



การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันรักษารากที่มีขนาด
คลองรากฟันกว้าง เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)
COMPARATIVE ANALYSIS OF FRACTURE RESISTANCE OF ENDODONTICALLY TREATED
TEETH WITH FLARED ROOT CANAL, RESTORED WITH DIFFERENT NUMBER OF FIBER
POSTS BY FINITE ELEMENT METHOD

นางสาวนิชาพัฒน์ วราเสฏฐ์รัตน

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันรักษารากที่มีขนาด
คลองรากฟันกว้าง เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

COMPARATIVE ANALYSIS OF FRACTURE RESISTANCE OF ENDODONTICALLY TREATED
TEETH WITH FLARED ROOT CANAL, RESTORED WITH DIFFERENT NUMBER OF FIBER POSTS
BY FINITE ELEMENT METHOD

นางสาวนิชาพัฒน์ วราเสฏฐ์รัตน

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของพินรักษาราก ที่มีขนาดคลองรากฟันกว้าง เมื่อใช้เตื่อยไฟเบอร์จำนวนต่างๆ

ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

ปีการศึกษา 2559

โดย

นางสาวนิชาพัฒน์ วราเสฏฐ์รัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร้อยตรี ดร.ศุภชัย สีนถาวร

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายความเค้นดึงเกิดขึ้นภายในคลองรากฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางเมื่อได้รับการบูรณะแบบต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยนำฟันกรามซี่ล่างที่ถูกถอนของมนุษย์ นำมาศึกษาโครงสร้างรายละเอียดภายในที่เครื่องเอ็กซเรย์คอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จำนวน 3 แบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ 1 บูรณะด้วยเรซินคอมโพสิตก่อนแกน (Multicore flow) แบบจำลองที่ 2 บูรณะด้วยเตื่อยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อัน ร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต (FRC postec plus no. 3, Multicore flow) และแบบจำลองที่ 3 บูรณะด้วยเตื่อยฟันไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน ร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต (FRC postec plus no.3 & no.0, Multicore flow) วิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks, 2016 โดยฟันทำมุมเอียงขนาด 45 องศา กำหนดแรงกระทำตามผลงานวิจัย โดยกลุ่มที่ 1 แรงกระทำ 361.80 นิวตัน กลุ่มที่ 2 แรงกระทำ 559.46 นิวตัน มีแรงกระทำมากที่สุด และกลุ่มที่ 3 แรงกระทำ 468.48 นิวตัน ผลการทดลองพบว่ากลุ่ม ที่ 2 มีความเค้นดึงน้อยที่สุด และกลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 1 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสามกลุ่มเกิดความเค้นดึงสูงสุดบริเวณส่วนกลางของเนื้อฟัน และกลุ่มที่ 3 ซึ่งบูรณะด้วยบูรณะด้วยเตื่อยฟันไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน ร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต มีการสะสมความเค้นดึง มากกว่ากลุ่มที่ 2 ที่บูรณะด้วยเตื่อยเพียง 1 อัน การศึกษานี้สรุปได้ว่าการบูรณะด้วยกลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเตื่อยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อัน ร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิตมีปริมาณของความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการบูรณะแบบอื่นๆ รวมทั้งรูปแบบการแตกหักของทั้งสามกลุ่ม จะแตกหักบริเวณส่วนกลางของเนื้อฟัน เป็นไปตามผลงานวิจัย

คำสำคัญ: ไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเค้นดึงสูงสุด เตื่อยพื้นไฟเบอร์ เรซินคอมโพสิต ฟันที่ผ่านการรักษา
คลองรากฟันบาง

**Comparative Analysis of Fracture Resistance of Endodontically
Treated Teeth with Flared Root Canal, Restored with Different
Number of Fiber Posts by Finite Element Method
Academic Year 2016**

By

Miss Nichaphat Warasetrattana

Advisor

Suppachai Sinthaworn, D. Eng.

Abstract

The aim of this study is to investigate the stress distribution in flared root canal with various restoration by 3D finite element analysis. Extracted permanent mandibular molar was evaluated by micro-computed tomography. Three dimensional finite element analysis models were created and adapted by using the SolidWorks computer software.

Method: first premolar teeth is endodontically treated and divided into 3 groups Group 1 was the control, restored with a resin composite core material (Multicore flow), Group 2 was restored with a single fiber post and resin composite core (FRC postec plus No.3, Multicore flow), and Group 3 was restored with 3 fiber posts and resin composite core (1 FRC postec plus no.3 and 2 fiber posts no.0, Multicore flow). Samples from all groups were then restored with metal crowns. They were tested at 45 degree, determined the force by research. The force 361.80 N in Group 1, the force 559.46 N in Group 2 and the force 468.48 N in Group 3. Stress concentration of teeth restored with one fiber posts with resin composite core in Group 2 was the lowest Stress that of those restored and Group 3, Group 1 in the last. A tooth restored with resin composite core and fiber posts with resin composite core showed the highest in middle of teeth and the amount of stress in the teeth restored with 2-fiberposts in Group 3 were higher than that of those restored with 1- fiber post in group 2

Under the condition of this study, it was concluded that flared root canal teeth restored with single fiber post and resin composite core show low stress concentrations when compared to the other types of restorations including the fracture pattern of the three groups is according to research results.

Keywords: Finite Element, Maximum Tensile strength, Fiber Post, Resin Composite, Endodontically treated tooth with flared root canal.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร.ต. ดร.ศุภชัย สິนถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการทำวิจัย ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คำแนะนำของ อาจารย์ อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ เกี่ยวกับผลการทดลองของงานวิจัยในครั้งนี้ ทำให้การศึกษาในครั้งนี้ดำเนินไปตามขอบเขตที่กำหนดและสำเร็จเป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solidworks) ทำให้สามารถทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ตามที่วัตถุประสงค์ตั้งไว้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร.ต. ดร.ศุภชัย สິนถาวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ธีระเจตกุล อาจารย์ ดร.อัฐสิทธิ์ ศิริวิชิราภรณ์ และอาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด ที่ช่วยตรวจทาน ให้คำแนะนำ และแก้ไขจุดบกพร่อง ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้องและมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ นำไปศึกษาไม่มากก็น้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากโครงการวิศวกรรมนี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

นิชาพัฒน์ วราเสฏฐ์รัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก-ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค-ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ-ช
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ฅ-ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.3.1 สร้างแบบจำลองรากฟันแบบสามมิติ	2
1.3.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้วิเคราะห์	2
1.3.3 วิเคราะห์การกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุด	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 การบูรณะฟันโดยใส่เดือยสำเร็จรูป	6
2.1.2 ทฤษฎีความเสียหาย	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.2.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักของฟัน	15
2.2.2 ของการบูรณะด้วยเดือยและแกนด้วยวิธีต่างๆบาง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	18
2.2.3 การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซี เมื่อมีการบูรณะแบบต่างๆ ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ 3 มิติ	21
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	30
3.1 วัสดุอุปกรณ์	30
3.1 วัสดุอุปกรณ์	
3.2 วิธีการวิจัย	30
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	34
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน (Flow chart)	36
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	38
4.1 ผลการดำเนินงาน	39
4.1.1 ทดลองใส่แรงกระทำ 1000 นิวตัน	39
4.1.2 ทดลองใส่แรงกระทำตามผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)	47
4.2 วิธี Mohr's circle หาค่า Max principal stress	55
4.2.1 เลือกพื้นที่หน้าตัดแบบจำลองฟันในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค	55
4.3 ตรวจสอบค่า Factor of safety ด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค	61
4.4 ตรวจสอบค่า Factor of safety ด้วยการคำนวณมือ	67
บทที่ 5 อภิปรายผลการดำเนินงาน	69
5.1 การอภิปรายผลการดำเนินงาน	70
5.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way ANOVA)	71
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	72
6.1 สรุปผล	72
6.2 ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก คู่มือการสร้างแบบจำลองคลอกรากฟัน 3 มิติ	78
ภาคผนวก ข บันทึกข้อความขอความอนุญาติใช้โปรแกรม SolidWorks	91
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พิจารณากรณี Plane stress และคิด Safety of factor	10
2.2	ค่าเฉลี่ยโหลดอัดสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละการทดลอง	16
3.1	คุณสมบัติทางกล ส่วนประกอบแบบจำลองฟัน	35
4.1	แสดงตำแหน่ง และค่าความเค้นสูงสุดในแบบจำลองฟันเมื่อใส่วัสดุแล้วแรงกระทำ 1,000 นิวตัน	45
4.2	แสดงตำแหน่งความเค้นสูงสุดในแบบจำลองแต่ละกลุ่มแรงกระทำ 1,000 นิวตัน	46
4.3	แสดงตำแหน่งความเค้นสูงสุดในแบบจำลองฟันเมื่อใส่วัสดุแล้วแรงกระทำตามผลงานวิจัย	53
4.4	แสดงตำแหน่งความเค้นสูงสุดในแบบจำลองแต่ละกลุ่ม แรงกระทำตามผลงานวิจัย	54
4.5	แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองฟันของแต่ละกลุ่ม	54
4.6	แสดงการแบ่ง Element size และประเภท Mesh	55
4.7	สรุปค่า Principal stress ด้วยกระทำแรง 1,000 ของแต่ละพื้นที่หน้าตัด	61
4.8	เปรียบเทียบ Factor of safety ของฟันทั้ง 3 กลุ่ม	66
4.9	ตรวจสอบค่า Factor of safety ของฟันและวัสดุบูรณะด้วยการคำนวณมือ	67
4.10	เปรียบเทียบค่า Factor of safety ของฟันที่คำนวณด้วยโปรแกรมกับการคำนวณมือ	68
4.11	ตารางสรุปค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน (One way ANOVA) ด้วยโปรแกรม (SPSS)	71

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เดือยสำเร็จรูป	6
2.2	ทฤษฎีความเค้นดึงฉากสูงสุด	9
2.3	ทฤษฎีความเค้นดึงฉากสูงสุดกรณี ใช้กับวัสดุที่ (Strength) ด้านดึงไม่เท่ากับด้านกด	10
2.4	ทฤษฎี (Modified-Mohr's theory)	11
2.5	วงกลมของมอร์ (Mohr's circle)	12
2.6	มี (Normal stress) ทิศทางเดียว	12
2.7	ตัวอย่างบูรณะด้วยโลหะเคลือบ Metal crown ติดตั้งที่ 135 องศา ในเครื่องทดสอบสากล	16
2.8	หัวของโพลดเซลล์แนวราบ 135 องศา แกนตามยาวของฟัน.	16
2.9	กลุ่มที่ 1	17
2.10	กลุ่มที่ 2	17
2.11	กลุ่มที่ 3	17
2.12	ภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้ไกลแสดงรูปแบบการกระจายความเค้นหลักสูงสุด	22
2.13	ภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้กลางไกลกลางแสดงการกระจายความเค้นผสมรวม	22
2.14	ภาพตัดตามขวางแสดงการกระจายความเค้นผสมรวม	23
2.15	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)	24
2.16	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)	24
2.17	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)	25
2.18	โปรแกรม (SolidWorks)	26
2.19	แสดงจุดต่อ	28
2.20	ภาพตัวอย่างแบบจำลองฟันกราม โดยใช้ (Solid mesh)	29
3.1	ฟันที่ได้จาก CT-Scan	30
3.2	แบบจำลองฟัน	31
3.3	แบบจำลองโครงโลหะครอบฟัน	31
3.4	แบบจำลองฐานยึด อีพอกซีเรซิน	32
3.5	กลุ่มที่ 1 บูรณะด้วยเรซินคอมโพสิตก่อก่อนฟัน	32
3.6	กลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเดือยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อัน ร่วมกับการก่อก่อนฟัน ด้วยเรซินคอมโพสิต	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	กลุ่มที่ 3 บุรณะด้วยเดือยฟัน ไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน ร่วมกับการก่อกันฟันด้วยเรซินคอมโพสิต	33
3.8	ขั้นตอนการดำเนินงาน (Flow chart)	36
4.1	แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 1 แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	39
4.2	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเนื้อฟัน ของกลุ่มที่ 1 แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	40
4.3	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 1 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	40
4.4	แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 2 แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	41
4.5	แสดงการกระจายความเค้นดึงของเนื้อฟัน ของกลุ่มที่ 2 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	41
4.6	แสดงการกระจายความเค้นดึงของเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 2 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	42
4.7	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเดือย ของกลุ่มที่ 2 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	42
4.8	แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 3 แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	43
4.9	แสดงการกระจายความเค้นดึงของเนื้อฟัน ของกลุ่มที่ 3 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	43
4.10	แสดงการกระจายความเค้นดึงของเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 3	44
4.11	แสดงการกระจายความเค้นดึงของเดือยฟันไฟเบอร์เบอร์ 3 และเบอร์ 0 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)	44
4.12	กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงของเนื้อฟันและวัสดุบุรณะด้วยแรง 1,000 นิวตัน	45
4.13	แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงกระทำ 361.80 นิวตัน (Principal stress 1)	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเนื้อฟัน ของกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงกระทำ 361.80 นิวตัน (Principal stress 1)	47
4.15	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 1 ด้วยแรงกระทำ 361.80 นิวตัน (Principal stress 1)	48
4.16	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 2 ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)	48
4.17	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเดือยไฟเบอร์ ของกลุ่มที่ 2 ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)	49
4.18	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเนื้อฟัน ของกลุ่มที่ 2 ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)	49
4.19	แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 3 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)	50
4.20	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเนื้อฟัน ของกลุ่มที่ 3 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)	50
4.21	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 3 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)	51
4.22	แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเดือยไฟเบอร์ ของกลุ่มที่ 3 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)	51
4.23	กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงของเนื้อฟันและวัสดุบูรณะ ด้วยแรงตามผลงานวิจัย	52
4.24	พื้นที่หน้าตัด (Cross section) มีค่า 31.42 ตารางมิลลิเมตร	52
4.25	พื้นที่หน้าตัด (Cross section) มีค่า 56.55 ตารางมิลลิเมตร	55
4.26	พื้นที่หน้าตัด (Cross section) มีค่า 25.13 ตารางมิลลิเมตร	55
4.27	วงกลมมอร์ พื้นที่หน้าตัด 31.42 ตารางมิลลิเมตร	56
4.28	วงกลมมอร์ พื้นที่หน้าตัด 56.59 ตารางมิลลิเมตร	57
4.29	วงกลมมอร์ พื้นที่หน้าตัด 25.13 ตารางมิลลิเมตร	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.30	กำหนดค่า Ultimate tensile strength ของเนื้อฟัน (Deep dentin = 33.9 MPa)	59
4.31	กำหนดค่า (Ultimate tensile strength) ของเรซินคอมโพสิต (ใช้ค่า DTS 47 MPa)	60
4.32	Ultimate tensile strength ของเดือยเส้นใยคาร์บอน	61
4.33	Factor of safety ของเนื้อฟัน กลุ่มที่ 1	62
4.34	Factor of safety ของเรซินคอมโพสิต กลุ่มที่ 1	62
4.35	Factor of safety ของเนื้อฟัน กลุ่มที่ 2	63
4.36	Factor of safety ของเรซินคอมโพสิต กลุ่มที่ 2	63
4.37	Factor of safety ของเดือยฟันไฟเบอร์ กลุ่มที่ 2	64
4.38	Factor of safety ของเนื้อฟัน กลุ่มที่ 3	64
4.39	Factor of safety ของเรซินคอมโพสิต กลุ่มที่ 3	65
4.40	Factor of safety ของเดือยฟันไฟเบอร์ กลุ่มที่ 3	65
ก.1	แสดงการสร้างวงกลมของโลหะครอบฟัน	78
ก.2	แสดงการสร้างโครงโลหะครอบฟัน	79
ก.3	แสดงการสร้างพื้นที่ใส่แรงของโลหะครอบฟัน	79
ก.4	แสดงการสร้างวงกลมเพื่อเจาะรูของโลหะครอบฟัน	80
ก.5	แสดงการสร้างเส้นเจาะของโลหะครอบฟัน	80
ก.6	แสดงฟันกรามซี่ล่างที่ได้จาก CT-Scan	81
ก.7	แสดงการสร้างคลองรากฟัน	81
ก.8	แสดงการสร้างเรซินคอมโพสิตและกัตตาเปอร์ชา	82
ก.9	แสดงการสร้างฐานยึด อีพอกซีเรซิน	82
ก.10	แสดงการสร้างรูเจาะฐานยึด อีพอกซีเรซิน เพื่อประกอบชิ้นงานเข้ากับฟัน	83
ก.11	แสดงการประกอบชิ้นงานระหว่างฐานยึดอีพอกซีเรซินกับฟัน	83
ก.12	แสดงการขั้นตอนแรกวิธีการวิเคราะห์ชิ้นงาน	84
ก.13	แสดงการใส่วัสดุต่างๆ	85
ก.14	แสดงการเลือกรูปแบบเชื่อมยึดระหว่างชิ้นงานแต่ละชิ้นงาน	85

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.15	แสดงการเลือกรูปแบบเชื่อมยึดของฐานยึดอีพอกซีเรซิน	86
ก.16	แสดงการเลือกแรงกระทำบนชิ้นงานโลหะครอบฟัน	86
ก.17	แสดงการเลือก Mesh และ ขนาดของ Mesh	87
ก.18	แสดงการประมวลผล	88
ก.19	แสดงการเลือกชนิดการวิเคราะห์ (Principal stress)	88
ก.20	แสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ (Max principal stress)	90
ข.1	บันทึกข้อความขอความอนุญาติใช้โปรแกรม SolidWorks	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

Post and Core ได้รับการยอมรับให้เป็นทางเลือกในการรักษารากฟัน โดยไม่คำนึงถึงปริมาณ และคุณภาพของเนื้อเยื่อฟันที่เหลืออยู่ Post เหล่านี้แสดงถึงการเสียดทานในการรักษาคลองฟัน ซึ่งเป็นลักษณะที่แสดงถึง ภาวะที่รากฟันตกอยู่ในอันตรายและท้ายที่สุดอาจจะทำให้รากแตกได้ ที่เกิดจากการดึง ในเนื้อเดียวกันระหว่างโลหะกับเนื้อฟัน (Post and core) ในฟันที่ได้รับการรักษารากฟันนั้น มักได้รับความเค้น (Stress) หลายรูปแบบ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด (Compression) กำลังรับแรงดึง (Tensile) และ กำลังรับแรงเฉือน (Shear) โดยความเค้นเฉือน (Shear stress) เป็นความเครียดที่ทำให้เกิดอันตรายกับ ฟันที่จะบูรณะมากที่สุด (Dr. Reem Al-Dhalaan, 2008) ได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความยาวเดือยฟัน และการรักษาระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของเดือยฟันให้เล็กที่สุด จะช่วยลด ความเค้นเฉือน (Shear stress) และช่วยรักษาโครงสร้างฟันที่ยังเหลืออยู่ จึงช่วยลดการแตกหักของฟันด้วย

ฟันที่ผ่านการรักษารากฟันที่มีคลองรากที่ผายออกมาก ผนังคลองรากฟันบาง เป็นฟันที่มีความเสี่ยงต่อการแตกหักสูงกว่าฟันที่ผ่านการรักษารากฟันทั่วไป มีผู้เสนอวิธีการบูรณะด้วยการก่อแกนด้วย เรซินคอมโพสิตทั้งหมด การใช้เส้นใยแก้วสำเร็จรูปร่วมกับเรซินคอมโพสิต หรือการใช้เดือยฟันไฟเบอร์ ร่วมกับการก่อแกนด้วยเรซินคอมโพสิต มาใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงของผนังเนื้อฟัน ซึ่งได้นำมา ประยุกต์ใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มาช่วยในการ วิเคราะห์ ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เป็นวิธีทางวิศวกรรมที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ของโครงสร้างที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีจึงสามารถ ปรับให้เข้ากับการใช้งานทางทันตกรรมได้อย่างเหมาะสม โดยสร้างรากฟันแบบสามมิติและพิจารณาที่ภาคตัดขวางตามแนวนอนของรากฟันการจำลอง รูปแบบราก ฟันกำหนดรูปร่างภายนอกของรากฟัน และคลองรากฟันที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความหนาของเนื้อฟัน ด้านประชิดที่แตกต่างกันด้วย จากนั้นใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ในการวิเคราะห์ผลการ เปรียบเทียบค่าของแรงภายในกับค่าการทดสอบจริงที่ได้จากผลงานวิจัย รวมไปถึงการกำหนดเงื่อนไข ขอบเขตในการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เพื่อให้ข้อมูลจากการวิเคราะห์เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากการใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์นั้น ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเงื่อนไข ขอบเขตในการวิเคราะห์ด้วย

นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สามารถ แก้ปัญหาทางวิศวกรรม ประกอบด้วยสมการที่สอดคล้องกับชนิดของปัญหานั้นๆ ปัญหาดังกล่าวคือ วัตถุที่จำลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของชิ้นงานก่อนการสร้าง ชิ้นงานจริง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและ

ความถูกต้องของงาน และสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้ สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวัสดุโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบจำลองแทนการใช้งานจริงและ เพื่อที่จะได้ลดต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์แล้วทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้งานจริงกับการ ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

เพื่อวิเคราะห์การกระจายความเค้น (Stress distribution) และค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองรากฟัน วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าของแรงภายใน ของแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์กับค่าจริงจากการทดสอบ ที่ได้จากผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ภาควิชาทันตกรรมทั่วไป คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1.3.1 สร้างแบบจำลองรากฟันแบบสามมิติ

สร้างแบบจำลองรากฟันให้ใกล้เคียงกับรูปทรงของรากฟันจริงจากผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ภาควิชาทันตกรรมทั่วไป คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป และได้กำหนดขนาดเส้นรอบวงปลอกโลหะยึดไว้ที่ 2 มิลลิเมตร

โดยแบ่งฟันกรามน้อยล่างซี่ที่หนึ่งซึ่งผ่านการรักษารากแล้วออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 1 ซี่

- กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มควบคุมบูรณะด้วยเรซินคอมโพสิตก่อกันฟัน (Multicore flow)
- กลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเดือยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อัน ร่วมกับการก่อกันฟันด้วยเรซินคอมโพสิต (FRC postec plus no.3, Multicore Flow)
- และกลุ่มที่ 3 บูรณะด้วยเดือยฟัน ไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน ร่วมกับการก่อกันฟันด้วยเรซินคอมโพสิต (FRC postec plus no.3 & no.0 , Multicore flow)

1.3.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.3.2.1 กำหนดสมบัติทางกลของส่วนประกอบรากฟัน เป็นแบบไอโซทรอปิกและมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear isotropic elastic) การยึดติดของผิวสัมผัสทั้งหมดเป็นแบบยึดติดแน่น (Bonded)

1.3.2.2 ไม่นำชั้นเคลือบรากฟัน (Cementum) ซึ่งจะอยู่ระหว่างเนื้อฟันกับเอ็นยึดปริทันต์ มาวิเคราะห์แยกจากเนื้อฟัน เนื่องจากมีขนาดที่บางเกินไปที่จะจำลองได้อย่างถูกต้องและเคลือบรากฟันมีค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ใกล้เคียงกับเนื้อฟัน จึงให้พิจารณารวมไปกับส่วนเนื้อฟัน

1.3.2.3 กำหนดให้บริเวณรอบนอกของรากฟัน ให้ไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากถูกยึดด้วย อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

1.3.2.4 เลือกใช้เอลิเมนต์ ชนิดสามมิติทรงสี่หน้าสิบจุดต่อ (10 - node tetrahedrons)

1.3.2.5 กำหนดให้มีแรงที่กระทำต่อคลองรากฟัน ตามผลงานวิจัย โดยใส่แรงกดท่ามุม 45 องศา กับแนวแกนฟัน

1.3.3 วิเคราะห์การกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุด

ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks สร้างแบบจำลองรากฟันให้ใกล้เคียงกับรูปทรงของรากฟันจริงและวิเคราะห์การกระจายความเค้นและค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองรากฟัน เมื่อมีแรงกระทำตามผลงานวิจัย พิจารณาให้เป็นแรงดันกระทำตั้งฉากกับผนังคลองรากฟัน ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในรากฟัน

ข้อตกลงเบื้องต้น

กำหนดคุณสมบัติของเนื้อเยื่อและวัสดุแบบจำลองมีคุณสมบัติเชิงกลเหมือนกันในทุกๆ ส่วน (Homogeneous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และมีสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) และมีการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของเนื้อเยื่อหรือวัสดุทุกชนิดแบบสมบูรณ์

ข้อจำกัดของงานวิจัย

การวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ เพื่อพิจารณาลักษณะการกระจายความเค้นในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย มาเปรียบเทียบกับผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ในงานวิจัยนี้ศึกษาความเค้นดึงในฟันกรามน้อยซี่ล่าง ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์แบบสามมิติจะมีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากกว่า และค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถนำไปอ้างอิงกับสภาพการณ์จริงได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถอธิบายปัญหาที่เกิดจากพฤติกรรมแตกหักของรากฟันและสามารถยืนยันผลการทดลองจริงจากผลงานวิจัยได้

1.4.2 ใช้ในการคาดการณ์ผลจากการออกแบบและตรวจสอบพฤติกรรมจากผลงานวิจัย โดยเฉพาะด้านทันตกรรม และเป็นแนวทางถึงการศึกษาต่อถึงวิธีการบูรณะฟันที่รักษาคคลองรากฟันแล้ว และมีฟันงคลองรากฟันบาง

1.4.3 เป็นการแสดงให้เห็นประโยชน์ในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้อย่างสะดวกและรวดเร็วกว่าการทดลอง สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่สำคัญในกรรมวิธีการผลิตได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม ช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

1.4.4 สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อถึงวิธีการบูรณฟันที่รักษารากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบาง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันมักมี การสูญเสียโครงสร้างของฟันจากฟันผุ การแตกหักของฟัน และขั้นตอนการรักษาคลองรากฟัน ดังนั้นในการบูรณะฟันที่ได้ รับการรักษาคลองรากฟัน เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและต้านทานต่อการแตกหัก (Fracture resistance) เช่นการทำเดือยฟัน ร่วมกับวัสดุก่อกแกนฟัน (Core build-up) และครอบฟัน ปัจจุบันการเลือกใช้วัสดุในการบูรณะฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วเปลี่ยนจากการใช้วัสดุที่มีความแข็งตึง (Rigid) เช่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ทองและเซอร์โคเนีย (Zirconia) มาเป็นเดือยฟันไฟเบอร์ (Fiber post) โดยใช้ร่วมกับสารยึดติด (Adhesive agents) และเรซินซีเมนต์ในการยึดเดือยฟันเข้ากับผนังคลองราก ฟัน เนื่องจากเดือยฟันไฟเบอร์มีลักษณะทางกลใกล้เคียงกับเนื้อฟันคือมี ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ใกล้เคียงกับเนื้อฟันในคลองรากฟันคือ 18.6 จิกะปาสคาล (GPa) ทำให้มีสมบัติทางกล (Mechanical property) ดีกว่าการใช้เส้นใยแก้วสำเร็จรูปร่วมกับเรซินคอมโพสิต หรือการใช้เดือยฟันไฟเบอร์ร่วมกับการก่อกแกนด้วยเรซินคอมโพสิต มาใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงของผนังเนื้อฟัน

มีการศึกษาพบว่าการใช้เดือยฟันไฟเบอร์ร่วมกับสารยึดติดและเรซินซีเมนต์จะทำให้ลดการแตกหักของรากฟันตามแนวตั้ง (Vertical root fracture) แต่ในขณะเดียวกันพบว่ารูปแบบความล้มเหลวที่พบได้บ่อยที่สุดคือการสูญเสียการยึดอยู่บริเวณหน้าสัมผัสของเดือยฟันไฟเบอร์เรซินและเนื้อฟัน ดังนั้นปัจจัยเรื่องการยึดอยู่ของเดือยฟันจึงเป็นสิ่งสำคัญทำให้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุง การยึดอยู่ของเดือยฟันมากขึ้น เนื่องจากเรซินคอมโพสิตชนิดที่สามารถใช้เป็นวัสดุก่อกแกนฟันและสารเชื่อมยึด ถูกนำมาใช้ในทางคลินิกมากขึ้นแต่ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุดังกล่าวจำกัดจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของพันธะของวัสดุที่ใช้ยึดระหว่างเดือยฟันไฟเบอร์กับคลองรากฟัน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม

ทั้งนี้การศึกษาเชิงการทดลองจากงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ในส่วนของการทดลองจะสูญเสียไปในเรื่องของเวลาและการลงทุนที่มีราคาสูง ดังนั้นจึงมีอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าจะใช้คือการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element modeling, FEM) ทำให้สามารถอธิบายปัญหาที่เกิดจากพฤติกรรมแตกหักของรากฟันและสามารถยืนยันผลการทดลองจริงจากงานวิจัยได้ ทั้งยังใช้ในการคาดการณ์ผลจากการออกแบบและตรวจสอบพฤติกรรมจากงานวิจัย โดยเฉพาะด้านทันตกรรม

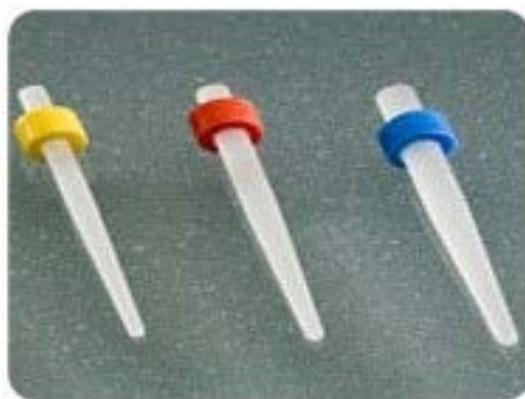
2.1.1 การบูรณะฟันโดยใส่เดือยสำเร็จรูปร่วมกับเรซินคอมโพสิต

ฟันที่ได้รับการรักษารากฟันมาแล้ว ถ้ามีเนื้อฟันเหลืออยู่มากอาจไม่จำเป็นต้องครอบฟันก็จะทำการบูรณะโดยการอุดฟันไว้ก็พอ แต่ถ้าฟันชิ้นนั้นเหลือเนื้อฟันน้อย การบูรณะฟันที่ตจ้งจำเป็นต้องมีการทำ เดือยฟันและครอบฟันบนฟันชิ้นนั้นๆ เพราะฟันที่ผ่านการรักษารากฟันมาแล้วนั้น จะมีลักษณะเปราะบาง แดงง่าย โดยเฉพาะฟันกรามสมควรเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องครอบฟัน

การใส่เดือยฟันเพื่อเป็นแกน หรือ แท่งในรากฟัน เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟันและเป็นการเพิ่ม ส่วนของเนื้อฟันที่หายไป ทำให้ครอบฟันยึดได้แน่นขึ้น เดือยฟันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

1. เดือยโลหะ (Metal post) ขั้นตอนการทำคือ ทันตแพทย์จะทำการกรอเตรียมฟันแล้วพิมพ์ฟันเพื่อส่งแลบทำเดือยมาเฉพาะแต่ละบุคคล นัดมาอีกครั้งเพื่อมาใส่เดือยฟันแล้วพิมพ์ทำครอบฟันอีกที ข้อดีคือค่าใช้จ่ายถูกกว่า มีความแข็งแรง แต่คนไข้ต้องมาพบทันตแพทย์สองครั้ง

2. เดือยสำเร็จรูป (Fiber post) มักทำมาจาก Fiber สามารถทำเดือยและพิมพ์ฟันทำครอบให้เสร็จได้ในครั้งเดียว สะดวก รวดเร็ว และเดือยมีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับเนื้อฟัน ทำให้มีโอกาสในการเกิดรากฟันแตกได้น้อยแต่ค่าใช้จ่ายสูงกว่าเดือยโลหะ



รูปที่ 2.1 เดือยสำเร็จรูป

(ที่มา: ศรีสุขทันตแพทย์. (2017). เดือยสำเร็จรูป สืบค้นเมื่อ 5 มกราคม 2560, จาก <http://www.srisukdental.com>)

2.1.2 ทฤษฎีความเสียหาย

วัสดุเปราะ ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (Maximum normal stress) ทฤษฎีของคูลอมป์-มอร์สำหรับวัสดุเปราะ (Brittle Coulumb-Mohr's theory) ทฤษฎีของมอร์ดัดแปลง (Modified Mohr's theory)

วัสดุเหนียว ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress theory) ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกดะฮีดรัล (Octagonal shear stress theory) ทฤษฎีพลังงานการผิดรูป (Distortion energy theory)

ทฤษฎีความเสียหายที่นิยมใช้ในการออกแบบ ประกอบด้วย

- ทฤษฎีความเค้นฉากสูงสุด (Maximum normal stress theory – MNST)
- ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress theory – MSST)
- ทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion energy theory – DET)
- ทฤษฎีของคูลอมป์-มอร์ (Coulomb-mohr's theory - CMT)

โครงการนี้จะกล่าวถึงวัสดุเปราะ เนื่องจากพินเป็นวัสดุเปราะ วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับ ความต้านแรงดึงของวัสดุนั้น (พิเชษฐ์ พินิจ, 2558)

2.1.2.1 ความเสียหายสำหรับวัสดุแข็งเปราะ

วัสดุที่มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักมากกว่าการ Yielding หรือมีการยืดตัวน้อยก่อนที่จะเกิดการแตกหักเรียกว่าวัสดุเปราะ มีวัสดุเปราะอยู่จำนวนหนึ่งที่มี (Compressive strength) เท่ากับหรือใกล้เคียงกับ (Tensile strength) วัสดุที่มีพฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า Even materials เช่น Fully hardened tool steel แต่วัสดุเปราะจำนวนมากซึ่งเป็นเหล็กหล่อเช่น เหล็กหล่อสีเทา จะมีกำลังแรงอัด (Compressive strength) สูงกว่า กำลังของแรงดึง (Tensile strength) มาก เรียกวัสดุที่มีพฤติกรรมเช่นนี้ว่า Uneven materials เปรียบเทียบกับเหล็ก สาเหตุที่เหล็กหล่อมียกกำลังแรงดึง (Tensile strength) ต่ำกว่าปกติมาก เนื่องจากมีช่องว่างหรือตำหนิขนาดเล็ก (Microscopic flaws) ภายในเนื้อวัสดุ เมื่อรับแรงดึง ตำหนิเหล่านี้จะทำให้เกิดการแตก (Crack) ได้ง่าย แต่เมื่อรับแรงกด ตำหนิเหล่านี้จะถูกบีบเข้าด้วยกันทำให้มีขนาดเล็กลงจึงมีผลต่อการเกิดแตก (Crack) น้อยลง นอกจากนี้ค่าของกำลังแรงดึง (Tensile strength) ยังต่ำกว่าค่ากำลังแรงเฉือน (Shear strength) อีกด้วย ซึ่งต่างจากวัสดุเหนียว ซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบแรงดึงและแรงบิด

ความเค้นดึง ซึ่งมีทฤษฎีที่สำคัญที่เป็นที่นิยมอยู่สามทฤษฎีคือ Maximum normal stress, Coulomb-Mohr's และ Modified-Mohr's theory

2.1.2.2 เกณฑ์ความแตกหักตามความเค้นตึงฉากสูงสุด

เกณฑ์การแตกหักตามความเค้นตึงฉากสูงสุด พิจารณาสำหรับวัสดุเปราะ ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรก่อนเกิดความเสียหายสุดท้ายน้อยมาก จึงมีความเค้นครากและความเค้นตึงสูงสุดมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นความเค้นตึงสูงสุดจึงถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับความเค้นตึงฉากสูงสุด ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อความเค้นตึงฉากสูงสุดที่เกิดในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลมีขนาดสูงสุดหรือเท่ากับความเค้นตึงสูงสุดของวัสดุ โดยเรียกเกณฑ์ความแตกหักตามความเค้นตึงฉากสูงสุด (Maximum normal fracture criteria) (ชาวสวน กาญจนมัย, 2552)

ทฤษฎีความเค้นตึงฉากสูงสุด (Maximum-normal-stress theory, Brittle)

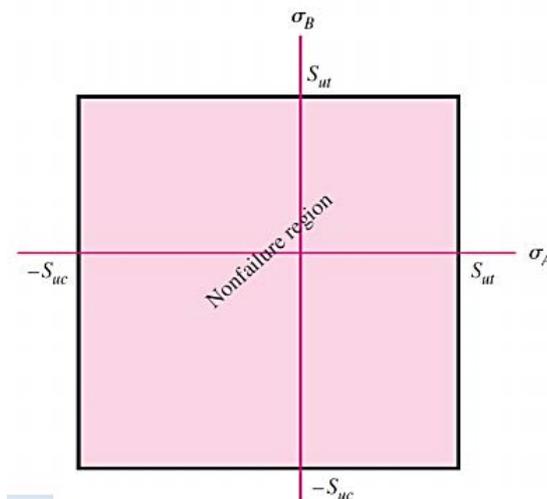
ทฤษฎี Maximum-normal-stress ทำนายว่าความเสียหายจะเกิดเมื่อค่า Principal stress ตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า ค่า Strength brittle materials ไม่มีค่า Yield strength ที่ชัดเจน จึงมักใช้ค่า Ultimate tensile หรือ Ultimate compressive stress แทน

$$\text{Principal stress} \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (2.1)$$

$$\text{Yield เมื่อ} \quad \sigma_1 \geq S_{\omega t} \quad \text{หรือ} \quad \sigma_3 \leq -S_{\omega c} \quad (2.2)$$

$$\text{คิด S.F.} \quad \sigma_1 \geq \frac{S_{\omega t}}{n} \quad \text{หรือ} \quad \sigma_3 \leq \frac{S_{\omega c}}{n} \quad (2.3)$$

Yield เมื่อ



รูปที่ 2.2 ทฤษฎีความเค้นดึงฉากสูงสุด

(ที่มา: พิเชษฐ์ พินิจ. (2555). ทฤษฎีความเสียหาย. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2560, จาก <http://pichet-pinit.in.th/wp-content/uploads/2014/08/6-Failure-Theory-for-Static-Stresses.pdf>)

2.1.2.3 ทฤษฎีของคูลอมป์-มอร์ (Coulomb-Mohr's theory)

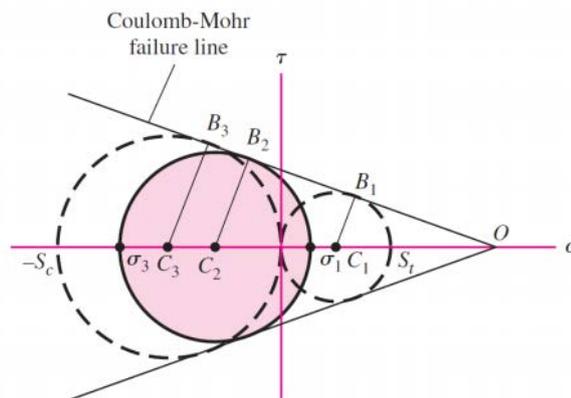
ทฤษฎีพลังงานแปรรูป ใช้กับวัสดุเปราะ (Coulomb-Mohr's theory – CMT) ทฤษฎีนี้ปรับปรุงจากทฤษฎี MNST (พิเชษฐ์ พินิจ, 2555) เนื่องจากวัสดุเปราะมักจะมีพฤติกรรมเป็นแบบ Uneven materials จึงมีการปรับ Maximum normal stress theory ให้เหมาะสมยิ่งขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 แต่จะใช้ได้กับวัสดุจริงในควอดแดรนต์ที่ 1 และ 3 ส่วนควอดแดรนต์ที่ 2 และ 4 ไม่ตรงกับผลการทดลอง จึงได้มีผู้คิดค้น Coulomb-Mohr's theory โดยการเชื่อมจุดที่อยู่ตรงข้ามกันด้วยเส้นทแยงมุมของควอดแดรนต์ที่ 2 และ 4 มีรูปร่างคล้ายกับ Distorsion energy theory แต่ต่างกันตรงที่ Coulomb-Mohr theory จะไม่สมมาตรเนื่องจากผลของ Uneven และใช้ Ultimate strength แทน Yield strength รูปที่ 2.3 แสดงผลของการทดสอบวัสดุเปราะเทียบกับ Coulomb-Mohr's theory ในควอดแดรนต์ที่ 4 ยังไม่ตรงกับทฤษฎีนี้ จุดที่เกิดความเสียหายจะอยู่นอกขอบเขตซึ่งหมายความว่ายังมีการเผื่อค่าความปลอดภัยมากเกินไป (ธีรพร เตจ๊ะ, 2553)

ใช้กับวัสดุที่ Strength ด้านดึงไม่เท่ากับด้านกด

ใช้ข้อมูลการทดสอบ Tension test และ Compression test เขียน Mohr's circle

ลากเส้นตรงสัมผัสวงกลมทั้งสอง และกำหนดให้เป็น Failure line

ถ้า Stress และ Shear เกินกว่าขอบเขตนี้ จะเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.3 ทฤษฎีความเค้นดึงฉากสูงสุดกรณี ใช้กับวัสดุที่ Strength ด้านดึงไม่เท่ากับด้านกด

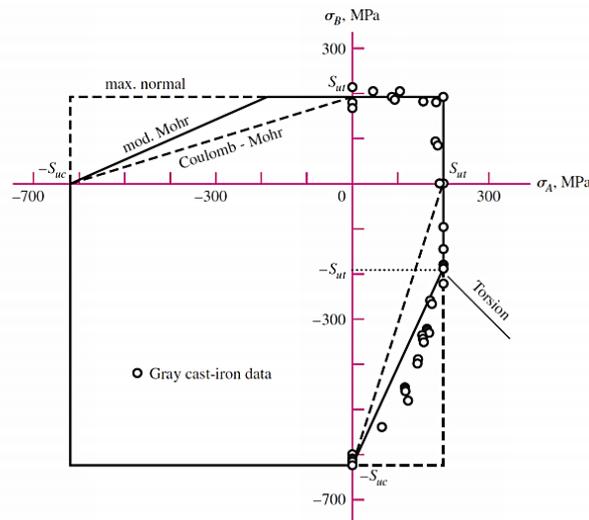
(ที่มา: พิชษฐ์ พินิจ. (2555). ทฤษฎีความเสียหาย. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2560, จาก <http://pichet-pinit.in.th/wp-content/uploads/2014/08/6-Failure-Theory-for-Static-Stresses.pdf>)

2.1.2.4 Modified-Mohr's theory

จากการทดสอบวัสดุเปราะ การเสียหายใกล้เคียงกับ Maximum normal-stress theory ผลที่ได้จะใกล้เคียงกับ Maximum normal-stress theory จึงมีผู้ปรับปรุง Coulomb-Mohr's theory โดยใช้ขอบเขตความเสียหายที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบวัสดุเปราะแทนโดยการเชื่อมจุด คือ ภาวะที่ความเค้นหลักมีเครื่องหมายเป็นบวกเหมือนกัน (ความเค้นดึง) Modified-Mohr's theory ทำนายว่าความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ ภาวะของความเค้นเพิ่มขึ้นเลยออกไปอยู่นอกขอบเขตความเสียหาย Factor of safety (ธีรพร เตจ๊ะ, 2553)

ตารางที่ 2.1 พิจารณากรณี Plane stress และคิด Safety factor

σ_A	σ_B	σ_1	σ_3	Yield condition
+	+	σ_A	0	$\sigma_A \geq S_y$
+	-	σ_B	σ_B	$\sigma_A - \sigma_B \geq S_y$
-	-	0	σ_B	$\sigma_B \leq -S_y$

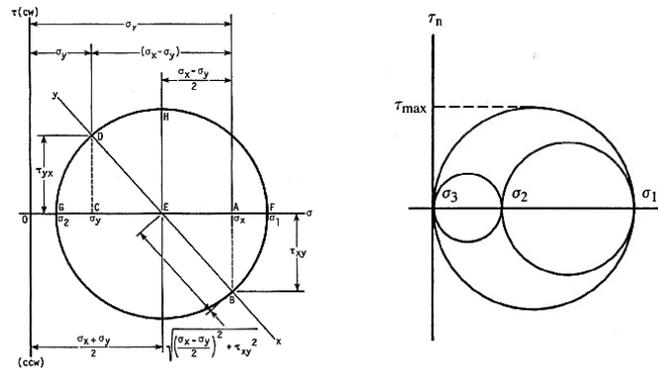


รูปที่ 2.4 ทฤษฎี Modified-Mohr's theory.

(ที่มา: พิเชษฐ์ พิณีจ. (2555). ทฤษฎีความเสียหาย. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2560, จาก [http:// pichet-pinit.in.th/wp-content/uploads/2014/08/6-Failure-Theory-for-Static-Stresses.pdf](http://pichet-pinit.in.th/wp-content/uploads/2014/08/6-Failure-Theory-for-Static-Stresses.pdf))

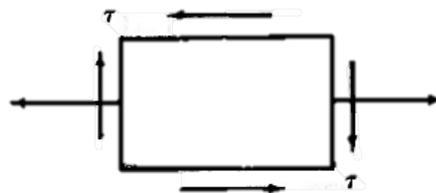
สรุปหากชิ้นงานที่จะวิเคราะห์เป็นวัสดุเหนียวจะใช้ Maximum shear stress หรือ Distortion energy theory แล้วแต่ประสบการณ์ของผู้ออกแบบ แต่ถ้าชิ้นงานที่จะวิเคราะห์เป็นวัสดุเปราะ Modified-Mohr theory เป็นทฤษฎีที่ให้ผลที่ใกล้เคียงที่สุด (ธีรพร เตจ๊ะ, 2553) แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ให้เกณฑ์ทฤษฎีความเค้นดึงฉากสูงสุด

ความเค้นหลัก (Principle stress) คือ ความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal stress) ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งอยู่บนระนาบหลัก ระนาบที่ไม่มีความเค้นเฉือน (พิเชษฐ์ พิณีจ, 2558) ความเค้นหลักและความเค้นเฉือนสูงสุด อาจหาได้จากวงกลมของมอร์ (Mohr's circle) ความเค้นเฉือนสูงสุดหาจากวงกลมมอร์ที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.5 วงกลมของมอร์ (Mohr's circle)

ในการออกแบบเครื่องจักรกล อาจจะพบความเค้นในลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 มี Normal stress ทิศทางเดียว

(ที่มา: Des Mach Elem Mech. Eng. Department. (2016). Retrieved January 4 2017, from

http://www.engineeringtoolbox.com/polymer-properties-d_1222.html :

http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103320%20Des%20Mach%20Element/CRW003_Failure%20Theories.pdf Engineeringtoolbox.Epoxy128,828,331,X75.)

ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) คือ แรงกระทำบนหน้าตัดที่เกิดขึ้นอยู่ในแนวตั้งฉากกับหน้าตัดและมีทิศทางออกจากหน้าตัดเราจะเรียกว่า ความเค้นดึง (Tensile stress) หากแรงที่ตั้งฉากนั้นมีทิศทางพุ่งเข้าหาหน้าตัดเราจะเรียก ความเค้นกด (Compressive stress) (วรรณสิริ พันธุ์ไธโร, 2010) ดังสมการ

$$\sigma_{av} = N/A \tag{2.4}$$

เกณฑ์ความเสียหายทั่วไป

ในกรณีนี้ที่ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมสร้างขึ้นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติคงที่ในทุกๆตำแหน่งและทิศทาง เกณฑ์การเสียหายทั่วไป (General form of failure criteria) กำหนดให้ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อ

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \geq \sigma_c \quad (2.5)$$

โดย $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ คือความเค้นหลัก และ σ_c คือความเค้นครากหรือความเค้นดึงสูงสุดของวัสดุ โดยขึ้นอยู่กับว่าเหตุการณ์ใดเกิดก่อน เกณฑ์ความเสียหายทั่วไปสามารถแสดงด้วยตัวแทนความเค้น $\bar{\sigma}$

$$\bar{\sigma} = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (2.6)$$

ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อ

$$\bar{\sigma} \geq \sigma_c \quad (2.7)$$

2.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จาก Simulation ในโปรแกรม SolidWorks

1. Von Mises stress คือ ผลลัพธ์ Stress ที่จะแสดงออกมาเป็นค่าแรกในโปรแกรม SolidWorks Simulation หรือเรียกว่าเป็นค่า Stress ที่นำผลลัพธ์ Stress ทั้ง 6 แบบ มาเข้าสู่สูตรรวมกัน เพื่อหาว่าชิ้นงานได้รับความเค้นรวมแล้ว (พลวัฒน์, ผลลัพธ์ที่ได้จาก Simulation, 2559)

$$\sqrt{0.5[(SX - SY)^2 + (SY - SZ)^2] + 3(TXY^2 + TYZ^2 + TZX^2)} \quad (2.6)$$

เมื่อ ค่า SX, SY, SZ หมายถึง Normal stress ในแนวแกน X,Y,Z ตามลำดับ
 ค่า TSX, TSY, TSZ หมายถึง Shear stress ในระนาบ XY, YZ, XZ ตามลำดับ

ปกติจะใช้ค่านี้ไปเปรียบเทียบกับค่า Yield stress ของวัสดุเพื่อดูว่าชิ้นงานเสียหายหรือยัง โดยถ้าค่า Maximum von Mises stress มากกว่า Yield ก็จะได้ว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายแล้ว แต่การดูค่า von Mises stress อย่างเดียวก็อาจจะไม่ใช่คำตอบทั้งหมด เนื่องจาก 2 สาเหตุดังนี้คือ

- ใช้การดู von Mises stress กับวัสดุเหนียว (ส่วนใหญ่โลหะทั่วไปก็มักจะเป็นวัสดุเหนียว)
- ค่า von Mises stress จะบอกทิศทางของแรงไม่ได้ ดังนั้นถ้าค่า von Mises stress สูงเกินค่า Yield แต่ชิ้นงานได้รับแรงกด ชิ้นงานก็อาจจะไม่เสียหาย

2. Principal stress เรียกอีกอย่างว่า ค่าความเค้นในแนวแกนหลัก ปกติจะใช้ดูวัสดุเปราะว่าเกิดความเสียหายหรือไม่ เนื่องจากค่า Principal stress สามารถดูทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นได้ว่าเป็นแรงดึงหรือแรงกด โดยแรงดึงจะมีค่า Stress เป็นบวก ส่วนแรงกดมีค่า Stress ติดลบ (พลวัฒน์, 2559)แต่ในการศึกษานี้ ได้ใช้ค่าของ P1-principle stress

P1-principle stress เกิดจากการรวม Stress tension/ Compression และ Shear โดยอาจใช้ Mohr's circle แล้วดูว่าในระนาบที่ Normal stress ที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นโดย Shear เป็น 0 เป็นเท่าไร และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ Yield strength จะทำนายได้ว่า จะเกิดการเสียหายหรือไม่ จะแม่นยำเมื่อใช้กับวัสดุเปราะ (Brittle) หมายถึง ไม่มีการยืดตัว เสียหายทันที

แต่ von Mises stress เป็นการรวมแรง (Combination) เป็นการรวมกันของ Principle stress ทั้งหมด ได้เป็นค่าตัวแทน Stress ที่จะนำไปเปรียบเทียบกับ Yield จะทำนายการเสียหายได้แม่นยำสำหรับ Ductile material ดังนั้นต้องดูว่าวัสดุที่ถ้าเป็น Ductile แล้ว von Mises stress เกิน Y.S. แสดงว่าใช้งานไม่ได้ (SolidWorks Thai, 2015)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟัน รักษารากที่มีขนาดคลองรากฟันกว้าง (ผนังคลองฟันบาง) เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ (2558) ได้ทำการวิจัยการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันรักษารากที่มีขนาดคลองรากฟันกว้างมาก (ผนังคลองรากฟันบาง) เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวน ต่างๆ กัน ได้ศึกษาฟันที่ผ่านการรักษาฟันที่มีคลองรากที่ผายออกมาก ผนังคลองรากฟันบางเป็นฟันที่มีความเสี่ยงต่อการแตกหักสูงกว่าฟันที่ผ่านการรักษาฟันทั่วไป ซึ่งมีการบูรณะด้วยการก่อแกนด้วยเรซินคอมโพสิตทั้งหมด การใช้เส้นใยแก้วสำเร็จรูปร่วมกับเรซินคอมโพสิต หรือการใช้เดือยฟันไฟเบอร์ร่วมกับการก่อแกนด้วยเรซินคอมโพสิต มาใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงของผนังเนื้อฟัน มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันลักษณะดังกล่าวโดยใช้เรซินคอมโพสิตยึดเดือยฟันไฟเบอร์พร้อมกับก่อแกนฟันเป็นวัสดุเดียวกัน และใส่เดือยไฟเบอร์เสริมในส่วนคลองรากที่ผายออกเป็นจำนวนต่างๆ กัน โดยแบ่งฟันกรามน้อยล่างซี่ที่หนึ่งซึ่งผ่านการรักษาแล้วออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ซี่ โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มควบคุมบูรณะด้วยเรซินคอมโพสิตก่อแกนฟัน (Multicore flow) กลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเดือยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อันร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต (FRC postec plus no.3, Multicore flow) และกลุ่มที่ 3 บูรณะด้วยเดือยฟันไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อันร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต (FRC postec plus no.3 & no.0 , Multicore flow) แล้วทำครอบฟันโลหะทั้ง 3 กลุ่ม จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine: static, LLOYD, Model LR10K) ใส่แรงกดทำมุม 135 องศา กับแนวแกนฟันจนกระทั่งฟันแตก โดยใช้ความเร็วหัวกด เท่ากับ 1 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างบูรณะด้วยโลหะเคลือบ Metal crown ติดตั้งที่ 135 องศา ในเครื่องทดสอบสากล



รูปที่ 2.8 หัวของโพลดเซลล์แนวราบ 135 องศา แกนตามยาวของฟัน.

(ที่มา: อุษณีย์ ปิงไพบุลย์ และคณะ. (2558). การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟัน รักษาารากที่มีขนาดคลองรากฟันกว้าง (ผนังคลองฟันบาง) เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM).)

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยโหลดอัดสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละ

Group	Average maximum compressive load (N)	Standard deviation
1	361.80	93.16
2	559.46	155.12
3	468.48	155.57

การทดลอง

จากผลการทดลอง ตารางที่ 2.2 แสดงผลการสูงสุดโหดอัด (N) ของแต่ละการทดลอง กลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดโหดอัดของ 361.8 N และมากที่สุดตัวอย่างข้าวที่บริเวณหนึ่งส่วนสามคอฟัน ตัวอย่างที่ข้าวจุดเชื่อมต่อระหว่างตรงกลางส่วนที่สามและส่วนสามคอฟัน กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดโหดอัดของ 559.46N, ตัวอย่างทั้งหมดข้าวที่บริเวณตรงกลาง เส้นใยเดียวไม่ได้ข้าวทั้งหมด ในกลุ่มนี้จะมีข้าวบางส่วนและทำให้เดียวแตกแบบสังเกตได้ กลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดโหดอัดของ 468.48 N, และ 4 ข้าวที่ตรงกลางส่วนที่สาม ตรงกลางเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แตกปลายส่วนที่สามของราก เดียวที่ไม่แตกหัก ยกเว้น 1 เดียว นั่นคือได้ถูกหักที่ยอดของเดียว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่ากลุ่มที่ 2 มีความแข็งแรงที่สุดในการแตกหัก ที่ความต้านทานต่อการโหดอัด (559.46N) และกลุ่มที่ 1 มีการแตกหักที่อ่อนแอที่สุด ความต้านทานต่อการโหดอัด (361.80 N) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่มีทางเดียว ANOVA และการทดสอบการเปรียบเทียบแบบหลากหลาย พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่สาม ($p > 0.05$)



รูปที่ 2.9 กลุ่มที่ 1



รูปที่ 2.10 กลุ่มที่ 2



รูปที่ 2.11 กลุ่มที่ 3

(ที่มา: อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ. (2558). การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของ ฟัน รักษารากที่มีขนาดคลองรากฟันกว้าง (ผนังคลองฟันบาง) เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, FEM)

สรุปผล จากการวิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยของแรงที่ทำให้เกิดการแตกในกลุ่มที่ 1 มีค่า $361.80 + 93.16$ นิวตัน กลุ่มที่ 2 มีค่า $559.46 + 155.12$ นิวตัน และกลุ่มที่ 3 มีค่า $468.48 + 155.17$ นิวตัน จาก ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่า ทั้ง 3 กลุ่ม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

การบูรณะฟันที่ผ่านการรักษารากฟันที่มีคลองรากฟันกว้าง ผนังคลองรากฟันบางสามารถทำได้ ด้วยการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิตเท่านั้น หรือจะใส่เดือยฟันไฟเบอร์ จำนวน 1 หรือ 3 อัน ร่วมกับการก่อแกนด้วยเรซินคอมโพสิต ซึ่งไม่ว่าจะบูรณะด้วยวิธีใด ต่างก็ไม่ได้ให้ความแตกต่างของความต้านทาน ต่อการแตกหักของฟันลักษณะดังกล่าว

2.2.2 ผลของการบูรณะด้วยเดือยและแกนด้วยวิธีต่างๆ ต่อการกระจายความเค้นในฟันซึ่งมี ผนังคลองรากบาง:ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล. (2545) สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายความเค้นด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟันตัด ซึ่งมีผนังคลองรากบางด้วยโปรแกรม MSC/Nastran for Windows เมื่อบูรณะด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 10 วิธี โดยพิจารณาปัจจัยหลักสามประการได้แก่ การเสริมหรือไม่เสริมผนังคลองรากฟัน ชนิดของเดือย (เดือย โลหะผสมทองชนิดที่สาม เดือยโลหะผสมนิเกิลโคเมียม เดือยสแตนเลสสตีล และเดือยเส้นใยคาร์บอน) กำหนดให้วัสดุทุกชนิดในแบบจำลองมีคุณสมบัติเชิงกลเหมือนกันในทุกๆ ส่วนของวัสดุ คุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง คุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น และวัสดุมีการเชื่อมกันและส่งผ่านความเค้นได้ดีกว่าการไม่เสริม การเสริมด้วยเรซินคอมโพสิตช่วยให้เกิดการกระจายความเค้นได้ดีกว่าการเสริมด้วยกลาสไอโอโน

เมอร์ผสมโลหะเงิน เตื่อยที่มีค่ามอดุลัส ของสภาพยืดหยุ่นมากทำให้เกิดความเค้นสะสมสูงสุดมากกว่า แต่จะทำให้เกิดความเค้นสะสมที่รากฟันส่วนต้นน้อยกว่าเตื่อยที่มีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นน้อย จากข้อสมมติของการทดลองข้างต้น การบูรณะโดยการเสริมผนังด้วย เรซินคอมโพสิตและใช้เตื่อยเส้นใยคาร์บอน น่าจะเป็นวิธีการเหมาะสมในการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากฟันบาง

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้ว และมีผนังคลองรากฟันบางด้วยวิธีบูรณะแบบต่างๆ ทำการศึกษาการกระจายความเค้นในฟันที่รักษารากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติในฟันตัดซึ่งหน้ากลางบนแนวด้านใกล้แก้ม-ด้านใกล้ลิ้น (Bucco-lingual) ซึ่งมีขนาดดังนี้

ความยาวส่วนตัวฟัน	10.5	มิลลิเมตร
ความยาวส่วนรากฟัน	13.0	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางในแนวใกล้แก้ม-ใกล้ลิ้นที่ระดับตัวฟัน	7.0	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางในแนวใกล้แก้ม-ใกล้ลิ้นที่ระดับคอฟัน	6.0	มิลลิเมตร

กำหนดวิธีการบูรณะฟันเป็น 10 วิธี ดังนี้

1. บูรณะด้วยเตื่อยโลหะเหวี่ยงขนาดตามคลองรากฟันที่เป็นอยู่
 - 1.1 โลหะผสมทองชนิดที่สาม ทอง-ไม่เสริมผนัง
 - 1.1 โลหะผสมนิเกิลโครเมียม นิเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง
2. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิต แล้วใช้เตื่อยโลหะเหวี่ยงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 2.1 โลหะผสมทองชนิดที่สาม ทอง-คอมโพสิต
 - 2.2 โลหะผสมนิเกิลโครเมียม นิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต
3. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิต แล้วใช้เตื่อยสำเร็จรูปทรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 3.1 เตื่อยสแตนเลสสตีล สแตนเลสสตีล-คอมโพสิต
 - 3.2 เตื่อยเส้นใยคาร์บอน คาร์บอน-คอมโพสิต
4. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน แล้วใช้เตื่อยโลหะเหวี่ยงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 4.1 โลหะผสมทองชนิดที่สาม ทอง-เซอร์เมต
 - 4.2 โลหะผสมนิเกิลโครเมียม นิเกิลโครเมียม-เซอร์เมต

5. บำรุงโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอเมอร์ผสมโลหะเงินบำรุงแล้วใช้เต็ยสำเร็จรูปทรงขนาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร

5.1 เต็ยสเตนเลส สเตนเลสสตีล-เซอร์เมต

5.2 เต็ยเส้นใยคาร์บอน คาร์บอน-เซอร์เมต

สรุปผลการวิจัยของการบำรุงด้วยเต็ยและแกนด้วยวิธีต่างๆ

การวิเคราะห์การกระจายความเค้นในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเต็ย ในการบำรุงฟันที่รักษาคลองรากฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ โดยกำหนดปัจจัยการเสริมผนังคลองรากฟันส่วนต้น ชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟันและชนิดของเต็ยพบว่า

1. ตำแหน่งที่อาจเกิดความล้มเหลวในการบำรุงฟันได้แก่ ที่ผนังฟันด้านในที่ระดับปลายเต็ยด้านในแก้ม ผนังคลองรากฟันด้านในที่ระดับปลายรากฟันด้านใกล้ลิ้นและที่ผิวรากฟันด้านนอกที่ระดับคลองรากฟันส่วนต้นด้านใกล้ลิ้น

2. ในฟันที่มีผนังคลองรากฟันส่วนต้นบาง การเสริมผนังคลองรากฟันทำให้การกระจายความเค้นได้ดีกว่าการไม่เสริมผนัง และทำให้ค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันลดลง

3. ชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟันไม่มีผลต่อค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟัน แต่ทำให้ความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันส่วนต้นมีค่าต่างกัน โดยเสริมผนังคลองรากฟันด้วยวัสดุที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นใกล้เคียงกับเนื้อฟันได้แก่ เรซินคอมโพสิตจะช่วยลดความเค้นดิ่งที่บริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าเซอร์เมตที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่าเนื้อฟันมาก

4. ชนิดของเต็ยมีผลต่อค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันและความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันส่วนต้น โดยเต็ยที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นมากกว่าจะทำให้ความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันส่วนต้นน้อยกว่าเต็ยที่มีค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นน้อย

5. ในการบำรุงฟันที่มีผนังคลองรากฟันบาง การใช้เรซินคอมโพสิตเป็นวัสดุคลองรากฟันและสร้างแกน ร่วมกับการใช้เต็ยเส้นใยคาร์บอน น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากช่วยลดความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีกว่าการบำรุงด้วยวิธีอื่น และการทำให้เกิดความเค้นในเนื้อฟันที่ใกล้เคียงกันในแต่ละบริเวณของรากฟัน

2.2.3. การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซีเมื่อมีการบурณะแบบต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

ณัฐภา ภิญโญโสภณ และคณะ (2560) ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษและทันตกรรมประดิษฐ์ ได้ทำการศึกษาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นภายในคลองรากฟัน ที่มีภาพตัดขวางเป็นรูป อักษรซีเมื่อได้รับการบурณะแบบต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

โดยนำฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ที่ถูกถอนของมนุษย์ ศึกษาโครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จำนวน 10 แบบจำลองคือ ฟันปกติฟันที่บурณะด้วยแกนฟัน เรซินคอมโพสิต ฟันที่บурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนหน้าตัดกลมจำนวน 1 และ 2 อัน ฟันที่ได้บурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้วหน้าตัดกลมจำนวน 1 และ 2 อัน ฟันที่บурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมจำนวน 1 และ 2 อัน ฟันที่บурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีจำนวน 1 และ 2 อัน ที่ทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แอนซิส โดยให้แรงขนาด 45 นิวตัน ด้านบดเคี้ยวด้วยหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร พบว่าการบурณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตทำให้เกิดการสะสมของความเค้นเป็นปริมาณสูงที่สุดโดยมากกว่าฟันปกติ เดือยฟันเส้นใยหน้าตัดกลมมีการสะสมความเค้นน้อยกว่าเดือยฟันหน้าตัดวงรี และการบурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยจำนวน 2 อัน มีการสะสมความเค้น ใกล้เคียงกับฟันปกติและน้อยกว่าการบурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยจำนวน 1 อัน การบурณะทุกแบบมีรูปแบบการกระจายความเค้น สะสมที่บริเวณคอฟันมากที่สุดโดยเฉพาะด้านใกล้แก้ม ภายใต้สภาวะของการศึกษานี้สรุปได้ว่าการบурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้ว หรือเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมจำนวน 2 อัน มีปริมาณของความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการบурณะแบบอื่นๆ

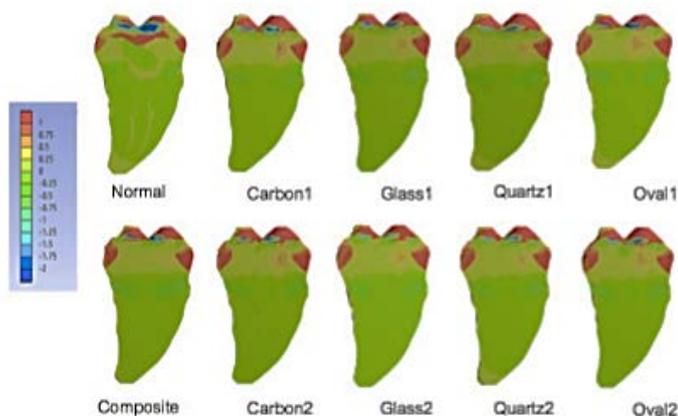
การสร้างแบบจำลองคลองรากฟันรูปอักษรซี

นำภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่มีสกุลของภาพเป็นแอสทีแอลไปเข้าโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์ (SolidWorks 2016, Dassault Systèmes, France) เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยฟันจะฝังอยู่ในกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกเนื้อโปร่งที่ระดับต่ำกว่าบริเวณ รอยต่อระหว่างเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร และมีเอ็นยึดปริทันต์ที่มีความหนา 200 ไมโครเมตร 9 คลองรากฟันมีขนาดเท่ากับการขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์ โปรเทเปอร์ยูนิเวอร์แซล (Protaper Universal, Dentsply Maillefer, Switzerland) ขนาด F2 และมีวัสดุอุดคลองรากฟัน กัดตาเปอร์ซาอยู่บริเวณปลายราก ขนาด 4 มิลลิเมตร ประกอบด้วย 10 แบบจำลอง คือฟันปกติฟันที่บурณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต ฟันที่ทำการบурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอน 1 และ 2 อัน ฟันที่บурณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้ว 1 และ 2 อัน ฟันที่บурณะด้วย เดือยฟันเส้นใยควอตซ์ 1 และ 2 อันและฟันที่บурณะด้วยเดือย ฟันเส้นใยหน้าตัดวงรี 1 และ 2 อัน เดือยฟันเส้นใยคาร์บอน เดือยฟันเส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนปลาย 0.6 มิลลิเมตรรูปทรงกรวยมีความผายร้อยละ 6 และเดือยฟันเส้นใยหน้าตัดวงรี

(ELLIPSONTMPOST, RTD/Satelec, Merigcac, France) มีชนิดของเส้นใยเป็นเส้นใยควอตซ์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนปลาย 0.6 มิลลิเมตร

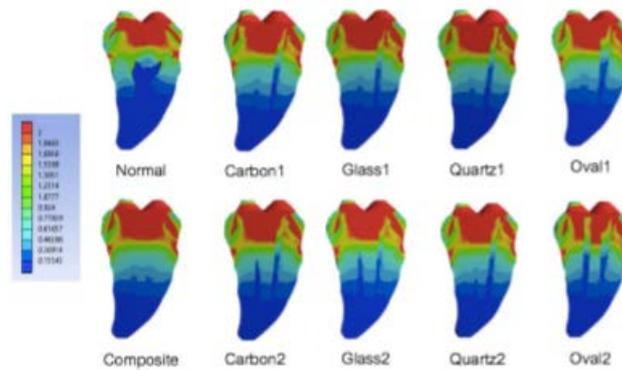
ผลการทดลองการกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษร ซี เมื่อมีการบูรณะแบบต่างๆ

เมื่อพิจารณาความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal stress) พบว่าฟันปกติและการบูรณะแบบต่างๆ เกิดการ สะสมของความเค้นหลักสูงสุดเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยมี ค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่ในช่วง 10.78–14.72 เมกกะปาสคาลและความเค้นอัดสูงสุดอยู่ในช่วง 8.56 –12.79 เมกกะปาสคาล จากภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้กลางไกลกลาง แสดงรูปแบบการกระจายของความเค้นหลักสูงสุดของฟัน ปกติและฟันที่ได้รับการบูรณะแบบต่างๆ พบว่าการบูรณะแบบต่างๆมีรูปแบบการกระจายความเค้นที่คล้ายคลึงกัน โดยมีการสะสมความเค้นอัดเป็นปริมาณมากบริเวณคอฟัน และเกิดความเค้นดึงขึ้นภายในเดือยฟัน การบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตเกิดการสะสมของความเค้นอัดใน รากฟันบริเวณใกล้คอฟันมากกว่าการบูรณะด้วยเดือยฟัน เส้นใยชนิดต่าง ๆ ส่วนรูปแบบการกระจายและปริมาณการ สะสมของความเค้นหลักสูงสุดภายในเดือยฟันพบว่าเดือยฟัน เส้นใยคาร์บอนมีความเค้นดึงที่เกิดขึ้นภายในเดือยฟันมากที่สุด

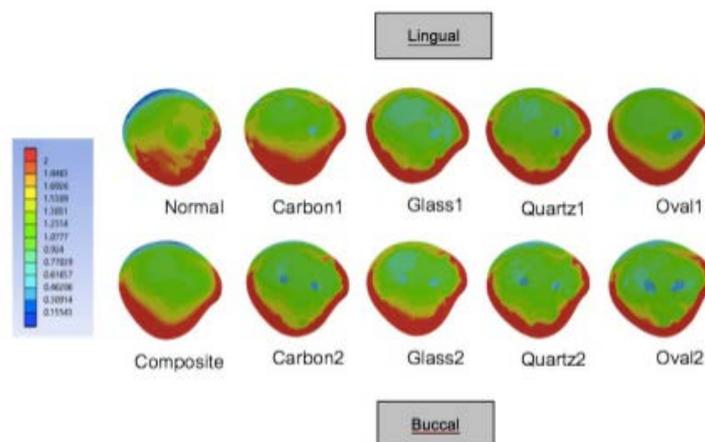


รูปที่ 2.12 ภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้ไกลแสดงรูปแบบการกระจายความเค้นหลักสูงสุด

เดือยฟันเส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมี ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นภายในเดือยฟันน้อยที่สุดและใกล้เคียงกันนอกจากนี้พบว่าความเค้นดึงที่สะสมอยู่ภายในเดือยฟันลดลง เมื่อมีการบูรณะด้วยเดือยฟันจำนวน 2 อัน



รูปที่ 2.13 ภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้กลางไกลกลางแสดงการกระจายความเค้นผสมรวม



รูปที่ 2.14 ภาพตัดตามขวางแสดงการกระจายความเค้นผสมรวม

(ที่มา: ัญญา ภิญโญโสภณ และคณะ. (2560). การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซีเมื่อมีการบูรณะแบบต่างๆด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ. เข้าถึงได้จาก การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซีเมื่อมีการบูรณะแบบต่าง ๆ ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ.)

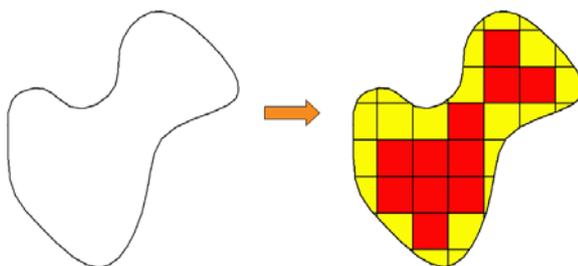
สรุปผลการกระจายความเค้น

จากการศึกษาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีของฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ที่มีภาพตัดขวางของคลองรากฟันส่วนต้น โค้งต่อเนื่องเป็นรูปอักษรซีโดยไม่มีการแยกคลองรากฟัน และมีลักษณะของคลองรากฟันเป็นแบบที่ 1 เมื่อพิจารณาจากภาพรังสีนั้น ภายใต้ข้อกำหนดของการศึกษานี้พบว่าการบูรณะด้วยเดือย

ในที่นี้จะเน้นสรุปเรื่องการใช้วัสดุ เรซินคอมโพสิตร่วมกับเดือยเส้นใยคาร์บอน และจากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการบุงนด้วยแกนพื้นเรซินคอมโพสิตเดือยเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 อัน และเดือยพื้นเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีจำนวน 1 อัน เกิดการสะสมของ ความเค้นดึงเป็นปริมาณมากกว่าการบุงนแบบอื่น ๆ การสะสมของความเค้นดึงเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากบริเวณคอฟันซึ่งการที่เกิดการสะสมความเค้นดึงเป็นปริมาณมากทำให้ มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของโครงสร้างฟันบริเวณคอฟันที่เรียกว่า แอ็บแฟรคชัน (Abfraction) ซึ่งมีสาเหตุจาก ความเค้นอัดและความเค้นดึงของแรงบดเคี้ยวที่สะสมบริเวณคอฟันด้านแก้มหรืออาจทำให้เกิดการแตกหักของตัวฟันและวัสดุบุงนได้ เนื่องจากได้มีการศึกษาพบว่าเคลือบฟัน เนื้อฟัน และวัสดุทางทันตกรรมบางชนิดและวัสดุเช่น เรซินคอมโพสิตสามารถทน ต่อความเค้นดึงก่อนที่จะเกิดการแตกหักได้เป็นปริมาณต่ำกว่า ความเค้นอัด ดังนั้นการบุงนด้วยแกนพื้นเรซินคอมโพสิต การบุงนด้วยเดือยพื้นเส้นใยคาร์บอน จำนวน 1 อัน และเดือยพื้นเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรี จำนวน 1 อัน มีความเสี่ยงในการเกิดการแตกหักได้มากกว่าการบุงนแบบอื่น ๆ

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) คือวิธีการที่โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ชิ้นงานส่วนใหญ่ใช้ในการคำนวณหาความแข็งแรง หลักการของ (FEM) คือการแบ่งชิ้นงานขนาดใหญ่ออกเป็นชิ้นงานขนาดเล็กๆ ที่มีรูปทรงเป็นเรขาคณิต (พวกสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม วงกลม เป็นต้น) เนื่องจากเครื่องมือหรือสูตรคำนวณที่เรามีอยู่สามารถคำนวณได้แต่รูปทรงเรขาคณิต ดังรูปที่ 2.15

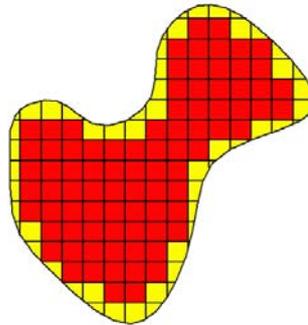


รูปที่ 2.15 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

(ที่มา: พลวัฒน์ ไพโรไพศาลกิจ. (2559). Simulation so easy. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560, จาก <http://thai-solidworkssimulation.blogspot.com/2014/10/solidworkssimulation.html>)

ถ้าต้องการหาพื้นที่ของรูปทรงใดๆ ตามภาพข้างบน วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการแบ่งชิ้นงานให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ เพื่อให้เราใช้สูตรหาพื้นที่ได้ จากนั้นจึงเอาผลลัพธ์ของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ แต่ละอันมาบวกกัน เราก็จะหาพื้นที่ของรูปทรงใดๆได้แต่จากรูปข้างบนจะเห็นว่าสี่เหลี่ยมสีแดงคือสี่เหลี่ยมที่เต็ม

รูป ส่วนสี่เหลี่ยมคือสี่เหลี่ยมที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นถ้าเราคำนวณพื้นที่สี่เหลี่ยมแล้วเอามารวมกันทั้งหมด ผลลัพธ์ที่ได้อาจจะมีความคลาดเคลื่อนจากของจริงไปบ้าง วิธีแก้ปัญหานี้ทำให้ขนาดของสี่เหลี่ยมแต่ละก่อนเล็กลง ดังรูปที่ 2.16



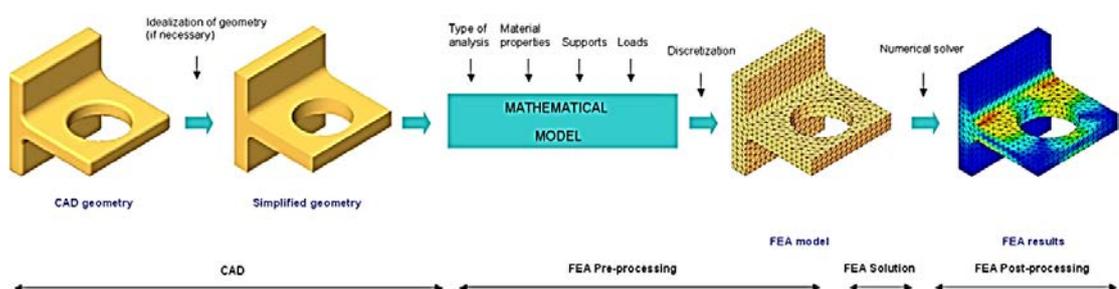
รูปที่ 2.16 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

(ที่มา: พลวัฒน์ ไพโรไพศาลกิจ. (2559). Simulation so easy. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560, จาก <http://thai-solidworkssimulation.blogspot.com/2014/10/solidworkssimulation.html>)

พื้นที่สี่เหลี่ยมหรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นส่วนที่ทำให้การคำนวณคลาดเคลื่อนจะมีน้อยลง แต่ก็ทำให้ต้องคำนวณมากขึ้นเพราะมีจำนวนสี่เหลี่ยมที่ต้องคิดมากขึ้น

สรุปคือวิธีการ FEA คือการเปลี่ยนชิ้นงานรูปร่างใดๆ ให้กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิต เพื่อให้เราสามารถใส่สูตรคำนวณที่มีอยู่ได้ ในการทำ Simulation เราเรียกการแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นเล็กๆ ว่าการแบ่ง Mesh

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ FEA



รูปที่ 2.17 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

(ที่มา: http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/2014_10_01_archive.html)

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

1. CAD Geometry คือการเขียนหรือนำไฟล์ CAD ที่ต้องการวิเคราะห์เข้ามา
2. Simplified Geometry คือการทำชิ้นงานให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เช่น ลบ Fillet ออก ปิดรูเจาะที่ไม่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ เอาลวดลายบนโมเดลหรืออักษรนูนออก เป็นต้น เพื่อให้โปรแกรมสามารถแบ่ง Mesh ได้ง่ายขึ้น
3. Mathematical model คือการกำหนดค่าต่างๆ เช่น ค่าวัสดุ จุดยึดชิ้นงาน แรงกระทำ เป็นต้น
4. Create mesh คือการแบ่ง Mesh สำหรับทำการวิเคราะห์
5. Analysis คือการวิเคราะห์ผลลัพธ์ออกมา โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในลักษณะของเฉดสีเพื่อบอกว่าตำแหน่งไหนมีความมากหรือน้อย และจะมีแถบสีกำกับเพื่อบอกว่าสีใดแสดงถึงค่าเท่าใด ซึ่งค่าที่โปรแกรมคำนวณได้ก็มีหลายหลาย เช่น Stress, Strain หรือ Displacement เป็นต้น

โปรแกรมโซลิด เวิร์ค (Solid Work 2016)



รูปที่ 2.18 โปรแกรม SolidWorks

โปรแกรม SolidWorks เป็นโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ ซึ่งใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับการศึกษาและระดับอุตสาหกรรม มีทั้งการข้อมูลในเวปไซต์ ต่างๆ เช่น Youtube มีการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัย มีสถานที่ที่จัดสอนโปรแกรมโดยเฉพาะ และมีคนที่รับสอนนอกสถานที่ ทำให้โปรแกรม SolidWorks มีผู้ใช้จำนวนมากเพราะมีแหล่งศึกษาที่ทำได้ง่าย และสามารถฝึกใช้งานได้อย่างรวดเร็ว แต่ยังมีคนจำนวนน้อยที่จะทราบว่าโปรแกรม SolidWorks สามารถเพิ่มฟังก์ชัน Add-in เพื่อให้มีความสามารถอย่างอื่นนอกเหนือจากการวาดโมเดล 3 มิติ ฟังก์ชัน Simulation เองก็เป็นหนึ่งในฟังก์ชัน Add-in ที่มีอยู่มากมาย ในโปรแกรม SolidWorks ที่จะทำการออกแบบจำลองรากฟัน ได้ใช้ ฟังก์ชัน Simulation

Simulation

คือการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโมเดล 3 มิติ (Strength analysis) โดยใช้วิธี Finite element analysis (FEA) ในการคำนวณหาความแข็งแรง ซึ่งจะมีโมดูลย่อยๆอีกหลายชนิดเพื่อให้ตอบโจทย์ความเสียหายที่มีได้หลากหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

- Linear static คือการวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระทำ สามารถดูการรับแรง (Stress) ที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน และดูการบิดงอ (Displacement) ได้

- Frequency คือการวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและ (Mode shape) ลักษณะหรือทิศทางของการสั่น

- Buckling คือการวิเคราะห์ความเสียหายแบบโก่งเดาะ (Buckling) โดยแสดงผลในรูปของ (Buckling load factor) คล้ายๆ กับ (Safety factor) ที่บอกว่าชิ้นงานสามารถรับแรงได้อีกกี่เท่าจึงจะเกิดความเสียหาย)

- Thermal คือการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

- Fatigue คือการวิเคราะห์ความล้าหรืออายุการใช้งานของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำซ้ำๆ

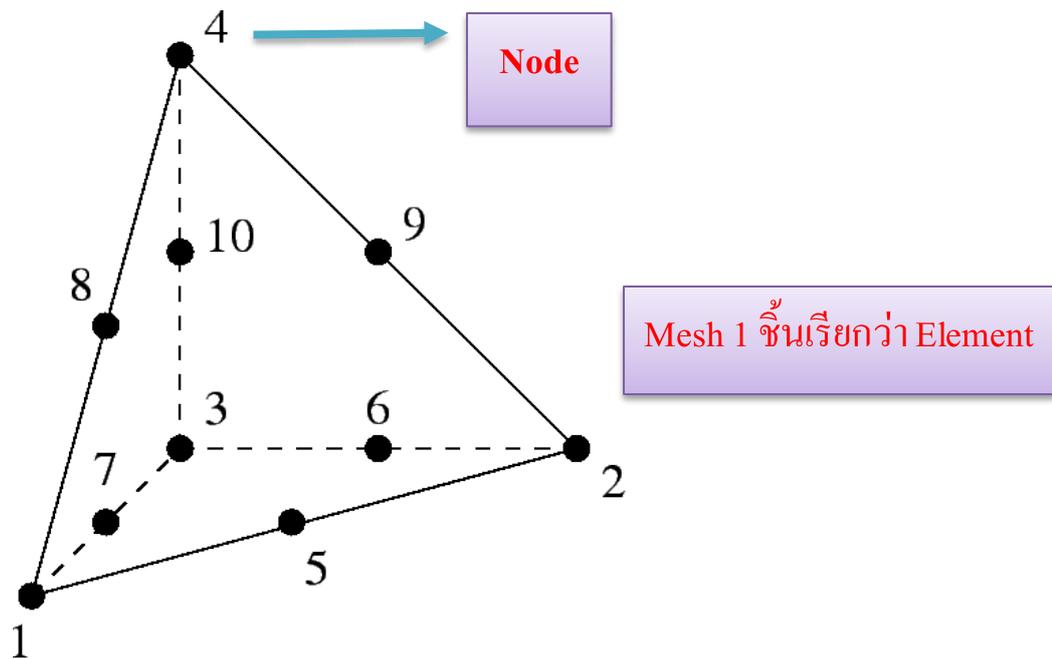
- Drop test คือการวิเคราะห์การตกกระแทก โดยสามารถกำหนดความสูงหรือความเร็วตอนชิ้นงานเกิดการกระแทกกับพื้น กำหนดมุมตกกระแทก และกำหนดค่าความแข็งแรงของพื้นที่ชิ้นงานมากระแทกได้

- Optimization คือการหาขนาดที่เหมาะสมของชิ้นงานด้วยโปรแกรม สามารถกำหนดตัวแปรที่ต้องการเปลี่ยน เช่น ขนาดของชิ้นงาน เป็นต้น กำหนดเงื่อนไข เช่น ต้องมี Safety factor มากกว่า 2 หรือมีการบิดงอไม่เกิน 1 มิลลิเมตร เป็นต้น และกำหนดเป้าหมายที่ต้องการ เช่น หาว่าชิ้นงานที่มีน้ำหนักเบาที่สุดคือเท่าไร โดยโปรแกรมจะเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานตามตัวแปรที่กำหนดโดยอัตโนมัติ และหาชิ้นงานที่เบาที่สุดโดยที่ชิ้นงานตัวนั้นๆ ต้องผ่านเงื่อนไขของเราด้วย

- Pressure vessel คือการวิเคราะห์ถึงความดัน โดยอ้างอิงกับมาตรฐาน ASME Code section VII, division 2, appendix 4

- Linear dynamic คือการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน สามารถกำหนดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น แล้วคำนวณหา Stress หรือ Displacement ที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆได้

- Non-linear คือการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นซึ่งมีได้ 3 แบบคือ วัสดุไม่เชิงเส้น (Material non-linear) เช่น พลาสติก ยาง เป็นต้น มีการสัมผัสหรือการเคลื่อนที่มาชนกันระหว่างชิ้นงานประกอบ (Contact non-linear) และชิ้นงานมีการบิดงอเปลี่ยนไปจากรูปเดิมมากๆ (Geometry non-linear) (พลวัฒน์ ไพโรไพศาลกิจ, 2559)

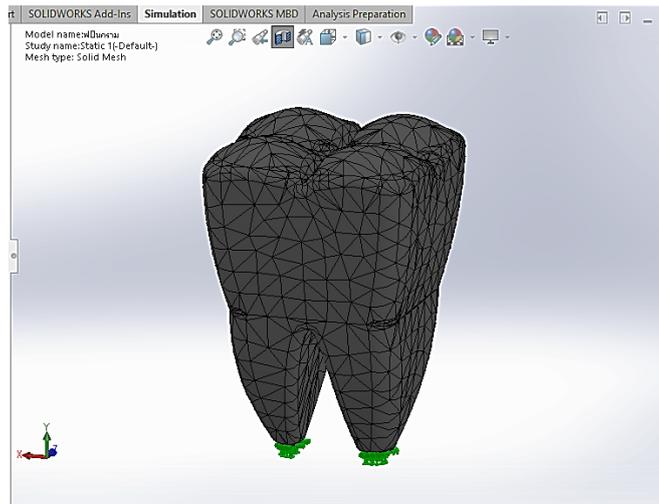


รูปที่ 2.19 แสดงจุดต่อ

(ที่มา: http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node33.html)

วิธีการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) คือการเปลี่ยนชิ้นงานรูปร่างใดๆ ให้กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิต เพื่อให้เราสามารถใส่สูตรคำนวณที่มีอยู่ได้ ในการทำ Simulation เราเรียกการแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นเล็กๆ ว่าการแบ่ง Mesh

Mesh คือการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเรขาคณิตเล็กๆ เพื่อให้เราสามารถใส่สูตรคำนวณต่างๆที่มีอยู่ได้ ดังนั้นการสร้าง Mesh จึงมีความสำคัญอย่างมาก เพราะถ้าเราแบ่งชิ้นงานไม่ดี ทำให้โปรแกรมมองเห็นรูปร่างที่จะวิเคราะห์ผิดเพี้ยนไป ก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดไปด้วย Mesh 1 ชั้นจะเรียกว่า Element และในแต่ละ Element จะมีจุด Node ซึ่งเป็นจุดตรงมุม Element ซึ่งจุด Node คือจุดที่โปรแกรมจะใช้คำนวณหาผลลัพธ์ ดังนั้นหากจุด Node มีจำนวนมาก โปรแกรมก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วยโดยในการทำแบบจำลองพื้น จะใช้ Solid mesh คือ Mesh รูปทรง 3 มิติ ในโปรแกรม SolidWorks จะเป็นรูปพีระมิดฐานสามเหลี่ยม เหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ชิ้นงานที่เป็นก้อนๆ สำหรับโมเดลที่ขึ้นรูปด้วยคำสั่งในแถบ Feature เช่น Extrude Revolve Swept ฯลฯ เมื่อเข้าใช้งานในฟังก์ชัน Simulation โปรแกรมจะวิเคราะห์ด้วย Solid mesh โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.20 ภาพตัวอย่างแบบจำลองฟันกราม โดยใช้ Solid mesh

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ (Intel Core I5-6200U 2.3GHz 4GB DDR3 L Memory)
2. โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ไฟล์เน็ตเอลิเมนต์ (SolidWorks, 2016)
3. แผ่นซีดีสำหรับบันทึกผลการทดลอง
4. กลุ่มตัวอย่างเป็นฟันกรามซี่ล่างของมนุษย์ที่ถูกถอนนำมาศึกษาโครงสร้างรายละเอียดภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

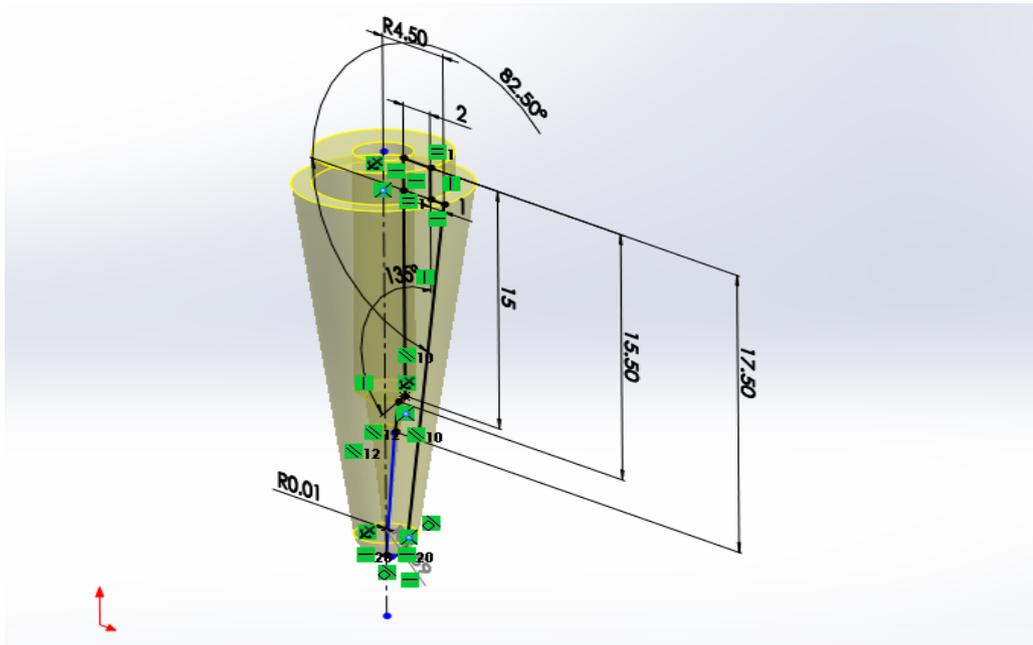
3.2 วิธีการวิจัย

ศึกษาการกระจายความเค้นในฟันที่รักษารากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติในฟันกรามน้อยซี่ล่าง ซึ่งมีขนาด 3 มิติ ดังนี้

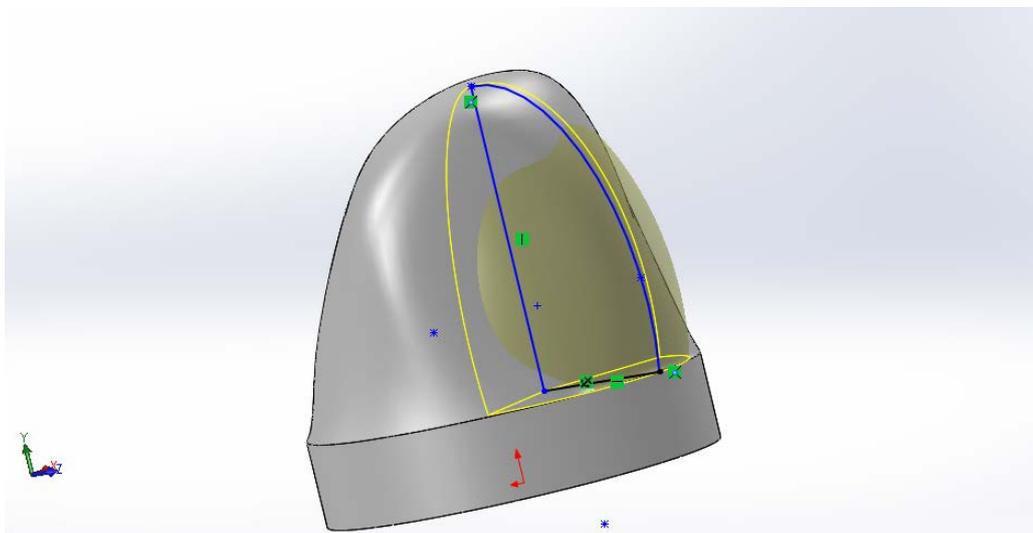
ความยาวส่วนรากฟัน	22	มิลลิเมตร
ความยาวของโครงโลหะครอบฟัน	7.2	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางตัวฟัน	9	มิลลิเมตร
ความยาวฐานยึด (อีพอกซีเรซิน)	65	มิลลิเมตร
ความกว้างฐานยึด (อีพอกซีเรซิน)	20	มิลลิเมตร



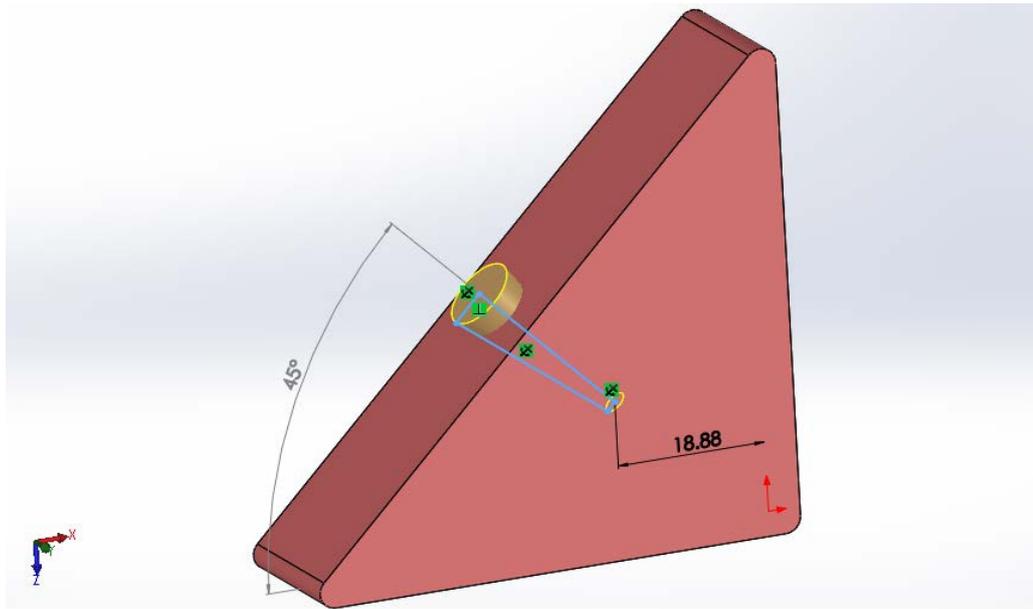
รูปที่ 3.1 ฟันที่ได้จาก CT-Scan



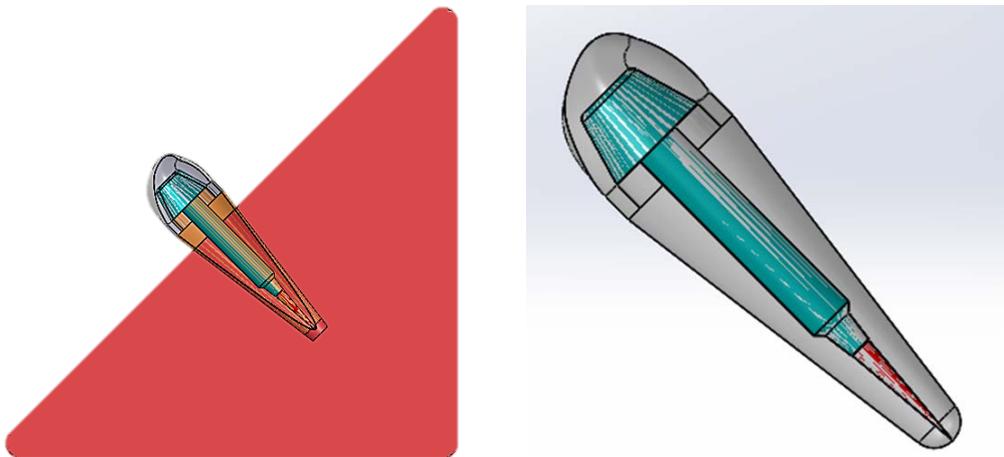
รูปที่ 3.2 แบบจำลองฟัน



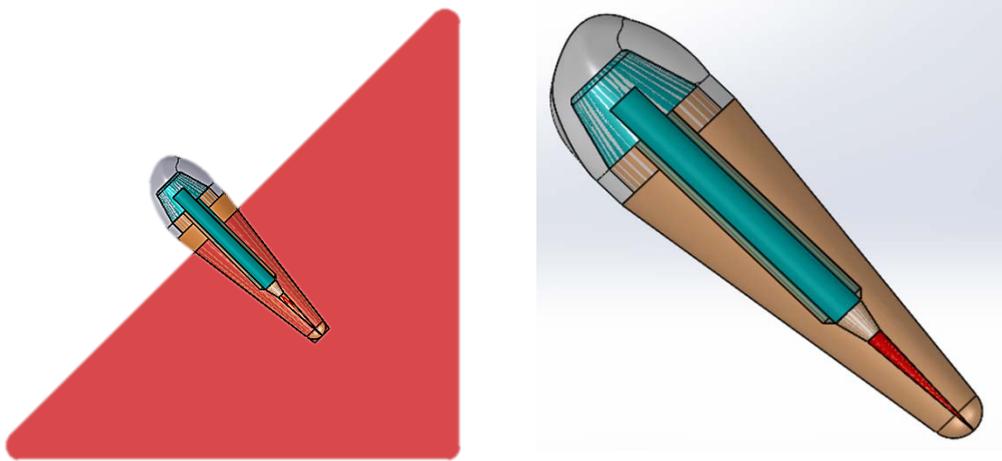
รูปที่ 3.3 แบบจำลองโครงโลหะครอบฟัน



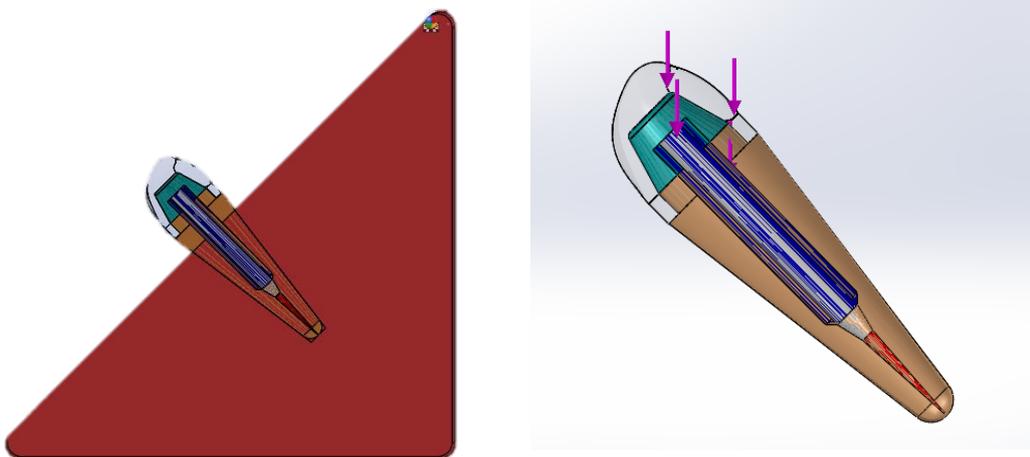
รูปที่ 3.4 แบบจำลองฐานยึด อีพอกซีเรซิน



รูปที่ 3.5 กลุ่มที่ 1 บุรณะด้วยเรซินคอมโพสิตก่อแกนฟัน



รูปที่ 3.6 กลุ่มที่ 2 บุรณะด้วยเดือยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อัน
 ร่วมกับการก่อแกนพันด้วยเรซินคอมโพสิต



รูปที่ 3.7 กลุ่มที่ 3 บุรณะด้วยเดือยฟัน ไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน
 ร่วมกับการก่อแกนพันด้วยเรซินคอมโพสิต

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) มีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 สร้างแบบจำลองรากฟันเสมือนกับการทดสอบจริง ลงในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) สร้างแบบจำลองรากฟันเสมือน (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

3.3.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) ได้แก่ ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus, E) ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ของแต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้าง โดยกำหนดสมบัติทางกลของส่วนประกอบรากฟันเป็นแบบไอโซทรอปิกและมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear isotropic elastic) การยึดติดของผิวสัมผัสทั้งหมดเป็นแบบยึดติดแน่น (Bonded)

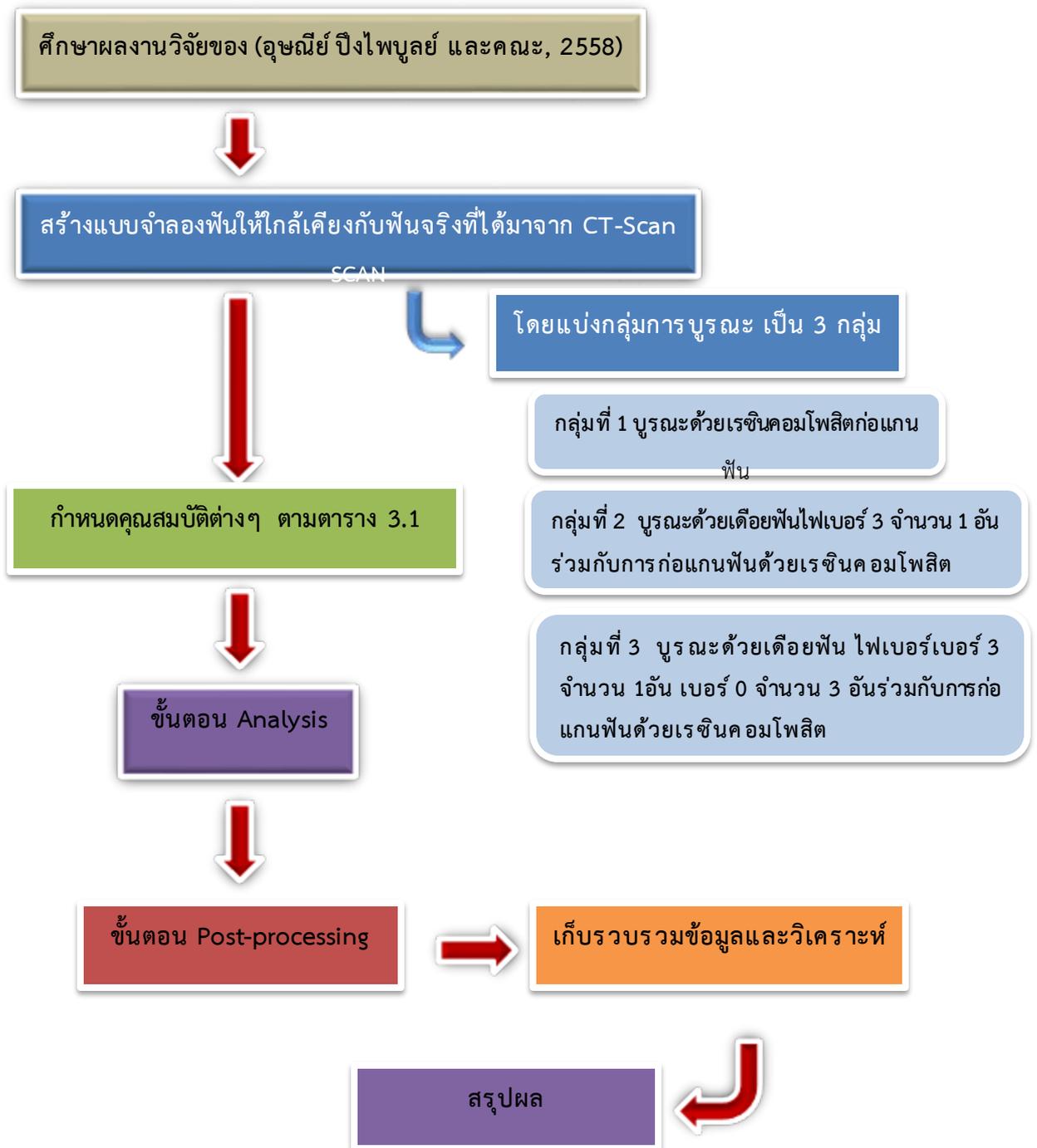
3.3.3 กำหนดแรงที่กระทำ 1,000 N ทำมุม 45 องศา และกำหนดฐานรองรับของรากฟันเป็น Fixed geometry

3.3.4 โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทดสอบการรับแรงจริงโดยกำหนดให้วิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนตามการเสียรูปของโครงสร้างทำการแสดงผลหาค่าความเค้น Stress

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกล ส่วนประกอบแบบจำลองรากฟัน

Material	Young's Modulus (E) MPa	Poisson's ratio (ν)	Reference
เนื้อฟัน	18600	0.31	(Farah, 1988)
เอ็นยึดปริทันต์	0.0689	0.45	(Peyton, 1952)
เหงือก	0.003	0.45	(Weinstein, 1980)
กัตตาเปอร์ชา	0.69	0.45	(Kydd, 1967)
เรซินคอมโพสิต	16600	0.24	(Roulet, 2000)
โลหะผสมทองคำ ครอบฟัน	96600	0.35	(Friedman, 1975)
เดือยเส้นใยคาร์บอน	21000	0.3	(Bassiouny, 1986)
อีพ็อกซี เรซิน	20000	0.3	(Engineeringtoolbox, ม.ป.ป.)

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน (Flow chart)



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน (Flow chart)

ขั้นตอนการ Analysis

ทำการส่งโปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้จาก ขั้นตอน Pre-processing โดยใช้คำสั่ง Analyze โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าการเคลื่อนที่จากสมการที่สร้างไว้ในแต่ละจุดและเอลิเมนต์ และสามารถนำไปคำนวณความเค้นแบบต่างๆ ได้ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต่างกันตามปริมาณความละเอียดของเอลิเมนต์

ขั้นตอน Post-Processing

ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงเป็นค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อและเอลิเมนต์ ค่าความเค้น ซึ่งได้แก่ ความเค้นแกนหลัก (Principal stress) ความเค้นเฉือน หรือความเค้นฟอนมิสเสส (von Mises stress) เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นภาพกราฟิกที่ทำให้มองเห็นลักษณะการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง รวมทั้งรูปแบบการกระจายความเค้นแบบต่างๆ โดยใช้แถบสีเป็นตัวกำหนดช่วงค่าความเค้นแสดงผล

การเก็บรวบรวมข้อมูล

บันทึกผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมได้แก่

1. ค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อพื้น วัสดุเสริมรากล่องรากฟัน และเตื่อยที่ใช้ในการบูรณะ
2. ภาพการฟิกแสดงรูปแบบการกระจายความเค้นดิ่งในเนื้อพื้น วัสดุเสริมรากล่องรากฟัน และเตื่อยที่ใช้ในการบูรณะ

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

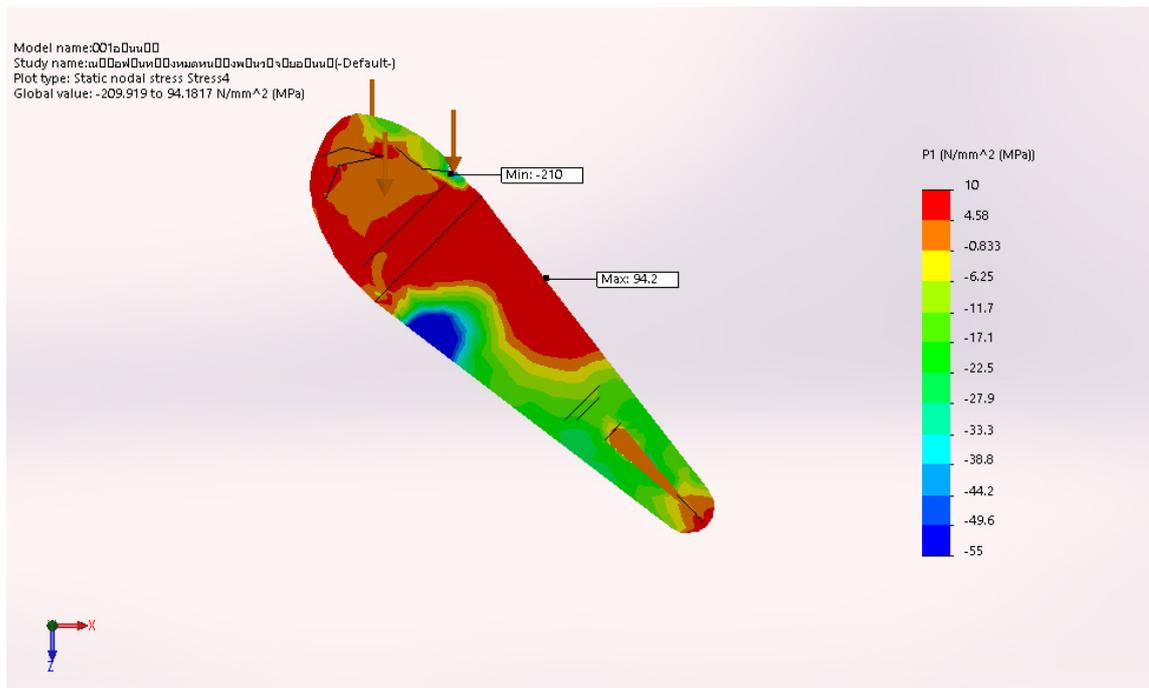
ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นด้วย โปรแกรม SolidWorks แสดงผลเป็นกราฟิกของการกระจายความเค้นด้วยสีที่แตกต่างกันเป็นตัวแทนค่าความเค้นตั้งโดยดูสัญลักษณ์แถบสีที่ระบุค่าทางด้านขวา ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่าความเค้นตั้ง จากค่ามากไปน้อยแทนด้วยสี แดง ส้ม เหลือง เขียว ฟ้า น้ำเงิน ตามลำดับ วัสดุที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ คือวัสดุที่อาจเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรง ได้แก่ ค่าความเค้นตั้งในเนื้อฟัน โดยได้ทำการใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน เพื่อดูการกระจายของ Stress เปรียบเทียบกับผลงานวิจัย และ ใส่แรงกระทำตามผลงานวิจัย คือ กลุ่มที่ 1 ใส่แรง 361.80 นิวตัน กลุ่มที่ 2 ใส่แรง 559.46 นิวตัน และกลุ่มที่ 3 ใส่แรง 468.48 นิวตัน เพื่อดูทิศทางการกระจายความเค้น

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวัสดุเปราะ เนื่องจากฟันเป็นวัสดุเปราะ วัสดุจะเกิดความเสียหาย เมื่อความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับ ความต้านแรงดึงของวัสดุนั้น (พิเชษฐ์ พิณีจ, 2558)

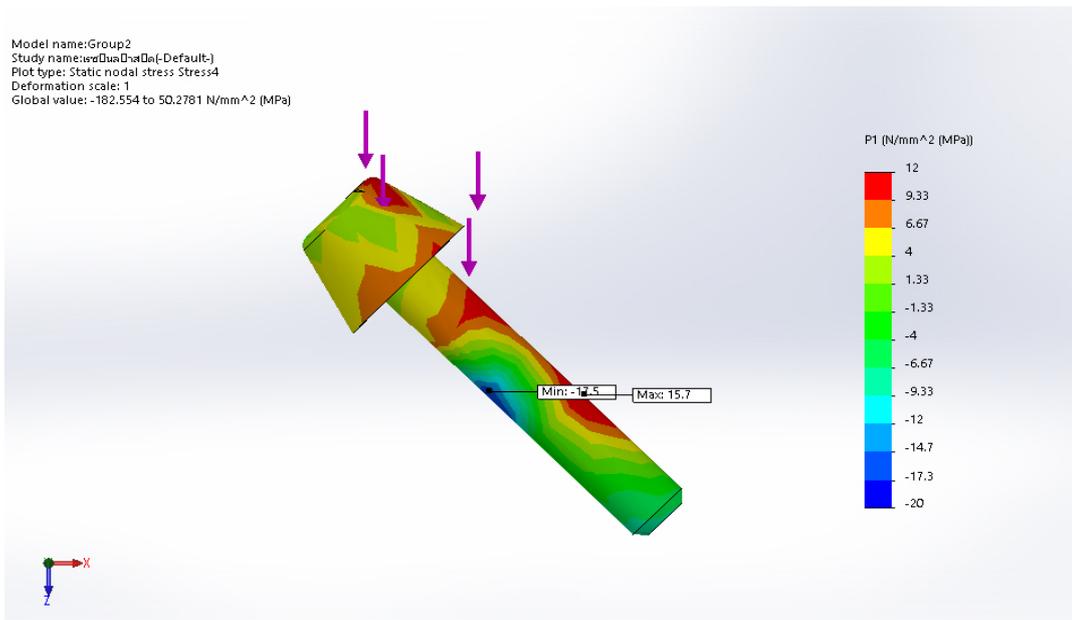
4.1 ผลการดำเนินงาน

4.1.1 ทดลองใส่แรงกระทำ 1000 นิวตัน

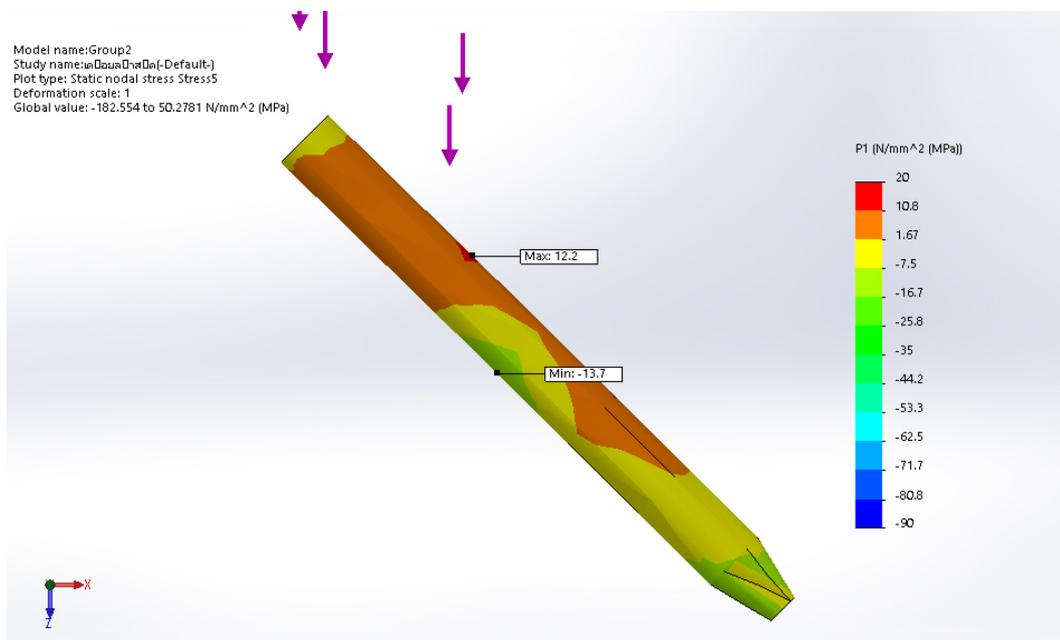
กลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 1
ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)

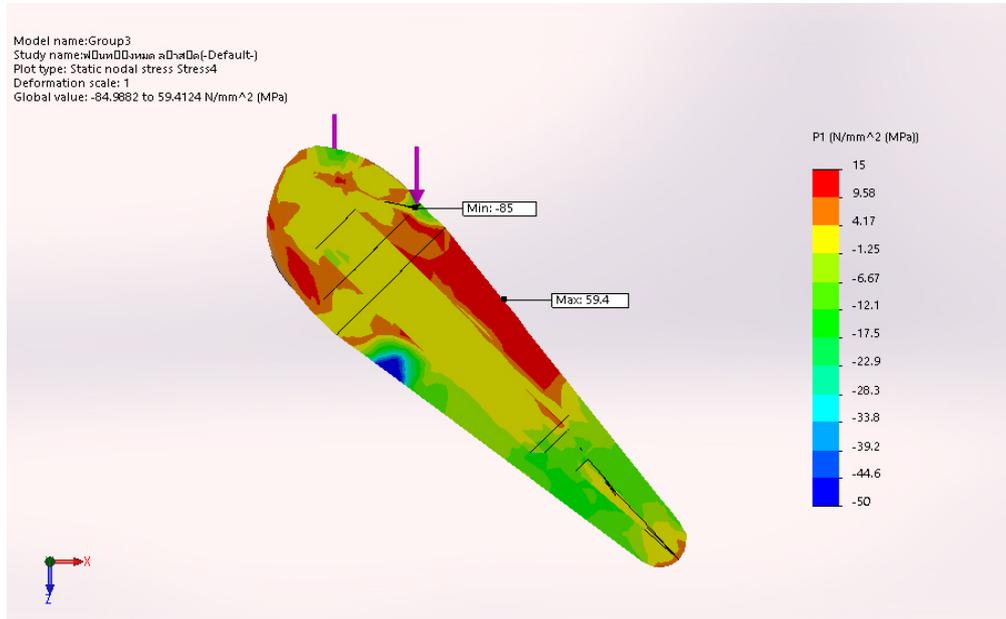


รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะชิ้นคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 2
 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)

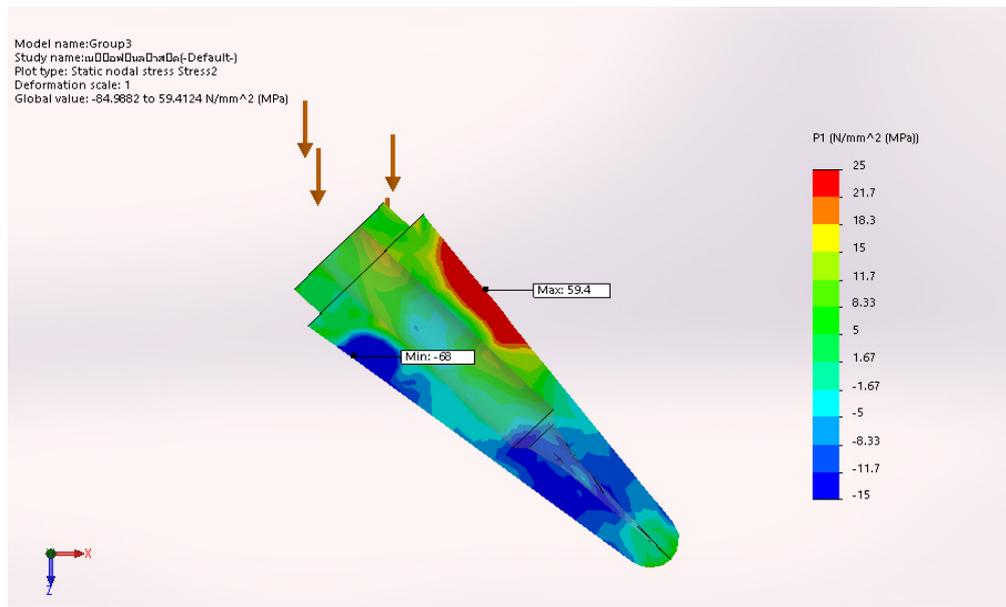


รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเดียว ของกลุ่มที่ 2
 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)

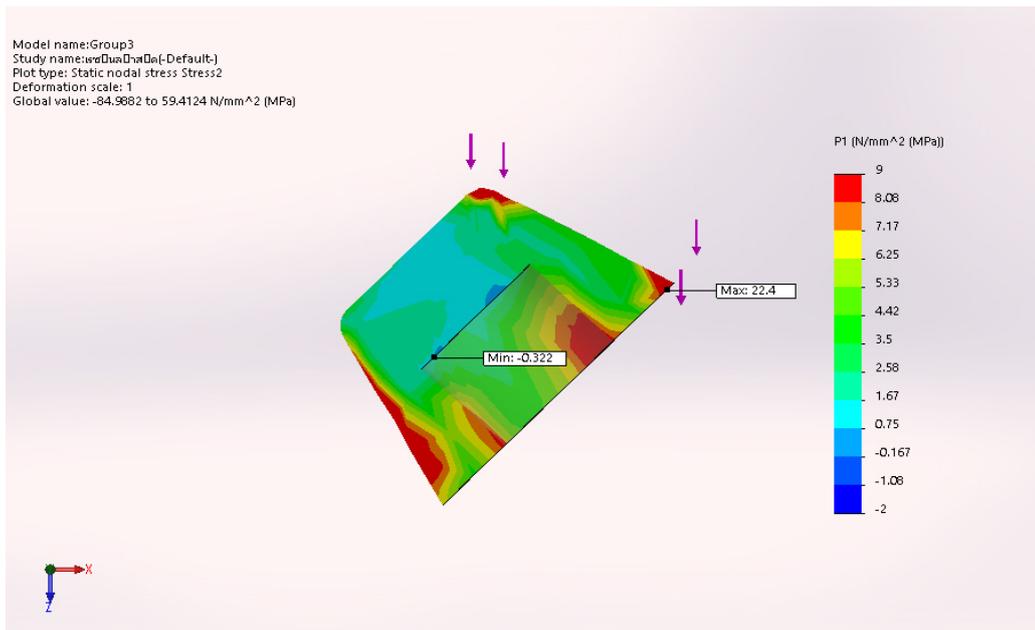
กลุ่มที่ 3



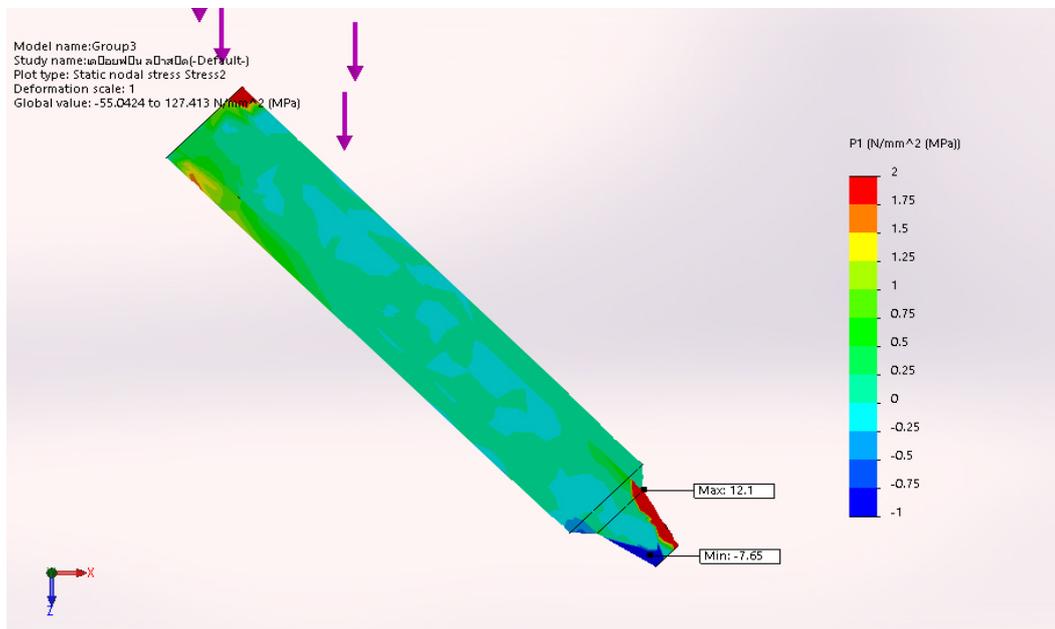
รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 3
ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)



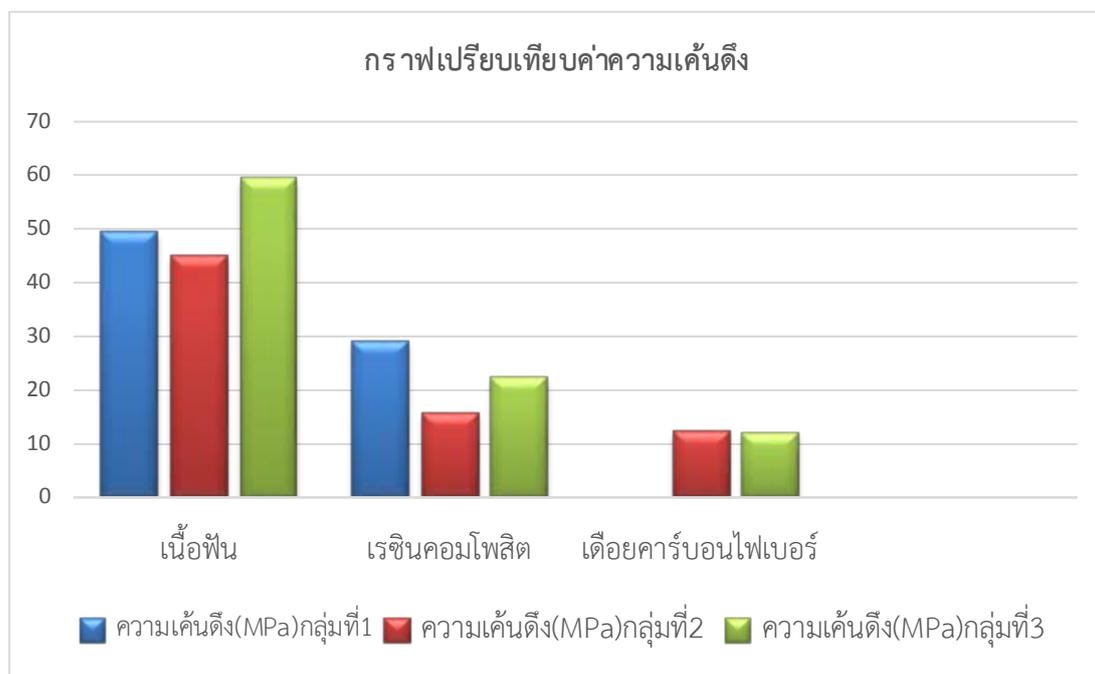
รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายความเค้นดึงของเนื้อพื้น ของกลุ่มที่ 3
ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายความเค้นดึงของเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 3
 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายความเค้นดึงของเดือยฟันไฟเบอร์เบอร์ 3 และเบอร์ 0
 ของกลุ่มที่ 3 ใส่แรงกระทำ 1,000 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงของเนื้อพื้นและวัสดุบูรณะ ด้วยแรง 1,000 นิวตัน

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่ง และค่าความเค้นสูงสุดในแบบจำลองฟันเมื่อใส่วัสดุแล้ว แรง 1,000 นิวตัน

แบบจำลอง/กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นดึงสูงสุด (Principle stress 1, P1)	
	แบบจำลองฟันเมื่อใส่วัสดุแล้ว	
	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง
กลุ่มที่ 1	94.2	ส่วนกลาง
กลุ่มที่ 2	50.3	ส่วนกลาง
กลุ่มที่ 3	59.4	ส่วนกลาง

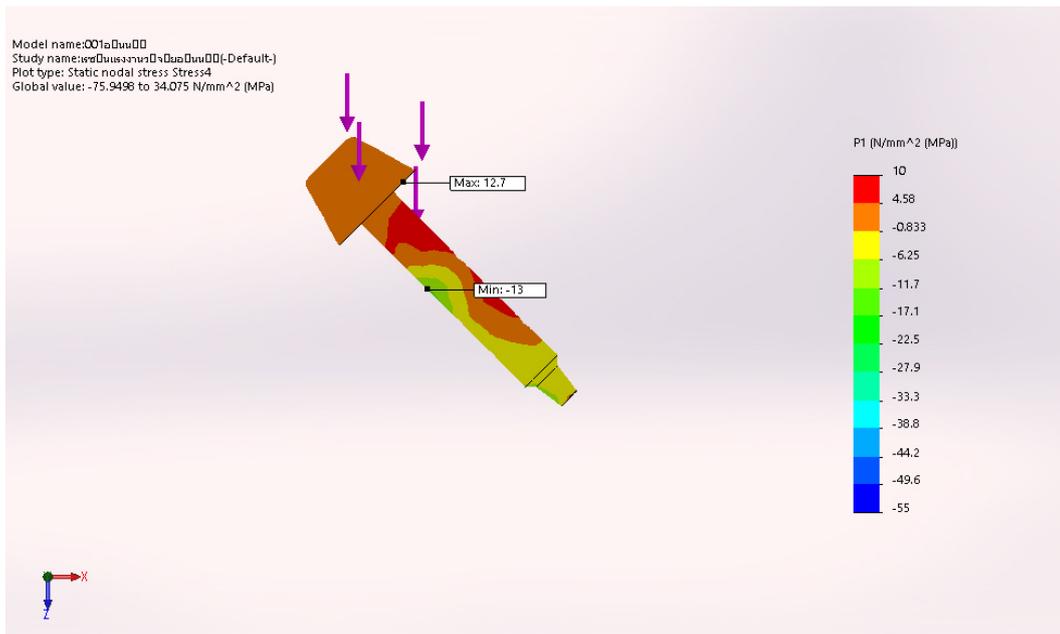
ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุดในแบบจำลองแต่ละกลุ่มด้วยแรง 1,000 นิวตัน

แบบจำลอง/ กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุด (Principle stress 1, P1)					
	เนื้อฟัน		เรซินคอมโพสิต		เดือย	
	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง
กลุ่มที่ 1	94.2	ส่วนกลาง	35.1	ส่วนต้น	-	-
กลุ่มที่ 2	45.1	ส่วนกลาง	15.7	ส่วนกลาง	12.2	ส่วนกลาง
กลุ่มที่ 3	59.4	ส่วนกลาง	22.4	ส่วนต้น	12.1	ส่วนปลาย

4.1.2 ทดลองใส่แรงกระทำตามผลงานวิจัยของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

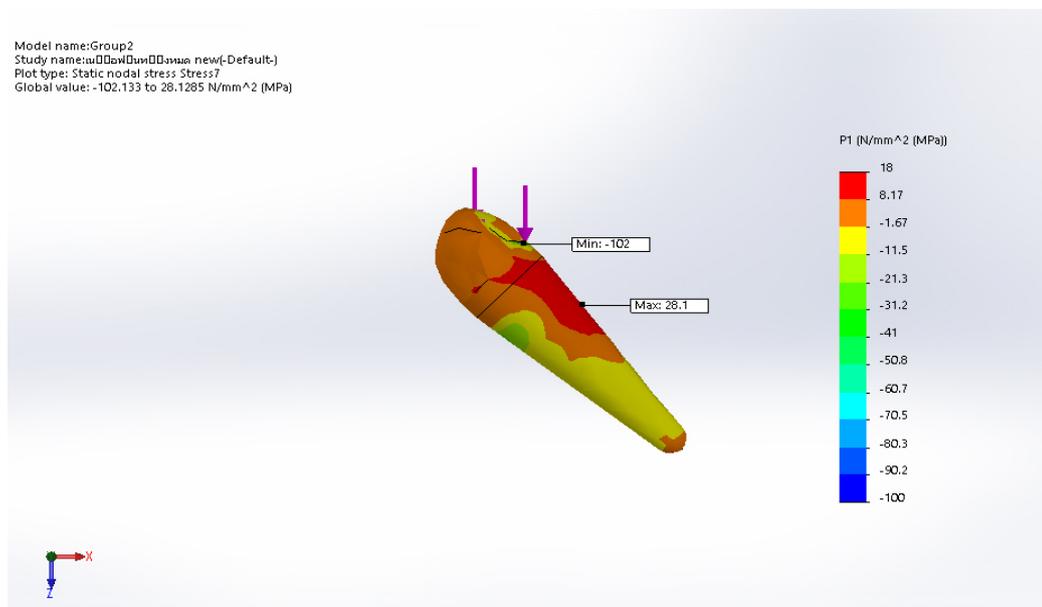
ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยโหดอัดสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละการทดลอง (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

Group	Average maximum compressive load (N)	Standard deviation
1	361.80	93.16
2	559.46	155.12
3	468.48	155.57

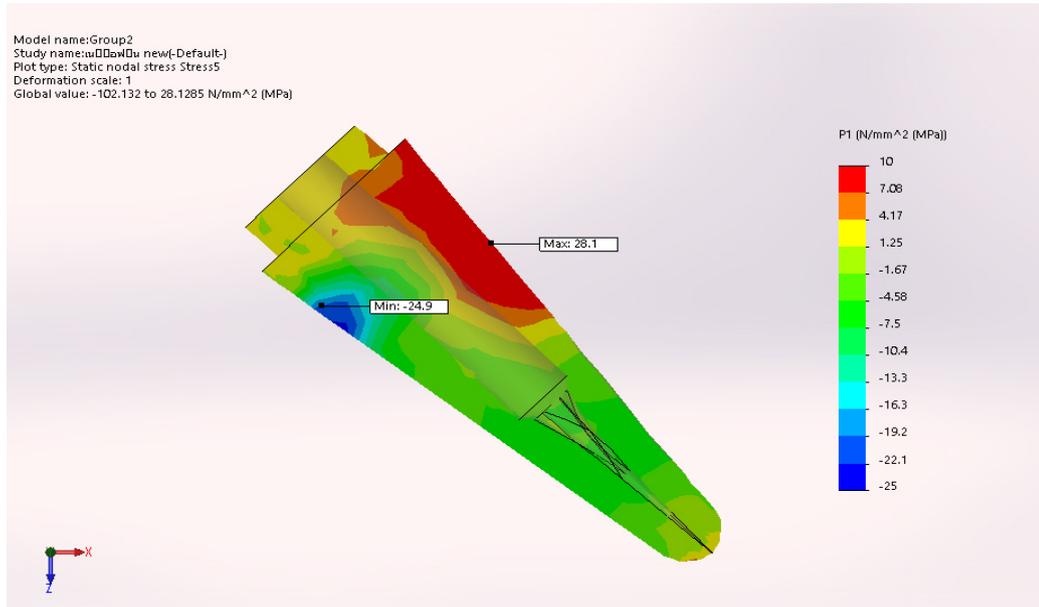


รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายความเค้นดึงเรซิน
 ด้วยแรงกระทำ 361.80 นิวตัน (Principal stress 1)

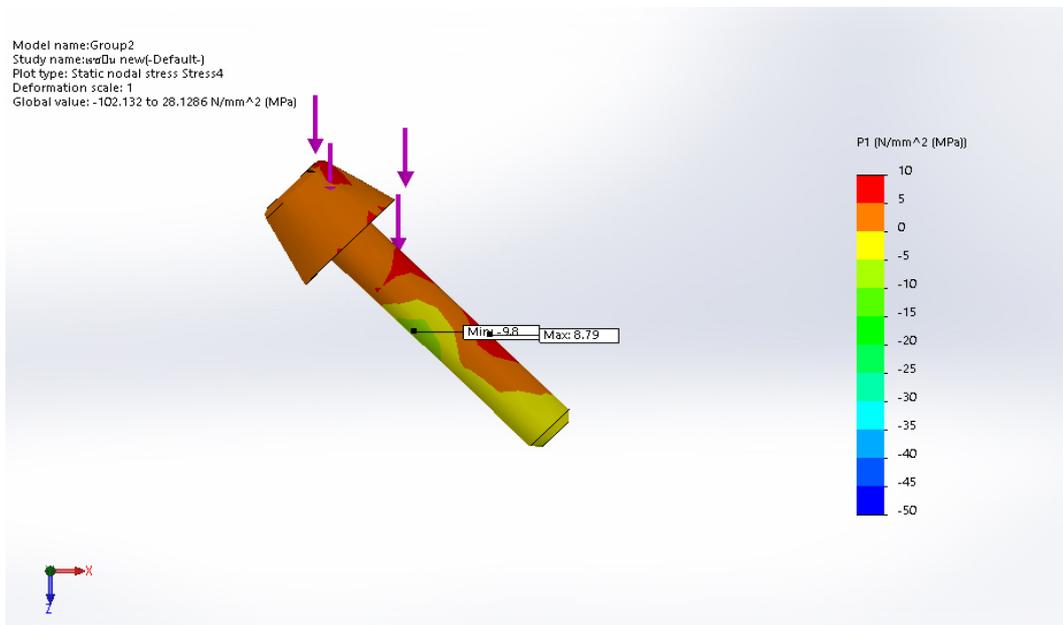
กลุ่มที่ 2



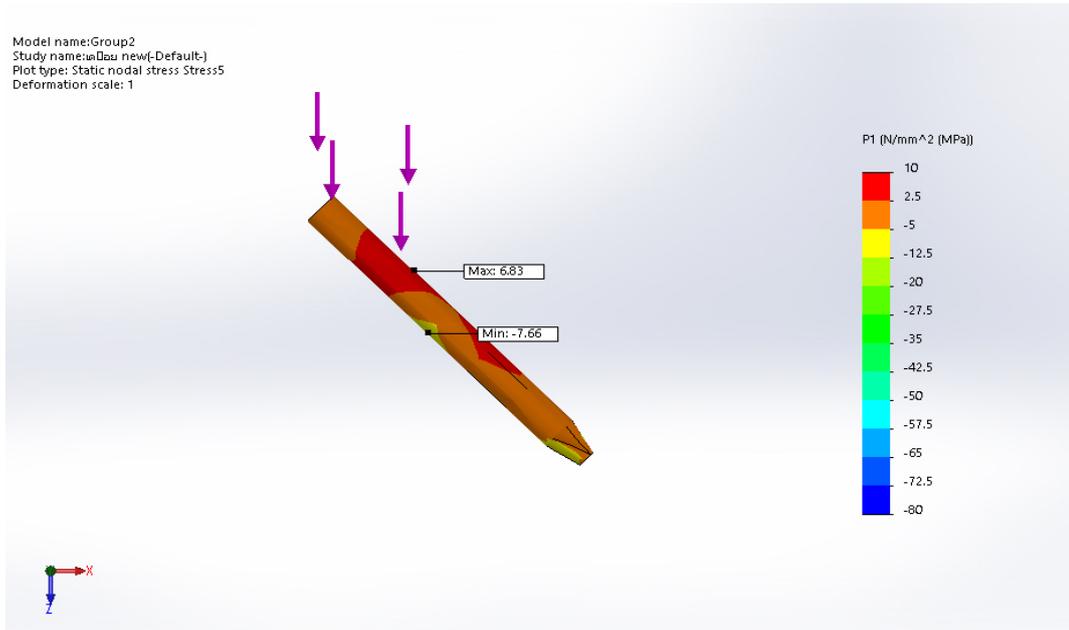
รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 2
 ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเนื้อพื้น ของกลุ่มที่ 2 ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)

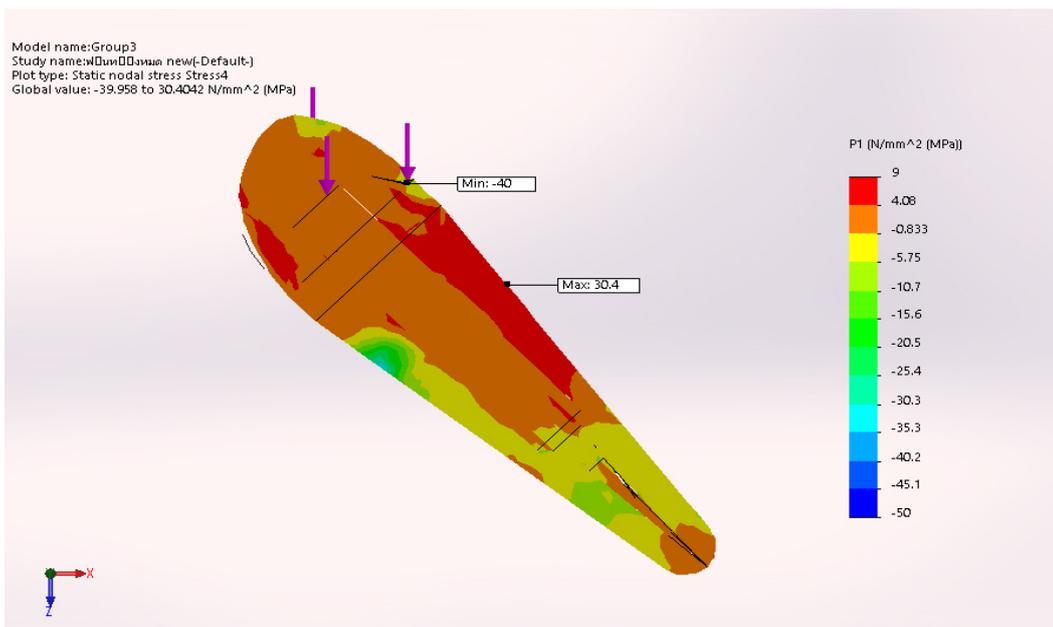


รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเรซินคอมโพสิต ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)

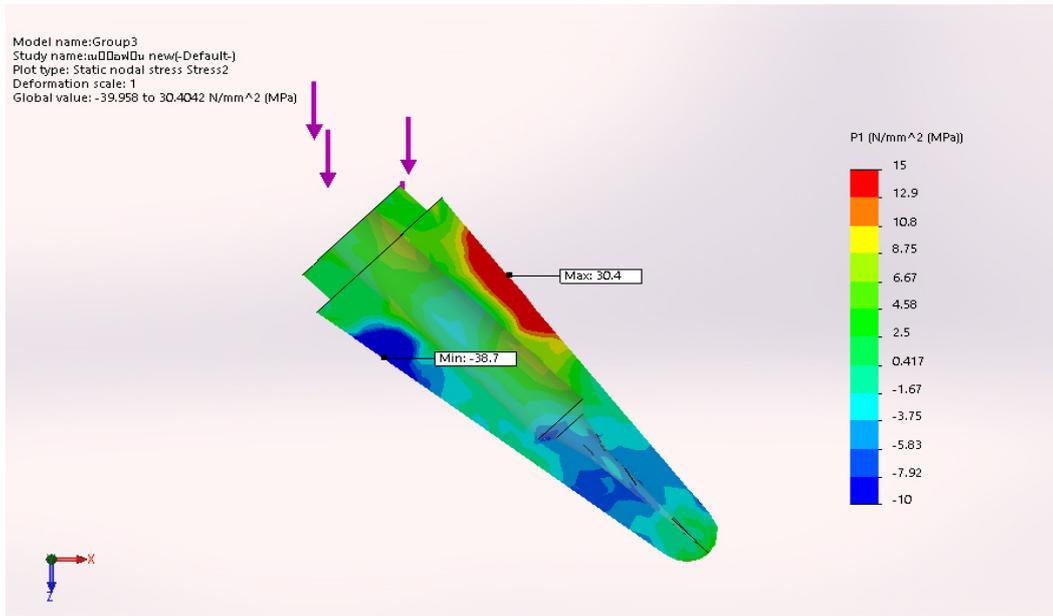


รูปที่ 4.19 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะतीयไฟเบอร์
ด้วยแรงกระทำ 559.46 นิวตัน (Principal stress 1)

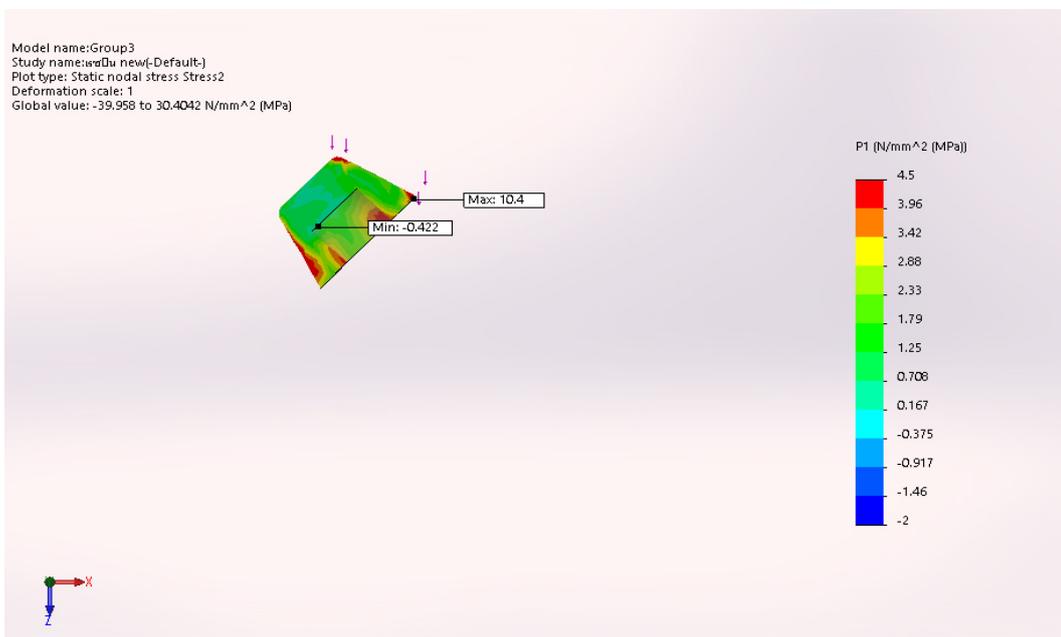
กลุ่มที่ 3



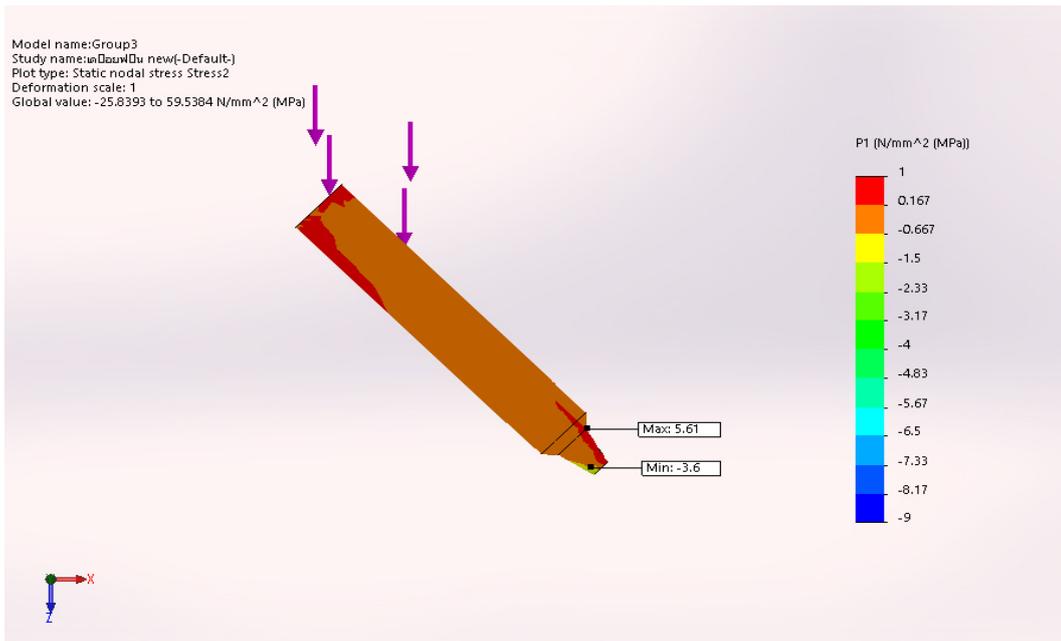
รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลอง ของกลุ่มที่ 3
ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเนื้อพื้น ของกลุ่มที่ 3
 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.22 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะเรซินคอมโพสิต ของกลุ่มที่ 3
 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.23 แสดงการกระจายความเค้นดึงเฉพาะतीयไฟเบอร์ ของกลุ่มที่ 3 ด้วยแรงกระทำ 468.48 นิวตัน (Principal stress 1)



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงของเนื้อฟันและวัสดุบูรณะ ด้วยแรงตามผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

ตารางที่ 4.3 แสดงตำแหน่ง และค่าความเค้นสูงสุดในรูปแบบจำลองพื้นเมื่อใส่วัสดุแล้ว ด้วยแรงกระทำตาม ผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

แบบจำลอง/กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุด (Principle stress 1, P1)	
	แบบจำลองพื้นเมื่อใส่วัสดุแล้ว	
	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง
กลุ่มที่ 1	34.1	ส่วนกลางเดียว
กลุ่มที่ 2	28.1	ส่วนกลางเดียว
กลุ่มที่ 3	30.4	ส่วนกลางเดียว

ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองแต่ละกลุ่ม ด้วยแรงกระทำตาม ผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

แบบจำลอง/ กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุด (Principle stress 1, P1)					
	เนื้อพื้น		เรซินคอมโพสิต		เดือย	
	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง
กลุ่มที่ 1	34.1	ส่วนกลาง	12.7	ส่วนต้น	-	-
กลุ่มที่ 2	28.1	ส่วนกลาง	8.79	ส่วนต้น	6.83	ส่วนกลาง
กลุ่มที่ 3	30.4	ส่วนกลาง	10.4	ส่วนต้น	5.61	ส่วนกลาง

ตารางที่ 4.5 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองฟินแต่ละกลุ่ม

Mesh type	Solid mesh
Mesher used	Standard mesh
Jacobian points	4 Points
Element size	3.33443 mm
Tolerance	0.166722 mm
Mesh quality	High

ตารางที่ 4.6 แสดงขนาด Element size และประเภท Mesh

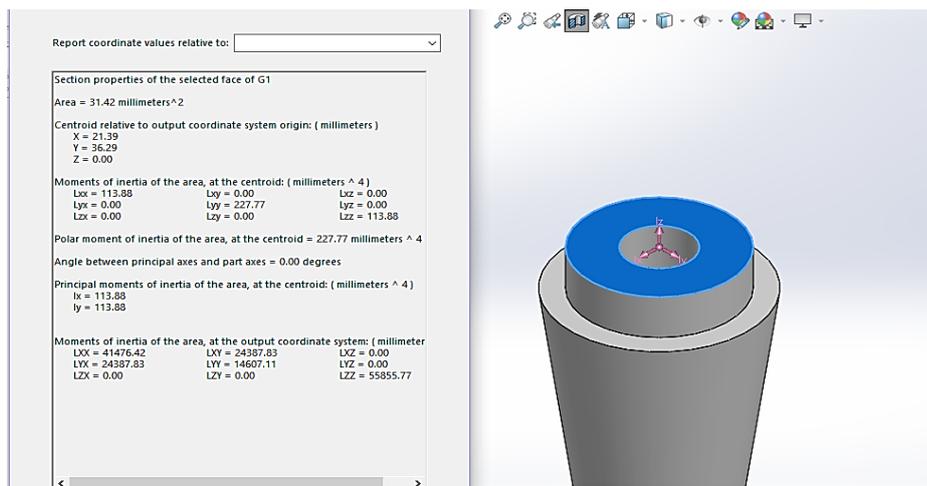
วิธีการบูรณะ	แบบจำลองฟินรวม	
	จำนวนจุดต่อ	จำนวนเอลิเมนต์
กลุ่มที่ 1 บูรณะด้วยเรซินคอมโพสิตก่อแกนฟัน	17,200	11,328
กลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเดือยฟันไฟเบอร์ 3 จำนวน 1 อัน ร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซิน คอมโพสิต	16,560	10,908
กลุ่มที่ 3 บูรณะด้วยเดือยฟัน ไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน ร่วมกับการก่อแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต	30,678	20,298

4.2 วิธี Mohr's circle หาค่า Max principal stress

วิธี Mohr's circle หาค่า Max principal stress ด้วยโปรแกรม TAA Mohr's circle 2D

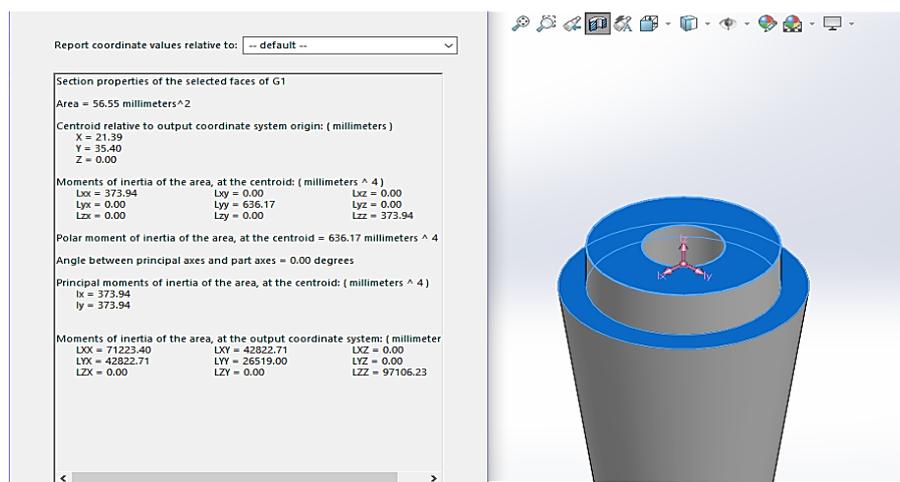
4.2.1 เลือกพื้นที่หน้าตัดแบบจำลองพื้นในโปรแกรมโซลิตเวิร์ค

พื้นที่หน้าตัด (Cross section) ของพื้น เลือกแบบที่ 1



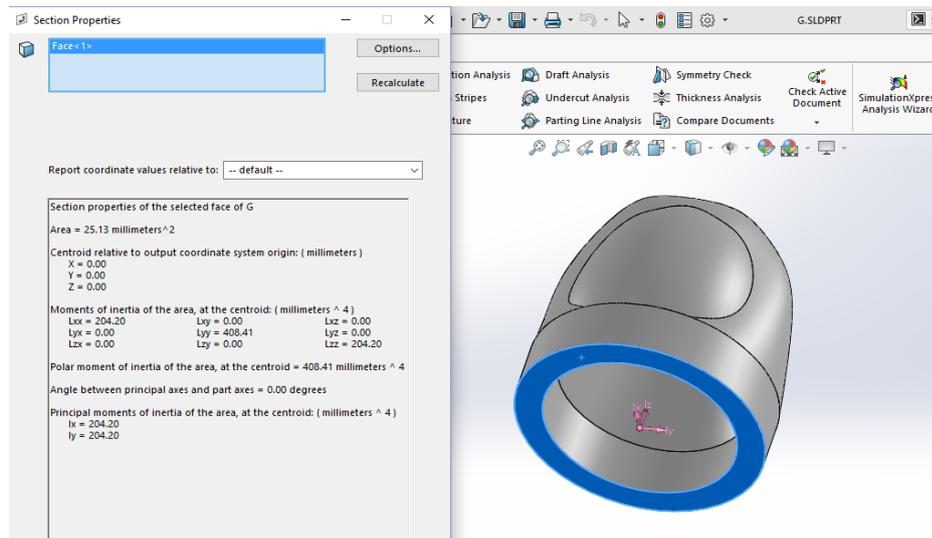
รูปที่ 4.25 พื้นที่หน้าตัด (Cross Section) มีค่า 31.42 ตารางมิลลิเมตร

เลือกพื้นที่หน้าตัด (Cross section) ของพื้นแบบที่ 2



รูปที่ 4.26 พื้นที่หน้าตัด (Cross section) มีค่า 56.55 ตารางมิลลิเมตร

พื้นที่หน้าตัด (Cross section) ของพื้น เลือกแบบที่ 3



รูปที่ 4.27 พื้นที่หน้าตัด (Cross section) มีค่า 25.13 ตารางมิลลิเมตร

4.2.2 วิธีการคำนวณ

จากการเลือกค่า (Area) ข้างต้น สรุปได้ดังนี้

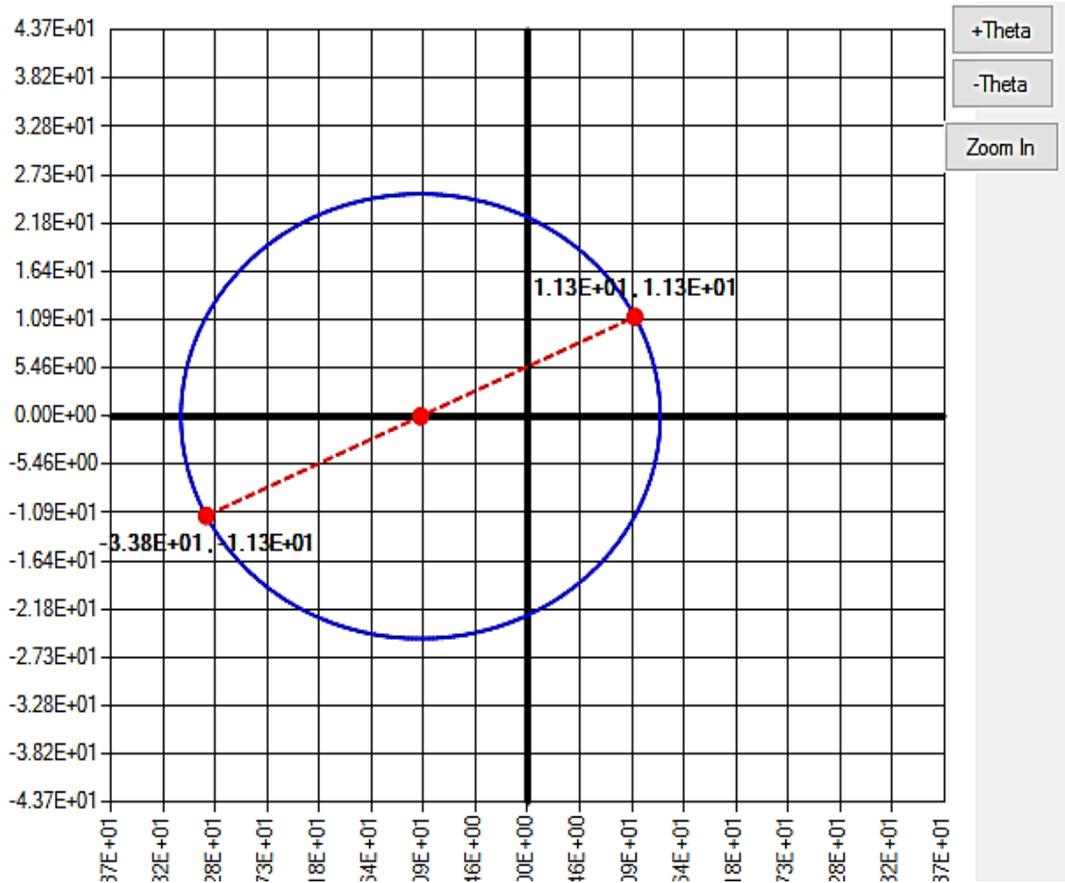
1. 31.42 ตารางมิลลิเมตร
2. 56.59 ตารางมิลลิเมตร
3. 25.13 ตารางมิลลิเมตร

โดยนำค่าพื้นที่หน้าตัด ทำการคำนวณวิธี Mohr's circle หาค่า Max principal stress

1. พื้นที่หน้าตัด 31.42 ตารางมิลลิเมตร

กำหนดให้แรง 1000 N ทาร (Area) จะได้ 31.83 MPa

ทำการแตกเข้าแกน XY, 31.83 Cos 45 , 31.83 Sin 45 จะได้ 22.5



รูปที่ 4.28 วงกลมมอร์ พื้นที่หน้าตัด 31.42 ตารางมิลลิเมตร

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัด 31.42 ตารางมิลลิเมตร มีค่า

Max principal = 13.9 MPa

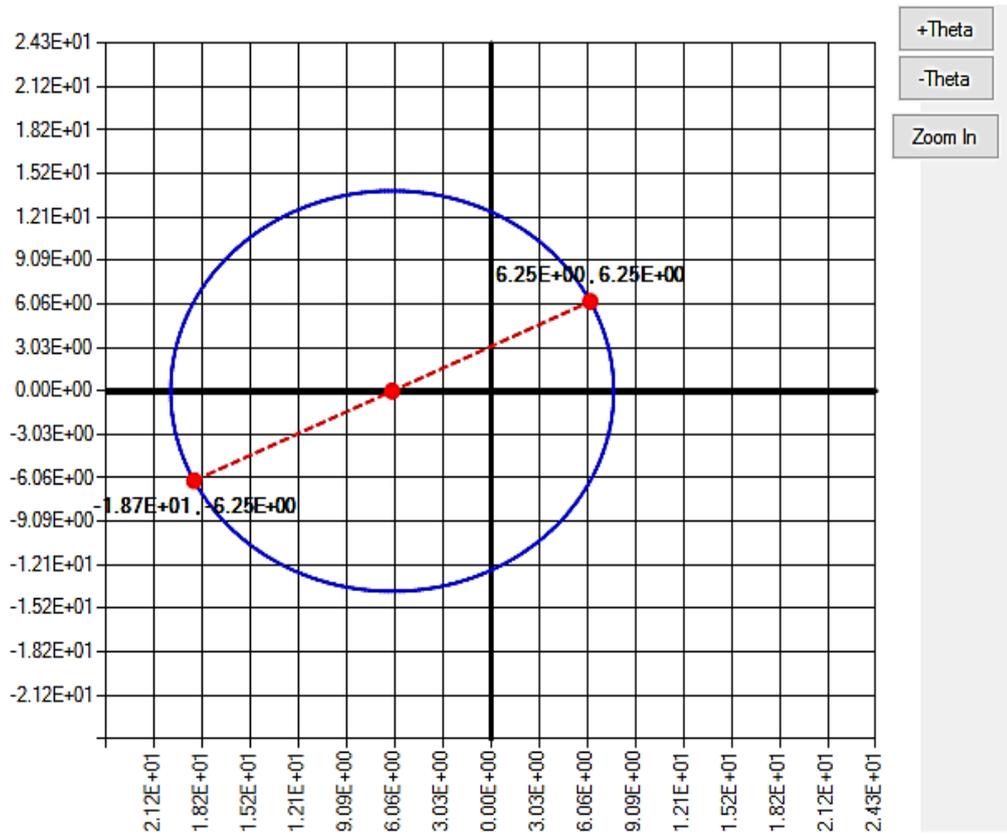
Min principal = -36.4 MPa

Max shear = 25.2 MPa

2. พื้นที่หน้าตัด 56.59 ตารางมิลลิเมตร

กำหนดให้แรง 1,000 N ทาร (Area) จะได้ 17.67 MPa

ทำการแตกเข้าแกน XY, $17.67 \cos 45$, $17.67 \sin 45$ จะได้ 12.49



รูปที่ 4.29 วงกลมมอร์ พื้นที่หน้าตัด 56.59 ตารางมิลลิเมตร

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัด 56.59 ตารางมิลลิเมตร มีค่า

Max principal = 7.72 MPa

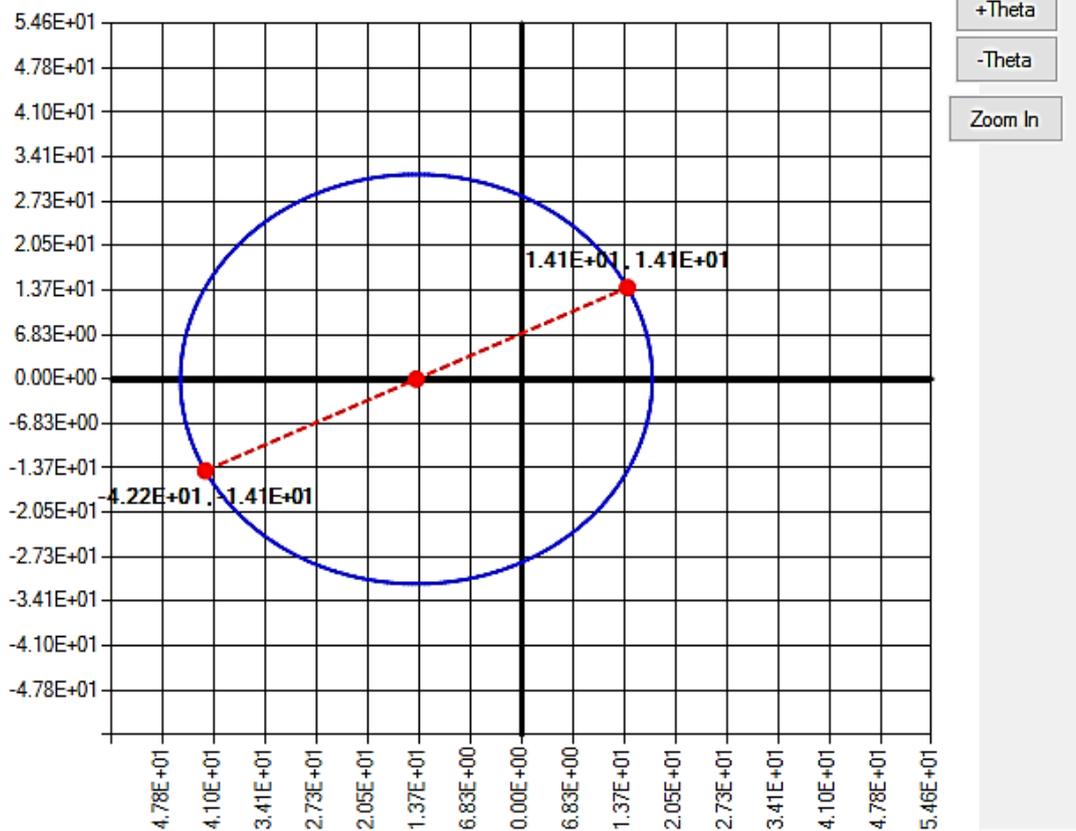
Min principal = -20.2 MPa

Max shear = 14.0 MPa

3. พื้นที่หน้าตัด 25.13 ตารางมิลลิเมตร

กำหนดให้แรง 1,000 N ทาร (Area) จะได้ 39.79 MPa

ทำการแตกเข้าแกน XY, $39.79 \cos 45$, $39.79 \sin 45$ จะได้ 28.14



รูปที่ 4.30 วงกลมเมอร์ พื้นที่หน้าตัด 56.59 ตารางมิลลิเมตร

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัด 25.13 ตารางมิลลิเมตร

Max principal = 17.4 MPa

Min principal = -45.5 MPa

Max shear = 31.5 MPa

ตารางที่ 4.7 สรุปค่า Max principle stress ด้วยแรง 1,000 N ของแต่ละพื้นที่หน้าตัด

Stress	Principle stress ด้วยแรง 1,000 N ของแต่ละพื้นที่หน้าตัด			
	เนื้อฟัน (คำนวณมือ) Area 31.42	เนื้อฟัน (คำนวณมือ) Area 56.59	เนื้อฟัน (คำนวณมือ) Area 25.3	ค่าเฉลี่ย (MPa)
Max prin.	13.9	7.72	17.4	13.01
Min prin.	-36.4	-20.2	-45.5	34.03
Max shear	25.2	14	31.5	23.57

4.3 ตรวจสอบค่า (Factor of safety) ด้วยโปรแกรมโซลิตเวิร์ค

Tooth structure	Mean (SD)
Superficial dentin	61.6 (16.3) ^a
Middle dentin	48.7 (16.7) ^b
Deep dentin	33.9 (8.0) ^c
Dentin-enamel junction	46.9 (13.7) ^b
Parallel enamel	42.2 (12.0) ^b
Transversal enamel	11.5 (4.7) ^d

Means indicated by different letters are significantly different at $p < 0.05$; $N = 20$ per group.

รูปที่ 4.31 กำหนดค่า Ultimate tensile strength ของเนื้อฟัน (Deep dentin = 33.9 MPa)

(ที่มา : Dental Material. (2004). Ultimate tensile strength of tooth Retrieved

January 2 2007, from Ultimate tensile strength of tooth structures structures :

https://www.researchgate.net/publication/5332618_Ultimate_tensile_strength_of_tooth_structures)

Table 2: Means and standard deviations of compressive strength (CS), diametral tensile strength (DTS), flexural strength (FS), flexural modulus (FM), wear volume (WV) and polymerization shrinkage (PS) of the tested resin composites.

	CS (MPa)	DTS (MPa)	FS (MPa)	FM (GPa)	WV ($\times 10^3$ mm ³)	1 Hour	PS (vol%) 24 Hours	48 Hours
Estelite Σ	297 (35) ^a	47 (3) ^a	112 (14) ^a	7.0 (0.2)	3.7 (2.5) ^a	1.65 (0.27)	2.16 (0.23) ^a	2.17 (0.28)
Filtek Supreme	262 (20) ^c	54 (4) ^f	140 (13) ^y	11.1 (0.5)	5.4 (2.1) ^a	1.68 (0.25)	2.26 (0.23) ^a	2.27 (0.22)
Heliomolar	252 (41) ^c	35 (6) ^y	101 (9) ^y	5.9 (0.2)	8.6 (3.7) ^a	1.96 (0.11)	2.54 (0.18)	2.52 (0.19)
Renamel Microfill	298 (15) ^a	38 (8) ^z	73 (6)	4.8 (0.1)	6.2 (3.4) ^{ab}	3.24 (0.14)	3.97 (0.10)	3.96 (0.15)
Esthet X	263 (25) ^c	46 (9) ^{yz}	125 (12) ^x	8.9 (0.1)	6.5 (3.6) ^{ab}	2.60 (0.22)	3.09 (0.23) ^a	3.10 (0.25)
Tetric Ceram	263 (7) ^c	49 (3) ^{za}	134 (9) ^x	9.2 (0.3)	4.1 (2.7) ^a	2.56 (0.23)	3.28 (0.09) ^a	3.26 (0.16)

Means with same superscript letters were not statistically different at the 0.05 level of significance. (n=5, except n=8 for WV).

รูปที่ 4.32 กำหนดค่า Ultimate tensile strength ของเรซินคอมโพสิต (ใช้ค่า DTS 47 MPa) (ที่มา : Lee YK, Lu H, Oguri M & Powers JM. (2006). Retrieved January 2 2007, from Properties of a Dental Resin Composite with a Spherical Inorganic Filler : <http://www.jopdentonline.org/doi/pdf/10.2341/05-154?code=opdt-site>)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเดือย 3 ชนิด⁷⁰

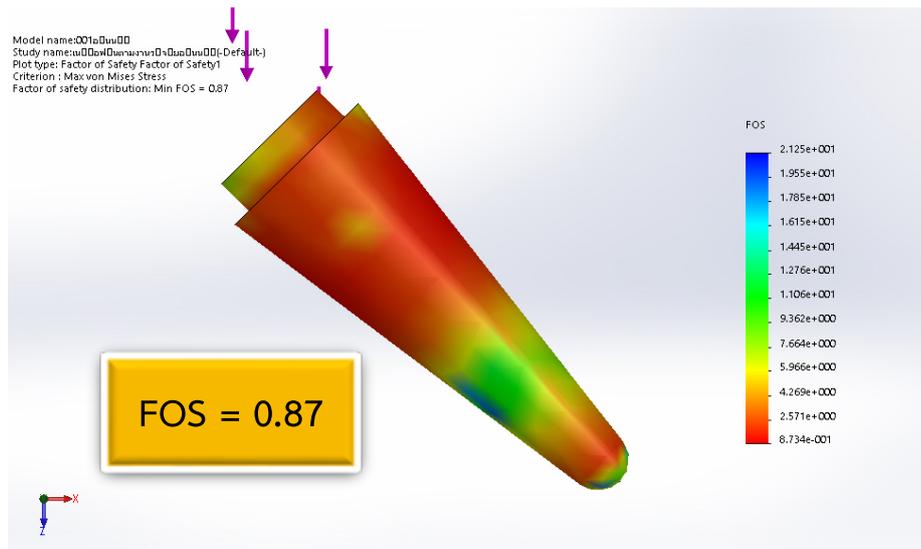
เดือย	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความแข็งแรงต่อความล้า (MPa)
เดือยเส้นใยคาร์บอน	1,600	1,440
เดือยไททาเนียม	1,000	500
เดือยโลหะผสมไททาเนียม	1,400	700

รูปที่ 4.33 Ultimate tensile strength ของเดือยเส้นใยคาร์บอน (ที่มา : ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล. (2545). ผลของการบурณะด้วยเดือยและผลของแกนต่างๆ ต่อการกระจายความเค้น. สืบค้นเมื่อ 3 มกราคม 2560, จาก http://www.tnrr.in.th/2558/?page=result_search&record_id=270351)

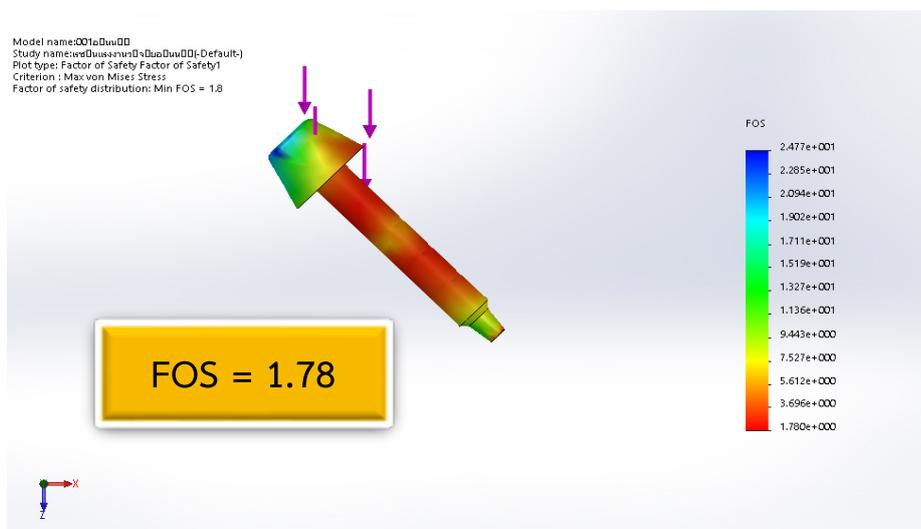
ผลการทดลอง

หาค่า Factor of safety ของเนื้อฟัน เดือยฟัน เรซินคอมโพสิต ของฟันทั้ง 3 กลุ่ม เพื่อตรวจสอบความเสียหายในเนื้อฟัน หากมีค่าน้อยกว่า 1 หรือ ประมาณ 1 แสดงว่ามีโอกาสแตกหัก

กลุ่มที่ 1

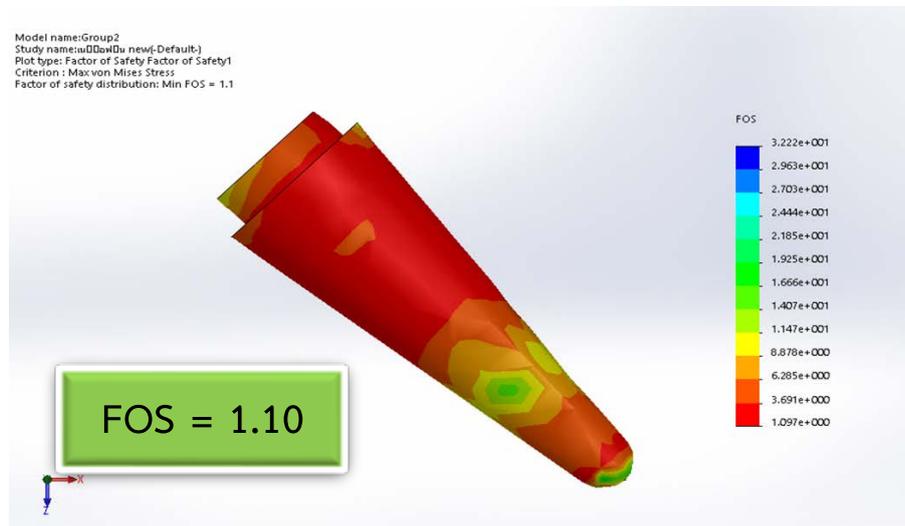


รูปที่ 4.34 Factor of safety ของเนื้อฟัน กลุ่มที่ 1

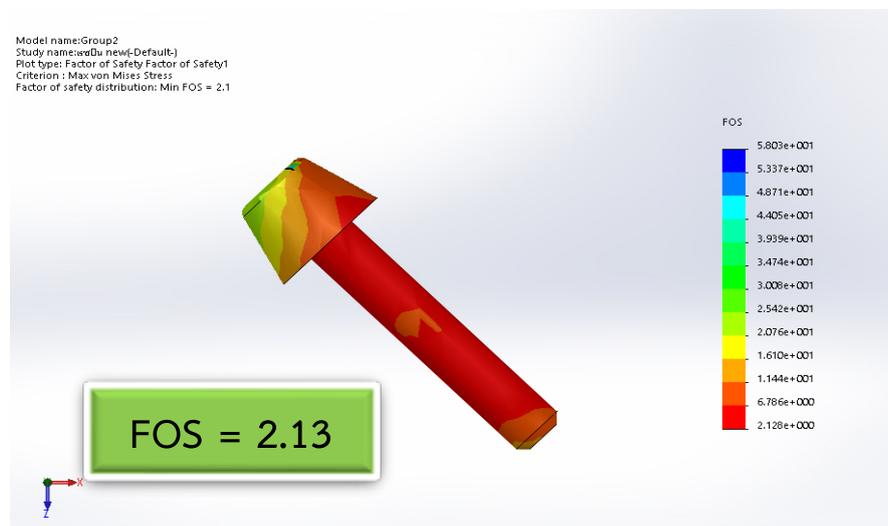


รูปที่ 4.35 Factor of safety ของเรซินคอมโพสิต กลุ่มที่ 1

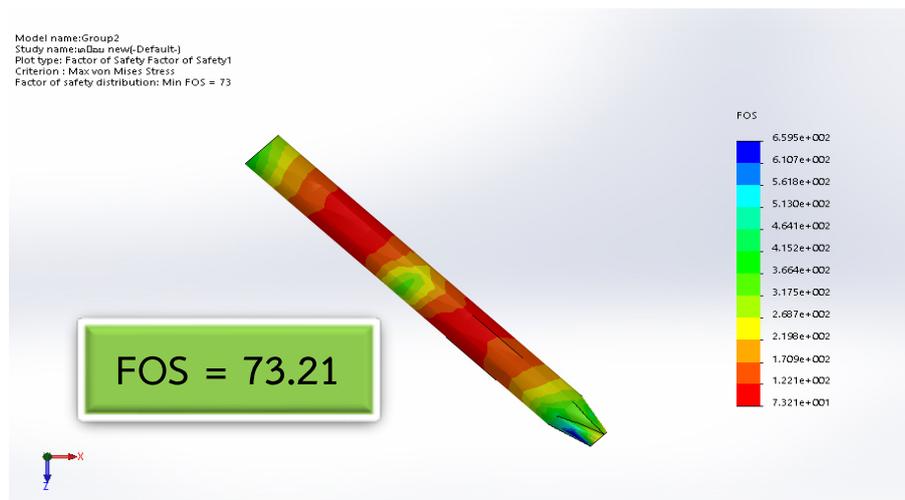
กลุ่มที่ 2



รูปที่ 4.36 Factor of safety ของเนื้อพื้ กลุ่มที่ 2

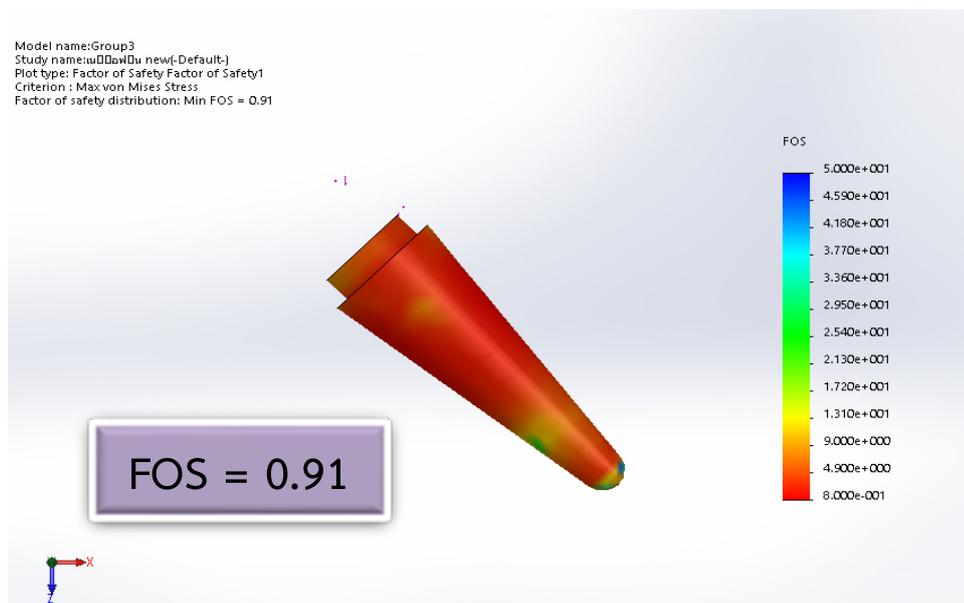


รูปที่ 4.37 Factor of safety ของเรซินคอมโพสิต กลุ่มที่ 2

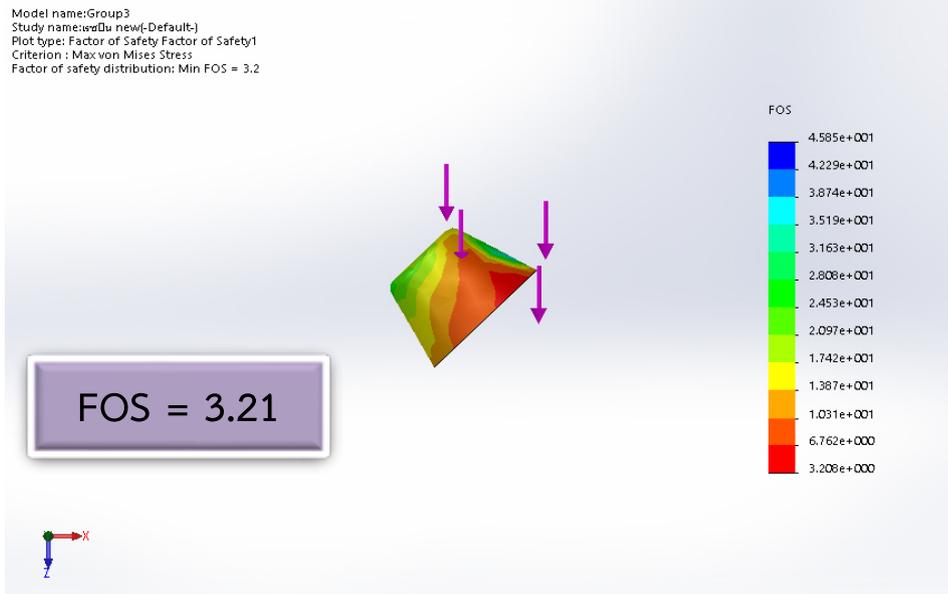


รูปที่ 4.38 Factor of safety ของเดือยฟันไฟเบอร์ กลุ่มที่ 2

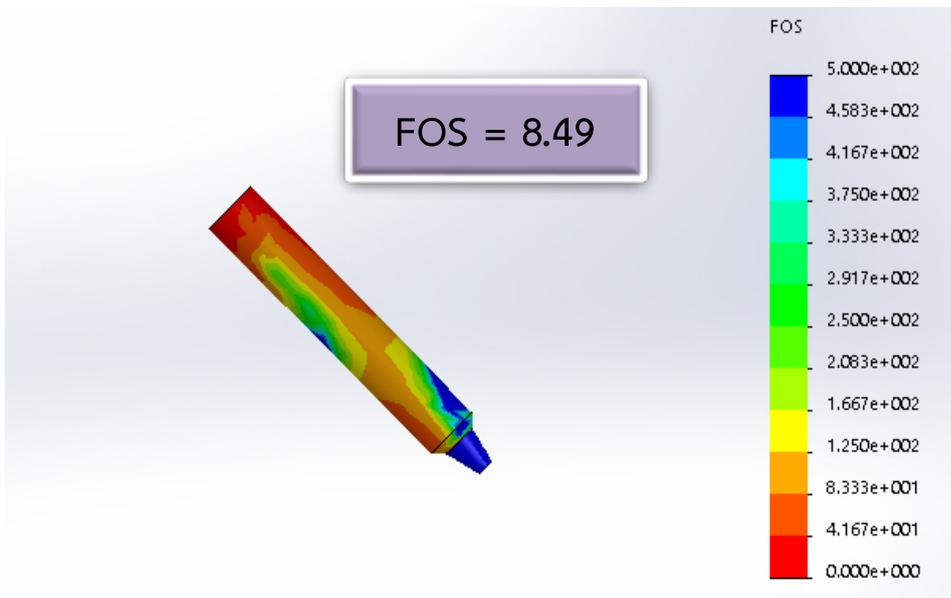
กลุ่มที่ 3



รูปที่ 4.39 Factor of safety ของเนื้อฟัน กลุ่มที่ 3



รูปที่ 4.40 Factor of safety ของเรซินคอมโพสิต กลุ่มที่ 3



รูปที่ 4.41 Factor of safety ของเดือยฟันไฟเบอร์ กลุ่มที่ 3

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า Factor of safety ของพื้นที่ 3 กลุ่ม

	เนื้อหิน	เรซินคอมโพสิต	เดือยไฟเบอร์
กลุ่มที่ 1	0.87	1.78	-
กลุ่มที่ 2	1.10	2.13	73.21
กลุ่มที่ 3	0.91	3.21	8.49

สรุปผลของค่า Factor of safety, (FOS)

การตรวจสอบค่า FOS จะเน้น แค่เนื้อหิน เรซินคอมโพสิต และเดือยไฟเบอร์ จึงได้ทำการเปรียบเทียบสองกลุ่มเท่านั้น คือกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 พบว่า

เมื่อพิจารณากลุ่มที่ 1 มีค่า FOS ของเนื้อหิน = 0.87, เรซินคอมโพสิต = 1.78 ค่าของเนื้อหินค่า FOS ต่ำกว่า 1 แสดงว่าเกิดการวิบัติที่เนื้อหินจริง ซึ่งวัสดุบูรณะอื่นๆค่ามากกว่า 1 แสดงว่าไม่เกิดการวิบัติ

เมื่อพิจารณากลุ่มที่ 2 มีค่า FOS ของเนื้อหิน = 1.01, เรซินคอมโพสิต = 2.13 เดือยไฟเบอร์ = 73.21 จะเห็นได้ว่า เนื้อหินมีค่าประมาณ 1 ซึ่งอาจจะทำนายได้ว่า จะเกิดความเสียหายลดลงมากกว่ากลุ่มที่ 1 เพราะมีการใส่เดือยไฟเบอร์ ซึ่งวัสดุบูรณะอื่นๆค่ามากกว่า 1 แสดงว่าไม่เกิดการวิบัติ

เมื่อพิจารณากลุ่มที่ 3 มีค่า FOS ของเนื้อหิน = 0.91, เรซินคอมโพสิต = 3.21 เดือยไฟเบอร์ = 8.94 จะเห็นได้ว่า เนื้อหินมีค่าประมาณค่า FOS ต่ำกว่า 1 การวิบัติอาจเกิดขึ้นบริเวณเนื้อหิน

4.4 ตรวจสอบค่า Factor of safety ด้วยการคำนวณมือ

เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทำได้เพียงแค่คำนวณด้วยเครื่องคิดเลข สามารถตรวจสอบเองได้โดยการนำค่า Maximum principal stress ของเนื้อหินและวัสดุบูรณะหารค่า Ultimate strength ของแต่วัสดุ ผลที่ได้เมื่อเกิดการวิบัติจะมีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 1 ดังสมการ

$$FOS = \sigma_{\text{limit}} / \sigma_1 \quad (5.1)$$

จากตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุดในแบบจำลองแต่ละกลุ่ม ด้วยแรงกระทำตามผลงานวิจัย

แบบจำลอง/ กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุด (Principle stress 1, P1)					
	เนื้อพื้น		เรซินคอมโพสิต		เดือย	
	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง
กลุ่มที่ 1	34.1	ส่วนกลาง	12.7	ส่วนต้น	-	-
กลุ่มที่ 2	28.1	ส่วนกลาง	8.79	ส่วนต้น	6.83	ส่วนกลาง
กลุ่มที่ 3	30.4	ส่วนกลาง	10.4	ส่วนต้น	5.61	ส่วนกลาง

ตารางที่ 4.9 ตรวจสอบค่า Factor of safety ของพื้นและวัสดุบูรณะ ด้วยการคำนวณมือ

แบบจำลอง/ กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุด (Principle stress 1, P1)					
	เนื้อพื้น		เรซินคอมโพสิต		เดือย	
	ความเค้น (MPa)	FOS	ความเค้น (MPa)	FOS	ความเค้น (MPa)	FOS
กลุ่มที่ 1	34.1	0.99	12.7	3.70	-	-
กลุ่มที่ 2	28.1	1.21	8.79	5.35	6.83	234.26
กลุ่มที่ 3	30.4	1.12	10.4	4.52	5.61	285.20

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า Factor of safety ของพื้นที่คำนวณด้วยโปรแกรมกับการคำนวณมือ

แบบจำลอง/ กลุ่ม	ตำแหน่งและค่าความเค้นดึงสูงสุด (Principle stress 1, P1)					
	เนื้อพื้น		เรซินคอมโพสิต		เดือย	
	FOS ด้วย โปรแกรม	FOS คำนวณมือ	FOS ด้วย โปรแกรม	FOS คำนวณมือ	FOS ด้วย โปรแกรม	FOS คำนวณมือ
กลุ่มที่ 1	0.87	0.99	1.78	3.70	-	-
กลุ่มที่ 2	1.10	1.21	2.13	5.35	73.21	234.26
กลุ่มที่ 3	0.91	1.12	3.21	4.52	8.49	285.20

สรุปผลค่า Factor of safety ด้วยโปรแกรมกับการคำนวณด้วยมือ

จากผลของการคำนวณค่า Factor of safety ของเนื้อพื้นและเรซินคอมโพสิต ด้วยโปรแกรม และการคำนวณมือ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ผลของเดือยจะมีความต่างกันมาก ทั้งนี้การที่ตรวจสอบหาค่า Factor of safety ด้วยโปรแกรมกับการคำนวณด้วยมือ ถึงแม้ตัวเลขจะได้ค่าไม่ตรงกัน แต่ก็ได้ผลที่ตรงกัน คือ เนื้อพื้นมีค่าประมาณ 1 เรซินคอมโพสิตมีค่ามากกว่า 1 และ เดือยไฟเบอร์มีค่าสูงมาก ทำให้สรุปได้ว่าการวิบัติเกิดขึ้นที่เนื้อพื้นจริง

บทที่ 5

การอภิปรายผลการวิจัย

5.1 การอภิปรายผลการวิจัย

การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราเสี่ยงต่อความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นความเสี่ยงต่อการแตกหักในส่วนประกอบที่สำคัญในการบูรณะได้แก่ เนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย โดยใช้เกณฑ์การแตกหักตามความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) พิจารณาสำหรับวัสดุเปราะ ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรก่อนเกิดความเสียหายสุดท้ายน้อยมาก จึงมีความเค้นครากและความเค้นดึงสูงสุดมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นความเค้นดึงสูงสุดจึงถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับความเค้นตั้งฉากสูงสุด (Maximum normal stress) ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อความเค้นตั้งฉากสูงสุดที่เกิดขึ้นในงานมีขนาดสูงสุดหรือเท่ากับความเค้นดึงสูงสุดของวัสดุนั้น แต่ในการศึกษานี้ ได้ใช้ค่าของ P1-principle stress เกิดจากการรวม Stress tension/ Compression และ Shear โดยอาจใช้ Mohr's circle แล้วดูว่าในระนาบที่ Normal stress ที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นโดย shear เป็น 0 เป็นเท่าไร และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ Yield strength จะทำนายได้ว่าจะเกิดการเสียหายหรือไม่ จะแม่นยำเมื่อใช้กับวัสดุเปราะ (Brittle) หมายถึง ไม่มีการยืดตัว เสียหายทันที

เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายความเค้นดึงเมื่อใส่แรงไป 1,000 นิวตัน เพื่อที่จะดูพฤติกรรมการแตกหักของฟันของทั้ง 3 กลุ่ม ทำการเปรียบเทียบการแตกหักกับผลงานวิจัยของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) จะเห็นว่ากลุ่มที่ 2 มีการแตกหักช้าที่สุด และ กลุ่มที่ 1 และ 3 ตามลำดับซึ่งตรงกับการทำแบบจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ กลุ่มที่ 2 มี ค่าความเค้นดึงของเนื้อฟันน้อยที่สุดที่ 45.1 MPa กลุ่มที่ 3 มีค่าความเค้นดึงที่ 59.4 MPa และกลุ่มที่ 1 MPa มีค่าความเค้นดึงมากที่สุดที่ 92.4 MPa เท่ากับว่ากลุ่มที่ 1 มีความเสียหายมากที่สุด

เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายความเค้นดึงเมื่อใส่แรงตามผลงานวิจัย เพื่อที่จะดูทิศทางการกระจายความเค้นดึงของเนื้อฟันและวัสดุบูรณะฟันได้อย่างแม่นยำ ของทั้ง 3 กลุ่ม ทำการเปรียบเทียบการแตกหักกับผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558)

การกระจายความเค้นดึงในเดือยของแต่ละแบบจำลองกลุ่มที่ 2 และ กลุ่มที่ 3 พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ มีความเค้นดึงมากที่บริเวณปลายเดือย การกระจายความเค้นดึงในวัสดุเสริมคลองรากฟันของฟันแต่ละกลุ่มจำลองพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ มีความเค้นดึงมากส่วนต้นและกลาง และรูปแบบการกระจายความเค้นดึงในเนื้อฟันเมื่อบูรณะด้วยต่างๆ คือ กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีความเค้นมากที่สุดที่ผิวรากฟันกลาง เมื่อพิจารณาค่าความเค้นกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันเพราะ

แบบจำลองได้ใช้เตื่อยไฟเบอร์ ซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำและใกล้เคียงกับค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน ซึ่งกลุ่มที่ 2 มีความเค้นดิ่งน้อยที่สุดในสามกลุ่ม แสดงว่าเสียหายช้าหรือมีความแข็งแรงมากที่สุด และ กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 1 ตามลำดับ

การเสริมผนังคลองรากฟันถึงแม้ช่วยลดความเค้นสูงสุดในรากฟัน แต่ก็จะทำให้ความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นของทั้งสองบริเวณ จากผลการทดลองมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นที่รากฟันส่วนต้น แต่ก็ยังมีค่าความเค้นน้อยกว่าบริเวณส่วนกลางของฟัน กล่าวคือรากฟันส่วนกลางมีความเค้นสูงสุด จึงทำให้ในการเสริมวัสดุที่มีการยึดติดกับเนื้อฟันจะช่วยรูดรากฟันส่วนที่บางให้รวมเป็นหน่วยเดียวกันและมีความแข็งแรงต้านทานต่อการแตกหักมากขึ้น (ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล, 2545) ดังนั้นการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางควรจะได้รับการเสริมผนังคลองรากก่อนการบูรณะด้วยเตื่อยการบูรณะด้วยการเสริมผนังคลองรากฟันในการรักษาคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบาง นอกจากจะช่วยลดค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีแล้ว ลดโอกาสเกิดความล้มเหลวแบบเตื่อยหลุด นอกจากนี้สามารถยืนยันผลงานวิจัยของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) พบว่าการทดลองของกลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเตื่อยไฟเบอร์ร่วมกับเรซินคอมโพสิตก่อน ได้มีความแข็งแรงที่สุด เนื่องจากได้รับแรงกระทำมากที่สุดก่อนที่จะแตกหักการบูรณะด้วยการเสริมผนังคลองรากฟันในการรักษาคลองรากฟันแล้ว และมีผนังคลองรากฟันบาง นอกจากจะช่วยลดค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีแล้ว ลดโอกาสเกิดความล้มเหลวแบบเตื่อยหลุด นอกจากนี้สามารถยืนยันผลงานวิจัยของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ภาควิชาทันตกรรมทั่วไป คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พบว่าการทดลองของกลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเตื่อยไฟเบอร์ร่วมกับเรซินคอมโพสิตก่อน ได้มีความแข็งแรงที่สุด เนื่องจากได้รับแรงกระทำมากที่สุดก่อนที่จะแตกหัก

5.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน One way ANOVA

ตารางที่ 4.11 ตารางสรุปค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน One way ANOVA ด้วยโปรแกรม SPSS

	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3
กลุ่มที่ 1	-	-0.779*	-1.367*
กลุ่มที่ 2		-	-0.588
กลุ่มที่ 3			-

ตัวเลขที่มี * คือ $P < 0.05$ (มีความแตกต่างที่ยอมรับได้ในทางสถิติที่ระดับ 0.05)

สรุปเปรียบเทียบผลความแตกต่างระหว่างค่าความเค้นดึงของแต่ละกลุ่ม

การทดสอบพบว่าชุดข้อมูลค่าความเค้นดึง (Principal stress 1) การทดลองของ Group 1 คือแบบจำลองฟันกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีความแตกต่างกันอย่างสำคัญทางสถิติ ระดับ 0.05 ส่วนการทดลองของ Group 2 คือแบบจำลองฟันกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ไม่มีแตกต่างกันอย่างสำคัญทางสถิติ ระดับ 0.05

เทียบกับผลงานวิจัย การเปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันรักษารากที่มีขนาดคลองรากฟันกว้างมาก (ผนังคลองรากฟันบาง) เมื่อใช้เตื่อยไฟเบอร์จำนวน ต่างๆ กัน

จากผลการทดลองของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มที่ 2 มีความแข็งแรงที่สุดในการแตกหัก ที่ความต้านทานต่อการโหลดอัด และกลุ่มที่ 1 มีการแตกหักที่อ่อนแอที่สุด ความต้านทานต่อการโหลดอัด อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่มีทางเดียว ANOVA และการทดสอบการเปรียบเทียบแบบหลากหลาย พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่สาม ($p > 0.05$)

ซึ่งมีผลไม่ตรงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดสอบพบว่าชุดข้อมูลค่าความเค้นดึง (Principal stress 1) การทดลองของ Group 1 คือแบบจำลองฟันกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีความแตกต่างกันอย่างสำคัญทางสถิติ ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) ส่วนการทดลองของ Group 2 คือแบบจำลองฟันกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ไม่มีแตกต่างกันอย่างสำคัญทางสถิติ ระดับ 0.05 ($p > 0.05$)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย ในการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันบางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ โดยกำหนดปัจจัยการเสริมผนัง คลองรากฟันส่วนต้น ชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟันและเดือยพบว่า

1. ทำการเปรียบเทียบการแตกหักกับผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) พบว่ากลุ่มที่ 2 มีการแตกหักซ้ำที่สุด และ กลุ่มที่ 3 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งตรงกับการทำแบบจำลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการกำหนดแรง 1000 N พบว่ากลุ่มที่ 2 มีค่าความเค้นดึงของเนื้อฟันน้อยที่สุดที่ 45.1 MPa กลุ่มที่ 3 มีค่าความเค้นดึงที่ 59.4 MPa และกลุ่มที่ 1 มีค่าความเค้นดึงมากที่สุดที่ 92.4 MPa

2. การกระจายความเค้นของกลุ่มที่ 2 บูรณะด้วยเดือยไฟเบอร์ร่วมกับเรซินคอมโพสิตก่อกแกนเมื่อใส่แรงกระทำตามผลงานวิจัย พบว่าได้มีความแข็งแรงที่สุด มีการกระจายความเค้นน้อยที่สุดในสามกลุ่ม และค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่บริเวณส่วนกลางของฟัน คล้ายกับผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) ที่มีรูปร่างการแตกหักอยู่ที่บริเวณส่วนกลางของเนื้อฟันเช่นเดียวกัน

3. จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายความเค้นดึงในกลุ่มที่ 3 โดยการใส่เดือยไฟเบอร์เบอร์ 3 จำนวน 1 อัน เบอร์ 0 จำนวน 2 อัน ร่วมกับการก่อกแกนฟันด้วยเรซินคอมโพสิต ทำให้เกิดการสะสมของ ความเค้นดึงเป็นปริมาณมากกว่าการบูรณะแบบใส่เดือยฟันไฟเบอร์ 1 อัน กลุ่มที่ 3 การบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต การบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอน จำนวน 2 อัน มี มีการขัดแย้งกับผลงานวิจัยของ (ณัฐฐา ภิญญโสภณ และคณะ, 2560) กล่าวไว้ว่า จำนวนของเดือยฟันที่ใช้ในการบูรณะส่งผลต่อการกระจายและการสะสมของความเค้นโดยการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยทุกประเภทในการศึกษาจำนวน 2 อัน จะมีปริมาณความเค้นสะสมลดลงเมื่อเทียบกับการบูรณะด้วยเดือยฟันชนิดเดียวกันจำนวน 1 อัน และมีปริมาณความเค้น ไกล่เคียงกับฟันปกติ (Maceri, 2006)

6.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้ได้ทำการเลือกวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ ถึงแม้ว่าจะทำให้ได้ผลที่ได้ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า แต่การกำหนดขนาดของวัสดุต่างๆ รวมถึงกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ก็ทำให้มีผลต่อการวิเคราะห์อย่างมาก จึงควรสร้างแบบจำลองจากของจริงโดยใช้ฟันจริงที่ได้จาก CT-Scan หรือ กลุ่มตัวอย่างเป็นฟันกรามซี่ล่างของมนุษย์ที่ถูกถอนนำมาศึกษาโครงสร้างรายละเอียดภายในด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ มากำหนดขนาดต่างๆ และค่าคุณสมบัติของวัสดุ บุรณะ ควรค้นคว้าหลายๆแหล่งข้อมูลจากนั้นกำหนดให้มีสมบัติเชิงกลเหมือนกันในทุกๆส่วนของวัสดุ รวมทั้งสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นซึ่งต่างจากสภาพความเป็นจริงของเนื้อเยื่อ ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นตามแนวขวางของเดือยโดยเฉลี่ย 21,000 MPa ในการคำนวณ ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงเมื่อเดือยเส้นใยคาร์บอนได้รับแรงทำมุม 135 องศาเช่นในการศึกษานี้ จึงน่าจะเกิดการโค้งงายขึ้นทำให้ความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นน่าจะมากขึ้นและความเค้นบริเวณส่วนปลายลดลง (ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล, 2545) แรงที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแรงสถิตย์ที่มีเพียงทิศทางเดียวที่ได้ศึกษาตามการทดลองของผลงานวิจัย (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) แต่ในความเป็นจริงแรงบิดเคี้ยวที่มากกระทำมิได้หลายแนวและเป็นแรงที่เกิดซ้ำๆ นอกจากนี้ลักษณะการเชื่อมยึดของวัสดุในสภาพจริงไม่ได้ยึดอย่างสมบูรณ์ ทำให้อาจจะเกิดความล้มเหลวขึ้นได้ที่ระหว่างผิวเชื่อมยึดของวัสดุ เช่น ระหว่างเดือยฟันกับแกนฟัน แกนฟันกับครอบฟัน เป็นต้น จึงอาจจะทำให้เกิดความล้มเหลวโดยการหลุดของวัสดุออกก่อนที่จะเกิดการแตกของรากฟัน แต่จากการศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ, 2558) และ (ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล, 2545) จึงสามารถอธิบายปัญหาที่เกิดจากพฤติกรรมการแตกหักของรากฟันและสามารถยืนยันผลการทดลองจริงจากผลงานวิจัยได้แม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลจากการวิจัยนี้เป็นเพียงการวิจัยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks เพียงโปรแกรมเดียว และสามารถยืนยันผลการทดลองของ (อุษณีย์ ปิงไพบูลย์และคณะ, 2558) เป็นเพียงบางส่วน ดังนั้นการออกแบบจำลองที่เหมาะสมควรได้รับการทดลองหลายโปรแกรม เพื่อหาวิธีในการบูรณะในรูปแบบต่างๆ และสามารถยืนยันผลที่ถูกต้องมากที่สุดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- Bassiouny, M. a. (1986). Abrasion resistance of glass-ionmer restorative. J Dent res 65.
- Dental Materials. (2004). Retrieved January 2 2007, from Ultimate tensile strength of tooth structures structures :
https://www.researchgate.net/publication/5332618_Ultimate_tensile_strength_of_tooth_structures
- Dr. Reem Al-Dhalaan. (2008). Retrieved January 2 2017, from PROSTHODONTIC Des Mach Elem Mech. Eng. Department. (2016). Retrieved January 4 2017, from
http://www.engineeringtoolbox.com/polymer-properties-d_1222.html :
http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103320%20Des%20Mach%20Element/CRW003_Failure%20Theories.pdf Engineeringtoolbox. Epoxy 128,828,331,X75.
- Farah, J. a. (1988). Finite element analysis of mandibular model. J Oeal Rehabit 15.
- Friedman, C. J. (1975). Composition and mechanical properties os gutta- percha endodontic point. J Dent Res54.
- Kydd, W. a. (1967). The stiffness of palatal mucoperiosteum. J Prosthet Dent18.
- lee YK, Lu H, Oguri M & Powers JM (2006) Retrieved January 2 2007, from Properties of a Dental Resin Composite with a Spherical Inorganic Filler :
<http://www.jopdentonline.org/doi/pdf/10.2341/05-154?code=opdt-site>
- Maceri, F. (2006). Retrieved January 2 2007, from Mechanical Behaviour of Endodontic Restorations with Multiple Prefabricated Posts :
<http://europepmc.org/abstract/med/17254588>
- Peyton, F. D. (1952). Physical properties of dentin. J Dent Res31.
- Roulet, J. a. (2000). Adhesion: the silent revolution in dentistry. Chicago : Quintessence .
- SolidWorks Thai. (2015, 06 21). von Mises Stress กับ P1: 1st Principal Stress. Retrieved from von Mises Stress กับ P1: 1st Principal Stress สืบค้นเมื่อ 3 มกราคม 2560 จาก <http://www.solidworksthai.com/webboard/index.php?topic=10307.0>

Weinstein, A. J. (1980). Implant-bone interface characteristics of bioglass dental implants. J Biomed Mater Res14.

ชาวสวน กาญจน์มัย. (2552). ความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ณัฐธา ภิญโญโสภณ และคณะ. (2560). การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซีเมื่อมีการบูรณะแบบต่างๆด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์3มิติ. เข้าถึงได้จาก การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซีเมื่อมีการบูรณะแบบต่างๆ ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์3มิติ .

ธีรพร เตจ๊ะ. (2553, สิงหาคม 19). การวิเคราะห์ผลลัพธ์ CAE เรื่อง FAILURE CRITERION #2. สืบค้นเมื่อ 28 ธันวาคม 2560 จาก

<http://solidworksthai.com/website/articles/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B9%8C%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%9E%E0%B8%97%E0%B9%8C-cae-%E0%B9%80%E0%B8%A3/>

ปิยะนารถ เอกวรพจน์. (2557). วัสดุบูรณะฟันเรซินคอมโพสิต. สืบค้นเมื่อ 6 มกราคม 2560, จาก <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:KRHNVKP9nHcJ:ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/download/5025/4786+&cd=1&hl=th&ct=clnk&gl=th>

พลวัฒน์ ไพรไพศาลกิจ. (2559). Simulation so easy. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560, จาก <http://thai-solidworkssimulation.blogspot.com/2014/10/solidworkssimulation.html>

พลวัฒน์ ไพรไพศาลกิจ. (2559). ผลลัพธ์ที่ได้จาก Simulation. สืบค้นเมื่อ 10 ธันวาคม 2559, จาก <http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/2016/03/simulation-part-25.html>

พิเชษฐ์ พิณีจ. (2555). ทฤษฎีความเสียหาย. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2560, จาก <http://pichet-pinit.in.th/wp-content/uploads/2014/08/6-Failure-Theory-for-Static-Stresses.pdf>

พิเชษฐ์ พิณีจ. (2558). การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2560, จาก <http://pichet-pinit.in.th/wp-content/uploads/2014/08/MTE-433-LM-03.pdf>

วรรณสิริ พันธุ์ไร. (2010). Strength of Materials I. สืบค้นเมื่อ 25 ธันวาคม 2559, จาก www.egmu.net/civil/wonsiri/Lecture4.ppt

- ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล. (2545). ผลของการบูรณะด้วยเดือยและผลของแกนต่างๆต่อการกระจายความเค้น. สืบค้นเมื่อ 3 มกราคม 2560, จาก
http://www.tnrr.in.th/2558/?page=result_search&record_id=270351
- ศรียุทธทันตแพทย์. (2017). เดือยสำเร็จรูป สืบค้นเมื่อ 5 มกราคม 2560, จาก
<http://www.srisukdental.com>
- สมศักดิ์ เสนาใหญ่. (2555). ความเค้น. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560, จาก
<http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1523-?groupid=277>
- อุษณีย์ ปิงไพบูลย์ และคณะ. (2558). การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันรักษารากที่มีขนาดคลองรากฟันกว้าง (ผนังคลองฟันบาง) เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM). การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของฟันรักษารากที่มีขนาด.

ภาคผนวก ก
(คู่มือการสร้างแบบจำลองรากฟัน)

คู่มือการสร้างแบบจำลองรากฟัน

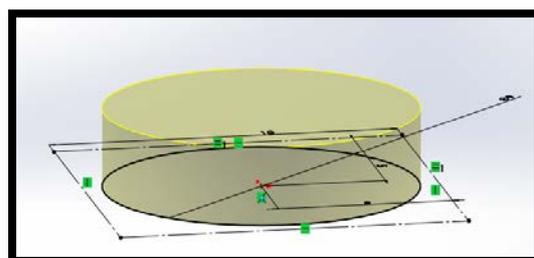
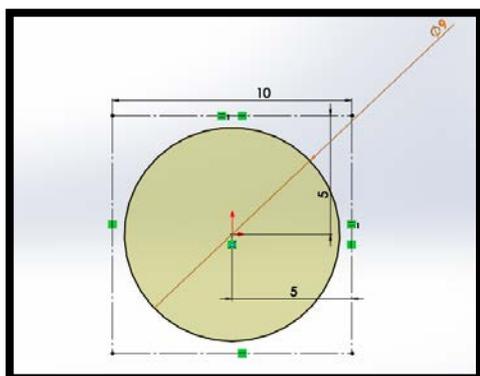
สร้างแบบจำลองรากฟัน ด้วยโปรแกรม SolidWorks, 2016 โดยคู่มือนี้จะเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองฟันของกลุ่มที่ 1 เพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ มีส่วนประกอบดังนี้

1. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของโลหะครอบฟัน
2. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของคลองรากฟัน
3. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของเรซินคอมโพสิต
4. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของฐานยึดอ็อกซี่เรซิน

5. เมื่อสร้างส่วนประกอบทั้ง 4 ในโปรแกรม SolidWorks แล้ว จากนั้นจะทำการใช้คำสั่ง Assembly เพื่อทำการประกอบชิ้นงานเป็นชิ้นเดียวกัน

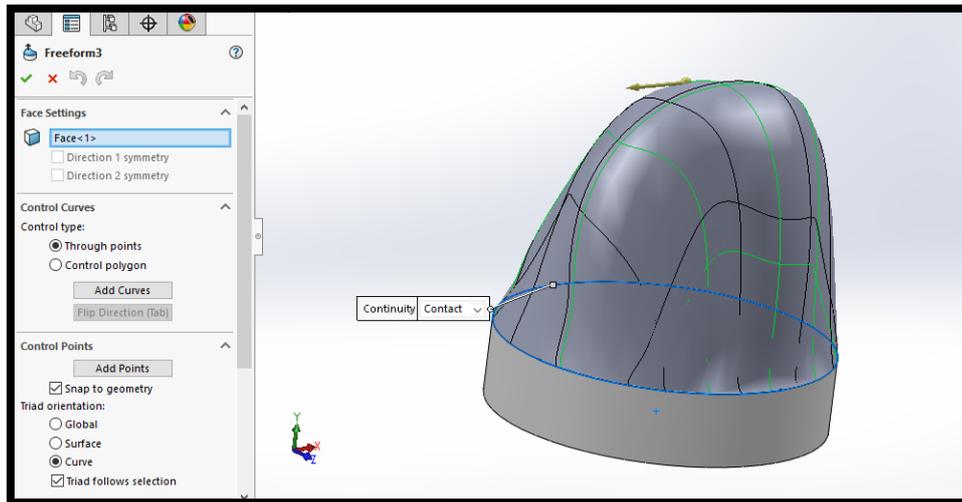
1 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของโลหะครอบฟัน

- 1.1 สร้างวงกลมด้วย เครื่องมือ Sketch แล้วเลือก Circle เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร
- 1.2 จากนั้นเลือกเครื่องมือ Features แล้วเลือก Extruded Boss/Base ให้มีความหนาขึ้นมา ด้านบน 2 มิลลิเมตร



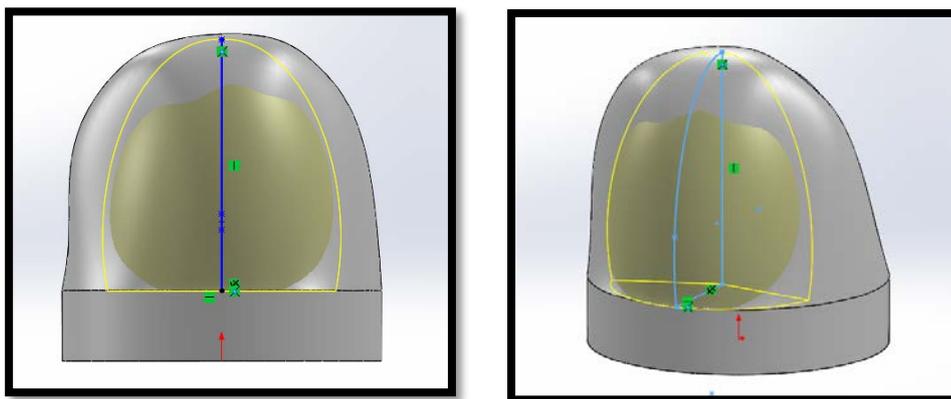
รูปที่ ก.1 แสดงการสร้างวงกลมของโลหะครอบฟัน

1.3 ใช้เครื่องมือ Freeform ในการร่างโลหะครอบฟันให้ คล้ายฟันจริงโดยเลือก Control type เป็นแบบ Through point จากนั้น จะมีเส้นมาให้วาดแบบ เมื่อวาดเสร็จแล้วกด เครื่องหมาย ถูกต้อง



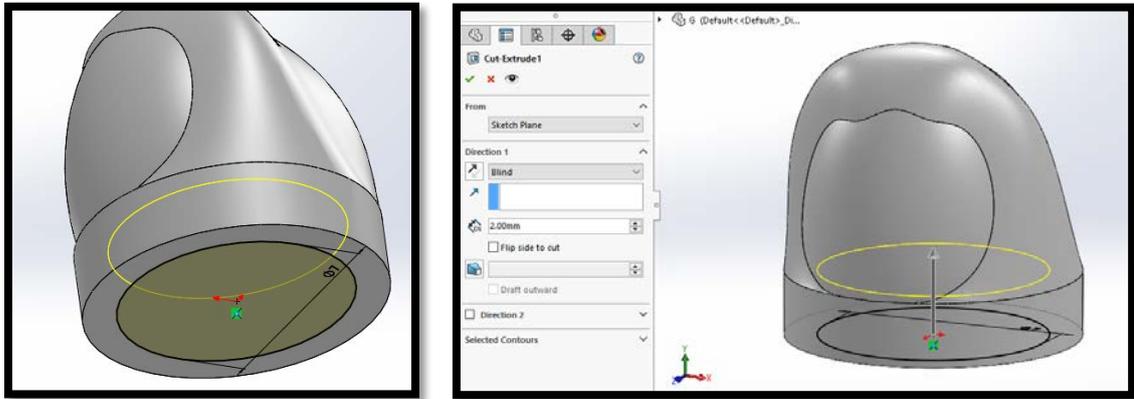
รูปที่ ก.2 แสดงการสร้างโครงโลหะครอบฟัน

1.4 เลือกเครื่องมือ Sketch แล้วเลือก Line วาดพื้นที่ที่จะใส่แรงกระทำ โดยวาดเป็น เส้นตรง ก่อน แล้วใช้ Spline วาดเส้นโค้ง คือเส้นสีฟ้าตามภาพ แล้วจากนั้น ใช้คำสั่ง Revolve เมื่อเสร็จแล้วกด เครื่องหมายถูกต้อง



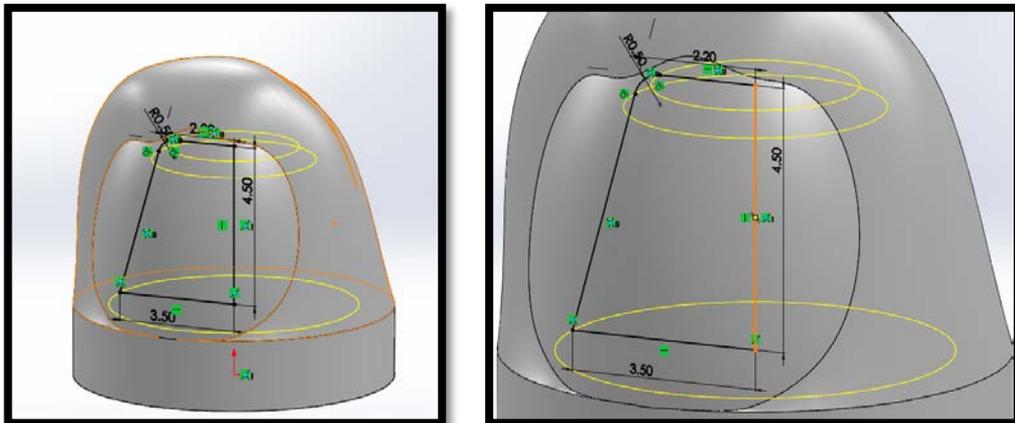
รูปที่ ก.3 แสดงการสร้างพื้นที่ใส่แรงของโลหะครอบฟัน

1.5 ใช้คำสั่ง Circle ทำเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร จากนั้นใช้คำสั่ง Revolve cut ทำให้กลวงด้านใน 2 มิลลิเมตร แล้วกดเครื่องหมายถูกต้อง



รูปที่ ก.4 แสดงการสร้างวงกลมเพื่อเจาะรูของโลหะครอบฟัน

1.6 เพื่อให้ด้านในของโลหะกรวงเข้าไปด้านใน สักเกตเส้นสีดำจากรูปที่ Sketch ด้านล่างใช้ คำสั่ง Line เส้นตรง 4.5 มิลลิเมตร เส้นนอน 3.5 มิลลิเมตร ทำการโค้งรัศมี 0.5จากนั้น ใช้คำสั่ง Revolve cut เพื่อทำให้เป็นวงกลมแล้วจะทำการตัดส่วนนั้นออกอัตโนมัติ ดั่งเส้นสีเหลืองแสดงในรูป



รูปที่ ก.5 แสดงการสร้างเส้นเจาะของโลหะครอบฟัน

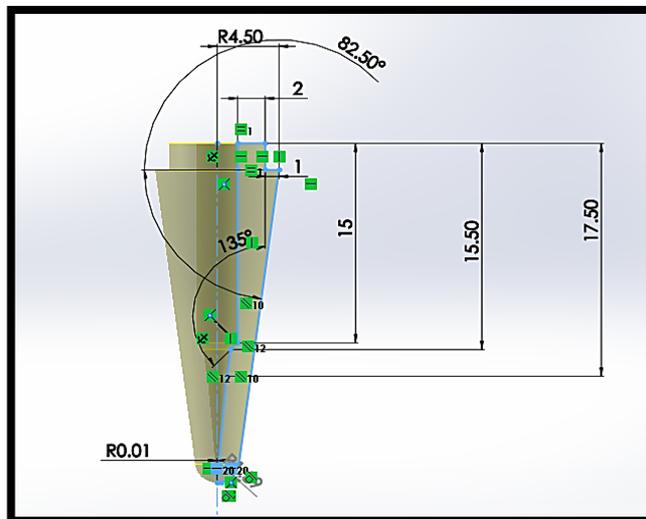
2. การแบบจำลอง 3 มิติ ของคลองรากฟัน

2.1 ใช้คำสั่ง Line และ Spline ในการร่างฟันให้คล้ายฟันจริงที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์



รูปที่ ก.6 แสดงฟันกรามซี่ล่างที่ได้จาก CT-Scan

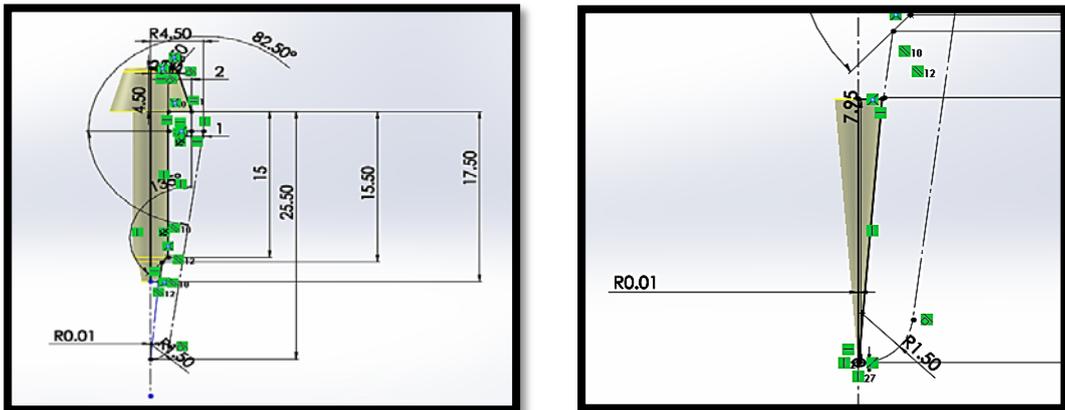
2.2 โดยมีขนาดคลองรากยาว 22 มิลลิเมตร ดูจากเส้นสีฟ้า ทำการวาดระยะที่ใกล้เคียงกับฟันจริง จากนั้นใช้คำสั่ง Revolve เพื่อทำการหมุนให้เป็นทรงกรวย



รูปที่ ก.7 แสดงการสร้างคลองรากฟัน

3. การแบบจำลอง 3 มิติ ของเรซินคอมโพสิต

3.1 ทำการร่างแบบจำลองด้วยคำสั่ง Line วาดเป็นโครงร่างเส้นสีดำ มีขนาด 17.5 มิลลิเมตร ระยะส่วนโค้งต่างๆ ดังแสดงดังรูป ก.8 จะนั้นใช้เครื่องมือ Revolve ทำให้หมุนรอบ จะได้เรซินคอมโพสิต เป็นแท่ง ส่วนการทำกัตตาเปอร์ซ่า ก็ทำคล้ายเรซินคอมโพสิตเช่นกัน ใช้คำสั่ง Line และ Revolve

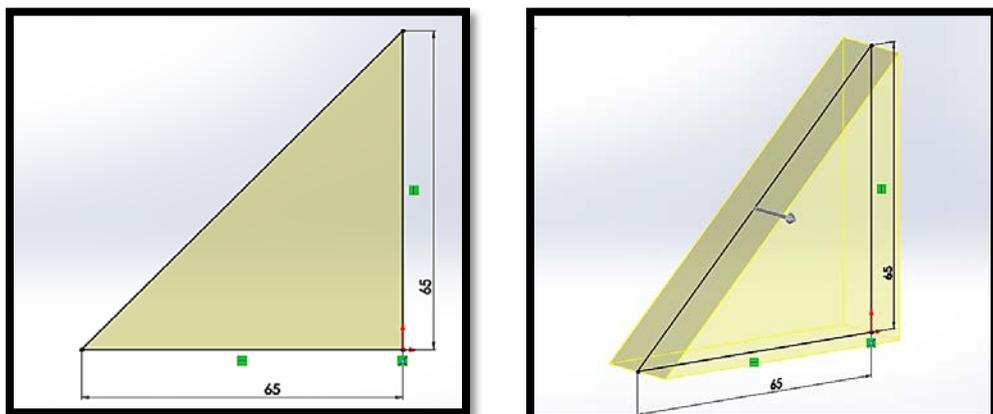


รูปที่ ก.8 แสดงการสร้างเรซินคอมโพสิตและกัตตาเปอร์ซ่า

4. การแบบจำลอง 3 มิติ ของฐานยึดอีพ็อกซีเรซิน

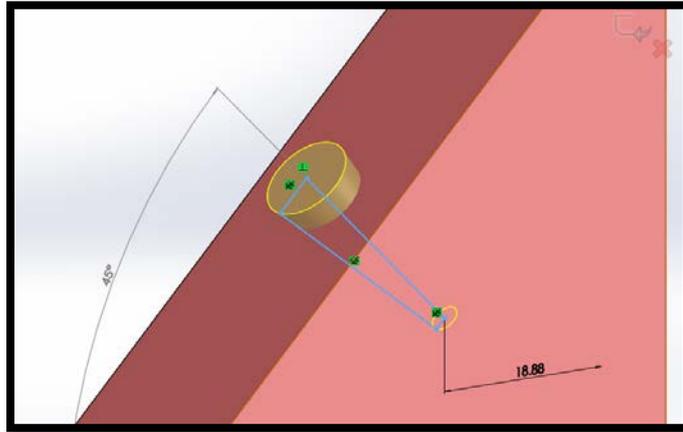
4.1 ใช้คำสั่ง Line สร้างเป็นรูปสามเหลี่ยม 65 x 65 มิลลิเมตร

4.2 จากนั้นใช้คำสั่ง Extruded Boss/Base ให้มีความหนา ขึ้นมาด้านบน 20 มิลลิเมตร



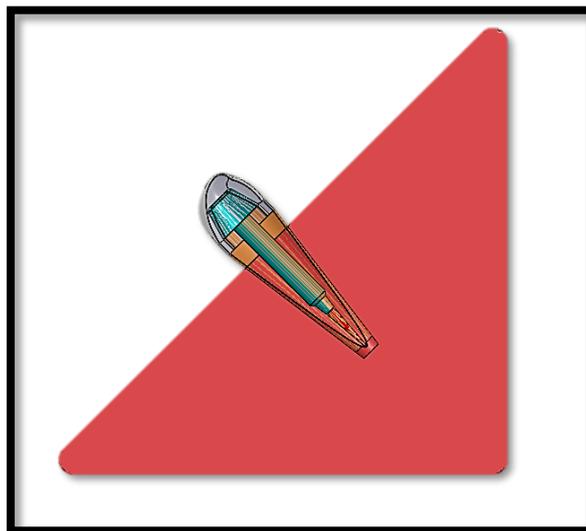
รูปที่ ก.9 แสดงการสร้างฐานยึด อีพ็อกซีเรซิน

4.3 ทำการเจาะรูเพื่อใส่ ตัวรอกฟันลงไปด้วยการวาดเส้นตรง คำสั่ง Line วาดตามเส้นสีดำและเส้นสีฟ้าดังแสดงในรูปจากนั้น ทำการ Revolve cut หมุนรอบ คำสั่งนี้จะตัดส่วนที่ Revolve ออก



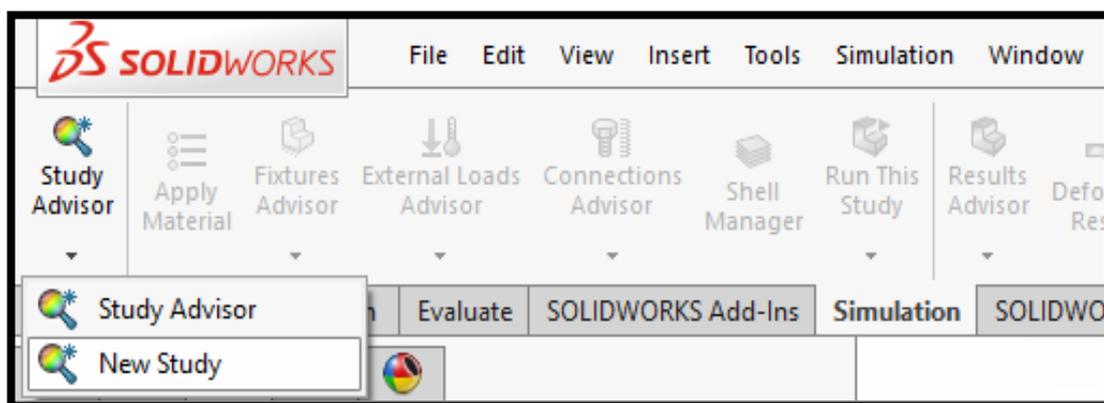
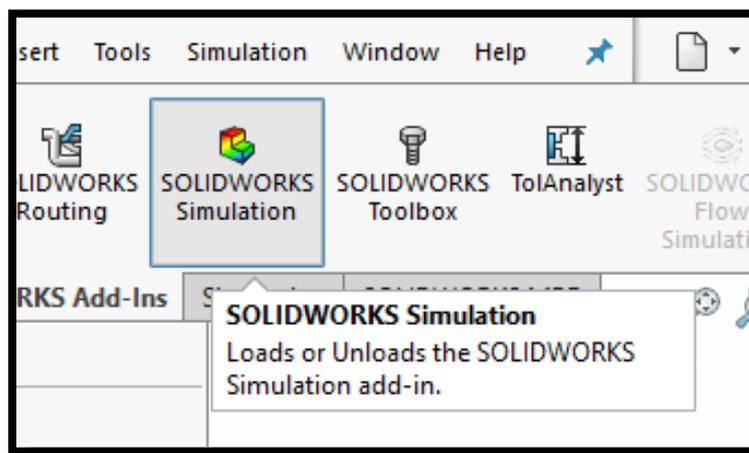
รูปที่ ก.10 แสดงการสร้างรูเจาะฐานยึดอีพอกซีเรซิน เพื่อประกอบชิ้นงานเข้ากับฟัน

5. เมื่อสร้างส่วนประกอบทั้ง 4 ในโปรแกรม SolidWorks แล้ว จากนั้นจะทำการใช้คำสั่ง Assembly เพื่อทำการประกอบชิ้นงานเป็นชิ้นเดียวกัน



รูปที่ ก.11 แสดงการประกอบชิ้นงานระหว่างฐานยึดอีพอกซีเรซินกับฟัน

5.1 ทำการวิเคราะห์โดยเลือก SolidWorks Simulation จากนั้นเลือก Simulation > Study Advisor > New Study



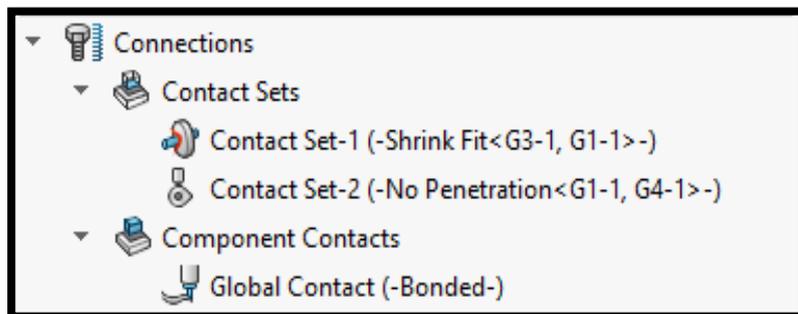
รูปที่ ก.12 แสดงการขั้นตอนแรกวิธีการวิเคราะห์ชิ้นงาน

5.2 ใส่วัสดุต่างๆของแต่ละชิ้นงาน



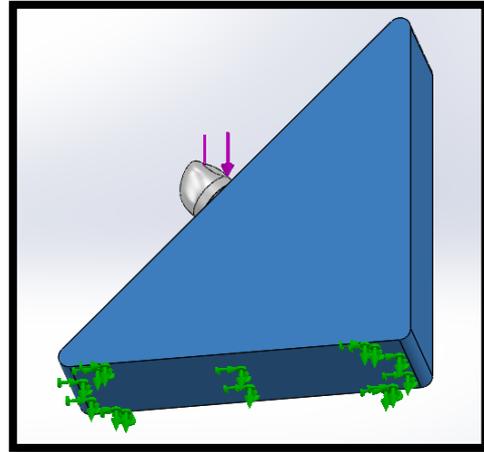
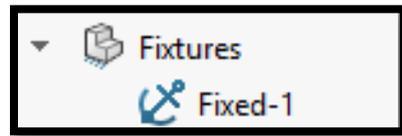
รูปที่ ก.13 แสดงการใส่วัสดุต่างๆ

5.3 เลือกรูปแบบการเชื่อม เป็นแบบ Contact Set > Shrink Fit คือให้เนื้อพื้นกับกัตตาเปอร์ซาเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วน Nopenetration จะให้เนื้อพื้นกับฐานยึดอีพ็อกซีเรซินติดกัน และ Component แบบ Bonded



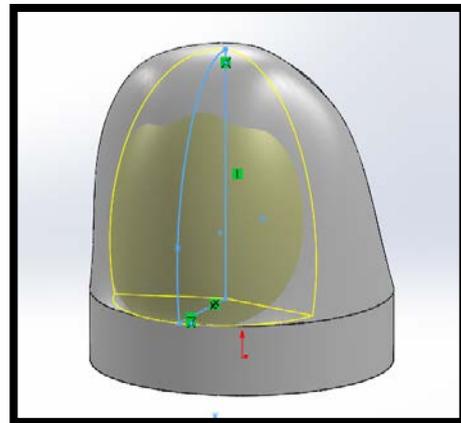
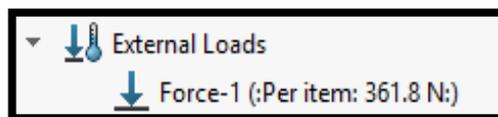
รูปที่ ก.14 แสดงการเลือกรูปแบบเชื่อมยึดระหว่างชิ้นงานแต่ละชิ้นงาน

5.4 เลือกการยึดของฐานแบบแน่น



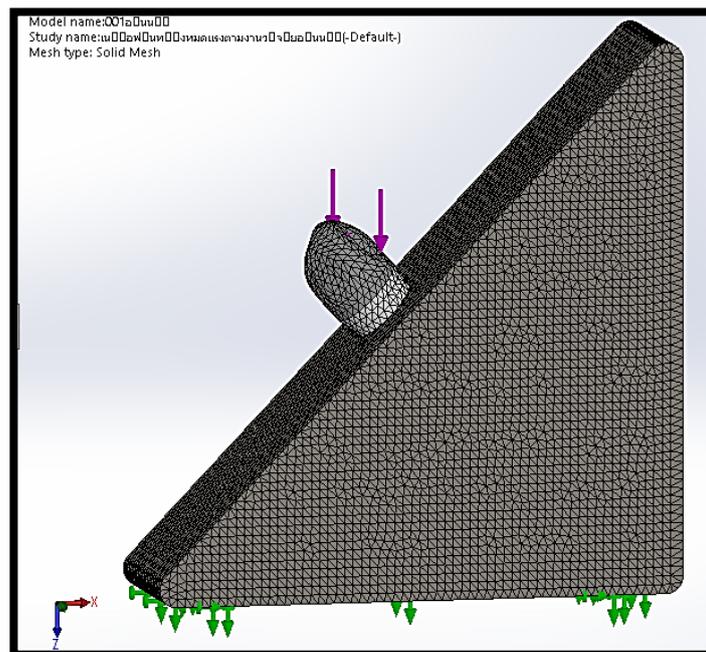
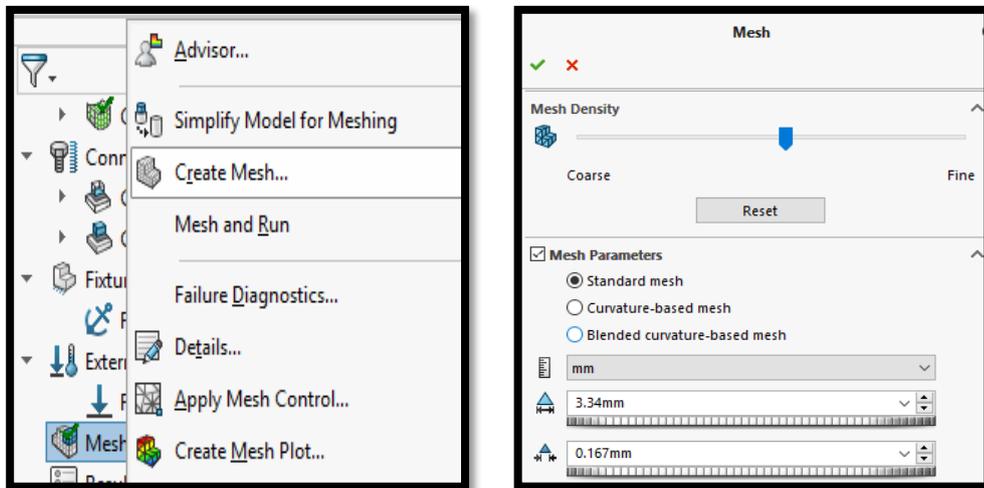
รูปที่ ก.15 แสดงการเลือกรูปแบบเชื่อมยึดของฐานยึดอ็อกซีเรซิน

5.5 เลือกพื้นที่ใส่แรงกระทำ จากนั้นใส่แรงกระทำ



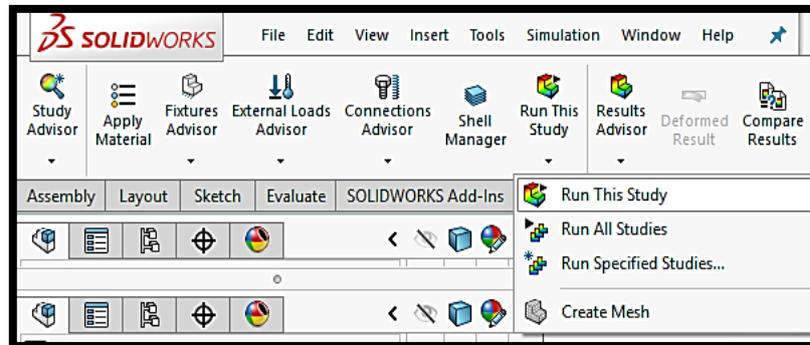
รูปที่ ก.16 แสดงการเลือกแรงกระทำบนชิ้นงานโลหะครอบฟัน

5.6 กำหนดขนาดของ Mesh > Create mesh



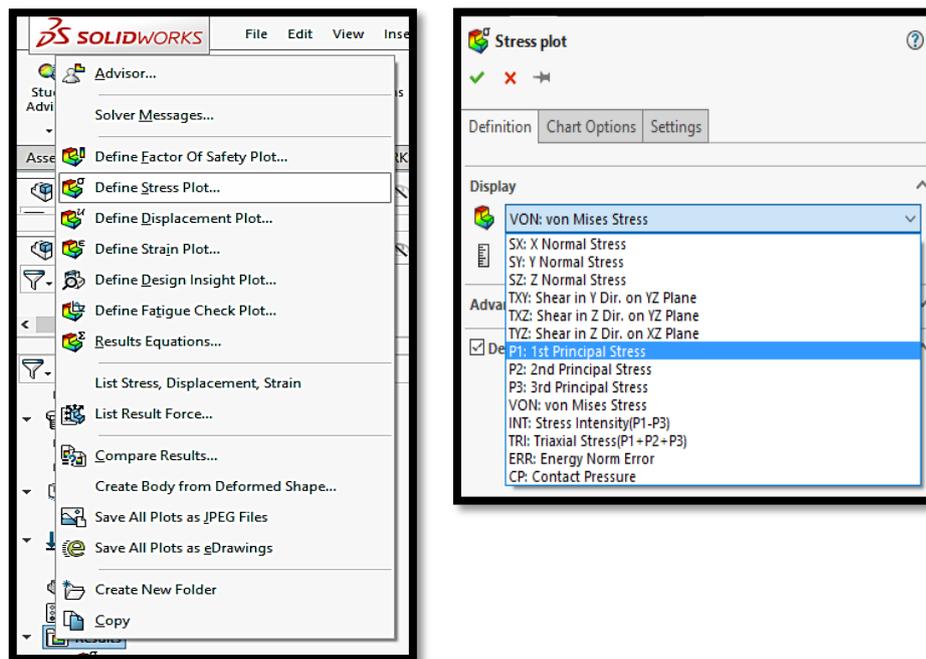
รูปที่ ก.17 แสดงการเลือก Mesh และ ขนาดของ Mesh

5.7 เลือกคำสั่งประมวลผล (Run)



รูปที่ ก.18 แสดงการประมวลผล

5.8 ดูผลลัพธ์โดยการคลิกขวาที่ Result > Define Stress Plot > Principal Stress 1



รูปที่ ก.19 แสดงการเลือกชนิดการวิเคราะห์ (Principal stress)

ภาคผนวก ข
(บันทึกข้อความขออนุมัติใช้โปรแกรม SolidWorks)



บันทึกข้อความ



ส่วนงาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทร. 22099, 27065

ที่ ศธ 0519.8.05/453

วันที่ 28 พฤศจิกายน 2559

เรื่อง ขอบความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม Solid Work

เรียน หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ด้วยนางสาวนิชาพัฒน์ วราเสฏฐ์รัตน นิสิตระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้ทำโครงการวิศวกรรม เรื่อง การวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของโครงสร้างพื้น รักรากรากที่มีขนาดคลองรากพื้นกว้าง (ผนังคลองพื้นบาง) เมื่อใช้เดือยไฟเบอร์จำนวนต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ศุภชัย สันถาวร เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการฯ ในปีการศึกษา 2559

ในการนี้ นิสิตมีความประสงค์จะขอใช้โปรแกรม Solid Work เพื่อใช้ในการทำโครงการวิศวกรรมหัวข้อเรื่องดังกล่าว โดยจะขอใช้ระหว่างวันที่ 1 ธันวาคม 2559 ถึง วันที่ 31 กุมภาพันธ์ 2560

ว่าที่พันตรี

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัทธิพร ศิริสวัสดิ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม

เรียน หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
 พ.อ. น.ส. อรุณรัตน์ อธิสุข
 ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
 ๑๕๓๐๑๑ ๑๖๗๗

๒๙ พ.ย. ๒๕๕๙.

เรียน คณ.ศ. อ.อ.อ.

เฟื่องพร

๒๙ พ.ย. ๕๙

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อสกุล	นางสาวนิชาพัฒน์ วราเสฏฐ์รัตน์	
วันเดือนปีเกิด	15 มีนาคม 2538	
สถานที่เกิด	อำเภอดอนเมือง กรุงเทพมหานคร	
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	242/186 ต.สนามบิน อ.ดอนเมือง จ.กรุงเทพมหานคร 10210	
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	086-353-3909	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนดอนเมืองทหารอากาศบำรุง
	พ.ศ. 2559	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
	รางวัลที่ได้รับระหว่างการศึกษา	พ.ศ. 2560