ผลกระทบของลักษณะรอยร้าวที่ส่งผลต่<mark>อการกระจ</mark>ายตัวของแรงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติของ ฟันกรามซี่ที่หนึ่ง โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

# ุ กุ กุ โ น โ ล ฮ ั ๅ *ก* ะ ุ

สรพล ณ ลำปาง

TC

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ปีการศึกษา 2563 INFLUENCE OF DIFFERENT CRACK CHARACTERISTICS ON STRESS DISTRIBUTION IN 3D HUMAN FIRST MOLAR MODEL USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

# ุกุล โนโล ฮั / ภูะ

Sorapon Na Lampang

10

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology Graduate School Thai-Nichi Institute of Technology Academic Year 2020

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของลักษณะรอยร้าวที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของแรงที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติของฟันกรามซี่ที่หนึ่ง โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไบต์เอลิเบบต์
โดย	สรพล ณ ลำปาง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจีระจรัส

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

ત શ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์) วันที่........เดือน.....พ.ศ....พ.ศ......

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

10

..... ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ทันตแพย์หญิง ชลิดา ลิ้มจีระจรัส)

(ผู้ช่วยศ<mark>าสตร</mark>าจารย์ ดร. จินตวั<mark>ฒน์ ไชยชนะวงศ์)</mark>

..... กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจีระจรัส)

สรพล ณ ลำปาง : ผลกระทบของลักษณะรอยร้าวที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของแรงที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติของฟันกรามซี่ที่หนึ่ง โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์, อาจารย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจีระจรัส, 65 หน้า.

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นเมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นบน แบบจำลอง 3 มิติขนาดเสมือนจริงของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่งของมนุษย์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางไฟ ในต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลอง 3 มิติดังกล่าวถูกสร้างขึ้น โดยมีพื้นฐานจากวิธี Cone-Beam Computed Tomography (CBCT) และการวิเคราะห์จะมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ ของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง ในส่วนของเคลือบฟัน และเนื้อฟันโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีแรก การศึกษาผลกระทบของขนาดความกว้างของรอยร้าว (0 μm, 40 μm, 68 μm, 75 μm, 80 μm และ 100 μm) และกรณีที่สอง การศึกษาผลกระทบของความสูงของรอยร้าว (2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm) จากบริเวณ Enamel-Cemento Junction (CEJ) โดย กำหนดค่าตัวแปรของความลึกของรอยร้าวในการศึกษานี้ที่ 3 mm. จากพื้นผิวของแบบจำลอง Dentin ซึ่งจากผลการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของรอยร้าว แสดงให้เห็นว่า ขนาดความกว้าง ของรอยร้าว มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของความเค้นบนฟันมากกว่าชนาดความสูงของรอยร้าว โดยขนาดของความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองที่ขนาดมากกว่า 68 μm มีค่าความเค้น และการกระจายของความเค้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยะสำคัญ และในกรณีของความสูงของรอยร้าว ความสูงของรอยร้าวส่งผลโดยตรงต่อค่าความเค้นดึงเฉพาะส่วนประกอบที่เกิดรอยร้าวเท่านั้น ซึ่งก็คือ ส่วนของเคลือบฟัน และเนื้อฟัน

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่อนักศึกษา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... SORAPON NA LAMPANG : INFLUENCE OF DIFFERENT CRACK CHARACTERISTICS ON STRESS DISTRIBUTION IN 3D HUMAN FIRST MOLAR MODEL USING FINITE ELEMENT ANALYSIS: ADVISOR: ASSOC. PROF. NUTTAPOL LIMJEERAJARUS, 65 PP.

In this study, the stress distribution on a 3D model of human mandibular first molar has been investigated using finite element analysis. The model is created based on Cone-Beam Computed Tomography (CBCT). The study focuses on the parametric study of crack parameters in the enamel and dentin layers, which can be divided into two cases, namely the crack width (0  $\mu$ m, 40  $\mu$ m, 68  $\mu$ m, 75  $\mu$ m, 80  $\mu$ m and 100  $\mu$ m) and the crack height (2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm  $\mu_{0} \approx 5.4$  mm) starting from the Enamel-Cemento Junction (CEJ). The simulation results revealed that the crack width had greater influence on the stress distribution than the crack height. In addition, the stresses have significantly increased as the crack width was larger than 68  $\mu$ m. Also, the crack height has a notable effect on tensile stress distribution only in the cracked layers, i.e., enamel and dentin.

Graduate School Field of Engineering Technology Academic Year 2020 Student's Signature ..... Advisor's Signature .....

#### กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง "ผลกระทบของลักษณะรอยร้าวที่ส่งผลต่อการ กระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติของฟันกรามซี่ที่หนึ่ง โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์ เอลิเมนต์" ได้ดำเนินการศึกษาอย่างเป็นระบบ มีขั้นตอนที่ชัดเจนเนื่องมาจากความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจีระจรัส ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของหัวข้อวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และเป็นผู้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำชี้แนะแนวทางในการศึกษาหาข้อมูลเพื่อประกอบการวิจัยใน หัวข้อนี้จนประสบความสำเร็จ ตลอดจนการชี้แนะวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทางการ ศึกษาวิจัยด้วยความรู้และประสบการณ์จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบผลสำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทันตแพทย์หญิง ชลิดา ลิ้มจีระจรัส และทีม คณาจารย์ คณะทันตแพทย์ศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อมา ดำเนินการอบรมข้อมูลตลอดจนช่วยกันเสนอกรณีศึกษาของปัญหาที่พบเจอในระดับคลินิค เพื่อเป็น แนวทางในการศึกษาลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนฟันกรามซี่ที่หนึ่งได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคณะกรรมการทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบ ตั้งแต่การสอบนำเสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์ และการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ เกี่ยวกับศาสตร์ความรู้ที่แต่ละท่านมี ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ในลำดับท้ายสุดวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่ได้เกิดขึ้นเลยหากไม่มีบุคคลำคัญเหล่านี้คอยเป็น กำลังสนับสนุนให้ได้ศึกษาในระดับปริญญาโทจนประสบความสำเร็จคือทางครอบครัวตะกูล ณ ลำปาง ทุกท่านเป็นผู้ที่ได้ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจมา ซึ่งผู้เขียนขอขอบพระคุณยิ่งมา ณ ที่นี้ด้วย

(0)

สรพล ณ ลำปาง

# สารบัญ

			หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย			१
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ			ຈ
กิตติกรรมประกาศ			ຊ
สารบัญ			v
สารบัญตาราง			ຄູ
สารบัญรูปภาพ			J
รายการสัญลักษณ์	Nula	<u> </u>	ฑ

# บทที่ 1

บท	น้ำ	
	1.1 ความเป็นมาแนวทางเหตุผลและปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	
	1.5 แผนการวิจัย	4

2

การศึกษาวรรณกรรม	5
2.1 โครงสร้างของฟัน	5
2.2 กล <mark>ศาสต</mark> ร์วัสด <mark>ุ</mark> (Me <mark>chanic</mark> al mat <mark>e</mark> rial) <mark></mark>	7
2.2 <mark>.1 ค</mark> วามเค้น (St <mark>re</mark> ss)	8
2.2 <mark>.2 ค</mark> วามสัมพันธ์ <mark>ร</mark> ะหว่าง <mark>Stress</mark> กับ St <mark>rain</mark>	9
2.2 <mark>.3 ค่</mark> าโมดูลัสขอ <mark>งย</mark> ังส์ (Youn <mark>g's</mark> modulus, E)	10
2.2.4 จุดคราก (Yield Point)	10
2.2.5 ค่าความแข็งแรงดุงสูงสุด (UTS)	11
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ	11
2.4 ภาพรังสีสวนตัดโดยคอมพิวเตอร์ชนิดโคนบีม (CBCT )	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14

# สารบัญ (ต่อ)

บทที่	2 Average and a second s	เน้า
	2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรอยร้าวของฟันในระดับคลินิก	14
	2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์	17
3	ระเบียบวิธีวิจัย	22
	3.1 ขอบเขตการศึกษา	23
	3.2 การพัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ	23
	3.3 ระเบียบการทางไฟไนต์เอลิเมนต์	25
	3.4 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบพารามิเตอร์	26
.4	ผลลัพธ์ที่ได้และการอภิปรายผล	28
	4.1 ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของขนาดความกว้าง (Width)	
	ของรอยร้าว	28
	4.1.1 ความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel	28
	4.1.2 ความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin	32
	4.1.3 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp	34
	4.1.4 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum	36
	4.1.5 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL	39
	4.1.6 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone	40
	4.1 <mark>.7 ค่</mark> าความ <mark>เ</mark> ค้นห <mark>ลักต่ำสุ</mark> ดที่เกิดขึ้นบนแ <mark>บบจ</mark> ำลอง Cancellous bone	43
	4.2 ผล <mark>การวิ</mark> เคราะห์ทางไฟไน <mark>ต์เอลิ</mark> เมนต์ของขนาดความสูง (Height)	5
<b>Y</b>	ขอ <mark>งรอย</mark> ร้าว	45
	4.2 <mark>.1 ค</mark> วามเค้นหลั <mark>กต่ำสุดที่เกิดขึ้นบ</mark> นแบบ <mark>จำลอ</mark> ง Enamel	46
	4.2.2 ความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin	48
1 1/2	4.2.3 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp	51
	4.2.4 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum	52
	4.2.5 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL	54
	4.2.6 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone	56
	4.2.7 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone.	58

# สารบัญ (ต่อ)

1 เทที่					หน้า
5	สรปผลการวิจัย				. 61
	ั 5.1 สรปผลงานเ	าารวิจัย			. 61
	5.2 การศึกษาใน	เอนาคต			. 62
บรรณานุก	รม				63
ประวัติย่อยู่	ผู้วิจัย	uıa	<u></u>		66
				9	
J					
				0.	
				1	
	/Mar				
	- vst				

# สารบัญตาราง

ល្ង

ตาราง		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานและระยเวลาการดำเนินงาน	. 4
2.1	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3.1	คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงโครงสร้างแบบ Isotropic	25
3.2	คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงโครงสร้างแบบ Orthotropic	25
	n í u í a æy v v v v v v v v v v v v v v v v v v v	

# สารบัญรูปภาพ

ູລູປ	หน้า
1.1	โครงสร้างของฟันส่วนของตัวฟันและรากฟัน 1
1.2	รอยร้าวที่เกิดขึ้นในบนฟัน 5 แบบ
2.1	ภาพกราฟฟิกแสดงให้เห็นถึงการแบ่งฟันภายในช่องปากออกเป็น 4 ส่วน
2.2	(A) ประเภทของฟันแท้ (ฟันกรามพันกรามน้อยฟันกรามน้อยและฟันกราม)
	ที่พบในแต่ละด้าน และ (B) ประเภทของฟันน้ำนม (ฟันกรามเขี้ยวและฟันกราม) 6
2.3	โครงสร้างของฟันส่วนของตัวฟันและรากฟัน7
2.4	ความเค้นเฉือนเฉลี่ย (Average shear stress)
2.5	ภาพแสดงพฤติกรรมของ True stress vs. True Strain
2.6	กราฟ Engineering Stress-Strain Curve แสดงจุด UTS 11
2.7	การเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นจากรูป (a) ไปเป็น (b)
2.8	ทิศทางของการแบ่งค่าตามแนบระนาบ 13
2.9	แสดงลักษณะของรรูปทรงเรขาคณิตของลำแสงรูปกรวย
2.10	รูปแสดงการศึกษาโดยแบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่มของ Keitb V. Krell et al 15
2.11	แรงกระทำต่อแผ่นรับแรงกัดแต่ละซึ่ 16
2.12	(a) รอยร้าวของการเกิดรอยร้าวส่วนของ Maxillary first pre-molar ฝั่ง Mesial (b) รอยร้าว
	ที่เกิดขึ้นบนส่วนของ Mandibular first molar ฝั่งmesial 16
2.13	ภาพแสดงลักษณะของหัวกด (a) Side view and (b) Top view 17
2.14	แบบจำลอง <mark>3 มิติจากการประยุกต์ Mic</mark> ro-CT กับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 17
2.15	ผลการคำน <mark>ว</mark> ณแสด <mark>งถึง</mark> การกระจาย <mark>ตัวของค</mark> วามเค <mark>้น</mark> ที่เกิดขึ้นใน 4 ช่วงเวลา
3.1	ขั้นตอนและลำดับ <mark>ของก</mark> ารศึกษาวิจั <mark>ย</mark>
3.2	การสร้างแบบจำล <mark>องจา</mark> ก Ansys S <mark>p</mark> aceclai <mark>m เพื่อ</mark> สร้างแ <mark>บบจ</mark> ำลอง
3.3	ส่วนประกอบ 7 ส่ <mark>วนหล</mark> ักของโครง <mark>ส</mark> ร้างแบบจ <mark>ำลอง</mark> โมเดล <mark>3 มิติ</mark> ของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง . 24
3.4	รูปแบบของเอลิเมนต์ที่แบบสามเหลี่ยมของแบบจำลอง 3 มิติ (Sound tooth model)
	ในโปรแกรม ANSYS Workbench 26
3.5	รายละเอียดของรอยร้าวที่สร้างในแบบจำลอง 3 มิติ
4.1	ผลการวิเคราะห์ Enamel Principal Stress (Tensile Stress)
4.2	การกระจายตัวของความเค้นดึงของค่า Enamel Principal Stress 6 กรณีศึกษา

IC.

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ູລູາ	ป	ĩ	าน้ำ
4.	.3	ผลการวิเคราะห์ Enamel Principal Stress (Compressive Stress)	30
4.	.4	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Enamel Principal Stress 6 กรณีศึกษา	31
4.	.5	ผลการวิเคราะห์ Dentin Principal Stress (Tensile Stress)	32
4.	.6	ผลการวิเคราะห์ Dentin Principal Stress (Compressive Stress)	33
4.	.7	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Dentin Principal Stress 6 กรณีศึกษา	34
4.	.8	ผลการวิเคราะห์ Dental Pulp Von-Mises Stress	35
4.	.9	การกระจายตัวของความเค้น (Von-Mises Stress) ของ Dental Pulp 6 กรณีศึกษา	35
4.	.10	ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Tensile Stress)	37
4.	.11	ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Compressive Stress)	37
4.	.12	การกระจายตัวของความเค้น (Cementum Principal Stress) 6 กรณีศึกษา	38
4.	.13	ผลการวิเคราะห์ PDL Von-Mises Stress	39
4.	.14	การกระจายตัวของความเค้นของค่า PDL Von-Mises Stress 6 กรณีศึกษา	40
4.	.15	ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Tensile Stress)	41
4.	.16	ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Compressive Stress)	42
4.	.17	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cortical bone Principal Stress 6 กรณีศึกษา	42
4.	.18	ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Tensile Stress)	43
4.	.19	ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Compressive Stress)	44
4.	.20	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cancellous bone Principal Stress 6 กรณีศึกษา	44
4.	.21	ภาพแสดงลักษณะ <mark>ของก</mark> รณีศึกของ <mark>ของควา</mark> มสูงรอ <mark>ย</mark> ร้าวบริ <mark>เวณ</mark> CEJ	45
4.	.22	ผลการวิเคราะห์ E <mark>nam</mark> el Principal Stress (Tensile Str <mark>ess)</mark>	46
4.	.23	ผลการวิเคราะห์ E <mark>nam</mark> el Princip <mark>al</mark> Stress (Compressive Stress)	47
4.	.24	การกระจายตัวขอ <mark>งควา</mark> มเค้นของค่ <mark>า</mark> Enamel Principal Stress 5 กรณีศึกษา	48
4.	.25	ผลการวิเคราะห์ Dentin Principal Stress (Tensile Stress)	49
4.	.26	ผลการวิเคราะห์ Dentin Principal Stress (Compressive Stress)	50
4.	.27	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Dentin Principal Stress 5 กรณีศึกษา	50
4.	.28	ผลการวิเคราะห์ Dental Pulp Von-Mises Stress	51
4.	.29	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Dental Pulp Von-mises Stress 5 กรณีศึกษา	52

ĩC

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.30	ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Tensile Stress) 53
4.31	ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Compressive Stress)
4.32	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cementum Principal Stress 5 กรณีศึกษา 54
4.33	ผลการวิเคราะห์ PDL Von-Mises Stress
4.34	การกระจายตัวของความเค้นของค่า PDL Von-Mises Stress 5 กรณีศึกษา
4.35	ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Tensile Stress)
4.36	ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Compressive Stress)
4.37	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cortical bone Principal Stress 5 กรณีศึกษา 58
4.38	ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Tensile Stress)
4.39	ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Compressive Stress)
4.40	การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cancellous bone Principal Stress 5 กรณีศึกษา 60

ୄୖ୶

# รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
σ	ความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย, N/m² or Pa
Р	แรงกระทำตั้งฉาก, N
А	พื้นที่หน้าตัดขวางที่แรงกระทำ, m <sup>2</sup>
A <sub>0</sub>	พื้นที่หน้าเริ่มต้นในแนวตัดขวางที่แรงกระทำ, m²
$\tau_{avg}$	ความเค้นเฉือนบนระนาบ, N/m <sup>2</sup>
	แรงเฉือนที่ระนาบ, N
ε	ความเครียดทางวิศวกรรม, N/m <sup>2</sup>
L <sub>0</sub>	ความยาวเดิมของชิ้นงาน, m
$L_{f}$	ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน, m
$\Delta L$	ความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ย <mark>นแปลงไป, m</mark>
E	Young's modulus, -
$\sigma_y$	Yield strength, N/m <sup>2</sup>
σ <sub>TS</sub>	Ultimate Tensile Strength, N/m <sup>2</sup>
$\sigma_x$	ความเค้นแนวแกน x, N/m²
$\sigma_y$	ความเค้นแนวแกน y, N/m²
$ au_{xy}$	้คว <mark>ามเค้นเฉือนแนวแกน</mark> xy, N/m <sup>2</sup>
$\sigma'_x$	ความเค <mark>้นแนวแกน x ที่เ</mark> ปลี่ยน <mark>ไป, N</mark> /m²
$\sigma'_y$	ความเค <mark>้น</mark> แนวแ <mark>กน y เป</mark> ลี่ยนไป <mark>, N/</mark> m²
$\tau'_{xy}$	ความเค <mark>้น</mark> เฉือนแนว <mark>แกน</mark> xy เป <mark>ลี่ยน</mark> ไป, N/m²
θ	ระยะมุมที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 1 บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาแนวทางเหตุผลและปัญหา

10

การดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ในแต่ละวันมีการบริโภคอาหารตลอดเวลา เพื่อนำมาเป็น พลังงานให้แก่ร่างกายให้สามารถทำกิจกรรมประจำวันได้ ปฏิเสธไม่ได้เลยว่าฟันเป็นอวัยวะหนึ่งที่มี การใช้ใช้งานอยู่ตลอดเวลาเพื่อใช้ในการบดเคี้ยวและฉีกอาหารเพื่อให้ระบบย่อยอาหารภายในร่างกาย สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในกระบวนการการบดเคี้ยวอาหาร ฟัน เป็นอวัยวะ ที่สำคัญที่ทำให้อาหารขนาดใหญ่ถูกทำให้ละเอียดหรือมีขนาดเล็กลง และเป็นอวัยวะที่เกิดแรงเชิงกล เกิดขึ้นทั้งกับเซลล์และเนื้อเยื้อของฟัน แรงเชิงกลที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วย แรงกด แรงดึง และแรง เฉือน ซึ่งเมื่อเกิดแรงข้างต้นมากเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์และเนื้อเยื้อของฟันได้ แต่ อนึ่ง จากงานวิจัยผลการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory research) พบว่าแรงในเชิงกลที่ กระทำต่อเซลล์และเนื้อเยื้อที่เหมาะสม [1] สามารถทำให้เซลล์และเนื้อเยื้อของฟันนั้นการกระตุ้น โปรตีนสำคัญบ้างตัวที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูเซลล์ได้ และในงานวิจัยทางคลินิก (Clinical research) ได้มี การรักษาการสึกในส่วนของเคลือบฟัน (Enamel) โดยการใช้ฟันยาง เพื่อลดแรงที่เกิดจากการขบกัน ของฟันที่ทำให้เกิดความเสียหายกับตัวของเคลือบฟัน กล่าวคือการบดเคี้ยวทำให้เกิดแรงในเชิงกล โดยตรงกับฟันลดลง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จากงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการจะสามารถบอกได้ว่าการให้ แรงเชิงกลที่เหมาะสม จะสามารถทำให้เซลล์เกิดการฟื้นฟูตัวเองได้ แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานจริง ในระดับคลินิกได้ เนื่องจากยังไม่สามารถบอกได้ว่าในการทำให้เกิดแรงเชิงกลนั้น ควรจะใช้แรงเชิงกล ในปริมาณเท่าไหร่จึงจะเหมาะสมกับเพื่อให้เซลล์เกิดการฟื้นฟูตัวเอง ดังนั้นการศึกษาวิจัยจึงมี ้ วัตถุประสงค์เพื่อจ<mark>ำลองการวิเค</mark>ราะ<mark>ห์เ</mark>พื่อหาค่าค</mark>วามเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติของฟันกรามซึ่ ้ที่หนึ่งโดยวิธีการวิเ<mark>ค</mark>ราะห์เ<mark>ชิงตัว</mark>เลข



**รูปที่ 1.1** โครงสร้างของฟันส่วนของตัวฟันและรากฟัน [2]

จากรูปที่ 1.1 แสดงองค์ประกอบของโครงสร้างฟัน 7 ส่วนประกอบ [2] คือ เคลือบฟัน (Enamel), เนื้อฟัน (Dentine), เนื้อเยื้อองค์ประกอบฟัน (Dental pulp), เนื้อเยื้อเอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal ligament : PDL), เคลือบรากฟัน (Cementum) เหงือก (Gingiva) และกระดูกฟัน (Bone) ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนของเคลือบฟัน (Enamel) เป็นส่วนหลักที่เกิดแรงสัมผัสต่อลักษณะการบด เคี้ยว และเป็นส่วนที่เกิดแรงในเชิงกลจากแนวของแรงกระทำของฟันและอาหารมากที่สุด แต่ถึงจะ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่หลักในการรับแรงเชิงกลมากที่สุดนั้น แต่ก็ถือได้ว่าส่วนของเคลือบฟันถูกจัดให้อยู่ ในส่วนของวัสดุเปราะ ซึ่งเกิดการร้าวได้ง่ายด้วยเช่นกัน โดยอ้างอิงจากหัวข้อการนำเสนอของ Hasan, et al [3] ว่าด้วยเรื่องของลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณของเคลือบฟัน (Enamel) ไปจนถึงส่วน ขอบเนื้อฟัน (Dentin) ว่ามีรอยร้าวแบบการร้าวจากบริเวณผิวการอุดลงไปแบบแนวเดียวกันอย่าง มีนัยะสำคัญ และในขณะเดียวกันงานวิจัยของ Keith V. Krell, DDS, MS, MA, and Daniel J. Caplan, DDS, PhD [4] ทำการเก็บตัวอย่างของคนไข้ที่มารับการรักษาในลักษณะของการเกิดรอย ร้าวจำนวน 2086 เคสพบว่ากว่า 36% เกิดขึ้นบนงิเวณฟันกรามซี่ที่สอง และ 27% เกิดขึ้นบนฟัน กรามซี่ที่หนึ่ง

**รูปที่ 1.2** รอยร้าวที่เกิดขึ้นในบนฟัน 5 แบบ [3]

10

จากงานการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับแรงบดเคี้ยวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากอาสาสมัครผู้เข้าร่วม โครงงการ [5] ทำให้ทางผู้ศึกษาทราบถึงค่าแรงบดเคี้ยวเฉลี่ยที่เกิดจากการขบกันของฟันที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณแบบจำลองในเชิงการคำนวณหลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าของแรงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นกับ แบบจำลองได้ ซึ่งในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการประยุกต์ เทคโนโลยี CT-Scan เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากสแกนภาพของตัว โมเดลจริงแล้ว สามารถนำไฟล์รูปภาพแบบ 2 มิติ มาสร้างแบบจำลองภายในโปรแกรมโดยผ่านทาง โปรแกรม ANSYS Spaceclaim ซึ่งในปัจจุบันวิธีการดังกล่าวเป็นที่ยอมรับในการศึกษาเกี่ยวกับการ จำลองรูปร่างทางชีวะวิทยาได้อย่างกว้างขวาง

อีกทั้งทางผู้ศึกษาได้พบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นบนฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง โดยมีลักษณะการร้าว แบบร้าวจากผิวของบริเวณร่องของเคลือบฟัน (Enamel) ลงไปจนถึงบริเวณต่ำกว่าบริเวณ (Cemento-Enamel Junction: CEJ) ลงไปตามในรูปที่ 1.2ค ซึ่งพบมากในผู้ป่วยปัจจุบัน และด้วย ลักษณะในการทำงานจริงของทางทันตแพทย์ที่เกิดขึ้น ไม่สามารถมองเห็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นภายใน อีก นัยหนึ่งคือรอยร้าวที่เกิดลึกลงไปจากบริเวณร่องของเคลือบฟันไปจนถึงบริเวณเนื้อฟัน จึงตัดสินได้ เพียงแต่ขนาดความกว้างที่สามารถเห็นได้ ดังนั้นแล้วทางผู้ศึกษาจึงเกิดความสนใจที่จะจำลองโมเดล 3 มิติของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่งเพื่อศึกษาขนาดของความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้น

ดังนั้นการศึกษาวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเข้ามาคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้น และจะมีการศึกษาเพื่อดู พฤติกรรมของการกระจายตัวของความเค้นภายในแบบจำลองเมื่อมีการเกิดรอยร้าวขึ้นที่แบบจำลอง Enamel และ Dentin ซึ่งจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าได้แก่ ความกว้างของรอยร้าว และ ความสูงของรอยร้าว โดยจะกำหนดค่าความลึกของรอยร้าวเป็นค่าคงที่ คือ ความลึก 3 mm. จากผิว ของแบบจำลอง Dentin

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่งของ มนุษย์ ( Mandibul<mark>a</mark>r firs<mark>t mo</mark>lar )

 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของความกว้างและความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Enamel และ Dentin ต่อพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลอง 3 มิติ ฟันกรามซี่ที่หนึ่งของมนุษย์

#### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติ จะทำการศึกษาลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบน ฟันกรามซี่ที่หนึ่ง (Mandibular first molar) เพียงซี่เดียวเท่านั้น

1.3.2 การสร้างแบบจำลองจะถูกสร้างโดยโปรแกรม ANSYS Space Claim และโปรแกรม ANSYS Workbench ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

การศึกษาลักษณะของรอยร้าวกรณีศึกษาแรกที่ความกว้างของรอยร้าวมีค่าต่างๆ 1.3.3 เป็น 0 µm (แทนฟันปกติ) - 100 µm <mark>และกรณีศึกษา</mark>ที่สองที่ความสูงของรอยร้าวที่มีค่าต่างๆเป็น 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm (บริเวณแนว Cemento-Enamel junction (CEJ))

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทำให้ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นของขนาดความกว้างรอยร้าว และความลึกรอยร้าวต่อ"การกระจายตัวความเค้นบนฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง

1.4.2 ได้ข้อเสนอแนะและแนวทางการรักษาทางทันตะกรรมต่อรอยร้าวที่พบบนฟันกราม ล่างซี่ที่หนึ่งของมนุษย์ ula

B

## 1.5 แผนการวิจัย

ระเบียบงานวิจัย		2020 ( เดือน )									2021 ( เดือน )					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1. การศึกษาวรรณกรรม																
2. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ในโปรแกรม															6	
Ansys Spaceclaim ของค่าพารามิเตอร์		-						-								
ความกว้างของรอยร้าว	_															
3. วิเคราะห์ผลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นของ																
ผลความกว้างของรอยร้าว																
4. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ในโปรแกรม																
Ansys Spaceclaim ของค่าพารามิเตอร์																
ความสูงของรอยร้าว																
5. วิเคราะห์ผลและสรุปผลของกร <mark>ณีศึกษาทั้ง</mark>																
2 กรณี																
6. สรุปผลการศึกษา + น้ำเสนอผลงาน															í	5

#### ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานและระยเวลาการดำเนินงาน

# บทที่ 2 การศึกษาวรรณกรรม

ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบผลกระทบของลักษณะรอยแตกแบบที่ แตกต่างกันที่เกิดบนฟันกรามซี่ที่หนึ่ง (Mandibular First molar) โดยการคำนวณใช้โปรแกรม ANSYS มาช่วยในการวิเคราะห์ผล ทั้งนี้ทางผู้ศึกษาเองยังตระหนักถึงความสำคัญที่จำเป็นต้องมี การศึกษาต่อวรรณกรรมในด้านเกี่ยวกับชีววิทยาของฟัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ผลทาง ระเบียบไฟในต์เอลิเมนต์ ดังนั้นแล้วทางผู้ศึกษาจังได้กำหนดหัวข้อในการศึกเพื่อให้เกิดความเข้าใจ มากยิ่งขึ้น ซึ่งทางผู้ศึกษาได้มีกการศึกษาวรรณกรรมในส่วนของหัวข้อดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 2.1 ศึกษา โครงสร้างของฟัน, หัวข้อที่ 2.2 กลศาสตร์วัสดุ, หัวข้อที่ 2.3 ภาพรังสีสวนตัดอาศัยคอมพิวเตอรชนิด โคนบีม (cone-beam computed tomography: CBCT ) และหัวข้อที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



#### 2.1 โครงสร้างของฟัน

รูปที่ 2.1 ภาพกราฟฟิกแสดงให้เห็นถึงการแบ่งฟันภายในช่องปากออกเป็น 4 ส่วน [2]

ฟันเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของร่างกายมนุษย์ มีหน้าที่ในการบดเคี้ยวอาหารที่ได้รับประทาน เข้าไป เพื่อช่วยให้ระบบย่อยอาหารของมนุษย์ไม่มีภาระในการย่อยอาหารที่มากจนเกินไป จนทำให้ ประสิทธิภาพการย่อยอาหารของระบบย่อยอาหารลดน้อยลง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับระบบ ย่อยอาหารให้สามารถย่อยอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และอีกหน้าที่หนึ่งที่สำคัญของฟัน คือฟันมีหน้าที่ในการช่วยให้ใบหน้านั้นเข้ารูป โดยฟันของมนุษย์จะมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 ชุด คือ ฟัน น้ำนม (Primary teeth หรือ Deciduous teeth) จะเกิดขึ้นมาเป็นชุดแรกในวัยทารกที่มีอายุได้ ประมาณ 6 เดือน ทั้งหมด 20 ซี่ เมื่อร่างกายเจริญเติบโตขึ้นไปถึงวัยหนึ่ง (อายุประมาณ 6 ปี) ร่างกาย จะเกิดการผลัดฟันใหม่ โดยฟันน้ำนมจะหลุดออกไปแล้วมีฟันแท้ (Secondary teeth หรือ Permanent teeth) ขึ้นมาแทนที่ทั้งหมด 32 ซี่ครบในอายุประมาณ 20 ปีเป็นส่วนใหญ่ ถึงแม้ว่าฟัน กราม (molar) ซี่ที่ 3 จะยังไม่ขึ้นมา โดยที่ฟันแท้ที่ขึ้นมานั้นจะมีหน้าที่ที่แตกต่างกันดังนี้ ฟันหน้า (incisor) ทั้ง 4 ซี่ ล่าง บน และฟันเขี้ยว (canine) ทำหน้าที่ตัดและฉีกอาหารออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อน จากนั้นจึงเป็นหน้าที่ของฟันกรามน้อย (premolar) และฟันกราม (molar) ในการบดเคี้ยวอาหาร ต่อไป



**รูปที่ 2.2** (A) ประเภทขอ<mark>งฟัน</mark>แท้ (ฟันกรา<mark>ม</mark>ฟันกราม<mark>น้อย</mark>ฟันกรา<mark>มน้อ</mark>ยและฟันกราม) ที่พบในแต่ละ ด้าน และ (B) ประเภทของฟันน้ำนม (ฟันเขี้ยวและฟันกราม) ในแต่ละจตุภาคในรูปที่ 2.1 [2]

โดยจากการศึกษาโครงสร้างของฟันมนุษย์เบื้องต้น[2] พบว่าเมื่อมนุษย์มีฟันแท้ขึ้นครบแล้ว จะสามารถจำแนกฟันภายในช่องปากได้เป็น 4 ส่วนหลักตามรูปที่ 2.1 คือ 1. ฟันของขากรรไกรบน ขวา (Maxillary right), 2. ฟันของขากรรไกรบนซ้าย (Maxillary left), 3. ฟันของขากรรไกรล่างขวา (Mandibular right) และ 4. ฟันของขากรรไกรล่างซ้าย (Mandibular left) โดยภายในช่องปากทั้ง 4 ส่วนหลักนี้ยังสามารถแยกออกเป็นประเภทของฟันแท้ได้ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งฟันแท้ประกอบด้วยฟัน 8 ซึ่ ในแต่ละจตุภาค ได้แก่ ฟันตัด (incisors) 2 ซึ่ ส่วนกลางและด้านข้าง, ฟันเขี้ยว (canine) 1 ซึ่, ฟัน กรามน้อย (premolars) 2 ซี่ และฟันกราม (molars) 3 ซี่ทั้งหมด 4 ด้านรวมจำนวนฟันทั้งหมด 32 ซึ่ ของทั้ง 4 จตุภาค



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของฟันส่วนของตัวฟันและรากฟัน [2]

ในฟันของมนุษย์หนึ่งซึ่จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของตัวฟัน (Crown) และส่วน ของรากฟัน (Root) และมีบริเวณรอยต่อของทั้ง 2 ส่วนนี้เรียกว่า ส่วนคอฟัน (Cervical line) ดัง แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างภายในของฟันหนึ่งซี่นั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็นอีก 7 ส่วนประกอบหลักได้แก่ เคลือบฟัน (Enamel), เนื้อฟัน (Dentine), เนื้อเยื้อฟัน (Dental pulp), เคลือบรากฟัน (Cementum), เนื้อเยื้อยึดปริทันต์ (Periodontal ligament :PDL), กระดูกเบ้าฟัน (Alveolar bone) และ เห<mark>งือก</mark> (Gingiva)

#### ี 2.2 กลศาสตร์วัสดุ (Mec<mark>hani</mark>cal mate<mark>ri</mark>al)

10

วัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์หรือการใช้งานทางวิศวกรรมสิ่งสำคัญคือคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ เกี่ยวข้องกับการใช้งานและกำหนดค่าของวัสดุที่ใช้ในโปรแกรมเพื่อความถูกต้องแม่นยำของการ วิเคราะห์แบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคือคุณสมบัติที่มีผลต่อความแข็งแรงเชิงกล และความสามารถของวัสดุในการขึ้นรูปให้มีรูปร่างที่เหมาะสม ได้แก่ ความแข็งแรง (Strength), ความ เหนียว (Toughness), ความแข็ง (Hardness), การแข็งตัวของวัสดุ (Hardenability), ความเปราะ (Brittleness), ความอ่อนตัวของวัสดุ (Malleability), ความเหนียว (Ductility), ความยืดหยุ่น (Resilience) และ ความล้าของวัสดุ (Fatigue)

#### <u>2.2.1 ความเค้น (Stress)</u>

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีผลต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่ง หน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงนั้น ไม่ความลำบากในการวัดหาค่าตามนิยามนี้ ดังนั้นแล้วอีกหนึ่งคำจำกัดความของความเค้น คือ แรงกระทำภายนอกที่มากระทำมีความสมดุลกับ แรงภายในที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นการหาค่าความเค้นจำเขียนดังสมการ Hiberler [6]

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

(2.1)

เมื่อ

σ คือ ความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย (Average normal Stress)
P คือ แรงกระทำตั้งฉาก (Normal Force)
A คือ พื้นที่หน้าตัดขวางที่แรงกระทำ

Unit : N/m<sup>2</sup> or Pa Unit : N Unit : m<sup>2</sup>

ความเค้นจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำดังต่อไปนี้ 2.2.1.1 ความเค้นดึง (Tensile Stress) เกิดเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ ภาคตัดขวาง โดยมีการแยกเนื้อวัสดุให้เกิดการแยกออกจากกัน

2.2.1.2 ความเค้นกด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉาก กับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง

2.2.1.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ ทิศทาง ขนานกับพื้นที่ภาคตัดขว<mark>าง เ</mark>พื่อให้วัสดุเ<mark>คลื่อน</mark>ผ่านจากกันดังรูปที่ มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาค<mark>ตัดขว</mark>าง A ซึ่งขน<mark>า</mark>นกั<mark>บทิศท</mark>างของแรงเฉือน

ร**ูปที่ 2.4** ความเค้นเฉือนเฉลี่ย (Average shear stress) [6]

ความเค้นเฉือนเฉลี่ย (Average shear stress) แสดงดังในรูปที่ 2.4 เป็นความเค้นที่ เกิดบริเวณพื้นที่หน้าตัดบนระนาบใด ๆ เมื่อมีแรงเฉือนเกิดขึ้นของวัสดุ สามารถคำนวณดังสมการดังนี้

$$\tau_{avg} = \frac{V}{A} \tag{2.2}$$

เมื่อ $ au_{avg}$	คือ ความเค้นเฉือนบนระนาบใด ๆ	Unit : N/m <sup>2</sup>
V	คือ แรงเฉือนที่ระนาบใด ๆ	Unit : N
Α	คือ พื้นที่หน้าตัด	Unit : m <sup>2</sup>

#### 2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

(0

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึง (Tensile) จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งแบบ Elastic และ แบบ Plastic โดยในตอนแรกเริ่มนั้นวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic โดยมีความสัมพันธ์ของ ค่าแรงที่กระทำและการยืดตัว (Extension) ที่เป็นเส้นตรง (Linear relationship) โดยที่ค่าของแรงที่ กระทำกับค่าของการยืดตัวของวัสดุสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress) และค่าความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) ที่จุดใด ๆ รวมถึงความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงพฤติกรรมของ True stress vs. True Strain [6]

จากภาพข้างต้นในการทดสอบจะใช้เพียงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ ความเครียดทางวิศวกรรมเท่านั้น โดยมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (อ้างอิงจากสมการที่ (2.1))

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{2.1}$$

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{2.3}$$

$$\sigma$$
 = ความเค้นทางวิศวิกรรม (Engineering stress)

โดยที่

- $\mathcal{E}$  = ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain)
- P = แรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (External Tensile force)

A = พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน (Original cross-sectional area)

 $L_0$  = ความยาวเดิมของขึ้นงาน (Original length)

 $L_f$  = ความยาวสุดท้ายของขึ้นงาน (Final length)

#### 2.2.3 ค่าโมดูลัสของยังส์ (Young's modulus, E)

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain ในช่วงที่วัสดุมีการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอิลาสติก เมื่อนำแรงที่กระทำของวัสดุออกไปจะทำให้รูปทรงของวัสดุนั้น กลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ กล่าวคือตราบใดที่แรงที่กระทำต่อวัสดุนั้น ยังไม่เกินค่าของอิลาสติก ก็จะ สามารถกลับคืนรูปร่างเดิมได้ ซึ่งเป็นไปตามกฏของ Hooks (Hooks' Law) โดยที่มีค่าความชันของ ความสัมพันธ์ Engineering stress – Engineering strain นี้คือค่า Young's modulus (E)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.4}$$

ค่าของ Young's modulus มีความสำคัญในเชิงการวิเคราะห์ความเสียหายของ วัสดุเนื่องจากค่าของ Young's modulus สามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการรับแรงก่อนที่จะ มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างข<mark>องวัส</mark>ดุ (Deflection of material) ตัวอย่าง การเสียรูปของคาน การบิดตัว งอตัวของวัสดุประเภทคาน<mark>เมื่อไ</mark>ด้รับแรง

#### <u>2.2.4 จุดคราก (Yield Point)</u>

อ้างอิงจากรูปที่ 2.5 หากวัสดุนั้นได้รับแรงที่มีความสม่ำเสมอกัน จะเกิดปรากฏการ ทำให้เกิดจุด Yield point ขึ้นดังในภาพ ซึ่งโดยปกติแล้ว Yield point นั้นเป็นจุดแรกที่วัสดุจะเกิด การเปลี่ยนรูปแบบ Plastic Deformation โดยที่ค่าความแข็งแรงของจุดนี้เรียกว่า Yield strength

10

 $(\sigma_y)$  และสามารถหาค่าได้จากค่าแรงที่กระทำตรงตำแหน่งการเกิด Yielding หารด้วยพื้นที่หน้าตัด ของสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_y = \frac{P}{A_0} \tag{2.5}$$

2.2.5 ค่าความแข็งแรงดุงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength,  $\sigma_{TS}$ )

เมื่อวัสดุใด ๆ ได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องจนกราฟของการเกิดแรงอ้างอิงจากรูปที่ 2.5 มีการเลยจุดของ Yield point ได้แล้วนั้น จะสังเกตได้ว่าต้องมีการใช้แรงเพิ่มมากขึ้นเพื่อทำให้ วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังแสดงในรูปภาพของกราฟ Stress-Strain curve ที่ เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้วัสดุจะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ซึ่งสัมพันธ์กับการจัดเรียงตัวเชิงโมเลกุล ของวัสดุนั้น ๆ เรียกว่า การเกิด work hardening หรือ Strain hardening วัสดุแต่ละชนิดจะมี ความสามารถในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างกัน

เมื่อยังคงให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ กราฟของ Stress-Strain จะเพิ่มขึ้น จนถึงจุดสูงสุดเรียกว่า Ultimate Tensile Stress (UTS) ดังในรูปที่ 2.6 ที่จุดนี้แสดงถึงค่าความ แข็งแรงสูงสุดของวัสดุที่สามารถจะรับแรงได้



ร**ูปที่ 2.6** กราฟ Engineering Stress-Strain Curve แสดงจุด UTS

#### 2.3 ทฤษฏีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ

2.3.1 การเปลี่ยนรูปของความเค้น (Stress Transformation)

จากรูปภาพ 2.7 ข้างต้นแสดงให้ทราบว่า ณ จุด ๆ หนึ่งบนวัตถุจะมีค่า State of stress  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$  อย่างหนึ่ง เมื่อเกิดการย้ายระบบพิกัดซึ่งส่งผลทำให้ค่พิกัดแตกต่างออกไปจากเดิม

จะอ่านค่าของ  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  ได้ต่างกัน คือ  $\sigma'_x, \sigma'_y, \tau'_{xy}$  แต่จะถือว่า State of stress ยังคงเดิม เมื่อมีการคำนวณใช้ระบบพิกัดที่เหมาะสมอันหนึ่ง จะทำให้  $\tau'_{xy} = 0$  กล่าวคือจะ เหลือเพียงตัวแปรของ  $\sigma_1, \sigma_2$  ซึ่งจะเรียกทิศทางนั้นว่า Principal direction สามารถเขียนเป็น สมการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้ดังสมการ (2.3) – (2.5)



ร**ูปที่ 2.7** การเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นจากรูป (a) เป็น (b)

$$\sigma'_{x} = \frac{\sigma_{x} + \sigma_{y}}{2} + \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$
(2.3)

$$\sigma'_{y} = \frac{\sigma_{x} + \sigma_{y}}{2} - \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \tag{2.4}$$

$$\tau'_{xy} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} sin 2\theta + \tau_{xy} cos 2\theta \tag{2.5}$$

จากสมการข้างต้น ขนาดของ  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  มีการเปลี่ยนแปลงตามแกนที่หมุนไป ดังนั้น ขนาดที่มากที่สุดของความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) เป็นค่าที่ ใช้ในการออกแบบหรือใช้วิเคราะห์โครงสร้างที่ถูกใช้งานกันมากที่สุดตามทฤษฎี โดยจะเรียกค่าสูงสุด และต่ำสุดของความเค้นแนวตั้งฉากนี้ว่า "ความเค้นหลัก (Principal stress)" โดยจากสมการที่ (2.3) และ สมการที่ (2.5) สมมติให้ความเค้นหลักเกิดขึ้นเมื่อ  $\frac{d\sigma_{x1}}{d\theta} = 0$  จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{d\sigma_{x1}}{d\theta} = 0 = -(\sigma_x - \sigma_y)sin2\theta + 2\tau_{xy}cos2\theta$$
(2.6)

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \tag{2.7}$$

จากสมการ (2.7) มุม  $heta_p$  คือมุมที่ระนาบซึ่งเกิดความเค้นหลัก (Principal stress) กระทำ กับแกน x โดยเรียกระนาบนี้ว่าระนาบหลัก (Principal plane) กล่าวคือเมื่อให้ค่าของ  $2 heta_p$  มี 2 ค่า โดยมีความแตกต่างกัน 90 องศา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีค่าความแตกต่างกัน เท่ากับ  $rac{\pi}{2}$  ดังปรากฏ ในสมการ (2.7) และเพื่อความเข้าใจที่ ขออ้างอิงรูปภาพจาก รศ.ดร. ชาวสวน กาญจโนชัย นำเสนอดัง ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ทิศทางของการแบ่งค่าตามแนบระนาบ

จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อมุม  $\theta_p$  ค่าหนึ่งจะทำให้เกิดความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal stress) และอีกค่าหนึ่งจะทำให้เกิดความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum principal stress) ดังนั้นแล้วความเค้นหลักที่เกิดขึ้นทั้งสองค่าจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ตั้งฉากต่อกัน และค่าของเค้นหลัก จะสามารถคำนวณได้จากการแทนค่าสูตรคำนวณในตัวแปรของ  $\theta_p$ ทั้งสองในสมการเปลี่ยนรูปความ เค้นแบบระนาบ (สมการ Transformation of plane stress)

2.4 ภาพรังสีสวนตัดโดยคอมพิวเตอรชนิดโคนบีม (Cone-beam computed tomography: CBCT )

ภาพรังสีส่วนตัดโดยคอมพิวเตอร์ชนิดโคนบีม หรือ CBCT เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญ อย่างยิ่งในการศึกษาในครั้งนี้ เนื่องจากแบบจำลองโมเดล 3 มิติของรูปทรงฟัน หรือแม้กระทั้งรูปทรง ที่มีความซับซ้อนสูง ทำให้ในบางครั้งการสร้างโมเดลขึ้นมานั้นเกิดขึ้นได้อย่างยากลำบาก ในทาง กลับกันเมื่อนำเทคโนโลยี CBCT เข้ามาประยุกต์กับงานวิจัยครั้งนี้ทำให้การสร้างแบบจำลองโมเดลฟัน กรามซี่ที่หนึ่งนั้นมีความแม่นยำมากขึ้น [7] โดยหลักการทำงานของเทคโนโลยี CBCT นั้นอาศัยการ ปล่อยรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีผ่านผู้ป่วยและมีตัวรับรังสีตรวจจับ โดยทั้งแหล่งกำเนิดรังสีและ ตัวรับรังสีจะติดบนแกนหมุนรอบตัวผู้ป่วย 360 องศาดังรูปที่ 2.9 เพื่อให้ได้ปริมาณของภาพ เช่นเดียวกับการถ่ายภาพรังสีแบบแพโนรามา (panoramic) จากนั้นบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปสร้างเป็น ภาพตัดขวางด้วยโปรแกรมในคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตของลำแสงรูปกรวย [8]

#### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

10

# 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่<mark>ยวข้</mark>องกับรอยร<mark>้าวของ</mark>ฟันในระดับคลินิ<mark>ก</mark>

การศึกษารอยร้าวที่เกิดขึ้นในปี 1954 ของ G. JW et al. ซึ่งเป็นคนแรกที่ได้เริ่มต้นอธิบาย การป่วยของผู้ป่วยที่เกิดจากอาการเจ็บปวดซึ่งเกิดจากการแตกหักหรือการเกิดรอยร้าวในบริเวณของ ฟันผู้ป่วย ซึ่งจากการตีพิม<mark>พ์ผล</mark>งานของ S. Hasan et al. [3] ในปี 201</mark>5 การทำให้เกิดความเจ็บปวด ขึ้นในฟันซึ่งมีผลมาจากการแตกหักของตัวฟัน หรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นในลักษณะที่แตกต่างกันไปของ ผู้ป่วย

โดยในเวลาใกล้เคียงกันในปี 2015 การศึกษาของ J. Manokawinchoke et al. [1] ซึ่งได้ ทำการศึกษาการผลิตสารโปรตีนจำพวก mRNA ของเซลล์เนื้อเยื้อเอ็นยึดปริทันต์ของมนุษย์ (Human periodontal ligament: hPDL) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ช่วยในการฟื้นฟูและสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมาโดยใช้การ จำลองแรงเสมือนการบดเคี้ยวของมนุษย์คือแรงอัดที่เป็นจังหวะเพื่อให้เกิดแรงกระทำขึ้นบนตัวเซลล์ โดยผลที่ได้ออกมาจากการจำลองทำให้เห็นว่าการตอบสนองในการสร้างเอนไซม์ของ hPDL นั้นเกิด การสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้อสรุปที่ได้จากการศึกษานั้นบอกว่าช่วงของแรงกระทำที่ เหมาะสมที่ทำให้เกิดการสร้างเอนไซม์นั้นอยู่ที่ 2-4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร



**รูปที่ 2.10** รูปแสดงการศึกษาโดยแบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่มของ Keitb V. Krell et al. [4]

โดยจากการศึกษาของ K. V. Krell et al. [4] ในปี 2018 ลักษณะของเคสการรักษาการเกิด รอยร้าวของฟันกว่า 2086 เคสนั้น เป็นฟันกรามล่างซี่ที่สอง (Mandibular second molars) กว่า 36% ตามมาด้วย ฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง (Mandibular first molars) 27% และฟันกรามบนซี่ที่หนึ่ง (Maxillary first molars) 18% โดยวิธีการศึกษาของผู้วิจัยนั้นจะแบ่งชั้นของฟันทั้ง 2086 ออกเป็น 3 ชุดย่อยที่ไม่เหมือนกันดังในรูปที่ 2.10 ซึ่งผลสรุปจากการศึกษานั้นพบว่าเมื่อความลึกของรอยร้าวที่ เกิดขึ้นของฟันมากกว่า 5 มิลลิเมตร เมื่อรับการรักษารากฟันแล้วเกิดความล้มเหลวในการรักษาใน อัตราที่สูงกว่าผู้ป่วยที่ความลึกของรอบร้าวน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

ในการศึกษาของ Y. Abe et al. [5] ในปี 2012 ซึ่งทำการศึกษาเพื่อหาค่าของแรงกัดหรือที่ เกิดขึ้นภายในช่องปากของมนุษย์ โดยมีผู้เข้าร่วมทดสอบทั้งสิ้นจำนวน 99 คน โดยสามารถแบ่งอายุ จากเพศสภาพเป็น 2 กลุ่มคือ ผู้ชาย 49 คน และผู้หญิง 50 คน โดยมีอายุเฉลี่ยอยู่ที่ 20-37 ปี โดย แบ่งการทดสอบเป็น 2 แบบดังรูปที่ 2.15 คือการกัดแบบตำแหน่ง (a) แบบยอดฟันบนล่างชนกัน และ (b) การกัดแบบให้ฟันสบกันและจากผลการศึกษาทำให้ได้ผลของแรงที่กระทำกับแผ่นรับแรงดังรูปที่ 2.11 แบ่งเป็นตำแหน่งของฟันแต่ละซี่

			Force (N	)			Area (m	m <sup>2</sup> )			Pressure	(MPa)		
	Code	n	Median	Mean	s.d.	95% CI	Median	Mean	s.d.	95% CI	Median	Mean	s.d.	95% CI
Maxilla														
Central incisor	U-CI	139	48-9	58.7	41.0	6-8	0.9	1.1	0.9	0.2	57.3	62.5	21.0	3.5
Lateral incisor	U-LI	96	31.7	39-4	27.6	5-5	0.6	0.7	0.7	0.1	60.4	65-6	26.5	5-3
Canine	U-C	114	30.7	38-1	23.8	4-4	0.5	0.7	0.5	0.1	62.3	68.3	22.9	4.2
First premolar	U-PM1	142	36-6	43.2	30.7	5-0	0.7	0.8	0.7	0.1	64.5	68.3	24.7	4.1
Second premolar	U-PM2	156	38-3	49.4	34.7	5-4	0.6	0.9	0.8	0.1	60.1	63-3	20.4	3.2
First molar	U-M1	196	142-2	166-1	97.2	13-6	2.8	3.4	2.2	0.3	51.7	52.7	10.4	1.5
Second molar	U-M2	195	187-5	211.1	124.6	17.5	3.7	4.5	3.0	0.4	49.3	50-0	10.0	1.4
Mandible														
Central incisor	L-CI	128	44.5	53-3	37.4	6-5	0.9	1.0	0.9	0.1	55-1	60.9	22.0	3.8
Lateral incisor	L-LI	98	31.8	37.7	27.3	5-4	0.5	0.7	0.7	0.1	64.8	67.5	26.4	5-2
Canine	L-C	100	31-1	34-4	20.5	4.0	0.5	0.6	0.4	0.1	62.9	69-2	27.6	5.4
First premolar	L-PM1	134	33-2	40.7	27.7	4.7	0.6	0.7	0.6	0.1	63-6	67.8	25.0	4.2
Second premolar	L-PM2	159	38-1	45.9	31.9	5.0	0.6	0.8	0.8	0.1	61.5	65-6	22.4	3.5
First molar	L-M1	196	135-2	150-3	91.9	12.9	2.6	3.0	2.0	0.3	51.9	54-3	12.7	1.8
Second molar	L-M2	196	205-4	236.4	129.7	18.2	4.3	5-1	3-2	0.4	48.9	49.3	8.7	1.2

รูปที่ 2.11 แรงกระทำต่อแผ่นรับแรงกัดแต่ละซี่ [5]

โดยถ้าย้อนกลับไปในปี 2001 R. Steve et al. [8] ได้ศึกษารูปแบบของการเกิดรอยร้าวขึ้น ของฟันชนิด Posterior โดยในรูปที่ 2.12 แสดงรูปแบบของการเกิดรอยร้าวขึ้นโดย (a) รูปแบบที่ 1 ของการเกิดรอยร้าวส่วนของ Maxillary first pre-molar ฝั่ง Mesial และ (b) รูปแบบที่ 2 รอยร้าวที่ เกิดขึ้นบนส่วนของ Mandibular first molar ฝั่ง mesial จะเห็นว่าจากรูปลักษณะการเกิดรอยร้าว นั้นจะเกิดขึ้นบริเวณกลางฟัน หรือไล่จากร่องฟันลงไปบริเวณข้างฟัน (Cemento-enamel junction,



10







**รูปที่ 2.12** (a) รอยร้าวของการเกิดรอยร้าวส่วนของ Maxillary first pre-molar ฝั่ง Mesial (b) รอย ร้าวที่เกิดขึ้นบนส่วนของ Mandibular first molar ฝั่ง mesial [8]

#### <u>2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์</u>

ในปี 2015 B. Amir et al. [9] ได้ศึกษาและพัฒนารูปแบบของการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อ จำลองเชิง 2 มิติดูผลของแรงที่เกิดขึ้นที่ทำให้เกิดการแตกหักของฟันและค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบ ต่อการวิเคราะห์ผล และนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกันระหว่างค่าของการทดลองกับค่าของ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ โดยออกแบบหัวกดดังรูปที่ 2.13 ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าค่าของ โครงสร้างวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลของการแตกหักของวัสดุ โดยที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของความแข็งแรงและความเหนียวเพียงเท่านั้น



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงลักษณะของหัวกด (a) Side view and (b) Top view [9]

ในปี 2016 B. Stefano et al. [10] ซึ่งเป็นการศึกษาเพื่อจำลองการปรากฏการณ์ของการ กระจายความเค้น (Stress distribution) ที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการบดเคี้ยวอยู่ของฟันกรามซี่ที่หนึ่งบน และล่าง หรือในอีกคำกล่าวหนึ่งคือการจำลองปรากฏการณ์เสมือนจริงผ่านโปรแกรมแกรมการ ประมวลผล โดยรูปแบบของโมเดล 3 มิติที่ทางผู้วิจัยได้สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจำลองมาจาก การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Micron-Computed Tomography Scanning หรือ Micron-CT

10



ร**ูปที่ 2.14** แบบจำลอง 3 มิติจากการประยุกต์ Micro-CT กับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [10]

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาพบว่าค่าสูงสุดของแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนหน้าพื้นผิวสัมผัสอยู่ที่ 923 N อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นใน 4 ช่วงเวลาดังรูปที่ 2.15 คือ (a) 0.335 วินาที, (b) 0.375 วินาที, (c) 0.394 วินาที และ (d) 0.425 วินาที โดยสัญลักษณ์ B: buccal, D: distal, L: lingual and M: mesial



### รูปที่ 2.15 ผลการคำนวณแสดงถึงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นใน 4 ช่วงเวลา [10]

โดยในปีเดียวกันงานวิจัยของ W. Ryniewicz et al. [11] เป็นการศึกษาการกระจายตัวของ ความเค้นและระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของตัวยึด จากแบบจำลองฟันเขี้ยวบน (Maxillary central incisor) ซึ่งมีความน่าสนใจที่มีการนำเทคโนโลยีด้าน Cone beam computed tomography (CBCT) เข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองโมเดล 3 มิติที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบการรักษาของฟัน โดยผลการศึกษาทำให้ทราบว่าเนื้อเยื้อโพรงประสาทของฟันได้รับ ผลกระทบ 0.001 MPa ผลการศึกษาทำให้ทราบว่าเนื้อเยื้อโพรงประสาทของฟันได้รับ แรงที่กระทำ 0.001 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1% เมื่อเทียบกับแรงที่ได้

G

STITUTE OV

# ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี	ผู้เขียน	รายละเอียดของการวิจัย	ผลลัพท์			
2015	J. Manokawinchoke et al. [1]	ทำการศึกษาการผลิตสารโปรตีนจำพวก mRNA ของเซลล์เนื้อเยื้อเอ็นยึดปริทันต์ของมนุษย์ (Human periodontal ligament: hPDL)	ช่วงของแรงกระทำที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการสร้าง เอนไซม์เพื่อช่วยในการฟื้นฟูเนื้อเยื้อเซลล์ที่ถูกทำลายไป นั้นอยู่ที่ 2-4 กรัมต่อตารางเซ็นติเมตร			
2018	K. V. Krell et al. [4]	ศึกษาผลของการรักษารากฟันเทียม โดยมีตัวของ ความสูงของรอยร้าวฟันที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตรลงไปมาเป็นตัวเปรียบเทียบผลของการ รักษารากฟันเทียม	พบว่าเมื่อความลึกของรอยร้าวที่เกิดขึ้นของฟันมากกว่า 5 มิลลิเมตร เมื่อรับการรักษารากฟันแล้วเกิดความ ล้มเหลวในการรักษาในอัตราที่สูงกว่าผู้ป่วยที่ความลึก ของรอบร้าวน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร			
2012	Y. Abe et al. [5]	ทำการศึกษาเพื่อหาค่าของแรงกัดหรือที่เกิดขึ้น ภายในช่องปากของมนุษย์โดยมีผู้เข้าร่วมทดสอบ ทั้งสิ้นจำนวน 99 คน โดยสามารถแบ่งอายุจาก เพศสภาพเป็น 2 กลุ่มคือ ผู้ชาย 49 คน และ ผู้หญิง 50 คน โดยม <mark>ีอายุ</mark> เฉลี่ยอยู่ที่ 20-37 ปี	แรงบดเคี้ยวของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง (Mandibular first molars) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 54.3 MPa มีพื้นที่ ของแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนฟันอยู่ที่ประมาณ 3 ตาราง มิลลิเมตร			

# **ตารางที่ 2.1** สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	ผู้เขียน	รายละเอียดของการวิจัย	ผลลัพท์				
2001	R. Steve et al. [8]	ศึกษารูปแบบของการเกิดรอยร้าวของฟันที่เป็น Posterior teeth	รูปลักษณะการเกิดรอยร้าวนั้นจะเกิดขึ้นบริเวณกลางฟัน หรือไล่จากร่องฟันลงไปบริเวณข้างฟัน (Cemento- enamel junction, CEJ)				
2015	B. Amir et al. [9]	ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการรับแรงของ แบบจำลอง Enamel and Dentin ว่า พารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลคืออะไร	พารามิเตอร์ที่ส่งผลเมื่อนำไปคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าค่า ของความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุนั้นไม่ได้เป็น ตัวแปรสำคัญเท่ากับค่าของตัวโครงสร้างวัสดุ				
2016	B. Stefano et al. [10]	ศึกษาเพื่อจำลองการปรากฏการณ์ของการ กระจายความเค้น (Stress distribution) ที่ เกิดขึ้นในขณะที่มีการบดเคี้ยวอยู่ของฟันกรามซื่ ที่หนึ่งบนและล่างแบบไดนามิก	จากการศึกษาพบว่าค่าสูงสุดของแรงกระทำที่เกิดขึ้นบน หน้าพื้นผิวสัมผัสอยู่ที่ 923 N				



# **ตารางที่ 2.1** สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	ผู้เขียน	รายละเอียดของการวิจัย	ผลลัพท์
2016	W. Ryniewicz et al. [11]	การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและ ระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของตัวยึด จากแบบจำลอง ฟันเขี้ยวบน (Maxillary central incisor) โดยใช้ CBCT เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติในการ วิเคราะห์	ผลการศึกษาทำให้ทราบว่าเนื้อเยื้อโพรงประสาทของฟัน ได้รับผลกระทบจากแรงที่กระทำ 0.001 MPa ซึ่งมีค่าน้อย กว่า 1% เมื่อเทียบกับแรงที่ได้
2018	R.A. Hernández-Vázquez et al. [12]	ศึกษาวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์แรงบดเคี้ยว บนฟันกรามล่าง โดยให้ผิวสัมผัสระหว่าง Dentin	แรงที่เกิดขึ้นโดยในการทดลองใช้ชื่อว่าแรงของการบด เคี้ยว แนวตั้งและแนวนอน หรือกล่าวคือแรงที่ตั้งฉากกับ พื้นผิวสัมผัส เป็นแรงที่ถูกต้องตามทฤษฎีเพื่อใช้ในการ จำลองลักษณะของการบดเคี้ยวได้



# บทที่ 3 ระเบียบงานวิจัย

แนวทางการศึกษาวิจัยเรื่องการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นของโมเดล แบบจำลอง 3 มิติของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง (Mandibular first molars) โดยสร้างจากภาพภ่าย CT-Scan ชนิด CBCT (Cone beam computed tomography scanning) ซึ่งขั้นตอนของการศึกษาใน ครั้งนี้จะมีเนื้อหาการศึกษาตามลำดับตามในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงวิธีการศึกษาไว้อย่างครอบคลุม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและลำดับของการศึกษาวิจัย

จากแผนภาพแส<mark>ดงลำ</mark>ดับการทำงานของงานวิจัยนี้ในข้างต้น การศึกษาจะเริ่มต้นจาก การศึกษาวรรณกรรมเพื่อให้เข้าใจทฤษฎีที่ต้องนำมาปรับใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ต่อมาเมื่อมี ความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบการศึกษา และกำหนดวิธีการแก้ปัญหาได้ ขั้นตอนของการกำหนด ขอบเขตที่จะทำการศึกษาวิจัย เมื่อขั้นตอนการกำหนดรูปแบบการศึกษาสำเร็จ จะเป็นการสร้าง แบบจำลองฟันกรามซี่ที่หนึ่งโดยประยุกต์ข้อมูลจากการศึกษาวรรณกรรมในข้างต้นเข้ากับการสร้าง แบบจำลองด้วย เมื่อได้แบบจำลองที่เป็นแบบจำลองของฟันปกติ ( Sound Tooth ) คือฟันกรามซี่ที่ หนึ่งที่จะเป็นใช้อ้างอิงเพื่อวิเคราะห์ผลเมื่อมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการจะศึกษาต่อไป โดย กรณีศึกษาที่ผู้ศึกษาให้ความสนใจคือส่วนของการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติ เมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษามี
ความกว้างของรอยร้าว และความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณ Cemento-Enamel junction (CEJ) โดยเมื่อได้ผลการวิเคราะห์แล้วทางผู้ศึกษาจะวิเคราะห์ผลและการอภิปรายผลเพื่อตรวจเช็คกับ ทฤษฎีเบื้องต้น แล้วจะสรุปผลในลำดับถัดไป

#### 3.1 ขอบเขตการศึกษา

ภายหลังจากการทำการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในข้างต้น ประกอบกับการ ปรึกษาขอคำแนะนำจากทางคณะผู้เชี่ยวชาญในด้านสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้แล้ว ได้ ข้อกำหนดขอบเขตของงานวิจัยชิ้นนี้ว่าทางผู้ศึกษาจะมีการทำโมเดลจำลอง 3มิติของฟันกรามล่างซี่ที่ หนึ่ง (Mandibular first molar) เท่านั้น โดยใช้โปรแกรม Ansys Spaceclaim เพื่อทำการสร้าง โมเดลคู่กับการใช้ข้อมูลจากการทำ CT Scan ภายถ่ายของโครงสร้างฟันจากคนไข้จริง เลขหนังสือ อนุมัติจริยธรรม (HREC-DCU 2016-087) จากคณะทันตแพทย์ศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่ง จะสามารถนำมาสร้างโมเดลจำลอง 3 มิติ ได้ทั้งหมด 7 ส่วนประกอบหลัก คือ เคลือบฟัน (Enamel), เนื้อฟัน (Dentin), เนื้อเยื้อโพรงประสาทฟัน (Pulp), เคลือบรากฟัน (Cementum) และ เนื้อเยื้อปริ ทันต์ (Periodontal ligament: PDL) ทั้งสิ้น 5 ส่วนองค์ประกอบ และมีส่วนของ Bone ที่ใช้เป็นฐาน ยึดโครงสร้างของฟัน คือ Cortical bone กับแบบจำลองภายในเนื้อ bone คือ Cancellous bone รวมทั้งสิ้น 7 ส่วนประกอบหลัก เพื่อสร้างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติ มาเป็นโมเดลอ้างอิงในการทำรอย ร้าวโดยอ้างอิงจากกรณีศึกษาที่พบได้จริงในระดับคลินิกเข้ามาเป็นรูปแบบที่ต้องการศึกษาเบื้องต้น

ในส่วนของการคำนวณวิเคราะห์ผลการจำลองเนื่องจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นจะใช้ระเบียบทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ซึ่งเป็นเครื่องมือภายในโปรแกรมตะกูล ANSYS เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลในรูปแบบของ Static Structural Analysis โดยกำหนดให้คุณสมบัติ วัสดุต่าง ๆ ของโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

#### 3.2 การพัฒนาแบบจำลอ<mark>ง 3 ม</mark>ิติ

10

เมื่อทำการตรวจ<mark>สอบ</mark>ขนาดของตัวอย่างของฟันที่จำนำมาใช้ในการออกแบบเบื้องต้น เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ S. Ruengdit et al [13] แล้วจะนำแบบ CT Scan ซึ่งอธิบายเบื้องต้น เกี่ยวกับวิธีการทำงาน และการประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในครั้งนี้ตัวภาพถ่ายมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ภายในโปรแกรมออกแบบหรือเขียนแบบ (Computer-Aided Design: CAD) การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ โปรแกรมออกแบบ ANSYS Spaceclaim เป็นโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองควบคู่กับภาพถ่าย จากเทคโนโลยี CBCT และโปรแกรมยังสามารถสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่มีความซับซ้อนสูงอย่างเช่น ในกรณีศึกษาในครั้งนี้เป็นต้น โดยวิธีการใช้เครื่องมือในโปรแกรม ANSYS Spaceclaim ในการขึ้นรูป ขึ้นเป็นในแนวตรง หรือแนวแกน Z ดังในรูปภาพที่ 3.2 ซึ่งจากการสร้างแบบจำลองโมเดล 3 มิตินี้จะ สามารถได้ขนาดที่แม่นยำ ส่วนโค้งต่าง ๆ หรือรูปทรงที่ซับซ้อน

# รูปที่ 3.2 การสร้างแบบจำลองจาก Ansys Spaceclaim เพื่อสร้างแบบจำลอง

แต่เนื่องจากภาพถ่ายทาง CT Scan คนไข้กรณีศึกษาครั้งนี้ พบว่ามีส่วนประกอบบางส่วนไม่ สามารถสแกนได้เนื่องจากไม่ได้เป็นวัสดุที่จะสามารถถูกสแกนได้ตามคุณสมบัติของเครื่อง คือ ส่วน ของเคลือบรากฟัน (Cementum), เนื้อเยื้อปริทันต์ (Periodontal ligament: PDL) และเหงือก ดังนั้นเพื่อให้การสร้างแบบจำลอง 3 มิติในครั้งนี้สามารถศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในได้อย่าง ครบถ้วน ดังนั้นทางผู้ศึกษาจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำพารามิเตอร์บางส่วนมาใช้อ้างอิงขนาดของทั้ง 3 ส่วนประกอบข้างต้น ในบทความวิจัยของ H. Christof et al. [14] และ A. Nikolaus et al. [15] ทำ ให้ผู้ศึกษาทราบถึงขนาดความหนาของเคลือบรากฟัน (Cementum) และเนื้อเยื้อปริทันต์ (PDL) เท่ากับ 0.135 มิลลิเมตร และ 0.25 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำให้ผู้ศึกษาสามารถทำแบบจำลองให้ครบ องค์ประกอบ 7 อง<mark>ค์ประกอบดังในรูปที่ 3.3</mark>



**รูปที่ 3.3** ส่วนประกอบ 7 ส่วนหลักของโครงสร้างแบบจำลองโมเดล 3 มิติของฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง

#### 3.3 ระเบียบการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อสร้างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติในโปรแกรมการวิเคราะห์ Ansys Spaceclaim และ เปรียบเทียบขนาดของแบบจำลองกับมาตราฐานของคนเอเชียตามที่ได้อธิบายตามหัวข้อ 3.1 แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง 3 มิติกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการกำหนดค่า วัสดุที่จะใช้ให้กับแบบจำลองโดยจำแนกได้ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของวัสดุเชิงโครงสร้าง แบบ Isotropic และตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของวัสดุเชิงโครงสร้างแบบ Orthotropic

ในตารางที่ 3.1 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุของแบบจำลอง Pulp, Cementum และ Periodontal ligament: PDL ใช้เป็นค่า Isotropic เรื่องจาก ณ ปัจจุบัน ค่าของส่วนประกอบดังกล่าวยังไม่มีตีพิมพ์ผลจากการทดลองจริงที่เป็น Orthotropic

٩	9		
Isotropic Components	Modulus of elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Reference
Dulp	0.002	0.45	[15]
Futp	0.002	0.45	[1]
Cementum	15.50	0.31	[16],[17]
Periodontal ligament: PDL	0.945	0.45	[7]

# ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงโครงสร้างแบบ Isotropic

# ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงโครงสร้างแบบ Orthotropic

Orthotropic	Modulus of elasticity (GPa)		Poisson's Ratio				
Components	Sagittal	Coronal	Axial	Sagittal	Coronal	Axial	Reference
	plane	plane	plane	plane	<mark>pl</mark> ane	plane	V .
Enamel	7 <mark>3.72</mark>	63.27	63.27	<mark>0</mark> .23	<mark>0</mark> .45	0.23	[18]
Dentin	1 <mark>7.07</mark>	5.61	5. <mark>61</mark>	0.30	<mark>0</mark> .33	0.30	[18]
Cancellous bone	1.15	0.21	1.15	0.32	0.06	0.01	[19]
Cortical bone	22.2	18.70	13.0	0.55	0.17	0.32	[20]

เมื่อกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุให้กับแบบจำลอง 3 มิติได้แล้วขั้นตอนต่อไปคือการนำส่วน ของโมเดลเข้าสู่การวิเคราะห์ในโปรแกรม ANSYS ที่เป็นการวิเคราะห์แรงเชิงสถิตศาสตร์ (Static Structure condition loading) ซึ่งเบื้องต้นการวิเคราะห์จะใช้การวิเคราะห์เอลิเมนต์แบบพีระมิด ฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedral 10 nodes) จากในรูป 3.4 จะได้ผลของจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 3,602,924 เอลิเมนต์ แล้วผลของจำนวน node เท่ากับ 4,927,278 nodes



**รูปที่ 3.4** รูปแบบของเอลิเมนต์ที่แบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยมของแบบจำลอง 3 มิติ (Sound tooth model) ในโปรแกรม ANSYS Workbench

3.4 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบพารามิเตอร์

T



**รูปที่ 3.5** รายละเอียดของรอยร้าวที่สร้างในแบบจำลอง 3 มิติ

**ITUTE** 

เมื่อขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ดังหัวข้อที่ 3.3 เสร็จสิ้นแล้วจะได้ส่วนของ Sound Tooth หรือส่วนของฟันกรามซี่ที่หนึ่งที่มีความสมบูรณ์อยู่ ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของรอย ร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองนั้นจึงต้องมีการพัฒนาแบบจำลองขั้นโดยอ้างอิงจากแบบจำลอง Sound Tooth ให้มีรอยร้าวเกิดขึ้นบนแบบจำลองจะสามารถแบ่งขึ้นตอนการศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้ คือ ความกว้างของรอยร้าว (Width) และความสูงของรอยร้าว (Height) ดังในรูปที่ 3.5

จากในรูปที่ 3.5 การสร้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะสร้างให้เกิดขึ้นบนแบบจำลองส่วนของ Enamel และ Dentin ให้เกิดรอยร้าวและในการศึกษานี้จะให้ความลึก (Depth) ของรอยร้าวที่เกิดขึ้น มีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดในแต่ละแบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นเพื่อทำการเปรียบเทียบใน การศึกษาครั้งนี้ โดยความลึกดังกล่าวมีค่าอยู่ 3 mm. อ้างอิงจากพื้นผิวของส่วนของ Dentin เป็น สำคัญซึ่งเหตุผลที่ต้องทำให้พารามิเตอร์ความลึกของรอยร้าวคงที่เพราะเพื่อให้มิติในการศึกษาและ ขอบเขตนั้นแคบลงคือทำการศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เพียง 2 ตัวแปรเท่านั้นคือ ผลกระทบ ของความกว้างของรอยร้าว และ ความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นต่อการกระจายตัวของค่าความเค้นที่ เกิดขึ้นดังนั้นจึงสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้คือ ความกว้างของรอยร้าวที่ใช้มีค่า 0 μm (Sound Tooth), 40 μm, 68 μm, 75 μm, 80 μm และ 100 μm ตามลำดับ

ความสูงของรอยร้าวที่ใช้ในการศึกษาโดยเป็นความสูงของรอยร้าวบริเวณ Cemento-Enamel junction (CEJ) มีขนาดของความสูงคือ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm โดย กรณีศึกษาที่จะใช้อ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบกับผลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณ Dental Pulp พบว่าที่ฟันกรามซี่ที่หนึ่งที่เกิดรอยร้าวที่มีขนาดความกว้างที่ 68 μm มีค่าความขันที่เพิ่มขึ้นเมื่อขนาด ความกว้างเป็น 75 μm อย่างมีนัยะสำคัญ ผู้ศึกษาจึงกำหนดให้ใช้แบบจำลองขนาดฟันที่เกิดรอยร้าว ความกว้าง 68 μm เป็นแบบจำลองอ้างอิง แล้วทำการจำลองค่าความสูงของรอยร้าวที่ CEJ ในกรณี ต่าง ๆ ทั้งหมด 5 กรณีด้วยกันดังที่กล่าวไป

(0)

การวิเคราะห์ผลในการศึกษา จะใช้การวิเคราะห์ผลโดยอ้างอิงจากค่าของความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal stress ) ควบคู่กับข้อมูลเชิงคุณภาพที่เป็นลักษณะของแถบสี หรือ Contour มีแบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ดังนี้ Enamel, Dentin, Cementum, Cortical bone และ Cancellous bone ส่วนแบบจำลอง Dental pulp กับ PDL จะใช้การวิเคราะห์อ้างอิงจากค่าของ Von-Mises stress ควบคู่กับการดูแถบสีเช่นกัน

27

# บทที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้และการอภิปรายผล

จากการจำลองผลวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขหรือไฟไนต์เอลิเม้นต์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะของความกว้างของรอยร้าวและความสูงรอยที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติ ฟันกรามล่างซี่ที่หนึ่ง ของมนุษย์ ถูกนำเสนอเป็นหัวข้อได้ดังนี้ (4.1) ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของขนาดความ กว้างของรอยร้าว (4.2) ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของขนาดความสูงของรอยร้าว

หัวข้อ (4.1) เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนความกว้างของรอยร้าว ที่แตกต่างกันว่าผลกระทบของความกว้างรอยร้าวมีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้น อย่างไรบนแบบจำลอง 3 มิติ และหัวข้อที่ (4.2) จะเป็นการเปรียบเทียบในเชิงความสูงของรอยร้าวที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลองว่าส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างไร

ซึ่งในการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นจากโปรแกรม ANSYS ทางผู้วิจัยจะ ทำการใช้ค่าในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ วัสดุประเภท Enamel, Dentin, PDL, Cementum, Cortical bone and Cancellous bone ใช้ค่าความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress) ในการ วิเคราะห์ผล และวัสดุประเภท Dental Pulp และ Periodontal ligament (PDL) ใช้ค่าของ Von-Mises Stress ในการวิเคราะห์ผล

# 4.1 ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของขนาดความกว้าง (Width) ของรอยร้าว

ในการวิเคราะห์ผลของกระจายตัวความเค้นที่เกิดขึ้นจากขนาดความกว้าง (Width) ของรอย ร้าวที่แตกต่างกันในงานวิจัยครั้งนี้ ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างรอยร้าวจำลองขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติฟัน กรามซี่ที่หนึ่งดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 3.3 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการ เปรียบเทียบพารามิเตอร์นั้น การสร้างรอยร้าวจะจำลองว่ารอยร้าวความยาวเกิดขึ้นตั้งแต่ส่วนของ Middle groove ไปจนถึงบริเวณของ CEJ ดังรายละเอียด ความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้น ทาง ผู้วิจัยได้ให้ขนาดของความกว้างที่แตกต่างกัน 6 กรณี ประกอบด้วย 0 µm (Sound Tooth), 40 µm, 68 µm, 75 µm, 80 µm and 100 µm ผลการวิเคราะห์แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

# 4.1.1 ความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel

จากผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้น แสดงค่าของความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้น บนแบบจำลองที่มีขนาดรอยร้าวที่แตกต่างกันทั้ง 6 กรณี ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นที่ขนาดของ รอยร้าว 0 µm หรือบนแบบจำลองที่ยังไม่เกิดรอยร้าวขึ้นมีค่าของความเค้นดึง (Tensile Stress) คือ 0.06 MPa และค่าของความเค้นกด (Compressive Stress) คือ 74.65 MPa เมื่อนำผลมา เปรียบเทียบกับขนาดของรอยร้าวที่เกิดขึ้นกรณีที่กว้างที่สุดคือ 100 μm มีค่าของความเค้นดึง (Tensile Stress) คือ 15.55 MPa และค่าของความเค้นกด (Compressive Stress) คือ 308.85 MPa พบว่าค่าของความเค้นดึงมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากกรณี 0 μm ขนาด 259 เท่า และความเค้นกดมีค่า เพิ่มสูงขึ้น 4 เท่า แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นว่าเมื่อมีรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ 100 μm เกิดความเค้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบระหว่างขนาดความ กว้างของรอยร้าวที่ 0 μm กับ 100 μm ไม่ได้แสดงว่าค่าที่เกิดขึ้นที่ขนาดของรอยร้าวที่อีก 4 กรณีที่ เหลือจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเป็นเทรนที่เป็นเส้นตรงแต่อย่างใด ดังแสดงให้เห็นรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.3



10

รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ Enamel Principal Stress (Tensile Stress)

ค่าที่แสดงให้เห็นดังในรูปภาพที่ 4.1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันในทุกกรณีแล้วนั้นจะพบว่าค่า ของความเค้นดึงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี 0 μm คือ ที่กรณี 40 μm เพิ่มขึ้น ประมาณ 157 เท่า ที่กรณี 68 μm ค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 223 เท่า ที่กรณี 75 μm เพิ่มขึ้นประมาณ 207 เท่า ที่กรณี 80 μm เพิ่มขึ้นประมาณ 257 เท่า จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดของความกว้างของรอยร้าวมี ค่าที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเค้นดึงบนแบบจำลอง Enamel เพิ่มขึ้นเป็นค่าแปรผันตรงต่อกัน



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของความเค้นดึงของค่า Enamel Principal Stress 6 กรณีศึกษา

ในรูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel จะเห็น ได้ว่ากรณีศึกษาฟันปกตินั้น ค่าของความเค้นดึงที่มากสุดที่สุดบนแบบจำลองเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของ แบบจำลอง แต่ในกรณีศึกษาเมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นที่ขนาดความกว้างของรอยร้าวที่เพิ่มมากขึ้น จะเห็น ว่าพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นดุงที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงที่บริเวณของส่วนปลายที่มีการเกิด รอยร้าว อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่ลักษณะของการเกิดการเสียรูปบริเวณส่วนของปลายรอยร้าวนั้น ทำให้ส่วนที่ของแบบจำลองที่แยกกันเกิดการชนกัน จากการจำลองภาพเคลื่อนไหวแสดงให้เห็นว่า บริเวณดังกล่าวมีการเคลื่อนมาชนกันของปลายรอยร้าว ทำให้เกิดความเค้นดึงนั้นสูง และจะสูงที่สุดที่ ขนาดความกว้างของรอยร้าว 100 µm

10



**รูปที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์ Enamel Principal Stress (Compressive Stress)

อ้างอิงตามรูปภาพที่ 4.3 นั้นค่าของความกดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี 0 µm คือ ที่ กรณี 40 µm เพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า ที่กรณี 68 µm เพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่า ที่กรณี 75 µm เพิ่มขึ้นประมาณ 1.7 เท่า ที่กรณี 80 µm เพิ่มขึ้นประมาณ 1.68 เท่า เช่นเดียวกันกับความเค้นดึงจะ พบว่าเมื่อขนาดของความกว้างของรอยร้าวเพิ่มมากขึ้น ขนาดของค่าความเค้นกดก็เพิ่มขึ้นแบบแปร ผันตรงกับขนาดความกว้างด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของความเค้นของค่า Enamel Principal Stress 6 กรณีศึกษา

10

แสดงในรูปที่ 4.4 พฤติกรรมของการกระจายตัวของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบน Enamel ที่ไม่ เกิดความรอยร้าว (Sound Tooth) พบการกระจายตัวที่มีความสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้แรงที่เกิดขึ้นมีค่า ของความเค้นกด (Enamel Compressive Stress) มีค่าน้อยที่สุดบริเวณจุดรับแรง ในทางกลับกัน เมื่อเปรียบเทียบเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความกว้างของรอยร้าวเพิ่มขึ้นที่ 40 μm, 68 μm, 75 μm, 80 μm และ 100 μm พบว่าที่บริเวณจุดรับแรง (Red spot zone) เกิดความเค้นกดสูงขึ้น ตามลำดับ ประกอบกับเกิดการกระจายตัวของความเค้นกด (Compressive Stress) เพิ่มมากขึ้น ตามลำดับ และมากที่สุดที่ขนาดของความกว้างรอยร้าวที่ 100 μm ซึ่งคาดว่าเกิดจากเวลาบดเคี้ยว เมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้น ทำให้แบบจำลองที่เกิดรอยร้าวนั้นมีการเคลื่อนตัวเข้าหากัน จนทำให้เกิดแรง เชิงกลจนทำให้เกิดความเค้นขึ้น

ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษานั้นจะเห็นว่าค่าที่ของความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบน Enamel พบว่าความเค้นมีที่ค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของขนาดความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้น เมื่อมีขนาดมากกว่า 68 µm และความเค้นจะมีค่าพุ่งขึ้นเมื่อขนาดของความกว้างเพิ่มขึ้นเป็น 100 µm และการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบน Enamel มีพฤติกรรมที่แสดงให้เห็นว่าการเกิดรอย ร้าวของฟันที่ขนาดแตกต่างกันทั้ง 5 กรณีศึกษา และกรณีศึกษาของรูปแบบฟันที่ปกติไม่มีรอยร้าวอีก 1 กรณี การกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนพฤติกรรมต่างไปเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง กรณีที่เกิดรอยร้าวขึ้นกับฟันปกติที่ไม่มีรอยร้าวอย่างมีนัยสำคัญ

# <u>4.1.2 ความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin</u>

จากผลการคำนวณจาก Enamel ผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Dentin แสดงให้ เห็นพฤติกรรมของความเค้นที่เกิดขึ้นแตกต่างไปจากแนวโน้มของความเค้นที่เกิดขึ้นบน Enamel อย่างน่าสนใจของกรณีศึกษา 6 กรณี ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของความเค้นที่เกิดขึ้นของ Dentin จากลักษณะของกราฟที่ได้จากการคำนวณดังในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



**รูปที่ 4.5** ผ<mark>ลการวิเครา</mark>ะห์ <mark>Denti</mark>n Principal Stress (Tensile Stress)

ผลการคำนวณค่า<mark>ความ</mark>เค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบน Dentin นั้นดังรูปที่ 4.5 แสดง ให้เห็นว่าค่าที่เกิดขึ้นเกิดลักษณะคล้ายกราฟรูปทรงตัว U ผู้ศึกษามีความเห็นว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้น เช่นนี้ เนื่องมาจากการได้รับแรงจากส่วนของ Enamel ที่กรณีของฟันปกติ (Sound Tooth) นั้นมีการ ส่งต่อแรงเนื่องจากพฤติกรรมการกระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นบน Enamel มีความสม่ำเสมอกันแล้ว เป็นไปได้ว่าการส่งผ่านแรงนั้นก็จะมีความสม่ำเสมอด้วยทำให้ข้อมูลเชิงปริมาณที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็น ถึงค่าความเค้นดึงที่มีค่าสูงมากคือ 28.342 MPa และในทางตรงกันข้ามค่าของความเค้นดึงที่เกิดขึ้น บน Dentin ที่เกิดขึ้นบนขนาดของรอยร้าวที่ 100 µm มีค่าที่สูงมากคือ 28.414 MPa เนื่องจากการ รับแรงที่มากขึ้นเช่นกันนั่นเป็นสาเหตุที่ทางผู้ศึกษาได้ข้อสรุปในเชิงอุปมาว่า ไม่นับที่กรณีของฟันปกติ ที่ไม่เกิดรอยร้าวขึ้น กรณีที่เกิดรอยร้าวที่ 40 µm, 68 µm, 75 µm และ 80 µm รอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ ทั้ง Enamel และ Dentin ส่งผลให้ Enamel การกระจายตัวของความเค้นไปเกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่ง บนทั้ง Dentin แต่ในทางกลับกันความสามารถในการรับความเค้นดึงของ Dentin จะเสียไปจนทำให้ เกิดความเค้นสะสมที่ส่วนประกอบอื่น อย่างเช่น Pulp, Cementum และ PDL ได้ ทำให้ส่วนของฟัน เหล่านี้จะได้รับแรงที่มากขึ้น

ในทางเดียวกันกับความเค้นดึง (Tensile Stress) พฤติกรรมของความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นบน Dentin ก็จะมีการรับแรงที่น้อยลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความ เค้นกดจะมากที่สุดที่กรณีศึกษาของฟันปกติ และของฟันที่เกิดรอยร้าวมากที่สุด 100 μm ค่าของ ความเค้นกดที่เกิดขึ้นของกรณีศึกษาฟันปกติ คือ 79.257 MPa และของฟันที่เกิดรอยร้าว 100 μm คือ 128.80 MPa และมีค่าของความเค้นกดของกรณีศึกษาอื่นเฉลี่ย คือ 33.62 MPa



**รูปที่ 4.6** ผลก<mark>ารวิเค</mark>ราะห์ Den<mark>tin Prin</mark>cipal <mark>S</mark>tress (Compressive Stress)

ซึ่งจากผลการคำนวณได้ข้อมูลเชิง<mark>คุ</mark>ณภาพตามรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าพฤติกรรมการกระจายตัว ของความเค้นที่เกิดขึ้นบน Dentin นั้นมีความสม่ำเสมอกันของทั้ง 6 กรณีศึกษาและพบว่ากรณีของ ฟันปกติจะเกิดความเค้นกดสูงบริเวณยอดของ Dentin แต่ในกรณีของความกว้างรอยร้าว 100 μm จะสังเกต Red Spot บริเวณของส่วนปลายรอยร้าวค่อนข้างเป็นวงกว้าง



ร**ูปที่ 4.7** การกระจายตัวของความเค้นของค่า Dentin Principal Stress 6 กรณีศึกษา

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Dentin จากกรณีศึกษา พบว่าค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองความเค้นดึงกับความเค้นกดมีความสัมพันธ์กันแบบ แปรผันตามกัน คือเมื่อค่าของความเค้นดึงเพิ่มขึ้น ความเค้นกดที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มขึ้นตาม ถ้าดูข้อมูล เชิงประมาณและคุณภาพประกอบกันพบว่า ที่แบบจำลองปกติเปรียบเทียบกับเมื่อเกิดรอยร้าว ที่ แบบจำลองที่เกิดรอยร้าวนั้นมีความเค้นดึงและความเค้นกดเพิ่มขึ้นที่บริเวณปลายของรอยร้าวชัดที่สุด คือข้อมูลของกรณีศึกษาฟันปกติเปรียบเทียบกับฟันที่มีความกว้างของรอยร้าวขนาด 100 µm ดังรูปที่ 4.7

#### 4.1.3 ค่าความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp

11

จากผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของค่าความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Dental Pulp ของฟันกรามซี่ที่หนึ่งแสดงค่าการเกิดความเค้นตามรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็น ว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองฟันปกติ (Sound Tooth) นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษา ทั้ง 5 กรณีได้ผลคือ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 40 µm และ 68 µm นั้นพบว่าค่าของความเค้น หลักที่เกิดขึ้นของค่าที่ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่อยู่ในช่วงของกรณีศึกความกว้าง ของรอยร้าวเป็น 75 µm 80 µm และ 100 µm และถ้ากล่าวถึงค่าที่เกิดขึ้นของกรณีศึกษา แบบจำลองที่เป็นฟันปกติแล้วนั้นที่มีค่าของความเค้นเกิดขึ้นอยู่ที่ 0.0116 MPa นั้นเมื่อเปรียบเทียบ กับค่าความเค้นหลักที่เพิ่มขึ้นที่กรณีศึกษา 75 µm พบว่ามีค่าความเค้นแตกต่างกันประมาณ 67 เท่า และเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาความกว้างของรอยร้าวที่ 100 µm พบว่ามีค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นประมาณ 190 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นที่แบบจำลองนี้มีค่าที่แปรผันตรงกับความกว้าง ของรอยร้าวที่เพิ่มมากขึ้น คือค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของความกว้างเพิ่มขึ้น และจะมีความเร่ง หรือความชันของกราฟเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดความกว้างของรอยร้าวมีค่ามากกว่า 68 µm



**รูปที่ 4.8** ผลการวิเคราะห์ Dental Pulp Von-Mises Stress

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp พบว่าค่าของความเค้นมีความชันเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่บริเวณกรณีศึกษาที่มากกว่า 68 µm ขึ้น ไปรวมไปถึงปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้นอย่างน้อย 60 เท่าเมื่อเทียบกับความเค้นที่เกิดขึ้นใน ฟันปกติ (Sound Tooth)

10



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของความเค้น (Von-Mises Stress) ของ Dental Pulp 6 กรณีศึกษา

ซึ่งจากข้อมูลเชิงคุณภาพที่แสดงในรูปที่ 4.9 ให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกันของค่าของการ กระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp ส่วนของกรณีศึกษาฟันปกติการ กระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอทั้งทั้งแบบจำลอง และมีความเค้นเกิดขึ้นมากที่จุด ้ปลายของรากดังแสดงในแท็ก (Tag) แต่เมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นบนแบบจำลอง Enamel and Dentin ทำ ให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยร้าว จะเห็นได้ชัด ที่สุดคือเมื่อเริ่มเกิดรอยร้าวที่ความกว้างของรอยร้าว 40 µm พบว่าทั่วทั้งแบบจำลองนั้นเกิดความเค้น สม่ำเสมอทั่วทั้งแบบจำลองเหมือนกับกรณีฟันปกติ แต่เกิดความเค้นที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ แบบจำลองฟันปกติคือ ฟันปกติ = 0.0116 MPa แต่ที่กรณีของ 40 µm = 0.0134 MPa ซึ่งมีค่าที่ เพิ่มขึ้นและเกิดที่จุดเดียวคือที่ปลายรากของแบบจำลอง นั่นแสดงให้ผู้ศึกษาเห็นว่าเมื่อมีรอยร้าวเริ่ม เกิดขึ้น จะส่งผลต่อแบบจำลอง Dental Pulp อย่างมีนัยสำคัญ และที่กรณีของความกว้างรอยร้าวที่ 68 µm ในทำนองเดียวกัน ทั่วทั้งแบบจำลองเริ่มเกิดการกระจายของความเค้นที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก รอยร้าวมีขนาดกว้างขึ้น และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมากที่สุดที่ปลายรากมีค่า 0.0163 MPa ในทาง ต่อเนื่องกันพบว่า เมื่อเปรียบเทียบ Contour ของกรณีศึกษา 75 µm 80 µm และ 100 µm พฤติกรรมการกระจายของความเค้นบนแบบจำลองเปลี่ยนไปจากกรณีการศึกษาของฟันปกติ, 40 µm และ 68 µm การกระจายตัวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองนั้นเริ่มเกิดความไม่สม่ำเสมอกันและมีค่าของ ความเค้นเพิ่มขึ้นคือ 0.7817 MPa, 1.0853 MPa และ 2.2261 MPa ตามลำดับ กรณีศึกษาที่ทางผู้ ศึกษาคิดว่าเกิดผลกระทบของความกว้างรอยร้าวที่ 100 µm พบว่ามีค่าความเค้น (Von-Mises Stress) สูงที่สุดและมีการย้ายตำแหน่งการเกิดไปเกิดที่ปลายรากที่ไม่เหมือนกับกรณีศึกษาก่อนหน้านี้ ทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพนั้นพบว่าค่าของความเค้นที่เกิดขึ้น บนแบบจำลอง Dental pulp แปรผันตามขนาดความกว้างของรอยร้าว และจะมีความชั้นเพิ่มขึ้น อย่างมากเมื่อเกิดของความกว้างรอยร้าวที่มากกว่า 68 µm อย่างมีนัยสำคัญ ทางผู้ศึกษาคาดว่าเกิด จากการที่ขนาดของความกว้างบริเวณ Enamel และ Dentin มากเกินไปจนทำให้เกิดการกระจาย ของแรงผ่านมายังแบบจำลอง Dental pulp ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่อจากแบบจำลองที่เกิดรอยร้าว ดังกล่าวได้

#### 4.1.4 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum

จากผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum แสดงให้ผู้ศึกษาเห็นค่าเชิงปริมาณได้จากรูปที่ 4.10 Tensile Stress และ รูปที่ 4.11 Compressive Stress เห็นถึงความสัมพันธ์กันจากกราฟของข้อมูลที่ได้จากผลการคำนวณว่าค่าของ ทั้ง 2 นั้นสัมพันธ์กันที่จะเห็นกรณีศึกษาที่ขนาดของความกว้างรอยร้าวที่ 100 µm นั้นมีความชันของ กราฟข้อมูลความเค้นดึง (Tensile Stress) และ ความเค้นกด (Compressive Stress) สูงขึ้นอย่าง มากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาทั้ง 5 กรณี



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Tensile Stress)

กราฟของข้อมูลความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้น กับ ความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum นี่เมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่าทั้ง 2 ค่ามีความสัมพันธ์ ไปในทิศทางเดียวกัน และค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดทั้ง 2 บริเวณของความชันกราฟที่ เพิ่มขึ้นสูงในกรณีศึกษาการเกิดรอยร้าวที่ความกว้างของรอยร้าวมีค่า 100 µm

10



ร**ูปที่ 4.11** ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Compressive Stress)

ทางผู้ศึกษาเปรียบเทียบกรณีของความกว้างรอยร้าว 100 µm กับ ค่าเฉลี่ยของค่าความเค้น ที่เกิดขึ้น พบว่าค่าเฉลี่ยของความเค้นดึงของ 5 กรณีมีค่าคือ 3.2066 MPa และค่าของความเค้นดึงที่ เพิ่มขึ้นในกรณี 100 µm มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 14 เท่า และส่วนของค่าเฉลี่ยของความเค้นกด 5 กรณีศึกษามีค่าที่ 38.7904 MPa ซึ่งค่าความเค้นกดในกรณี 100 µm มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเฉลี่ย 5 กรณีประมาณ 4.09 เท่า

ข้อมูลเชิงคุณภาพแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากกรณีศึกษาของการเกิดรอยร้าวขึ้นขึ้นบน แบบจำลอง Enamel และ Dentin นั้นมีผลน้อยมากต่อพฤติกรรมการกระจายตัวค่าความเค้นที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum ทั้งกรณีฟันปกติ และกรณีของฟันที่เกิดรอยร้าวขึ้น แต่อย่างไรก็ ตามถึงแม้ว่าพฤติกรรมการกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองนั้น จะมีความสม่ำเสมอมาก เมื่อเทียบกับแบบจำลองส่วนอื่น แต่ก็ยังมีค่าของความกดที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่เช่นกันบริเวณที่ของรอยต่อ ระหว่าง Cementum กับบริเวณ CEJ ของ Enamel ซึ่งเป็นส่วนปลายของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง จะเห็นได้ว่าขอบของ Cementum นั้นมีค่าของความกดที่ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีรอยร้าว เกิดขึ้น และจะมีความเค้นกดมากที่สุดที่กรณีศึกษาของขนาดความกว้างรอยร้าว 100 μm อาจจะ เนื่องมาจากที่ระดับความกว้างของรอยร้าว 100 μm นั้นมีขนาดที่มากเกินไป เมื่อมีการบดเคี้ยวหรือมี การรับแรงนั้นทำให้ปลายรอยร้าวมืองศาที่เคลื่อนตัวมาก จนทำให้เกิดการกระทบกับขอบบริเวณ Cementum ดังรูปที่แสดง 4.12 กรณีของ 100 μm



16

รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของความเค้น (Cementum Principal Stress) 6 กรณีศึกษา

ข้อมูลปริมาณและคุณภาพจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าความเค้นดึงและความเค้นกด มีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรงกันในแบบจำลอง Cementum และขนาดของความกว้างของรอย ร้าวไม่ได้ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum จนกระทั่งขนาดของความกว้างของ รอยร้าวมีค่า 80 µm จะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 4.10 และ 4.11 และเมื่อมาดูข้อมูลเชิงคุณภาพ ประกอบด้วยก็จะเห็นว่ามีความเค้นเริ่มเร่งตัวขึ้นบริเวณของปลายรอยร้าวที่เกิดขึ้น หรือที่ขอบของ แบบจำลอง Cementum ทางผู้ศึกษาคาดว่าเกิดจากความกว้างที่เกิดขึ้นบน Enamel มีขนาดที่กว้าง เกินไปจนทำให้มีพื้นที่ทำให้รอยร้าวทั้ง 2 ฝั่ง เกิดการเคลื่อนตัวมาชนกันที่บริเวณขอบของ แบบจำลอง Cementum

# 4.1.5 ค่าความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL

จากผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นถึงข้อมูลของค่าความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองของ PDL ซึ่งแสดงข้อมูลเชิงปริมาณของกรณีการศึกษาของฟันปกติ (Sound Tooth) และกรณีของการเกิดรอยร้าวที่มีขนาดความกว้าง 40 µm, 68 µm, 75 µm, 80 µm และ 100 µm แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.13 และแสดงข้อมูลเชิงคุณภาพของพฤติกรรมการกระจาย ตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.14

จากข้อมูลในรูปภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL ซึ่งค่าความเค้นของกรณีฟันปกติมีค่าความเค้น 7.3360 MPa ซึ่งค่าของความเค้นของกรณฟัน ปกติที่เกิดขึ้นค่านี้เมื่อเทียบกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเกิดรอยร้าวขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin นั้นพบว่าค่าของความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงพบว่ามีค่าที่แตกต่างกันไม่เกินประมาณ 12% ของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง และการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง PDL คาดว่าค่าของความเค้นที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเนื่องมากจากแบบจำลองนี้เป็น แบบจำลองที่อยู่ภายในตัวฟันลึก ทำให้การกระจายตัวของแรงถูกแบบจำลองส่วนอื่นดูดซับแรงไป หมดแล้ว

(0)



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ PDL Von-Mises Stress

ในรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นของข้อมูลเชิงคุณภาพก็จะเห็นว่าการกระจายตัวของทุกกรณีศึกษามีการ กระจายตัวของความเค้นที่ค่อนข้างไม่แตกต่างกัน ดังนั้นทางผู้ศึกษาจึงมีความเห็นเกี่ยวกับความเค้นที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL ว่าความกว้างของรอยร้าวที่เกิดนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความเค้นที่เกิดขึ้น บนแบบจำลอง PDL และไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองด้วย



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของความเค้นของค่า PDL Von-Mises Stress 6 กรณีศึกษา

10

การวิเคราะห์ผลของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL พบว่าค่าของความเค้นที่เกิดขึ้น ไม่ได้แปรผันตามขนาดของความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin ซึ่ง ทางผู้ศึกษาคาดว่าที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากแบบจำลอง Enamel, Dentin, Dental pulp และ Cementum มีการดูดซับแรงที่กระจายลงมาจากการเกิดรอยร้าวสูง จะสังเกตว่าที่ขนาดของความ กว้างรอยร้าวมากกว่า 68 µm นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นเกิดขึ้น ทำให้ผู้ศึกษาตั้ง ข้อสังเกตว่าที่ขนาดความกว้างของรอยร้าวมากกว่า 68 µm นั้นพฤติกรรมของการกระจายตัวของ ความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

# <u>4.1.6 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone</u>

จากผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone จากผลของฟันปกติ และกรณีของการเกิดรอยร้าว แสดงให้เห็นตามในรูปที่ 4.15 Tensile Stress และ 4.16 Compressive Stress

จากผลการคำนวณของแรงดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone จากข้อมูลที่ได้ แสดงให้เห็นผลคือ ที่ฟันปกติ (Sound Tooth) ได้ผลการคำนวณของค่าความเค้นดึงที่ 5.125 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการเกิดรอยร้าวขึ้นนั้น ค่าที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกันอยู่ที่ ไม่เกิน 5.69 % ดังนั้นแล้วจากข้อมูลตัวเลขที่เปรียบเทียบนี้ เลยสรุปได้ว่าเมื่อมีการเกิดรอยร้าวขึ้น ค่า ของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่แบบจำลอง Cortical bone นั้นส่งผลกระทบน้อยมากต่อความเค้นที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลองนี้



**รูปที่ 4.15** ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Tensile Stress)

10

ในทำนองเดียวกันกับค่าของความเค้นดึง (Tensile Stress) ค่าของความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองตามข้อมูลในรูปที่ 4.16 นั้น จะเห็นว่าค่าของความ เค้นกดของฟันปกตินั้นอยู่ที่ 25.303 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นบน แบบจำลอง Enamel และ Dentin นั้นพบว่าค่าของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 2.79 % ซึ่ง สามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกได้ว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลกระทบน้อยมากกับความเค้นกดที่เกิดขึ้นบน แบบขำลอง Cortical bone

พบว่าค่าของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone นั้นมีค่าของความเค้นดึง และความเค้นที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งคาดว่าเกิดปรากฏการณ์เดียวกับแบบจำลอง PDL คือ แบบจำลอง Enamel, Dentin, Dental pulp และ Cementum มีการดูดซับแรงที่กระจายลงมาจาก การเกิดรอยร้าวค่อนข้างเยอะแล้วทำให้แรงที่เกิดขึ้นเมื่อขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อความ เค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone มากนัก



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Compressive Stress)

จากข้อมูลเชิงคุณภาพในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้น หลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone ซึ่งจากภาพดังกล่าวพฤติกรรมการกระจายตัวของความ เค้นที่เกิดขึ้นนั้น พบว่ามีพฤติกรรมที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลอง ของกรณีศึกษาที่ฟันปกติ และกรณีของฟันที่เกิดรอยร้าวขึ้น จากในรูปจะสังเกตเห็นว่าความเค้นดึงที่ เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนแบบจำลอง และจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณขอบของ แบบจำลอง (สีน้ำเงินเข้ม) และบริเวณรอบ ๆ ที่เป็นส่วนรอยต่อระว่างแบบจำลองนั้นเกิดเป็นความ เค้นกดกระตัวเป็นวงกว้างและคล้ายกันทั้ง 6 กรณีศึกษา



**รูปที่ 4.17** การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cortical bone Principal Stress 6 กรณีศึกษา

# 4.1.7 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone

ผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของค่าความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone พบว่าผลของความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองแสดงค่าให้ เห็นตามในรูปที่ 4.18 ค่าของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองกรณีฟันปกติ พบว่ามีค่าอยู่ที่ 0.25664 MPa ซึ่งเมื่อนำค่าเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่เกิดรอยร้าวขึ้นนั้นพบว่าความแตกต่างของค่า ของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงเพียง 2.26 % เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นกรณีของการเกิดรอย ร้าวขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin นั้นไม่ได้ส่งผลกระทบมากต่อแบบจำลอง Cancellous bone

ซึ่งในทำนองเดียวกันกับความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone นั้นค่าของความเค้นกดของกรณีสึกษาฟันปกติมีค่าอยู่ที่ 1.2986 MPa เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าความเค้นกดที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาของการเกิดรอยร้าว พบว่าค่าของความเค้นกด ที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าราว 0.6699 % ซึ่งถือว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการที่ค่าเปลี่ยนแปลงน้อย มากสามารถบ่งบอกได่ว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin นั้นส่งผลกระทบต่อ ความเค้นกดที่เกิดขึ้นที่แบบจำลอง Cancellous bone น้อยมาก



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Tensile Stress)

กรณีศึกษาของฟันปกติ เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาเมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นที่แบบจำลอง Enamel และ Dentin พบว่าการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองนั้นทั้ง 6 กรณีศึกษามี พฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นไม่แตกต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณส่วนใหญ่ของแบบจำลองนั้น เกิดความเค้นดึง และความเค้นดึงจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบรอยต่อกับแบบจำลอง PDL และจำ เกิดความเค้นกดมากที่สุดที่บริเวณขอบรอยต่อของแบบจำลอง Cancellous bone กับ แบบจำลอง Cortical bone)



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Compressive Stress)

10

ในรูปที่ 4.20 แสดงข้อมูลเชิงคุณภาพของการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นค่าของ พฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone ซึ่งแสดงการ กระจายที่เห็นนั้นกล่าวได้ว่าค่าของความเค้นดึงมีการกระจายตัวบริเวณส่วนใหญ่ของแบบจำลองและ มีค่าของความเค้นดึงมากที่สุดที่ส่วนของขอบรอยต่อระหว่างแบบจำลอง Cortical bone และ Cancellous bone



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cancellous bone Principal Stress 6 กรณีศึกษา

จากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นดึงและความเค้นกดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองนั้น ไม่มี ผลกระทบต่อความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองมากนัก จากข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพที่แสดง ที่เป็นเช่นนั้นทางผู้ศึกษาคาดว่า แบบจำลอง Enamel, Dentin, Dental pulp และ Cementum มี การดูดซับแรงที่กระจายลงมาจากการเกิดรอยร้าวค่อนข้างเยอะแล้วจึงทำให้แรงที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดรอย ร้าวขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone น้อย

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางไฟในต์เอลิเมนต์ของขนาดความสูง (Height) ของรอยร้าว

(

การวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดความสูง (Height) ของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติที่ผู้ศึกษาต้องการนำมาศึกษาในหัวข้อนี้นั้น ทางผู้ศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองของรอยร้าวขึ้น ให้จะอ้างอิงแบบจำลองที่มีขนาดของความกว้างรอยร้าวที่ 68 µm มาใช้เป็นแบบจำลองอ้างอิงในการ ปรับค่าพารามิเตอร์ของความสูงบริเวณ CEJ ของรอยร้าว ได้อธิบายไว้เบื้องต้นในหัวข้อที่ 3.3 ที่ทางผู้ ศึกษาได้ให้ความสนใจนำแบบจำลองของขนาดความกว้างรอยร้าวที่ 68 µm มาทำการศึกษาต่อ แทนที่จะทำความสูงของรอยร้าวที่เปรียบเทียบกับแบบจำลองฟันปกติ (Sound tooth) นั้นมีเหตุผล 2 ประการคือ ประการแรกปัญหาของคนไข้ทางคลินิคส่วนใหญ่ที่ต้องมีการทำการรักษาฟันทันทีพบว่า จะรักษาเมื่อเกิดรอยร้าวซึ่งวินิจฉัยจากการใช้เครื่องมือทางทันตกรรมสัมผัสบริเวณรอยร้าว หรือเป็น ขนาดของความกว้างของรอยร้าวที่สพิเศษที่ใช้ทางทันตกรรมสามารถย้อมติด คือประมาณ 68 µm และเหตุผลประการที่ 2 คือจากการที่ผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ขนาดของความกว้างของรอยร้าวขึ้น ในหัวข้อที่ 4.1 นั้นจะสังเกตได้ว่าที่ขนาดของความกว้างของรอยร้าวที่ 68 µm นั้นค่าความเค้นที่ เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองกรณีศึกษาอื่นพบว่า ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีความชันเกิดขึ้นมากอย่าง มีนัยสำคัญ ดังนั้นเหตุผลทั้ง 2 ประการดังกล่าวมาข้างต้นทางผู้ศึกษาจึงเลือกแบบจำลองของฟัน 3 มิติที่เกิดรอยร้าวและมีขนาดความกว้างที่ 68 µm มาเป็นตัวเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ผลครั้งนี้



**รูปที่ 4.21** ภาพแสดงลักษณะของกรณีศึกของของความสูงรอยร้าวบริเวณ CEJ

ซึ่งผู้ศึกษาได้ทำการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของความสูงขึ้นทั้งหมด 5 กรณีศึกษาด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งค่าความสูงของแบบจำลองอ้างอิงที่ผู้ศึกษานำมา เปรียบเทียบนั้น ขนาดความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นถึงบริเวณ CEJ มีขนาดความสูงคือ 5.4 mm ดังนั้นแล้วดังแสดงในภาพ กรณีศึกษาของขนาดความสูงทั้งหมดมีดังนี้ ขนาดความสูง 5.4 mm (แบบจำลองอ้างอิง 68 µm), ขนาดความสูง 2 mm, ขนาดความสูง 3 mm, ขนาดความสูง 4 mm และ ขนาดความสูง 5 mm ผู้ศึกษาจะควบคุมพารามิเตอร์ในการศึกษาให้คล้ายกับการศึกษากรณีของ ความกว้างของรอยร้าวมากที่สุดคือ ความลึกของรอยร้าวที่ 3 mm จากเนื้อของแบบจำลอง Dentin ผลการวิเคราะห์แสดงดังหัวข้อการวิเคราะห์ของแบบจำลองดังต่อไปนี้

# <u>4.2.1 ความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel</u>

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นถึงค่าของความเค้นต่ำสุดที่เกิดบน แบบจำลอง Enamel ขนาดความกว้างรอยร้าวที่ 68 µm แสดงจากผลของความสูงของรอยร้าวที่เกิด แตกต่างกันทั้งหมด 5 กรณีศึกษาประกอบด้วยกรณีของความสูงบริเวณ CEJ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm ผลของการคำนวณที่ได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.22 ความเค้นดึง (Tensile Stress) และ 4.23 ความเค้นกด (Compressive Stress)



รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ Enamel Principal Stress (Tensile Stress)

รูปที่ 4.22 แสดงค่าของความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel ซึ่ง จากผลการคำนวณพบว่าขนาดของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณ CEJ นั้นได้ค่าของความเค้น ดึงที่ความสูงของรอยร้าว 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm คือ 0.23 MPa, 0.09 MPa, 5.33 MPa, 9.83 MPa และ 13.42 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นเป็นแนวโน้มว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้น บริเวณ CEJ ยิ่งมีความสูงของรอยร้าวเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดความเค้นดึงบนแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างมี นัยสำคัญ

ผลการคำนวณที่ได้ของความเค้นกด (Compressive Stress) แสดงให้เห็นค่าของความเค้น กดของความสูงของรอยร้าวที่ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm คือ 0.125.51 MPa, 130.88 MPa, 134.96 MPa, 135.67 MPa และ 121.86 MPa ตามลำดับ พบว่าค่าความเปลี่ยนแปลง ของความกดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นกดที่เกิดขึ้นราว 11 % ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นผู้ศึกษา จึงสามารถกล่าวได้ว่าความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาทั้งหมด 5 กรณีนั้นไม่ได้ส่งผลอย่าง มีนัยยะมากนักต่อความเค้นกดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel



#### **รูปที่ 4.2<mark>3</mark> ผลก<mark>ารวิเ</mark>คราะห์ Ena<mark>mel Pr</mark>incipa<mark>l</mark> Stres<mark>s (Co</mark>mpressive Stress)**

ในรูปที่ 4.24 แ<mark>สดง</mark>การกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel ใน กรณีศึกษาของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้น จากรูปพบว่าบนพื้นผิวของแบบจำลองมีการกระจาย ตัวอย่างสม่ำเสมอที่บริเวณค่าใกล้ 0 MPa กล่าวคือบนแบบจำลองเกิดความเค้นขึ้นน้อยมาก แล้วเมื่อ ดูที่บริเวณจุดรับแรง 8 จุดจะเกิดจุด Red spot หรือบริเวณที่เกิดความเค้นกดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจุด ที่รับแรงกดดังกล่าวไม่ได้เป็นจุดที่มีความเค้นกดมากที่สุด แต่เป็นบริเวณรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนร่องของ แบบจำลอง ซึ่งจะเห็นได้ตาม Tag ดังกล่าว ทุกกรณีศึกษาพบว่าความเค้นกดเกิดขึ้นมีค่ามากสุดที่ บริเวณจุดเดียวกันทั้ง 5 กรณีศึกษา และส่วนของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นสูงสุดนั้นในลักษณะเดียวกับ ความเค้นกดที่เกิดขึ้น ความเค้นดึงจุดที่เกิด Cold spot มากที่สุดคือบริเวณของปลายของรอยร้าวที่ เกิดขึ้น ยกเว้นกรณีของ 3 mm ที่ความเค้นดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นบริเวณจุดรับแรงกรณีเดียว เท่านั้น

จากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพของแบบจำลอง Enamel เมื่อความสูงของรอย ร้าวเปลี่ยนแปลงไปพบว่า ความสูงของรอยร้าวส่งผลต่อความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองส่วน ของความเค้นดึง มากกว่าความเค้นกดพบว่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผัน ตามความสูงของรอยร้าว ส่วนความเค้นกดที่ขนาดของความสูง 2 mm – 5 mm นั้นมีการ เปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตามขนาดความสูงเล็กน้อย แต่ที่ความสูง 5.4 mm นั้นค่าความเค้นเกิดค่าที่ ลดลง ผู้ศึกษาคาดว่าที่ความสูง 5.4 mm ซึ่งเป็นระยะที่เกิดการแบ่งของความเค้นกล่าวคือปลายของ รอยร้าวเกิดแยกออกจากกัน ทำให้เกิดปริมาณความเค้นกดน้อยลง แต่ความเค้นดึงมีปริมาณเพิ่ม สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



**รูปที่ 4.24** การกระจ<mark>ายต</mark>ัวของความเ<mark>ค้นของ</mark>ค่า Enamel Pr<mark>incip</mark>al Stress 5 กรณีศึกษา

# <u>4.2.2 ความเค้นห<mark>ลักต่</mark>ำสุดที่เกิดขึ้น</mark>บนแบบ<mark>จำลอง</mark> Denti<mark>n</mark></u>

จากผลการวิเคร<mark>าะห์ท</mark>างไฟไนต์เ<mark>อ</mark>ลิเมนต์แสดงให้เห็นถึงค่าของความเค้นต่ำสุดที่เกิดบน แบบจำลอง Dentin ขนาดความกว้างรอยร้าวที่ 68 µm แสดงจากผลของความสูงของรอยร้าวที่เกิด แตกต่างกันทั้งหมด 5 กรณีศึกษาประกอบด้วยกรณีของความสูงบริเวณ CEJ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm ผลของการคำนวณที่ได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.25 ความเค้นดึง (Tensile Stress) และ 4.26 ความเค้นกด (Compressive Stress) จากรูปที่ 4.25 แสดงผลการคำนวณของค่าของค่าความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษา ทั้ง 5 กรณีศึกษาต่อความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin ค่าของความเค้น ดึงที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษาของความสูงรอยร้าวบริเวณ CEJ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm มีค่าความเค้นดึงคือ 1.474 MPa, 2.972 MPa, 2.918 MPa, 3.848 MPa และ 11.257 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากผลการคำนวณที่ได้นั้น พบว่าค่าของความสูงของรอยร้าวที่บริเวณ CEJ ส่งผลอย่างมี นัยสำคัญต่อความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin



## ร**ูปที่ 4.25** ผลการวิเคราะห์ Dentin Principal Stress (Tensile Stress)

10

ผลการคำนวณที่ได้ของความเค้นกด (Compressive Stress) พบว่าค่าของความเค้นกดของ ความสูงของรอยร้าวที่ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm คือ 33.91 MPa, 32.345 MPa, 31.214 MPa, 31.848 MPa และ 28.839 MPa ตามลำดับ พบว่าค่าความเปลี่ยนแปลงของ ความกดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นกดที่เกิดขึ้นราว 14 % ซึ่งถือว่าน้อยมาก ดังนั้นทางผู้ ศึกษาจึงสามารถกล่าวได้ว่<mark>าควา</mark>มสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาทั้งหมด 5 กรณีนั้นไม่ได้ส่งผล อย่างมีนัยยะมากนักต่อคว<mark>ามเค้</mark>นกดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin

#### 49



**รูปที่ 4.26** ผลการวิเคราะห์ Dentin Principal Stress (Compressive Stress)

จากข้อมูลการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin ตามในรูปที่ 4.27 แสดงให้เก็นว่าการกระจายตัวของความเค้นมีความสม่ำเสมอกันทั่วทั้งแบบจำลอง แต่จะสังเกตได้ว่า บริเวณจุดเริ่มของรอยร้าว (บริเวณร่องของ Dentin) นั้นมีความเค้นกดเกิดขึ้นเหมือนกันกันทั้ง 5 กรณีศึกษา แล้วเป็นจุดที่เกิดความเค้นดึงมากที่สุดเช่นกัน

16



**รูปที่ 4.27** การกระจายตัวของความเค้นของค่า Dentin Principal Stress 5 กรณีศึกษา

50

จากผลการวิเคราะห์พบว่าขนาดของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dentin นั้นมีผลแปรผันตรงต่อค่าของความเค้นดึง และส่งผลแปรผกผันต่อค่าความเค้นกด ซึ่งผู้ศึกษาคาดว่าที่ ความเค้นดึงมีค่าเพิ่มขึ้นแรงที่เกิดขึ้นในช่วงของร่องของรอยร้าวนั้นค่าของแรงที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรม การกระจายตัวตามแนวร่องของรอยร้าวและพยายามดันให้รอยร้าวนั้นมีการแยกตัวมากขึ้น เพราะว่า รูปร่างของรอยร้าวที่ทางผู้ศึกษาจำลองนั้นมีรูปแบบคล้ายลิ่ม และสาเหตุที่ความเค้นกดมีค่าลดลงเมื่อ ความสูงของรอยร้าวเพิ่มขึ้นนั้นคาดว่ามาจากความเค้นกดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยร้าวนั้น เมื่อขนาดตามพื้นที่ของรอยร้าวเพิ่มมากขึ้น จากความสูง 2 mm – 3 mm ทำให้พื้นที่การกระจาย ของแรงเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงเป็นสาเหตุให้ที่ความสูงเพียง 2 mm นั้นมีขนาดของความเค้นกดมากที่สุด

# <u>4.2.3 ค่าความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp</u>

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดบน แบบจำลอง Pulp เมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin ที่ความสูงตาม กรณีศึกษาทั้ง 5 กรณีดังกล่าว แสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.28 ว่าขนาดความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นตาม กรณีศึกษาทั้ง 5 กรณีซึ่งประกอบไปด้วย ขนาดความสูง 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm มีค่าความเค้นเกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp คือ 0.0083 MPa, 0.0055 MPa, 0.0055 MPa, 0.0055 MPa และ 0.0163 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากผลการคำนวณแสดงความเปลี่ยนแปลงเมื่อ เทียบขนาดความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้น พบว่าที่บริเวณ Dental Pulp นั้นขนาดความสูงของรอย ร้าวที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองแต่อย่างใด



รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ Dental Pulp Von-Mises Stress

จากผลการคำนวณของข้อมูลเชิงคุณภาพตามในรูปที่ 4.29 พฤติกรรมการกระจากตัวของค่า ความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Dental Pulp นั้นค่าของความเค้นที่เกิดน้อยที่สุดจะสังเกตเป็น ปลายรากเล็กของแบบจำลองกรณีศึกษาเหมือนกันทั้ง 5 กรณีและจำเกิดความเค้นมากที่สุดบริเวณที่ เป็นปลายรากใหญ่ทางขวามือของแบบจำลองในรูปภาพ และความเค้นมีการกระจายกันอย่าง สม่ำเสมอในแบบจำลอง Dental Pulp

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษานี้นั้นไม่ ส่งผลต่อการเกิดความเค้นขึ้นบนแบบจำลอง Dental pulp คาดว่าเพราะแรงที่เกิดขึ้นนั้นถูก แบบจำลอง Enamel และ Dentin ดูดซับแรงที่เกิดขึ้นไปหมดแล้ว ทำให้ค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Dental pulp นั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก จนถึงไม่เปลี่ยนแปลงเลย



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของความเค้นของค่า Dental Pulp Von-mises Stress 5 กรณีศึกษา

# <u>4.2.4 ค่าความเค้<mark>นหลัก</mark>ต่ำสุดที่เกิด<mark>ขึ้นบนแบบจำล</mark>อง Ce<mark>men</mark>tum</u>

จากผลการวิเครา<mark>ะห์ท</mark>างไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นผ<mark>ลลัพ</mark>ธ์ของการคำนวณของค่าความ เค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum เมื่อมีการจำลองให้เกิดรอยร้าวขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin ดังกรณีศึกษาของขนาดความสูงของรอยร้าวทั้ง 5 กรณีซึ่งแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 4.30 ความเค้นดึง (Tensile Stress) และรูปที่ 4.31 ความเค้นกด (Compressive Stress)

ในรูปที่ 4.30 แสดงผลของความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum เมื่อทำการศึกษากรณีศึกษาของขนาดความสูงของรอยร้าวทั้ง 5 กรณี พบว่าผลการ คำนวณแสดงให้เห็นค่าที่เกิดขึ้น มีขนาดความเปลี่ยนแปลงเพียงแค่ 7% เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขนาดของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษานั้น ไม่ได้ส่งผลต่อค่าของความเค้นดึง



รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Tensile Stress)

ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ของค่าความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum นั้นในทางเดียวกันกับค่าของความเค้นดึงที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลง ของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นนั้น พบว่ามีค่าของความเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นราว 1 % เท่านั้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ผลกระทบของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้น ไม่ได้ส่งผลมากนักต่อความเค้นกดที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum

10-



ร**ูปที่ 4.31** ผลการวิเคราะห์ Cementum Principal Stress (Compressive Stress)

เมื่อมาดูข้อมูลเชิงคุณภาพในรูปที่ 4.32 :ซึ่งแสดงข้อมูลพฤติกรรมการกระจายตัวของความ เค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของความสูงรอย ร้าวที่เกิดขึ้น 5 กรณีศึกษา จะเห็นว่าความเค้นดึงเกิดขึ้นมากสุดที่บริเวณส่วนขอบหลังของแบบจำลอง และความเค้นกดจะเกิดขึ้นมากสุดที่บริเวณปลายของรอยร้าวที่เกิดขึ้น จะพบว่าที่แบบจำลองกรณี ความสูงของรอยร้าวเป็น 5.4 mm จะเห็นว่าเกิดจุดแดง (Red spot) บ่งบอกถึงแรงกดที่เกิดขึ้นบน แบบจำลองมากกว่าแบบจำลองกรณีศึกษากรณีอื่น



รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cementum Principal Stress 5 กรณีศึกษา

10

จากการวิเคราะห์นั้นสามารถสรุปได้ว่าความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความเค้น หลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cementum ซึ่งคาดว่ามีจากแรงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin นั้นถูกดูดซั<mark>บ</mark>ทั้ง 2 แบบจำลอง</mark>หมดแล้วทำให้ค่าของแรงที่เหลือลงมาถึงแบบจำลอง Cementum น้อยมาก

#### <u>4.2.5 ค่าความเค้น (Von-Mises S<mark>t</mark>ress) ที่เก**ิดขึ้น**บนแบ<mark>บจำล</mark>อง PDL</u>

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของความเค้น (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง PDL จากผลกระทบของความขนาดความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin ทั้งหมด 5 กรณีศึกษา พบว่าจากรูปที่ 4.33 แสดงข้อมูลของผลการคำนวณซึ่ง จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL ที่ขนาดของความสูงรอยร้าวที่ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm มีค่าความเค้นเกิดขึ้นคือ 7.3648 MPa, 7.3639 MPa, 7.3639 MPa, 7.3639 MPa และ 7.3641 MPa ตามลำดับ จะจะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL เมื่อมีการศึกษาที่ขนาดความสูงของรอยร้าวที่แตกต่างกัน มีค่า การเปลี่ยนแปลงเพียง 0.009 % เท่านั้นซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ขนาดของความสูงรอยร้าวที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Enamel และ Dentin ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL



#### รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ PDL Von-Mises Stress

TC

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงคุณภาพของการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง PDL ตามในรูปที่ 4.34 ก็จะพบว่าการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง ของกรณีศึกษาทั้งหมด 5 กรณีดังกล่าวมีการกระจายตัวของความเค้นสม่ำเสมอและเหมือนกันทั้ง 5 กรณีศึกษา และค่าของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแบบจำลอง Cortical bone และ PDL ทำให้เมื่อเกิดการรับแรงจากแบบจำลอง Enamel ที่ให้เกิดการสัมผัสกับแบบจำลอง Cortical bone เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ได้ทำการอ้างอิงในการวิจัยครั้งนี้ จึงทำให้ความเค้นเกิดขึ้น สูงบริเวณนั้น

ในทำนองเดียวกับ<mark>แบบ</mark>จำลอง Dental pulp ความเค้นที<mark>่เกิดขึ้</mark>นบนแบบจำลอง PDL นั้นจาก ผลการวิเคราะห์พบว่าขนาดพารามิเตอร์ความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้ส่งผลต่อความเค้นที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง PDL ดังข้อมูลที่แสดงใน รูปที่ 4.33

55



ร**ูปที่ 4.34** การกระจายตัวของความเค้นของค่า PDL Von-Mises Stress 5 กรณีศึกษา

# 4.2.6 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone

(

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลกระทบของขนาดความสูงรอยร้าวที่เกิดขึ้น จากกรณีศึกษา 5 กรณีกับค่าความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone นั้นแสดงให้เห็น ความเค้นดึง (Tensile Stress) ในรูปที่ 4.35 และ ความเค้นกด (Compressive Stress) ในรูปที่ 4.36 ตามลำดับ



**รูปที่ 4.35** ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Tensile Stress)

จากผลการวิเคราะห์ได้ข้อมูลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองตามในรูปที่ 4.35 พบว่าความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองจากการศึกษากรณีของขนาดความสูง ทั้งหมด 5 กรณีคือ ขนาดความสูงของรอยร้าว 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm มีค่า ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง คือ 5.166 MPa, 5.1656 MPa, 5.1655 MPa, 5.1652 MPa และ 5.1645 MPa ตามลำดับ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นนั้น พบว่าค่าความเปลี่ยนแปลงเพียง 0.3 % เท่านั้นซึ่งทำให้ผู้ศึกษาสามารถกล่าวได้ว่าขนาดของความสูง ของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษาทั้ง 5 กรณีไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นดึงบนแบบจำลอง Cortical bone

ในทำนองเดียวกันกับค่าของความเค้นกด (Compressive Stress) พบว่าจากรูปที่ 4.36 แสดงข้อมูลของค่าความเค้นกดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดความสูงของ รอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษา 5 กรณีดังกล่าว พบว่าค่าเมื่อขนาดความสูงเปลี่ยนแปลงที่ 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm ค่าของความเค้นกดมีค่าเป็น 25.328 MPa, 25.327 MPa, 25.327 MPa, 25.326 MPa และ 25.325 MPa ตามลำดับ ค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นกดที่ เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความสูงของรอยร้าวนั้นพบว่าค่าความเค้นกดเปลี่ยนแปลงเพียง 0.01 % ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขนาดของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อขนาดของค่าความ เค้นกดบนแบบจำลอง Cortical bone

เมื่อมาดูในรูปที่ 4.37 ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพแสดงการกระจายตัวของค่าความเค้นหลักที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone พบว่าความเค้นกดสูงสุดจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณรอยต่อ ระหว่างแบบจำลอง PDL กับ Cortical bone และพบว่าค่าของความเค้นดึงเกิดมากบริเวณของขอบ แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.37 ของทั้ง 5 กรณีศึกษา

(5



ร**ูปที่ 4.36** ผลการวิเคราะห์ Cortical bone Principal Stress (Compressive Stress)

จากผลการวิเคราะห์ความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone เมื่อพารามิเตอร์ ความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงนั้น พบว่าไม่ส่งผลต่อความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cortical bone คาดว่าเกิดการดูดซับแรงของแบบจำลอง Enamel และ Dentin ไปค่อนข้างมากแล้ว



รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cortical bone Principal Stress 5 กรณีศึกษา

## 4.2.7 ค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone

70

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลกระทบของขนาดความสูงรอยร้าวที่เกิดขึ้น จากกรณีศึกษา 5 กรณีกับค่าความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone นั้นแสดงให้ เห็นในรูปที่ 4.38 ความเค้นดึง (Tensile Stress) และ รูปที่ 4.39 ความเค้นกด (Compressive Stress) ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ได้ข้อมูลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองตามในรูปที่ 4.38 พบว่าความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองจากการศึกษากรณีของขนาดความสูง ทั้งหมด 5 กรณีคือ ขนาดความสูงของรอยร้าว 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm มีค่า ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง คือ 0.25703 MPa, 0.25702 MPa, 0.25721 MPa, 0.25719 MPa และ 0.25716 MPa ตามลำดับ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงที่ เกิดขึ้นนั้น พบว่าค่าความเปลี่ยนแปลงเพียง 0.07 % เท่านั้นซึ่งทำให้ผู้ศึกษาสามารถกล่าวได้ว่าขนาด ของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษาทั้ง 5 กรณีไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นดึงบน แบบจำลอง Cancellous bone

ในลักษณะเดียวกับผลการคำนวณความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง พบว่าที่ความสูงของรอยร้าว 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm มีค่าความ
เค้นกดอยู่ที่ 1.3069 MPa, 1.3067 MPa, 1.3067 MPa, 1.3068 MPa และ 1.3073 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่าความเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษา ทั้งหมด 5 กรณีพบว่าความเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นกดอยู่เพียง 0.05 % ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่า ของขนาดความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้น ไม่ได้ส่งผลต่อขนาดของค่าความเค้นกดที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Cancellous bone



**รูปที่ 4.38** ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Tensile Stress)

10



ร**ูปที่ 4.39** ผลการวิเคราะห์ Cancellous bone Principal Stress (Compressive Stress)

เมื่อมาดูส่วนของข้อมูลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพในรูปที่ 4.40 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการกระจาย ตัวของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Cancellous bone เมื่อมีการรอยร้าวขึ้นที่ความสูงตาม กรณีศึกษาทั้ง 5 กรณี จะเห็นว่าจากภาพแสดงให้เห็นความเค้นดึง (Tensile Stress) มีค่ามากที่ บริเวณขอบที่เป็นรอยต่อของแบบจำลองระหว่าง Cancellous bone และ Cortical bone และ พบว่าความเค้นหลักที่กระจายตัวส่วนใหญ่บนแบบจำลองนั้นเป็นความเค้นดึง ส่วนความเค้นกด (Compressive Stress) จะเห็นว่าค่าความเค้นกดจะสูงที่บริเวณรอยต่อของแบบจำลองเหมือนกัน



ร**ูปที่ 4.40** การกระจายตัวของความเค้นของค่า Cancellous bone Principal Stress 5 กรณีศึกษา

เช่นเดียวกับแบบจำลอง Cortical bone ผลการวิเคราะห์ความเค้นหลักที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Cancellous bone เมื่อมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้น นั้นพบว่าไม่ส่งผลต่<mark>อ</mark>การเกิ<mark>ดคว</mark>ามเค้นหลักบนแบบจำลอง คาดว่าเนื่อง</mark>มาจากการดูดซับแรงที่เพียงพอ ของแบบจำลอง Enamel <mark>และ</mark> Dentin

# บทที่ 5 สรุปผลงานการวิจัย

## 5.1 สรุปผลงานการวิจัย

จากการศึกษาค้นความเกี่ยวกับผลกระทบของรอยร้าวที่มีต่อการกระจายตัวของความเค้นที่ เกิดขึ้นบนแบบจำลองฟันกรามซี่ที่หนึ่งของมนุษย์ ใช้การจำลองโครงสร้าง 3 มิติของฟันกรามซี่ที่หนึ่ง ขนาดจริง พบว่าจากการศึกษาผลกระทบของลักษณะรอยร้าวที่ศึกษาทั้งหมด 2 หัวข้อได้แก่ 1.) กรณี ของขนาดความกว้างของรอยร้าวที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 มิติ 2.) กรณีของขนาดความสูงของรอยร้าวที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง 3 แบบจำลอง 3 มิติ

การศึกษาพบว่าเมื่อมีการศึกษาโดยเปรียบเทียบขนาดความกว้างของร้าวที่เกิดขึ้นบน แบบจำลอง Enamel และ Dentin กับฟันปกติที่ไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นทั้งหมด 6 กรณีศึกษา ผลการ คำนวณแสดงให้เห็นถึงค่าของขนาดความกว้างของรอยร้าวส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นหลัก ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยถ้าเจาะจงส่วนของแบบจำลอง Dental Pulp ซึ่งเป็น ส่วนที่เป็นโพรงประสาทฟัน และมีผลกระทบมากเมื่อเกิดความเค้นขึ้นที่แบบจำลองนี้ พบว่าค่าของ ความเค้น (Von-Mises Stress) ที่ขนาดความกว้างของรอยร้าว 0 μm – 68 μm ค่าความเค้นเกิด ความเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่เมื่อค่าของขนาดความกว้างรอยร้าวเพิ่มขึ้นเป็น 75 μm และ 80 μm พบว่าค่าของความเค้นบนแบบจำลอง Dental Pulp มีค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และ ความเค้นจะสูงมากที่สุดที่ขนาดความกว้างรอยร้าว 100 μm ดังนั้นจากผลการศึกษาพบว่าขนาด ความกว้างของรอยร้าวมีอิทธิพลต่อการเกิดความเค้นหลัก (Principal Stress) และ ความเค้น (Von-Mises Stress) อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการศึกษากรณีของความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณ Cemento-Enamel Junction (CEJ) ซึ่งมีความลึกของรอยร้าวที่ 3 mm. จากพื้นผิวของ Dentin และใช้แบบจำลองอ้างอิงโดยการ จำกัดพารามิเตอร์ค่าของความกว้างของรอยร้าวเป็น 68 µm เนื่องจากทางผู้ศึกษามีการคาดการว่าที่ ความกว้างของรอยร้าวที่มีขนาดมากกว่ากรณีศึกษานี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นอย่างมี นัยสำคัญ สามารถแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณีดังนี้ กรณีของความสูง 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 5.4 mm ผลจากการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ดังวิเคราะห์ในบทที่ 4 พบว่าค่าขนาด ความสูงของรอยร้าวมีผลโดยตรงกับค่าความเค้นดึง (Tensile stress) บนแบบจำลอง Enamel และ Dentin แต่จะมีผลกระทบแบบแปรผันตรงกับค่าของความเค้นกด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้น บนแบบจำลองดังกล่าว แต่แบบจำลอง Dental Pulp, Cementum, PDL, Cortical bone and Cancellous bone ขนาดความสูงของรอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าการกระจายตัวของความเค้น บนแบบจำลอง

## 5.2 การศึกษาในอนาคต

จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ของรอยร้าวที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดความกว้าง ของรอยร้าว และขนาดความสูงของรอยร้าว ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง Enamel และ Dentin มีผลต่อ การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในฟัน ณ ขณะนี้ผู้ศึกษาได้กำหนดค่าตัวแปรของขนาดความลีก ของรอยร้าวเป็น 3 mm. นับจากพื้นผิวของแบบจำลอง Dentin การศึกษาในลำดับถัดไปจะเป็น การศึกษากรณีของค่าพารามิเตอร์ของความลึกของรอยร้าว โดยผู้ศึกษาจะทำการกำหนดค่าตัวแปร ของความกว้างของรอยร้าว 68 µm และความสูงของรอยร้าวเป็น 5.4 mm ซึ่งอาจจะกำหนด ค่าพารามิเตอร์ของความลึกมีค่า 1 mm., 2 mm., 3 mm., 4 mm., 5 mm. และ 6 mm. จากผิว ของแบบจำลอง Enamel ซึ่งอ้างอิงจากการศึกษาของคุณ K. V. Krell et al. [4] ซึ่งในการศึกษานั้น บ่งบอกว่าที่ขนาดความลึกมากกว่า 5 mm. นั้นส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของการรักษารากฟัน เทียมของฟันกรามล่างซี่ที่สองของคนไข้จำนวน 2086 ซี่ ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวนั้นแสดงให้เห็นถึง ความสำคัญของค่าพารามิเตอร์ขนาดของความลึกรอยร้าวมีผลต่อการเกิดความเค้นภายในโครงสร้าง ของฟันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้ศึกษามีความสนใจว่าเมื่อจำลองค่าพารามิเตอร์ความลึกของรอยร้าว ที่ขนาดน้อยกว่า 5 mm. และ มากกว่า 5 mm. จากผิวของแบบจำลอง Enamel ส่งผลกระทบต่อ ความเค้นภายในโครงสร้างของฟันอย่างไร



#### บรรณานุกรม

- [1] J. Manokawinchoke et al., "Mechanical force-induced TGFB1 increases expression of SOST/POSTN by hPDL cells," *Journal of Dental Research*, vol. 94, no. 7, pp. 983-989, June 2015.
- [2] M. A. Husain, DDS., "Dental Anatomy and Nomenclature for Radiologist,"
  [Online]. Available: https://radiologic.theclinics.com//retrieve/pii/
  S0033838917301252 [Accessed: October 1, 2017].
- [3] S. Hasan et al., "Cracked tooth syndrome: Overview of literature," *International Journal of Applied and Basic Medical Research*, vol. 5, issue 3, December 2015.
- [4] K. V. Krell et al., "12-month success of cracked teeth treated with orthograde root canal treatment," *Clinical Research*, vol. 44, Issue 4, pp.543-548, April 2018.
- [5] Y. Abe et al., "Occlusal-supporting ability of individual maxillary and mandibular teeth," *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 39, pp.923-930, September 2012.
- [6] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Material*, 8<sup>th</sup> edition, USA: Pearson Prentice Hall, 2011.
  - L. Nuttapol et al., "Comparison of ultimate force revealed by compression tests on extracted first premolars and FEA with a true scale 3D multi-component tooth model based on a CBCT dataset," *Clinical Oral Investigations*, vol. 24, pp.211-220, April 2019.
- [8] R. Steve et al., "Type and incidence of cracks in posterior teeth," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 62, pp.168-172, August 2001.
- [9] B. Amir et al., "Mechanics analysis of molar tooth splitting," *Acta Biomaterialia*, vol. 15, pp. 237-243, March 2015.

(0)

[7]

[10] B. Stefano et al., "Dynamic modeling of tooth deformation using occlusal kinematics and finite element analysis," *PLoS ONE*, vol 11, no. 3 : e0152663, pp. 1-17, March 2016.

STITUTE OF

- [11] W. Ryniewicz et al., "Three-dimensional finite element simulation of intrusion of the maxillary central incisor," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 385-390, March 2016.
- [12] R.A. Hernández-Vázquez et al., "Numerical analysis of masticatory forces on a lower first molar considering the contact between dental tissues," *Hindawi Bionics and Biomechanics*, vol. 2018, pp. 1-15, April 2018.
- [13] S. Ruengdit et al., "Sex determination from teeth size in thais," Proceeding 6<sup>th</sup> CIFS Academic Day, CIFS, Impact Muang Thong Thani, Nonthaburi, September 14-15, 2011, pp. 1-12.
- [14] H. Christof et al., "Ceramic inlays: Is the inlay thickness an important factor influencing the fracture risk," *Journal of Dentistry*, vol. 41, pp.628-635, April 2013.
- [15] A. Nikolaus et al., "Importance of the variable periodontal ligament geometry for whole tooth mechanical function: A validated numerical study," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 67, pp. 61-73, March 2017.
- [16] S. P. Ho et al., "The tooth attachment mechanism defined by structure, chemical composition and mechanical properties of collagen fibers in the periodontium," *Biomaterials*, vol. 28, pp. 5238–5245, September 2007.
- [17] J. W. FARAH, et al., "Finite element analysis of three- and four-unit bridges," *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 16, pp. 603-611, October 1989.
- [18] J. Miura et al., "Multiscale analysis of stress distribution in teeth under applied forces," *Dental Materials*, vol. 25, no.1, pp. 67-73, January 2009.
- [19] A.M. O'Mahony et al., "Anisotropic elasticity of cortical and cancellous bone in the posterior mandible increases peri-implant stress and strain under oblique loading," *Clinical Oral Implants Research*, vol. 12, no.6, pp. 648-657, December 2001.
- [20] C.L. Schwartz-Dabney and P.C. Dechow, "Variations in cortical material properties throughout the human dentate mandible," *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 120, pp. 252-277, March 2003.





ชื่อ - สกุล วัน เดือน ปีเกิด ที่อยู่ปัจจุบัน

E-mail

10

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2563

พ.ศ. 2562

นาย สรพล ณ ลำปาง วันที่ 17 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2540 969/388 ซอย 62 หมู่บ้านภัสสร 4 ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล ประชาธิปัตย์ อำเภอ ธัญญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12130 na.sorapon\_st@tni.ac.th Sorapon.nl@gmail.com

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เทคโนโลยีวิศวกรรม สถานบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมยานยนต์ เกียรตินิยมอันดับ 2 สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

#### ผลงานการตีพิมพ์

- [1] S. NaLampang, C. N. Limjeerajarus, N. Limjeerajarus, "Effect of a crack on stress distribution in human mandibular first molar: an FEA study," *The 9th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology*, JCREN, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, October 28 - 30, 2020, pp. 1-5.
- [2] S. NaLampang and N. Limjeerajarus, "Influence of land size diameter on cell performance and transport behaviors in a 50 cm<sup>2</sup> PEFC MEA with a cascade hexagonal honeycomb GFC," *The 9th International Conference on Mechanical Engineering, Phuket*, TSME, Thailand, December 11-14, 2018, pp. 628-634.