทั้ง 2 ชนิดต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อทำการแบ่งชั้นของกระดูกแล้ว อย่างไรก็ตามด้วยขนาดที่ใหญ่เมื่อเทียบกับฟัน เมื่อใช้แบบจำลองในการคำนวณและบริเวณที่ห่างออกไปจากตัวส่วนที่ความเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่น้อยจากการวิเคราะห์ของกันยวันต์ จึงทำการตัดออกให้มีขนาดเล็กลง สุดท้ายทำให้เกิดช่องว่างให้สามารถนำแบบจำลองชั้นเอ็นอีตปริทันต์และตัวฟันใส่ในแบบจำลองได้แนบชิดกัน แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองกระดุก, (ก) การสร้างผิวกระดุก, (ข) แบบจำลองกระดุกที่มีลักษณะเป็นของแข็ง, (ค) แบบจำลองกระดุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

เมื่อได้แบบจำลองโครงสร้างของฟันครบตามต้องการ และนำแบบจำลองมาประกอบกันดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยเรียงลำดับตามชั้นบนสุดเป็นชั้นเคลือบฟัน ถัดมาคือชั้นเนื้อฟัน เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ กระดุกฟองน้ำและกระดุกเนื้อแน่นตามลำดับ แบบจำลองดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานของการสร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบต่อไป



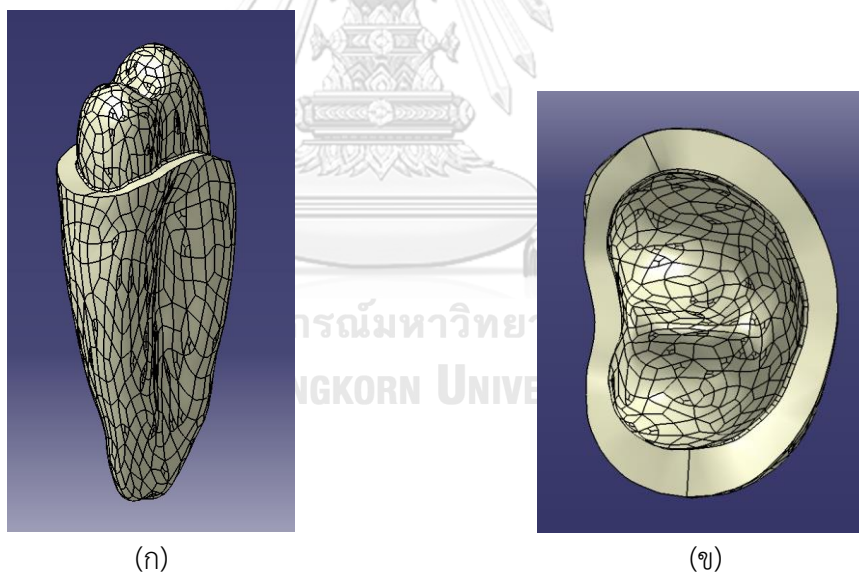
รูปที่ 4.7 แบบจำลองฟันที่มีโครงสร้างเหมือนฟันมนุษย์, (ก) แบบจำลองโครงสร้างของฟันกรามน้อยส่วนล่างที่เป็นฟันแท้, (ข) การเรียงตัวของแบบจำลอง

4.2 การสร้างแบบจำลองครอบฟันเซรามิก

หลังจากสร้างแบบจำลองฟันกรามน้อยดังที่กล่าวในข้างต้นแล้ว แบบจำลองดังกล่าวถูกใช้เป็นพื้นฐานมาสร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบต่อไป เนื้อหาในส่วนนี้จึงอธิบายวิธีการและหลักการสร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบฟันด้วยเซรามิก

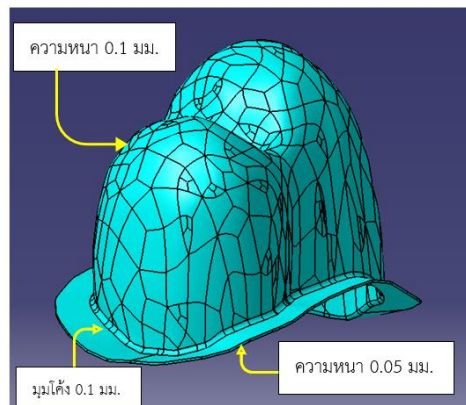
ครอบฟันสามารถสร้างได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น โลหะ เซรามิก หรือเรซิน ทั้งนี้เมื่อวัสดุเปลี่ยนไปลักษณะของครอบจะต้องมีลักษณะที่ต่างกัน เพื่อให้ครอบฟันสามารถรับภาระชนิดต่างได้ ครอบฟันที่สนใจในวิทยานิพนธ์นี้คือครอบฟันที่ทำจากเซรามิก เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความเปราะ ดังนั้นลักษณะของครอบฟันเซรามิกจะมีความหนาในระดับหนึ่งโดยมีความหนาประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร เพื่อให้ครอบฟันทนทานต่อการรับภาระในชีวิตประจำวัน

จากข้อจำกัดที่กล่าวมาทำให้ฟันที่ถูกกรอต้องรับกับครอบฟันที่สร้างขึ้น การสร้างแบบจำลองฟันที่ผ่านการกรอนั้นเริ่มจากการนำแบบจำลองฟันขึ้นเนื้อฟันมาตัด โดยใช้ CEJ รอบนอกสร้างพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแนวฟัน โดยแบ่งเป็นส่วนล่างและส่วนบน ส่วนล่างคือเนื้อฟันที่ไม่ต้องผ่านการกรอฟัน แต่ส่วนบนต้องมีการกรอฟันให้มีขนาดเล็กลง นำส่วนที่ตัดแบ่งมาลดขนาดให้มีระยะห่างจากครอบ CEJ ของส่วนรากประมาณ 1 มิลลิเมตร และมีระยะห่างจากระยะเคลือบผิวเดิมบริเวณผิวด้านบดเคี้ยวของฟัน ประมาณ 1.5 มิลลิเมตร และเมื่อรวมส่วนบนที่ผ่านการลดขนาดและส่วนล่างมาจะเป็นชิ้นเนื้อฟันที่ผ่านการกรอ สุดท้ายทำมุมโค้ง (fillet) บริเวณจุดต่อบริเวณมุมที่เกิดจากการกรอ โดยให้มีรัศมีเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8



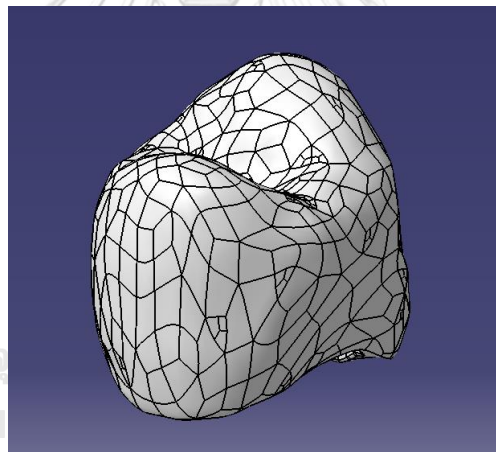
รูปที่ 4.8 แบบจำลองเนื้อฟันที่ผ่านการกรอ (ก) ภาพมุมกว้าง (ข) มุมมองจากยอดฟัน

ส่วนต่อมาคือการสร้างชั้นซีเมนต์ (cement) ซึ่งเป็นชั้นที่ยึดระหว่างครอบฟันและเนื้อฟันที่ผ่านการกรอ เริ่มจากนำพื้นผิวบริเวณเนื้อฟันที่ถูกกรอ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 มาสร้างความหนา โดยบริเวณเนื้อฟันที่ถูกกรอซีเมนต์จะมีความหนา 0.1 มิลลิเมตร และ 0.05 มิลลิเมตรบริเวณบ่าที่ถูกกรอ สุดท้ายคือการทำ fillet บริเวณมุมระหว่างฟันที่ถูกกรอและบ่า ดังแสดงในรูปที่ 4.9



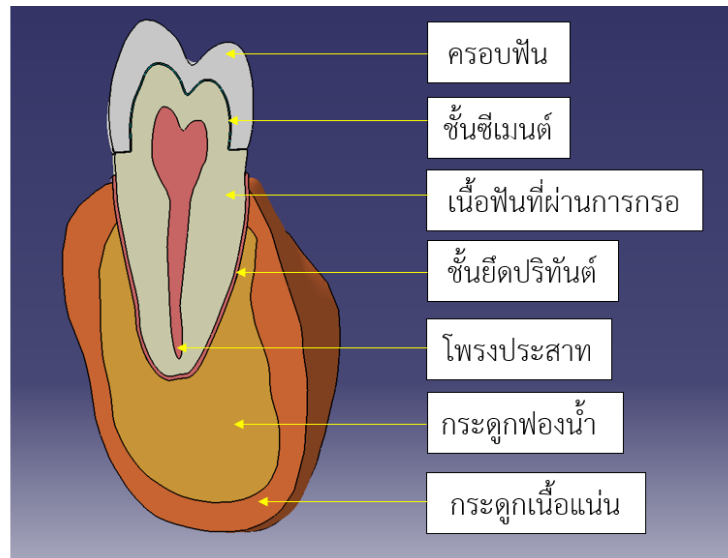
รูปที่ 4.9 แบบจำลองซีเมนต์

ส่วนสุดท้ายคือการการสร้างกรอบพื้น นำพื้นผิวของซีเมนต์ ด้านนอกมารวมกับเคลือบพื้นของพื้นเดิมทำให้ได้รูปทรงของกรอบพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แบบจำลองกรอบพื้น

หลังจากสร้างแบบจำลองส่วนต่าง ๆ มาแล้ว นำแบบจำลองทั้งหมดมาประกอบกันเพื่อให้ได้แบบจำลองโครงสร้างของพื้นครบตามต้องการ และนำแบบจำลองมาประกอบกันดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยเรียงลำดับตาม ชั้นบนสุดเป็นชั้นกรอบพื้น ถัดมาคือชั้นซีเมนต์ ชั้นเนื้อพื้นที่ผ่านการกรอเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน ชั้นเอ็นปริทันต์ กระจกฟองน้ำและกระจกเนื้อแน่นตามลำดับ แบบจำลองดังกล่าวจะเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป



รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางของแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบเซรามิก



บทที่ 5 พารามิเตอร์ฟินเลย์ (Findley's parameter)

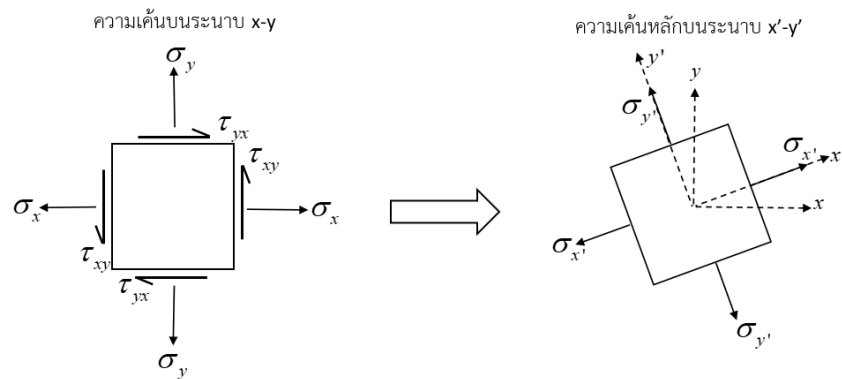
การศึกษาความล้าในวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจกับพารามิเตอร์ฟินเลย์ ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวเกิดขึ้นบนระนาบที่มีความเค้นที่ทำให้ตัวแปรความเสียหายมีค่าสูงสุดของเวลาที่เปลี่ยนไป ดังนั้นด้วยตัวแปรที่หลากหลายและแนวทางในการหาตัวแปรดังกล่าวสามารถคำนวณได้หลากหลายวิธี เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม COMSOL ในการคำนวณหาตัวแปรดังกล่าว เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงหลักการในการคำนวณหาพารามิเตอร์ฟินเลย์ทั้งในรูป 2 มิติ และ 3 มิติในการวิเคราะห์ปัญหา และการหาพารามิเตอร์สำหรับแนวคิดของฟินเลย์

5.1 หลักการคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์

ความล้าพิจารณาจากความเค้นที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เปลี่ยนไป ณ จุดที่สนใจ เพื่อพิจารณาว่าจุดดังกล่าวมีโอกาสแตกหักและจะมีอายุการใช้งานมากน้อยเพียงใด

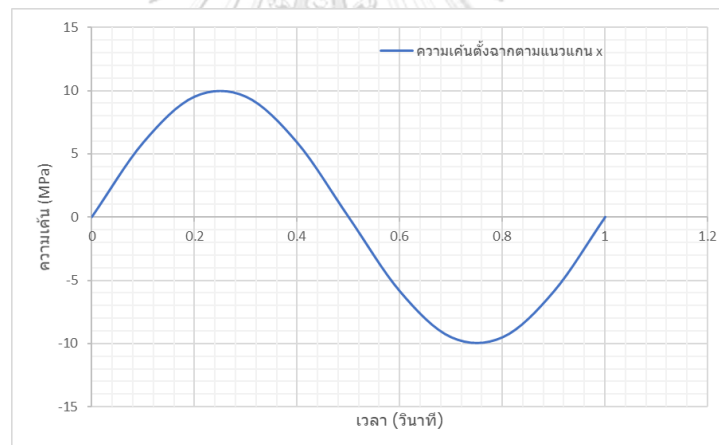
จากสมการ f เกิดจากช่วงความเค้นเฉือนที่เปลี่ยนไปใน 1 รอบภาระและความเค้นสูงสุด ซึ่งทำให้ $\frac{\Delta T}{2} + k\sigma$ มีค่าสูงสุด ณ จุดที่สนใจ โดยความเค้นที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามระนาบและเวลาที่เปลี่ยนไป การคำนวณหาค่า f ของระนาบที่มีความเค้นที่ทำให้ f มีค่าสูงสุดนั้นมีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อคำนวณในรูปแบบสมการ เนื่องจากเมื่อพิจารณาความเค้นที่ ณ จุดหนึ่งในรูปเอลิเมนต์ความเค้นที่ใช้ในการแปลงต้องมีหลายองค์ประกอบ เช่น ความเค้นใน 2 มิติจำเป็นต้องรู้ 3 องค์ประกอบ และยังซับซ้อนเมื่อพิจารณาความเค้นใน 3 มิติ นั่นคือต้องรู้ความเค้น 6 องค์ประกอบ ดังนั้นการคำนวณค่า f ที่เกิดจากความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ณ ระนาบที่เปลี่ยนไป นิยมคำนวณในรูปแบบต่อเนื่องโดยการหาค่า f ที่ระนาบที่ทำมุมค่าต่าง ๆ เนื่องจากสามารถใช้โปรแกรมอย่างง่าย เช่น Excel MATLAB เพื่อลดขั้นตอนการคำนวณ [33]

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในหลักการมากขึ้น ขอยกตัวอย่างการคำนวณปัญหาในระนาบ 2 มิติ ในระบบพิกัด $x-y$ เพื่อเทียบผลการคำนวณจากหลักการดังกล่าวกับโปรแกรม เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นในรูป 2 มิติ ประกอบไปด้วย ความเค้นตั้งฉากตามแกน x และ y และความเค้นเฉือนในระนาบ $x-y$ ความเค้นดังกล่าวเปลี่ยนไปตามระนาบที่สนใจ เอลิเมนต์ความเค้นแสดงได้ดังในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การแปลงความเค้นในระนาบ 2 มิติ

เมื่อสนใจความเค้นที่จุด ๆ หนึ่ง ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยข้อมูลดังกล่าวจะใช้เพื่อพิจารณาหาค่า f อย่างไรก็ตามข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงระนาบพิกัดเดียว ดังนั้นต้องหาความเค้นในระนาบที่ทำให้ f มีค่าสูงสุด ดังนั้นเมื่อหาความเค้นในระนาบต่าง ๆ ผ่านสมการการแปลงความเค้น



รูปที่ 5.2 กราฟความเค้นตั้งฉากที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาใน 1 รอบการะ

เมื่อพิจารณาสมการ $f = \left(\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma \right)_{\max}$ ในพจน์ความเค้นตั้งฉากต้องเป็นความเค้นตั้งฉากสูงสุดในแต่ละระนาบของหนึ่งรอบการะ เพื่อนำไปใช้คำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์ต่อไป ขั้นแรกของการคำนวณคือการหาความเค้นตั้งฉากที่ระนาบหนึ่งของแต่ละเวลาผ่านการแปลงความเค้น โดยจะทำการหาที่ระนาบทั้งหมดทุกระนาบ 0-180 องศา ทุก ๆ 9 องศา ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นตึงฉากสูงสุดที่ระนาบต่าง ๆ

มุมของ ระนาบ (องศา)	ความเค้นตึง ฉากที่เวลา 0 วินาที (MPa)	ความเค้นตึง ฉากที่เวลา 0.25 วินาที (MPa)	ความเค้นตึง ฉากที่เวลา 0.5 วินาที (MPa)	ความเค้นตึง ฉากที่เวลา 0.75 วินาที (MPa)	ความเค้นตึง ฉากสูงสุดของ ระนาบ (MPa)
0	0	10.00	0	-10.00	10.00
9	0	9.76	0	-9.76	9.76
18	0	9.05	0	-9.05	9.05
27	0	7.94	0	-7.94	7.94
36	0	6.55	0	-6.55	6.55
37	0	6.38	0	-6.38	6.38
38	0	6.21	0	-6.21	6.21
39	0	6.04	0	-6.04	6.04
40	0	5.87	0	-5.87	5.87
41	0	5.70	0	-5.70	5.70
90	0	0.00	0	0.00	0.00
99	0	0.24	0	-0.24	0.24
108	0	0.95	0	-0.95	0.95
117	0	2.06	0	-2.06	2.06
126	0	3.45	0	-3.45	3.45
135	0	5.00	0	-5.00	5.00
144	0	6.55	0	-6.55	6.55
153	0	7.94	0	-7.94	7.94
162	0	9.05	0	-9.05	9.05
171	0	9.76	0	-9.76	9.76

ในพจน์เป็นความเค้นเฉือนของสมการพารามิเตอร์พินเลย์ต้องเป็นช่วงของความเค้นเฉือนของแต่ละระนาบของหนึ่งรอบภาระ ดังนั้นเป็นการหาช่วงของความเค้นเฉือนที่แต่ละระนาบในหนึ่งรอบภาระ โดยเริ่มจากการหาความเค้นเฉือนที่ระนาบ 0-180 องศา ทุก ๆ มุม 9 องศา ของแต่ละเวลาเพื่อหาช่วงของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น ณ ระนาบนั้น แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการคำนวณหาช่วงของความเค้นเฉือนที่ระนาบต่าง ๆ

มุมของระนาบ (องศา)	ความเค้นเฉือนที่ เวลา 0 วินาที (MPa)	ความเค้นเฉือนที่ เวลา 0.25 วินาที (MPa)	ความเค้นเฉือน ที่เวลา 0.5 วินาที (MPa)	ความเค้นเฉือนที่ เวลา 0.75 วินาที (MPa)	ช่วงของ ความเค้น เฉือน (MPa)
0	0	0.00	0	0.00	0.00
9	0	-1.55	0	1.55	3.09
18	0	-2.94	0	2.94	5.88
27	0	-4.05	0	4.05	8.09
36	0	-4.76	0	4.76	9.51
37	0	-4.81	0	4.81	9.61
38	0	-4.85	0	4.85	9.70
39	0	-4.89	0	4.89	9.78
40	0	-4.92	0	4.92	9.85
41	0	-4.95	0	4.95	9.90
90	0	0.00	0	0.00	0.00
99	0	1.55	0	-1.55	3.09
108	0	2.94	0	-2.94	5.88
117	0	4.05	0	-4.05	8.09
126	0	4.76	0	-4.76	9.51
135	0	5.00	0	-5.00	10.00
144	0	4.76	0	-4.76	9.51
153	0	4.05	0	-4.05	8.09
162	0	2.94	0	-2.94	5.88
171	0	1.55	0	-1.55	3.09

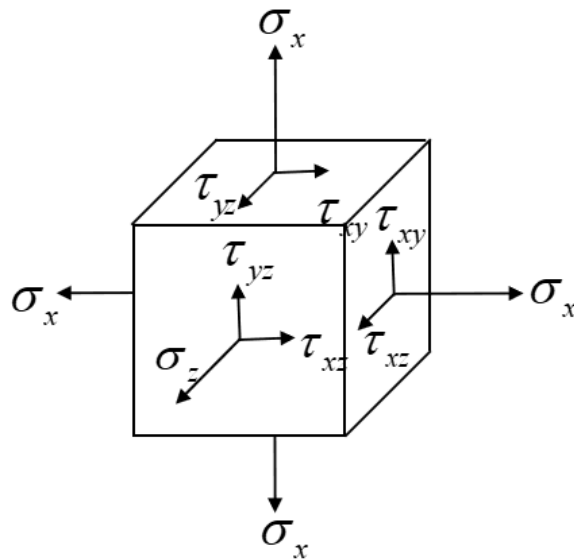
สุดท้ายคือการคำนวณ f ของแต่ละระนาบที่เกิดขึ้นจากความเค้นตั้งฉากสูงสุดและช่วงของความเค้นเฉือน โดยค่า f ที่จุดนั้นคือค่า f ที่มากที่สุด ณ ระนาบหนึ่ง หมายความว่า เป็นระนาบที่เป็นระนาบวิกฤต ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างการคำนวณหา $\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$ ที่ระนาบต่าง ๆ

มุมของระนาบ (องศา)	$\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$ (MPa)	มุมของระนาบ (องศา)	$\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$ (MPa)
0	2.000	90	0.000
9	3.496	99	1.594
18	4.748	108	3.130
27	5.633	117	4.457
36	6.064	126	5.446
37	6.082	135	6.000
38	6.093	144	6.064
39	6.099	153	5.633
40	6.098	162	4.748
41	6.091	171	3.496

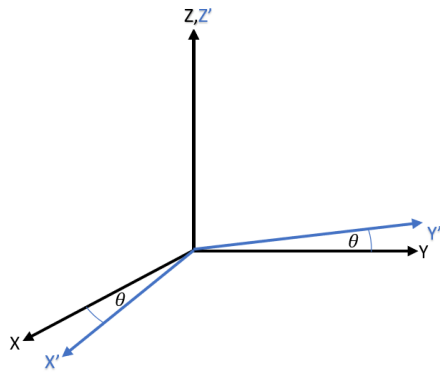
ผลที่ได้คือระนาบทำมุม 39 องศาเกินแกน x เป็นระนาบวิกฤต ซึ่งเป็นระนาบที่มีโอกาสเกิดเป็นรอยแตกต่อไปได้ เมื่อเทียบมุมดังกล่าวกับทฤษฎีที่ทำการคำนวณในบทความรู้พื้นฐาน พบว่ามุมที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกัน

สำหรับการคำนวณบนระบบพิกัด 3 มิติ มีความซับซ้อนมากกว่า 2 มิติ เนื่องจากความเค้นในระบบ 3 มิติจำเป็นต้องรู้ความเค้น 6 องค์ประกอบ คือความเค้นตั้งฉากตามแนวแกน x, y และ z และความเค้นเฉือนของ 3 ระนาบ ทำให้เกิดหาแปลงความเค้นมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น หลักการการแปลงความเค้นให้ครบทุกระนาบที่เป็นไปได้มีหลายวิธี โดยความเค้นใน 3 มิติในรูปเอลิเมนต์ความเค้นแสดงในรูปที่ 5.3 ระนาบความเค้นที่เปลี่ยนไปได้นั้นหาได้จากการหมุนเอลิเมนต์ในทุก ๆ ทิศทาง สำหรับการเปลี่ยนความเค้นให้ครบทั้งระบบใน 3 มิติสามารถทำได้โดยการแปลงความเค้นตามแนวพิกัด [34, 35] วิธีการหาแนวระนาบที่ใช้หาแนวระนาบวิกฤตนั้นมีหลายวิธี อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการแปลงความเค้นตามแกนพิกัด 2 ครั้ง เพื่อให้เป็นลำดับขั้นตอนในการหามุมในระนาบพิกัด 3 มิติโดยใช้โปรแกรมอย่างง่าย เช่น โปรแกรม Excel, MATLAB

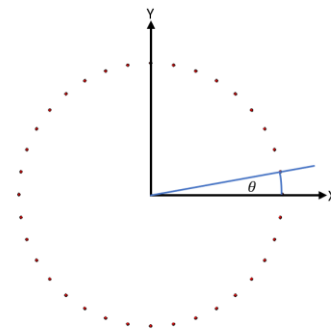


รูปที่ 5.3 ความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติ

วิธีการหาขนาดวิกฤตมีวิธีการดังนี้ โดยเริ่มจากการแปลงความเค้นตามระนาบที่หมุนรอบแกน z จะทำให้ได้ความเค้นในระนาบ $x'-y'-z'$ ต่อมาเป็นการหมุนระนาบรอบแกน y' จะได้ความเค้นในระบบพิกัด $x''-y''-z''$ ด้วยการหมุนด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้เราสามารถหาความเค้นในระนาบ 3 มิติที่มุมต่าง ๆ ได้ โดยทำการหา f ที่ทุก ๆ มุม 9 องศาที่หมุนรอบแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ก) ด้วยการแบ่งที่ละมุมทำให้ระนาบที่หมุนรอบแกน y ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ข) ต่อมาการหมุนระบบพิกัดในระนาบ y' แสดงในรูปที่ 5.5 (ก) ซึ่งเมื่อทำการหมุนแกน y' ที่ทุก ๆ มุม ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ข) จะทำให้ได้จุดทั้งหมดที่ทำการหาเป็นการประมาณที่ทุกมุมของระนาบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยรูปที่ 5.7 แสดงถึงแกน x'' ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับระบบพิกัด $x-y-z$ ความเค้นที่ใช้ที่ทำการคำนวณค่า f คือความเค้นบนระนาบที่มีแกน x'' เป็นเวกเตอร์ตั้งฉากของระนาบ คือความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน 2 ค่า การคำนวณหาความเค้นตั้งฉากสูงสุดยังคงเป็นแบบเดิมในการคำนวณ 2 มิติ แต่การหาช่วงของความเค้นเฉือนคือเกิดจากขนาดของความเค้นเฉือนที่รวมกันแบบเวกเตอร์

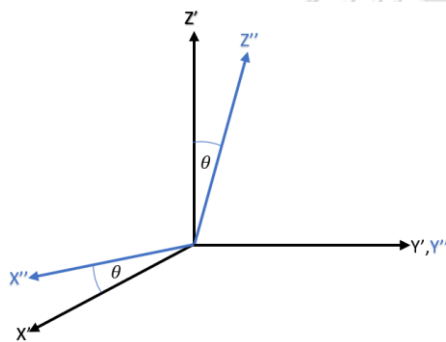


(ก)

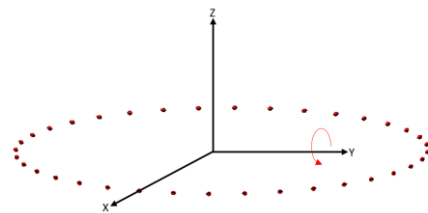


(ข)

รูปที่ 5.4 (ก) การหมุนแกนพิกัดตามแกน z (ข) จุดที่แสดงการเปลี่ยนของแกนพิกัดที่หมุนตามแกน

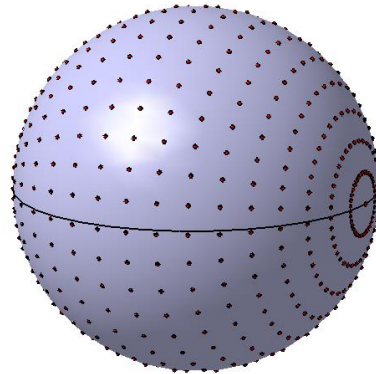


(ก)

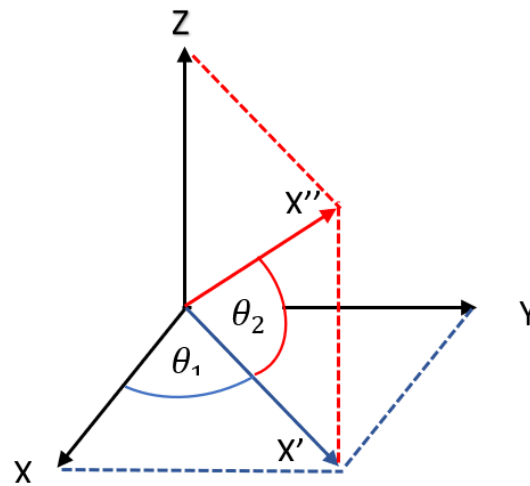


(ข)

รูปที่ 5.5 (ก) การหมุนแกนพิกัดตามแกน y' (ข) จุดที่แสดงการเปลี่ยนของแกนพิกัดที่หมุนตามแกน y



รูปที่ 5.6 จุดทั้งหมดที่ทำการหาจะเป็นการประมาณที่ทุกมุมของระนาบ 3 มิติ



รูปที่ 5.7 การแปลงระบบแกนพิกัด x'' เมื่อเทียบกับระบบพิกัด x - y - z

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม COMSOL ในการคำนวณหาความเค้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม COMSOL จะใช้ความเค้นที่ได้จากการคำนวณมาหาพารามิเตอร์ฟินเลย์ที่จุดต่าง ๆ บนแบบจำลอง อย่างไรก็ตามโปรแกรม COMSOL ให้ค่าพารามิเตอร์ฟินเลย์เพียงอย่างเดียวและไม่รายงานมุมของระนาบวิกฤต ดังนั้นจึงต้องนำค่าความเค้นที่ได้จากโปรแกรม COMSOL มาคำนวณหามุมของระนาบวิกฤตโดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยคำนวณ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ฟินเลย์และระนาบวิกฤตของจุดหนึ่งที่น่าสนใจ

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สอบหวนการคำนวณพารามิเตอร์ของฟินเลย์ แสดงในภาคผนวก ข. โดยโปรแกรมจะทำการหาระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้น โดยจุดที่พิจารณาคือจุดที่มีพารามิเตอร์ฟินเลย์สูงสุดของบริเวณที่มีการกระจายของความเค้น

หลักการคือโปรแกรมทำการแปลงความเค้นโดยหมุนตามแกน z 1 ครั้ง ต่อมาหมุนตามแกน y' เมื่อเปลี่ยนค่ามุมที่หมุนตามแกน z และ y' จาก 0 ถึง 180 องศา ทีละ 1 องศาจะทำให้ความเค้นในระนาบที่มีเวกเตอร์ตั้งฉากคือ x'' ในทุกระนาบที่เป็นไปได้ โดยการแปลงความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติใช้การแปลงในรูปเมทริกซ์ดังที่แสดงในหัวข้อ “การแปลงความเค้นในระบบพิกัด 3 มิติ” โดยเมทริกซ์เปลี่ยนพิกัดที่หมุนตามแกน z คือ

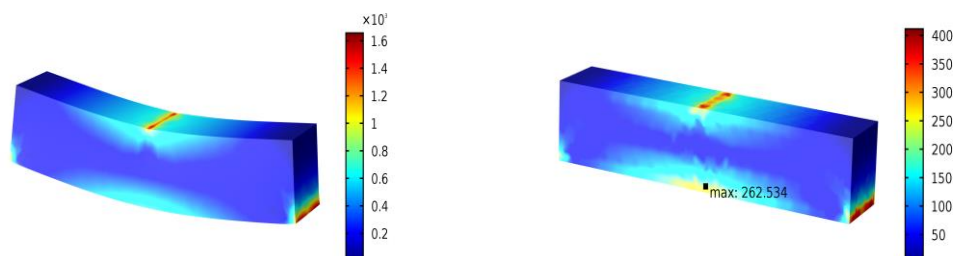
$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และเมทริกซ์เปลี่ยนพิกัดที่หมุนตามแกน y' คือ

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) \end{bmatrix}$$

การสอบทานการคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์

การสอบทานการคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์ระหว่างโปรแกรม COMSOL และ MATLAB โดยกรณีที่สอบทานกรณีของของคานโดยมีขนาดความกว้าง 1 เมตร ความยาว 5 เมตร ความสูง 1 เมตร ที่ถูกยึดด้วย simple support ที่ปลายทั้งสองข้าง แรงถูกแรงกระทำที่กึ่งกลางของคาน เป็นขนาด 100 นิวตัน โดยคุณสมบัติของวัสดุคือค่ามอดูลัส 200 GPa อัตราส่วนปัวซอง 0.30 และความหนาแน่น 7,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเมื่อคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเค้น von Mises และพารามิเตอร์ฟินเลย์ที่มาจากการคำนวณของโปรแกรม COMSOL แสดงในรูปที่ 5.8



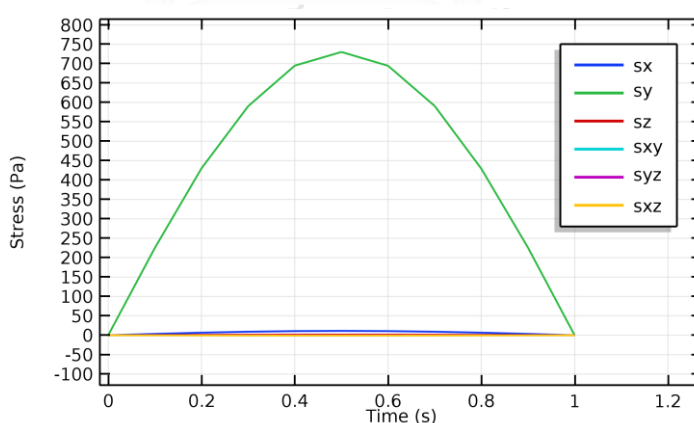
รูปที่ 5.8 ผลการคำนวณโดยโปรแกรม COMSOL (ก) ความเค้น von Mises

(ข) พารามิเตอร์ฟินเลย์ ของคาน

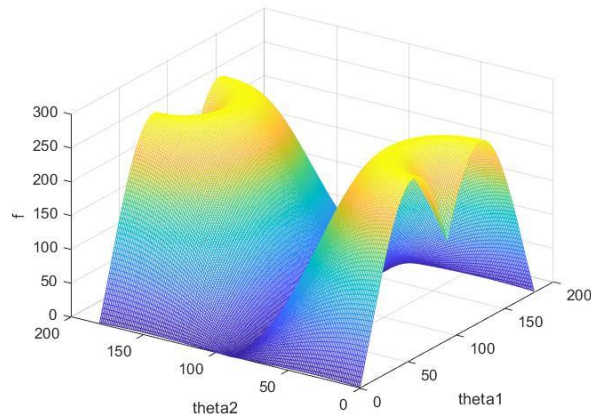
ข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นข้อมูลในการคำนวณพารามิเตอร์พินเลย์ เมื่อคำนวณพารามิเตอร์ของพินเลย์ผ่านโปรแกรม COMSOL เมื่อพิจารณาบริเวณบริเวณกึ่งกลางของคานาด้านล่าง ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์พินเลย์คือ 262.53 Pa ซึ่งจุดดังกล่าวจะเป็นจุดที่จะสอบทวนด้วยโปรแกรม MATLAB ที่สร้างขึ้น เมื่อนำองค์ประกอบความเค้นที่เกิด ณ จุดดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5.9

พารามิเตอร์พินเลย์จากโปรแกรม MATLAB ที่ได้คือ 269.56 Pa ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเมื่อเทียบกับโปรแกรม COMSOL เท่ากับ 2.68 % ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ จากการสอบทวนพารามิเตอร์พินเลย์จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรม COMSOL

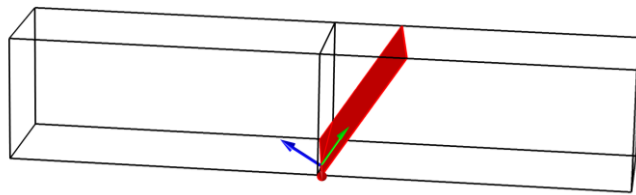
อย่างไรก็ตามโปรแกรม MATLAB สามารถระบุระนาบวิกฤตจากการแปลงความเค้นของจุดดังกล่าว และจากวิธีการคำนวณในโปรแกรม MATLAB ทำให้สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ของ θ_1 , θ_2 และ $\frac{\Delta T}{2} + k\sigma$ ของจุดดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยพบว่ามุมที่มีค่า $\frac{\Delta T}{2} + k\sigma$ สูงสุดมี 2 มุมคือระนาบวิกฤตที่เกิดจากมุม θ_1 เท่ากับ 98° และ θ_2 เท่ากับ 147° และมุม θ_1 เท่ากับ 32° และ θ_2 เท่ากับ 90° ซึ่งมุมดังกล่าวสามารถนำไปสร้างเวกเตอร์ตั้งฉากของระนาบวิกฤต เมื่อรวมกับจุดที่พิจารณาทำให้สามารถระบุระนาบวิกฤตที่เกิดบนชิ้นงานได้ โดยระนาบวิกฤตของมุม θ_1 เท่ากับ 32° และ θ_2 เท่ากับ 90° เป็นระนาบตามพื้นผิว ซึ่งเกิดรอยแตกได้ยาก ดังนั้นรอยแตกที่เกิดจากระนาบวิกฤตจึงควรเป็นมีระนาบเดียวกับระนาบที่มีมุม θ_1 เท่ากับ 98° และ θ_2 เท่ากับ 147° ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.9 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่จุดที่มี f สูงสุดบริเวณกึ่งกลางของคานาด้านล่าง กรณีการสอบทวน



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ θ_1 , θ_2 และ $\frac{\Delta T}{2} + k\sigma$



รูปที่ 5.11 ระนาบวิกฤตที่คำนวณจากโปรแกรม MATLAB

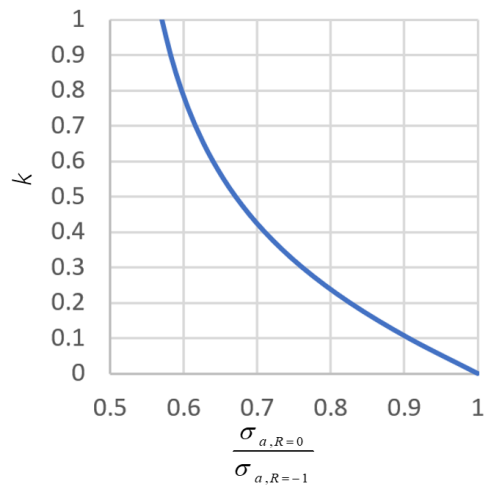
5.2 การคำนวณพารามิเตอร์สำหรับแนวคิดของฟินเลย์

ในการใช้ข้อมูล Findley's model มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบค่าเพื่อใช้ในการคำนวณคือค่า k และค่า f ซึ่งสามารถหาได้จากขีดจำกัดความล้าของวัสดุที่ต้องการ เช่น ขีดจำกัดความล้าและ S-N curve ของวัสดุที่รับความเค้นเฉือนและรับความเค้นดึงฉาก หรือรับความเค้นดึงฉากที่มีอัตราส่วนความเค้นค่าต่าง ๆ เมื่อทำการสืบค้นข้อมูลวัสดุที่สนใจ ซึ่งก็คือ เซอร์โคเนีย และ ลิเทียมไดซิลิเกต พบว่า Homaei et al. [14] และ Studart et al. [15] ได้รายงานข้อมูลที่ต้องการไว้ โดยวัสดุที่พบคือ zirconia Cercons และ ลิเทียมไดซิลิเกต (IPSe. Empress) ที่มีการทดลองเพื่อหาขีดจำกัดความล้า และ S-N curve ของความเค้นดึงฉากที่มีค่าอัตราส่วนความเค้นต่างกัน เมื่อนำข้อมูลของ [14, 15] คือ S-N curve ในรูปสมการ Basquin และ ขีดจำกัดความล้า แทนค่าลงในสมการ (3-16)-(3-21) ข้อมูลและค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 5.4 โดยรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 5.4 สมบัติทางกลด้านความล้าของวัสดุต่าง ๆ

วัสดุ	อัตราส่วน ความเค้น	A	b	ขีดจำกัด ความล้า (MPa)	ค่าถ่วง น้ำหนัก ของพิน เลย์	พารามิเตอร์ พินเลย์ (MPa)
ลิเทียมไดซิลิ เกต [14, 15]	0.03	95.845	-0.012	81.2	1.076	188.53
	-1	224.91	-0.030	148.17		
เซอร์โคเนีย [14, 15]	0.01	384.43	-0.032	247.1	0.992	524.27
	-1	460.98	-0.038	428.10		
เนื้อพิน [36]	0.1	200	-0.111	43.15	0.216	32.92
	-1	247	-0.111	53.30		

พบว่าค่า k ของวัสดุบุรณะทั้งสองมีค่าสูงมาก แม้ว่าใน D.F. Socie et al. [13] กล่าวถึงค่า k ของวัสดุเหนียวมีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.3 แต่ในวัสดุเปราะเช่น เซรามิก, เหล็กหล่อ ค่า k ที่สูงมาก แต่ไม่มีการระบุว่าค่า k สามารถมีค่าสูงสุดเท่าไร ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้ และค่า k ที่มีค่าสูงมีผลอย่างไรกับตัวแปรความเสียหาย ดังนั้นเพื่อตรวจสอบว่าค่า k ประมาณ 1 ยังคงสามารถใช้วิธีการของพินเลย์ได้หรือไม่ และพิจารณาของผลค่า k มาก เมื่อพิจารณาสมการ (3-16) พบว่าเมื่อเปลี่ยนค่า k เพื่อหาค่า $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ พบว่าถ้า $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ มีค่าน้อยกว่า 0.5 จะทำให้ k เข้าใกล้อนันต์ พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.12 และเมื่อพิจารณาจากค่า f ที่มีค่า k เป็นอนันต์จากสมการ (3-9) หมายความว่าทำให้ k มีค่าเข้าใกล้อนันต์ นั่นคือผลของความเค้นตั้งฉากมีมากกว่าความเค้นเฉือนมากจนความเค้นเฉือนไม่มีผลในการพิจารณาความล้าในวัสดุตามวิธีการของพินเลย์ ทำให้สามารถใช้ความเค้นตั้งฉากในวัสดุเพียงอย่างเดียวเพื่อประมาณความล้าของวัสดุได้ โดยระนาบที่เกิดความเสียหายมากที่สุดเป็นระนาบเดียวกับระนาบของความเค้นหลักสูงสุดนั่นเอง

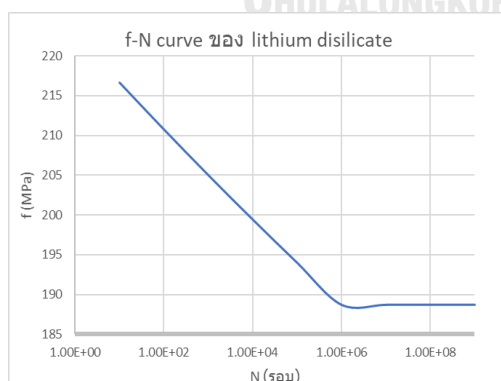


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ และ k

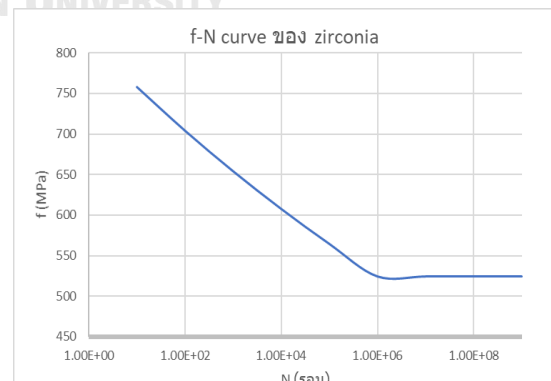
การที่ค่า k ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูง กล่าวคือมีค่าประมาณ 1 บ่งบอกถึงอิทธิพลของความเค้นตึงฉากที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุมีความเปราะ และผลของความเค้นตึงฉากที่มากขึ้นส่งผลให้ระนาบที่เสียหายใกล้เคียงกับระนาบของความเค้นหลักมากขึ้น สุดท้ายนำค่า k และ S-N curve ที่ได้มาค่า A และ b จากสมการ

$$f = \frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma = \frac{\sqrt{(\sigma_a)^2 + k^2(\sigma_{\max})^2} + k\sigma_{\max}}{2} = A(N_f)^b$$

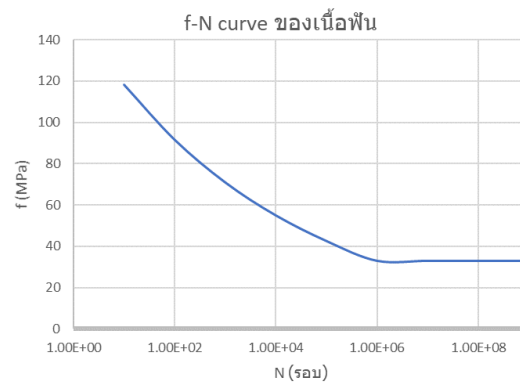
ดังนั้นเมื่อแทน σ_a ใน S-N curve จะได้กราฟ f-N curve เพื่อใช้หาค่า N_f โดย f-N curve ของ ลิเทียมไดซิลิเกต และ เซอร์โคเนีย ดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ก) และ รูปที่ 5.13 (ข) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



รูปที่ 5.13 f-N curve ของ (ก) ลิเทียมไดซิลิเกต และ (ข) เซอร์โคเนีย (ค) เนื้อฟัน



บทที่ 6 วิธีการศึกษา

การครอบฟันเป็นการบูรณะฟันที่ได้รับความเสียหายหรือแตกหัก เช่น ฟันผุ หรือฟันสึก วิธีการครอบฟันเป็นการสร้างครอบฟันแบบติดแน่นถาวรมาทดแทนให้กับตัวฟันที่เสียหาย โดยในนี้ให้ความสนใจเคลือบฟันที่ทำมาจากเซรามิก วิธีการบูรณะโดยการครอบฟันทำโดยการกรอฟันที่เสียหายออกและตกแต่ง โดยครอบฟันได้มาจากการพิมพ์ฟันเดิมเพื่อให้ฟันสามารถทำหน้าที่ได้ดังเดิม

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนในการศึกษา โดยเปรียบเทียบฟันที่บูรณะด้วยการครอบฟันด้วยวัสดุเซรามิก 2 ชนิด คือลิเทียมไดซิลิเกต และ เซอร์โคเนีย ทั้งนี้โดยใช้แบบจำลองเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเค้นและความล้าในกรณีที่ได้รับภาระแบบเดียวกัน

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน คือการเลือกสมการที่สอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่สนใจ สร้างแบบจำลอง กำหนดคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการคำนวณ การกำหนด mesh กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) และกำหนดรูปแบบการแสดงผลที่สนใจ

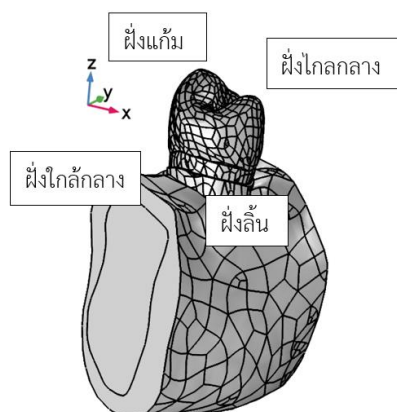
6.1 สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

ดังที่กล่าวในข้างต้นว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีพื้นฐานจากสมการ PDE และ ODE ที่อธิบายปรากฏการณ์ที่สนใจศึกษาโดยระบบสมการจะถูกปรับเปลี่ยนให้สามารถประมาณคำตอบในกรณีที่น่าสนใจได้ เช่น รูปร่างหรือเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างกัน โดยในวิทยานิพนธ์นี้สนใจความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ความล้า ซึ่งความเค้นดังกล่าวก่อให้เกิดการแตกหัก (crack propagation) ซึ่งเกิดจากความล้าของฟันที่ผ่านการครอบฟันเซรามิกในรูปแบบจำลอง 3 มิติ ดังนั้นสมการพื้นฐานที่นำมาใช้จึงควรเป็นสมการที่คำนวณถึงผลของเวลาและอธิบายปรากฏการณ์ของของแข็งได้

6.2 แบบจำลองและระบบแกนพิกัดของแบบจำลอง

แบบจำลองที่สนใจในวิทยานิพนธ์คือฟันที่ผ่านการครอบฟันเซรามิก 2 ชนิดคือ ลิเทียมไดซิลิเกต และ เซอร์โคเนีย โดยแบบจำลอง 3 มิติที่ใช้เหมือนกันทั้ง 2 กรณีโดยแสดงขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองในบทก่อนหน้า

ตามปกติงานทางทันตกรรมจะระบุทิศทางตามด้านของฟันเป็น mesial, buccal, lingual และ distal แต่เพื่อให้ง่ายและสอดคล้องกับงานทางด้านวิศวกรรมที่ใช้ระบบพิกัด x - y - z ในการแสดงทิศหรือตำแหน่ง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดจุดกำเนิดที่ปลายของรากฟันที่อยู่บริเวณร่องพอดี้ โดยให้ทิศ z เป็นทิศตามรากฟันและชี้ขึ้นไปที่ยอดฟัน ส่วนแกน y ชี้ทางยอดฟันใหญ่หรือด้าน distal ส่วนแกน x ชี้ทางด้าน lingual ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบพิกัด 3 มิติของแบบจำลองพื้นที่ผ่านการกรอ

6.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

หลังจากกำหนดสมการที่สนใจและสร้างแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าแบบจำลองนั้นมีวัสดุและ/หรือส่วนประกอบที่มีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันไป ซึ่งหมายความว่าแต่ละวัสดุจะมีพฤติกรรมทางกลที่แตกต่างกันด้วย พฤติกรรมทางกลดังกล่าวเป็นผลมาจากสมบัติทางกลในสมการ ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้สมบัติทางกลของวัสดุอยู่ภายใต้เงื่อนไข isotropic, homogeneous และ linear-elastic โดยสมบัติทางกลที่ใช้ในการคำนวณคือค่ามอดูลัส (Young modulus, E) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) และความหนาแน่น (density) สมบัติทางกลของวัสดุประเภทต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สมบัติทางกลของวัสดุในแบบจำลอง [19] [37] [38]

วัสดุในแบบจำลอง		มอดูลัสของความยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง	ความหนาแน่น (kg/m^3)
กรอบฟัน	ลิเทียมไดซิลิเกต	95,980	0.23	2,500
	เซอร์โคเนีย	210,000	0.23	6,000
ชั้นซีเมนต์ [16]		7,700	0.30	2,500
ชั้นเนื้อฟัน		16,600	0.31	3,000
เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน		2	0.45	1,000
ชั้นเอ็นยึดปริทันต์		68.9	0.45	1,100
กระดูกเนื้อแน่น		13,700	0.38	1,400
กระดูกฟองน้ำ		1,370	0.30	1,400

6.4 ผิวสัมผัส

เนื่องจากแบบจำลองมีส่วนประกอบหลายส่วนที่มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไป และมีการสัมผัสที่พื้นผิวของแต่ละส่วนประกอบต่างกัน ลักษณะของผิวสัมผัสแสดงถึงลักษณะการกระทำต่อกันระหว่างวัสดุ โดยลักษณะผิวสัมผัสที่ต่างก็นำมาซึ่งผลที่แตกต่าง เช่น ผิวสัมผัสแบบยึดติด (bond) แสดงถึงผิวสัมผัสนั้นจะเกิดความเค้นตึงฉากและเฉือนในทุกทิศทางที่ผิวสัมผัสเคลื่อนที่ ในขณะที่ผิวสัมผัสแบบไร้แรงเสียดทาน จะเกิดความเค้นตึงฉากเมื่อผิวสัมผัสทั้งสองเคลื่อนที่เข้าหากันเท่านั้น จากการยกตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าการเลือกคู่สัมผัสที่เปลี่ยนไปนำมาซึ่งผลของพฤติกรรมเชิงกลที่แตกต่างกัน

คู่สัมผัสในแบบจำลองมีหลากหลายคู่ ลักษณะของผิวสัมผัสแต่ละคู่สัมผัสสรุปในตารางที่ 6.2 โดยคู่สัมผัสทั้งหมดในแบบจำลองเป็นแบบยึดติด [5] เนื่องจากแต่ละคู่สัมผัสถูกยึดไว้ด้วยพันธะทางเคมียึดระหว่างพื้นผิวจนทำให้ผิวของแต่ละคู่สัมผัสเคลื่อนที่พร้อมกันทุกทิศทาง

ตารางที่ 6.2 คู่สัมผัสในแบบจำลองพื้นที่ผ่านการครอบ

คู่สัมผัส		ลักษณะของผิวสัมผัส
ส่วนประกอบในพื้นที่ผ่านการครอบ	ครอบฟัน และ เนื้อฟัน	แบบยึดติด (bond)
	เนื้อฟัน และ เนื้อเยื่อโพรงประสาท	
	เนื้อฟัน และ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์	
	กระดูกกรามส่วนกระดูกหนาแน่น และ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์	
	กระดูกกรามส่วนกระดูกฟองน้ำ และ ชั้นเอ็นยึดปริทันต์	
	กระดูกกรามส่วนกระดูกหนาแน่น และ กระดูกกรามส่วนกระดูกฟองน้ำ	

6.5 Mesh

Mesh คือรูปแบบของการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยของขอบเขตที่สนใจในที่นี้คือแบบจำลองฟันแบบจำลองนี้มีรูปร่างที่ซับซ้อน บางส่วนมีลักษณะโค้ง หรือร่องขนาดเล็ก ดังนั้นเพื่อให้เอลิเมนต์ที่เกิดจากการแบ่งของ mesh สามารถเรียงตัวสอดคล้องกับรูปทรงแบบจำลอง mesh ที่ใช้จึงควรมีลักษณะปรับโค้งตามพื้นผิวที่ซับซ้อน ดังนั้นรูปร่างเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (tetrahedron) มีลักษณะที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถแบ่งให้ได้เอลิเมนต์ตามพื้นผิวได้ง่ายกว่า mesh ชนิดอื่น

ขนาดของ mesh มีผลต่อความแม่นยำในการคำนวณเนื่องจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการประมาณค่าตอบจาก node ที่ถูกแบ่งจากโดเมนที่สนใจ node หรือ mesh ควรจะมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของปัญหาที่สนใจได้ mesh ที่มีความละเอียดมากพอที่จะช่วยให้ได้คำตอบที่ลู่เข้าสู่คำตอบแม่นยำตรงได้ ขนาดของ mesh ที่เหมาะสมจากวิทยานิพนธ์ของนางสาวกัญยวันต์ [5, 31, 32] ได้บอกถึงคือประมาณ 0.3 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามการใช้ node จำนวนมาก ก็ต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณ เช่น ความจำ หรือเวลา ในการคำนวณมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการลดขนาด mesh ในบริเวณกระดุกกราม เนื่องจากกระดุกกรามมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับฟัน และมีสมบัติทางกลที่ยากต่อการเปลี่ยนรูป mesh ของกระดุกกรามจึงมีขนาดประมาณ 0.4 มิลลิเมตร สุดท้ายคือขนาด mesh ของ PDL และซีเมนต์ ต้องมีขนาดเล็กกว่าส่วนอื่น เนื่องจากรูปร่างที่บาง (ความหนาประมาณ 0.025 มิลลิเมตร) อย่างไรก็ตาม mesh มีการปรับแก้เฉพาะจุดในบางส่วนของรูปทรง ดังนั้นจำนวน mesh และ node ที่ใช้ในการคำนวณมีจำนวนเป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 6.3

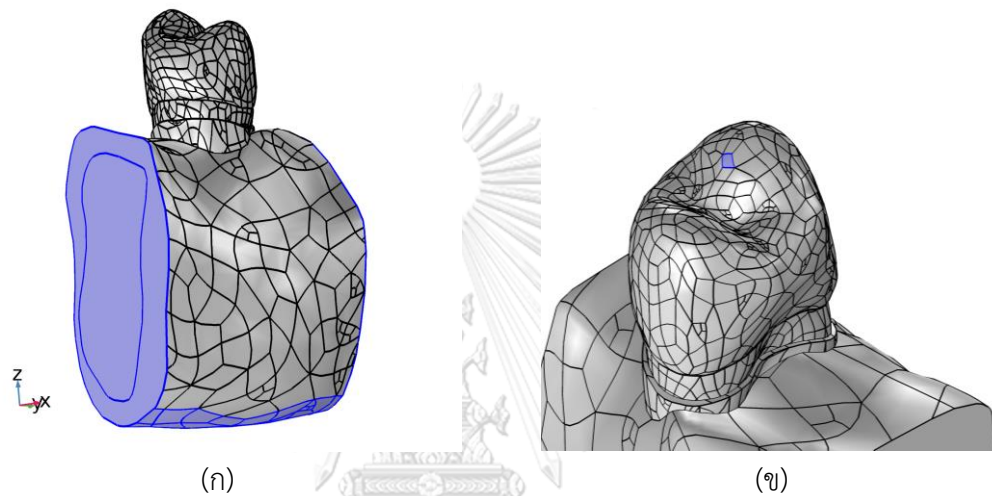
ตารางที่ 6.3 จำนวน mesh และ node ในแบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบ

แบบจำลอง	ประเภทของ mesh	จำนวน mesh	จำนวน node
ครอบฟัน	ทรงสี่หน้า (tetrahedron)	21,540	5,866
ชั้นซีเมนต์		18,978	6,458
ชั้นเนื้อฟัน		39,429	9,859
เนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน		2,037	612
ชั้นเอ็นยึดปริทันต์		14,551	4,662
กระดุกเนื้อแน่น		18,823	5,677
กระดุกฟองน้ำ		23,517	6,509
		รวม	138,875

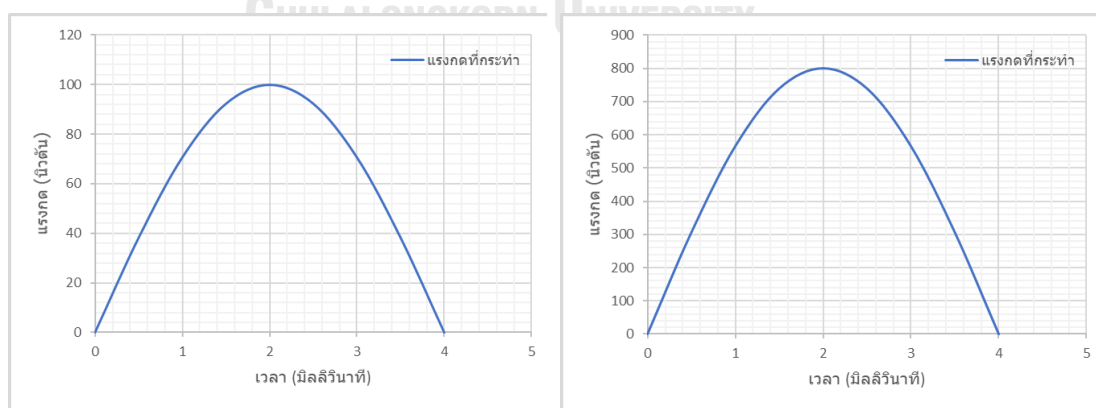
6.6 เงื่อนไขขอบเขต

ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง สำหรับปัญหาของแข็งที่วิทยานิพนธ์นี้สนใจ เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองคือการระบุว่าแบบจำลองมีแรงกระทำอย่างไร โดยเงื่อนไขขอบเขตที่สนใจคือสภาวะที่ฟันเกิดการบิดเคี้ยว โดยเสมือนให้ฟันบนและฟันล่างเกิดการกระทบกันในช่องปากบนกระดุกขากรรไกร ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของกระดุกกรามคือถูกยึดแน่น (fix support) ที่บริเวณที่ถูกตัดขวางทั้ง 2 ด้านและบริเวณด้านล่างของกระดุกกราม ดังแสดงในรูปที่ 6.2

(ก) นอกจากนี้พื้นที่ถูกแรงกระทำโดยพื้นด้านบน ซึ่งจะจำลองเป็นแรงที่กระทำบนยอดฟันใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 โดยกรณีแรงที่สนใจคือแนวแรงตั้งฉากกับพื้นผิวที่สนใจแสดงในรูปที่ 6.2 (ข) โดยแรงมีขนาด 100 และ 800 นิวตัน โดยกรณี 100 นิวตัน แสดงถึงแรงที่ฟันบดเคี้ยวกันโดยปกติ ในขณะที่แรง 800 นิวตัน มาจากแรงกัดของคนที่มีภาวะนอนกัดฟัน โดยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในรูปแบบกราฟรูปไซน์ แสดงในรูปที่ 6.3 โดยมีช่วงการบดเคี้ยวที่ 4 มิลลิวินาที เกิดจากการ sampling แรงที่กระทำในฟัน [39]



รูปที่ 6.2 ตำแหน่งของขอบเขตกำหนด (ก) ตำแหน่งที่ถูกยึดนิ่ง (ข) ตำแหน่งที่แรงกดกระทำ



รูปที่ 6.3 ขนาดของแรงกดที่เปลี่ยนไปตามเวลา (ก) แรงกดสูงสุด 100 นิวตัน (ข) แรงกดสูงสุด 800 นิวตัน

6.7 ผลการศึกษาที่สนใจ

ผลที่สนใจในวิทยานิพนธ์คือความเค้นและความล้าของแบบจำลองเพื่อหาบริเวณที่มีโอกาสเสียหายมากที่สุด โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองคือความเค้น von Mises และ พารามิเตอร์ฟินเลย์

เมื่อกำหนดให้การคำนวณผ่านโปรแกรม ผลจากการคำนวณอันดับแรกออกมาในรูปของค่าการเคลื่อนที่ (displacement) ของแต่ละ node อย่างไรก็ตามตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ อยู่ในรูปของความเค้นเป็นหลัก ค่าการเคลื่อนที่เหล่านั้นจะถูกแปลงโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่ ทำให้สามารถเปลี่ยนค่าการเคลื่อนที่ที่เป็นความเครียด หลังจากนั้นความเครียดจะถูกแปลงเป็นความเค้นโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และสมบัติของวัสดุ อย่างไรก็ตามความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งสามารถแสดงได้ 6 องค์ประกอบ คือ ความเค้นตั้งฉากตามแกนพิคัต 3 มิติ 3 องค์ประกอบ และความเค้นเฉือนตามระนาบพิคัต 3 องค์ประกอบ หรืออาจแสดงในรูปความเค้นที่เกิดจากความเค้นทั้ง 6 องค์ประกอบเช่นความเค้น von Mises ในการพิจารณาความเสียหาย

การศึกษาในส่วนที่สองเป็นการหาจำนวนรอบก่อนการเสียหายของวัสดุบูรณะหรือครอบฟัน และเนื้อฟัน โดยในขั้นแรกโปรแกรมจะคำนวณความเค้นที่เกิดภายในตัวอย่างทั้งหมด เพื่อใช้วิเคราะห์ความล้า สำหรับวิธีการของฟินเลย์โปรแกรมจะนำความเค้นที่ได้มาคำนวณหาค่า f บนชิ้นงานโดยข้อมูลจำเป็นต่อการคำนวณคือค่า k และ f ของวัสดุ ซึ่งค่าแต่ละค่าหามาตามทีแสดงในหัวข้อ “การหาพารามิเตอร์สำหรับแนวคิดของฟินเลย์” โดยผลที่ได้จากโปรแกรม COMSOL คือ fatigue usage factor ซึ่งคือค่า f ของแต่ละจุดบนแบบจำลองที่เกิดจากการคำนวณโปรแกรมหารด้วยค่า f ที่คำนวณจากผลการทดสอบวัสดุ โดยเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$F.U.F = \frac{f_{finite}}{f_{endurance\ limit}}$$

โดย $F.U.F$ คือ fatigue usage factor

f_{finite} คือ ตัวแปรฟินเลย์ของชิ้นงานจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

$f_{endurance\ limit}$ คือ ตัวแปรฟินเลย์ที่ขีดจำกัดความล้าที่คำนวณผลของการทดสอบวัสดุ

การแสดงผลเป็น fatigue usage factor สามารถบอกถึงลักษณะและตำแหน่งของความเสียหายจากความล้าทางกลได้ แต่วิทยานิพนธ์นี้มีอีกจุดประสงค์อย่างหนึ่งคือการหาจำนวนรอบก่อนการเสียหาย โดยการหาค่า f บนชิ้นงานเพื่อนำไปเทียบหา N_f ในกราฟ $f-N$ curve โดยสามารถหาค่า

f ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้จากค่า fatigue usage factor โดยการคูณ fatigue usage factor กับ f ที่ได้จากการทดลองซึ่งค่า f ของวัสดุ ต่อมานำค่า f ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมาเปรียบเทียบกับกราฟ f -N curve ของวัสดุที่คำนวณได้ โดยผลที่ได้จากโปรแกรม COMSOL บริเวณที่ f มีค่ามากที่สุด เมื่อนำไปเปรียบเทียบใน f -N curve หมายความว่า มี N_f ที่ต่ำที่สุด



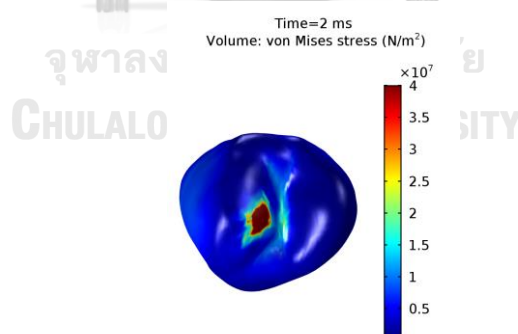
บทที่ 7 ผลการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงผลการคำนวณผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลที่สนใจคือความเค้น von Mises พารามิเตอร์พินเลย์ และระนาบวิกฤตบริเวณที่พารามิเตอร์พินเลย์มีค่าสูงสุดที่บริเวณที่มีการกระจายตัวความเค้น โดยปกติงานทางวิศวกรรมจะคำนึงถึงพารามิเตอร์พินเลย์ที่มีค่าสูงสุด ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายเพียงค่าเดียว แต่สำหรับงานทางทันตกรรมที่ชิ้นงานมีความแตกต่างของรูปร่างและวัสดุประกอบกับคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาจุดอื่นที่พารามิเตอร์พินเลย์มีค่าสูงรองลงมาด้วย เนื่องจากระนาบเหล่านั้นนั้นอาจเป็นระนาบที่เกิดความเสียหายจริงก็ได้

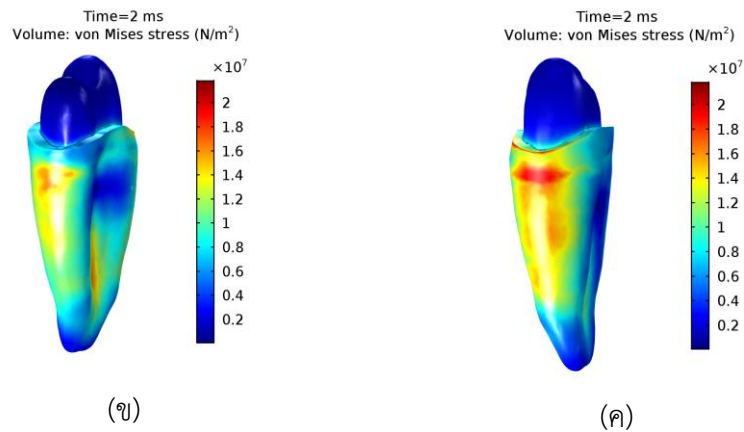
7.1 กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกต

7.1.1 กรณีแรงกด 100 นิวตัน กระทำบนยอดสูง

การวิเคราะห์ความเค้นในรูปของความเค้น von Mises ของกรณีนี้ดังแสดงในรูปที่ 7.1 พบว่าความเค้นในครอบฟันมีความเข้มของความเค้น (stress concentration) มากที่บริเวณที่ถูกแรงกระทำ โดยมีความเค้นสูงสุดคือ 153.88 MPa นอกจากนี้บริเวณที่มีความเข้มของความเค้นคือบริเวณร่องฟันตรงกลาง โดยมีความเค้นสูงสุดคือ 25.554 MPa ในขณะที่ความเค้นที่เกิดในเนื้อฟันนั้นความเข้มของความเค้นมีค่ามากกว่าบริเวณคอฟันตามแนวยอดฟันสูงและต่ำพอดี และร่องตามแนวยาวของรากฟัน โดยจุดที่มีความเค้นสูงสุดคือ 21.6 MPa บริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง รองลงมาคือ 18.5 MPa บริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ สุดท้ายคือ 17.9 MPa บริเวณร่องตามยาวของรากฟัน

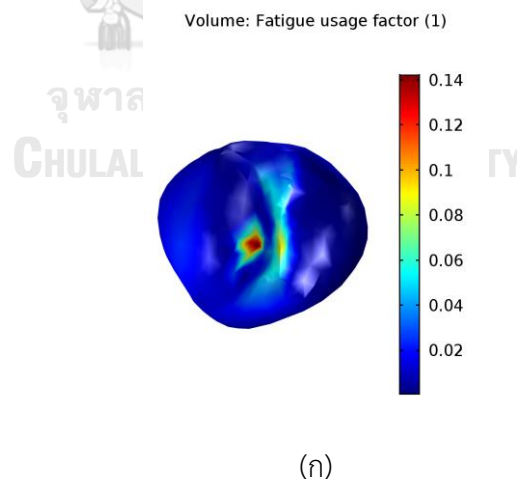


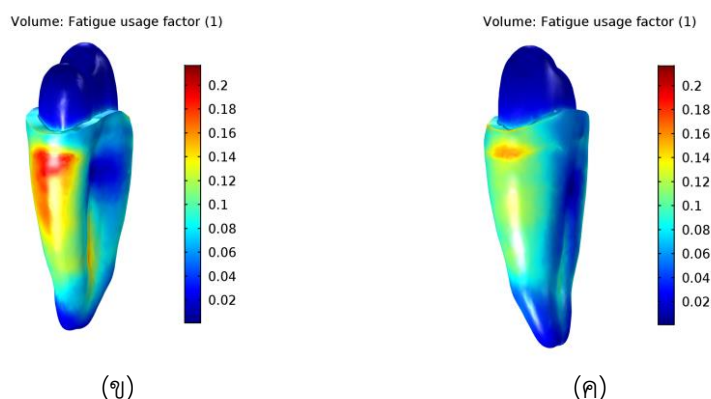
(ก)



รูปที่ 7.1 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณี ครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

เมื่อวิเคราะห์ความล้าจากความเค้นที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.2 พบว่าสำหรับครอบฟัน บริเวณที่มีโอกาสเสียหายเนื่องจากจากความล้ามากที่สุดคือบริเวณที่แรงกระทำโดยตรง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดคือ 0.2 รองลงมาคือบริเวณร่องฟัน โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดคือ 0.12 ในขณะที่จุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้ามากที่สุดในเนื้อฟันคือ บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันเล็ก โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดคือ 0.2 รองลงคือบริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดคือ 0.18 สุดท้ายคือบริเวณร่องตามยาวของรากฟัน โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดคือ 0.14





รูปที่ 7.2 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝัง (ค) เนื้อฟันฝังกรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

การวิเคราะห์แต่ละจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของแต่ละบริเวณที่มีความเข้มของความเค้น เพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบที่วัสดุจะรับภาระได้ นอกจากนี้ยังแสดงระนาบวิกฤตและแสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา เพื่อวิเคราะห์ว่าความเค้นองค์ประกอบใดมีผลต่อความล้าที่เกิดขึ้นมากที่สุด โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์คือจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของครอบฟันคือบริเวณจุดที่มีแรงกระทำและร่องฟัน และบริเวณเนื้อฟันคือ คอฟันฝังยอดฟันเล็ก คอฟันฝังยอดฟันสูง และร่องตามยาวรากฟัน

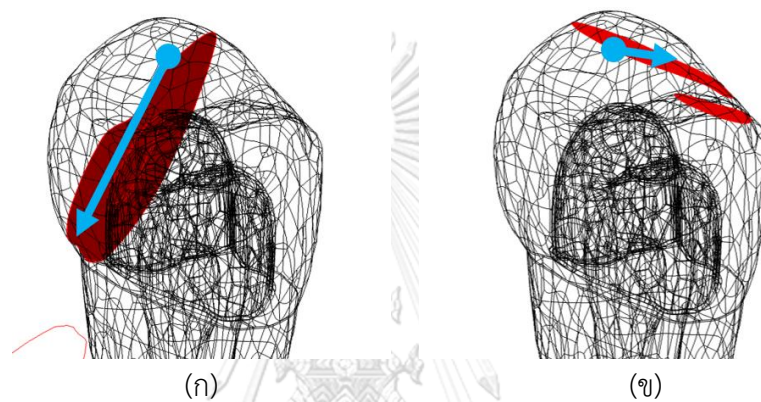
เมื่อนำค่า F.U.F. ไปแปลงหาค่า f แล้วเพื่อนำไปเทียบในเส้นโค้ง $f-N$ ของแต่ละวัสดุเพื่อหาอายุใช้งานของแต่ละวัสดุ เมื่อพิจารณาค่า F.U.F. ที่เกิดจากการกระจายตัวของความเค้นมีค่าน้อยกว่า 1 ดังแสดงในตารางที่ 7.1 ทุกจุดจะพบว่า ภายใต้สภาวะแรงกด 100 นิวตัน จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของครอบฟันและเนื้อฟันมีค่ามากกว่า 10^6 รอบ ทุกบริเวณที่เกิดความเค้น

ตารางที่ 7.1 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

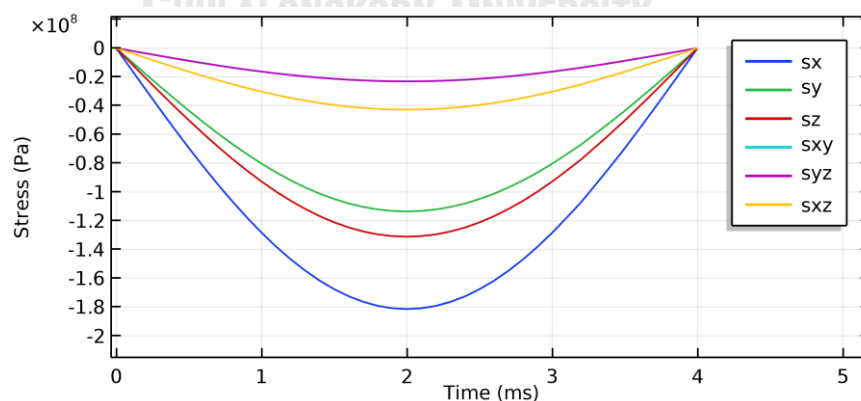
องค์ประกอบ	บริเวณที่เกิด	F.U.F.	จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ (รอบ)
ครอบฟัน	จุดที่โดนแรงกระทำ	0.2	มากกว่า 10^6
	ร่องฟัน	0.12	
เนื้อฟัน	คอฟันฝังยอดฟันเล็ก	0.2	
	คอฟันฝังยอดฟันสูง	0.18	
	ร่องตามยาวของรากฟัน	0.14	

สุดท้ายคือการแสดงระนาบวิกฤตและองค์ประกอบความเค้นในจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดแต่ละบริเวณ เพื่อหาระนาบที่จะเกิดรอยแตกเริ่มต้น โดยระนาบวิกฤตดังกล่าวสามารถมีได้มากกว่า 1 ระนาบได้ ดังต่อไปนี้

ระนาบวิกฤตของกรอบฟันที่บริเวณที่แรงกระทำ มีระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำและมีทิศทางรอยแตกไปที่ป่าของเนื้อฟัน และระนาบที่ตัดขวางยอดฟันใหญ่ไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม แสดงในรูปที่ 7.3 และองค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.4

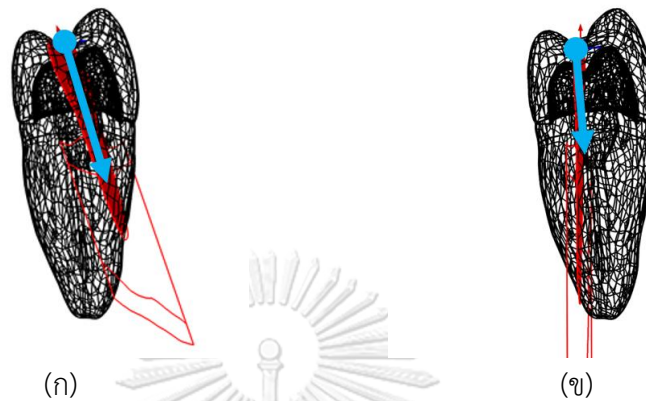


รูปที่ 7.3 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ (ก) ระนาบเอียงลงไปยังป่าฟัน (ข) ระนาบเอียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม กรณีแรงกด 100 นิวตัน กระทำบนยอดสูง

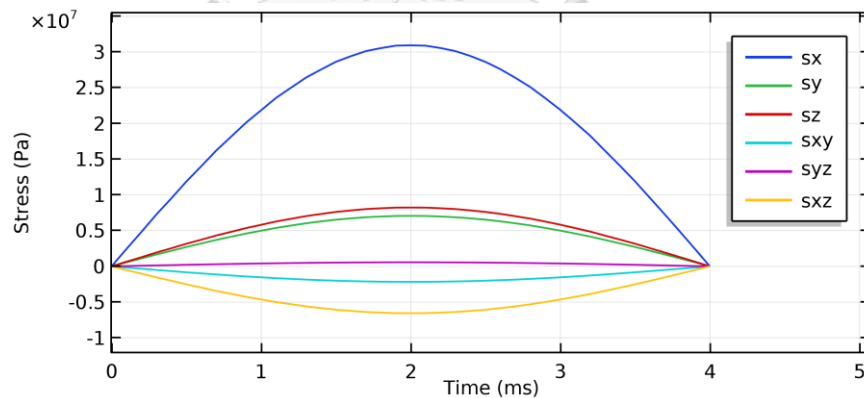


รูปที่ 7.4 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ กรณีกรอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

ระนาบวิกฤตของกรอบฟันที่ร่องกลางกรอบฟัน มีระนาบจากร่องกลางกรอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง และระนาบผ่ากลางตามรากฟัน แสดงในรูปที่ 7.5 และองค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.6

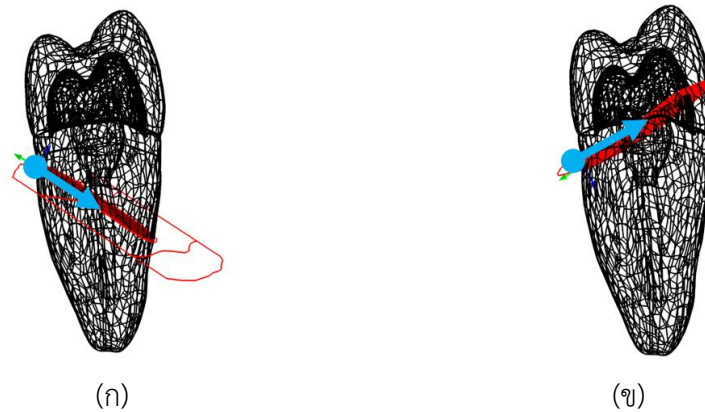


รูปที่ 7.5 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระนาบจากร่องกลางกรอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากฟัน กรณีกรอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

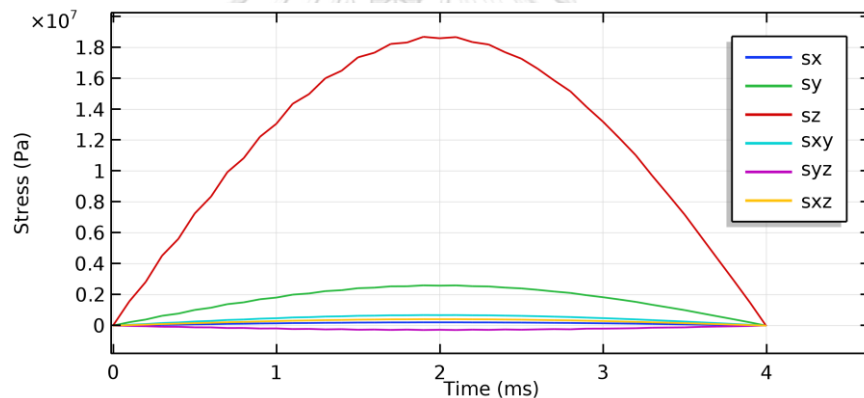


รูปที่ 7.6 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน กรณีกรอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

ในขณะที่ระนาบวิกฤตของเนื้อฟันเป็นดังนี้ ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ มีระนาบเอียงลงไปยังยอดฟันสูง และระนาบเอียงขึ้นไปทางกรอบฟัน แสดงในรูปที่ 7.7 และองค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.8

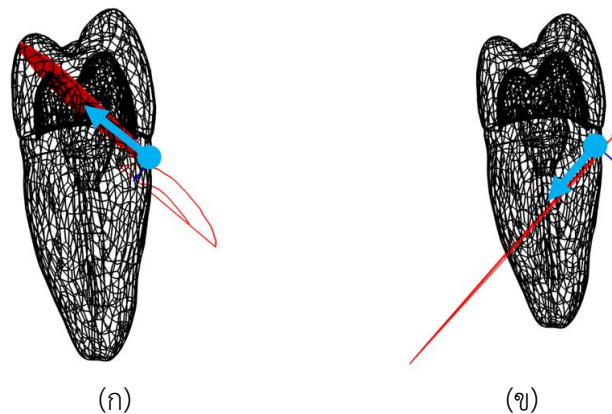


รูปที่ 7.7 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระบายวิกฤต บริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระบายเอียงขึ้นไปทาง คีรอบฟัน กรณีคีรอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

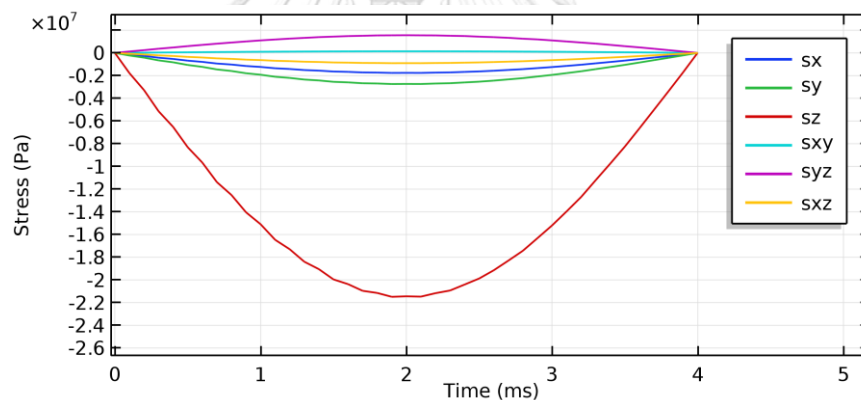


รูปที่ 7.8 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอด ฟันต่ำ กรณีคีรอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

ระบายวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูงมีระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ และระบายเอียงลง ไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำดังแสดงในรูปที่ 7.9 องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.10

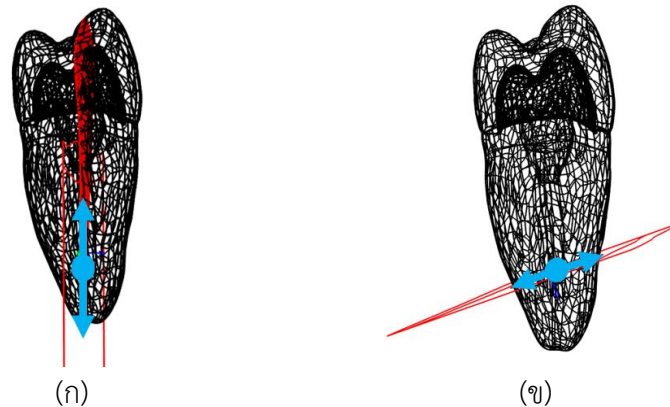


รูปที่ 7.9 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระบายเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ (ข) ระบายเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกต และถูกแรงกด 100 นิวตัน

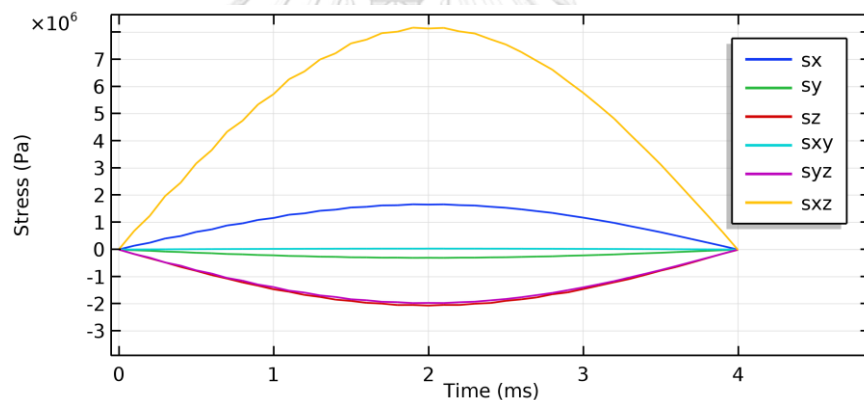


รูปที่ 7.10 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

ระบายวิกฤตของเนื้อฟันที่ร่องตามแนวยาวของรากฟัน มีระบายผ่ากลางตามยาวของรากฟัน และระบายตัดขวางตามรากฟันดังแสดงในรูปที่ 7.11 องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.11 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดบริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระนาบผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระนาบตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

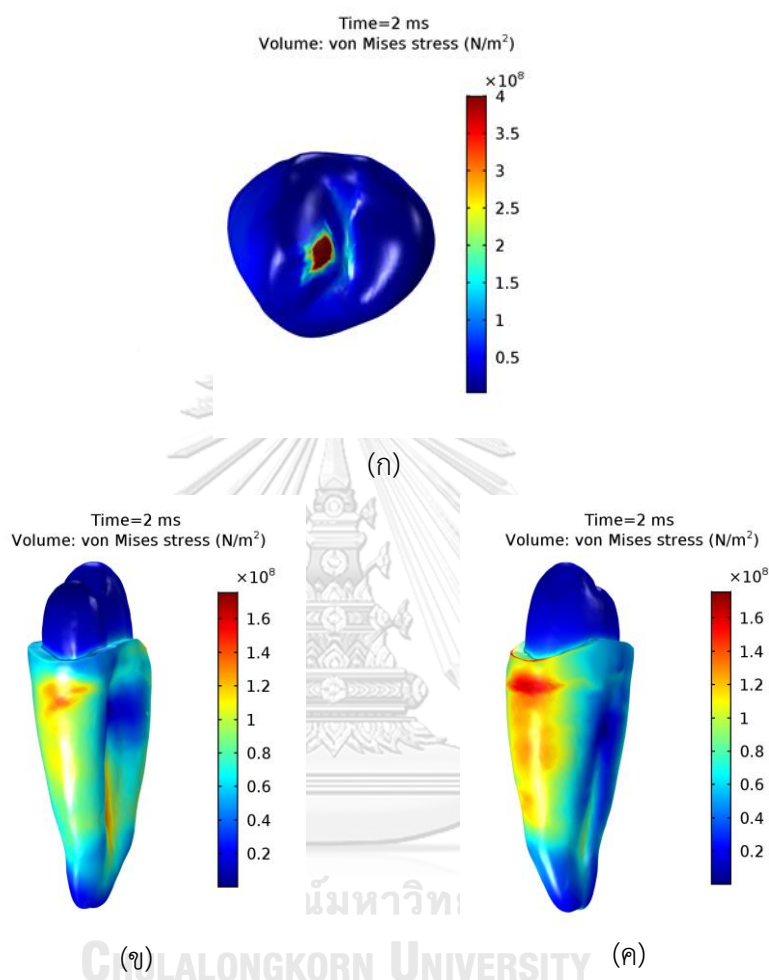


รูปที่ 7.12 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 100 นิวตัน

7.1.2 กรณีแรง 800 นิวตัน กดยอดสูง

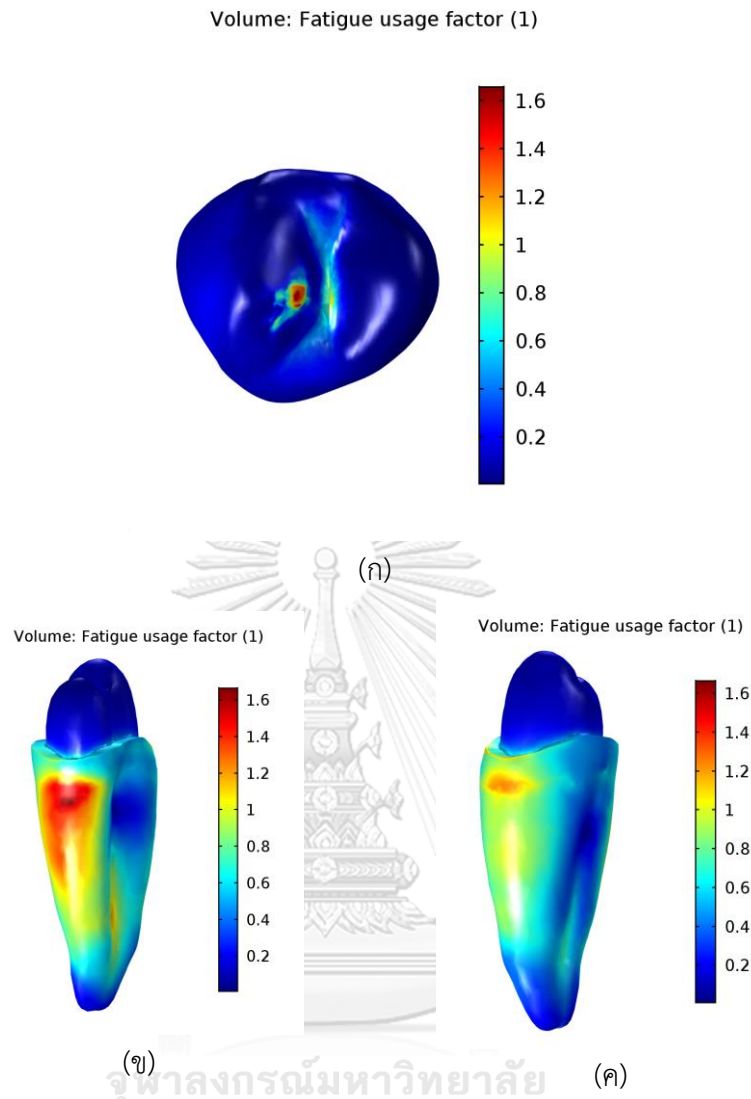
การวิเคราะห์ความเค้นในรูปของความเค้น von Mises ของกรณีนี้ดังแสดงในรูปที่ 7.13 พบว่าความเค้นในครอบฟันมีความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration) มากที่บริเวณที่ถูกแรงกระทำ โดยมีความเค้น von Mises มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,842 MPa นอกจากนี้บริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูงบริเวณร่องฟันตรงกลาง พบว่ามีความเค้น von Mises สูงสุดเท่ากับ 204.32 MPa ในขณะที่ความเค้นที่เกิดในเนื้อฟันมีความเข้มข้นของความเค้นมีมากบริเวณคอฟันตามแนวยอดฟันสูงและต่ำพอดี และร่องตามแนวยาวของรากฟัน โดยจุดที่มีความเค้น von Mises สูงสุดเท่ากับ 173.4

MPa ที่บริเวณคอพั้นฝั่งยอดสูง รองลงมาคือที่บริเวณคอพั้นฝั่งยอดต่ำ ซึ่งมีความเค้น von Mises เท่ากับ 128.2 MPa สุดท้ายคือที่บริเวณร่องตามยาวของรากพั้น ซึ่งมีความเค้น von Mises เท่ากับ 70.88 MPa



รูปที่ 7.13 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบพั้น (ข) เนื้อพั้นฝั่ง (ค) เนื้อพั้นฝั่งกรณี ครอบพั้นทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

เมื่อวิเคราะห์ความล้มเหลวจากความเค้นที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.14 พบว่าสำหรับ ครอบพั้นนั้นจุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้มเหลวมากที่สุดคือบริเวณที่แรงมากระทำโดยตรง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.658 รองลงมาคือบริเวณร่องพั้น โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.156 ในขณะที่จุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้มเหลวที่สุดในเนื้อพั้นคือบริเวณคอพั้นฝั่งยอดพั้นเล็ก โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.752 รองลงคือ บริเวณคอพั้นฝั่งยอดพั้นสูง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.320 และส่วนสุดท้ายคือบริเวณร่องตามยาวของรากพั้น โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.212



รูปที่ 7.14 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝัง (ค) เนื้อฟันฝังกรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

การวิเคราะห์ตำแหน่งที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของแต่ละบริเวณที่มีความเข้มของความเค้นปรากฏจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ การวางตัวของระนาบวิกฤตและองค์ประกอบของความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ว่าความเค้นองค์ประกอบใดมีผลต่อความล้าที่เกิดขึ้นมากที่สุด บริเวณที่ทำการวิเคราะห์คือจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด โดยในส่วนของครอบฟันจะพิจารณาบริเวณที่มีแรงกระทำและร่องฟัน สำหรับส่วนเนื้อฟันจะพิจารณาที่คอฟันฝังยอดฟันเล็ก คอฟันฝังยอดฟันสูง และร่องตามยาวของรากฟัน

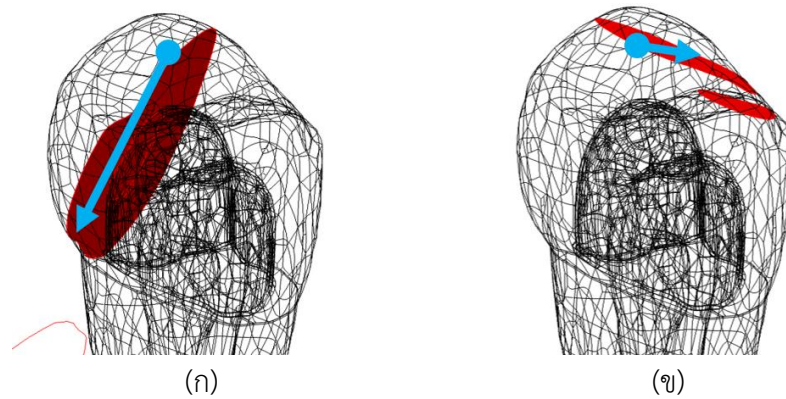
เมื่อนำ F.U.F. ไปหาค่า f แล้วเพื่อนำไปเทียบในเส้นโค้ง $f-n$ ของแต่ละวัสดุเพื่อหาอายุใช้งานของแต่ละวัสดุดังแสดงในตารางที่ 7.2 เมื่อพิจารณาค่า F.U.F. ที่เกิดจากการกระจายตัวของความเค้นมีค่ามากกว่า 1 ที่ทุก ๆ จุดจะพบว่า ภายใต้สภาวะแรงกด 800 นิวตัน จำนวนรอบที่ครอบฟันสามารถรับได้น้อยที่สุดคือบริเวณจุดที่รับแรงกระทำ โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้มีค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 7.2 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

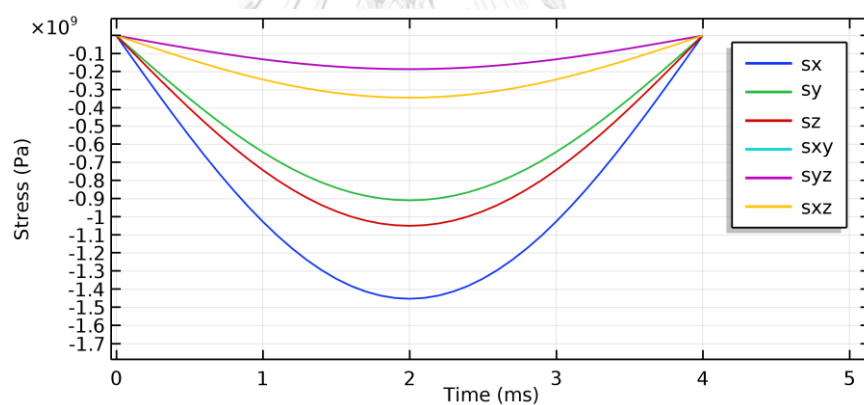
องค์ประกอบ	บริเวณที่เกิด	F.U.F.	จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ (รอบ)
ครอบฟัน (ลิเทียมไดซิลิเกต)	จุดที่โดนแรงกระทำ	1.658	น้อยกว่า 10^3
	ร่องฟัน	1.156	9,143
เนื้อฟัน	คอฟันฝั่งยอดฟันเล็ก	1.752	8,428
	คอฟันฝั่งยอดฟันสูง	1.320	93,100
	ร่องตามยาวของรากฟัน	1.212	344,677

สุดท้ายคือการแสดงระนาบวิกฤตและองค์ประกอบความเค้นในจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดแต่ละบริเวณ เพื่อหามุมที่รอยแตกเริ่มต้น โดยระนาบวิกฤตดังกล่าวสามารถมีมากกว่า 1 ระนาบได้ มีดังนี้

ระนาบวิกฤตของครอบฟันที่บริเวณที่แรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 7.15 มีระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำและมีทิศทางรอยแตกไปที่บ่าของเนื้อฟัน และระนาบที่ตัดขวางยอดฟันใหญ่ไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.16

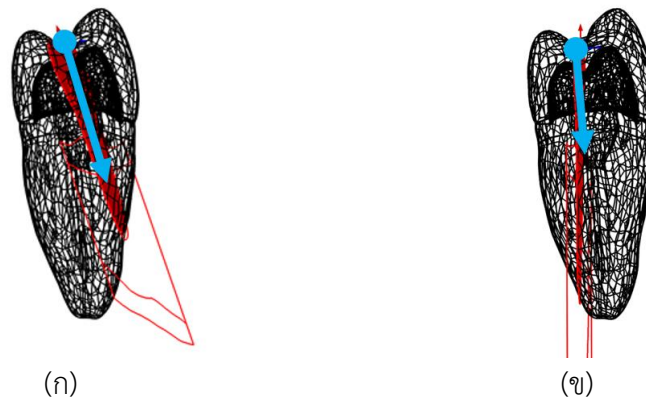


รูปที่ 7.15 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ (ก) ระบายเอียงลงไปยังบ่าฟัน (ข) ระบายเอียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

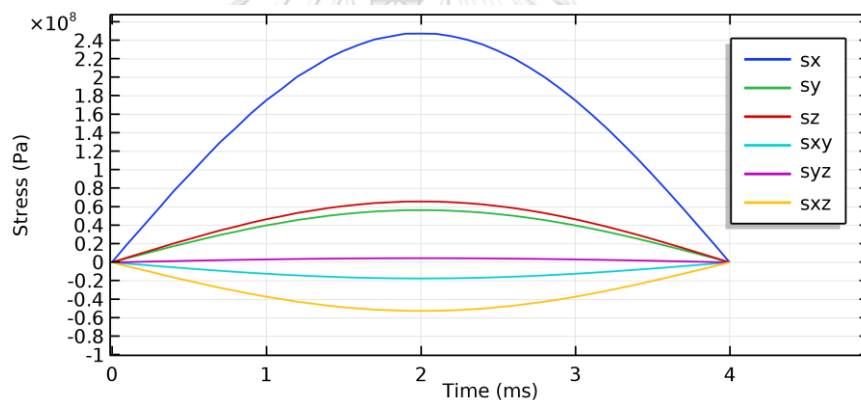


รูปที่ 7.16 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ

ระบายวิกฤตของครอบฟันที่ร่องกลางครอบฟันดังแสดงในรูปที่ 7.17 มีระบายที่เริ่มจากร่องกลางครอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง และระบายผ่ากลางตามรากฟัน องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.18

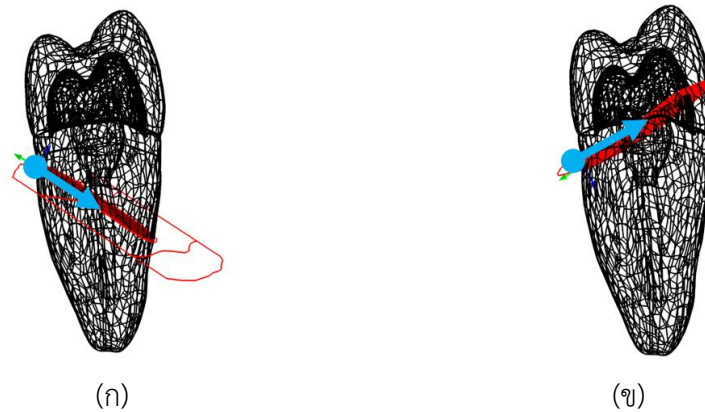


รูปที่ 7.17 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระนาบที่จากร่องกลาง
 ครอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากฟัน
 กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

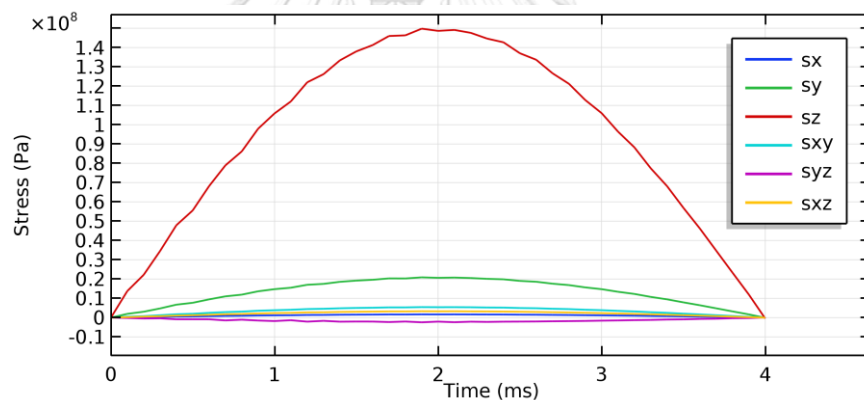


รูปที่ 7.18 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน กรณี
 ครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

ในขณะที่ระนาบวิกฤตของเนื้อฟันเป็นดังนี้ ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำดังแสดงใน
 รูปที่ 7.19 มีระนาบเอียงลงไปยังยอดฟันสูง และระนาบเอียงขึ้นไปทางครอบฟัน องค์ประกอบความ
 เค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.20



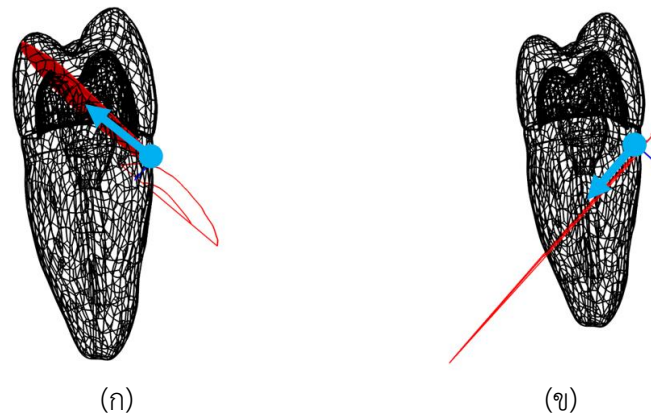
รูปที่ 7.19 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระบายวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระบายเอียงขึ้นไปทางครอบฟัน



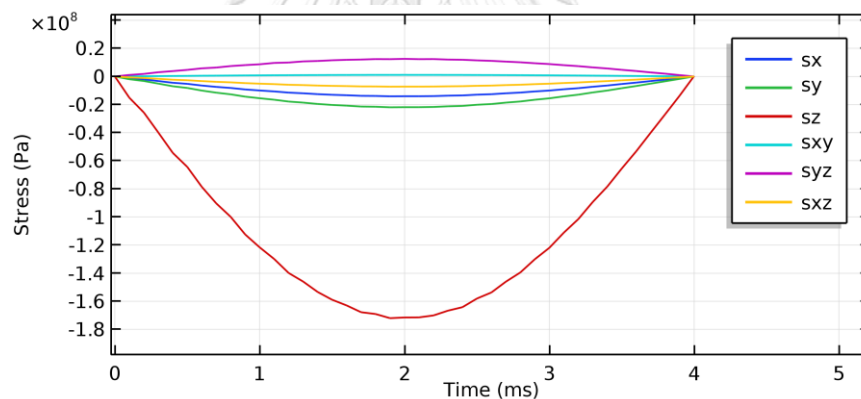
รูปที่ 7.20 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ

ระบายวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูงดังแสดงในรูปที่ 7.21 มีระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ และระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่

7.22

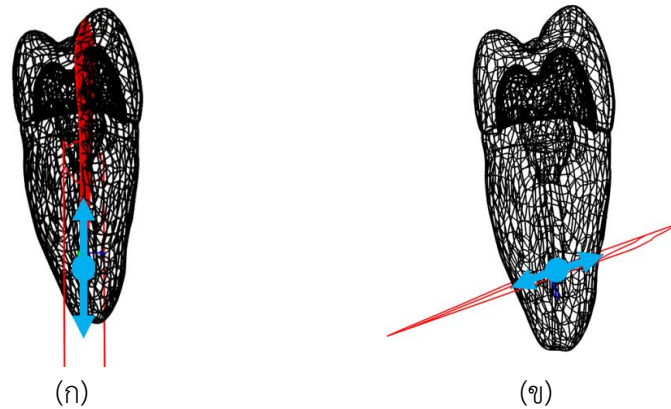


รูปที่ 7.21 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ (ข) ระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

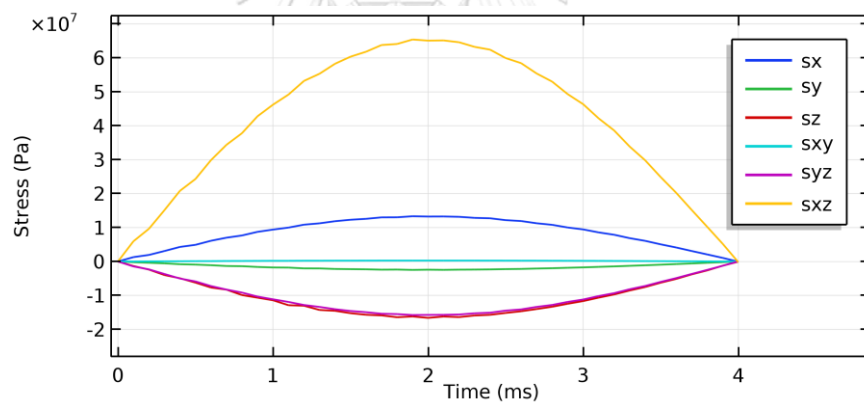


รูปที่ 7.22 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

ระนาบวิกฤตของเนื้อฟันที่ร่องตามแนวยาวของรากฟันดังแสดงในรูปที่ 7.23 มีระนาบผ่ากลางตามยาวของรากฟัน และระนาบตัดขวางตามรากฟัน และองค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.24



รูปที่ 7.23 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระนาบผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระนาบตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจาก ลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

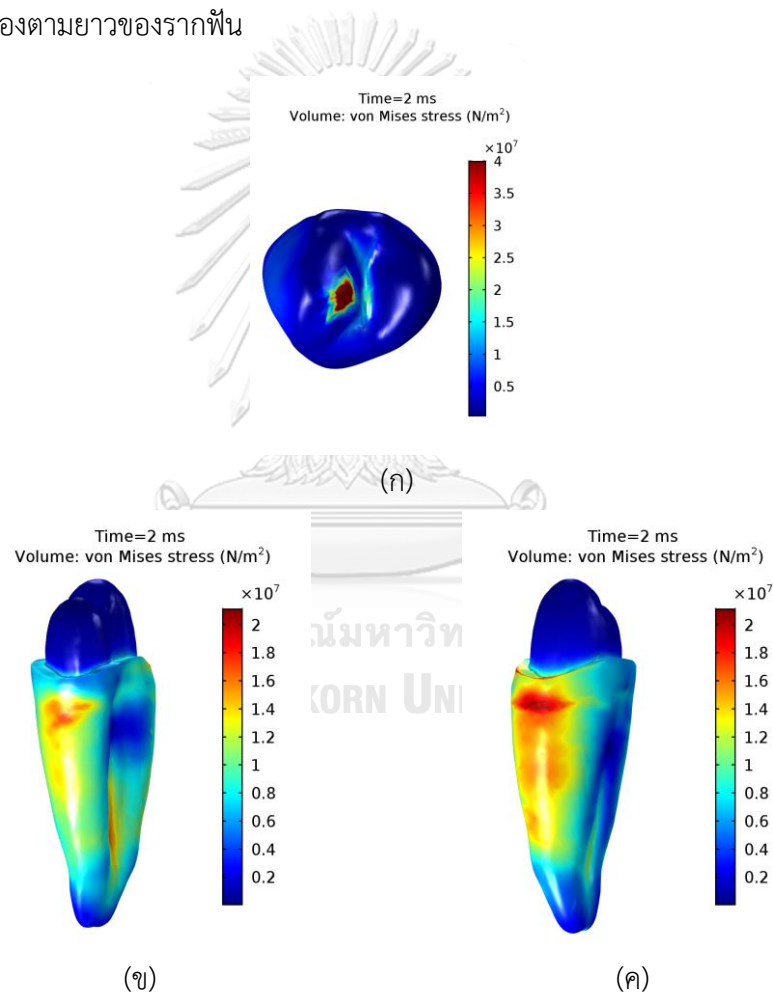


รูปที่ 7.24 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนว ยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและถูกแรงกด 800 นิวตัน

7.2 กรณีครอบฟันทำจากเซอร์โคเนีย

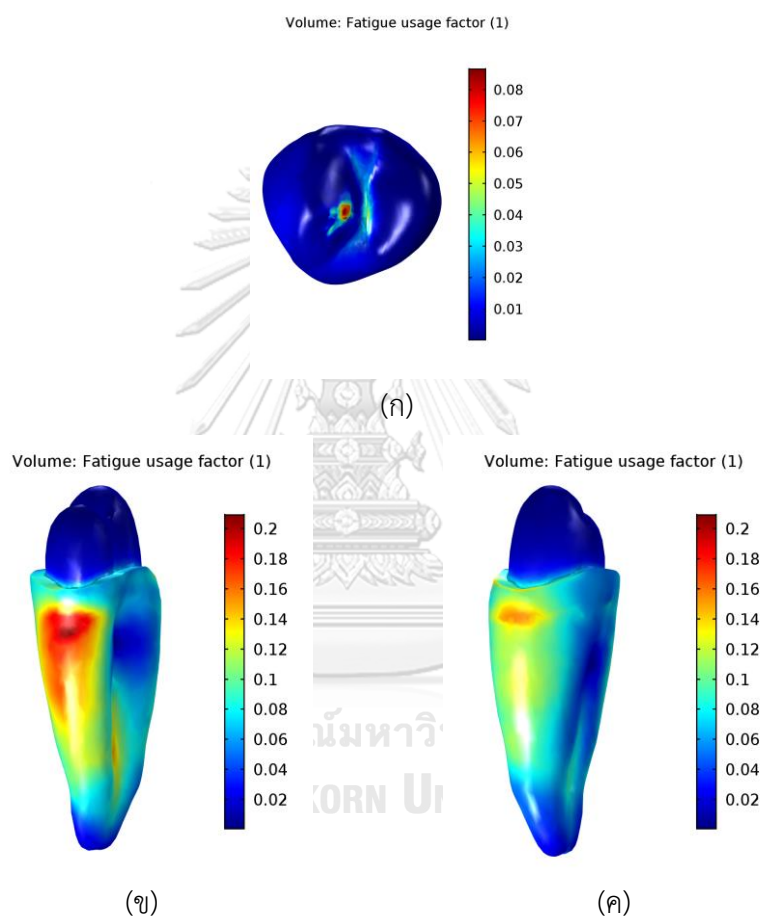
7.2.1 กรณี 100 นิวตัน กดยอดสูง

การวิเคราะห์ความเค้นในรูปของ von Mises ของกรณีนี้ดังแสดงในรูปที่ 7.25 พบว่าครอบฟันมีความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration) มากที่บริเวณที่ถูกแรงกระทำ โดยมีความเค้นสูงสุดคือ 153.84 MPa นอกจากนี้บริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูงคือบริเวณร่องฟันตรงกลาง โดยมีความเค้นสูงสุดคือ 26.06 MPa ในขณะที่ความเค้นที่เกิดในเนื้อฟันมีค่ามากบริเวณคอฟันตามแนวยอดฟันสูงและต่ำพอดี และร่องตามแนวยาวของรากฟัน โดยจุดที่มีความเค้นสูงสุดคือ 21.74 MPa บริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง ร่องลงมาคือ 15.91 MPa บริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ สุดท้ายคือ 16.1 MPa บริเวณร่องตามยาวของรากฟัน



รูปที่ 7.25 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำจากเซอร์โคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน

เมื่อวิเคราะห์ความล้าจากความเค้นที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.26 พบว่าจุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้ามากที่สุดสำหรับครอบฟันคือบริเวณที่แรงมากกระทำโดยตรง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.08458 รองลงมาคือบริเวณร่องฟัน โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.05595 ในขณะที่จุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้ามากที่สุดในเนื้อฟันคือบริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันเล็ก โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.2203 รองลงคือบริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.1661 สุดท้ายคือบริเวณร่องตามยาวของรากฟันที่มีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.1521



รูปที่ 7.26 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง

กรณีครอบฟันทำจากเซอโรโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน

การวิเคราะห์แต่ละจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของแต่ละบริเวณที่มีความเข้มของความเค้นเป็นการทำเพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบที่สามารถรับได้ ระนาบวิกฤตและแสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา การวิเคราะห์ในลักษณะนี้เป็นการหาว่าความเค้นองค์ประกอบใดมีผลต่อความล้าที่เกิดขึ้นมากที่สุด โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์คือจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของครอบฟันคือบริเวณจุด

ที่มีแรงกระทำและร่อนพื้น ส่วนบริเวณเนื้อพื้นตำแหน่งที่ต้องพิจารณาคือ คอพื้นฝั่งยอดพื้นเล็ก คอพื้นฝั่งยอดพื้นสูง และร่อนตามยาวของรากพื้น

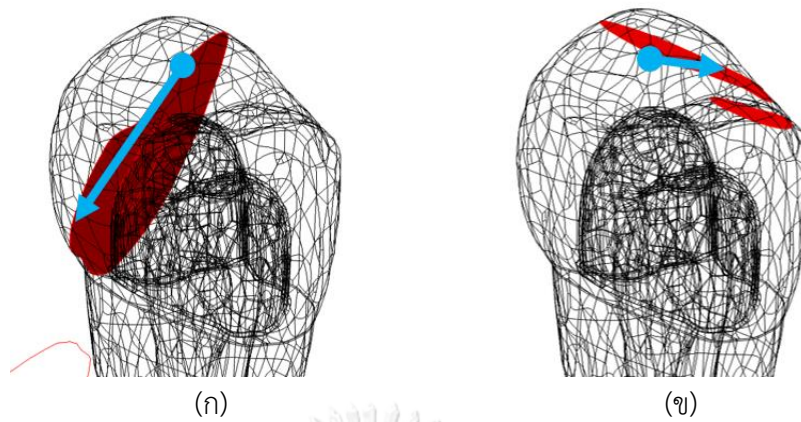
เมื่อนำ F.U.F. ไปแปลงหาค่า f แล้วเพื่อนำไปเทียบในเส้นโค้ง $f-n$ ของแต่ละวัสดุเพื่อหาอายุใช้งานของแต่ละวัสดุดังที่แสดงในตารางที่ 7.3 เมื่อพิจารณาค่า F.U.F. ที่เกิดจากการกระจายตัวของความเค้นมีค่าน้อยกว่า 1 ทุกจุด ดังนั้นภายใต้สภาวะแรงกด 100 นิวตัน จำนวนรอบที่ครอบพื้นและเนื้อพื้นสามารถรับได้มีค่ามากกว่า 10^6 รอบ ทุกบริเวณที่เกิดความเค้น

ตารางที่ 7.3 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบพื้นทำจาก เซอร์โคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน

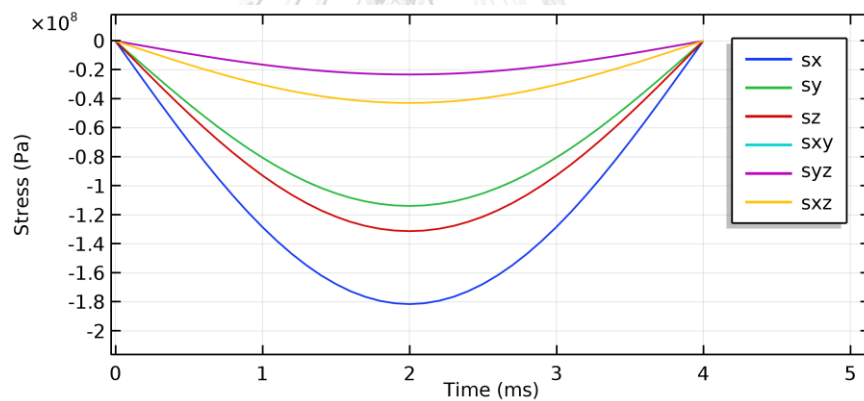
องค์ประกอบ	บริเวณที่เกิด	F.U.F.	จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ (รอบ)
ครอบพื้น	จุดที่โดนแรงกระทำ	0.08458	มากกว่า 10^6
	ร่อนพื้น	0.05595	
เนื้อพื้น	คอพื้นฝั่งยอดพื้นเล็ก	0.2203	
	คอพื้นฝั่งยอดพื้นสูง	0.1661	
	ร่อนตามยาวของรากพื้น	0.1521	

สุดท้ายคือการแสดงระนาบวิกฤตและองค์ประกอบความเค้นในจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดแต่ละบริเวณ เพื่อหามุมที่รอยแตกเริ่มต้น โดยระนาบวิกฤตดังกล่าวสามารถมีมากกว่า 1 ระนาบได้

ระนาบวิกฤตของครอบพื้นที่บริเวณที่แรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 7.27 มีการวางตัวตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำและมีทิศทางรอยแตกไปที่บ่าของเนื้อพื้น และอีกระนาบเป็นระนาบที่ตัดขวางยอดพื้นใหญ่ไปทางฝั่งกระพุ่มแก้ม รูปที่ 7.28 แสดงองค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว

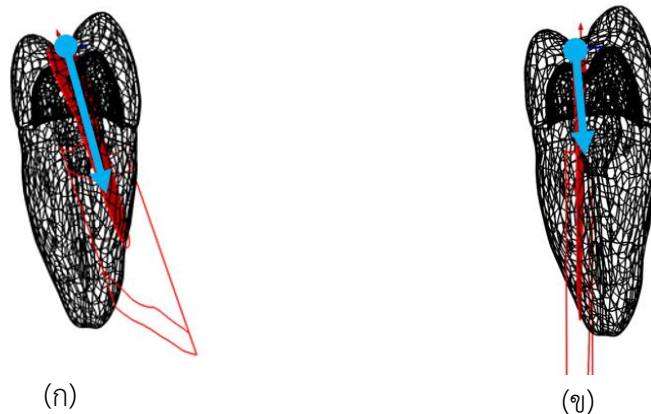


รูปที่ 7.27 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่มีแรงกระทำ (ก) ระบายเอียงลงไป ยังบ่าฟัน (ข) ระบายเอียงไปทางฝั่งกระทิงแก้ม สำหรับครอบฟันที่เป็นเซอร์โคเนีย และมีแรงกด 100 นิวตัน

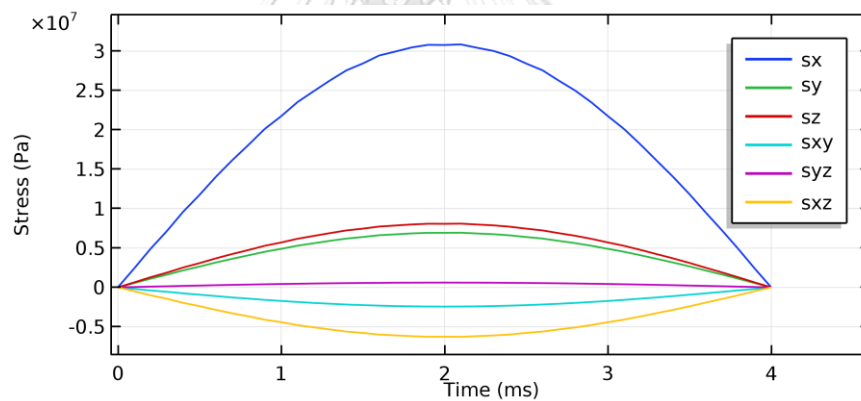


รูปที่ 7.28 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ

ระบายวิกฤตของครอบฟันที่ร่องกลางครอบฟันดังแสดงในรูปที่ 7.29 มีระบายที่เริ่มจากร่องกลางครอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง และระบายผ่ากลางตามรากฟัน โดยองค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.30

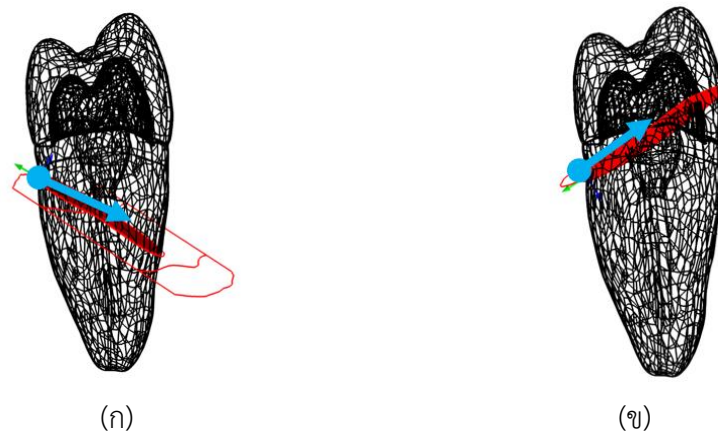


รูปที่ 7.29 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณห้องพิน (ก) ระนาบที่จากร่องกลาง
 ครอบพินลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดพินสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากพิน
 กรณีครอบพินทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน

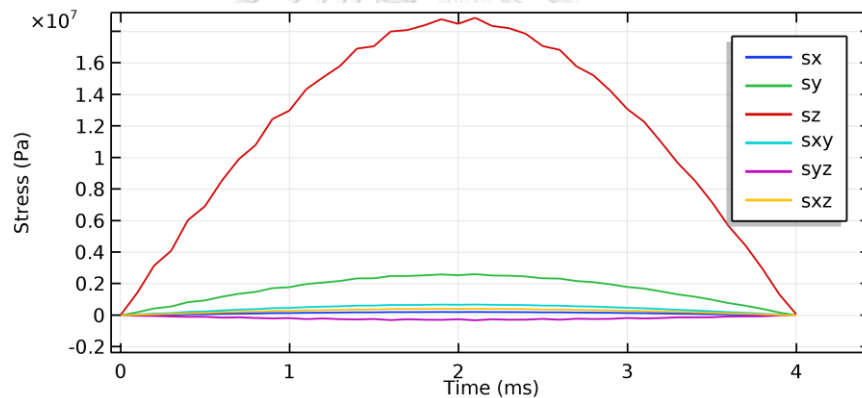


รูปที่ 7.30 องค์กรประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณห้องพินเนื้อพิน
 กรณีครอบพินทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 100 นิวตัน

ในขณะที่ระนาบวิกฤตของเนื้อพินมีดังต่อไปนี้ ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟพินฝั่งยอดต่ำดังแสดง
 ในรูปที่ 7.31 มีระนาบเอียงลงไปยังยอดพินสูง และระนาบเอียงขึ้นไปทางครอบพิน องค์กรประกอบ
 ความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.32

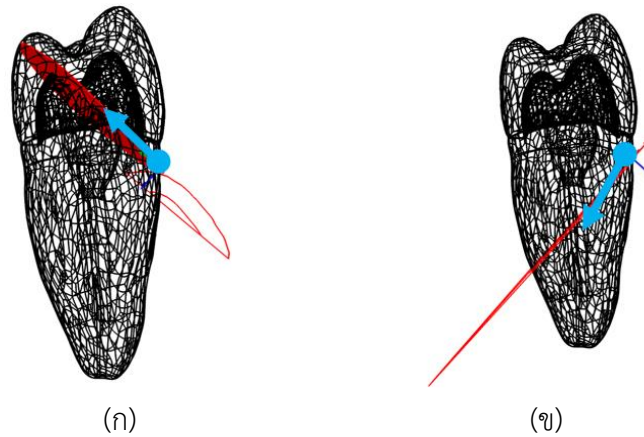


รูปที่ 7.31 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระนาบเอียงขึ้นไปทางคอฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซรามิกและถูกแรงกด 100 นิวตัน

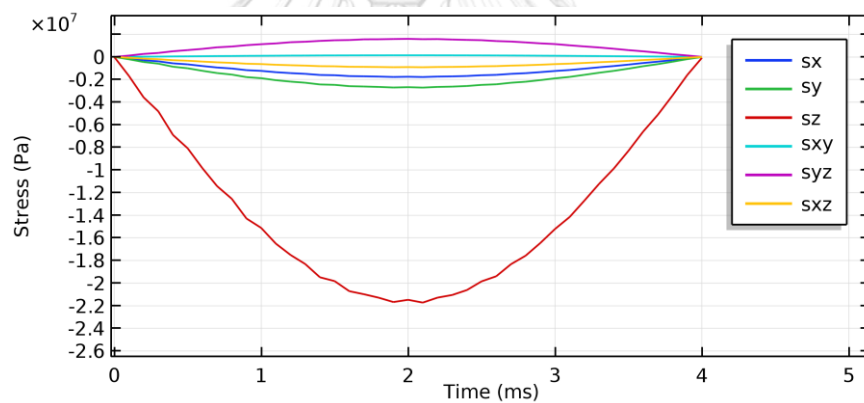


รูปที่ 7.32 องค์กรประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากเซรามิกและถูกแรงกด 100 นิวตัน

ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูงดังแสดงในรูปที่ 7.33 มีระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำและระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ องค์กรประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.34

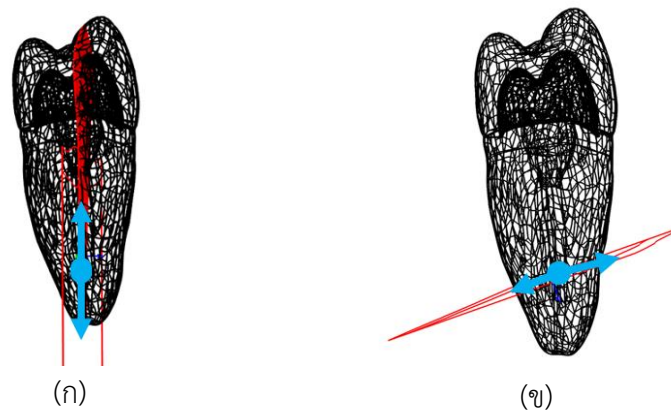


รูปที่ 7.33 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระบายเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ (ข) ระบายเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟัน ทำจากเซรามิกและถูกแรงกด 100 นิวตัน

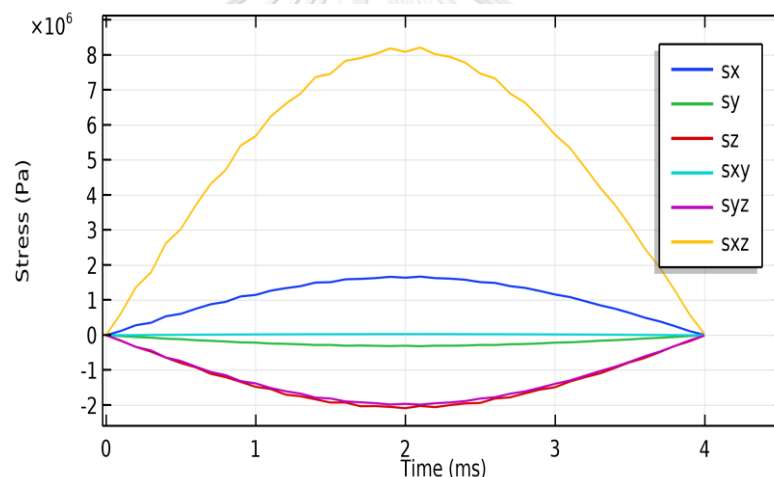


รูปที่ 7.34 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง

ระบายวิกฤตของเนื้อฟันที่ร่องตามแนวยาวของรากฟันดังแสดงในรูปที่ 7.35 มีระนาบผ่ากลางตามยาวของรากฟัน และระนาบตัดขวางตามรากฟัน องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.36



รูปที่ 7.35 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระบายผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระบายตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำ จากเซรามิคเหนียวและถูกแรงกด 100 นิวตัน

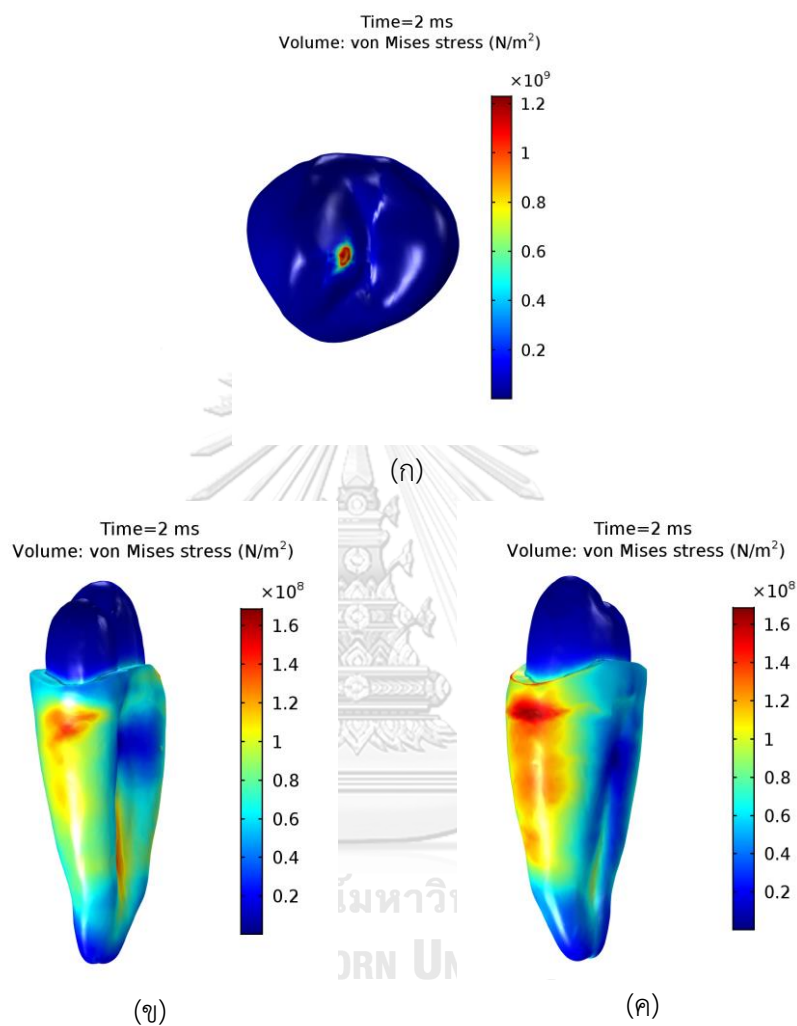


รูปที่ 7.36 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนว ยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซรามิคเหนียวและถูกแรงกด 100 นิวตัน

7.2.2 กรณีแรง 800 นิวตัน กดยอดสูง

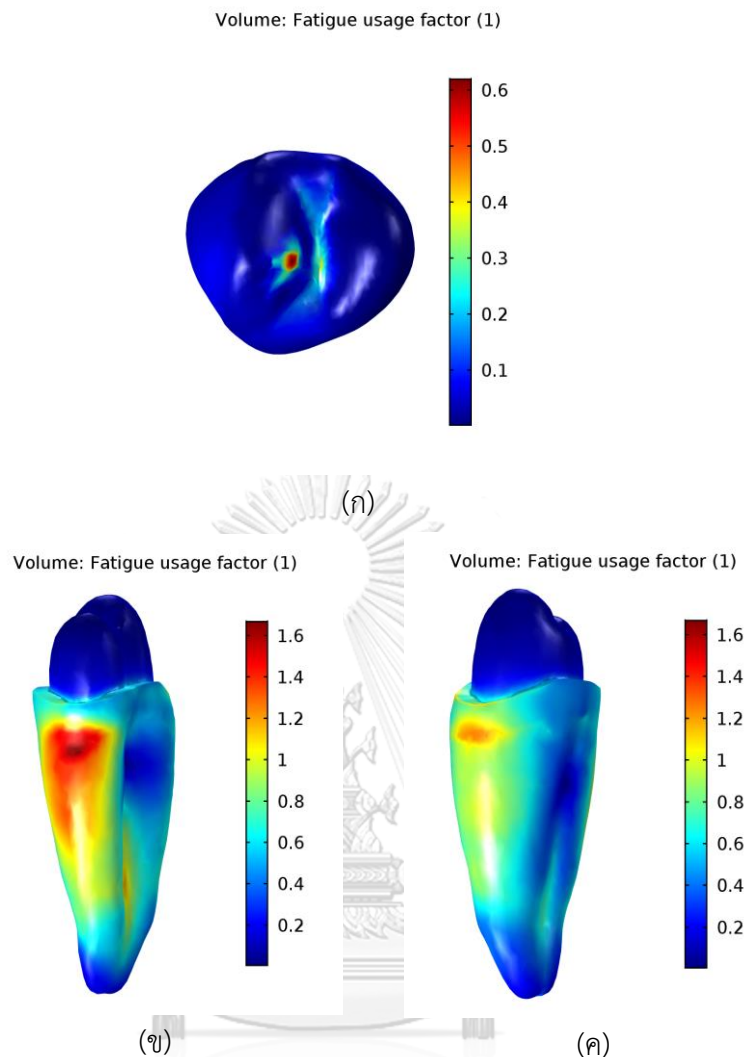
การวิเคราะห์ความเค้นในรูปของความเค้น von Mises ของกรณีนี้ดังแสดงในรูปที่ 7.37 พบว่าความเค้นในครอบฟันมีความเข้มของความเค้น (stress concentration) มากที่บริเวณที่มีแรงกระทำ โดยมีความเค้น von Mises มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1842.9 MPa นอกจากนี้บริเวณที่มีความเข้มของความเค้นคือบริเวณร่องฟันตรงกลาง โดยมีความเค้น von Mises มีค่าสูงสุดเท่ากับ 209.37 MPa ในขณะที่ความเค้นที่เกิดในเนื้อฟันนั้นความเข้มของความเค้นมีมากบริเวณคอฟันตามแนวยอดฟันสูง และต่ำพอดี และร่องตามแนวยาวของรากฟัน โดยจุดที่มีความเค้น von Mises มีค่าสูงสุดเท่ากับ

175.67 MPa ที่บริเวณคอปั้นฝั่งยอดสูง รองลงมาคือความเค้น von Mises มีค่าเท่ากับ 130.23 MPa ที่บริเวณคอปั้นฝั่งยอดต่ำ และความเค้น von Mises มีค่าเท่ากับ 121.34 MPa ที่บริเวณร่องตามยาวของรากฟัน



รูปที่ 7.37 ความเค้น von Mises ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณี ครอบฟันทำจากเซอร์โคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ความล้มเหลวจากความเค้นที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.38 พบว่าสำหรับครอบฟัน จุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้มเหลวมากที่สุดคือบริเวณที่แรงมากระทำโดยตรง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.6765 รองลงมาคือบริเวณร่องฟัน โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 0.4485 ในขณะที่จุดที่มีโอกาสเสียหายจากความล้มเหลวที่สุดในเนื้อฟันคือบริเวณคอปั้นฝั่งยอดฟันเล็ก โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.757 รองลงคือบริเวณคอปั้นฝั่งยอดฟันสูง โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.2329 ส่วนสุดท้ายคือบริเวณร่องตามยาวของรากฟันซึ่งมีค่า F.U.F. สูงสุดเท่ากับ 1.213



รูปที่ 7.38 F.U.F. ของ (ก) ครอบฟัน (ข) เนื้อฟันฝั่ง (ค) เนื้อฟันฝั่ง กรณีครอบฟันทำจากเซอร์โคเนีย และถูกแรงกด 800 นิวตัน

การวิเคราะห์แต่ละตำแหน่งที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของแต่ละบริเวณที่มีความเข้มของความเค้น ปรากฏจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบที่สามารถรับได้ ระบุनावิกฤตและแสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา เพื่อวิเคราะห์ความเค้นองค์ประกอบใดมีผลต่อความล้าที่เกิดขึ้นมากที่สุด โดยเป็นบริเวณที่ทำการวิเคราะห์คือจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดของครอบฟันจะพิจารณาบริเวณที่แรงกระทำและร่องฟัน สำหรับเนื้อฟันจะพิจารณาที่คอฟันฝั่งยอดฟันเล็ก คอฟันฝั่งยอดฟันสูง และร่องตามยาวของรากฟัน

เมื่อนำ F.U.F. ไปแปลงหาค่า f แล้วเพื่อนำไปเทียบในเส้นโค้ง f - n ของแต่ละวัสดุเพื่อหาอายุใช้งานของแต่ละวัสดุดังแสดงในตารางที่ 7.4 เมื่อพิจารณาค่า F.U.F. ที่เกิดจากการกระจายตัวของ

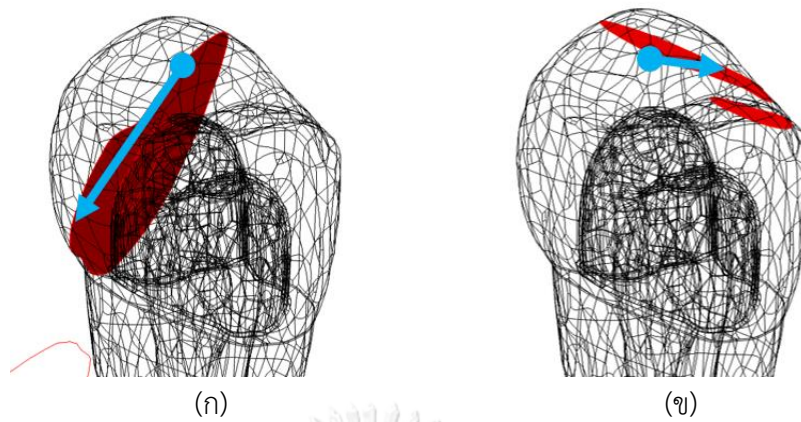
ความเค้นมีค่ามากกว่า 1 ที่ทุก ๆ จุดจะพบว่า ภายใต้สภาวะแรงกด 800 นิวตัน จำนวนรอบที่ครอบฟันสามารถรับได้น้อยที่สุดคือบริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันเล็กมีจำนวนรอบที่น้อยที่สุด โดยมีค่า F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้มีค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 7.4 F.U.F. สูงสุดและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ของแต่ละบริเวณ กรณีครอบฟันทำจาก เซอร์โคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน

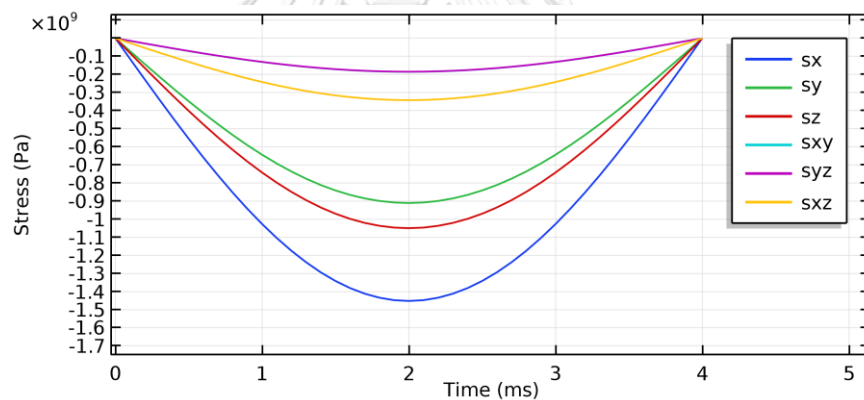
องค์ประกอบ	บริเวณที่เกิด	F.U.F.	จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ (รอบ)
ครอบฟัน (เซอร์โคเนีย)	จุดที่โดนแรงกระทำ	0.6765	มากกว่า 10^6
	ร่องฟัน	0.4485	
เนื้อฟัน	คอฟันฝั่งยอดฟันเล็ก	1.757	8,335
	คอฟันฝั่งยอดฟันสูง	1.3229	95,586
	ร่องตามยาวของรากฟัน	1.213	380,341

สุดท้ายคือการแสดงระนาบวิกฤตและองค์ประกอบความเค้นในจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุดแต่ละบริเวณ เพื่อหามุมที่รอยแตกเริ่มต้น โดยระนาบวิกฤตดังกล่าวสามารถมีมากกว่า 1 ระนาบได้ มีดังนี้

ระนาบวิกฤตของครอบฟันที่บริเวณที่แรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 7.39 มีระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำและมีทิศทางรอยแตกไปที่บ่าของเนื้อฟัน และระนาบที่ตัดขวางยอดฟันใหญ่ไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม องค์ประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.40

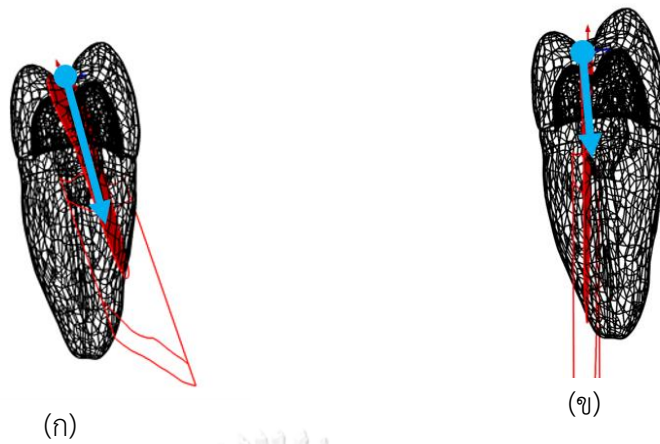


รูปที่ 7.39 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ (ก) ระบายเฉียงลงไปยังบ่าฟัน (ข) ระบายเฉียงไปทางฝั่งกระพุ้งแก้ม กรณีครอบฟันทำจากเซอร์โคเนีย และถูกแรงกด 800 นิวตัน

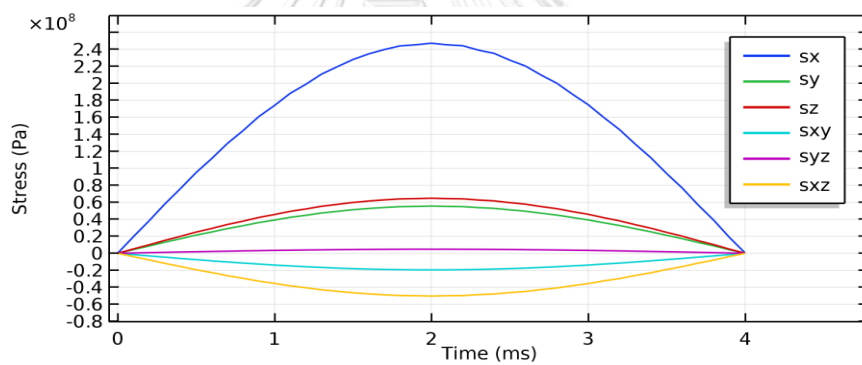


รูปที่ 7.40 องค์กรประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณที่โดนแรงกระทำ

ระบายวิกฤตของครอบฟันที่ร่องกลางครอบฟันดังแสดงในรูปที่ 7.41 มีระบายที่เริ่มจากร่องกลางครอบฟันลงไปและมีแนวเฉียงไปทางด้านยอดฟันสูง และระบายผ่ากลางตามรากฟัน องค์กรประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.42

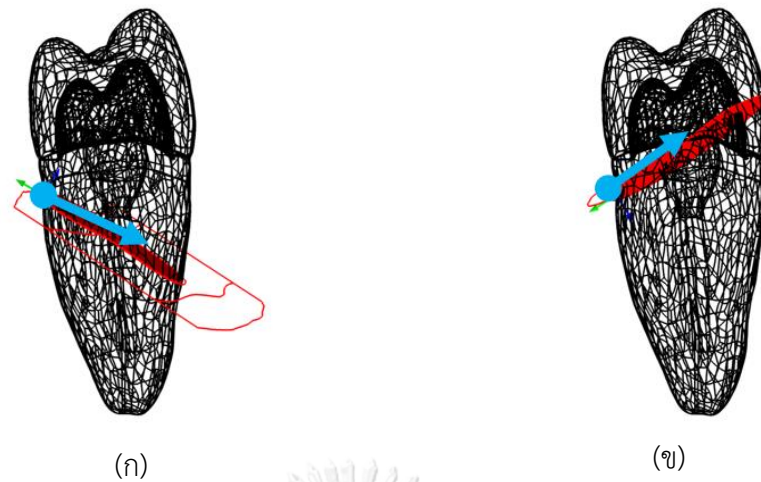


รูปที่ 7.41 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน (ก) ระนาบที่จากร่องกลางครอบฟันลงไปและมีแนวเอียงไปทางด้านยอดฟันสูง (ข) ระนาบผ่ากลางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซรามิคเหนียวและถูกแรงกด 800 นิวตัน

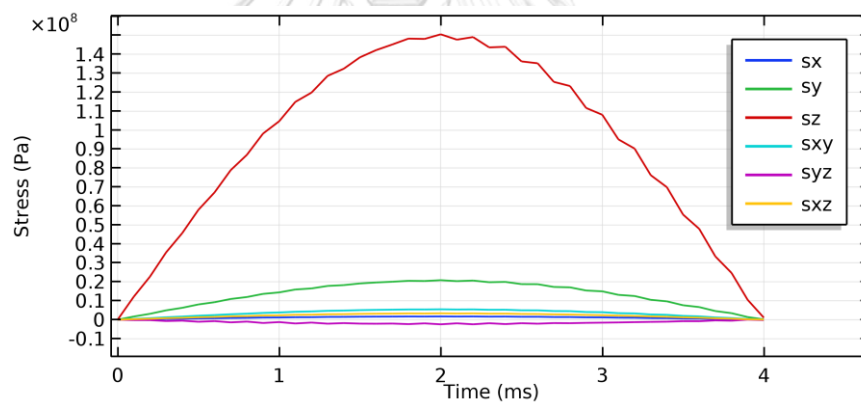


รูปที่ 7.42 องค์กรประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซรามิคเหนียวและถูกแรงกด 800 นิวตัน

ในขณะที่ระนาบวิกฤตของเนื้อฟันเป็นดังนี้ ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำดังแสดงในรูปที่ 7.43 มีระนาบเอียงลงไปยังทางด้านยอดฟันสูง และระนาบเอียงขึ้นไปทางครอบฟัน องค์กรประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.44

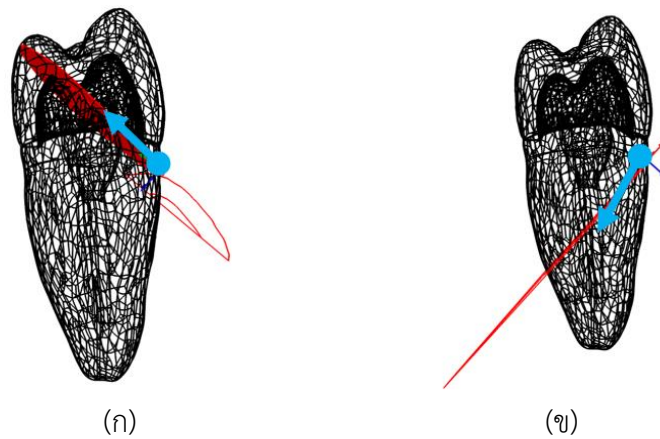


รูปที่ 7.43 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ (ก) ระบายวิกฤต บริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง มีระนาบเอียงลงไปทางยอดฟันสูง (ข) ระบายเอียงขึ้นไปทาง คอรอบฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน

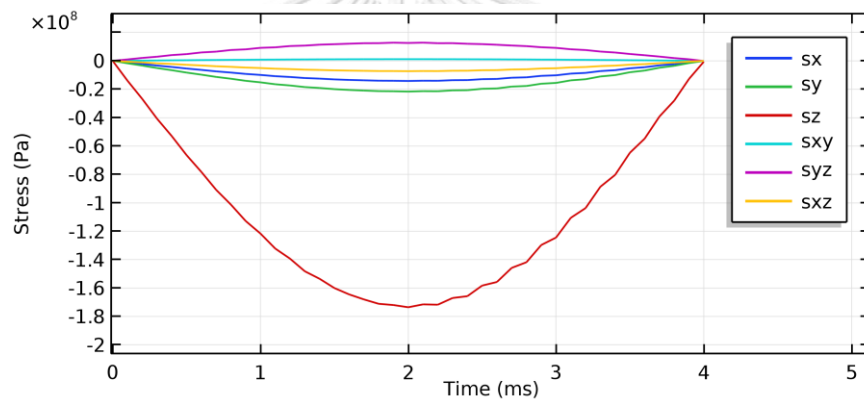


รูปที่ 7.44 องค์กรประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่ง ยอดฟันสูง กรณีครอบฟันทำจากเซอริโคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน

ระบายวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูงแสดงในรูปที่ 7.45 มีระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ และระบายเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ องค์กรประกอบความเค้นของจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 7.46

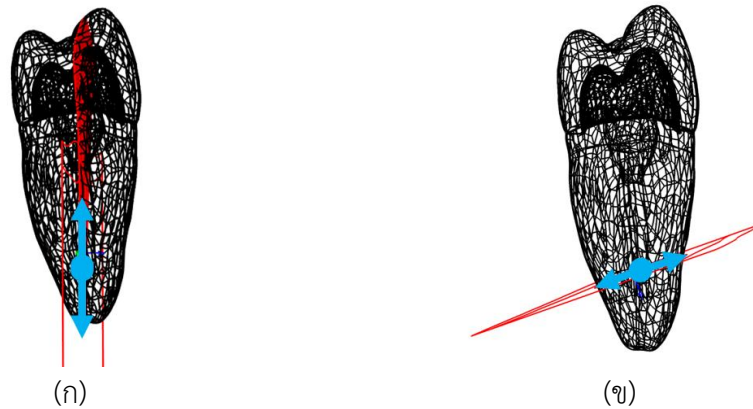


รูปที่ 7.45 ระนาบวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันสูง (ก) ระนาบเอียงขึ้นไปทางยอดฟันต่ำ (ข) ระนาบเอียงลงไปยังรากฟันฝั่งยอดฟันต่ำ กรณีครอบฟันทำจากเซอร์โคเนียและถูกแรงกด 800 นิวตัน

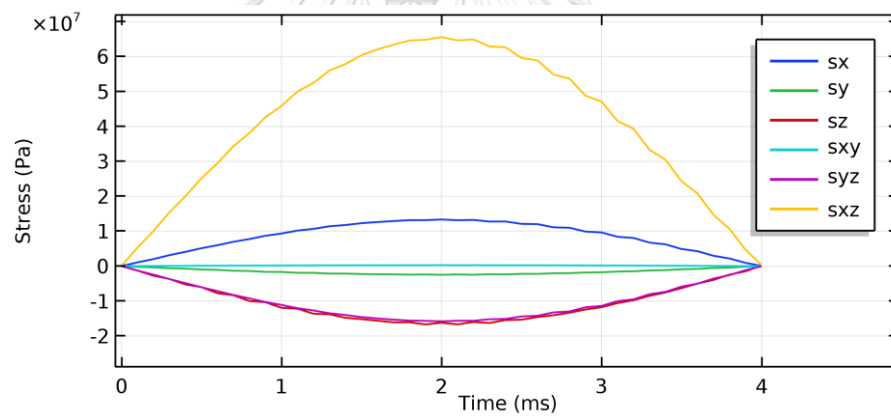


รูปที่ 7.46 องค์กรประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณคอฟันฝั่งยอดฟันต่ำ

ระนาบวิกฤตของเนื้อฟันที่ร่องตามแนวยาวของรากฟันดังแสดงในรูปที่ 7.47 มีระนาบผ่ากลางตามยาวของรากฟัน และระนาบตัดขวางตามรากฟัน และองค์กรประกอบความเค้นของจุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7.48



รูปที่ 7.47 ระบายวิกฤตของจุดที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน (ก) ระบายผ่ากลางตามยาวของรากฟัน (ข) ระบายตัดขวางตามรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซรามิคเหนียว และถูกแรงกด 800 นิวตัน



รูปที่ 7.48 องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาของที่มีค่า F.U.F. สูงสุด บริเวณร่องตามแนวยาวของรากฟัน กรณีครอบฟันทำจากเซรามิคเหนียวและถูกแรงกด 800 นิวตัน

บทที่ 8 การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยส่วนหนึ่งวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในครอบฟันโดยพิจารณาจากความเค้น แต่ในงานวิจัยอีกหลาย ๆ งาน พบว่าฟันที่ผ่านการครอบเกิดความเสียหายหรือรอยแตกจากแรงที่ยังไม่ถึงจุดแตกหักโดยแรงดังกล่าวมีลักษณะเป็นแรงซ้ำ ๆ กัน ดังนั้นการพิจารณาความล้าจึงเป็นที่สนใจในการพิจารณาจำนวนรอบของภาระกับรอยแตกของฟันที่ผ่านการครอบ เพื่อใช้ศึกษาแนวทางการศึกษาการออกแบบครอบฟัน รูปแบบการกรอฟันและวัสดุที่ใช้ในการครอบฟัน

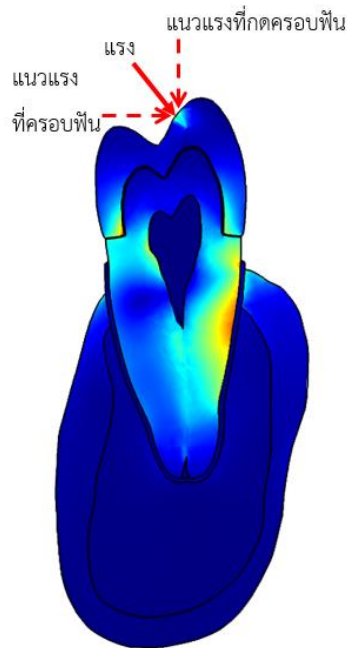
บทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของการศึกษา โดยส่วนแรกกล่าวถึงการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ความล้าและเปรียบเทียบระนาบวิกฤตกับรอยแตกทางคลินิก ส่วนที่สามเป็นการพิจารณาความแตกต่างของการวิเคราะห์ความเสียหายโดยพิจารณาความเค้นและความล้า

8.1 การวิเคราะห์ความเค้นในแบบจำลอง

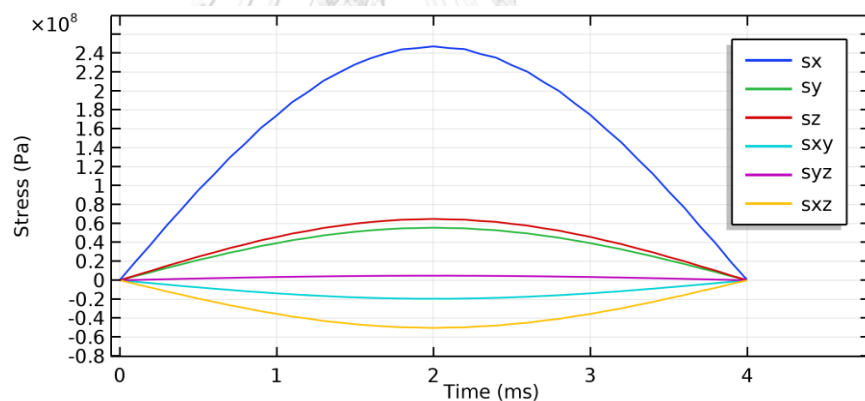
จากผลการวิเคราะห์ความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเค้น von Mises บนครอบฟันมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันสำหรับกรณีที่ได้รับภาระขนาด 100 นิวตัน หรือ 800 นิวตัน แม้มีขนาดแรงกระทำและวัสดุครอบที่แตกต่างกัน สำหรับในวัสดุครอบเดียวกันและแรงกระทำที่แตกต่างกันก็จะมีลักษณะการกระจายความเค้นที่ลักษณะใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบกรณีแรงกระทำเท่ากันแต่วัสดุครอบคนละชนิด พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในฟันที่ครอบด้วยเซรามิกที่มีความแข็งแรงและความหนาแน่นมากกว่ามีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าเนื่องจากผลของความหน่วงทำให้วัสดุที่มีมวลหรือความหนาแน่นมากกว่าได้รับผลของแรงพลศาสตร์มากกว่า

ความเค้นที่ปรากฏที่ครอบฟันมีการกระจายของความเค้นมากที่สุดคือตำแหน่งที่ถูกแรงกระทำ เนื่องจากแรงดังกล่าวกระทำบนพื้นที่ขนาดเล็ก ส่วนที่มีการกระจายของความเค้นมากรองลงมาคือบริเวณร่องฟันตรงกลาง ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นร่องตรงกึ่งกลางของครอบฟันและเป็นขอบเขตแบ่งยอดฟันของฟันกรามน้อย ทำให้แรงที่กระทำบนยอดสูงเพียงยอดเดียวเป็นการถ่างยอดฟันทั้งสองออกจากกัน ยอดฟันสูงถูกกดและถ่างออกโดยแรงกระทำ ในขณะที่ส่วนอื่นของครอบฟันถูกยึดกับเนื้อฟันด้วยซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8.1 โดยสิ่งที่แสดงถึงผลของแนวแรงดังกล่าวสังเกตได้จากองค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของบริเวณร่องฟันที่แสดงในรูปที่ 8.2 ความเค้นในระนาบ $x-z$ และตามแกน x ที่มีค่าสูงเกิดจากแรงในแนวนอน ในขณะที่แรงในแนวตั้งก่อให้เกิดความเค้นตามแกน z และความเค้นตามระนาบ $y-z$ จำนวนมาก



รูปที่ 8.1 แผนภาพแสดงแนวแรงที่กระทำต่อครอปปั่น

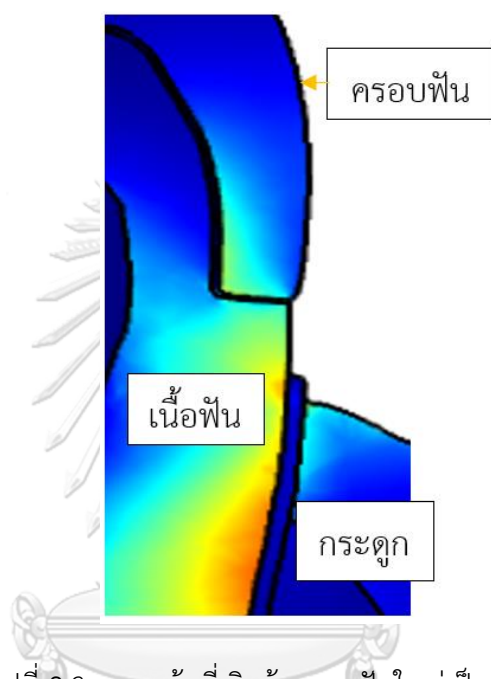


รูปที่ 8.2 ลักษณะกราฟความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาบริเวณรองเท้า

เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟอง แรงที่กระทำบนครอปปั่นไม่ได้ถูกส่งผ่านซีเมนต์ไปสู่เนื้อฟองจนเกิดการกระจายของความเค้นที่เนื้อฟองที่ถูกครอบ แต่ไปกระจายความเค้นที่บริเวณคอปั่น เนื่องจากครอปปั่นมีความหนาในระดับหนึ่งประกอบกับวัสดุมีความแข็งเกร็งมาก รวมถึงความลึกของบ่าที่ทำการครอบ ทำให้แรงที่กระทำกระจายไปสู่เนื้อฟองผ่านชั้นซีเมนต์มีการกระจายแรงไปที่บ่าแล้วไปสู่การกระจายความเค้นที่คอปั่นของเนื้อฟอง

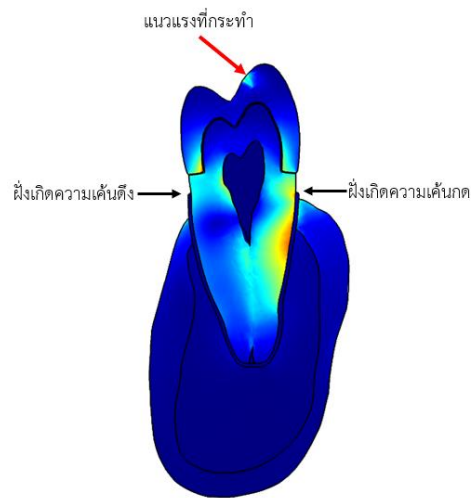
ความเค้นที่ปรากฏในเนื้อฟองบริเวณที่ติดกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์นั้นไม่ว่าจะฝั่งยอดสูงหรือฝั่งยอดต่ำ เกิดจากการที่ฟองได้รับภาระ ครอปปั่นคือส่วนแรกที่ส่งแรงผ่านมายังฟอง ต่อมาแรงจากเคลือบ

ฟันส่งผ่านคือเนื้อฟัน ทั้งนี้ครอบฟันมีค่ามอดุลัสที่สูงมาก และมีผิวสัมผัสระหว่างครอบฟันกับซีเมนต์ และซีเมนต์กับเนื้อฟันเป็นแบบยึดติด ทำให้ครอบฟันและเนื้อฟันที่ติดกับเคลือบฟันมีการเปลี่ยนรูปร่างน้อย รวมถึงเนื้อฟันที่ติดกับชั้นเอ็นยึดปริทันต์ที่มีผิวสัมผัสแบบยึดติดต้องออกแรงต้านไม่ให้ฟันเคลื่อนที่ ส่งผลให้การเปลี่ยนรูปไปเกิดที่บริเวณเนื้อฟันที่ไม่ติดกับบริเวณใดหรือบริเวณคอฟันดังแสดงในรูปที่ 8.3 ความเค้นที่เกิดเป็นความเค้นกดมีการกระจายความเค้นอัดเป็นวงโดยที่ผิวมีความเค้นมากที่สุด



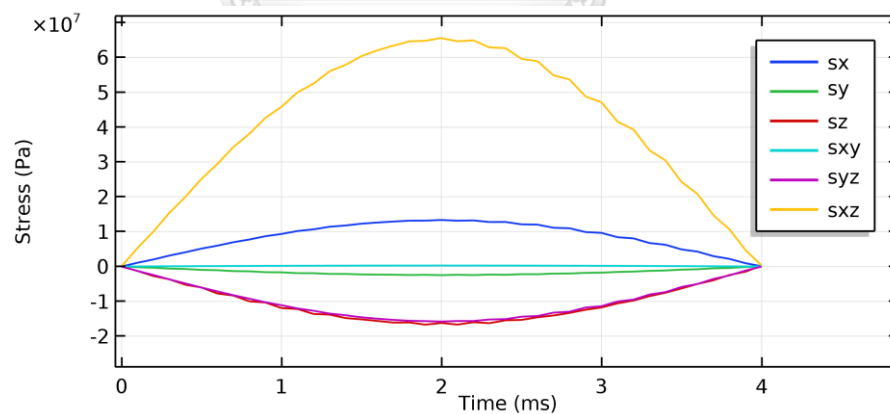
รูปที่ 8.3 ความเค้นที่เกิดด้านยอดฟันใหญ่เป็นวง

สำหรับเกิดความเค้นที่เกิดที่ฝั่ง buccal และ lingual ฝั่งยอดสูงมีความเค้นมากกว่าฝั่งยอดต่ำดังแสดงในรูปที่ 8.4 เนื่องจากฝั่งยอดสูงอยู่ใกล้กับแนวแรงมากกว่ายอดต่ำ ทำให้เกิดความเค้นกดที่เกิดจากแรงกดและโมเมนต์ที่ตัวฟันออกแรงต้าน ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ยอดต่ำเป็นความเค้นที่เกิดจากแรงกดที่ยอดสูง ทำให้ความเค้นที่เกิดมีลักษณะเป็นความเค้นดึงที่บริเวณยอดฟันต่ำ



รูปที่ 8.4 ลักษณะความเค้นที่เกิดจากแรงที่กระทำ

บริเวณสุดท้ายคือบริเวณร่องตามรากฟัน บริเวณดังกล่าวมีความเค้นสูง เกิดจากเมื่อแรงที่กระทำเหมือนเป็นการโยกและกดตัวฟันลงไปบนกระดูก ทำให้เนื้อฟันได้รับแรงต้านจากกระดูก ขากรรไกรที่มีค่าความแข็งแรงที่สูง รวมไปถึงผลของรูปร่างของร่องที่ลักษณะแคบและลึก ทำให้มีการกระจายตัวของความเค้นที่ร่องฝั่งงนอกมีค่าสูง สิ่งที่แสดงถึงพฤติกรรมดังกล่าวสามารถสังเกตได้จากองค์ประกอบความเค้น ดังแสดงในรูปที่ 8.5 ความเค้นตามระนาบ $x-z$ และตามแกน x แสดงถึงการดำเนินการเคลื่อนที่ของเนื้อฟันโดยกระดูกกราม



รูปที่ 8.5 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นบริเวณร่องตามรากฟัน

8.2 การวิเคราะห์ความล้ม

การวิเคราะห์ความล้มโดยใช้แบบจำลองของฟินเลย์มีผลที่น่าสนใจ 3 ประเด็น คือ บริเวณที่มีโอกาสความเสียหายจากความล้ม จำนวนรอบที่วัสดุจะสามารถรับได้ ระบายวิกฤตที่มีโอกาสการเกิดรอยแตกมากที่สุด การวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การหาว่ากรอบฟันและเนื้อฟันที่ผ่านการกรอมีโอกาสเสียหายมากน้อยเพียงใด โดยจะเปรียบเทียบกับข้อมูลการแตกหักทางคลินิกของกรอบฟันเซรามิกต่อไป โดยพิจารณาฟันที่อยู่ในสภาวะการบดเคี้ยวปกติและการกัดฟันของคนนอนกัดฟัน โดยกำหนดให้แรงกดบนยอดฟันมีขนาด 100 และ 800 นิวตันตามลำดับ

ในหัวข้อนี้ขอแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งกล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟินเลย์ของกรอบฟันและเนื้อฟันที่ผ่านการกรอและการเปรียบเทียบระบายวิกฤตของบริเวณที่มีโอกาสแตกหักต่าง ๆ กับผลทางคลินิก ซึ่งการเปรียบเทียบดังกล่าวบอกถึงลักษณะการแตกหักโดยรวมที่เกิดจากการทดลองในอดีตหรือการเก็บข้อมูลทางคลินิก ส่วนที่สองคือจำนวนรอบที่วัสดุกรอบและเนื้อฟันจะสามารถรับได้ โดยเป็นการเปรียบเทียบว่าบริเวณใดและส่วนใดของวัสดุที่มีโอกาสเสียหายจากความล้มมากกว่ากัน

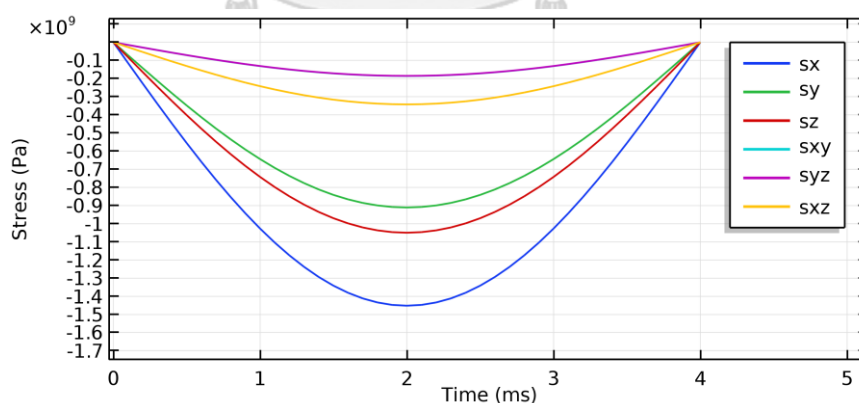
8.2.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟินเลย์และเปรียบเทียบระบายวิกฤตกับการแตกหัก

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ความล้มของวัสดุในรูปของ F.U.F. หรือพารามิเตอร์ฟินเลย์ของวัสดุกรอบฟันและเนื้อฟัน โดยปกติการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมจะคำนึงถึงค่าสูงสุดที่ทำให้เกิดความเสียหายเพียงค่าเดียว แต่เนื่องจากฟันที่ผ่านการบูรณะในการใช้งานจริงหรือตัวอย่างฟันที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการมีความแตกต่างของรูปร่างและสมบัติของวัสดุประกอบ ประกอบกับคุณสมบัติความล้มที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาจุดอื่นที่มีค่าสูงรองลงมาในบริเวณที่มีการกระจายตัวของความเค้นด้วย เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณระบายวิกฤตซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลแล้วในบริเวณที่มีค่า F.U.F. สูงสุดในแต่ละบริเวณที่เกิดการกระจายตัวของความเค้นมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้น ทำให้ตัวแปรพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะเป็นองค์ประกอบของความเค้นที่ทำให้เกิดพารามิเตอร์ฟินเลย์ที่แตกต่างกัน หรือระบายวิกฤตที่มีระนาบใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟินเลย์ที่บริเวณจุดต่าง ๆ 5 บริเวณคือ จุดที่แรงกระทำ ร่องฟันของกรอบฟัน คอฟันฝั่งยอดต่ำ คอฟันฝั่งยอดสูง และร่องตามรากฟัน โดยวิเคราะห์ว่าองค์ประกอบความเค้นใดก่อให้เกิดพารามิเตอร์ฟินเลย์และระบายวิกฤตที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบระบายวิกฤตที่เกิดขึ้น ซึ่งการเปรียบเทียบดังกล่าวบอกถึงลักษณะการแตกหักโดยรวมที่เกิดจากการทดลองในอดีตหรือการเก็บข้อมูลทางคลินิก

การวิเคราะห์ระนาบวิกฤตสามารถวิเคราะห์จากองค์ประกอบความเค้นทั้ง 6 องค์ประกอบ ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นความเค้นใน 3 ระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ความเค้นที่เกิดในระนาบอื่น เป็นไปตามการแปลงความเค้น ทำให้สามารถหาความเค้นที่เกิดบนระนาบใด ๆ จากการแปลงความเค้นได้

วัสดุกรอบฟันทั้งลิเทียมไดซิลิเกตและเซอโรโคเนีย มีค่าถ่วงน้ำหนักของฟินเล่ย์ประมาณ 1 ซึ่งหมายถึงอิทธิพลของความเค้นตั้งฉากและช่วงของค่าความเค้นเฉือนมีค่าเท่า ๆ กัน ดังนั้นระนาบวิกฤตของกรอบฟันจึงควรเป็นระนาบที่ใกล้เคียงกับระนาบที่มีความเค้นตั้งฉากสูงสุดมีค่ามากที่สุด การพิจารณาระนาบวิกฤตของวัสดุกรอบฟันสามารถพิจารณาจากความเค้นบนระนาบ x, y และ z ที่เกิดขึ้นว่าความเค้นในระนาบใดเป็นระนาบใกล้เคียงกับระนาบที่มีความเค้นตั้งฉากมีค่าสูง

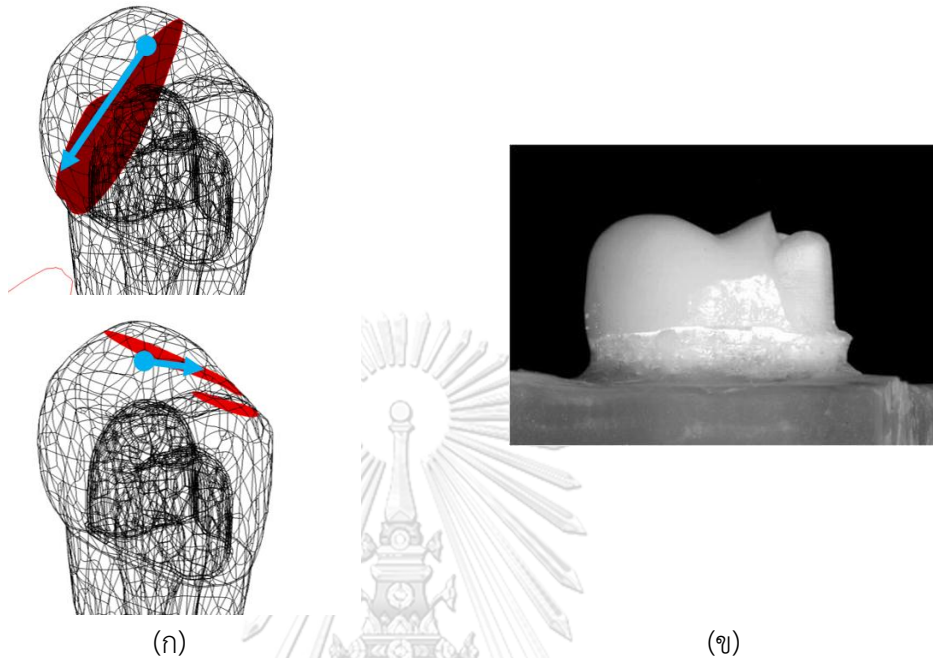
เมื่อพิจารณาความล้าของกรอบฟัน จุดที่สัมผัสกับแรงโดยตรงมีโอกาสเสียหายมากที่สุด เนื่องจากการที่ถูกกระทำโดยแรง สันเกตได้จากองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณที่ถูกแรงกระทำตามที่แสดงในรูปที่ 8.6 ความเค้นที่เกิดขึ้นมีขนาดสูงสุดในแบบจำลองทั้งหมด ดังนั้นจากกราฟแสดงให้เห็นถึงขนาดของความเค้นตามแกน x, y และ z ด้วยขนาดที่มากที่สุด อย่างไรก็ตามความเค้นที่เกิดเป็นความเค้นกดซึ่งทำให้ค่าความเค้นตั้งฉากสูงสุดในทุกระนาบมีค่าเป็น 0 ทำให้ความกว้างของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความล้า ดังนั้นระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้นจึงควรเป็นระนาบที่มีขนาดของความเค้นเฉือนมากที่สุด ดังนั้น ระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้นจึงมีระนาบที่ทำมุมเอียงจากแนวแรง



รูปที่ 8.6 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณที่ถูกแรงกระทำ

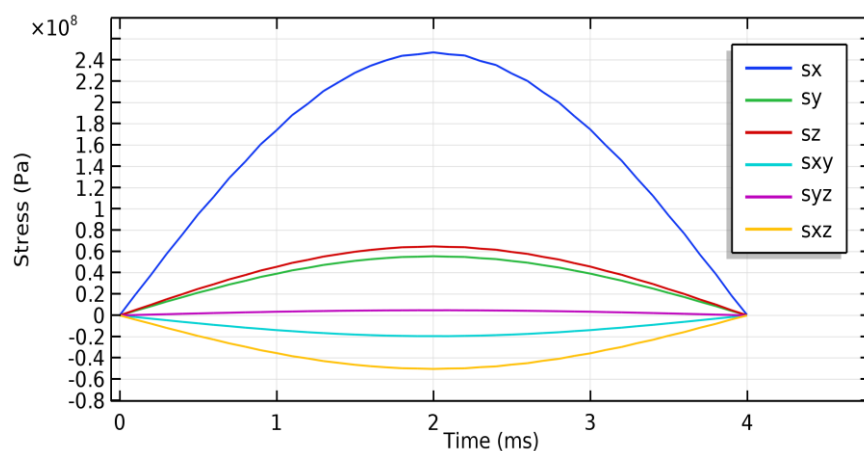
บริเวณที่ถูกแรงกระทำเป็นบริเวณที่จำนวนรอบภาระที่น้อยที่สุด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลทางคลินิก พบว่ามีลักษณะที่เหมือนการแตกของกรอบฟันจากกรอบฟันไปสู่ป่าของฟันที่ผ่านการกรอในการทดลองของ Seydler et al. [40] ดังแสดงในรูปที่ 8.7 การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษา

แรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของฟันกรามน้อยที่ผ่านการครอบฟัน โดยวัสดุที่ใช้ทำครอบฟันเป็นลิเทียมไดซิลิเกต โดยผลการศึกษาพบลักษณะของรอยแตกดังกล่าวที่เกิดจากการรับภาระของแรงโดยตรง



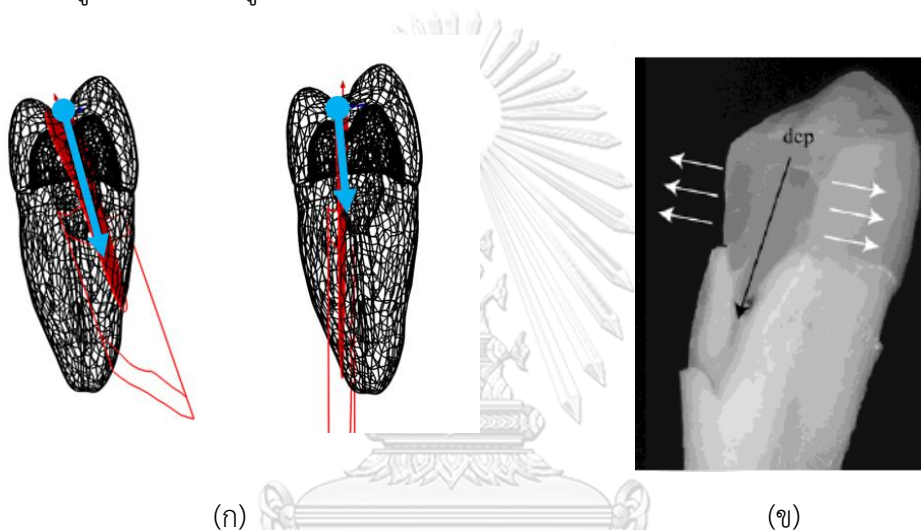
รูปที่ 8.7 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณที่ถูกแรงกระทำ (ข) รอยแตกบริเวณจุดสัมผัสของฟัน [40]

จุดที่มีโอกาสเสียหายรองลงมาของครอบฟันคือบริเวณร่องฟัน โดยจุดดังกล่าวมีลักษณะขององค์ประกอบความเค้นแสดงในรูปที่ 8.8 โดยที่จุดดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากความเค้นตามแกน x และ z ที่มีขนาดที่สูง อีกทั้งยังเป็นความเค้นดึง ระนาบวิกฤตที่เกิดจึงควรมีทิศใกล้เคียงกับแกน x และ z



รูปที่ 8.8 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณที่ร่องฟัน

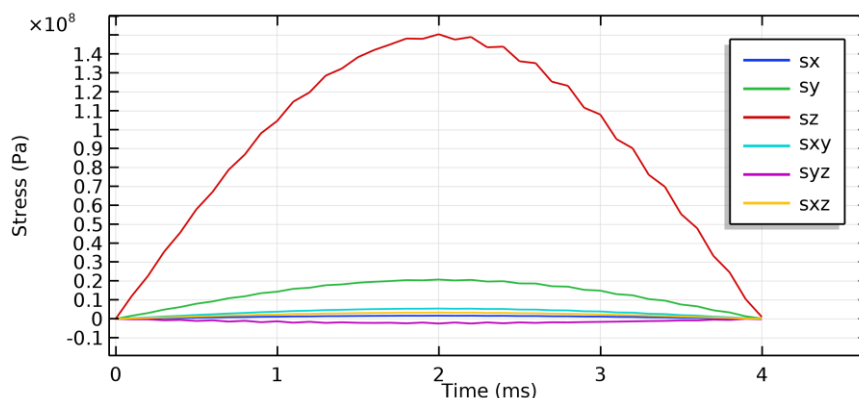
ระนาบวิกฤตดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับผลทางคลินิกพบว่า ลักษณะรอยแตกดังกล่าวเป็นการแตกหักจากร่องฟันไปสู่รากฟันในการศึกษาการแตกหักของฟันที่ผ่านการครอบฟันเซรามิก วิธีการศึกษาคือนำฟันที่แตกหักจากกรณีศึกษาต่าง ๆ มาทำการถ่ายภาพรอยแตกเพื่อวิเคราะห์จุดเริ่มต้นของรอยแตก ลักษณะรอยแตกดังกล่าวพบในกรณีของผู้ป่วยที่ฟันกรามน้อยผ่านการครอบฟันและเกิดการแตกหักจากแรงทางกล พบว่ามีลักษณะรอยแตกเริ่มจากร่องฟันของครอบฟันเซรามิกผ่ากลางลงมาที่เนื้อฟันตามลูกศรที่แสดงในรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณร่องฟัน (ข) รอยแตกบริเวณร่องฟัน [41]

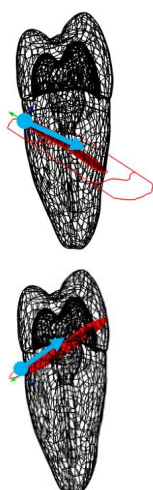
เนื้อฟันมีค่าถ่วงน้ำหนักของฟันเฉลี่ยประมาณ 0.2 ซึ่งหมายถึงอิทธิพลของความเค้นเฉือนมีมากกว่าความเค้นตั้งฉาก ดังนั้นระนาบวิกฤตของครอบฟันจึงควรเป็นระนาบที่มีความเค้นเฉือนที่มีค่าสูง ระนาบวิกฤตของวัสดุครอบฟันสามารถพิจารณาจากความเค้นบนระนาบ x , y และ z ที่เกิดขึ้นว่าระนาบใดเป็นระนาบใกล้เคียงกับระนาบที่ความเค้นเฉือนมีค่าสูง โดยระนาบที่มีความเค้นเฉือนสูงควรใกล้เคียงกับระนาบที่มีความเค้นตั้งฉากมีค่าสูงจากการแปลงความเค้น

ต่อมาเป็นการพิจารณาความล้าในเนื้อฟัน โอกาสที่มีการเสียหายสูงสุดคือบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ โดยจุดดังกล่าวมีลักษณะองค์ประกอบความเค้นดังแสดงในรูปที่ 8.10 โดยที่จุดดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากความเค้นตั้งฉากตามแกน z มีขนาดมากที่สุด ดังนั้นระนาบวิกฤตใกล้เคียงกับแกน z โดยทำมุมเอียงกันแกน z เนื่องจากระนาบวิกฤตที่เกิดควรมีความเค้นเฉือนที่มีค่าสูง

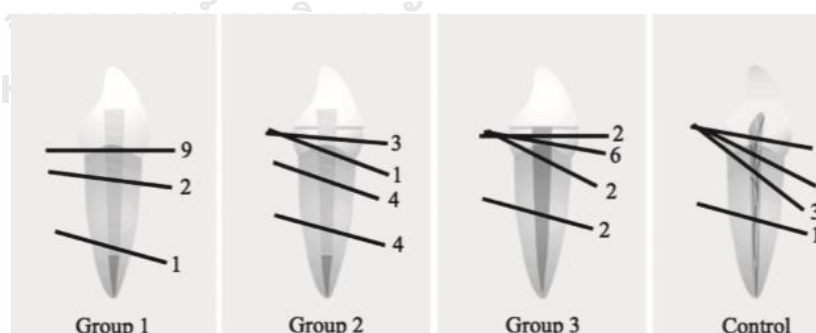


รูปที่ 8.10 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง

เมื่อเปรียบเทียบระนาบวิกฤตดังกล่าวกับผลทางคลินิก พบว่าลักษณะรอยแตกเริ่มจากบริเวณคอฟันสู่รากฟันหรือยอดฟันเหมือนกับการทดลองการแตกหักของครอบฟันของ Leevailoj [42] ที่แสดงในรูปที่ 8.11 ซึ่งเป็นการทดลองฟันตัดล่างที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันที่รับภาระเป็นคาบ เพื่อศึกษาลักษณะการแตกหักของคลองรากฟัน พบว่าเกิดลักษณะการแตกหักที่เนื้อฟัน ฝั่งตรงข้ามกับบริเวณที่แรงกระทำ แม้ฟันที่นำมาเปรียบเทียบจะไม่ใช้ฟันชนิดเดียวกัน แต่แนวแรงกระทำที่เกิดและรอยแตกมีความใกล้เคียงกัน รอยแตกลักษณะดังกล่าวพบได้ยาก เนื่องจากการทดลองดังกล่าวมากเกิดการแยกออกระหว่างครอบฟันกับซีเมนต์ หรือ เนื้อฟันกับซีเมนต์ส่งผลให้เงื่อนไขกำหนดเปลี่ยนไปและเกิดรอยแตกที่แตกต่างกัน



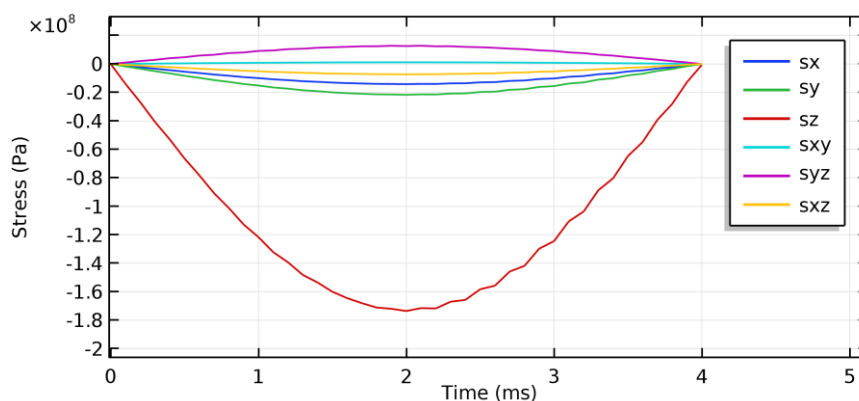
(ก)



(ข)

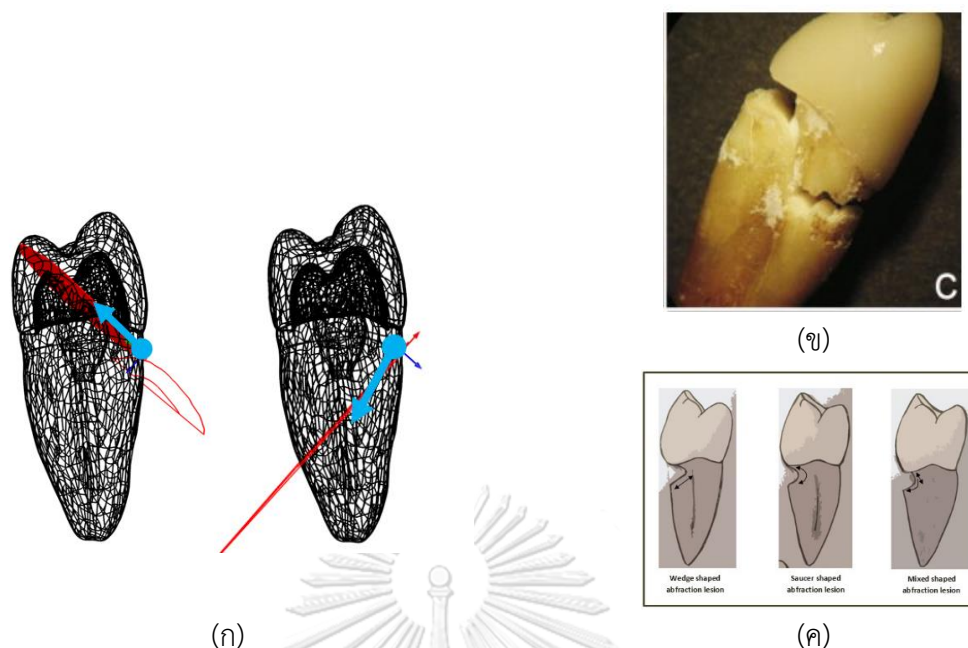
รูปที่ 8.11 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง (ข) รอยแตกบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ [42]

เมื่อพิจารณาความล้าในเนื้อฟัน ส่วนที่มีโอกาสเสียหายรองลงมาคือบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง โดยจุดดังกล่าวมีลักษณะองค์ประกอบความเค้นแสดงในรูปที่ 8.12 จุดดังกล่าวเกิดความเค้นกดในทุกแนวแกน ทำให้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 0 ทำให้ระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้นควรเป็นระนาบที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด



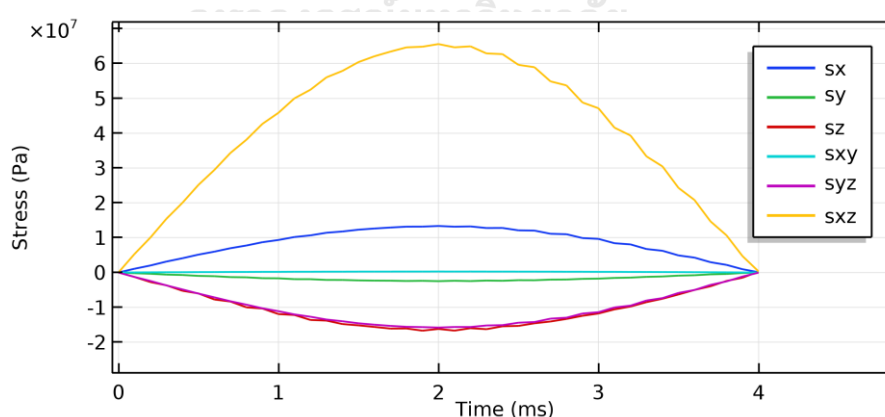
รูปที่ 8.12 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณคอฟันฝั่งยอดต่ำ

เมื่อพิจารณาระนาบวิกฤตวิกฤตเปรียบเทียบกับผลทางการทดลอง พบว่าเกิดการแตกหักที่คอฟันของเนื้อฟันเหมือนกับการทดลองการแตกหักของครอบฟันของ Fragou et al.[43] ตามที่แสดงในรูปที่ 8.13 (ข) ซึ่งเป็นการทดลองของฟันกรามน้อยที่ผ่านการครอบฟันโลหะหรือเซรามิกและการอุดคลองรากฟัน โดยใช้วัสดุต่าง ๆ กัน การศึกษาทำโดยการทดลองนำฟันที่ผ่านการบูรณะแบบต่าง ๆ มาผ่านแรงกดเป็นคาบเพื่อศึกษาการแตกหักของวัสดุบูรณะและตัวฟัน โดยกรณีที่น่ามาเปรียบเทียบคือกรณีฟันกรามน้อยที่ผ่านการครอบฟันเซรามิกที่มีการอุดคลองรากฟัน และอีกรูปแบบหนึ่งเกิดการแตกหักที่ใกล้เคียงกันคือลักษณะของคอฟันสึก แสดงในรูปที่ 8.13 (ค) ซึ่งอาจเกิดรอยแตกเริ่มต้นจากบริเวณดังกล่าว และเมื่อเกิดรอยแตกเริ่มต้นและยังคงรับภาระแบบเดิม เนื้อฟันบริเวณดังกล่าวอาจเกิดการสึกกร่อนของเนื้อฟันบริเวณดังกล่าวจากการได้รับแรงกด



รูปที่ 8.13 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง (ข) รอยแตกบริเวณคอฟันฝั่งยอดสูง [43] (ค) รอยแตกของคอฟันสึก [44]

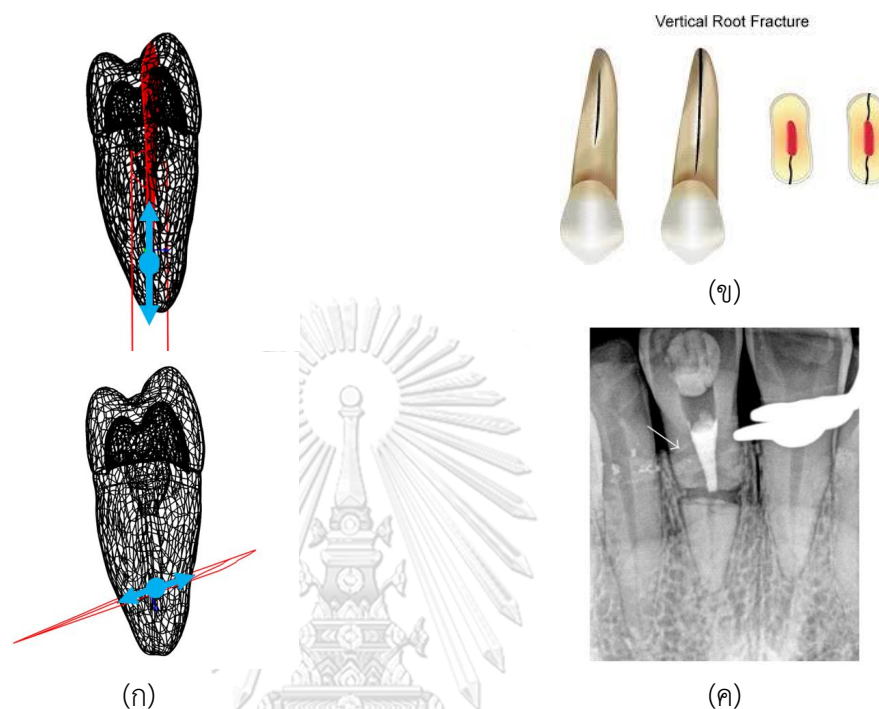
ต่อมาเป็นการพิจารณาความล้มในเนื้อฟัน โอกาสที่มีการเสียหายน้อยสุดคือบริเวณร่องตามรากฟัน โดยจุดดังกล่าวมีลักษณะองค์ประกอบความเค้นตามที่แสดงในรูปที่ 8.14 โดยที่จุดดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากในระนาบ $x-y$ มีขนาดมากที่สุดระนาบวิกฤตใกล้เคียงกับระนาบ $x-z$ ระนาบที่เกิดความเสียหายใกล้เคียงกับความเค้นเฉือนสูงสุด



รูปที่ 8.14 ลักษณะองค์ประกอบความเค้นของจุดที่มี F.U.F. สูงสุดในบริเวณร่องตามรากฟัน

เมื่อพิจารณาระนาบวิกฤตบริเวณร่องตามรากฟัน ระนาบดังกล่าวเมื่อเทียบกับผลทางคลินิกพบว่าเทียบได้กับลักษณะเป็นการแตกหักของรากฟันตามแนวยาว (vertical root fracture) [45]

แสดงในรูปที่ 8.15 (ข) และเกิดการแตกหักของรากฟันตามแนวขวาง (horizontal root fracture) ดังแสดงในรูปที่ 8.15 (ค) ซึ่งอ้างอิงการแตกหักดังกล่าวมาจากการศึกษาของ Rothom et al. [46] ซึ่งศึกษาการถ่ายภาพโดยใช้รังสีในการศึกษาการแตกหักของฟัน



รูปที่ 8.15 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ระนาบวิกฤตบริเวณตามรากฟัน (ข) การแตกหักของรากฟันตามแนวยาว [45] (ค) รอยแตกบริเวณตามรากฟัน [46]

8.2.2 จำนวนรอบที่วัสดุครอบและเนื้อฟันสามารถรับได้

ในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องหาจำนวนรอบของภาระที่ส่วนต่าง ๆ ของฟัน ทั้งเนื้อฟันที่หลุดจากการกรอและครอบฟันจะสามารถรับได้ก่อนเกิดความเสียหาย เหตุที่ต้องหาจำนวนรอบของภาระดังกล่าวก็เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบว่าส่วนใดของฟันที่ผ่านการบูรณะจะเสียหายก่อน และจะช่วยให้สามารถทำนายอายุการใช้งานของการบูรณะฟันนี้ได้

เมื่อพิจารณาจำนวนรอบของภาระที่วัสดุส่วนเนื้อฟันและครอบฟันสามารถรับได้ในกรณีที่แรงกระทำมีค่าเป็น 100 นิวตัน พบว่าวัสดุครอบทั้งสองชนิดไม่ว่าจะเป็นลิเทียมไดซิลิเกตหรือเซอร์โคเนียมีจำนวนรอบของภาระที่รับได้มากกว่า 10^6 รอบ ซึ่งเป็นรอบที่กำหนดเป็นเขตจำกัดการคงทนในการศึกษา นี้ โดยขนาดของ f ที่คำนวณได้มีขนาดน้อยกว่า f ที่เป็นเขตจำกัดคงทนได้ค่อนข้างมากสังเกตได้จาก F.U.F. ที่บริเวณต่าง ๆ มีค่าไม่เกิน 1 ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าแนวแรงและขนาดแรงดังกล่าวไม่ทำให้เกิดรอยแตกในฟันที่ผ่านการบูรณะ

หากแรงกระทำเพิ่มจาก 100 นิวตัน เป็น 800 นิวตัน พื้นที่ครอบด้วยลิเทียมไดซลิเกตและเซอร์โคเนียมีจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 จำนวนรอบที่สามารถรับได้ของครอบฟันและเนื้อฟันในกรณีที่ถูกกระทำด้วยแรง 800 นิวตัน

องค์ประกอบ	บริเวณที่เกิด	ลิเทียมไดซลิเกต	เซอร์โคเนีย
		จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ (รอบ)	จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ (รอบ)
ครอบฟัน	จุดที่โดนแรงกระทำ	น้อยกว่า 10^3	มากกว่า 10^6
	ร่องฟัน	9,143	
เนื้อฟัน	คอฟันฝั่งยอดฟันเล็ก	8,428	8,335
	คอฟันฝั่งยอดฟันสูง	93,100	95,586
	ร่องตามยาวของรากฟัน	344,677	380,341

เมื่อพิจารณาความล้มในกรณีแรงกระทำเท่ากับ 800 นิวตัน และวัสดุครอบฟันเป็นลิเทียมไดซลิเกต พบว่าเมื่อพิจารณาจากจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ ส่วนที่เกิดการเสียหายจากความล้าก่อนคือบริเวณที่แรงกระทำ ร่องลงมาคือคอฟันฝั่งยอดเล็ก ร่องฟันของครอบฟัน คอฟันฝั่งยอดสูง และร่องตามรากฟัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความล้มในกรณีแรงกระทำ 800 นิวตัน และวัสดุครอบฟันเป็นเซอร์โคเนีย พบว่าเมื่อพิจารณาจากจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับได้ส่วนที่เกิดการเสียหายจากความล้าก่อนคือคอฟันฝั่งยอดเล็ก ร่องลงมาคือ คอฟันฝั่งยอดสูง ร่องตามรากฟัน ร่องฟันของครอบฟัน และบริเวณที่แรงกระทำ ตามลำดับ

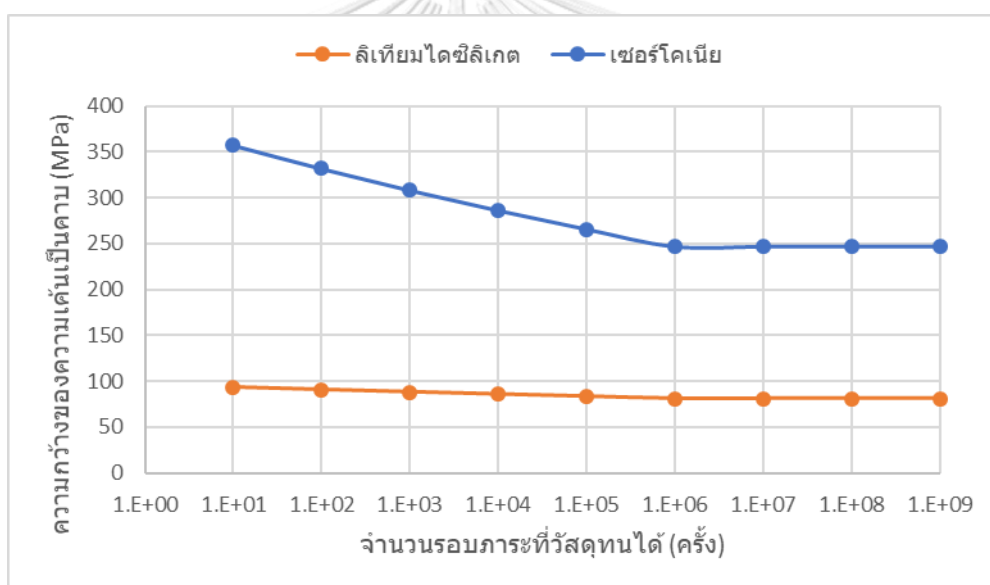
ดังนั้นการพิจารณากรณีแรงกระทำเท่ากับ 800 นิวตัน ฟันที่มีวัสดุครอบที่ต่างกันจะมีความสามารถในการรับภาระจากแรงซ้ำ ๆ ต่างกัน เนื่องจากสมบัติของวัสดุที่ต่างกัน ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

อิทธิพลของวัสดุครอบที่แตกต่าง

เมื่อพิจารณาจำนวนรอบที่วัสดุส่วนเนื้อฟันและครอบฟันสามารถรับได้ในกรณีของแรง 100 นิวตัน พบว่าวัสดุทั้งสองไม่ว่าในกรณีวัสดุครอบจากลิเทียมไดซลิเกตหรือเซอร์โคเนีย มีอายุการใช้งานมากกว่า 10^6 รอบ ซึ่งเป็นรอบที่กำหนดเป็นเขตจำกัดการคงทนของวิธานิพจน์นี้ โดยขนาดของ f ที่

คำนวณได้มีขนาดน้อยกว่า f ที่เขตจำกัดคงทนได้ค่อนข้างมาก สังเกตได้จากค่า F.U.F. ที่บริเวณต่าง ๆ มีค่าไม่เกิน 1 ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าในแนวแรงและขนาดแรงดังกล่าวไม่สามารถทำให้เกิดรอยแตกจากสภาวะดังกล่าวได้

เมื่อพิจารณาความล้าในกรณีแรงกระทำเท่ากับ 800 นิวตัน ระหว่างกรณีที่เป็นลิเทียมไดซิลิเกตหรือเซอร์โคเนีย พบว่าเมื่อเทียบกับ F.U.F. ในกรณีครอบฟันทำจากลิเทียมไดซิลิเกต ครอบฟันมีอายุการใช้งานน้อยกว่า 10^6 รอบ ในกรณีที่ครอบฟันทำจากเซอร์โคเนียจะมีอายุการใช้งานมากกว่า 10^6 รอบ ทั้งหมดนี้เกิดจากการพิจารณากราฟ f-N และ S-N เมื่อเปรียบเทียบ σ_a แล้วพบว่าเส้นโค้ง S-N ของของลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนียในกรณีที่มีอัตราส่วนความเค้นเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 8.16 ของเซอร์โคเนียมีค่าสูงกว่าของลิเทียมไดซิลิเกต ทุกช่วงประมาณ 3.33 เท่า อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับ F.U.F. เนื้อฟันที่ผ่านการกรอ F.U.F. ของเนื้อฟันมีโอกาสเสียหายมากกว่าครอบฟัน



รูปที่ 8.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้ง S-N ของลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนีย

จากการพิจารณากราฟ S-N วัสดุครอบที่เป็นเซรามิกพบว่าเมื่อเทียบกับมีความชันส่วนที่เป็นจำนวนรอบจำกัดที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับลักษณะกราฟ S-N ของเนื้อฟัน ซึ่งลักษณะกราฟ S-N ดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีความเปราะ เช่น เซรามิก ด้วยลักษณะดังกล่าวทำให้ถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นเกินขีดจำกัดความล้าเพียงเล็กน้อยอาจทำให้อายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นวัสดุครอบฟันเซรามิกที่สามารถทนทานต่อความเสียหายที่เกิดจากความล้าได้ควรมีขีดจำกัดความล้าที่สูง โดยผลของความต่างของสมบัติของวัสดุส่งผลต่อจำนวนรอบที่สามารถรับได้ของเนื้อฟันเพียงเล็กน้อย

8.3 การเปรียบเทียบผลของความเค้น von Mises กับพารามิเตอร์ฟินเลย์

จากผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเค้นใน 3 มิติจะมีความเค้นทั้งหมด 6 องค์ประกอบ โดยส่วนมากการพิจารณาความเสียหายของพินโดยการศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ความเค้นที่เกิดจากความเค้นทั้ง 6 องค์ประกอบ เช่น ความเค้น von Mises เป็นหลักในการทำนายความเสียหายของตัวพิน อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้หลักการของระนาบวิกฤต ซึ่งเป็นการทำนายในรูปของการเกิดรอยแตก ในหัวข้อนี้จึงจะอธิบายถึงความแตกต่างระหว่าง 2 วิธีการว่าส่งผลต่างอย่างไร

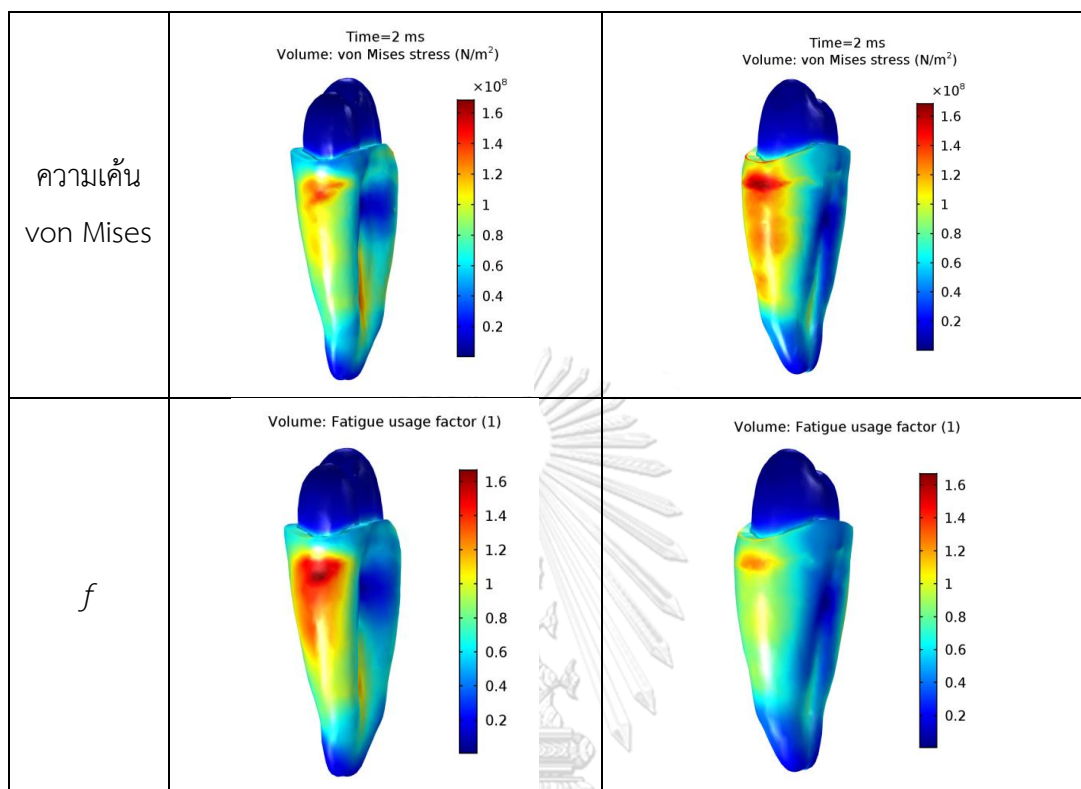
เมื่อเทียบการวิเคราะห์ความเสียหายจาก von Mises และพารามิเตอร์ความล้า f ทั้งสองแนวคิดสามารถบอกถึงบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้ แต่พารามิเตอร์ความล้า f สามารถบอกได้ถึงอายุการใช้ และแนวรอยแตกเบื้องต้น โดยข้อดีดังกล่าวสามารถใช้เพื่อช่วยเป็นแนวทางในการออกแบบการรักษาต่อไป

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณในแต่ละกรณี พบว่ามีความแตกต่างของตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความเสียหายในกรณีของการกดยอดสูงเพียงยอดเดียว การพิจารณาความเสียหายที่ใช้ von Mises และความล้า f เกิดความแตกต่างกันที่บริเวณคอปันฝั่งสูงและต่ำ ความเค้น von Mises แสดงถึงจุดที่มีโอกาสเสียหายมากกว่าคือบริเวณคอปันฝั่งสูง ในขณะที่การใช้พารามิเตอร์ความล้า f พบว่าคอปันฝั่งยอดต่ำมีโอกาสเสียหายมากกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นเพื่อหาสาเหตุการวิเคราะห์ถึงแตกต่างกันนี้จึงต้องทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบความเค้นในหนึ่งรอบภาระของจุดที่มีพารามิเตอร์ความล้า f สูงสุด บริเวณคอปันฝั่งต่ำ และจุดที่มีค่าความเค้น von Mises สูงสุดบริเวณคอปันฝั่งสูง ดังแสดงในตารางที่ 8.2 พบว่าบริเวณฝั่งยอดต่ำมีความเค้นตั้งฉากที่เป็นแรงดึงที่มีขนาดมากที่สุด ในขณะที่จุดที่มีความเค้น von Mises มีค่าสูงสุดนั้นมีความเค้นตั้งฉากเป็นแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ เมื่อพิจารณาสมการ

$$f = \left(\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma \right)_{\max}$$

พบว่าความเค้นตั้งฉากสูงสุดของกรณีความเค้นที่ตั้งฉากเป็นแรงอัด ทำให้ความเค้นตั้งฉากสูงสุดมีค่าเป็น 0 ดังนั้นแสดงว่าระนาบวิกฤตเกิดจากความเค้นเฉือนเท่านั้น หรือในอีกมุมมองหนึ่งสามารถกล่าวได้ว่าความเค้นดึงจะก่อให้เกิดรอยแตกได้มากกว่าความเค้นอัด ในขณะที่อีกฝั่งหนึ่งเกิดแรงอัดเพียงอย่างเดียวแต่รอยแตกมักปรากฏให้เห็นในบริเวณที่มีความเค้นดึง ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้พารามิเตอร์ความล้า f ที่แสดงถึงจุดที่มีโอกาสเสียหายมากกว่าคือ คอปันฝั่งยอดต่ำที่มีความเค้นตั้งฉากเป็นบวก ในขณะที่ความเค้นที่บริเวณคอปันยอดสูงมีขนาดที่มากกว่าเนื่องจากตำแหน่งของแรงที่ใกล้กว่า รวมถึงเหตุผลอื่นที่ได้กล่าวไปทำให้ความเค้น von Mises มองว่าจะเกิดความเสียหายมากกว่าบริเวณอื่น

ตารางที่ 8.2 การเปรียบเทียบความเค้น von Mises และพารามิเตอร์ความล้า f กรณี 800 นิวตัน ที่มีวัสดุครอบเป็นลิเทียมไดซิลิเกต



เมื่อความเค้นที่ได้จากการแปลงความเค้นในระนาบต่าง ๆ มีโอกาสเป็นบวกหรือลบ อย่างไรก็ตามขนาดและทิศทางของความเค้นตั้งฉากส่วนใหญ่เป็นลบ ความเค้นตั้งฉากของระนาบที่เปลี่ยนไปก็ยังคงอยู่ในช่วงลบอยู่ ดังนั้นความเค้นตั้งฉากสูงสุดของแต่ละระนาบที่ในหนึ่งรอบภาระ เท่ากับ 0 MPa ดังนั้นพารามิเตอร์ของฟินเลย์จึงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนเป็นหลัก

การพิจารณาความเสียหายที่เกิดจากความล้าแตกต่างจากการพิจารณาความเค้น เนื่องจากพิจารณาในรูปของความล้าให้น้ำหนักต่อบริเวณที่เกิดแรงดึงที่เกิดให้ทรอยแตกมากกว่าบริเวณที่เกิดแรงกด ในขณะที่การพิจารณาความเค้นที่ทำให้เกิดการเสียหายอย่างเดียวนั้นให้น้ำหนักกับขนาดมากกว่า

บทที่ 9 สรุป

9.1 สรุปผลการศึกษา

ในปัจจุบันระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ความเค้นหรือความเครียดที่เกิดขึ้นในพื่นในกรณีต่าง ๆ ไม่ว่าจะพื่นที่ผ่านการบูรณะแบบต่าง ๆ เช่น การใส่รากพื่นเทียม พื่นที่ผ่านการอุดหรือการครอบ เนื่องจากใช้ทรัพยากรในการศึกษาที่น้อยกว่า แม้วิธีการดังกล่าวไม่สามารถให้ผลที่แม่นยำ แต่ยังคงสามารถศึกษาแนวโน้มที่เกิดขึ้นในพื่นได้ในระดับหนึ่ง ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวใช้ควบคู่กับความรู้ด้านทันตกรรมในการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับพื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแตกหักที่เกิดขึ้นในพื่น

ความเสียหายส่วนใหญ่ในพื่นเกิดจากการรับภาระที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ เช่น การบดเคี้ยวปกติ หรือการกัดพื่นของผู้ที่มีอาการนอนกัดพื่น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสนใจในการนำวิธีวิเคราะห์ความล้าที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในงานทางทันตกรรม โดยใช้ข้อมูลทางความเค้นจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการที่เลือกใช้ในการทำนายความล้าคือแนวคิดของฟินเลย์ หลักการคือความเสียหายที่เกิดจากความล้าเกิดจากความกว้างของความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากสูงสุดที่ระนาบหนึ่งที่ทำให้พารามิเตอร์ความเสียหายมีค่าสูงสุด โดยระนาบดังกล่าวคือระนาบวิกฤตซึ่งถูกพิจารณาให้เป็นระนาบรอยแตกเริ่มต้นและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับความล้าของวัตถุที่สนใจได้

ขอบเขตในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือพื่นที่ผ่านการครอบด้วยครอบพื่นที่ทำจากวัสดุเซรามิก เนื่องจากครอบพื่นเซรามิกได้รับความนิยมในปัจจุบันจากเหตุผลทางด้านความสวยงามและไม่ก่อให้เกิดการแพ้ในคนไข้บางราย อย่างไรก็ตามวัสดุเซรามิกยังคงเป็นวัสดุที่มีความเปราะ ดังนั้นการพิจารณารอยแตกเริ่มต้นและการประมาณจำนวนรอบที่ครอบพื่นและเนื้อพื่นสามารถรับได้จะทำให้ทันตแพทย์สามารถพัฒนาแนวทางรักษาต่อไปได้

กรณีศึกษาที่สนใจคือครอบพื่นที่ทำจากลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนีย ได้รับแรงกระทำตั้งฉากกับพื่นผิวบนยอดพื่นสูง ในขณะที่กระดุกกรามไม่เคลื่อนที่ ขนาดของแรงมี 2 กรณีคือ 100 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงของพื่นที่บดเคี้ยวโดยปกติ และแรง 800 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงสูงสุดของพื่นที่เกิดในผู้ป่วยนอนกัดพื่น

การสร้างแบบจำลองพื่นที่ผ่านการครอบ เริ่มจากการนำข้อมูลรูปร่างของพื่นจากการสแกนและนำมาปรับปรุงโดยโปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม สำหรับสร้างส่วนประกอบของแบบจำลองพื่นตามหลักการทางทันตกรรม โดยแบ่งได้ 5 ส่วนคือ เคลือบพื่น เนื้อพื่น เนื้อเยื่อโพรงประสาท ชั้นเอ็นยึดปริทันต์ และกระดุกกราม 2 ส่วน คือกระดุกพ่องน้ำและกระดุกเนื้อแน่น ต่อมาคือการสร้าง

แบบจำลองฟันที่ผ่านการครอบด้วยครอบฟันเซรามิก โดยลักษณะฟันที่ผ่านการครอบสร้างได้โดยการนำส่วนเคลือบฟันออกทั้งหมด และลดขนาดของเนื้อฟันที่อยู่เหนือรากฟันให้สามารถคลุมด้วยครอบฟันที่มีพื้นฐานจากเคลือบฟัน โดยระหว่างชั้นครอบฟันและเนื้อฟันที่ผ่านการกรอนั้นมีชั้นซีเมนต์บาง ๆ เป็นตัวยึด

หลักการหาระนาบวิกฤตจากการพิจารณาองค์ประกอบความเค้นในระนาบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยใช้หลักการของการแปลงความเค้นตามแกน 2 ครั้งเพื่อหาระนาบที่พารามิเตอร์ฟินเลย์มีค่ามากที่สุด โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ในการหาระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้นของจุดที่ค่าพารามิเตอร์ฟินเลย์มีค่ามากที่สุด โดยสอบทวนกับค่าพารามิเตอร์ของฟินเลย์จากการคำนวณของโปรแกรม COMSOL

ผลการวิเคราะห์พบว่าเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวก่อให้เกิดการโยกของฟันและครอบฟันส่วนที่ไม่อยู่ในกระดูกและเนื้อฟันมีความแข็งเกร็งที่น้อยกว่าครอบฟันและกระดูกกราม ทำให้ความเค้นกระจายตัวบริเวณคอฟันของเนื้อฟัน ความเค้นในครอบฟันส่วนมากกระจายตัวในบริเวณที่มีแรงกระทำ และบริเวณร่องฟันของครอบฟันจากรูปร่างที่เป็นร่องทำให้เกิดการกระจายของความเค้นที่มีค่าสูง

การเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีฟันครอบด้วยวัสดุเซรามิกทั้งสองชนิด พบว่าความเค้นที่เกิดในลิเทียมไดซิลิเกตเกิดขึ้นน้อยกว่าเซอร์โคเนีย เนื่องจากลิเทียมไดซิลิเกตมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าทำให้ได้รับผลของแรงพลศาสตร์น้อยกว่าด้วย

เมื่อพิจารณาระนาบวิกฤตที่เกิดจากความล้าพบว่าระนาบวิกฤตดังกล่าวมีลักษณะการวางตัวของระนาบการแตกหักที่คล้ายกับระนาบการแตกหักที่พบได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขขอบเขตใกล้เคียงกันหรือรายงานการแตกหักของฟันทางคลินิก

นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุครอบเซอร์โคเนียสามารถรับความล้าได้ดีกว่าวัสดุลิเทียมไดซิลิเกต อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสองชนิดสามารถทนทานต่อแรงบิดเคี้ยวโดยปกติมากกว่า 10^6 รอบซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสถิติการเคี้ยวแล้วพบว่ามากกว่า 2 ปี สำหรับกรณีแรงมีค่าเท่ากับ 800 นิวตันพบว่าลิเทียมไดซิลิเกตเกิดการรอยแตกที่ครอบฟันก่อน ในขณะที่เซอร์โคเนียเกิดรอยแตกที่บริเวณเนื้อฟันก่อน โดยเกิดจากคุณสมบัติของการทนทานความล้าของลิเทียมไดซิลิเกตที่มีน้อยกว่า อย่างไรก็ตามด้วยผลของแรงพลศาสตร์ที่เกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันทำให้ความเค้นที่เกิดในเนื้อฟันมีมากขึ้นทำให้เนื้อฟันในกรณีการครอบด้วยเซอร์โคเนียมีอายุการใช้งานน้อยกว่าครอบฟันที่เป็นเซอร์โคเนียเล็กน้อย

การใช้ความเค้น von Mises และพารามิเตอร์ฟินเลย์ในการทำนายความเสียหาย ให้ผลการทำนายที่แตกต่างกัน เนื่องจากความเค้น von Mises พิจารณาว่าขนาดของความเค้นทำให้เกิดการ

เสียหายเป็นหลัก ในขณะที่ความล้มพิจารณาความเค้นในรูปแบบที่ทำให้เกิดรอยแตกเป็นหลัก ทำให้ได้ผลการทำนายที่แตกต่างกันได้ เช่น บริเวณที่เกิดความเค้นกดและความเค้นดึง ความล้ม เช่น พารามิเตอร์พินเลย์พิจารณาความเค้นดึงมีโอกาการเสียหายที่มากกว่า แม้ว่าความเค้นกดจะมีขนาดสูงกว่า

9.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลการศึกษาที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์บรรลุจุดประสงค์ของที่ตั้งไว้คือหาวิเคราะห์ความเค้นและพยากรณ์ลักษณะการแตกหัก และจำนวนรอบของการรับภาระก่อนการเสียหายที่เกิดจากความล้มของวัสดุบรณะ สำหรับการบรณะพินแบบการครอบพินด้วยวัสดุบรณะประเภทเซรามิก และเสนอการใช้ความรู้ด้านความล้มโดยวิธีการวิเคราะห์ระนาบวิกฤตโดยใช้สมการของพินเลย์ในการหาอายุการใช้งานในรูปแบบจำนวนรอบและรูปการแตกหักในวัสดุบรณะพินทางทันตกรรม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ที่สำคัญดังนี้

1. เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองของพินที่ผ่านการครอบเซรามิกและการวิเคราะห์ความล้มของการบรณะพินชนิดอื่น ๆ
2. ใช้ข้อมูลความเค้นในการพิจารณาการรอยแตกเริ่มต้นและจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับภาระได้เพื่อเป็นแนวทางในการวินิจฉัยหรือแนวทางในการรักษาแก่ทันตแพทย์ต่อไป
3. ระบุความแตกต่างของการพิจารณาความเค้นและความล้ม ส่งผลต่อการพิจารณาการเสียหายอย่างไร

9.3 ข้อเสนอแนะ

การกำหนดขอบเขตกำหนดของแรงที่กระทำบนพินที่เดียวตลอดนั้นทำให้เกิดความเค้นที่เกิดขึ้นมีขนาดสูงกว่าความเป็นจริง ในขณะที่การบิดเคี้ยวในชีวิตจริงนั้นมีการไถลระหว่างผิวพินทำให้ตำแหน่งของแรงกระทำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงควรมีการจำลองแรงให้สมจริงมากขึ้น

คุณสมบัติของเซรามิกมีช่วงที่เกินขีดจำกัดความล้มมีค่อนข้างน้อย ทำให้เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นเกินขีดจำกัดความล้มเพียงเล็กน้อย จะทำให้จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรับความล้มลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นถ้ามีการทดลองเพื่อสอบทวนผล การทดลองควรมีความแม่นยำที่สูงเพื่อรองรับความอ่อนไหวของความเค้นที่เกิดขึ้น

บรรณานุกรม

1. Merdji, A., Bachir Bouiadjra, B., Ould Chikh, B., Mootanah, R., Aminallah, L., Serier, B., and Muslih, I.M., *Stress distribution in dental prosthesis under an occlusal combined dynamic loading*. *Materials & Design (1980-2015)*, 2012. **36**: p. 705-713.
2. Narendrakumar, U., Mathew, A.T., Iyer, N., Rahman, F., and Manjubala, I., *A 3D Finite Element Analysis Of Dental Implants With Varying Thread Angles*. *Materials Today: Proceedings*, 2018. **5**(5, Part 2): p. 11900-11905.
3. Chang, H.-S., Chen, Y.-C., Hsieh, Y.-D., and Hsu, M.-L., *Stress distribution of two commercial dental implant systems: A three-dimensional finite element analysis*. *Journal of Dental Sciences*, 2013. **8**(3): p. 261-271.
4. Al-Omiri, M.K., Rayyan, M.R., and Abu-Hammad, O., *Stress analysis of endodontically treated teeth restored with post-retained crowns: A finite element analysis study*. *The Journal of the American Dental Association*, 2011. **142**(3): p. 289-300.
5. กัญยวัฒน์ ตวงวิไล, การวิเคราะห์ความเค้นของฟันที่มีการอุดหรือการครอบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, in *2017*. 2017, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 39-42.
6. Li, R.W.K., Chow, T.W., and Matinlinna, J.P., *Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: State of the art*. *Journal of Prosthodontic Research*, 2014. **58**(4): p. 208-216.
7. Sailer, I., Makarov, N.A., Thoma, D.S., Zwahlen, M., and Pjetursson, B.E., *All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs)*. *Dental Materials*, 2015. **31**(6): p. 603-623.
8. Rekow, E.D., Silva, N.R.F.A., Coelho, P.G., Zhang, Y., Guess, P., and Thompson, V.P., *Performance of Dental Ceramics: Challenges for Improvements*. *Journal of Dental Research*, 2011. **90**(8): p. 937-952.

9. Chen, C., Trindade, F.Z., de Jager, N., Kleverlaan, C.J., and Feilzer, A.J., *The fracture resistance of a CAD/CAM Resin Nano Ceramic (RNC) and a CAD ceramic at different thicknesses*. Dental Materials, 2014. **30**(9): p. 954-962.
10. Guess, P.C., Zavanelli, R.A., Silva, N.R., Bonfante, E.A., Coelho, P.G., and Thompson, V.P., *Monolithic CAD/CAM lithium disilicate versus veneered Y-TZP crowns: comparison of failure modes and reliability after fatigue*. Int J Prosthodont, 2010. **23**(5): p. 434-42.
11. Ankyu, S., Nakamura, K., Harada, A., Inagaki, R., Katsuda, Y., Kanno, T., Niwano, Y., Örtengren, U., and Egusa, H., *Influence of microscale expansion and contraction caused by thermal and mechanical fatigue on retentive strength of CAD/CAM-generated resin-based composite crowns*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018. **86**: p. 89-97.
12. Zhang, Y., Sailer, I., and Lawn, B.R., *Fatigue of dental ceramics*. Journal of Dentistry, 2013. **41**(12): p. 1135-1147.
13. Socie, D.F. and Marquis, G.B., *Multiaxial Fatigue*. 2000, Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers
14. Homaei, E., Farhangdoost, K., Tsoi, J.K.H., Matinlinna, J.P., and Pow, E.H.N., *Static and fatigue mechanical behavior of three dental CAD/CAM ceramics*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016. **59**: p. 304-313.
15. Studart, A.R., Filser, F., Kocher, P., and Gauckler, L.J., *In vitro lifetime of dental ceramics under cyclic loading in water*. Biomaterials, 2007. **28**(17): p. 2695-2705.
16. Homaei, E., Jin, X.-Z., Pow, E.H.N., Matinlinna, J.P., Tsoi, J.K.-H., and Farhangdoost, K., *Numerical fatigue analysis of premolars restored by CAD/CAM ceramic crowns*. Dental Materials, 2018. **34**(7): p. e149-e157.
17. Homaei, E., Farhangdoost, K., Pow, E.H.N., Matinlinna, J.P., Akbari, M., and Tsoi, J.K.-H., *Fatigue resistance of monolithic CAD/CAM ceramic crowns on human premolars*. Ceramics International, 2016. **42**(14): p. 15709-15717.
18. Kayabaşı, O., Yüzbasioğlu, E., and Erzincanlı, F., *Static, dynamic and fatigue behaviors of dental implant using finite element method*. Advances in Engineering Software, 2006. **37**(10): p. 649-658.

19. Ausiello, P., Franciosa, P., Martorelli, M., and Watts, D.C., *Numerical fatigue 3D-FE modeling of indirect composite-restored posterior teeth*. Dental Materials, 2011. **27**(5): p. 423-430.
20. Susmel, L., *Three different ways of using the Modified Wöhler Curve Method to perform the multiaxial fatigue assessment of steel and aluminium welded joints*. Engineering Failure Analysis, 2009. **16**(4): p. 1074-1089.
21. Shen, W., Xu, L., He, F., and Song, L., *Notch stress to assess multiaxial fatigue of complex welded structures under non-proportional loading*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019. **102**: p. 151-161.
22. Olsson, E., Olander, A., and Öberg, M., *Fatigue of gears in the finite life regime — Experiments and probabilistic modelling*. Engineering Failure Analysis, 2016. **62**: p. 276-286.
23. ศูนย์วิจัยระบบบริการสุขภาพช่องปากโดยความร่วมมือขององค์การอนามัยโลก มหาวิทยาลัยกรอนนิงเกน ประเทศเนเธอร์แลนด์, *คู่มือการบูรณะฟันโดยสูญเสียเนื้อฟันน้อยที่สุด*. ขอนแก่น: บริษัท ธเนศพัฒนา จำกัด., 2538.
24. Cekic-Nagas, I., Egilmez, F., and Helvacioğlu Kivanç, B., *The Permanent Maxillary and Mandibular Premolar Teeth*. 2018.
25. Hall, A. and Chadwick, G., *Chapter 11 - All-ceramic crowns*, in *Advanced Operative Dentistry*, D. Ricketts and D. Bartlett, Editors. 2011, Churchill Livingstone: Edinburgh. p. 141-150.
26. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, *กลศาสตร์ของวัสดุ*, ed. 2. 2557, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
27. Hibbeler, R.C., *Mechanics of Materials*. 2004, Singapore: rentice Hall Pearson Education South Asia Pte Ltd.
28. Marquis, G.B. and Socie, D.F., *4.09 - Multiaxial Fatigue*, in *Comprehensive Structural Integrity*, I. Milne, R.O. Ritchie, and B. Karihaloo, Editors. 2003, Pergamon: Oxford. p. 221-252.
29. Portugal, I., Olave, M., Urresti, I., Zurutuza, A., López, A., Muñoz-Calvente, M., and Fernández-Canteli, A., *A comparative analysis of multiaxial fatigue models under random loading*. Engineering Structures, 2019. **182**: p. 112-122.

30. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ed. 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
31. Jung, W., Park, S., and Shin, H., *Combining volumetric dental CT and optical scan data for teeth modeling*. Computer-Aided Design, 2015. **67-68**: p. 24-37.
32. Várady, T., Martin, R.R., and Cox, J., *Reverse engineering of geometric models—an introduction*. Computer-Aided Design, 1997. **29**(4): p. 255-268.
33. COMSOL, I., *High-Cycle Fatigue Analysis of a Cylindrical Test Specimen*. USA: COMSOL, Inc.
34. Svärd, H., *A branch and bound algorithm for evaluation of the Findley fatigue criterion*. International Journal of Fatigue, 2015. **73**: p. 27-38.
35. Weber, B., Kenmeugne, B., Clement, J.C., and Robert, J.L., *Improvements of multiaxial fatigue criteria computation for a strong reduction of calculation duration*. Computational Materials Science, 1999. **15**(4): p. 381-399.
36. Nalla, R.K., Kinney, J.H., Marshall, S.J., and Ritchie, R.O., *On the in vitro Fatigue Behavior of Human Dentin: Effect of Mean Stress*. Journal of Dental Research, 2004. **83**(3): p. 211-215.
37. Zhang, L., Wang, Z., Chen, J., Zhou, W., and Zhang, S., *Probabilistic fatigue analysis of all-ceramic crowns based on the finite element method*. Journal of Biomechanics, 2010. **43**(12): p. 2321-2326.
38. Vukicevic, A.M., Zelic, K., Jovicic, G., Djuric, M., and Filipovic, N., *Influence of dental restorations and mastication loadings on dentine fatigue behaviour: Image-based modelling approach*. Journal of Dentistry, 2015. **43**(5): p. 556-567.
39. Oskui, I.Z., Hashemi, A., Jafarzadeh, H., and Kato, A., *Finite element investigation of human maxillary incisor under traumatic loading: Static vs dynamic analysis*. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2018. **155**: p. 121-125.
40. Seydler, B., Rues, S., Müller, D., and Schmitter, M., *In vitro fracture load of monolithic lithium disilicate ceramic molar crowns with different wall thicknesses*. Clinical Oral Investigations, 2014. **18**(4): p. 1165-1171.
41. Scherrer, S., Anselm, H.W., B. Quinn, J., and Quinn, G., *Descriptive Fractography on All Ceramic Dental Crown Failures*. 2011. p. 339-350.

42. Leevailoj, C. and Tunsthansthum, P., *Fracture strength after fatigue loading of root canal treated central incisors restored with post and direct composite build-up*. Vol. 34. 2014. 103-113.
43. Fragou, T., Tortopidis, D., Kontonasaki, E., Evangelinaki, E., Ioannidis, K., Petridis, H., and Koidis, P., *The effect of ferrule on the fracture mode of endodontically treated canines restored with fibre posts and metal-ceramic or all-ceramic crowns*. Journal of Dentistry, 2012. **40**(4): p. 276-285.
44. Elmarakby, A., Abdo Al Sabri, F., A Alharbi, S., and M Halawani, S., *Noncarious Cervical Lesions as Abfraction: Etiology, Diagnosis, and Treatment Modalities of Lesions: A Review Article*. Vol. 07. 2017.
45. American Association of Endodontists, *Cracking the cracked tooth code*. Endodontics: Colleagues for Excellence, Summer 2008.
46. Rothom, R. and Chuveera, P., *Differences in Healing of a Horizontal Root Fracture as Seen on Conventional Periapical Radiography and Cone-Beam Computed Tomography* J Case Reports in Dentistry, 2017. **2017**: p. 5.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. โปรแกรมในการคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์

โปรแกรมนี้ถูกสร้างมาจากโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้คำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของฟินเลย์และองค์ประกอบความเค้นของจุดที่สนใจ โปรแกรมทำการแปลงความเค้นไปที่ระนาบทั้งหมดผ่านการแปลงความเค้นตามแกน 2 ครั้ง เพื่อให้ได้ทุกระนาบผ่านระบบเมตริกซ์ และนำความเค้นตามระนาบที่มีเวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบที่เปลี่ยนไปมาคำนวณ $\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$ เพื่อหาระนาบที่มีค่าสูงสุดทำให้ได้พารามิเตอร์ฟินเลย์และระนาบวิกฤตที่เกิดขึ้น ข้อจำกัดของโปรแกรมนี้คือ องค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนตามเวลานั้นต้องมีลักษณะเป็น proportional loading โปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้

```
syms angle1; syms angle2;
% กำหนดองค์ประกอบความเค้นและค่าถ่วงน้ำหนักของวัสดุ

k=0.2;

stress=[11 0 0;0 730 0;0 0 0];
% เมตริกซ์เปลี่ยนทิศทาง

T1=[cos(deg2rad(angle1)) sin(deg2rad(angle1))0;-sin(deg2rad(angle1)) cos(deg2rad(angle1))
0;0 0 1];

%การแปลงความเค้นตามแกนครั้งที่ 1
stress1=T1.'*stress*T1;
%การแปลงความเค้นตามแกนครั้งที่ 2

T2=[cos(deg2rad(angle2))0 sin(deg2rad(angle2));0 1 0;-sin(deg2rad(angle2))0
cos(deg2rad(angle2));
stress2=T2.'*stress1*T2;
% การคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์

matrix=formula(stress2);
normalstress(angle1,angle2)=matrix(1,1);
shearstress(angle1,angle2)=(matrix(1,2)^2+matrix(1,3)^2)^0.5;
maxshear(angle1,angle2)=shearstress(angle1,angle2)/2;
% การคำนวณพารามิเตอร์ฟินเลย์ของทุกระนาบช่วงมุมละ 1 องศา
[x, y]=meshgrid(0:1:180);
maxnormal=double(normalstress(x, y));
maxnormal1=max(maxnormal, 0);
maxshear1=double(maxshear(x, y));
z=maxnormal1*k+maxshear1;
%วาดกราฟที่มุมที่หมุนตามแกนครั้งที่ 1 มุมที่หมุนตามแกนครั้งที่ 2 และพารามิเตอร์ฟินเลย์

mesh(x, y, z)

%หาค่าสูงสุดของ  $\frac{\Delta\tau}{2} + k\sigma$  และมุมของเวกเตอร์ตั้งฉากของระนาบที่เกิด

[Zmax, Idx]=max(z(:))
[ZmaxRow, ZmaxCol]=ind2sub(size(z), Idx)
```

ภาคผนวก ข. การพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของแต่ละวัสดุ

การพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ ต้องใช้ขีดจำกัดความล้าของรูปแบบภาระที่ต่างกัน เช่น ความเค้นตั้งฉากแต่มีอัตราส่วนความเค้นที่แตกต่างกัน หรือความเค้นตั้งฉากกับความเค้นเฉือน ข้อมูลที่สืบค้นของวัสดุที่พิจารณาความล้าคือกรอบพินและเนื้อพิน มีเพียงขีดจำกัดความล้าของการทดสอบความเค้นตั้งฉากที่มีอัตราส่วนความเค้นที่ต่างกัน ดังนั้นสมการที่ใช้หาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของแต่ละวัสดุคือสมการ

$$\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}} = \frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$$

โดยสมการดังกล่าวแสดงค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ในรูปแบบที่ซับซ้อน จึงใช้การเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ที่ทำให้ฝั่งขวาของสมการเท่ากับฝั่งซ้ายของสมการ เนื้อหาในที่นี้เป็นารแสดงข้อมูลการหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของวัสดุ 3 ชนิด คือ ลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนียซึ่งเป็นวัสดุกรอบและเนื้อพิน

หลักการคือการเปลี่ยนค่า k ในฝั่งขวาของสมการคือ $\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$ เพื่อหาค่า k ที่ทำให้

สมการเป็นจริง โดยใช้การเปรียบเทียบที่ทำให้เกิดค่าความต่างระหว่าง $\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$ ที่เกิดจาก

การเปลี่ยนค่า k กับ $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ ที่เป็นสมบัติของวัสดุ มีค่าน้อยที่สุด โดยคุณสมบัติทางความล้าสรุปใน

ตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 สรุปคุณสมบัติทางความล้าของวัสดุกรอบและเนื้อพิน

วัสดุ	อัตราส่วน ความเค้น	ขีดจำกัดความ ล้า (MPa)	$\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$	k	f (MPa)
ลิเทียมไดซิลิเกต	0.03	81.2	0.547479	1.076	188.53
	-1	148.17			
เซอร์โคเนีย	0.01	247.1	0.565770	0.992	524.27
	-1	428.10			
เนื้อพิน	0.1	43.15	0.811321	0.216	32.92
	-1	53.30			

การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของลิเทียมไดซิลิเกต

ลิเทียมไดซิลิเกตเป็นวัสดุที่ใช้ทำครอบฟันชนิดหนึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ผลการคำนวณคือค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของวัสดุนี้คือ 1.076 ซึ่งเป็นการคำนวณมาจากขีดจำกัดความล้าของความเค้นที่อัตราส่วน 0.03 และ -1 คือ 247.1 และ 428.10 MPa โดย $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ คือ 0.565770 ตารางที่แสดงต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณ โดยคอลัมน์แรกคือค่า k ที่ทำการสุ่มได้ คอลัมน์ที่สองคือค่าของสมการฝั่งขวา คอลัมน์สามคือความต่างระหว่าง $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ และ $\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$ ที่ทำการเปลี่ยนค่า k การคำนวณครั้งแรกโดยทำการเปลี่ยนค่า k จาก 0.02 ถึง 1.12 เพื่อหาค่า k อย่างหยาบ ดังแสดงในตารางที่ ข.2 พบว่าช่วงนี้ค่าความต่างน้อยที่สุดคือ 1.06 ถึง 1.10 จึงทำการสืบค้นค่า k ที่มีความละเอียดขึ้นในตารางที่ ข.3 จึงได้ค่า k เท่ากับ 1.076

การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนีย

เซอร์โคเนียเป็นวัสดุที่ใช้ทำครอบฟันชนิดหนึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ผลการคำนวณคือค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของวัสดุนี้คือ 0.992 ซึ่งเป็นการคำนวณมาจากขีดจำกัดความล้าของความเค้นที่อัตราส่วน 0.01 และ -1 คือ 81.2 และ 148.17 MPa โดย $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ คือ 0.547479 ตารางที่แสดงต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณ โดยคอลัมน์แรกคือค่า k ที่ทำการสุ่มคำนวณ คอลัมน์ที่สองคือค่าของสมการฝั่งขวา คอลัมน์สามคือความต่างระหว่าง $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ และ $\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$ ที่ทำการเปลี่ยนค่า k การคำนวณครั้งแรกโดยทำการเปลี่ยนค่า k 0.02 ถึง 1.12 เพื่อหาค่า k อย่างหยาบ ดังแสดงในตารางที่ ข.4 พบว่าช่วงนี้ค่าความต่างน้อยที่สุดคือ 0.98 ถึง 1.02 จึงทำการสืบค้นค่า k ที่มีความละเอียดขึ้นในตารางที่ ข.5 จึงได้ค่า k เท่ากับ 0.992

การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเนื้อฟัน

ผลการคำนวณคือค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของวัสดุนี้คือ 0.992 ซึ่งเป็นการคำนวณมาจากขีดจำกัดความล้าของความเค้นที่อัตราส่วน 0.01 และ -1 คือ 43.15 และ 53.30 MPa โดย $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ คือ 0.811321 ตารางที่แสดงต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณ โดยคอลัมน์แรกคือค่า k ที่ทำการสุ่มได้ คอลัมน์ที่สองคือค่าของสมการฝั่งขวา คอลัมน์สามคือความต่างระหว่าง $\frac{\sigma_{a,R=0}}{\sigma_{a,R=-1}}$ และ

$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$ ที่ทำการเปลี่ยน k การคำนวณครั้งแรกโดยทำการเปลี่ยนค่า k 0.02 ถึง 1.12 เพื่อ

หาค่า k อย่างหยาบ แสดงในตารางที่ ข.6 พบว่าช่วงนี้ค่าความต่างน้อยที่สุดคือ 0.20 ถึง 0.24 จึงทำการสืบค้นค่า k ที่มีความละเอียดขึ้นในตารางที่ ข.7 จึงได้ค่า k เท่ากับ 0.216



ตารางที่ ข.2 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของลิเทียมไดซลิเกตช่วง 0.02 ถึง 1.12 ช่วงละ 0.02

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง	k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
0.02	0.979033	0.431554	0.58	0.630627	0.083148
0.04	0.958565	0.411086	0.6	0.625007	0.077528
0.06	0.938640	0.391161	0.62	0.619667	0.072187
0.08	0.919295	0.371816	0.64	0.614590	0.067111
0.1	0.900562	0.353083	0.66	0.609764	0.062284
0.12	0.882466	0.334986	0.68	0.605172	0.057693
0.14	0.865024	0.317545	0.7	0.600803	0.053324
0.16	0.848249	0.300770	0.72	0.596645	0.049165
0.18	0.832146	0.284667	0.74	0.592684	0.045205
0.2	0.816716	0.269237	0.76	0.588910	0.041431
0.22	0.801955	0.254475	0.78	0.585314	0.037835
0.24	0.787853	0.240374	0.8	0.581884	0.034405
0.26	0.774399	0.226920	0.82	0.578613	0.031133
0.28	0.761576	0.214097	0.84	0.575490	0.028011
0.3	0.749368	0.201889	0.86	0.572509	0.025030
0.32	0.737753	0.190274	0.88	0.569661	0.022182
0.34	0.726711	0.179232	0.9	0.566940	0.019461
0.36	0.716220	0.168740	0.92	0.564338	0.016859
0.38	0.706255	0.158776	0.94	0.561850	0.014370
0.4	0.696795	0.149316	0.96	0.559468	0.011989
0.42	0.687815	0.140336	0.98	0.557189	0.009710
0.44	0.679293	0.131814	1	0.555006	0.007526
0.46	0.671206	0.123726	1.02	0.552914	0.005434
0.48	0.663531	0.116052	1.04	0.550909	0.003429
0.5	0.656248	0.108769	1.06	0.548986	0.001506
0.52	0.649335	0.101856	1.08	0.547141	0.000338
0.54	0.642774	0.095294	1.1	0.545370	0.002109
0.56	0.636544	0.089064	1.12	0.543671	0.003809

ตารางที่ ข.3 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของลิเทียมไดซิลิเกตช่วง 1.061 ถึง 1.099 ช่วงละ

0.001

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง	k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
1.061	0.548892	0.001412	1.087	0.546513	0.000966
1.062	0.548798	0.001318	1.088	0.546424	0.001055
1.063	0.548704	0.001225	1.089	0.546335	0.001144
1.064	0.548611	0.001131	1.09	0.546247	0.001233
1.065	0.548517	0.001038	1.091	0.546158	0.001321
1.066	0.548424	0.000945	1.092	0.546070	0.001409
1.067	0.548331	0.000852	1.093	0.545982	0.001497
1.068	0.548239	0.000759	1.094	0.545894	0.001585
1.069	0.548146	0.000667	1.095	0.545806	0.001673
1.07	0.548054	0.000575	1.096	0.545719	0.001760
1.071	0.547962	0.000482	1.097	0.545631	0.001848
1.072	0.547870	0.000390	1.098	0.545544	0.001935
1.073	0.547778	0.000299	1.099	0.545457	0.002022
1.074	0.547686	0.000207			
1.075	0.547595	0.000116			
1.076	0.547504	0.000025			
1.077	0.547413	0.000066			
1.078	0.547322	0.000157			
1.079	0.547231	0.000248			
1.08	0.547141	0.000338			
1.081	0.547051	0.000429			
1.082	0.546961	0.000519			
1.083	0.546871	0.000609			
1.084	0.546781	0.000698			
1.085	0.546691	0.000788			
1.086	0.546602	0.000877			

ตารางที่ ข.4 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนียช่วง 0.02 ถึง 1.12 ช่วงละ 0.02

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง	k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
0.02	0.979816	0.414046	0.58	0.640142	0.074373
0.04	0.960095	0.394325	0.6	0.634570	0.068800
0.06	0.940879	0.375109	0.62	0.629272	0.063502
0.08	0.922203	0.356433	0.64	0.624232	0.058462
0.1	0.904099	0.338329	0.66	0.619438	0.053668
0.12	0.886590	0.320820	0.68	0.614875	0.049105
0.14	0.869694	0.303925	0.7	0.610531	0.044761
0.16	0.853425	0.287655	0.72	0.606394	0.040624
0.18	0.837789	0.272019	0.74	0.602452	0.036682
0.2	0.822788	0.257018	0.76	0.598695	0.032925
0.22	0.808419	0.242649	0.78	0.595112	0.029342
0.24	0.794675	0.228905	0.8	0.591695	0.025925
0.26	0.781546	0.215777	0.82	0.588433	0.022663
0.28	0.769019	0.203249	0.84	0.585319	0.019550
0.3	0.757077	0.191307	0.86	0.582345	0.016575
0.32	0.745703	0.179933	0.88	0.579504	0.013734
0.34	0.734878	0.169108	0.9	0.576787	0.011017
0.36	0.724581	0.158811	0.92	0.574189	0.008419
0.38	0.714791	0.149021	0.94	0.571704	0.005934
0.4	0.705486	0.139717	0.96	0.569324	0.003555
0.42	0.696646	0.130876	0.98	0.567046	0.001276
0.44	0.688248	0.122479	1	0.564864	0.000906
0.46	0.680272	0.114502	1.02	0.562772	0.002998
0.48	0.672696	0.106926	1.04	0.560767	0.005003
0.5	0.665501	0.099731	1.06	0.558844	0.006926
0.52	0.658666	0.092896	1.08	0.556998	0.008772
0.54	0.652174	0.086404	1.1	0.555226	0.010544
0.56	0.646005	0.080235	1.12	0.553525	0.012245

ตารางที่ ข.5 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนียช่วง 0.981 ถึง 1.019 ช่วงละ 0.001

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง	k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
0.981	0.566935	0.001165	1.007	0.564122	0.001648
0.982	0.566824	0.001054	1.008	0.564017	0.001753
0.983	0.566713	0.000943	1.009	0.563912	0.001858
0.984	0.566602	0.000832	1.01	0.563807	0.001963
0.985	0.566492	0.000722	1.011	0.563703	0.002067
0.986	0.566382	0.000612	1.012	0.563598	0.002172
0.987	0.566272	0.000502	1.013	0.563494	0.002276
0.988	0.566162	0.000392	1.014	0.563391	0.002379
0.989	0.566053	0.000283	1.015	0.563287	0.002483
0.99	0.565943	0.000174	1.016	0.563184	0.002586
0.991	0.565834	0.000065	1.017	0.563080	0.002689
0.992	0.565726	0.000044	1.018	0.562978	0.002792
0.993	0.565617	0.000153	1.019	0.562875	0.002895
0.994	0.565509	0.000261			
0.995	0.565401	0.000369			
0.996	0.565293	0.000477			
0.997	0.565185	0.000585			
0.998	0.565078	0.000692			
0.999	0.564971	0.000799			
1	0.564864	0.000906			
1.001	0.564757	0.001013			
1.002	0.564651	0.001119			
1.003	0.564544	0.001225			
1.004	0.564438	0.001331			
1.005	0.564333	0.001437			
1.006	0.564227	0.001543			

ตารางที่ ข.6 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเนื้อฟันช่วง 0.02 ถึง 1.12 ช่วงละ 0.02

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
0.02	0.979816	0.168495
0.04	0.960095	0.148774
0.06	0.940879	0.129558
0.08	0.922203	0.110882
0.1	0.904099	0.092778
0.12	0.886590	0.075269
0.14	0.869694	0.058374
0.16	0.853425	0.042105
0.18	0.837789	0.026469
0.2	0.822788	0.011467
0.22	0.808419	0.002902
0.24	0.794675	0.016645
0.26	0.781546	0.029774
0.28	0.769019	0.042302
0.3	0.757077	0.054244
0.32	0.745703	0.065617
0.34	0.734878	0.076443
0.36	0.724581	0.086740
0.38	0.714791	0.096530
0.4	0.705486	0.105834
0.42	0.696646	0.114675
0.44	0.688248	0.123072
0.46	0.680272	0.131049
0.48	0.672696	0.138624
0.5	0.665501	0.145820
0.52	0.658666	0.152654
0.54	0.652174	0.159147
0.56	0.646005	0.165316

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
0.58	0.640142	0.171178
0.6	0.634570	0.176751
0.62	0.629272	0.182049
0.64	0.624232	0.187088
0.66	0.619438	0.191883
0.68	0.614875	0.196446
0.7	0.610531	0.200790
0.72	0.606394	0.204927
0.74	0.602452	0.208869
0.76	0.598695	0.212626
0.78	0.595112	0.216209
0.8	0.591695	0.219626
0.82	0.588433	0.222888
0.84	0.585319	0.226001
0.86	0.582345	0.228975
0.88	0.579504	0.231817
0.9	0.576787	0.234534
0.92	0.574189	0.237132
0.94	0.571704	0.239617
0.96	0.569324	0.241996
0.98	0.567046	0.244275
1	0.564864	0.246457
1.02	0.562772	0.248548
1.04	0.560767	0.250554
1.06	0.558844	0.252477
1.08	0.556998	0.254323
1.1	0.555226	0.256095
1.12	0.553525	0.257796

ตารางที่ ข.7 การหาค่าถ่วงน้ำหนักของพินเลย์ของเซอร์โคเนียช่วง 0.201 ถึง 0.239 ช่วงละ 0.001

k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง	k	$\frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+(2k)^2}}$	ผลต่าง
0.201	0.822055	0.010734	0.227	0.803538	0.007783
0.202	0.821323	0.010002	0.228	0.802847	0.008474
0.203	0.820593	0.009272	0.229	0.802158	0.009163
0.204	0.819864	0.008543	0.23	0.801470	0.009851
0.205	0.819137	0.007816	0.231	0.800783	0.010538
0.206	0.818411	0.007091	0.232	0.800098	0.011222
0.207	0.817687	0.006367	0.233	0.799415	0.011906
0.208	0.816965	0.005644	0.234	0.798733	0.012587
0.209	0.816244	0.004923	0.235	0.798053	0.013268
0.21	0.815525	0.004204	0.236	0.797375	0.013946
0.211	0.814807	0.003487	0.237	0.796697	0.014623
0.212	0.814091	0.002770	0.238	0.796022	0.015299
0.213	0.813377	0.002056	0.239	0.795348	0.015973
0.214	0.812664	0.001343			
0.215	0.811952	0.000632			
0.216	0.811243	0.000078			
0.217	0.810534	0.000786			
0.218	0.809828	0.001493			
0.219	0.809123	0.002198			
0.22	0.808419	0.002902			
0.221	0.807717	0.003604			
0.222	0.807017	0.004304			
0.223	0.806318	0.005003			
0.224	0.805621	0.005700			
0.225	0.804925	0.006396			
0.226	0.804231	0.007090			

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิรเดช ธารณเจษฎา
วัน เดือน ปี เกิด	25 กุมภาพันธ์ 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล
ที่อยู่ปัจจุบัน	101/18 หมู่ 1 หมู่บ้านพงษ์เพชร ซอย แจ้งวัฒนะ 43 ถนน แจ้งวัฒนะ ตำบลคลองเกลือ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY