

ผลของการบูรณะด้วยเด็ดยและแกนด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อการกระจายความเค้น
ในพื้นซึ่งมีผนังคองรอกบาง : วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นางสาวศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์


คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1012-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFECT OF VARIOUS METHODS FOR POST AND CORE RESTORATION ON STRESS
DISTRIBUTION IN FLARED ROOT CANAL : THE FINITE ELEMENT METHOD



Miss Siriporn Arunpraditkul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1012-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการบูรณะด้วยเดือยและแกนด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อการกระจายความ
เค้นในฟันซึ่งมีผนังคลองรากบาง : วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย นางสาวศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล
ภาควิชา ทันตกรรมประดิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ทันตแพทย์หญิง ดร. ประรอมภ์ ซาลิมี่
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี) ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ทันตแพทย์ สุรสิทธิ์ เกียรติพงษ์สาร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทันตแพทย์สุภบุญธรรม บุรณเวช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ทันตแพทย์หญิง ดร. ประรอมภ์ ซาลิมี่)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มโน คุรัตน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ทันตแพทย์ ดร. วีระ เลิศจิราการ)

ศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล : ผลของการบูรณะด้วยเดือยและแกนด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อการกระจายความเค้น
ในฟันที่มีผนังคลองรากบาง (THE EFFECT OF VARIOUS METHODS FOR POST AND CORE
RESTORATION ON STRESS DISTRIBUTION IN FLARED ROOT CANAL : THE FINITE
ELEMENT METHOD)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ทันตแพทย์หญิง ดร. ประมรภ์ ชาลิมิ, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ศาสตราจารย์
ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 79 หน้า. ISBN 974-17-1012-7.

ในทางคลินิกทันตแพทย์สามารถพบฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางจากฟันผุลุกลามอย่างมากก่อนหรือ
หลังรักษารากฟัน ผุบริเวณขอบครอบฟัน หรือการเสียเนื้อฟันจากชั้นตอนการรีดเดือยเก่าออก ซึ่งเป็นปัญหา
ต่อการพยากรณ์ความสำเร็จภายใต้การรักษารักษา ต่อมาได้มีการนำเสนอวิธีต่าง ๆ ในการบูรณะฟันที่มีสภาพดัง
กล่าวในรูปแบบกรณีศึกษาโดยยังไม่มีข้อมูลแสดงผลการรักษาระยะยาว หรือวิธีการบูรณะที่เหมาะสมที่สุด
ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการบูรณะที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบการกระจายความเค้น
ในเนื้อฟันและวัสดุบูรณะ

ทำการวิเคราะห์การกระจายความเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟันตัดซี่หน้ากลางบนซึ่งมีผนังคลอง
รากบางด้วยโปรแกรม MSC/Nastran for Windows เมื่อบูรณะด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 10 วิธี โดยพิจารณา
ปัจจัยหลักสามประการได้แก่ การเสริมหรือไม่เสริมผนังคลองรากฟัน ชนิดของวัสดุที่ใช้เสริมผนัง (เรซินคอมโพ
สิตหรือกลาสไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน) และชนิดของเดือย (เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม เดือยโลหะผสมนิ
เกิลโครเมียม เดือยสแตนเลสสตีล และเดือยเส้นใยคาร์บอน) กำหนดให้วัสดุทุกชนิดในแบบจำลองมีคุณสมบัติ
เชิงกลเหมือนกันในทุก ๆ ส่วนของวัสดุ คุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง คุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น และวัสดุมี
การเชื่อมกันและส่งผ่านความเค้นถึงกันอย่างสมบูรณ์ ผลการศึกษาพบว่า การเสริมผนังคลองรากฟันช่วยให้
เกิดการกระจายความเค้นได้ดีกว่าการไม่เสริม การเสริมด้วยเรซินคอมโพสิตช่วยให้เกิดการกระจายความเค้น
ได้ดีกว่าการเสริมด้วยกลาสไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน เดือยที่มีความอดุลย์ของสภาพยืดหยุ่นมากทำให้เกิด
ความเค้นสะสมสูงสุดมากกว่า แต่ทำให้เกิดความเค้นสะสมที่รากฟันส่วนต้นน้อยกว่าเดือยที่มีความอดุลย์ของ
สภาพยืดหยุ่นน้อย จากข้อสมมติของการทดลองข้างต้น การบูรณะโดยการเสริมผนังด้วยเรซินคอมโพสิตและ
ใช้เดือยเส้นใยคาร์บอนน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากฟันบาง

ภาควิชา ทันตกรรมประดิษฐ์
สาขาวิชา ทันตกรรมประดิษฐ์
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิติกร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

##4376114932 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEY WORD: FINITE ELEMENT METHOD / FLARED ROOT CANAL / POST AND CORE / STRESS
DISTRIBUTION / REINFORCEMENT

SIRIPORN ARUNPRADITKUL : THESIS TITLE. (THE EFFECT OF VARIOUS METHODS FOR
POST AND CORE RESTORATION ON STRESS DISTRIBUTION IN FLARED ROOT CANAL : THE
FINITE ELEMENT METHOD) THESIS ADVISOR : Dr. PRAROM SALIMEE, THESIS COADVISOR :
Prof. Dr. PRAMOTE DECHAUMPHAI, [79 PAGES] pp. ISBN 974-17-1012-7

Clinically, endodontically treated teeth with thin root canal wall or flared root canal is a result of carious extension, secondary caries, pin removal procedure, etc. The prognosis for this problem has been unpredictable. Recently, there have been some literatures which introduced the techniques of reinforcing the weaken root, nevertheless, suitable restorative procedures are still controversial and information on longitudinal study has been limited. In order to find out the optimal technique, this study aimed to investigate the stress distribution in root dentin and restorative materials. The 2 dimensional finite element model of flared root canal of maxillary central incisors with ten restorative methods were performed using MSC/Nastran for Windows. Three evaluated parameters were investigated : reinforcing or unreinforcing the flared root canal, reinforcing materials (composite resin and cermet) and post materials (gold alloy type III, Ni-Cr alloy, stainless steel and carbon fiber). All materials were assumed to be homogeneous, isotropic, linear elastic and perfectly bonded between the interfaces. The results showed that maximal tensile stress in dentin were reduced in the reinforcing models. Reinforcement with composite resin provided less maximum tensile stress than that with cermet. High elastic modulus of post materials provided more maximal tensile stress and less stress concentration at flared dentin than post with low elastic modulus. From this FEA study, reinforcement of flared root canal with composite resin and carbon fiber post displayed favorable stress distribution and might be a suitable technique for rehabilitating pintooth with flared root canal.

Department/Program Prosthodontics

Student's signature.....

Field of study Prosthodontics

Advisor's signature.....

Academic year 2545

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ทันตแพทย์หญิง ดร. ประรอมภ์ ซาลิมี่ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ด้วยดีโดยตลอด ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทันตแพทย์ศุภบุรณ์ บุรณเวช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทันตแพทย์ ดร. มโน คูรัตน์ และอาจารย์ทันตแพทย์ ดร. วีระ เลิศจิราการ กรรมการร่วมตรวจสอบ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องเนื้อหาให้สมบูรณ์ ทันตแพทย์ธนา ธนผลินที่สละเวลาอันมีค่ามาช่วยสอน ให้คำแนะนำวิธีการใช้ตลอดจนตอบและแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการใช้โปรแกรม MSC/Nastran for Windows และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์ที่จัดสรรจากเงินทุนบัณฑิตวิทยาลัยและงบประมาณแผ่นดินประจำปีภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2545

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญแผนภูมิ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	
ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหาของงานวิจัย.....	1
สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ตัวแปรของงานวิจัย.....	2
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
2. ปรัชญาหรือบรรณกรรม.....	4
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	16
วิธีการวิจัย.....	16
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	34
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
4. ผลการวิจัย.....	35
5. การอภิปรายผลการวิจัย.....	55
ปัจจัยการเสริมผนังคลองรากฟันกับความเค้นในเนื้อฟัน.....	57
ปัจจัยวัสดุเสริมคลองรากฟันกับความเค้นดึงในเนื้อฟัน.....	60
ปัจจัยชนิดของเตี๋ยกับความเค้นดึงในเนื้อฟัน.....	61
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68

บทที่	หน้า
สรุปผลการวิจัย.....	68
ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ณ

ตาราง	หน้า
1. แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเดือย 3 ชนิด.....	9
2. แสดงค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของแต่ละวัสดุบนแบบจำลอง.....	29
3. แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของการบูรณะฟันด้วยเดือยและแกนทั้ง 10 วิธี.....	33
4. แสดงตำแหน่ง และค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละวัสดุในแต่ละแบบจำลอง.....	54
5. แสดงความเค้นดึงในเนื้อฟันของแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิตและคาร์บอน-เซอ์เมต.....	56
6. แสดงค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันเมื่อใช้เดือย 3 ชนิดที่มีรูปร่างเหมือนกัน.....	64
7. แสดงความเค้นในเนื้อฟันที่บริเวณต่าง ๆ ของแบบจำลองการบูรณะทั้ง 10 วิธี.....	65



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ญ

ภาพประกอบ	หน้า
1. แบบจำลองพื้นที่ก่อนการบูรณะ.....	18
2. แบบจำลองการบูรณะด้วยเดือยโลหะเหวี่ยงทองชนิดที่สาม.....	19
3. แบบจำลองการบูรณะด้วยเดือยโลหะผสมเหวี่ยงนิกเกิลโครเมียม.....	20
4. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตแล้วใช้เดือยโลหะผสมทอง ชนิดที่สาม.....	21
5. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตแล้วใช้เดือยโลหะผสมนิกเกิล โครเมียม.....	22
6. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตแล้วใช้เดือยสแตนเลสสตีล.....	23
7. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตแล้วใช้เดือยเส้นใยคาร์บอน.....	24
8. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือย โลหะผสมทองชนิดที่สาม.....	25
9. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือย โลหะผสมนิกเกิลโครเมียม.....	26
10. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือย สแตนเลสสตีล.....	27
11. แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือย เส้นใยคาร์บอน.....	28
12. แสดงแบบจำลองเมื่อบูรณะด้วยเดือยโลหะเหวี่ยงโดยไม่เสริมผนังคลองรากฟัน.....	31
13. แสดงแบบจำลองเมื่อบูรณะโดยเสริมผนังคลองรากแล้วใช้เดือยและแกนโลหะเหวี่ยง.....	31
14. แสดงแบบจำลองเมื่อบูรณะโดยเสริมผนังคลองรากแล้วใช้เดือยสำเร็จรูปและสร้าง แกนด้วยวัสดุบูรณะ.....	32
15. แสดงแบบจำลองการบูรณะฟันด้วยเดือยและแกนทั้ง 10 วิธี ที่มีการแบ่งเอลิเมนต์ และมีการรวมจุด.....	33
16. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง.....	36
17. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองนิกเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง.....	37
18. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองทอง-คอมโพสิต.....	38
19. แบบจำลองทอง-คอมโพสิต.....	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ฎ

ภาพประกอบ	หน้า
20. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองนิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต.....	40
21. แบบจำลองนิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต.....	41
22. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองสแตนเลสสตีล-คอมโพสิต.....	42
23. แบบจำลองสแตนเลสสตีล-คอมโพสิต.....	43
24. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต.....	44
25. แบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต.....	45
26. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองทอง-เซอรัมเมต.....	46
27. แบบจำลองทอง-เซอรัมเมต.....	47
28. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองนิเกิลโครเมียม-เซอรัมเมต.....	48
29. แบบจำลองนิเกิลโครเมียม-เซอรัมเมต.....	49
30. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองสแตนเลสสตีล-เซอรัมเมต.....	50
31. แบบจำลองสแตนเลสสตีล-เซอรัมเมต.....	51
32. แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองคาร์บอน-เซอรัมเมต.....	52
33. แบบจำลองคาร์บอน-เซอรัมเมต.....	53

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนภูมิ	หน้า
1. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นดึงสะสมที่บริเวณ รากฟันส่วนต้นแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนังและนิเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง.....	57
2. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดเมื่อเสริมและไม่เสริมผนัง.....	59
3. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นสะสมที่รากฟันส่วนต้นเมื่อไม่เสริมและเสริม คลองรากฟันด้วยวัสดุบูรณะฟัน.....	59
4. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดเมื่อเสริมผนังด้วยเซอร์เมตและ เรซินคอมโพสิต.....	60
5. แสดงการเปรียบเทียบความเค้นดึงบริเวณรากฟันส่วนต้นเมื่อเสริมผนังด้วย เซอร์เมตและเรซินคอมโพสิต.....	61
6. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันเมื่อใช้เดือยชนิดต่าง ๆ.....	62
7. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงบริเวณรากฟันส่วนต้นเมื่อใช้เดือยชนิดต่าง ๆ.....	63
8. แสดงความเค้นดึงในเนื้อฟันที่บริเวณต่าง ๆ ของแบบจำลองทั้ง 10 วิธี.....	66

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของงานวิจัย

ในทางคลินิกเราสามารถพบฟันที่มีส่วนต้นของคลองรากฟันผายออกหรือมีผุบางส่วน โดยที่อวัยวะปริทันต์ที่รองรับฟันยังคงแข็งแรง ไม่มีพยาธิสภาพ ทั้งนี้อาจเนื่องจากฟันผุลุกลามอย่างมากก่อนหรือหลังการรักษาคลองรากฟัน การละลายตัวที่ผิดปกติภายในคลองรากฟัน (internal root resorption) จากพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อใน (pulp) ความผิดปกติของทันตแพทย์ในขั้นตอนการรักษาคลองรากฟันหรือเตรียมคลองรากฟันเพื่อบูรณะ หรือในรายที่มีการผุบริเวณขอบของครอบฟันเดือยและลุกลามไปยังผุถึงส่วนต้นของเดือย หรือจำเป็นต้องรื้อเดือยเก่าทำให้มีการสูญเสียเนื้อฟันที่ผนังคลองรากส่วนต้นไป หากพบฟันลักษณะนี้ทันตแพทย์อาจแนะนำให้ถอนฟันซี่นั้นและใส่ฟันปลอมทดแทน ทั้งนี้เพราะฟันซี่นั้นมักเป็นปัญหาต่อการพยากรณ์ความสำเร็จภายหลังการรักษา เนื่องจากผุบางส่วนที่บางอาจแตกหักเมื่อได้รับแรงขณะยึดเดือยหรือเมื่อใช้งาน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวิทยาการในการรักษาและวัสดุทางทันตกรรมมีความก้าวหน้ามากขึ้น ได้มีผู้วิจัยหลายรายได้นำเสนอกรณีศึกษา (case report) ถึงวิธีการบูรณะด้วยวิธีแตกต่างกันเพื่อพยายามเก็บฟันซี่นั้นไว้ และมีการรายงานการติดตามผลการรักษาเป็นระยะเวลาสั้น ๆ โดยยังไม่มีข้อมูลที่แสดงถึงผลการรักษาระยะยาว หรือวิธีการบูรณะที่ดีและเหมาะสมที่สุด หรือข้อมูลสนับสนุนความน่าเชื่อถือของวิธีการ เช่น การแสดงการกระจายความเค้นในเนื้อฟัน ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในรากฟันที่มีสภาพดังกล่าวเมื่อทำการบูรณะด้วยวิธีต่าง ๆ โดยพิจารณาปัจจัยหลักได้แก่ การเสริมผนังคลองรากฟัน วัสดุที่ใช้ในการเสริมผนัง และประเภทของเดือยที่ใช้บูรณะ เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางให้ทันตแพทย์พิจารณาเลือกวิธีการบูรณะที่เหมาะสมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมมติฐานของงานวิจัย

1. การเสริมผนังคลองรากฟันในการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบางช่วยลดการกระจายความเค้นไปสู่เนื้อฟัน
2. วัสดุเสริมผนังคลองรากฟันชนิดเรซินคอมโพสิตและแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินให้ผลการกระจายความเค้นในเนื้อฟันต่างกัน
3. การใช้เดือยโลหะผสมเหวี่ยงทองชนิดที่สาม โลหะผสมนิกเกิลโครเมียม เดือยสำเร็จรูปสเตนเลสสตีล และเดือยเส้นใยคาร์บอนให้ผลการกระจายความเค้นในเนื้อฟันต่างกัน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบางด้วยวิธีบูรณะแบบต่าง ๆ

ตัวแปรของงานวิจัย

ตัวแปรต้น

- การเสริมผนังคลองรากฟันในการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบางและการไม่เสริมผนังคลองรากฟัน
- วัสดุเสริมผนังคลองรากฟันได้แก่ ชนิดเรซินคอมโพสิตและแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน (เซอรัมเมต)
- เดือยที่ใช้ในการบูรณะได้แก่ เดือยโลหะผสมเหวี่ยงทองชนิดที่สาม เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียม เดือยสำเร็จรูปสเตนเลสสตีล และเดือยเส้นใยคาร์บอน

ตัวแปรตาม*

- รูปแบบการกระจายความเค้นดึง (major principle stress หรือ tensile stress) ในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย
- ค่าความเค้นดึงสูงสุด (maximal tensile stress) ที่เกิดขึ้นในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย

*หมายเหตุ เนื่องจากเนื้อฟันและวัสดุบูรณะฟันส่วนมากมีความแข็งแต่เปราะ แตกหักได้เมื่อได้รับแรงค้ำหนึ่ง โดยจุดเริ่มของการแตกหักจะเกิดที่บริเวณที่มีการสะสมของความเค้นดึงสูง

ข้อตกลงเบื้องต้น

กำหนดคุณสมบัติของเนื้อเยื่อและวัสดุในแบบจำลองให้มีสมบัติเชิงกลเหมือนกันในทุก ๆ ส่วน (homogeneous) มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic) และมีสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) และมีการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของเนื้อเยื่อหรือวัสดุทุกชนิดเป็นแบบสมบูรณ์

ข้อจำกัดของงานวิจัย

การวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ เพื่อพิจารณาลักษณะการกระจายความเค้นดึงในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย แม้ว่าทฤษฎีการวิเคราะห์แบบสามมิติจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากกว่า แต่ในงานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายความเค้นดึงในฟันตัดซี่หน้ากลางบน (maxillary central incisors) ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างสมมาตรโดยเฉพาะรากฟัน ผลที่ได้จากสองมิติจึงไม่แตกต่างกับสามมิติมากนัก การคำนวณแบบจำลองสองมิติทำให้แบบจำลองมีขนาดเล็กลง จึงประหยัดเวลาในการคำนวณและใช้เนื้อที่หน่วยความจำและประมวลผลน้อยลง ซึ่งทำได้ง่ายกว่า¹ อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากการคำนวณไม่สามารถนำไปอ้างอิงกับในสภาพการณ์จริง เพราะแบบจำลองเป็นการสมมติขึ้นตามข้อตกลงเบื้องต้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบตัวแปรที่ต้องการศึกษา ดังนั้นผลที่ได้จึงใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเท่านั้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เป็นการศึกษาเบื้องต้นที่ช่วยทำให้ทราบวิธีการบูรณะฟันที่รักษาคคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบางที่เหมาะสมเพื่อสามารถนำไปใช้งานทางคลินิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ช่วยยืดอายุการใช้งานของฟันที่รักษาคคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบาง
3. เป็นแนวทางในการศึกษาต่อถึงวิธีการบูรณะฟันที่รักษาคคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

ฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วส่วนมากจะเกิดการแตกหักได้ง่าย ทั้งนี้เพราะการสูญเสียเนื้อฟันก่อนและระหว่างการรักษาคลองรากฟัน²⁻³ ดังนั้นการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วด้วยวิธีการที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ฟันมีรูปร่างเหมาะสมและสามารถทำหน้าที่ในช่องปากได้ต่อไป การบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันมีหลักพื้นฐานที่สำคัญสองประการ⁴ คือ ลดการสูญเสียเนื้อฟันส่วนที่ดีและการปกป้องปุ่มฟัน (cusp protection) โดยการคลุมหรือเชื่อมปุ่มฟัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟันหลัง⁴⁻⁷ การบูรณะฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันแล้วอาจเกิดความล้มเหลวขึ้นซึ่งมีทั้งความล้มเหลวที่สามารถบูรณะซ้ำได้ เช่น เดือยหลุด แกนที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุอุดหลุดหรือบิ่นแตกครอบฟันหลุดหรือแตก ตัวฟันแตกหักในแนวนอน และความล้มเหลวที่ไม่สามารถบูรณะซ้ำได้ เช่น รากฟันแตกหักในแนวนอนหรือแนวตั้ง เกิดการทะลุรากฟันจากการเตรียมคลองรากเพื่อใส่เดือย⁶

การบูรณะฟันหลังการรักษาคลองรากฟัน สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับสภาพของฟันที่รักษาคลองรากฟันที่แตกต่างกัน ดังนี้

- **การบูรณะด้วยการอุดปิดทางเข้าสู่คลองรากฟัน (filling)** เป็นการใช้ซีเมนต์ปิดส่วนกัตตาเปอร์ชาแล้วอุดทับด้วยอะมัลกัม หรือเรซินคอมโพสิตร่วมกับบอนด์ วิธีนี้จะทำในกรณีที่เหลือเนื้อฟันดีจำนวนมาก หรือมีสันริมฟัน (marginal ridge) สมบูรณ์ รอยฟันหรือรูเปิดเข้าสู่คลองรากฟันเล็กน้อย สามารถให้การยึดอยู่แก่วัสดุบูรณะได้โดยไม่จำเป็นต้องใส่เดือย⁸⁻¹¹ เดิมเชื่อว่าการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วควรใส่เดือยทุกกรณี ซึ่งเป็นวิธีการรักษาทางอุดมคติเพื่อช่วยให้การยึดอยู่ของแกนและเสริมความแข็งแรงให้แก่ฟัน แม้ว่าฟันชิ้นนั้นจะมีเนื้อฟันส่วนที่ดีเหลืออยู่มากก็ตาม เพราะเดือยจะช่วยกระจายแรงที่ได้รับบนตัวฟันไปตลอดความยาวรากฟัน¹²⁻¹⁷ แต่ในปัจจุบันการบูรณะโดยการใส่เดือยจะทำในกรณีที่มีตัวฟันเหลืออยู่น้อยไม่เพียงพอที่จะให้การยึดอยู่แก่แกนฟัน¹⁸

- **การบูรณะด้วยการปกคลุมปุ่มฟันด้วยอะมัลกัม เรซินคอมโพสิต หรือใช้โลหะเหวี่ยง (onlay)** Linn และ Messer⁵ แนะนำว่าควรทำการบูรณะด้วยการปกคลุมปุ่มฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วแม้ว่าฟันชิ้นนั้นมีสันริมฟันที่สมบูรณ์ จากการศึกษาย้อนหลังจากข้อมูลทางคลินิกของ Sorensen และ Martinoff¹⁹ พบว่าฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้วไม่ได้ทำครอบฟันมีอัตราการเกิดฟันแตกร้อยละ 24.2 ในขณะที่การบูรณะด้วยการครอบฟันทั้งที่มีอัตราการเกิดฟันแตกเพียงร้อยละ 5.2 Abou-Rass⁸ พบว่าเนื้อฟันส่วนที่ไม่ได้ถูกปกคลุมเสี่ยงต่อการแตกเมื่อใช้งาน การบูรณะด้วยวิธีนี้ทำในกรณีที่มีเนื้อฟันเหลืออยู่มาก ไม่จำเป็นต้องใส่เดือยก่อนการปกคลุมปุ่มฟัน Sidoli และ

Setchell²⁰ พบว่าการทำครอบฟันบนเนื้อฟันดีที่เหลืออยู่จะต้านทานต่อการแตกหักมากกว่าการตัดเนื้อฟันดีนั้นแล้วทดแทนโดยการใส่เดือยและแกนก่อนครอบฟัน

- **การบูรณะโดยการใส่หมุด (dentin pin) ร่วมกับแกนอะมัลกัมหรือเรซินคอมโพสิตแล้วครอบฟัน** วิธีนี้ให้การยึดอยู่ของแกนน้อยกว่าการอุดด้วยวัสดุอุดลงในคลองรากฟัน การใส่หมุดเป็นการเพิ่มความเค้นในเนื้อฟัน ทำให้รากฟันแตกหักหรือหมุดอาจทะลุออกนอกเนื้อฟัน จึงไม่แนะนำให้ใช้วิธีนี้²¹⁻²² Orkin และ Louw²³ แนะนำให้ใช้การฝังหมุดร่วมกับการใส่เดือยเพื่อช่วยด้านการหมุนและการหลุดของแกนได้ดีขึ้น

- **การบูรณะด้วยการอุดอะมัลกัมเป็นเดือยและแกน (amalgam core) แล้วครอบฟัน** เป็นการอุดด้วยอะมัลกัมลงในคลองรากฟันลึก 2-4 มิลลิเมตร²⁴ วิธีนี้ไม่ได้ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการแตกหัก เพื่อช่วยให้การยึดอยู่แก่แกนที่สร้างขึ้น ใช้ในกรณีที่ที่มีความสูงของผนังโพรงในตัวฟันน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ข้อควรระวังสำหรับวิธีนี้คือการทะลุผนังรากฟันที่โค้งงอในขั้นตอนการเตรียมคลองรากฟัน²⁵ การอุดอะมัลกัมเป็นเดือยและแกนให้ประสิทธิผลไม่ต่างกับการใส่เดือยและแกนโลหะเหนียวรองรับครอบฟัน^{26,27} และไม่ต่างกับการใส่เดือยสำเร็จรูปร่วมกับแกนอะมัลกัม^{21,26,28}

- **การบูรณะโดยการใส่เดือยสำเร็จรูป (prefabricated post) ร่วมกับแกนอะมัลกัมหรือคอมโพสิต หรือแก้วไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ผสมโลหะเงินแล้วครอบฟัน** ใช้ในกรณีที่เนื้อฟันเหลือไม่เพียงพอที่จะปักหมุดหรือให้การยึดอยู่กับแกนได้ หรือกรณีที่ผนังโพรงฟันหรือคลองรากมีส่วนคอดหากต้องกำจัดส่วนคอดเพื่อใช้เดือยโลหะเหนียวแล้วจะทำให้สูญเสียเนื้อฟันไปมาก

- **การบูรณะด้วยเดือยและแกนโลหะเหนียวแล้วครอบฟัน** ทำในกรณีที่เนื้อฟันเหลือน้อยไม่เพียงพอต่อการยึดอยู่ของครอบฟัน วิธีนี้มีราคาแพง และเสียเวลามากกว่าวิธีอื่น กรณีที่ผนังโพรงฟันหรือคลองรากมีส่วนคอดจะเสียเนื้อฟันในการกำจัดส่วนคอดนั้น และจากการศึกษาข้อมูลย้อนหลังทางคลินิกของ Sorensen และ Martinoff¹⁹ พบว่า ฟันที่บูรณะด้วยเดือยโลหะเหนียวร่วมกับครอบฟันมีอัตราการล้มเหลว (รากฟันแตกหรือรากฟันทะลุ) มากกว่าฟันที่ไม่ได้ใส่เดือยแล้วครอบฟัน และความล้มเหลวที่เกิดขึ้นมักทำให้ฟันไม่สามารถบูรณะได้อีก

จากวิธีการบูรณะที่แตกต่างกันข้างต้นสามารถแยกพิจารณาเป็นวิธีที่ใช้เดือยและไม่ใช้เดือยเดือยที่ใช้แบ่งเป็นเดือยโลหะเหนียวซึ่งทำขึ้นเฉพาะบุคคลด้วยโลหะผสม และเดือยสำเร็จรูปซึ่งอาจทำจากวัสดุที่เป็นโลหะหรืออโลหะ ร่วมกับแกนซึ่งก่อสร้างด้วยวัสดุอุดได้แก่ อะมัลกัม เรซินคอมโพสิต หรือแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน

การบูรณะด้วยการใส่เดือยโลหะเหวี่ยงและเดือยสำเร็จรูป

• เดือยโลหะเหวี่ยง

เดือยและแกนจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน ติดกันเป็นชิ้นเดียว มีความแนบสนิทกับคลองรากได้ดีกว่าเดือยสำเร็จรูป มีความแข็งแรงสูง ความลึมหelvของฟันที่บูรณะส่วนมากทำให้รากฟันแตกหักซึ่งนำไปสู่การถอนฟัน²⁹⁻³² ใช้เวลาในการผลิตนานและมีขั้นตอนยุ่งยากกว่าเดือยสำเร็จรูป Torbjorner Karlsson และ Odman³³ พบว่ามีความลึมหelvเมื่อบูรณะด้วยเดือยโลหะเหวี่ยงร้อยละ 15 ในขณะที่ความลึมหelvเมื่อบูรณะด้วยเดือยสแตนเลสสตีลมีเพียงร้อยละ 8 Mentink และคณะ³⁴ พบว่าอัตราความสำเร็จของฟันหน้าที่บูรณะด้วยเดือยโลหะเหวี่ยงร้อยละ 82 และสามารถอยู่ได้ 10 ปี

• เดือยสำเร็จรูป

เป็นส่วนที่อยู่ในคลองรากฟันและแกนสร้างขึ้นด้วยวัสดุบูรณะฟัน ทำให้มีรอยต่อระหว่างเดือยและแกน เดือยสำเร็จรูปมีทั้งรูปแบบขนานและแบบลิ้ม แต่เดือยทั้งสองรูปแบบก็ไม่สามารถทำให้เกิดความแนบสนิทของเดือยกับคลองรากโดยตลอดได้ เดือยสำเร็จรูปสามารถใช้ได้กับคลองรากที่มีความคอคดทำให้ไม่ต้องสูญเสียเนื้อฟันในการกำจัดความคอคดนั้น ความลึมหelvของฟันที่บูรณะส่วนมากทำให้แกนที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุอุดเกิดการแตกหักมากกว่าการเกิดการหลุดของเดือยหรือรากฟันแตก ทำให้มีโอกาสเกิดรากฟันแตกน้อยกว่าการใช้เดือยโลหะเหวี่ยง^{29,31}

ความสำเร็จในการบูรณะด้วยการใส่เดือย ขึ้นกับปัจจัยดังนี้

• รูปร่างของเดือย

เดือยมีรูปร่างต่าง ๆ ได้แก่ เดือยชนิดเกลียว เดือยทรงขนาน เดือยทรงสอบ ฯลฯ เดือยชนิดเกลียวให้การยึดอยู่มากที่สุดแต่เนื่องจากทำให้เกิดความเค้นในเนื้อฟันมากซึ่งนำไปสู่การแตกหักของรากฟันได้^{35,36} เดือยทรงขนานให้การยึดอยู่ที่ดี สามารถต้านต่อแรงดึง แรงเฉือนและแรงหมุนได้ดีกว่าเดือยทรงสอบ³² เนื่องจากให้การกระจายความเค้นทั่วรากฟัน แต่เดือยทรงสอบจะมีความเค้นมากในบางบริเวณ^{37,38} เดือยทรงขนานจะมีความเค้นมากโดยเฉพาะที่พื้นผิวด้านนอกของรากฟันที่ระดับปลายเดือยเพราะการใช้เดือยทรงขนานจำเป็นต้องเตรียมคลองรากฟันบริเวณปลายเดือยจึงทำให้เนื้อฟันบริเวณนั้นบางลง³⁹⁻⁴¹ เดือยทรงสอบทำให้เกิดผลกระทบแบบลิ้ม (wedging effect) ต่อฟันคือมีความเค้นมากที่ใกล้คอฟันทำให้รากฟันแตกตามแนวแกนฟัน^{30,40-42} Peters และคณะ⁴³ พบว่าทั้งเดือยทรงขนานและเดือยทรงสอบทำให้เกิดความเค้นมากที่ระดับปลายเดือย โดยยังมีความสอบมากเท่าใดค่าความเค้นจะยิ่งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อใส่ครอบฟันโดยมีขอบของครอบฟันโอบรอบเนื้อฟันส่วนที่แข็งแรง 2 มิลลิเมตร (ferrule effect) บนฟันที่ใส่เดือยที่มีรูปร่างแตกต่างกันจะมี

การกระจายความเค้นไม่ต่างกัน³⁸ คือความเค้นมากที่สุดที่รอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน และมีความต้านทานต่อการแตกหักไม่ต่างกัน⁴⁴

● ขนาดของเดือย

การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางจะช่วยเพิ่มการยึดอยู่ แต่ต้องเสียเนื้อฟันมากขึ้นทำให้เกิดฟันแตกหัก^{17,45} บางการศึกษาพบว่าขนาดของเดือยมีผลต่อการยึดอยู่น้อยมาก และเดือยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กทำให้ฟันต้านต่อการแตกหักได้ดีกว่า^{36,46} โดยความหนาของเนื้อฟันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานต่อแรงในแนวด้านข้าง³⁹ ดังนั้นการเตรียมขนาดคลองรากฟันเป็นสิ่งสำคัญ โดยควรให้ขนาดของเดือยและฟันที่แข็งแรงเพียงพอ Hussey⁴⁷ แนะนำว่าเดือยไม่ควรใหญ่กว่าหนึ่งในสามของเส้นผ่านศูนย์กลางของรากฟันและควรเหลือผนังของรากฟันไม่น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร⁴⁸

● ความยาวของเดือย

การเพิ่มความยาวของเดือยจะช่วยเพิ่มการยึดอยู่และช่วยลดความเค้นในรากฟันทำให้สามารถต้านต่อการแตกหักได้มากขึ้น¹⁷ แต่บางการศึกษาพบว่าความยาวของเดือยไม่ได้ช่วยลดความเค้นในรากฟันเพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดเท่านั้น ซึ่งตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ระดับปลายเดือย^{43,49} อย่างไรก็ตามพบว่าเดือยที่ยาวมากกว่าความยาวตัวฟันจะพบอัตราการเกิดความล้มเหลว (รากฟันแตกหรือเดือยหลุด) เพียงร้อยละ 3⁵⁰

● ความแนบของเดือย

เดือยที่แนบสนิทกับคลองรากฟันจะช่วยเพิ่มการยึดอยู่ เดือยที่ไม่แนบจะทำให้มีความหนาของซีเมนต์มาก ซึ่งซีเมนต์มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและความแข็งแรงกต่ำกว่าเดือย เมื่อได้รับแรงบิดเคี้ยวจะเกิดลักษณะคานตีคานงัด ทำให้เกิดความเค้นในรากฟันมากขึ้นและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างของซีเมนต์ ทำให้เดือยหลุดหรือฟันหัก⁵¹ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เรซินซีเมนต์ในการยึดเดือยพบว่าความแนบของเดือยไม่มีผลต่อการยึดอยู่^{52,53} โดยความหนาของเรซินซีเมนต์ที่อยู่รอบ ๆ เปรียบเสมือนตัวดูดซับแรงจากเดือยไปสู่ฟัน⁵⁴ Peter และคณะ⁴³ พบว่าเดือยที่ยึดแน่นกับเนื้อฟันจะกระจายความเค้นอย่างสม่ำเสมอไปตลอดรากฟัน โดยความเค้นสูงสุดยังคงอยู่ที่ตำแหน่งปลายเดือย แต่ถ้าเดือยยึดอยู่กับฟันไม่ดี ความเค้นที่ปลายรากจะมากขึ้นร้อยละ 20-50 และความเค้นในซีเมนต์จะมากขึ้นด้วย

● การออกแบบโครงสร้างของเดือย

การทำให้เกิดการโอบรอบตัวฟันโดยมีแถบของโลหะกว้าง 1-2 มิลลิเมตร หรือปรากฏการณ์เฟอร์รูลที่รอยต่อเดือยและแกนกับฟัน⁵⁵ หรือ/และที่รอยต่อของครอบฟันกับรากฟัน^{56,57} เป็นการเพิ่มความต้านทานต่อการแตกหักตามแนวแกนฟัน และต้านต่อผลกระทบแบบลิ้มจากเดือยทรงสอบ⁴⁰ บางการศึกษาแนะนำว่าการทำให้ขอบของครอบฟันอยู่ต่ำกว่าขอบของเดือยและแกน 1-2 มิลลิเมตร จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดฟันแตกได้อย่างมีประสิทธิภาพ^{24,42,45,58,59} แต่จากผลการศึกษา

ทางโฟโตอีลาสติคพบว่าเดือยและแกนที่มีเฟอร์รูลจะเกิดความเค้นขึ้นที่บริเวณนี้มากกว่าเดือยและแกนที่ไม่มีปรากฏการณ์เฟอร์รูล อันจะนำไปสู่การเกิดฟันแตกได้ง่ายในบริเวณที่มีความเค้นมาก⁶⁰

● ซีเมนต์ที่ใช้ในการยึดเดือย

การใช้ซีเมนต์ติดแน่น (adhesive cement) หรือเรซินซีเมนต์ยึดเดือยทำให้ความแข็งแรงพันธะมากขึ้นเป็นหกเท่าของซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ (zinc phosphate cement) และเป็นสองเท่าของแก้วไอโอโนเมอร์ซีเมนต์^{61,62} นอกจากนี้ Mendoza และคณะ⁶³ พบว่าการยึดเดือยด้วยเรซินซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดฟันแตกได้

● วัสดุที่ใช้ทำเดือย

เดือยที่มีความแข็งแรงมากจะทนต่อแรงบิดเคี้ยวได้มาก จึงไม่บิดงอ ความเค้นที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าคือเนื้อฟัน ทำให้เกิดร้าวฟันแตกหักตามมา มีหลายการศึกษาที่พบว่าฟันที่ใส่เดือยโลหะเหวี่ยงรูปทรงสอบมักพบความล้มเหลวแบบร้าวฟันแตก^{29,30} อย่างไรก็ตามหลายการศึกษาพบว่า เมื่อใส่ครอบฟันโดยมีปรากฏการณ์เฟอร์รูลบนฟันที่ใช้เดือยจากวัสดุที่ต่างกัน จะมีความแข็งแรงกด (compressive strength) ไม่ต่างกัน^{23,24,55,64}

วัสดุที่ใช้ทำเดือยแบ่งเป็นพวกที่เป็นโลหะและอโลหะดังนี้

○ **กลุ่มที่เป็นโลหะ** ได้แก่ โลหะผสมนิเกิล-โครเมียม โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม สแตนเลสสตีล โลหะผสมทอง โลหะผสมไททานเนียม เป็นต้น เดือยกลุ่มนี้จะมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและความแข็งแรงมากกว่าเนื้อฟัน เดือยโลหะอาจถูกกัดกร่อนได้โดยเฉพาะเมื่อสร้างแกนด้วยอะมัลกัม ซึ่งพบว่าอาจทำให้เกิดเดือยหักได้⁶⁵ อย่างไรก็ตามพบว่าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อความล้มเหลวในการรักษาทางคลินิกอย่างชัดเจน^{66,67} นอกจากนี้สีของโลหะอาจสะท้อนผ่านร้าวฟัน กระดูกและเหงือกที่บางออกมาก่อนให้เกิดความไม่สวยงามได้

○ **กลุ่มที่เป็นอโลหะ** ได้แก่

➤ woven polyester bondable ribbon (Ribbond) หรือ polyethylene woven fiber

Karna⁶⁸ พบว่าการใช้ woven polyester bondable ribbon ร่วมกับสารเชื่อมยึดทำเป็นเดือยจะช่วยต้านต่อการเกิดร้าวฟันแตกเพราะความสามารถในการดัดงอ (flexibility) ของเดือยช่วยลดการดำเนินรอยแตกเล็ก ๆ (microcrack) ไปยังร้าวฟัน รอยแตกจึงหยุดอยู่ที่ชั้นระหว่างเดือยกับสารเชื่อมยึด จากการทดสอบนำร่องพบว่าความล้มเหลวที่พบส่วนมากคือครอบฟันหลุด หรือแกนเรซินคอมโพสิตบิ่นไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถนำกลับมาติดใหม่ได้โดยไม่พบว่ามีารแตกของร้าวฟัน

Sirimai Riis และ Morgano⁶⁹ ศึกษาความต้านทานต่อการเกิดรากฟันแตกเมื่อใช้เดือยและแกนแบบต่าง ๆ ในการบูรณะฟันโดยไม่ทำครอบฟัน พบว่าการใช้ Ribbond เป็นเดือยช่วยลดการเกิดการแตกของรากฟัน แต่สามารถต้านต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของรากฟันน้อยกว่าเดือยโลหะเหวี่ยง และเดือยสำเร็จรูป

➤ เดือยเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber post)⁷⁰

ประกอบด้วยสารอีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) ซึ่งมีเส้นใยคาร์บอนเรียงตัวตามแนวยาวเพื่อเสริมความแข็งแรงเฉือนโดยมีปริมาณที่แตกต่างกันแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต สารอีพ็อกซีเรซินเป็นสารกลุ่มเดียวกับ Bis-GMA ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในเรซินคอมโพสิตและเรซินซีเมนต์ทำให้สามารถเกิดพันธะเคมีกับเรซินคอมโพสิตและเรซินซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี เดือยชนิดนี้ไม่ถูกกัดกร่อนเหมือนเดือยโลหะ มีค่ามอดุลัสของสภาพความยืดหยุ่น 21 กิกะปาสคาลซึ่งใกล้เคียงกับฟัน และต่ำกว่าเดือยที่ทำจากสแตนเลสสตีลหรือเดือยที่ทำจากไททานเนียมมาก (190-200 และ 110 กิกะปาสคาล ตามลำดับ) พื้นผิวของเดือยมีความขรุขระ 5-15 ไมครอน ดังนั้นเมื่อใช้ยึดด้วยเรซินซีเมนต์จึงได้ทั้งการยึดติดทางกลและทางเคมีทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกับฟันและกระจายแรงในเนื้อฟันดีขึ้น รวมทั้งมีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับฟันจึงไม่ค่อยพบฟันแตกเหมือนการใช้เดือยโลหะ ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และค่าความแข็งแรงต่อความล้า (fatigue strength) มากกว่าเดือยที่ทำจากไททานเนียมหรือเดือยที่ทำจากโลหะผสมไททานเนียม (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเดือย 3 ชนิด⁷⁰

เดือย	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความแข็งแรงต่อความล้า (MPa)
เดือยเส้นใยคาร์บอน	1,600	1,440
เดือยไททานเนียม	1,000	500
เดือยโลหะผสมไททานเนียม	1,400	700

Purton และ Payne⁷¹ พบว่าเดือยสแตนเลสสตีลมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าและยึดกับรากฟันและวัสดุทำแกนได้ดีกว่าเดือยเส้นใยคาร์บอน เดือยเส้นใยคาร์บอนไม่ทำให้เกิดการแพ้เหมือนเดือยโลหะที่มีนิเกิลเป็นส่วนประกอบ เมื่อเกิดความล้มเหลวมักจะเกิดการบิ่นของเดือยออกบางส่วนหรือเกิดรอยแตกร้าว แต่ถ้าเป็นเดือยสแตนเลสสตีลจะงอ¹¹ และถ้าจำเป็นต้องรู้หรือเดือยออกก็สามารถทำได้ง่ายโดยการใช้ตัวทำลายและกรอด้วยความเร็ว

ต่ำลงในระหว่างไฟเบอร์ แต่ข้อเสียคือราคาแพงกว่าเดือยโลหะและโปร่งต่อรังสีเอ็กซ์
ขอบเขตของเดือยจึงสังเกตได้จากเรซินซีเมนต์ที่มีความทึบต่อรังสีเอ็กซ์

การใช้เดือยเส้นใยคาร์บอนสามารถต้านทานต่อแรงได้น้อยกว่าการใช้เดือยโลหะ
เหวี่ยงสองเท่า^{20,72} และไม่ต่างกับการใช้เดือยสแตนเลสตีล¹¹ ในขณะที่บางการศึกษาพบว่า
เดือยเส้นใยคาร์บอนสามารถต้านทานต่อแรงไม่ต่างกับเดือยโลหะเหวี่ยง แต่มากกว่าเดือย
สแตนเลสตีล⁷³ แต่บางการศึกษาพบว่าเดือยเส้นใยคาร์บอนสามารถต้านทานต่อแรงน้อย
กว่าเดือยสแตนเลสตีลสองเท่า²⁰ อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าปริมาณแรงที่ทำให้เกิด
ความล้มเหลวในเดือยเส้นใยคาร์บอนนั้นมีความมากกว่าแรงบิดเคี้ยวจริง การใช้เดือยโลหะ
เหวี่ยงทำให้เกิดฟันแตกร้อยละ 91 ถึง 100^{31,74,75} มากกว่าการใช้เดือยสแตนเลสตีลและ
เดือยเส้นใยคาร์บอนที่ทำให้ฟันแตกร้อยละ 50⁷⁶ ถึง 81⁷⁵ และร้อยละ 0^{31,76} ถึง 5⁷⁷ ตาม
ลำดับ ทั้งนี้เพราะเดือยโลหะเหวี่ยงมีความแข็งมากจึงไม่แตก แต่จะส่งผ่านแรงมายังเนื้อ
ฟันบริเวณขอบของครอบฟัน⁷² ในขณะที่เดือยเส้นใยคาร์บอนส่วนมากจะแตกที่รอยต่อของ
เดือยและแกน⁷⁴ เพราะการเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอนตามยาวซึ่งมีความแข็งแรงดึงตามยาว
สูงและความอดุลล์ของสภาพยืดหยุ่นใกล้เคียงกับฟันจึงดูดซับและกระจายแรงเข้าในเนื้อฟัน
ทำให้ตำแหน่งการสะสมความเค้นเปลี่ยนจากบริเวณขอบของครอบฟันมายังบริเวณรอยต่อ
ของเดือยกับแกนฟันแทน การที่เดือยนี้สามารถถูกตัดงอได้สูงดังนั้นเมื่อได้รับแรงจะทำให้
เกิดการทำลายฟันระหว่างซีเมนต์กับเดือย ทำให้ครอบฟันที่ครอบบนเดือยนี้อาจเสี่ยงการ
ปิดสนิทตามขอบ ทำให้เกิดการรั่วของขอบครอบฟันและมีฟันผุตามมาได้^{31,54}

นอกจากนี้ยังมีเดือยวัสดุอื่นที่ไม่ใช่โลหะ⁷⁸ ได้แก่ เดือยที่ทำจากเส้นใยแก้ว เช่น
Luscent Anchor Post ของ Dentatus, FibreKor Post ของ Jeneric/Pentron,
Wallingford, Aestheti-Post ของ Bisco หรือเดือยเป็นเรซินที่ใส่ฟิลเลอร์ ได้แก่ ParaPost
White Post ของ Whaledent หรือเดือยที่ทำจากเซรามิค ได้แก่ เซอร์โคเนียม (zirconium)
เช่น Experimental ของ Dentsply เป็นต้น

- วัสดุที่ใช้ทำแกน

ได้แก่ อะมัลกัม, เรซินคอมโพสิต และแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน

➤ **อะมัลกัม**⁸ มีความแข็งแรงกด ความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลล์ของสภาพยืดหยุ่น
และความเสถียรทางมิติมากกว่าเรซินคอมโพสิตและแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน นอกจากนี้
นี้อะมัลกัมสามารถถูกกัดกร่อนทำให้เกิดสารที่ช่วยลดการรั่วซึมตามขอบได้ อย่างไรก็ตาม
การใช้อะมัลกัมทำแกนจะใช้เวลาในการก่อตัวนาน ไม่สามารถหล่อแต่งรูปร่างในครั้งเดียว สี
ไม่สวย จึงไม่นิยมใช้ในฟันหน้า

➤ **เรซินคอมโพสิต**⁷⁹ ชนิดที่ใช้ในการทำแกนฟันเป็นชนิดไฮบริด (hybrid) ที่มีฟิลเลอร์ร้อยละ 25 โดยปริมาตรและร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก มีทั้งชนิดบ่มเองและบ่มตัวด้วยแสง ปัจจุบันนิยมใช้ชนิดบ่มตัวด้วยแสงเพราะใช้ง่าย สามารถควบคุมเวลาในการก่อตัวได้ และมีความแข็งแรงกดี เรซินคอมโพสิตมีการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์มาก ความเสถียรทางมิติต่ำเพราะสามารถดูดความชื้นทำให้เกิดการขยายตัว ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงสองถึงสิบเท่าของฟันธรรมชาติขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินคอมโพสิต

➤ **แก้วไอโอโนเมอร์ (Glass ionomer)**⁸⁰ ประกอบด้วยผงแก้วฟลูออโรอะลูมิเนียมซิลิเกต (fluoroaluminosilicate glass) และกรดโพลีคาร์บอกซิลิก (polycarboxylic acid) ไม่นิยมใช้ทำแกนเนื่องจากความแข็งแรงดิ่งต่ำ จึงมีการดัดแปลงโดยเติมผงโลหะผสมเงินและทำการหลอมที่อุณหภูมิสูงเรียกว่า เซอร์เมต (cermet) ทำให้ความแข็งแรงกดีและความแข็งแรงดัด (flexural strength) มากขึ้น^{81,82} ในขณะที่บางการศึกษาพบว่าแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินมีความแข็งแรงกดี ความต้านทานต่อการคืบ (creep resistance) ลดลง⁸³ อย่างไรก็ตาม McLean⁸⁴ พบว่าแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้เป็นแกนฟันได้

การบูรณะฟันที่รักษารากหลายวิธีที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำไปประยุกต์ในฟันที่รักษารากคลองรากฟันแล้วที่มีสภาพแตกต่างกัน ในฟันที่มีส่วนต้นของคลองรากฟันผายออกหรือมีผนังบางจากสาเหตุต่าง ๆ นั้นอาจทำให้ทันตแพทย์เกิดความลังเลในการตัดสินใจให้การรักษาว่าจะทำการบูรณะฟันซี่นั้นต่อหรือควรทำการถอนฟันซี่นั้นออกไป Tjan และ Whang⁴⁵ และ Sorensen และ Engelman^{30,58} พบว่าแม้ความหนาของเนื้อฟันที่บริเวณขอบของครอบฟัน ไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการแตกหักก็ตาม แต่ถ้าผนังบางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรก็จะมีโอกาสแตกมากขึ้น⁴³ การบูรณะโดยการทำเดือยโลหะเพียงให้มีรูปร่างแนบไปกับคลองรากฟันที่ผายออกอาจทำให้เกิดผลกระทบแบบลิ้มทำให้ฟันแตกตามแนวแกนฟัน หรือการบูรณะโดยการใส่เดือยสำเร็จรูปก็ไม่สามารถทำให้แนบสนิทพอดีกับคลองรากส่วนต้นที่ผายออกทำให้มีความหนาซีเมนต์บริเวณดังกล่าวมาก และถ้าซีเมนต์มีความแข็งแรงกดีต่ำก็อาจทำให้ซีเมนต์แตกและส่งผลให้เกิดเดือยหลุดหรือฟันแตกได้ นอกจากนี้ถ้าฟันซี่ดังกล่าวมีความยาวรากมากพอ อาจให้การรักษาโดยการดิ่งฟันให้สูงขึ้นมาในช่องปากมากขึ้นโดยการจัดฟันและกำจัดผนังคลองรากส่วนที่บางแล้วให้การรักษาด้วยเดือยและครอบฟันตามปกติ แต่วิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายและเวลามาก ไม่สามารถใช้กับฟันที่มีความยาวรากสั้นได้ ดังนั้นการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากบางจึงมีอัตราเสี่ยงต่อความล้มเหลวสูง อย่างไรก็ตามกรณีที่ต้องการเก็บฟันซี่นั้นไว้ อาจจากภาวะทางร่างกายไม่สมบูรณ์ทำให้ไม่สามารถถอนฟันได้ โดยฟันที่มีสภาพดัง

กล่าวไม่จำเป็นต้องถูกใช้เป็นส่วนหลักหรือรับแรงมาก มีการสบฟันแบบปกติ ดังนั้นการบูรณะฟันด้วยวัสดุบูรณะที่สามารถเชื่อมยึดติดกับเนื้อฟันที่ดีร่วมกับการออกแบบการสบฟันของครอบฟันที่เหมาะสมน่าจะช่วยยืดอายุการใช้งานของฟันซี่นี้ได้

มีการวิจัยที่เสนอการใช้วัสดุบูรณะมาทดแทนเนื้อฟันส่วนที่หายไปและช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่ผนังคลองรากส่วนที่บางก่อนที่จะบูรณะด้วยการใส่เดือยและครอบฟัน Lui⁸⁵ ใช้เรซินคอมโพสิตชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองที่มีคุณสมบัติที่บดรังสีเอกซ์มีชื่อทางการค้าว่า Profile เสริมในคลองรากฟันส่วนต้น จากนั้นจึงกรอเตรียมคลองรากให้เกิดส่วนด้านการหมุนและส่วนค้ำยัน (positive seat) เพื่อไม่ให้เดือยจมลงในคลองรากมากเกินไปขณะยึดเดือยและในระหว่างการใส่บดเคี้ยว⁸⁶ โดยเชื่อว่าเรซินคอมโพสิตเป็นวัสดุที่แข็งแรงพอที่จะใช้เป็นวัสดุบูรณะฟันหรือเป็นแกนรองรับครอบฟันได้ การเสริมผนังคลองรากฟันส่วนต้นและใช้เดือยที่มีขนาดพอดีกับคลองรากส่วนล่างจะเป็นการลดขนาดเดือยลง ทำให้สามารถต้านทานต่อการเกิดการแตกของรากฟันได้ดีขึ้นกว่าการใช้เดือยที่มีขนาดใหญ่^{17,37,87} และได้รูปร่างคลองรากที่เหมาะสมกับการใช้เดือยทรงขนานซึ่งจะดีกว่าการใช้เดือยทรงสอบตามลักษณะคลองรากเดิม ที่จะทำให้เกิดผลกระทบแบบลิ้มและความเค้นมากที่คลองรากส่วนต้นซึ่งมีผนังบาง^{49,88,89} นอกจากนี้การหดตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์จะช่วยให้ผนังคลองรากที่บางถูกรวบเข้าหากัน ทำให้ต้านต่อการเกิดการแตกของรากฟันได้มากขึ้น⁹⁰ การเสริมผนังคลองรากด้วยเรซินคอมโพสิตทำได้ง่ายและเร็ว ได้คลองรากที่ขนาดพอดีกับเดือยที่ต้องการ และสามารถพิมพ์คลองรากเพื่อทำแบบเดือยในห้องปฏิบัติการหรือปั้นแบบเดือยโดยตรงในช่องปากเพื่อสร้างเดือยโลหะเหวี่ยงแล้วทำครอบฟันตามปกติ ต่อมา Lui⁹¹ ใช้แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินเสริมในคลองรากฟันแล้วจึงทำเดือยมายึดด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ หลังจากติดตามผลในระยะ 5 ปี ยังไม่พบว่ามีรากฟันแตก หรือเดือยหรือครอบฟันหลุด แม้ว่าความแข็งแรงฟันจะกับเนื้อฟันของแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินน้อยกว่าแก้วไอโอโนเมอร์แต่ก็เพียงพอต่อการยึดกับเนื้อฟันที่ถูกรับสภาพ แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินยังมีคุณสมบัติทางกลดีกว่า^{84,92} การรั่วซึมตามขอบน้อยกว่าเรซินคอมโพสิตเนื่องจากขณะก่อตัวมีการหดตัวน้อยกว่า^{93,94} ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับเนื้อฟันทำให้วัสดุยึดติดกับเนื้อฟันในระยะยาวได้ดี สามารถปล่อยฟลูออไรด์ได้จึงเหมาะที่จะใช้ในกรณีที่เสียเนื้อฟันเนื่องจากฟันผุ ที่บดรังสีเอกซ์ ไม่ถูกกัดกร่อน⁸¹ แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินมีรูปทรงน้อยและมีอนุภาคเงินที่สามารถดูดซับแรง ทำให้เพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อการเกิดฟันแตก⁹⁵ มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนจากการขัดถูมากกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์และอะมัลกัม⁹⁶ แต่น้อยกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดแมโครฟิลล์ และอะมัลกัมชนิดดิสเพอร์ส¹¹ การใช้แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินเสริมภายในคลองรากแล้วยึดเดือยและครอบฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ทำให้เนื้อฟันและวัสดุบูรณะรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เสริมความแข็งแรงแก่ฟันที่

อ่อนแอได้ดี⁹¹ ต่อมา Lui⁹⁷ ใช้เดือยพลาสติกส่งผ่านแสง (light-transmitted plastic post) ในการเสริมผนังคลองรากส่วนต้นด้วยเรซินคอมโพสิตเพื่อช่วยในการบ่มตัวด้วยแสง แล้วจึงใส่เดือยโลหะเหวี่ยงหรือเดือยสำเร็จรูปร่วมกับแกนเรซินคอมโพสิต

Saupe Gluskin และ Radke⁹⁸ เปรียบเทียบการใช้เดือยโลหะผสมทองที่มีรูปร่างตามลักษณะคลองรากส่วนต้นที่ผายออกกับการเสริมผนังคลองรากด้วยเรซินคอมโพสิตก่อนทำเดือยที่มีรูปทรงขนานและยึดเดือยด้วยเรซินซีเมนต์โดยไม่ได้ทำครอบฟัน พบว่าการเสริมผนังคลองรากด้วยเรซินคอมโพสิตเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดฟันแตกมากกว่าร้อยละ 41.1-52.4 ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นพบว่ามีรากฟันแตกมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนความล้มเหลวของฟันระพบเพียงร้อยละ 15 ซึ่งเกิดได้ทั้งระหว่าง เรซินกับเนื้อฟันและเรซินกับเดือย Saupe และคณะ⁹⁸ อธิบายว่าการเสริมด้วยเรซินคอมโพสิตซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นใกล้เคียงกับเนื้อฟันเป็นการกระจายความเค้นได้ดี⁹⁹ ในขณะที่การใช้เดือยโลหะเหวี่ยงโดยไม่เสริมผนังคลองรากนั้น โลหะซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นมากกว่าฟันจะส่งผ่านความเค้นมาที่ผนังรากฟันส่วนที่บาง ต่อมา Sirimai และคณะ⁶⁹ แนะนำการใช้ Ribbond ในการเสริมผนังคลองรากฟันที่บางเพื่อช่วยลดเวลา ค่าใช้จ่าย และลดการแตกของรากฟัน

จากวิธีการเสริมผนังคลองรากฟันที่มีผู้ศึกษาหลายท่านเสนอมานี้ มีการใช้วัสดุและวิธีการในการเสริมคลองรากฟันที่แตกต่างกัน และจากการทบทวนข้อมูลจากวารสารมีทั้งคำแนะนำที่สอดคล้องกันและขัดแย้งกันในการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้ว ยังไม่มีข้อมูลรองรับถึงผลระยะยาวหรือข้อสรุปเกี่ยวกับวิธีการที่ดีที่สุดในการบูรณะฟันที่มีผนังส่วนต้นของคลองรากบางหรือข้อมูลแสดงความน่าเชื่อถือของวิธีต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายความเค้นในเนื้อฟันและวัสดุที่ใช้ในการบูรณะ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการกระจายความเค้นภายในวัสดุจากการบูรณะด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการหาวิธีบูรณะที่เหมาะสม

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) สามารถนำมาใช้ศึกษาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่มีความซับซ้อน ซึ่งอาจประกอบด้วยวัสดุหลายประเภทรวมอยู่ด้วยกัน มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันในแต่ละบริเวณและสามารถทำการวิเคราะห์ความเค้นได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าการศึกษากการกระจายความเค้นด้วยวิธีอื่น เช่น วิธีโฟโตอีลาสติก วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่ง่าย เร็ว ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อย สามารถลอกเลียนสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีความซับซ้อนได้อย่างครบถ้วนกว่าวิธีอื่น รวมทั้งสามารถกำหนดขนาดและทิศทางของแรงที่มากระทำต่อแบบจำลองได้หลายแนว ผลของการวิเคราะห์ทำให้เห็นการกระจายความเค้นภายในโครง

สร้างนั้นได้และสามารถนำไปทำนายความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น เพื่อหาทางแก้ไขจุดบกพร่องนั้นและป้องกันไม่ให้เกิดความล้มเหลวขึ้นได้

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์¹⁰⁰ ช่วยในการออกแบบชิ้นงานและโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยพัฒนาริเริ่มจากงานวิจัยทางด้านอวกาศและการบิน โดยใช้หลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาที่เรากำหนดขึ้นเป็นเงื่อนไขสมมติและสร้างแบบจำลอง จากนั้นจึงแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) ที่มีรูปทรงเรขาคณิตง่าย ๆ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม รูปทรงสี่หน้า รูปทรงหกหน้า แต่ละเอลิเมนต์ต่อกันด้วยจุด (node) จากนั้นจึงกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแต่ละชนิดในแบบจำลอง รวมทั้งเงื่อนไขของแรงที่กระทำบนแบบจำลอง ผลของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดและเอลิเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ และแก้สมการหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนความสัมพันธ์ต่อเนื่องบนจุดและเอลิเมนต์ต่าง ๆ นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น ผลที่ได้จะเป็นค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างซึ่งสามารถนำไปหาค่าอื่นต่อไปได้ เช่น ค่าความเครียด (strain) หรือความเค้น (stress) และสามารถแสดงเป็นภาพกราฟฟิกทำให้เห็นภาพการกระจายความเค้นและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง

สมการทางคณิตศาสตร์ของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์เชิงกลของของแข็ง (solid mechanics) อาศัยหลักการสมบัติทางกลของสปริง ซึ่งมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้แก่การยืดออกหรือหดเข้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแรงที่ได้รับและความแข็งของสปริง (stiffness) ดังสมการ

$$\text{Force (F)} = \text{Stiffness (K)} * \text{Deflection } (\Delta L)$$

ซึ่งความแข็งของสปริงคือความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่าง โดยขึ้นอยู่กับค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น และรูปทรงทางเรขาคณิต (geometry) ของวัตถุนั้น¹⁰¹

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยทางทันตกรรมอย่างแพร่หลาย อาทิ การศึกษาการกระจายแรงรอบรากเทียมแบบต่าง ๆ¹⁰² ศึกษาผลของเดือยต่อการกระจายความเค้นในเนื้อฟันในฟันที่รักษาคลองรากฟันแล้ว^{43,49,61} เป็นต้น ในการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายความเค้นในครอบฟันเดือยที่ผ่านมาโดยมุ่งศึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้เดือยชนิดต่าง ๆ ในการกระจายความเค้นภายในครอบฟันเดือยที่มีความหนาของผนังคลองรากฟันปกติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการกระจายความเค้นในเนื้อฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางซึ่งเป็นปัญหาที่ทันตแพทย์สามารถพบได้บ่อย เพื่อหา

วิธีการบูรณะพื้นที่มีลักษณะดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม และเป็นแนวทางในการศึกษาต่อถึงวิธีการบูรณะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อยืดอายุการใช้งานของพื้นที่นั้นต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
 - หน่วยประมวลผล (CPU) Intel Pentium III 866 MHz.
 - หน่วยความจำชั่วคราว (RAM) 256 Mb.
 - หน่วยความจำถาวร 20 Gb.
2. โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (MSC/Nastran for Windows 4.5, MacNeal-Schwendler Corporation, สหรัฐอเมริกา)
3. กระดาษกราฟสำหรับวาดแบบจำลอง
4. แผ่นซีดีสำหรับบันทึกผลการทดลอง

วิธีการวิจัย

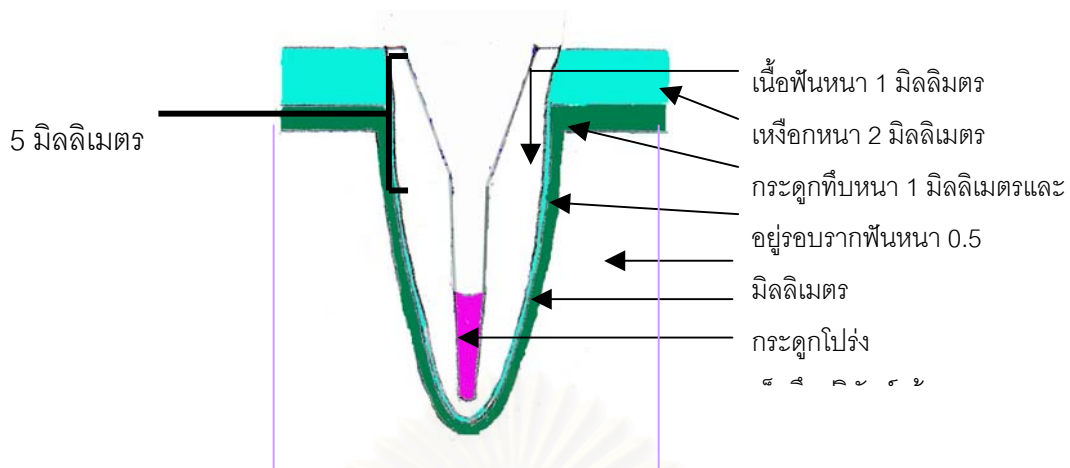
ทำการศึกษาการกระจายความเค้นในฟันที่รักษารากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบาง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติในฟันตัดซี่หน้ากลางบนแนวด้านใกล้แก้ม-ด้านใกล้ลิ้น (bucco-lingual) ซึ่งมีขนาดมิติ¹⁰³ ดังนี้

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

แบบจำลองฟันก่อนการบูรณะ (รูปที่ 1) จะมีผนังคลองรากฟันส่วนต้นหนา 1 มิลลิเมตรโดยรอบแล้วค่อย ๆ หนาขึ้นเป็นระยะ 5 มิลลิเมตร ตัดส่วนตัวฟันเหนือรอยต่อเคลือบฟันและเคลือบรากฟัน 1 มิลลิเมตร แบบจำลองการบูรณะประกอบด้วยชั้นเนื้อฟัน เดือย แกนฟัน กัดตาเปอร์ซามีความยาว 4 มิลลิเมตร จุดอยู่เหนือรูเปิดรากฟัน 1 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตอนปลาย 0.6 มิลลิเมตร (เท่าขนาดไฟล์เบอร์ 60¹⁰⁴) รากฟันฝังอยู่ในกระดูกโปร่งที่มีกระดูกที่หนา 1 มิลลิเมตร โดยมีเอ็นยึดปริทันต์ หนา 0.2 มิลลิเมตรและกระดูกที่บอบรากฟันหนา 0.5 มิลลิเมตรล้อมรอบอยู่ รากฟันยึดอยู่ในกระดูกอย่างสมบูรณ์ มีเหงือกหนา 2 มิลลิเมตร กระดูกที่บอบอยู่ต่ำกว่ารอยต่อเคลือบ

พื้นและเคลือบรากฟัน 1 มิลลิเมตร¹⁰³ ครอบฟันเป็นชนิดครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (porcelain fused to metal) มีความหนาที่ปลายฟัน 2 มิลลิเมตร ความหนาโดยรอบแกนฟันหนา 1 มิลลิเมตร ยกเว้นด้านใกล้ริมฝีปากหนา 1.5 มิลลิเมตร โลหะที่ใช้เป็นโลหะทองชนิดที่สาม (gold alloy III) หนา 0.5 มิลลิเมตร เคลือบด้วยกระเบื้องเฟลด์สปาร์ (feldspathic porcelain) ขอบของครอบฟันเป็นชนิด ไชลเดอร์ (shoulder) กว้าง 1.5 มิลลิเมตรทางด้านใกล้แก้ม และกว้าง 1 มิลลิเมตรทางด้านใกล้ลิ้น จากแบบจำลองสภาพฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางที่กำหนดขึ้น พบว่าไม่สามารถสร้างให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์รูลได้เนื่องจากเหลือเนื้อฟันบริเวณขอบน้อยเกินไป

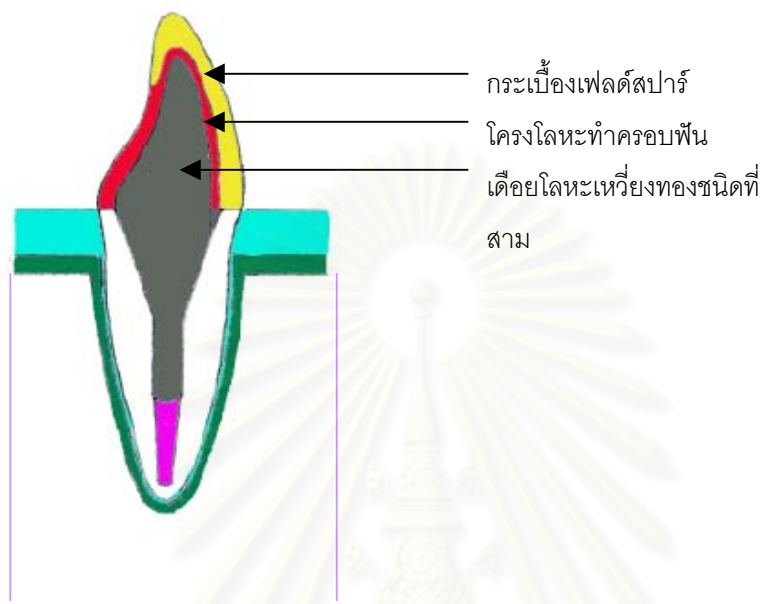
- กำหนดวิธีการบูรณะฟันเป็น 10 วิธี ดังนี้
 1. บูรณะด้วยเดือยโลหะเหวียงขนาดตามคลองรากฟันที่เป็นอยู่
 - 1.1 โลหะผสมทองชนิดที่สาม : ทอง-ไม่เสริมผนัง (รูปที่ 2)
 - 1.2 โลหะผสมนิกเกิลโครเมียม : นิกเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง (รูปที่ 3)
 2. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิต แล้วใช้เดือยโลหะเหวียงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 2.1 โลหะผสมทองชนิดที่สาม : ทอง-คอมโพสิต (รูปที่ 4)
 - 2.2 โลหะผสมนิกเกิลโครเมียม : นิกเกิลโครเมียม-คอมโพสิต (รูปที่ 5)
 3. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิต แล้วใช้เดือยสำเร็จรูปทรงขนานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 3.1 เดือยสเตนเลสสตีล : สเตนเลสสตีล-คอมโพสิต (รูปที่ 6)
 - 3.2 เดือยเส้นใยคาร์บอน : คาร์บอน-คอมโพสิต (รูปที่ 7)
 4. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน แล้วใช้เดือยโลหะเหวียงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 4.1 โลหะผสมทองชนิดที่สาม : ทอง-เซอร์เมต (รูปที่ 8)
 - 4.2 โลหะผสมนิกเกิลโครเมียม : นิกเกิลโครเมียม-เซอร์เมต (รูปที่ 9)
 5. บูรณะโดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินบูรณะ แล้วใช้เดือยสำเร็จรูปทรงขนาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร
 - 5.1 เดือยสเตนเลสสตีล : สเตนเลสสตีล-เซอร์เมต (รูปที่ 10)
 - 5.2 เดือยเส้นใยคาร์บอน : คาร์บอน-เซอร์เมต (รูปที่ 11)



รูปที่ 1 แบบจำลองฟันก่อนการบูรณะ

หมายเหตุ

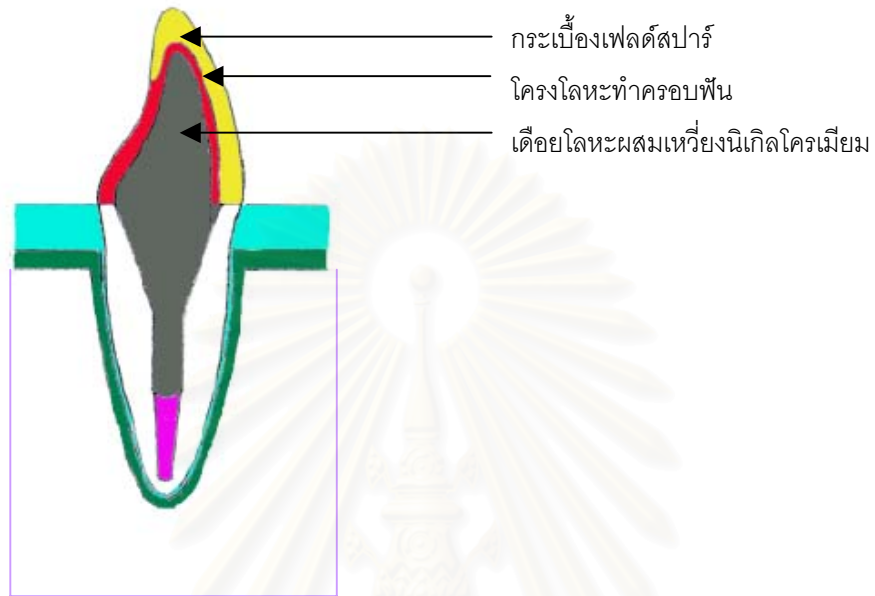
-  เนื้อฟัน
-  เหงือกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระดูกลึบ
-  กระดูกร่อง
-  กัดตาเปอร์ซิก



รูปที่ 2 แบบจำลองการบูรณะด้วยเดือยโลหะเหวี่ยงทองชนิดที่สาม

หมายเหตุ

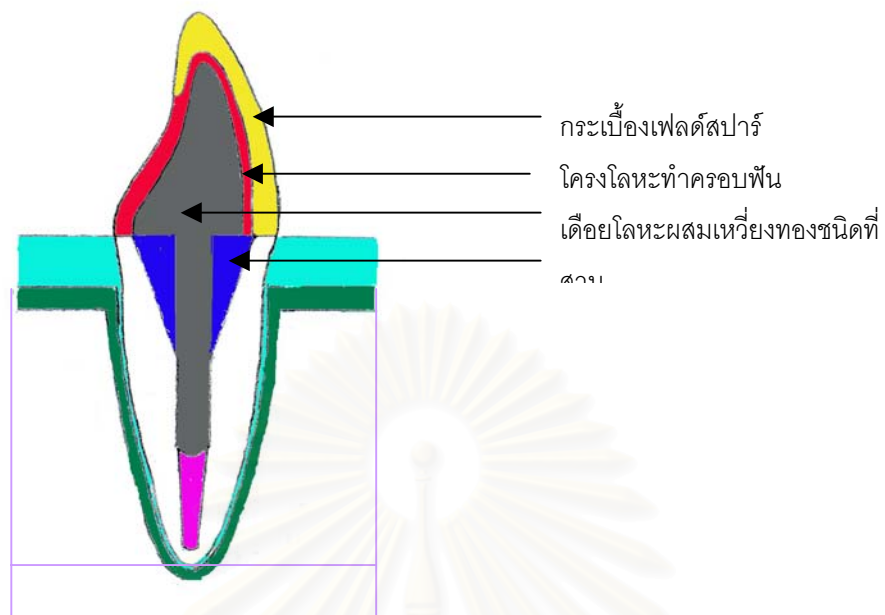
-  เนื้อฟัน
-  เหงือกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระจกที่บ
-  กระจกโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ชา
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  เดือยโลหะเหวี่ยงทองชนิดที่สาม



รูปที่ 3 แบบจำลองการบูรณะด้วยเต็อยโลหะผสมเหวียงนิเกิลโครเมียม







หมายเหตุ

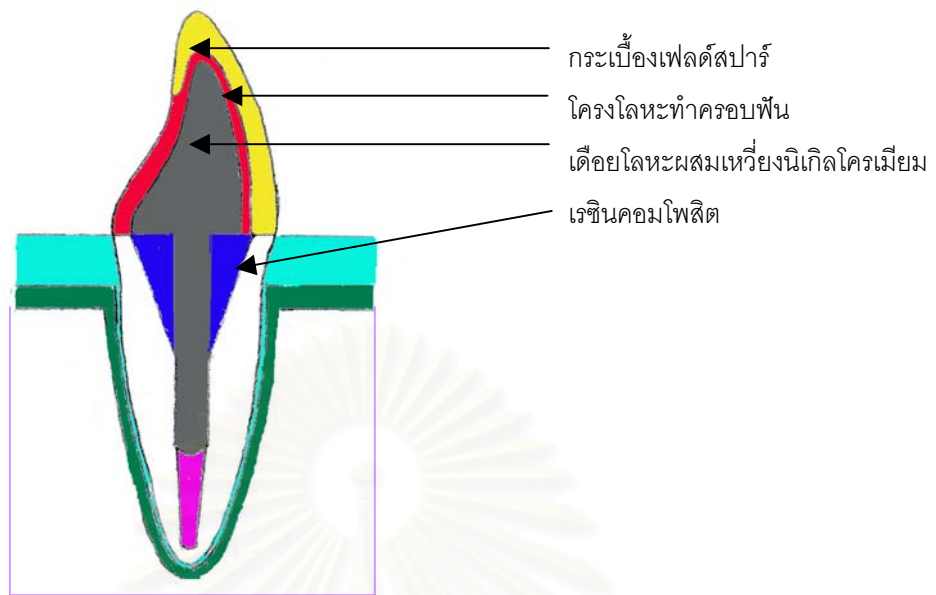
-  เนื้อฟัน
-  เหล็กและเอ็นยี่ดปริทันต์
-  กระดุกทึบ
-  กระดุกโปร่ง
-  กัตตาเปอร์ช่า
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  เต็อยโลหะผสมเหวียงนิเกิลโครเมียม



รูปที่ 4 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิต แล้วใช้เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม










หมายเหตุ

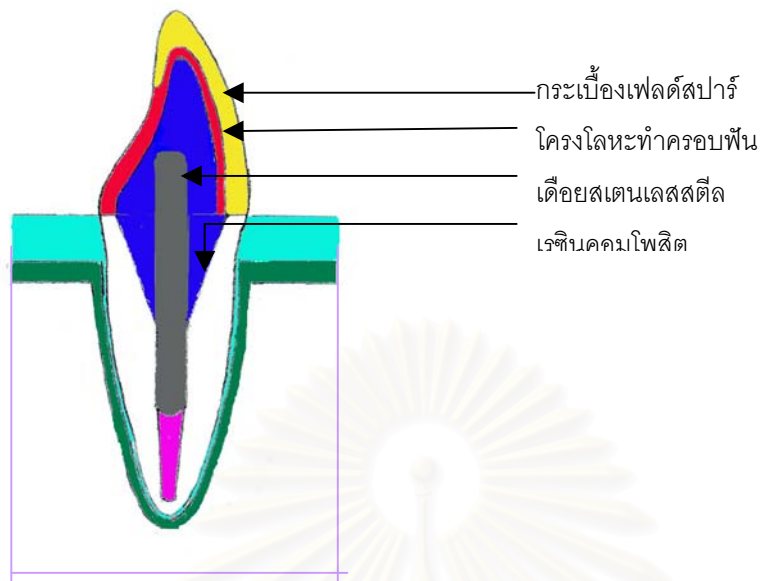
-  เนื้อฟัน
-  เหงือกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระจกทึบ
-  กระจกโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ชา
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  เรซินคอมโพสิต
-  เดือยโลหะผสมเหวี่ยงทองชนิดที่สาม



รูปที่ 5 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิต แล้วใช้เดือยโลหะผสมนิเกิลโครเมียม

หมายเหตุ

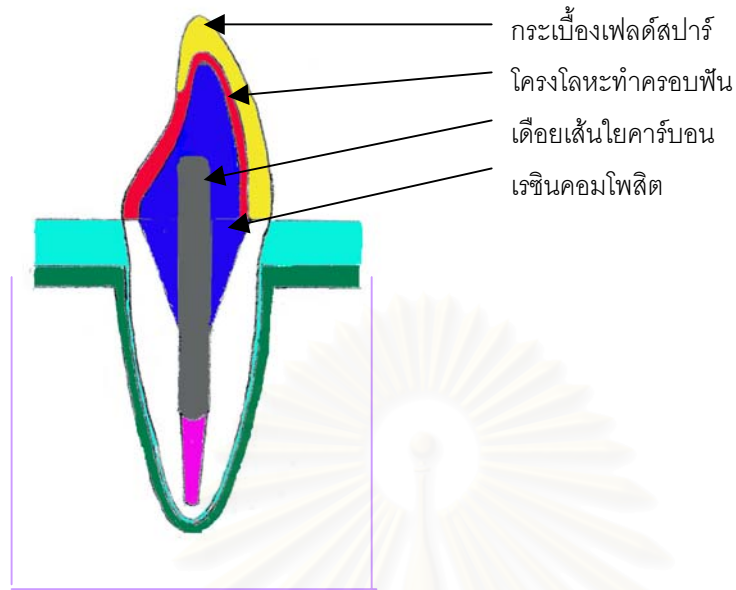
-  เนื้อฟัน
-  เหงือกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระจุกทึบ
-  กระจุกโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ชา
-  ครอบเบื่องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  เรซินคอมโพสิต
-  เดือยโลหะผสมเหวียงนิเกิลโครเมียม



รูปที่ 6 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตแล้วใช้เดือยสแตนเลสสตีล

หมายเหตุ

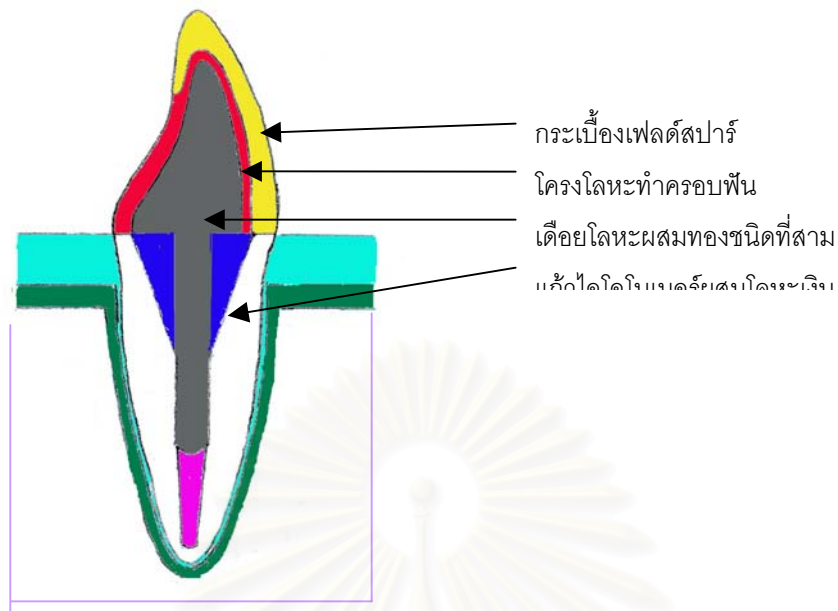




รูปที่ 7 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตแล้วใช้เดือยเส้นใยคาร์บอน

หมายเหตุ

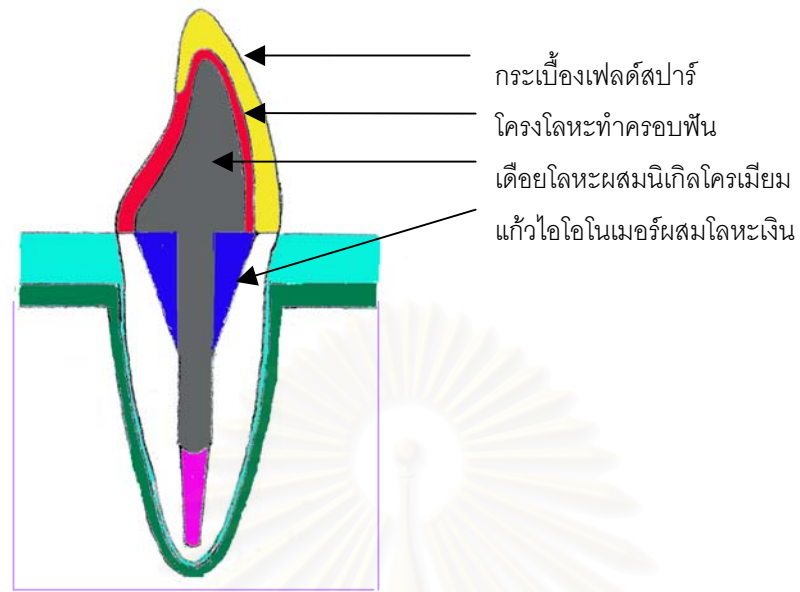
-  เนื้อฟัน
-  เหยือกและเอ็นยึดปริทันต์
-  ครอบฟัน
-  ครอบฟันโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ซิก
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  เรซินคอมโพสิต
-  เดือยเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 8 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม

หมายเหตุ

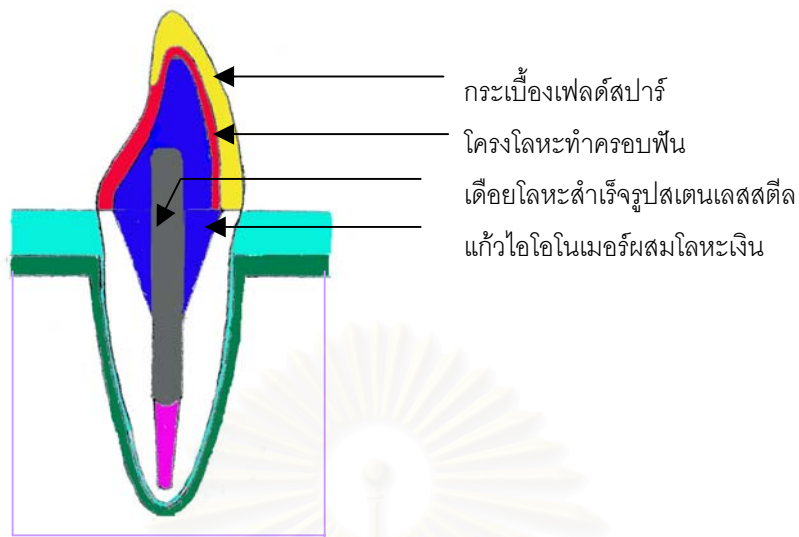
-  เนื้อฟัน
-  เหนืออกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระจุกที่บ
-  กระจุกโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ชา
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน
-  เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม



รูปที่ 9 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียม









หมายเหตุ

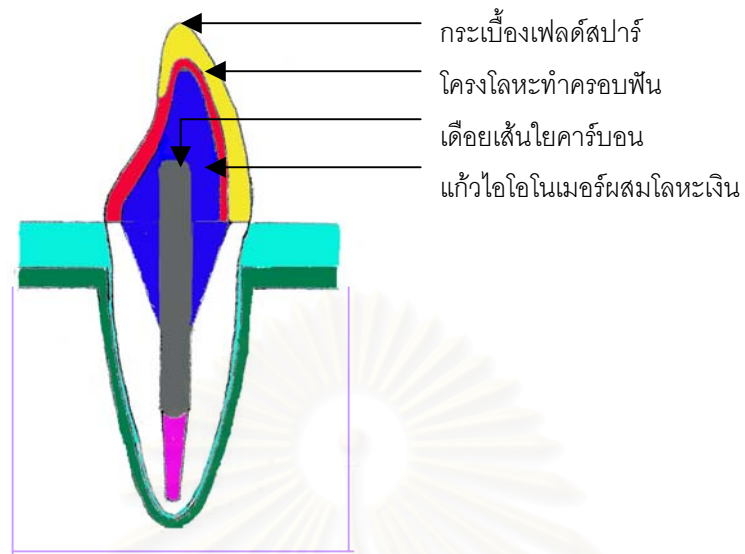
-  เนื้อฟัน
-  เหนืออกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระจุกทึบ
-  กระจุกโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ชา
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน
-  เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียม



รูปที่ 10 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือยสเดนเลสตีล

หมายเหตุ

-  เนื้อฟัน
-  เหนือกและเอ็นยัดปริทันต์
-  ครอบดูกที่บ
-  ครอบดูกโปรง
-  กัตตาเปอร์ชา
-  ครอบเบื่องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน
-  เดือยโลหะสำเร็จรูปสเดนเลสตีล



รูปที่ 11 แบบจำลองการเสริมผนังคลองรากด้วยแก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงินแล้วใช้เดือยเส้นใยคาร์บอน

หมายเหตุ

-  เนื้อฟัน
-  เหงือกและเอ็นยึดปริทันต์
-  กระดูกทึบ
-  กระดูกโปร่ง
-  กัดตาเปอร์ชา
-  กระเบื้องเฟลด์สปาร์
-  โครงโลหะสำหรับครอบฟัน
-  แก้วไอโอโนเมอร์ผสมโลหะเงิน
-  เดือยโลหะเส้นใยคาร์บอน

แบบจำลองที่สร้างรวมชั้นของเคลือบรากฟันไว้กับชั้นเนื้อฟันเนื่องจากเป็นชั้นที่บางมาก (16-60 ไมครอนที่ระยะหนึ่งในสามของรากฟันส่วนต้น และ 200 ไมครอนที่ระยะหนึ่งในสามของรากฟันส่วนปลาย¹⁰⁵) และมีคุณสมบัติคล้ายเนื้อฟัน¹⁰⁶ ในแบบจำลองจะไม่มีชั้นของซีเมนต์ที่ยึดติดอยู่กับฟัน และครอบกับฟัน เนื่องจากเป็นชั้นที่บางมาก (25-40 ไมครอน) เมื่อเทียบกับส่วนประกอบอื่นของแบบจำลองและในการทดลองนี้จะสมมติให้แต่ละส่วนมีการยึดติดกันอย่างสมบูรณ์

เมื่อได้แบบจำลองแล้วจึงแบ่งแบบจำลองออกเป็นหน่วยย่อยเล็ก ๆ (node และ element) ทำการกำหนดให้ส่วนฐานของกระดูกที่รองรับรากฟันในแบบจำลองเป็นส่วนที่ตรึงแน่นไม่มีการเคลื่อนขยับเมื่อได้รับแรง (boundary constraint) ในการวิเคราะห์กำหนดให้เนื้อเยื่อหรือวัสดุทุกชนิดในแบบจำลองมีคุณสมบัติเชิงกลเหมือนกันในทุก ๆ ส่วน (homogeneous) มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic) และคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) กำหนดค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio) ของแต่ละวัสดุบนแบบจำลอง แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของของแต่ละวัสดุบนแบบจำลอง

Material	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson ratio	Reference
เนื้อฟัน	18.6	0.31	106
เอ็นยึดปริทันต์	0.0689	0.45	107
เหงือก	0.003	0.45	108
กระดูกทึบ	13.7	0.30	106
กระดูกโปร่ง	1.37	0.30	106
กัตตาเปอร์ธา	0.00069	0.45	109
โลหะผสมทองทำครอบฟัน	96.6	0.35	110
โลหะผสมทองทำเดือย	77	0.33	111
โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม	172	0.32	112
เดือยสแตนเลสสตีล	200	0.33	113
เดือยเส้นใยคาร์บอน	21	0.3	69
แก้วไอโอโนเมอร์ ผสมโลหะเงิน	6	0.3	114
เรซินคอมโพสิต	16.6	0.24	115
กระเบื้องเฟลด์สปาร์	69	0.28	116

นำค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองมาแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นดังสมการที่ 1 และ 2¹⁰⁰ ดังนี้

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\} \quad \text{สมการที่ 1}$$

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

หมายเหตุ	σ	=	ความเค้น
	C	=	ค่าคงที่
	ε	=	ความเครียด
	E	=	ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น
	ν	=	อัตราส่วนปัวซอง

กำหนดแรงที่กระทำบนแบบจำลองเป็นแรงจากการบิดเคี้ยวในพื้นที่มีการสับฟันแบบที่หนึ่ง (class I Angle's classification) เป็นแรงที่พื้นหน้าตัดซี่กลางล่างกระทำต่อพื้นหน้าตัดซี่กลางบนทางด้านใกล้ลิ้น แรงที่ใช้เป็นแรงสถิตย์ (static load) ปริมาณ 150 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของแรงกัดที่ฟันตัดหน้าในผู้ใหญ่¹¹⁷ โดยทำมุม 130 องศา กับแนวแกนพื้นหน้าตัดซี่กลางบน¹¹⁸

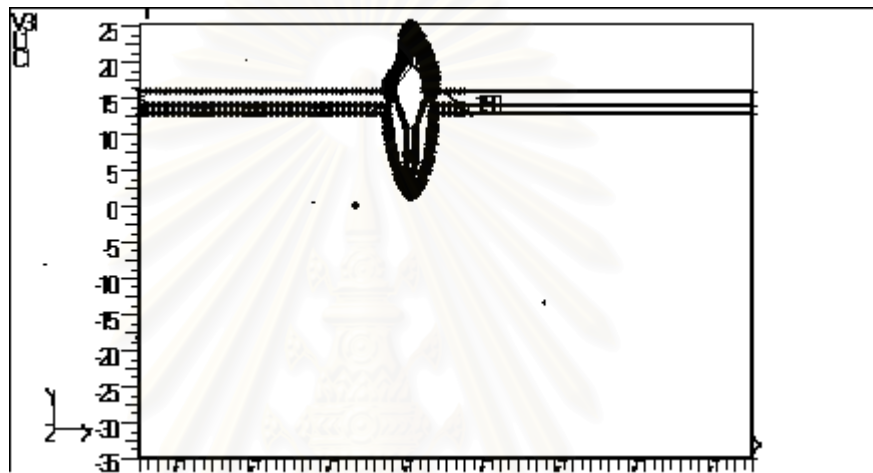
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม MSC/Nastran for Windows 4.5 ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. Pre-Processing คือขั้นตอนที่เริ่มตั้งแต่การสร้างแบบจำลอง การแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อย การกำหนดคุณสมบัติของส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลอง กำหนดเงื่อนไขขอบเขต กำหนดขนาดและทิศทางของแรงที่มากระทำ
2. Analysis คือขั้นตอนที่โปรแกรมทำการคำนวณและประมวลผลแก้ไขปัญหาที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1
3. Post-Processing คือขั้นตอนที่นำผลที่ได้จากการคำนวณมาแสดง ซึ่งอาจแสดงในรูปตัวเลขหรือภาพกราฟิก (stress contour)

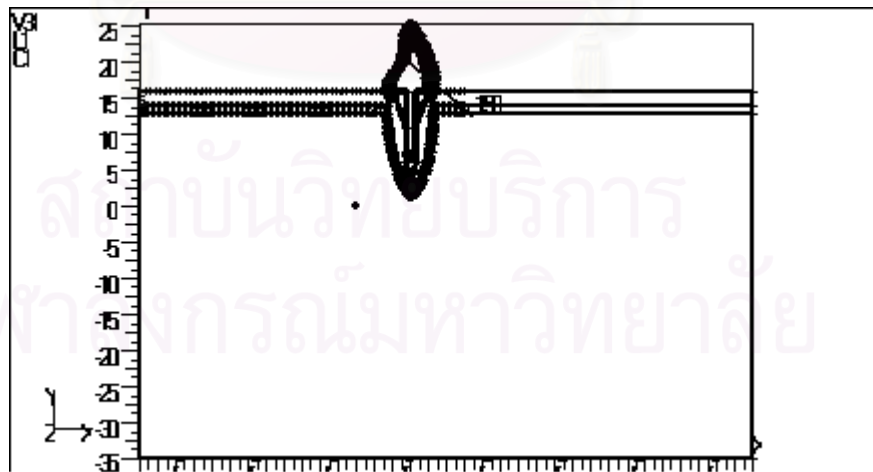
ขั้นตอน Pre-Processing

1. วาดแบบจำลองลงในกระดาษกราฟในอัตราส่วน 10:1 เพื่อขยายขนาดแบบจำลองให้ใหญ่ขึ้นเหมาะกับการอ่านค่าพิกัดของจุดต่าง ๆ บนแบบจำลอง แล้วนำค่าพิกัดของจุดดังกล่าวมาใช้ในการสร้างจุด (point) ในโปรแกรมจนครบทุกจุด จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมจุด (curve) จนได้แบบจำลองที่ต้องการ

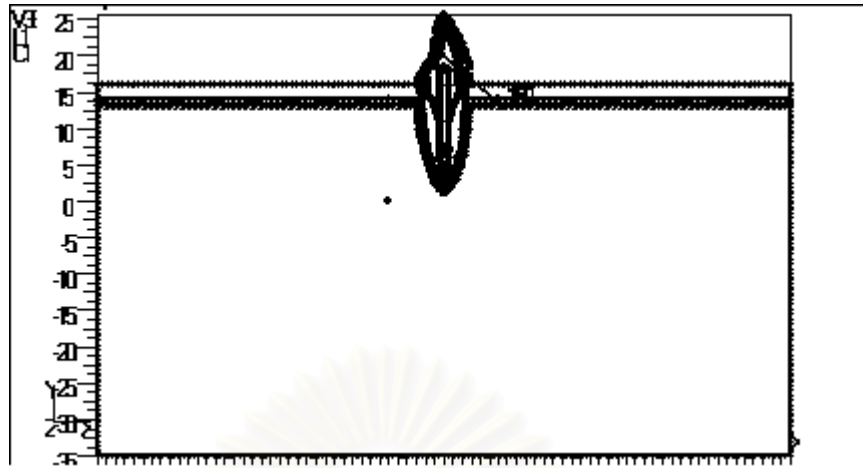
2. กำหนดขอบเขตวัสดุที่มีคุณสมบัติเดียวกัน (boundary surface) จะได้แบบจำลองการบูรณะฟันก่อนที่จะมีการแบ่งเอลิเมนต์ (รูปที่ 12-14)



รูปที่ 12 แสดงแบบจำลองก่อนแบ่งเป็นหน่วยย่อยเมื่อบูรณะด้วยเดือยโลหะเหวี่ยงโดยไม่เสริมผนังคลองรากฟัน

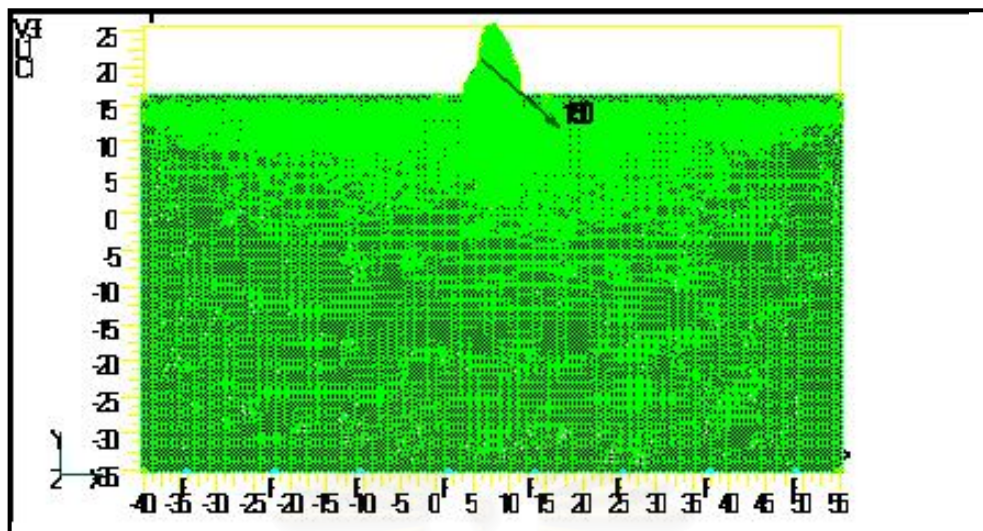


รูปที่ 13 แสดงแบบจำลองก่อนแบ่งเป็นหน่วยย่อยเมื่อบูรณะด้วยเสริมผนังคลองรากแล้วใช้เดือยและแกนโลหะเหวี่ยง



รูปที่ 14 แสดงแบบจำลองก่อนแบ่งเป็นหน่วยย่อยเมื่อบูรณะโดยเสริมผนังคลองรากแล้วใช้เดือยสำเร็จรูปและสร้างแกนด้วยวัสดุบูรณะ

3. กำหนดค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของวัสดุแต่ละชนิดดังตารางที่ 2
4. กำหนดลักษณะเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นแบบสองมิติเพื่อทดสอบการกระจายความเค้น จึงเลือก plane element แบบ plane strain ซึ่งมีรูปร่างเอลิเมนต์เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (basic rectangular)
5. กำหนดตำแหน่งที่แรงมากระทำ (load) ทิศทางและปริมาณแรง
6. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary constraint) บริเวณส่วนฐานของกระดูกในแบบจำลองถูกตรึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแกนนอนและแกนตั้ง ผลการกระจายความเค้นที่ได้บริเวณส่วนฐานของแบบจำลองจึงอาจผิดพลาดเล็กน้อยซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อบริเวณที่จะศึกษาได้แก่ รากฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย เนื่องจากขนาดของแบบจำลองมีความกว้างเพียงพอ
7. กำหนดขนาดของเอลิเมนต์ของแต่ละวัสดุของแบบจำลอง โดยบริเวณที่ต้องการศึกษา กำหนดให้มีขนาดเอลิเมนต์เล็กกว่าบริเวณอื่น เพื่อให้ได้ค่าความเค้นที่ถูกต้องที่สุด ซึ่งการกำหนดขนาดอาจกำหนดตามขอบเขตของแต่ละวัสดุ หรือกำหนดขนาดตามเส้นโค้ง แล้วจึงสร้างเอลิเมนต์ที่ละวัสดุ จากนั้นจึงรวมจุดต่อที่มีการซ้อนทับกันในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีขอบเขตติดกัน (coincidence node) (รูปที่ 15) จะได้จำนวนจุดต่อและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้ง 10 วิธีดังตารางที่ 3



รูปที่ 15 แสดงแบบจำลองการบูรณะพื้นด้วยเดือยและแกนทั้ง 10 วิธี ที่มีการแบ่งเอลิเมนต์และมีการรวมจุด (เนื่องจากเอลิเมนต์บริเวณที่ศึกษามีขนาดเล็กทำให้จึงไม่เห็นความแตกต่างของการบูรณะทั้ง 10 วิธี)

ตารางที่ 3 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของการบูรณะพื้นด้วยเดือยและแกนทั้ง 10 วิธี

วิธีการบูรณะ	แบบจำลองโดยรวม		แบบจำลองส่วนที่ต้องการศึกษา*	
	จำนวนจุดต่อ	จำนวนเอลิเมนต์	จำนวนจุดต่อ	จำนวนเอลิเมนต์
ทอง-ไม้เสริมผนัง	47,824	47,668	28,717	28,437
นิเกิลโครเมียม-ไม้เสริมผนัง	47,824	47,668	28,717	28,437
ทอง-คอมโพสิต	36,998	36,809	20,128	19,898
นิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต	36,998	36,809	20,128	19,898
สแตนเลสสตีล-คอมโพสิต	39,666	39,509	21,802	21,550
คาร์บอน-คอมโพสิต	39,666	39,509	21,802	21,550
ทอง-เซอร์เมต	36,998	36,809	20,128	19,898
นิเกิลโครเมียม-เซอร์เมต	36,998	36,809	20,128	19,898
สแตนเลสสตีล-เซอร์เมต	39,666	39,509	21,802	21,550
คาร์บอน-เซอร์เมต	39,666	39,509	21,802	21,550

หมายเหตุ แบบจำลองส่วนที่ต้องการศึกษา* หมายถึง เนื้อพื้น วัสดุเสริมคดของรากพื้น เดือยและครอบพื้น

ขั้นตอน Analysis

ทำการสั่งให้โปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้จากขั้นตอน pre-processing โดยใช้คำสั่ง analyze โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าการเคลื่อนที่จากสมการที่สร้างไว้ในแต่ละจุดต่อและเอลิเมนต์ และสามารถนำไปคำนวณความเค้นแบบต่าง ๆ ได้ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต่างกันตามปริมาณและความละเอียดของเอลิเมนต์

ขั้นตอน Post-Processing

ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงเป็นค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อและเอลิเมนต์ ค่าความเค้น ซึ่งได้แก่ ความเค้นแกนหลัก (principal stress) ความเค้นเฉือน (shear stress) หรือความเค้นฟอนมิสเสส (von Mises stress) เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นภาพกราฟิกที่ทำให้มองเห็นลักษณะการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง รวมทั้งรูปแบบการกระจายความเค้นแบบต่าง ๆ โดยใช้แถบสีเป็นตัวกำหนดช่วงค่าความเค้นในการแสดงผล

การเก็บรวบรวมข้อมูล

บันทึกผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมได้แก่

1. ค่าความเค้นดึงในเนื้อฟันส่วนที่บางบริเวณรากฟันส่วนต้นและค่าความเค้นดึงที่มากที่สุด
ในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือยที่ใช้ในการบูรณะ
2. ภาพกราฟิกแสดงรูปแบบการกระจายความเค้นดึงในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟันและ
เดือยที่ใช้ในการบูรณะ

การวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบรูปแบบการกระจายความเค้นดึงและค่าความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือยที่ใช้ในการบูรณะของแต่ละแบบจำลอง วิธีการบูรณะที่เหมาะสมจะต้องไม่ทำให้เกิดความหนาแน่นของความเค้นดึง (tensile stress concentration) ในเนื้อฟันที่บริเวณใดมากเป็นพิเศษ ควรก่อให้เกิดการกระจายความเค้นดึงในเนื้อฟันได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อฟันส่วนที่บางเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักของรากฟัน ดังนั้นในการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในเนื้อฟันจะพิจารณาจากค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเนื้อฟัน และความเค้นที่ผนังคลองรากบริเวณรากฟันส่วนต้น (flared dentin)

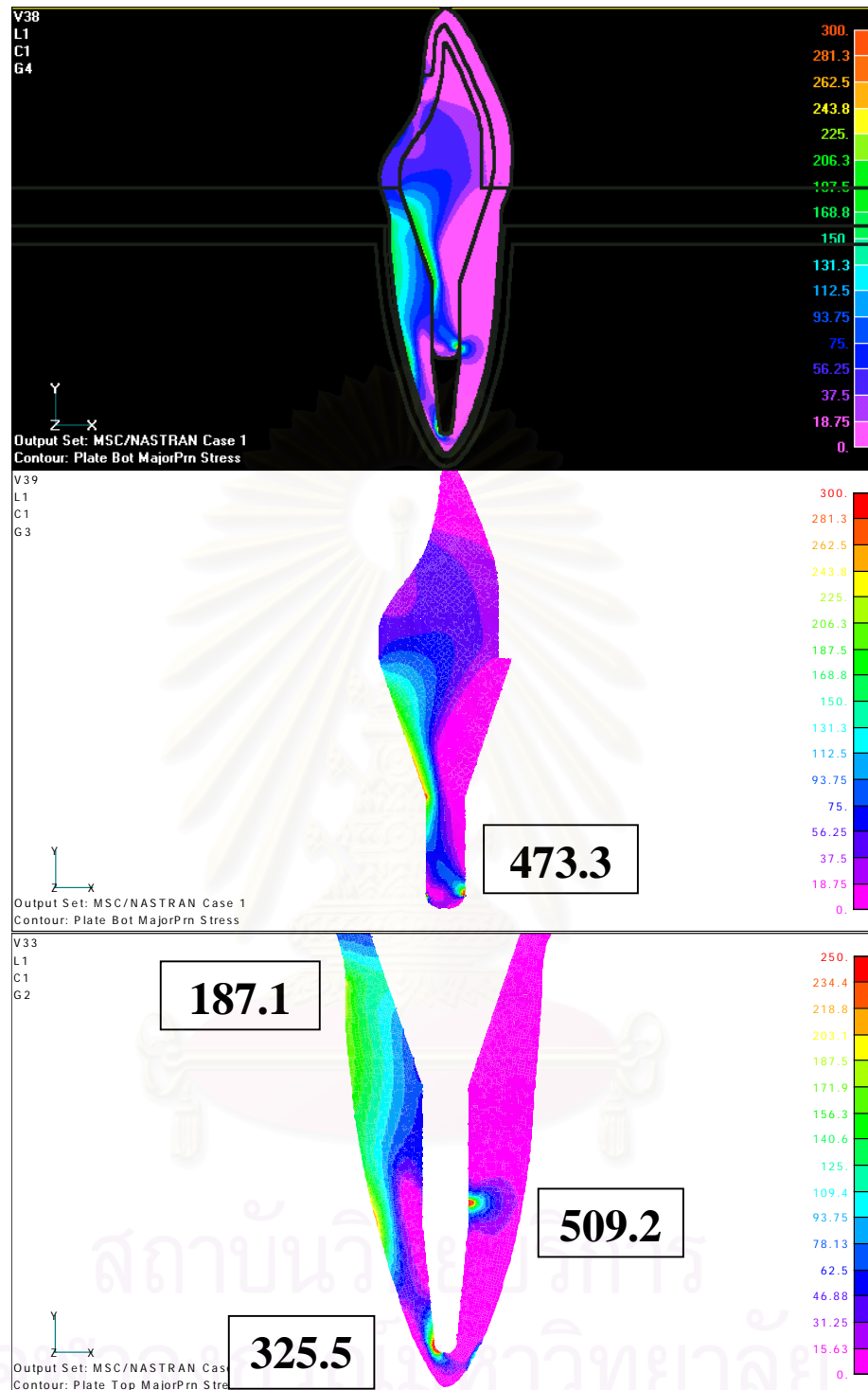
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MSC/Nastran for Windows แสดงผลเป็นภาพกราฟิกของการกระจายความเค้นด้วยสีที่แตกต่างกันเป็นตัวแทนค่าความเค้นดิ่งที่แตกต่างกันโดยดูจากสัญลักษณ์แถบสีที่ระบุค่าทางด้านขวา ในการทดลองนี้กำหนดให้ระดับค่าความเค้นดิ่งจากค่าน้อยไปมากแทนด้วยสีชมพู ม่วง น้ำเงิน ฟ้า เขียว เหลือง ส้ม และแดงตามลำดับ กำหนดการแสดงผลเฉพาะวัสดุส่วนที่สนใจศึกษา ร่วมกับการปรับระดับค่าของสี เพื่อให้เกิดความชัดเจนและสะดวกในการศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายความเค้นดิ่งในแต่ละวัสดุของแบบจำลอง วัสดุที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้คือวัสดุที่อาจเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงได้แก่ เนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย (รูปที่ 16-33) ค่าความเค้นดิ่งในรากฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือยที่ใช้ในการบูรณะของแต่ละแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4



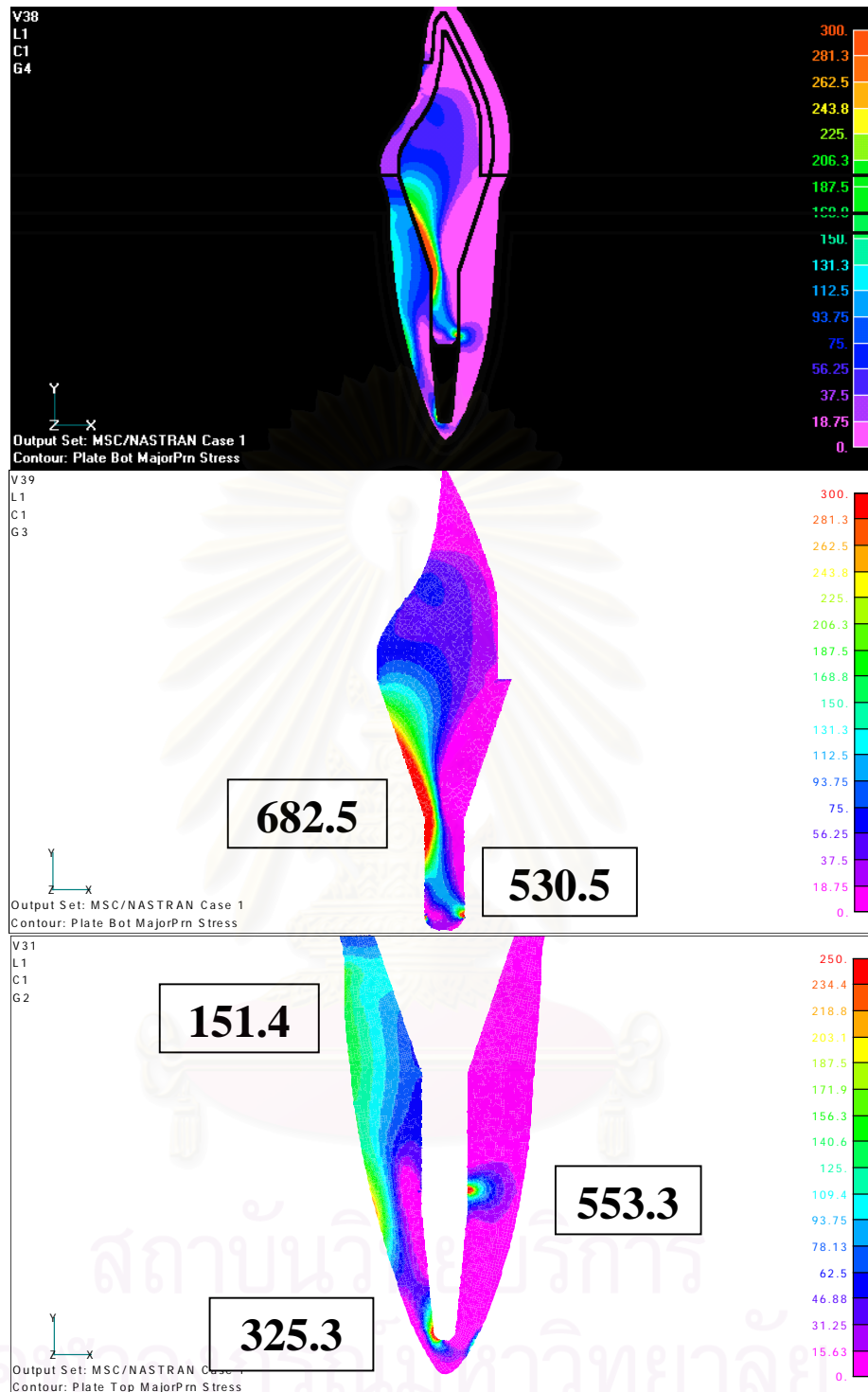
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



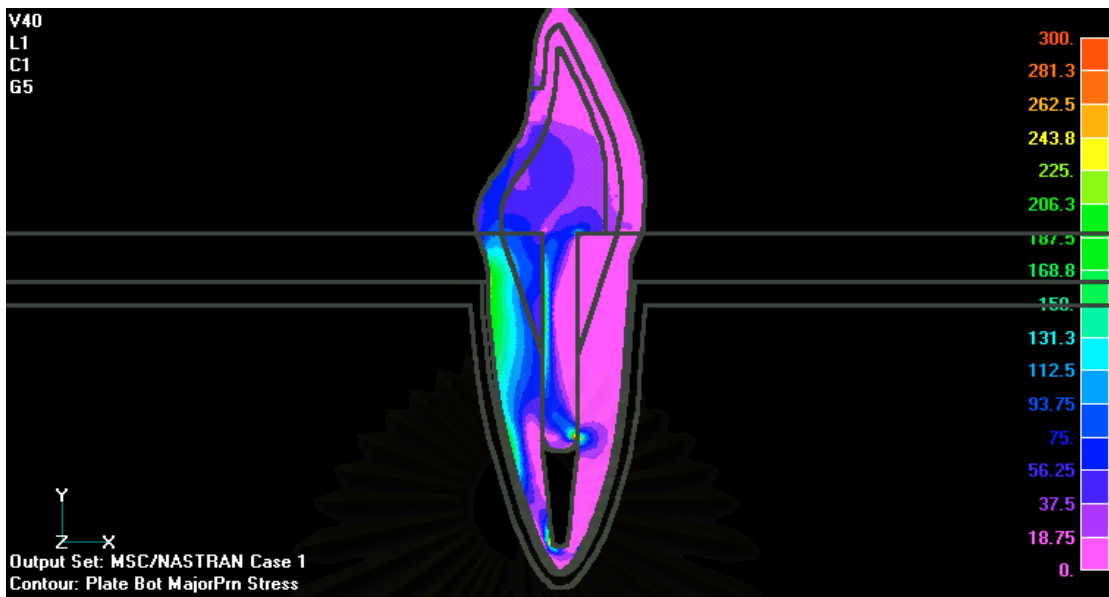
รูปที่ 16 บน : แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองทอง-ไม้เสริมผนัง

กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่ปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากฟัน และบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ

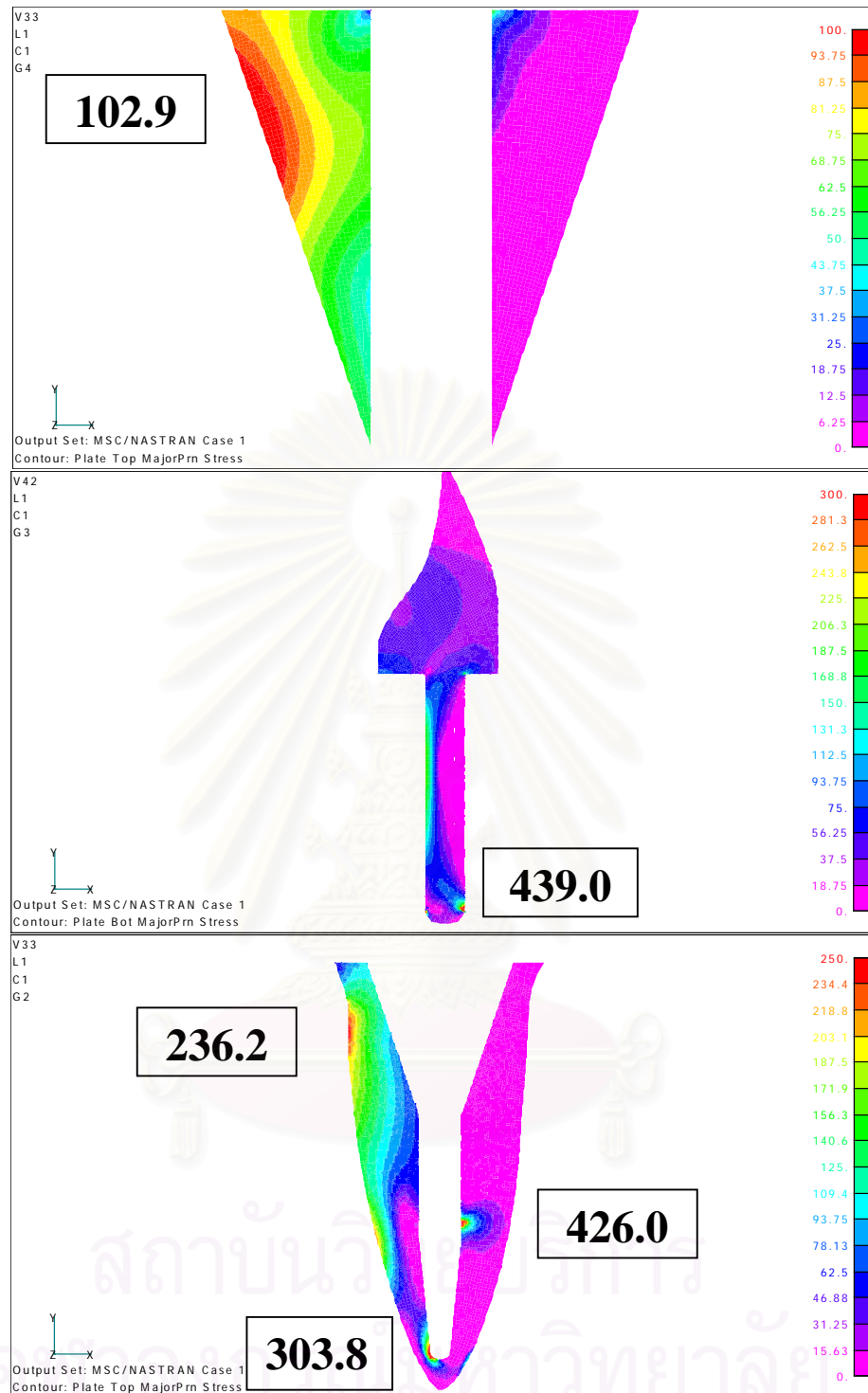


รูปที่ 17 บน : แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองนิเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง รูปแบบการกระจาย
 คล้ายแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง คือมีความเค้นในเนื้อพื้นมากที่บริเวณปลายเดือย แต่ในแบบ
 จำลองนี้มีความเค้นในเดือยบริเวณกลางเดือยมากกว่าที่บริเวณปลายเดือย
 กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่กลางเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายเดือย
 ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อพื้นอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากพื้น
 และบริเวณรากพื้นส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 18 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองทอง-คอมโพสิต รูปแบบการกระจายคล้ายแบบจำลองทอง-ไม้เสริมผนัง คือมีความเค้นในเนื้อพื้นและเดือยมากที่บริเวณปลายเดือย แต่แบบจำลองนี้มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองทอง-ไม้เสริมผนัง โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเรซินคอมโพสิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

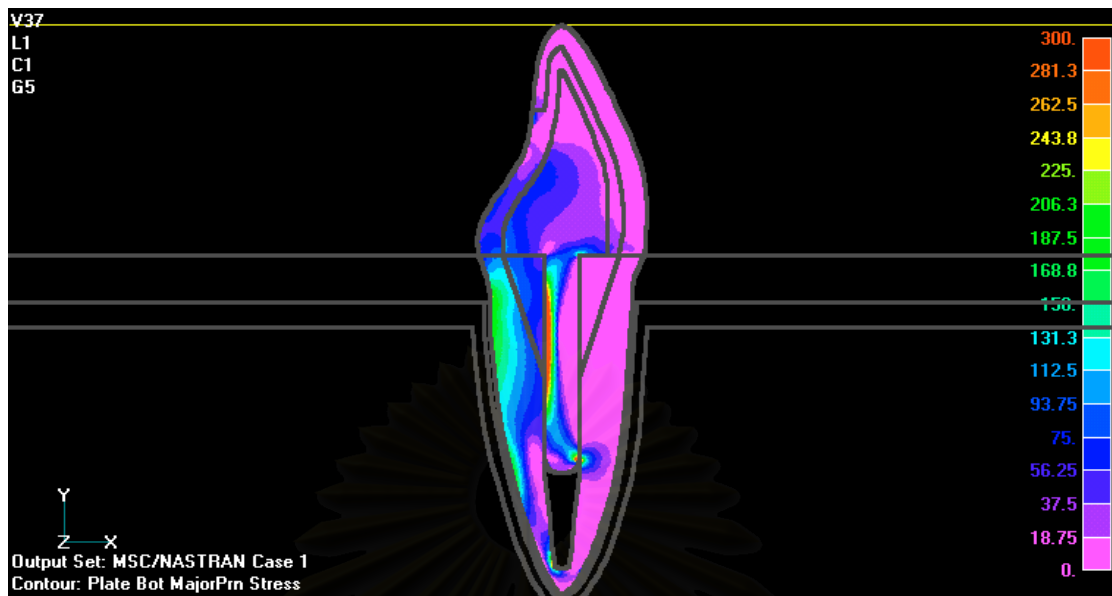


รูปที่ 19 แบบจำลองทอง-คอมโพสิต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเรซินคอมโพสิตอยู่ที่ระดับรากฟันส่วนต้น

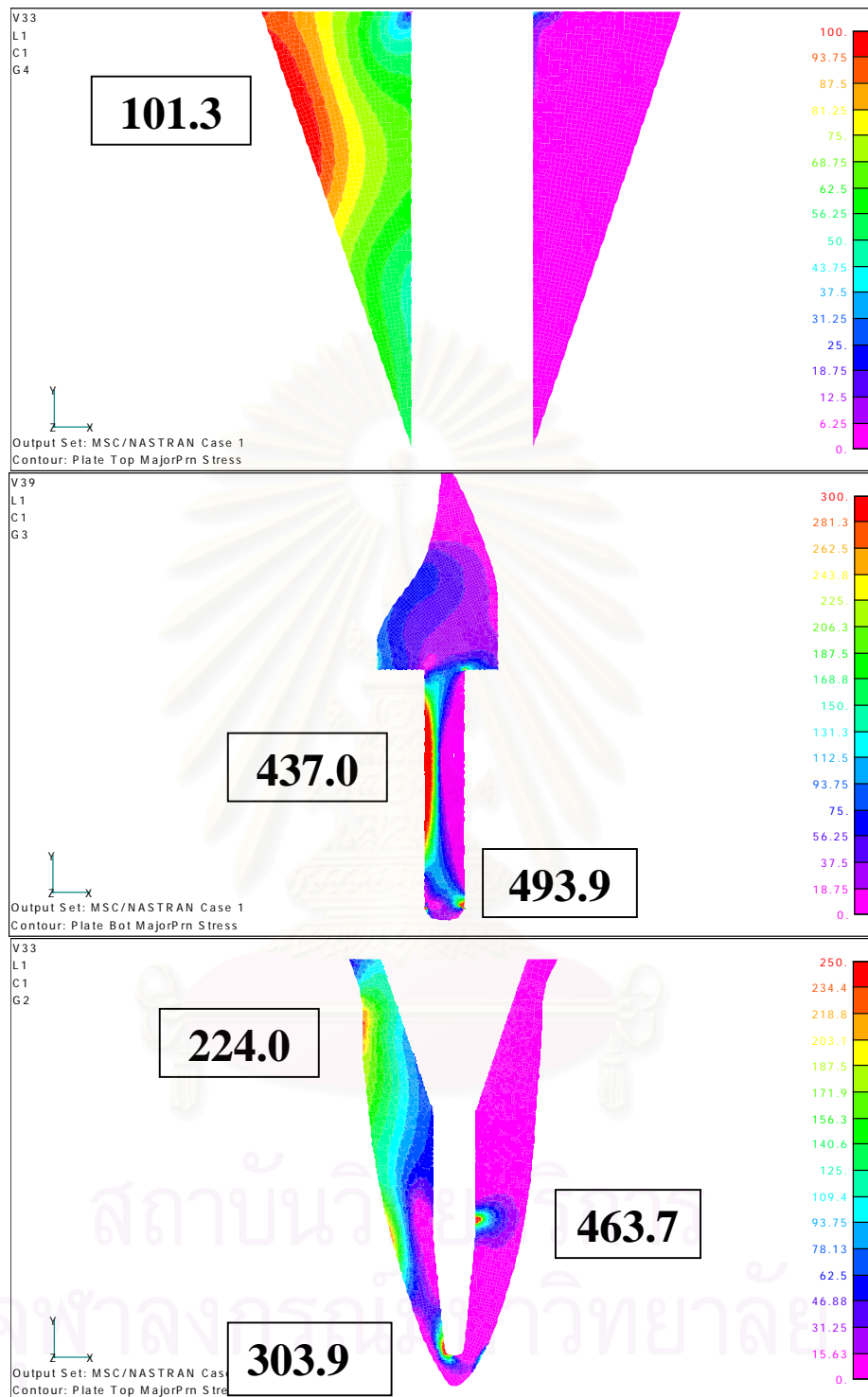
กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากฟันและบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 20 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองนิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต มีรูปแบบคล้ายแบบจำลองทอง-คอมโพสิต คือมีความเค้นในเนื้อพื้นและเดือยมากที่บริเวณปลายเดือย แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นน้อยกว่าแบบจำลองทอง-คอมโพสิต และความเค้นบริเวณกลางเดือยมากกว่าแบบจำลองทอง-คอมโพสิต โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเรซินคอมโพสิตดังที่พบในแบบจำลองทอง-คอมโพสิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



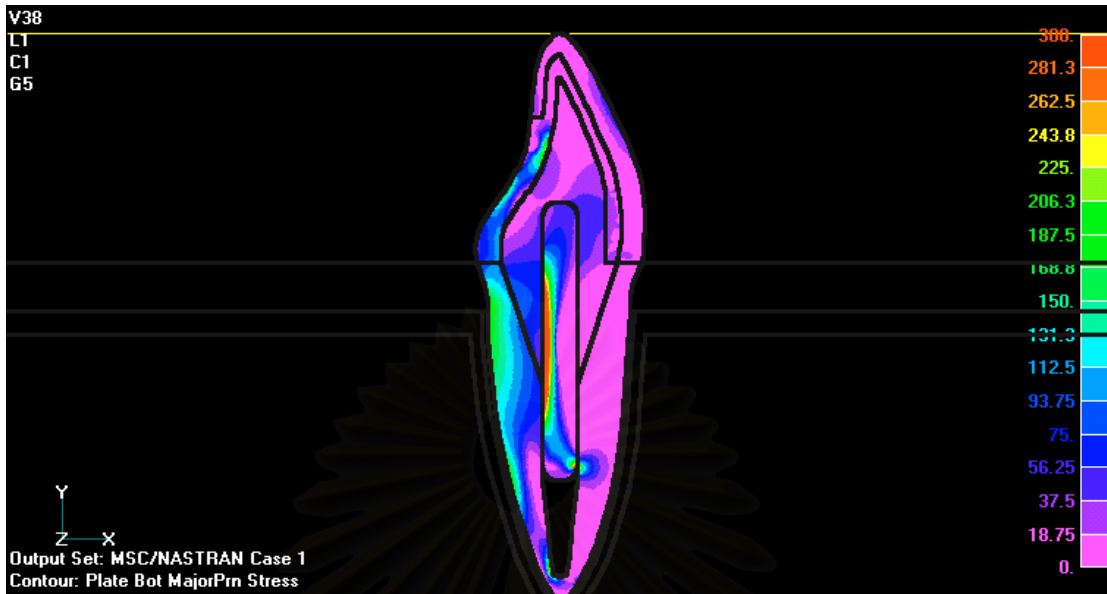
รูปที่ 21 แบบจำลองนิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเวซินคอมโพสิตอยู่ที่ระดับรากฟันส่วนต้น

กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณกลางเดือย

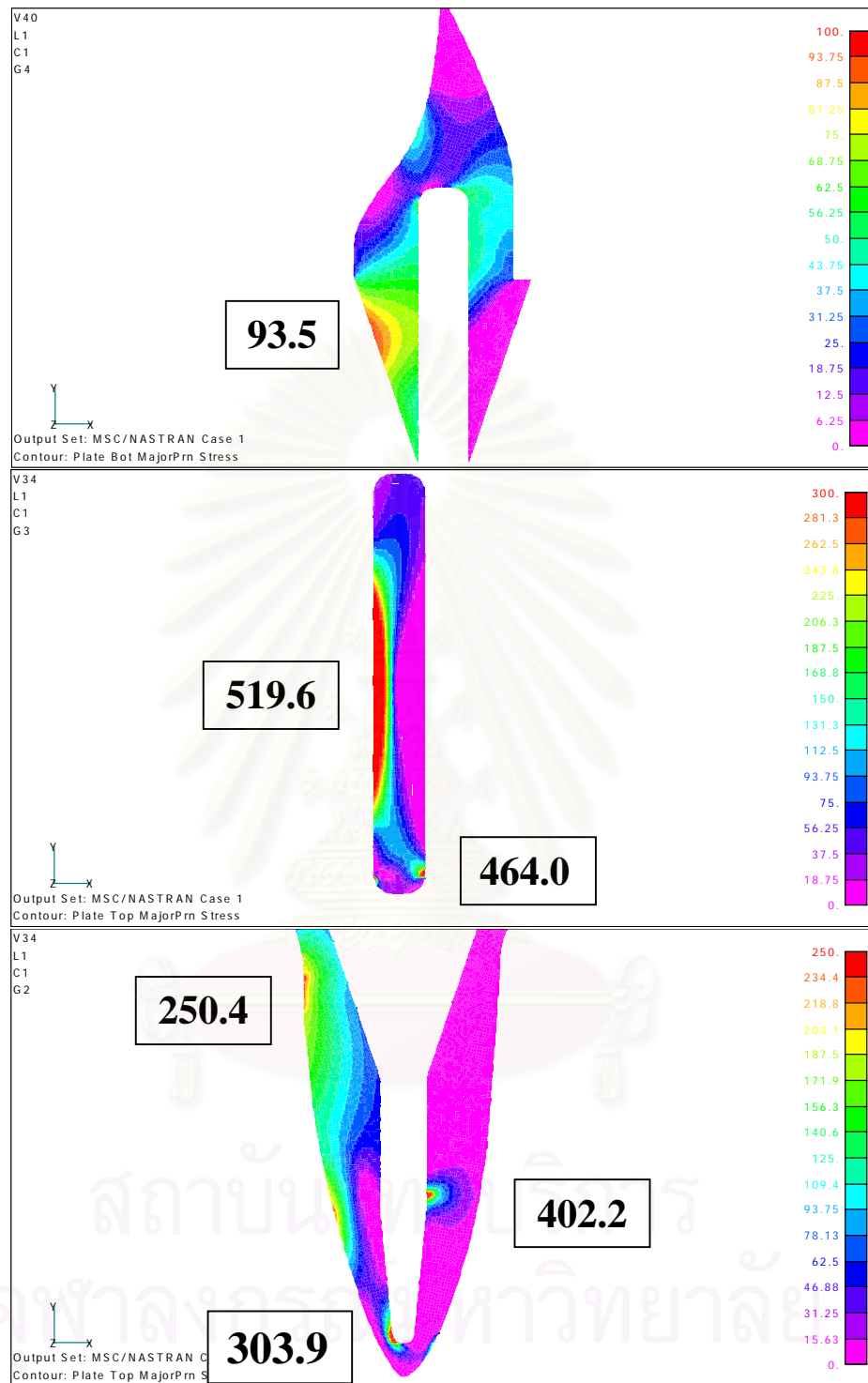
ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากฟัน

และบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 22 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองสแตนเลสสตีล-คอมโพสิต มีรูปแบบคล้ายแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง มีความเค้นในเนื้อพื้นมากที่บริเวณปลายเดือย และความเค้นในเดือยมากที่สุดที่บริเวณกลางเดือย แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเรซินคอมโพสิตดังที่พบในแบบจำลองทอง-คอมโพสิตและนิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

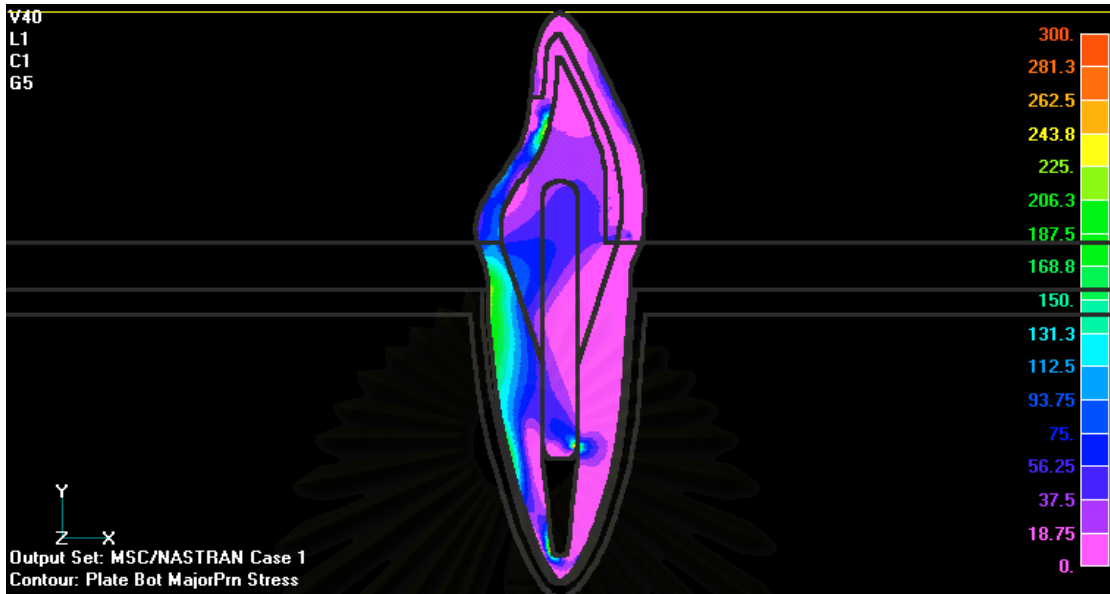


รูปที่ 23 แบบจำลองสแตนเลสสตีล-คอมโพสิต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเรซินคอมโพสิตอยู่ที่ระดับรากฟันส่วนต้น

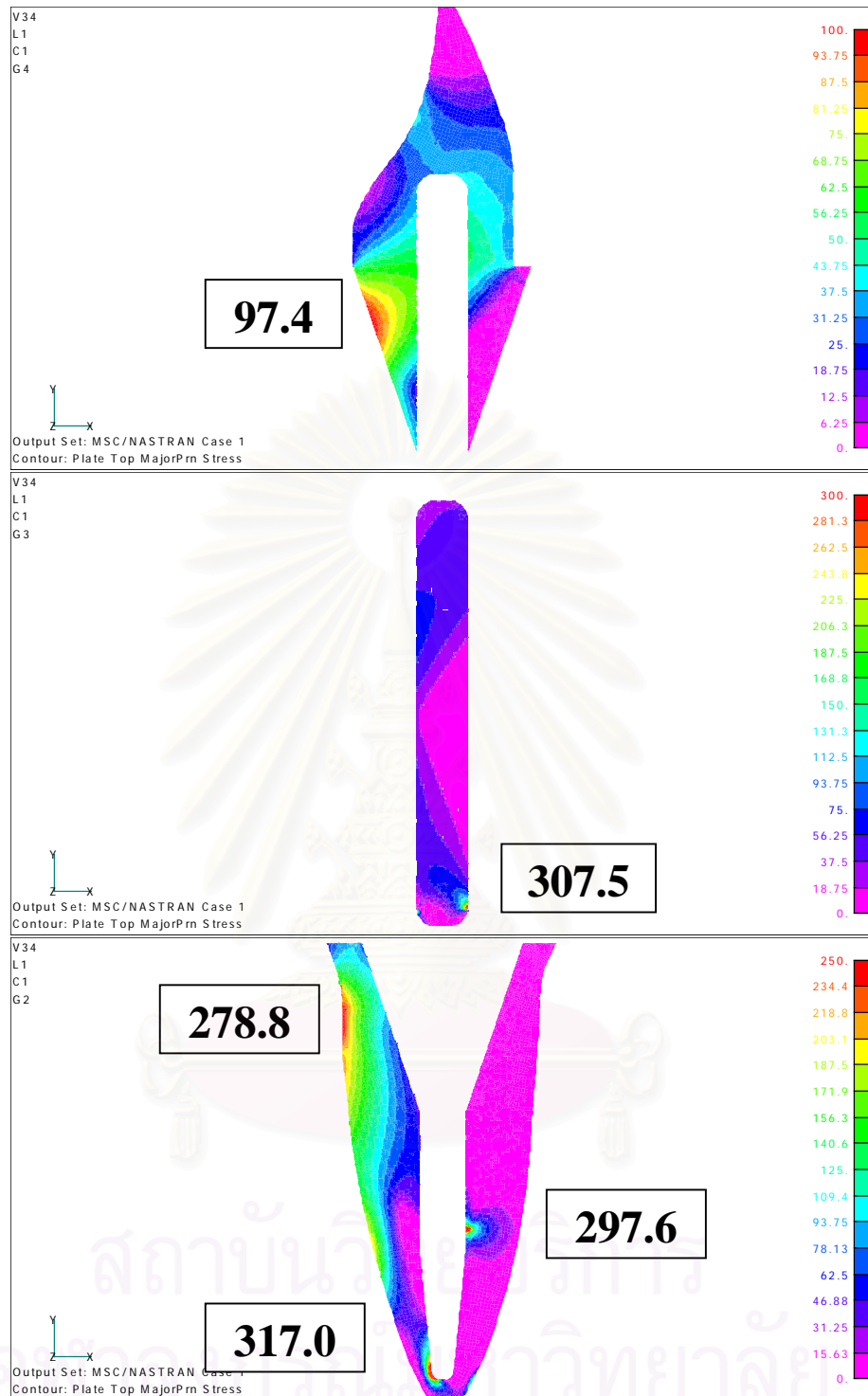
กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณกลางเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากฟัน และบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 24 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต มีลักษณะคล้ายแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง คือมีความเค้นในเนื้อพื้นมากที่บริเวณปลายรากฟันและที่ปลายเดือย แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง ส่วนความเค้นในเดือยมากที่บริเวณปลายเดือยคล้ายแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเรซินคอมโพสิตดังที่พบในแบบจำลองที่ใช้เดือยเป็นทอง หรือนิกเกิลโครเมียม หรือสแตนเลสสตีลและเสริมด้วยเรซินคอมโพสิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

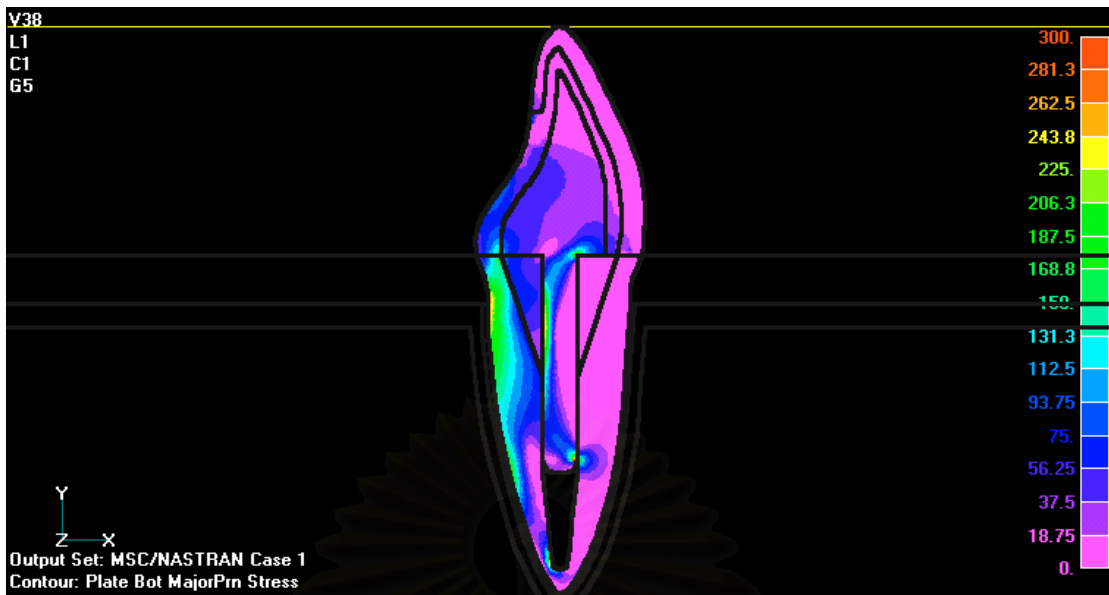


รูปที่ 25 แบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเรซินคอมโพสิตอยู่ที่ระดับรากฟันส่วนต้น

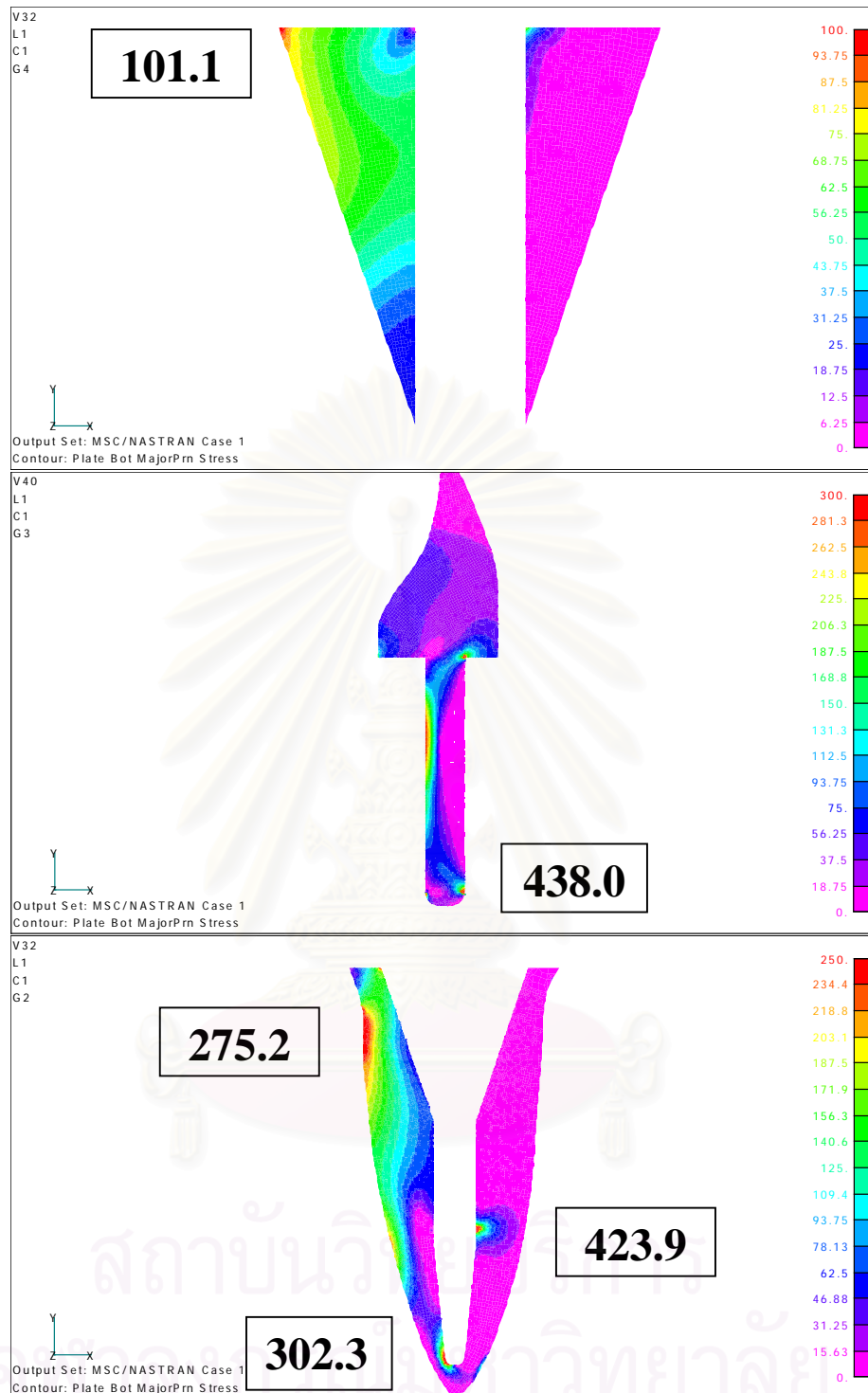
กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายรากฟัน รองลงมาคือบริเวณปลายเดือยและบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 26 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองทอง-เซอร์เมต คล้ายแบบจำลองทอง-คอมโพสิตที่มีความเค้นในเนื้อพื้นสูงสุดที่บริเวณปลายเดือย แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองทอง-คอมโพสิต ส่วนความเค้นในเดือยมากที่บริเวณปลายเดือยคล้ายแบบจำลองทอง-คอมโพสิต โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเซอร์เมตดังที่พบในแบบจำลองที่ใช้เดือยเป็นทอง หรือนิกเกิลโครเมียม หรือสแตนเลสสตีล หรือเส้นใยคาร์บอนที่เสริมผนังด้วยเรซินคอมโพสิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

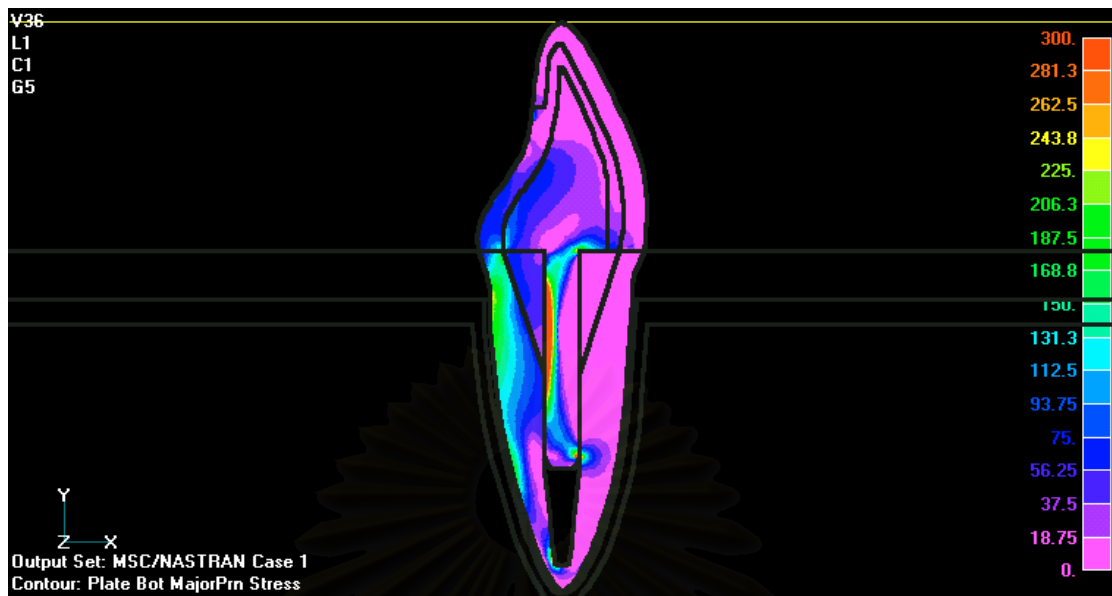


รูปที่ 27 แบบจำลองทอง-เซอร์เมต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเซอร์เมตอยู่ที่มุมบนที่ติดกับรากฟัน

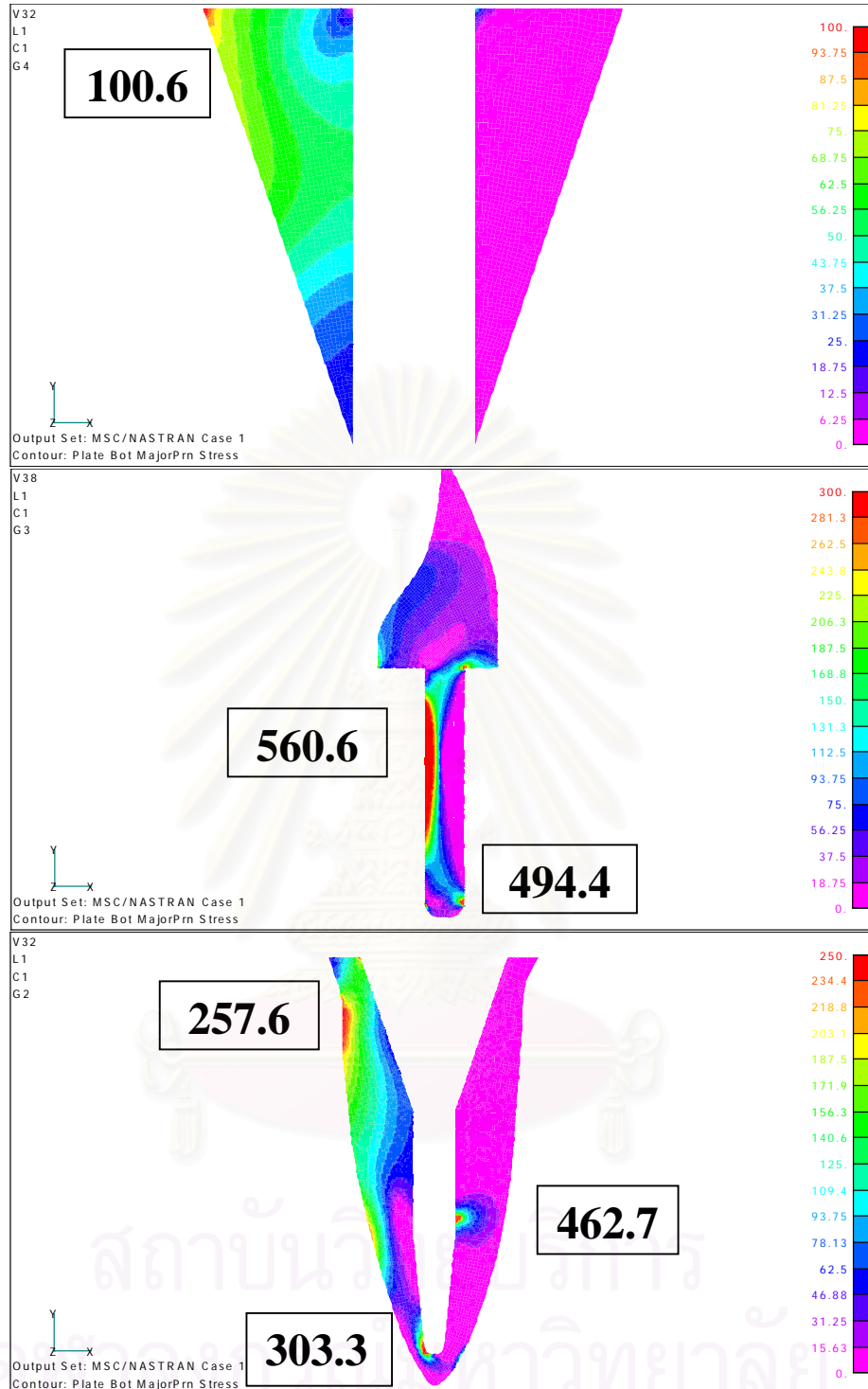
กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากฟันและบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 28 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองนิกิลโครเมียม-เซอร์เมต คัดถ่ายแบบจำลองนิกิลโครเมียม-คอมโพสิตที่มีความเค้นในเนื้อพื้นสูงสุดที่บริเวณปลายเดือย แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองนิกิลโครเมียม-คอมโพสิต ส่วนความเค้นในเดือยมากที่บริเวณกลางเดือยคัดถ่ายแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนัง โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเซอร์เมตดังที่พบในแบบจำลองทอง-เซอร์เมต

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

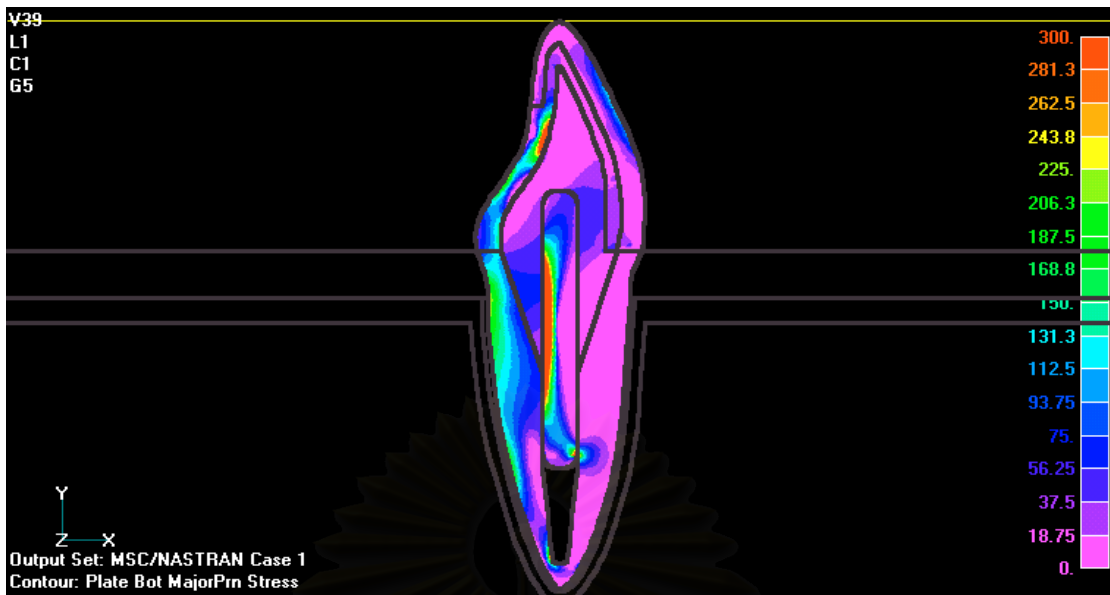


รูปที่ 29 แบบจำลองนิเกิลโครเมียม-เซอร์เมต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเซอร์เมตอยู่ที่มุมบนที่ติดกับรากฟัน

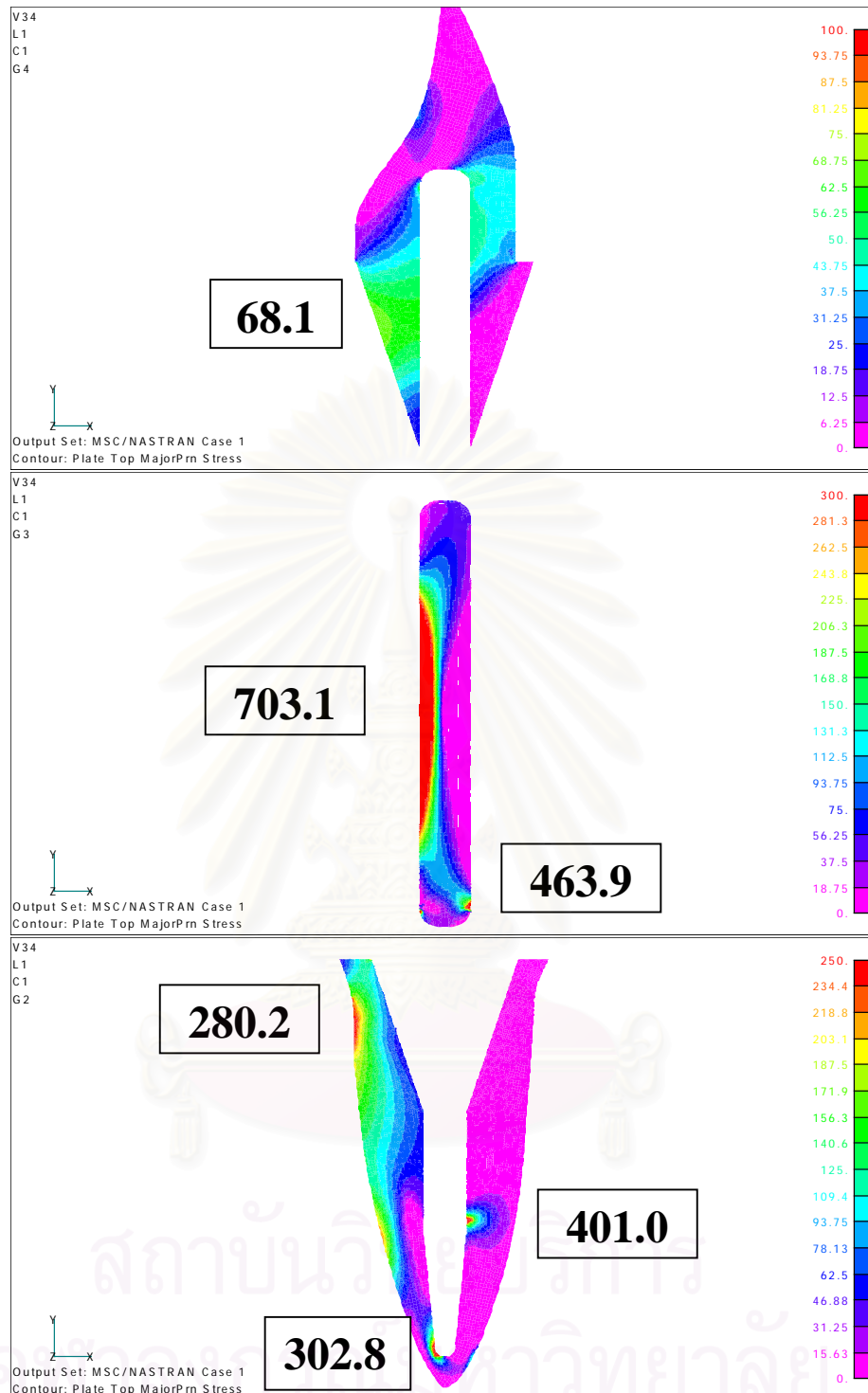
กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณกลางเดือย รองลงมาที่บริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากฟันและบริเวณรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 30 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองสแตนเลสสตีล-เซอร์เมต คล้ายแบบจำลองสแตนเลสสตีล-คอมโพสิตที่มีความเค้นในเนื้อพื้นมากที่บริเวณปลายเดือย แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองสแตนเลสสตีล-คอมโพสิต ส่วนความเค้นในเดือยมากที่บริเวณกลางเดือยคล้ายแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนังและสแตนเลสสตีล-คอมโพสิต โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเซอร์เมตดังที่พบในแบบจำลองทอง-เซอร์เมตและนิเกิลโคโรเมียม-เซอร์เมต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

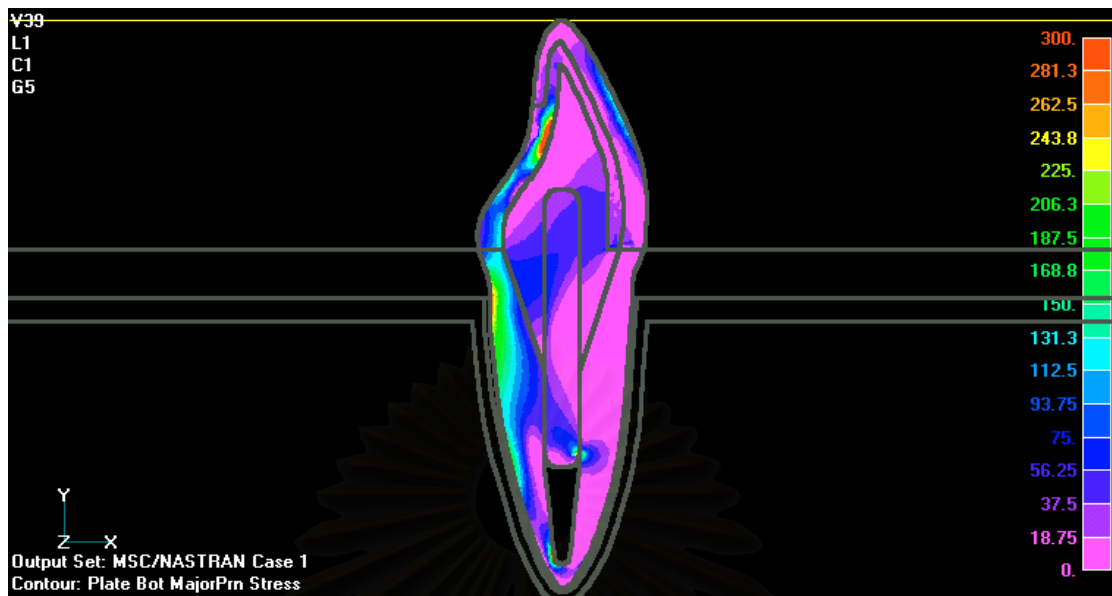


รูปที่ 31 แบบจำลองสแตนเลสสตีล-เซอร์เมต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเซอร์เมตอยู่ที่ระดับรากพื้นส่วนต้น

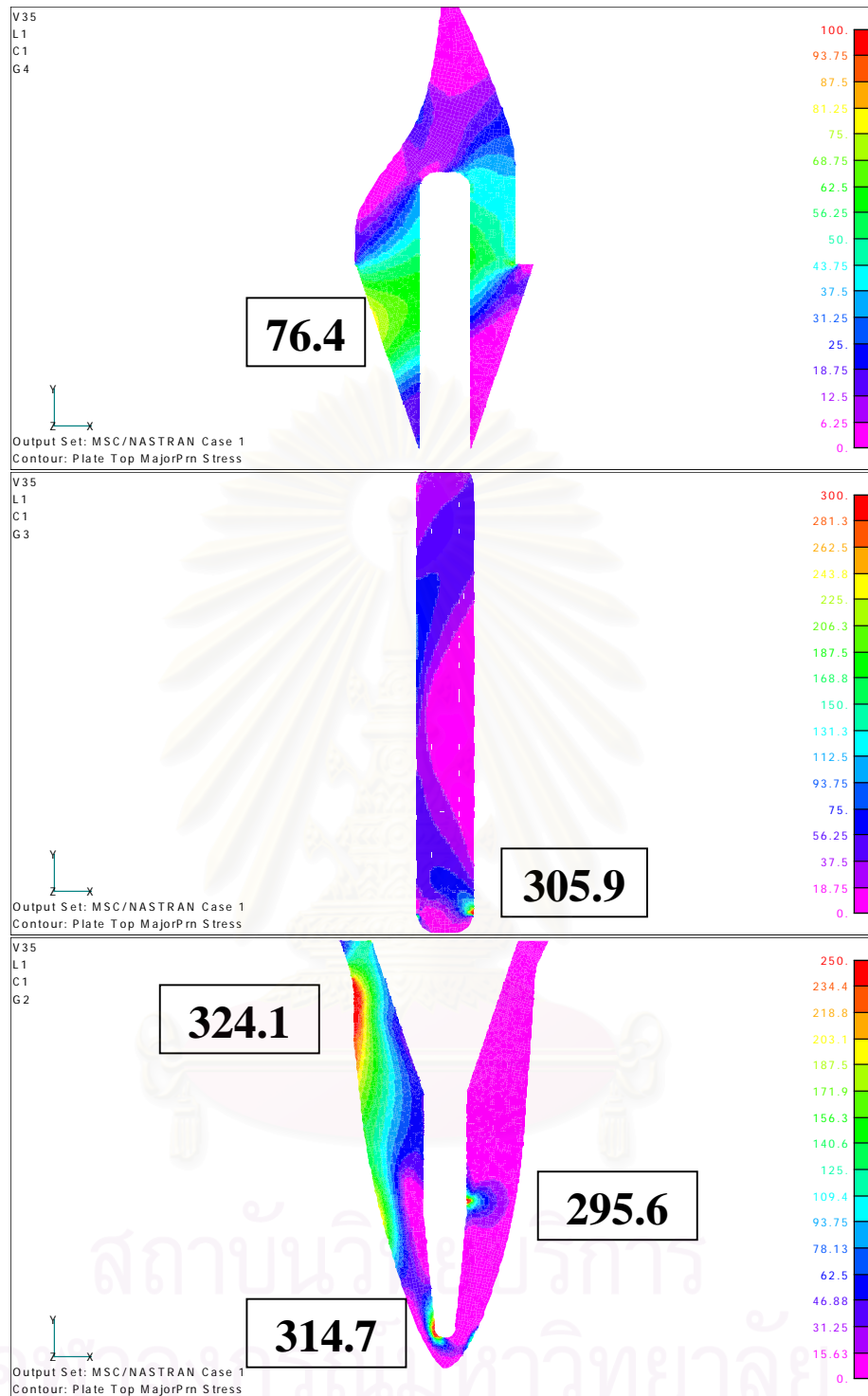
กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณกลางเดือย รองลงมาที่บริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อพืนอยู่ที่ระดับปลายเดือย รองลงมาคือบริเวณปลายรากพืนและบริเวณรากพืนส่วนต้น ตามลำดับ



รูปที่ 32 แสดงการกระจายความเค้นดึงของแบบจำลองคาร์บอน-เซอร์เมต คล้ายแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต แต่มีความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต และมากกว่าความเค้นที่ระดับปลายรากฟันและที่ระดับปลายเดือย ส่วนความเค้นในเดือยมากที่บริเวณปลายเดือยคล้ายแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิต โดยไม่พบบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นในเซอร์เมตดั่งที่พบในแบบจำลองที่ใช้เดือยเป็นทอง หรือนิกเกิลโครเมียม หรือสแตนเลสสตีลที่เสริมผนังคลองรากด้วยเซอร์เมต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 33 แบบจำลองคาร์บอน-เซออร์เมต

บน : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเซออร์เมตอยู่ที่ระดับรากพื้นส่วนต้น

กลาง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเดือยอยู่ที่บริเวณปลายเดือย

ล่าง : บริเวณที่มีความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อพื้นอยู่ที่ระดับรากพื้นส่วนต้น จงลงมาก็คือบริเวณปลายรากพื้นและบริเวณปลายเดือย ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงตำแหน่ง และค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละวัสดุในแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลอง	ตำแหน่งและค่าความเค้นสูงสุด					
	เนื้อพื้น		วัสดุเสริมคองรากฟัน		เดือย	
	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง	ความเค้น (MPa)	ตำแหน่ง
1.1 ทอง-ไม่เสริมผนัง	509.2	ปลายเดือย	-	-	473.3	ปลายเดือย
1.2 นิเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง	553.3	ปลายเดือย	-	-	682.5	กลางเดือย
2.1 ทอง-คอมโพสิต	426.0	ปลายเดือย	102.9	รากฟันส่วนต้น	439.0	ปลายเดือย
2.2 นิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต	463.7	ปลายเดือย	101.3	รากฟันส่วนต้น	493.9	ปลายเดือย
3.1 สแตนเลสสตีล-คอมโพสิต	402.2	ปลายเดือย	93.5	รากฟันส่วนต้น	519.6	กลางเดือย
3.2 คาร์บอน-คอมโพสิต	317.0	ปลายรากฟัน	97.4	รากฟันส่วนต้น	307.5	ปลายเดือย
4.1 ทอง-เซอร์เมต	423.9	ปลายเดือย	101.1	มุมบนที่ติดรากฟัน	438.0	ปลายเดือย
4.2 นิเกิลโครเมียม-เซอร์เมต	462.7	ปลายเดือย	100.6	มุมบนที่ติดรากฟัน	560.6	กลางเดือย
5.1 สแตนเลสสตีล-เซอร์เมต	401.0	ปลายเดือย	68.1	รากฟันส่วนต้น	703.1	กลางเดือย
5.2 คาร์บอน-เซอร์เมต	324.1	ผนังรากฟันส่วนต้น	76.4	รากฟันส่วนต้น	305.9	ปลายเดือย

บทที่ 5 การอภิปรายผลการวิจัย

การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเป็นการบ่งชี้ถึงอัตราเสี่ยงต่อความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้คือความเสี่ยงต่อการแตกหักในส่วนประกอบที่สำคัญในการบูรณะได้แก่เนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย ดังนั้นจึงมุ่งวิเคราะห์การกระจายความเค้นดึงโดยเฉพาะในเนื้อฟันเป็นหลัก เนื่องจากรูปแบบการบูรณะที่ดีและเหมาะสมจะต้องไม่ทำให้เกิดการแตกหักของรากฟันซึ่งเป็นความล้มเหลวที่พบมาก และมีผลทำให้ฟันซี่นั้นไม่สามารถทำการบูรณะซ้ำได้อีกทำให้ต้องถอนไปในที่สุด แนวโน้มการแตกของรากฟันเกิดขึ้นได้ในบริเวณที่มีความเค้นดึงมากจนเกินความแข็งแรงคราก (yield strength) ของเนื้อฟัน¹¹⁹ ซึ่งถ้าเนื้อฟันมีส่วนบกพร่อง (defect) ร่วมด้วย เช่น รอยร้าวหรือรอยผุในเนื้อฟันก็จะทำให้เกิดการแตกได้ง่ายขึ้น¹⁰¹

จากผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นพบว่ารูปแบบการกระจายความเค้นดึงในเนื้อฟันเมื่อบูรณะด้วยวิธีต่าง ๆ มีลักษณะโดยรวม คือ มีความเค้นมากที่ผนังคลองรากฟันด้านในที่ระดับปลายเดือยด้านใกล้แก้ม (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าตำแหน่ง**ปลายเดือย**) ผนังคลองรากฟันด้านในที่ระดับปลายกัทตาเปอร์ชาด้านใกล้ลิ้น (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าตำแหน่ง**ปลายรากฟัน**) ผนังรากฟันด้านนอกที่ระดับคลองรากฟันส่วนต้นด้านใกล้ลิ้น (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าตำแหน่ง**รากฟันส่วนต้น**) (รูปที่ 16-25) โดยแบบจำลองส่วนใหญ่จะพบความเค้นดึงสูงสุดที่บริเวณปลายเดือยซึ่งตรงกับการศึกษาของ Davy Dilley และ Krejci⁴⁹ Cailleateau Reiger และ Akin¹⁰¹ Reinhardt Krejci และ Pao¹¹² และ Yang และคณะ¹¹⁹ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรากฟันส่วนที่มีเดือยอยู่ภายในจะแข็งกว่ารากฟันส่วนที่ไม่มีเดือยซึ่งอยู่บริเวณปลายรากเมื่อได้รับแรงบิดเคี้ยวจะเกิดการโค้งงอ (bending) และเกิดจุดหักงอ (flexure point) บริเวณปลายเดือย^{61,120} ซึ่งสัมพันธ์กับการศึกษาของ Barkhordar Radke และ Abbasi⁵⁵ และ Assif และคณะ⁴⁴ และ Akkayan และ Gulmez¹²¹ ที่พบว่ารากฟันหน้ามักแตกในแนวนอนที่ระดับปลายเดือย อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ใช้เดือยที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นน้อย ได้แก่ แบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิตและคาร์บอน-เซอร์เมต พบว่าความเค้นสูงสุดจะเปลี่ยนตำแหน่งไปที่ปลายรากฟันและรากฟันส่วนต้น ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความเค้นทั้งสามบริเวณคือ ปลายเดือย ปลายรากฟัน และรากฟันส่วนต้น (ตารางที่ 5) พบว่าความเค้นที่บริเวณต่าง ๆ ของทั้งสองแบบจำลองค่อนข้างใกล้เคียงกัน เพราะแบบจำลองทั้งสองใช้เดือยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำและใกล้เคียงกับค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน แต่การที่แบบจำลองคาร์บอน-เซอร์เมตมีความเค้นที่รากฟันส่วนต้นมากกว่าบริเวณอื่นเป็นเพราะการเสริมผนัง

คลองรากด้วยเซอร์เมตซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่าเรซินคอมโพสิต จึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำได้มากกว่าตามหลักการของสปริง¹⁰¹ และส่งผ่านความเค้นไปที่เนื้อฟันบริเวณรากฟันส่วนต้นได้มากกว่า

ตารางที่ 5 แสดงความเค้นดึงในเนื้อฟันของแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิตและคาร์บอน-เซอร์เมต

ตำแหน่งความเค้นหนาแน่น	คาร์บอน-คอมโพสิต	คาร์บอน-เซอร์เมต
ปลายเดือย	297.6	295.6
ปลายรากฟัน	317.0	314.7
รากฟันส่วนต้น	278.8	324.1

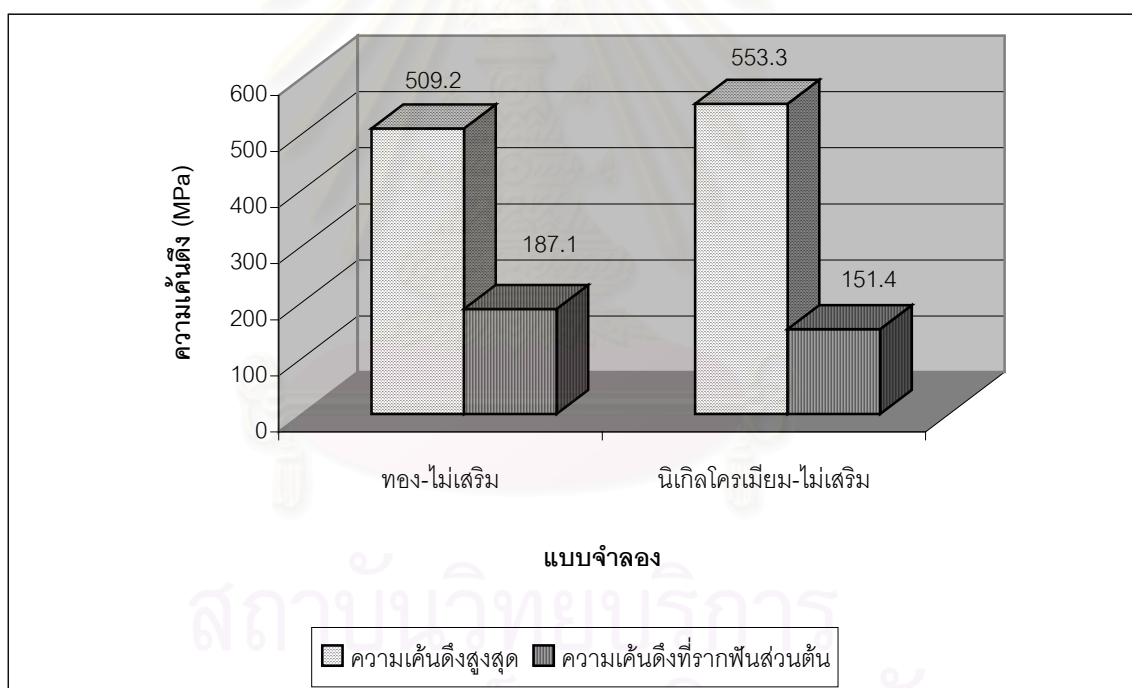
เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายความเค้นดึงในเดือยของแต่ละแบบจำลองพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ มีความเค้นดึงมากบริเวณปลายเดือยด้านใกล้แก้มและที่กลางเดือยด้านใกล้ลิ้น โดยเดือยที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นมาก (เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม เดือยโลหะผสมนิเกิลโครเมียม และเดือยสแตนเลสสตีล) จะมีบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นเป็นบริเวณกว้างกว่าเดือยที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่า (เดือยเส้นใยคาร์บอน)

เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายความเค้นดึงในวัสดุเสริมคลองรากฟันของแต่ละแบบจำลองพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ มีความเค้นดึงมากบริเวณที่ติดกับผนังคลองรากฟันส่วนต้นที่ด้านใกล้ลิ้น ในแบบจำลองที่เสริมผนังคลองรากด้วยเรซินคอมโพสิตซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นมากกว่าเซอร์เมตจะพบความเค้นหนาแน่นเป็นบริเวณกว้างกว่า เรซินคอมโพสิตจึงช่วยดูดซับแรงไว้ได้ดีกว่าและทำให้เกิดความเค้นที่เนื้อฟันส่วนที่บางบริเวณรากฟันส่วนต้นน้อยกว่า

จากผลการทดลอง การหาวิธีการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางที่เหมาะสมจะแยกวิเคราะห์ตามปัจจัยตัวแปรที่เพิ่มขึ้นตามสมมติฐาน ได้แก่ การเสริมผนังคลองรากฟันหรือไม่เสริมผนังคลองรากฟันด้วยวัสดุบูรณะฟันก่อนใส่เดือย ชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟัน และชนิดของเดือยดังนี้

ปัจจัยการเสริมผนังคลองรากฟันกับความเค้นดึงในเนื้อฟัน

ในกรณีที่ไม่เสริมผนังคลองรากฟันจะพบความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากชนิดของเดือยที่ใช้ การบูรณะด้วยเดือยโลหะผสมทองชนิดที่สามทำให้ค่าความเค้นสูงสุดซึ่งอยู่ที่ปลายเดือยมีค่าน้อยกว่าการบูรณะด้วยเดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียม แต่เมื่อพิจารณาบริเวณรากฟันส่วนต้นแล้วจะให้ผลตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียมมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงกว่า เมื่อได้รับแรงจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือโค้งงอภายในเดือยได้ยากกว่า และส่งผ่านความเค้นไปยังเนื้อฟันส่วนต้นน้อยกว่า ขณะเดียวกันทำให้รากฟันส่วนที่มีเดือยมีความแข็งเป็นหน่วยเดียวกันและต่างจากเนื้อฟันส่วนที่ไม่มีเดือยบริเวณปลายรากซึ่งมีการเปลี่ยนรูปได้มากกว่า ทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นและเกิดจุดโค้งงอขึ้นได้ที่ระดับปลายเดือย และมีปริมาณความเค้นที่มากกว่าเดือยโลหะผสมทองชนิดที่สามดังแผนภูมิที่ 1



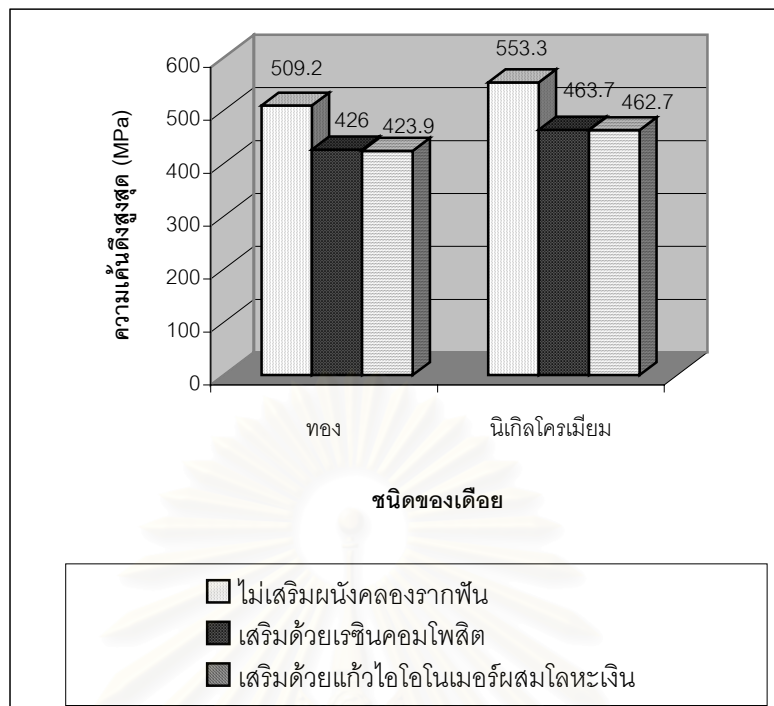
แผนภูมิที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดและค่าความเค้นดึงที่บริเวณรากฟันส่วนต้นของแบบจำลองทอง-ไม่เสริมผนังและนิกเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง

เมื่อเปรียบเทียบการเสริมและไม่เสริมผนังคลองรากฟันพบว่า แบบจำลองที่เสริมผนังคลองรากด้วยวัสดุโดยใช้เดือยประเภทเดียวกันจะมีค่าความเค้นในเนื้อฟันสูงสุดน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่เสริมผนังคลองราก (แผนภูมิที่ 2) ซึ่งสัมพันธ์กับการศึกษาของ Saupé และคณะ⁹⁸ ที่พบว่า การเสริมผนังคลองรากฟันที่บางด้วยเรซินคอมโพสิตสามารถทนแรงที่ทำให้รากฟันแตกได้มากกว่าการไม่เสริมผนังคลองรากฟัน

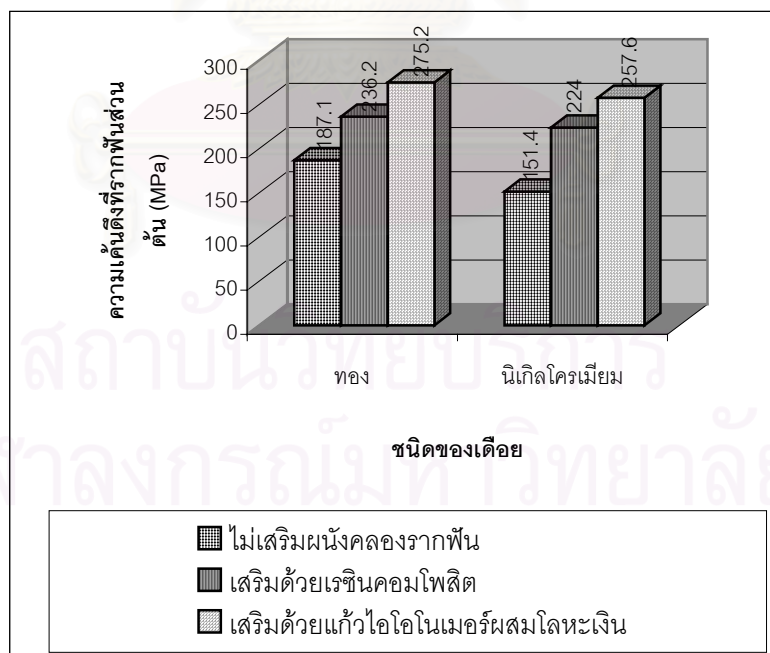
แต่เมื่อพิจารณาความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นพบว่า ให้ผลตรงกันข้าม คือการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยวัสดุทำให้เกิดความเค้นที่บริเวณนี้มากกว่าการไม่เสริมผนังคลองราก (แผนภูมิที่ 3) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเสริมด้วยวัสดุบูรณะฟัน ซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่าเดือยโลหะ เมื่อได้รับแรงวัสดุบูรณะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่า ทำให้ถ่ายทอดความเค้นไปยังรากฟันส่วนต้นได้มากกว่าการใช้เดือยโลหะ แต่ขณะเดียวกันวัสดุบูรณะก็ทำหน้าที่ช่วยดูดซับความเค้นที่เกิดขึ้นบางส่วนก่อนถ่ายทอดไปสู่เนื้อฟันทั้งหมด⁹⁸ ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่าการไม่เสริมผนังคลองรากฟัน

การเสริมผนังคลองรากฟันแม้ว่าจะช่วยลดความเค้นสูงสุดในรากฟัน แต่ก็จะทำให้ความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นทั้งสองบริเวณดังกล่าวพบว่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นที่บริเวณรากฟันส่วนต้นก็น้อยกว่าที่ปลายเดือย นอกจากนี้การเสริมผนังด้วยวัสดุที่มีการยึดติดกับเนื้อฟันจะช่วยรวบรวมรากฟันส่วนที่บางให้รวมเป็นหน่วยเดียวกันและมีความแข็งแรงต้านทานต่อการแตกมากขึ้น⁹⁰ ดังนั้นการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากบางควรจะได้รับเสริมผนังคลองรากก่อนการบูรณะด้วยฟันเดือย

การบูรณะด้วยการเสริมผนังคลองรากฟันในฟันรักษาคคลองรากฟันแล้วและมีผนังคลองรากฟันบาง นอกจากจะช่วยลดค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีแล้ว การเสริมผนังทำให้สามารถใช้เดือยสำเร็จรูปได้แบบพอดีกับผนังคลองรากที่เสริมด้วยวัสดุแล้ว ลดโอกาสเกิดความล้มเหลวแบบเดือยหลุด และช่วยลดการสะท้อนสีของเดือยที่เป็นโลหะได้⁹⁸ นอกจากนี้จากการทดลองของ Sorensen และ Engelman⁵⁸ พบว่าการเสริมผนังคลองรากฟันทำให้ได้เดือยที่มีรูปร่างขนานแทนที่จะเป็นรูปร่างสอบตามขนาดคลองรากฟันที่เป็นอยู่ ซึ่งจะช่วยลดการเกิดผลกระทบแบบลิ้ม เนื่องจากเดือยทรงสอบสามารถเคลื่อนลงมาทางปลายราก ทำให้ความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นและปลายเดือยมากขึ้นเมื่อได้รับแรง⁴⁰ และความล้มเหลวแบบรากฟันแตกจะเกิดที่ระดับไปทางปลายรากมากกว่าการใช้เดือยที่มีรูปร่างขนาน³⁰



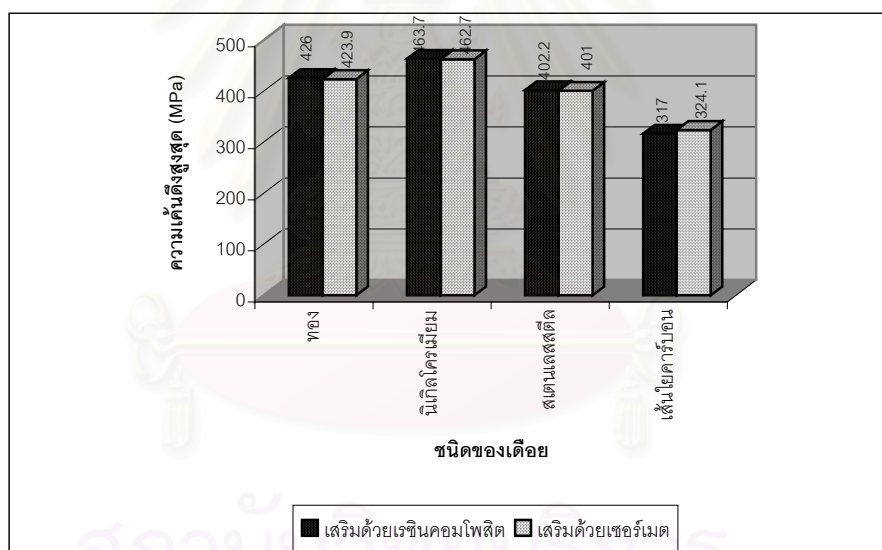
แผนภูมิที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดเมื่อเสริมและไม่เสริมผนังพบว่า การเสริมผนังคลองรากฟันจะช่วยลดค่าความเค้นดึงสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีกว่าการไม่เสริม



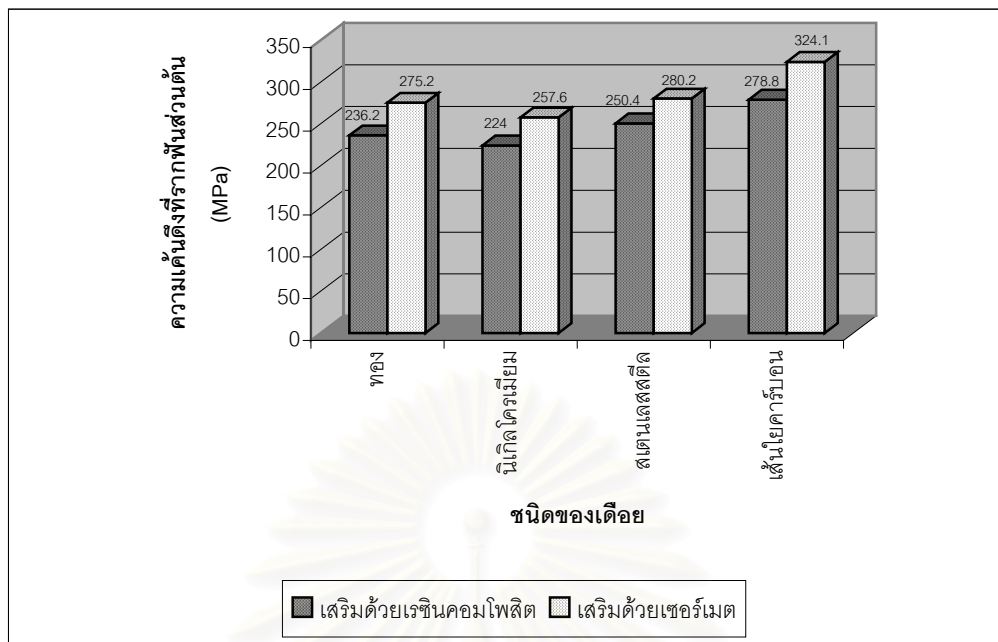
แผนภูมิที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นที่รากฟันส่วนต้นเมื่อเสริมและไม่เสริมคลองรากฟันด้วยวัสดุบูรณะฟัน พบว่าการเสริมผนังคลองรากฟันทำให้เกิดความเค้นที่บริเวณนี้มากกว่าการไม่เสริม

ปัจจัยชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟันกับความเค้นดึงในเนื้อฟัน

จากการใช้วัสดุเสริมคลองรากฟันสองชนิดคือเรซินคอมโพสิตและเซอรัมเมต เมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันพบว่า การเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตมีแนวโน้มทำให้เกิดความเค้นในเนื้อฟันโดยรวมมากกว่าการเสริมด้วยเซอรัมเมตเล็กน้อย ยกเว้นเมื่อใช้เดือยเส้นใยคาร์บอน การเสริมผนังด้วยเรซินคอมโพสิตทำให้ค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันโดยรวมน้อยกว่าการเสริมด้วยเซอรัมเมต (แผนภูมิที่ 4) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเค้นที่บริเวณรากฟันส่วนต้นพบว่า ได้ผลซึ่งตรงกันข้ามคือ การเสริมผนังด้วยเรซินคอมโพสิตทำให้เกิดความเค้นที่บริเวณนี้้น้อยกว่าการเสริมผนังด้วยเซอรัมเมต (แผนภูมิที่ 5) เนื่องจากเซอรัมเมตมีความอดุลีของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่าเรซินคอมโพสิต จึงเกิดการเปลี่ยนรูปได้ง่ายกว่าและส่งผ่านความเค้นไปยังเนื้อฟัน จากการใช้วัสดุเสริมคลองรากฟันสองชนิดอาจกล่าวได้ว่าชนิดของวัสดุเสริมผนังคลองรากฟันทำให้ความเค้นสูงสุดไม่ต่างกัน แต่ทำให้ความเค้นที่บริเวณรากฟันส่วนต้นต่างกัน



แผนภูมิที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดเมื่อเสริมผนังด้วยเซอรัมเมตและเรซินคอมโพสิต พบว่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันมีค่าใกล้เคียงกัน

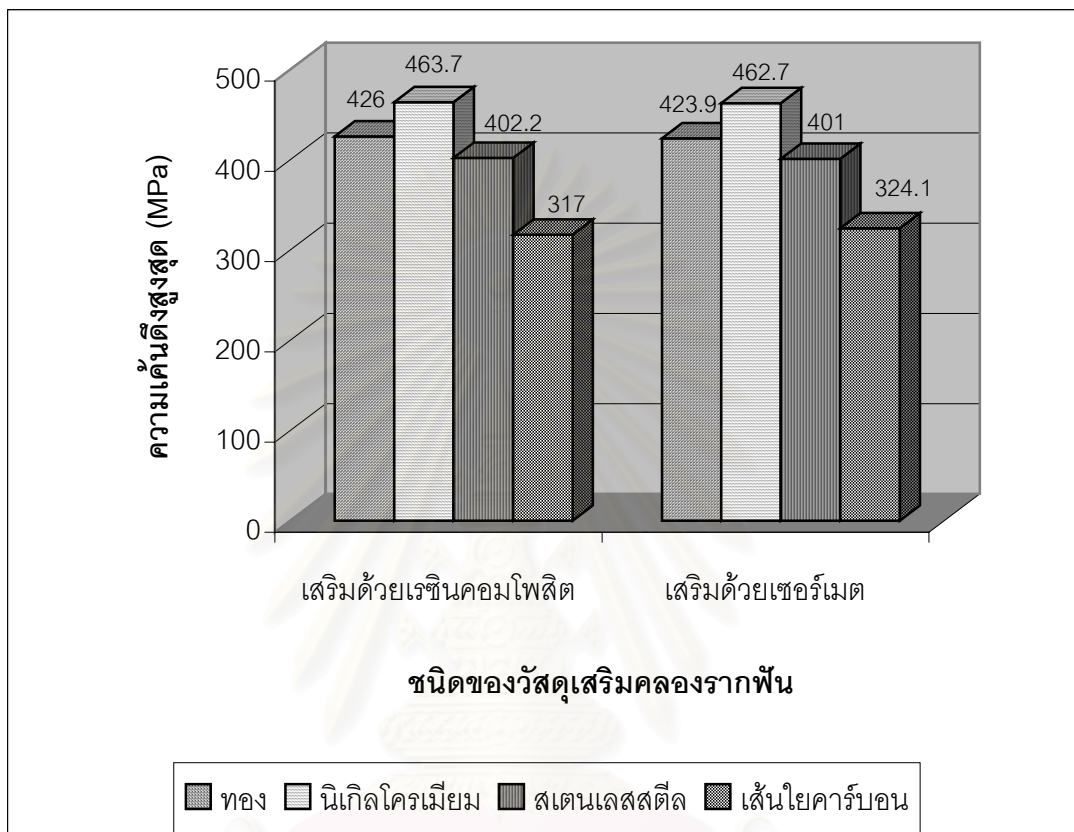


แผนภูมิที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นดึงบริเวณรากฟันส่วนต้นเมื่อเสริมผนังด้วย เซอร์เมตและเรซินคอมโพสิต พบว่าการเสริมผนังด้วยเรซินคอมโพสิตทำให้เกิด ความเค้นที่บริเวณนี้น้อยกว่าการเสริมผนังด้วยเซอร์เมต

ปัจจัยชนิดของเดือยกับความเค้นดึงในเนื้อฟัน

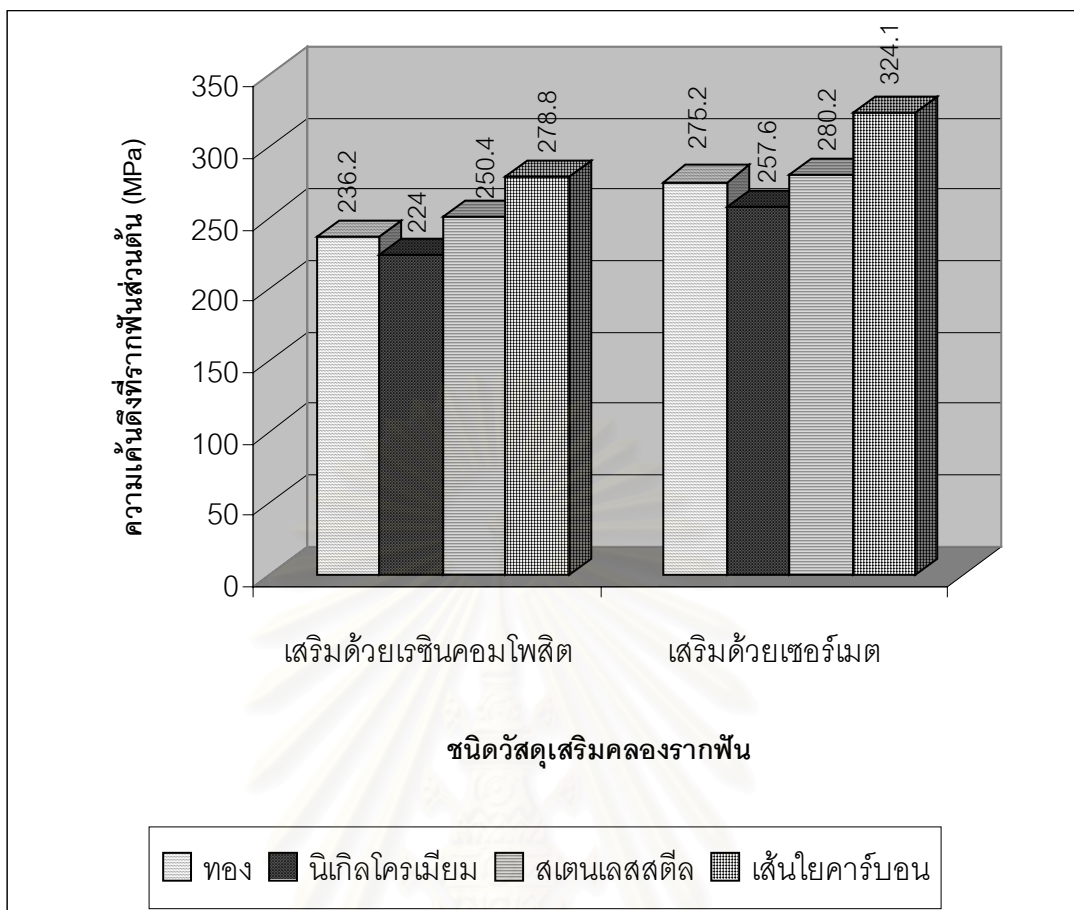
จากการบูรณะด้วยเดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม เดือยโลหะผสมนิกิลโคโรเมียม เดือย สแตนเลสสตีล และเดือยเส้นใยคาร์บอน เมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันพบว่า การใช้ เดือยเส้นใยคาร์บอนจะช่วยลดค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีกว่าการใช้เดือยชนิดอื่นเมื่อใช้วัสดุ เสริมคลองรากฟันชนิดเดียวกัน (แผนภูมิที่ 6) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงกดพบโอกาสเกิด รากฟันแตกเมื่อใช้เดือยเส้นใยคาร์บอนน้อยกว่าเดือยสแตนเลสสตีลและเดือยโลหะเหวี่ยง⁷⁴⁻⁷⁷ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความเค้นที่บริเวณรากฟันส่วนต้นพบว่าให้ผลตรงกันข้ามกล่าวคือ การใช้เดือย โลหะผสมนิกิลโคโรเมียมทำให้เกิดความเค้นในเนื้อฟันที่บริเวณรากฟันส่วนต้นน้อยกว่าเดือยชนิดอื่น (แผนภูมิที่ 7) เนื่องจากเดือยเส้นใยคาร์บอนมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่าเดือยชนิดอื่น และมีค่าใกล้เคียงกับค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของเนื้อฟัน ทำให้เกิดการกระจายความเค้นไปทั่วราก ฟัน ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันต่ำ เมื่อได้รับแรงจะเกิดการโค้งงอหรือเปลี่ยนรูปได้ง่ายทำให้ ส่งผ่านความเค้นไปยังบริเวณรากฟันส่วนต้นได้มาก ในขณะที่เดือยโลหะผสมนิกิลโคโรเมียมมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงที่สุดเมื่อได้รับแรงจะเกิดการโค้งงอได้ยากกว่า จึงส่งผ่านความเค้นไปยังเนื้อ ฟันที่รากฟันส่วนต้นน้อยกว่า ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันมีค่ามากกว่าแบบจำลองอื่น ซึ่ง

สัมพันธ์กับการศึกษาของ Assif และคณะ³⁹ และ Dean Jeansonne และ Sarkar⁷⁶ ที่พบว่าเดือยที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นมากจะส่งผ่านความเค้นไปยังเนื้อฟันบริเวณปลายเดือยมาก และมีแนวโน้มทำให้รากฟันแตกหักได้ง่าย



แผนภูมิที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันเมื่อใช้เดือยชนิดต่าง ๆ พบว่าการใช้เดือยเส้นใยคาร์บอนทำให้ค่าความเค้นสูงสุดต่ำกว่าเดือยชนิดอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แผนภูมิที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงบริเวณรากฟันส่วนต้นเมื่อใช้เดือยชนิดต่าง ๆ พบว่าการใช้เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียมทำให้เกิดความเค้นที่บริเวณดังกล่าวต่ำกว่าการใช้เดือยชนิดอื่น

จากแผนภูมิที่ 6 และ 7 พบว่าเมื่อทำการเสริมคลอกรากฟันด้วยวัสดุชนิดเดียวกันโดยใช้เดือยโลหะต่างชนิดกัน โดยทั่วไปค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันจะมากเมื่อใช้เดือยที่มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นมาก ดังเช่นค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันเมื่อใช้เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียมจะมากกว่าการใช้เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม ซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น 172 และ 77 GPa ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ใช้เดือยสแตนเลสสตีลซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงสุด (200 GPa) กลับมีค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อฟันน้อยกว่าเดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียมและเดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม ทั้งนี้จะเป็นเพราะการใช้เดือยสแตนเลสสตีลจะใช้แกนฟันที่ทำด้วยวัสดุบูรณะฟันชนิดเดียวกับที่ใช้เสริมคลอกรากฟันซึ่งมีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำกว่าแกนฟันของเดือยโลหะเหียงซึ่งจะใช้แกนฟันที่เป็นโลหะชนิดเดียวกับเดือย จึงช่วยลดความเค้นส่วนหนึ่งก่อนส่งผ่านความเค้นมายังเนื้อฟัน ซึ่งเมื่อลองทำการสร้างแบบจำลองเดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียมและเดือยโลหะผสมทองชนิดที่สามให้มี

รูปร่างเหมือนเดือยสแตนเลสสตีลแล้วสร้างส่วนแกนพื้นด้วยวัสดุบุรณะพื้นเช่นเดียวกับการใช้เดือยสแตนเลสสตีล พบว่าค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อพื้นเรียงลำดับจากมากไปน้อยเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของเดือย (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 แสดงค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อพื้นเมื่อใช้เดือย 3 ชนิดที่มีรูปร่างเหมือนกัน

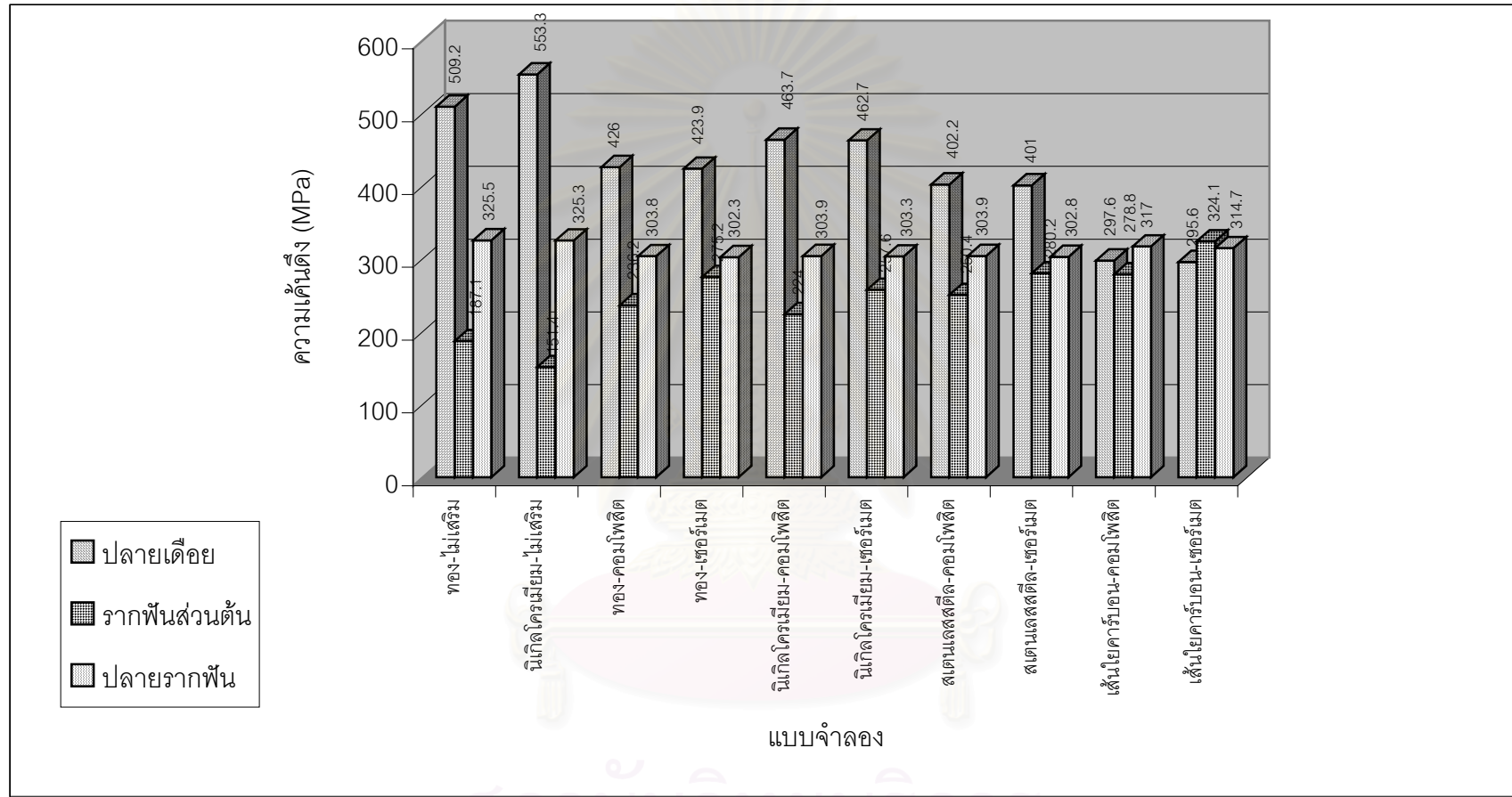
ชนิดของเดือย	ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (GPa)	ค่าความเค้นสูงสุด (MPa)	
		แกนพื้นเรซินคอมโพสิต	แกนพื้นเซอร์เมต
เดือยโลหะผสมทองชนิดที่สาม	77	369.2	366.7
เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียม	172	395.4	393.6
เดือยสแตนเลสสตีล	200	402.2	401.0

การบุรณะด้วยการใช้เดือยโลหะผสมนิกเกิลโครเมียมโดยไม่ได้เสริมผนังคลองรากฟันทำให้มีความเค้นที่รากฟันส่วนต้นน้อยที่สุด แต่ค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อพื้นซึ่งอยู่ที่บริเวณปลายเดือยมีค่ามากกว่าแบบจำลองอื่น แบบจำลองนี้จึงอาจจะไม่เหมาะสมกับการบุรณะฟันที่มีผนังคลองรากฟันส่วนต้นบาง เพราะอาจเกิดรากฟันแตกได้ที่ระดับปลายเดือย รูปแบบการบุรณะที่ดีควรมีการกระจายความเค้นไปเท่า ๆ กันทุกบริเวณของรากฟันเพื่อลดโอกาสเกิดรากฟันแตก ณ จุดใดจุดหนึ่ง จากการวิเคราะห์ค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นบริเวณรากฟันส่วนต้นกับปัจจัยทั้งสามประการ พบว่าการเสริมคลองรากฟันจะช่วยลดการเกิดการแตกของรากฟัน และการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตช่วยลดความเค้นที่บริเวณรากฟันส่วนต้นได้ดีกว่าเซอร์เมต ดังนั้นการบุรณะที่ได้น่าจะเป็นการเสริมผนังคลองรากด้วยเรซินคอมโพสิต เมื่อพิจารณาการใช้เดือยร่วมด้วยพบว่ารูปแบบการบุรณะที่น่าสนใจคือการบุรณะด้วยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยเรซินคอมโพสิตและใช้เดือยเส้นใยคาร์บอนเพราะทำให้ค่าความเค้นสูงสุดในเนื้อพื้นต่ำกว่าการบุรณะด้วยวิธีอื่น และเกิดความเค้นค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละบริเวณของรากฟัน ทำให้โอกาสเกิดรากฟันแตกลดลง ในขณะที่การใช้เดือยโลหะทั้งสามชนิดจะก่อให้เกิดความเค้นที่มาก ณ ตำแหน่งปลายเดือย (ตารางที่ 7 และแผนภูมิที่ 8)

ตารางที่ 7 แสดงความเค้นในเนื้อพื้นที่บริเวณต่าง ๆ ของแบบจำลองการบูรณะทั้ง 10 วิธี

แบบจำลอง	ปลายเดือย	รากฟันส่วนต้น	ปลายรากฟัน
1.1 ทอง-ไม่เสริมผนัง	509.2	187.1	325.5
1.2 นิเกิลโครเมียม-ไม่เสริมผนัง	553.3	151.4	325.3
2.1 ทอง-คอมโพสิต	426.0	236.2	303.8
2.2 นิเกิลโครเมียม-คอมโพสิต	463.7	224.0	303.9
3.1 สเตนเลสสตีล-คอมโพสิต	402.2	250.4	303.9
3.2 คาร์บอน-คอมโพสิต	297.6	278.8	317.0
4.1 ทอง-เซอรัมเมต	423.9	275.2	302.3
4.2 นิเกิลโครเมียม-เซอรัมเมต	462.7	257.6	303.3
5.1 สเตนเลสสตีล-เซอรัมเมต	401.0	280.2	302.8
5.2 คาร์บอน-เซอรัมเมต	295.6	324.1	314.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แผนภูมิที่ 8 แสดงความเค้นดึงในเนื้อพื้นที่บริเวณต่าง ๆ ของแบบจำลองทั้ง 10 วิธี พบว่าแบบจำลองคาร์บอน-คอมโพสิตมีค่าความเค้นสูงสุดต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

อย่างไรก็ตามผลจากการวิจัยนี้เป็นเพียงการวิจัยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีข้อจำกัดของการวิจัยที่ไม่เหมือนสภาพความเป็นจริง ดังนั้นการออกแบบการบูรณะที่เหมาะสมควรได้รับการยืนยันด้วยการทดสอบทางกล เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในเนื้อฟัน วัสดุเสริมคลองรากฟัน และเดือย ในการบูรณะฟันที่รักษาคลองรากฟันที่มีผนังคลองรากฟันบางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ โดยกำหนดปัจจัยการเสริมผนังคลองรากฟันส่วนต้น ชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟันและชนิดของเดือย พบว่า

1. ตำแหน่งที่อาจเกิดความล้มเหลวในการบูรณะฟันได้แก่ ที่ผนังคลองรากฟันด้านในที่ระดับปลายเดือยด้านใกล้แก้ม ผนังคลองรากฟันด้านในที่ระดับปลายรากฟันด้านใกล้ลิ้น และที่ผิวรากฟันด้านนอกที่ระดับคลองรากฟันส่วนต้นด้านใกล้ลิ้น
2. ในฟันที่มีผนังคลองรากฟันส่วนต้นบาง การเสริมผนังคลองรากฟันทำให้เกิดการกระจายความเค้นได้ดีกว่าการไม่เสริมผนัง เพราะทำให้ค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันลดลง
3. ชนิดของวัสดุเสริมคลองรากฟันไม่มีผลต่อค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟัน แต่ทำให้ความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันส่วนต้นมีค่าต่างกัน โดยการเสริมผนังคลองรากฟันด้วยวัสดุที่มีความอดดูล์ของสภาพยึดหยุ่นใกล้เคียงกับเนื้อฟันได้แก่ เรซินคอมโพสิตจะช่วยลดความเค้นดิ่งที่บริเวณรากฟันส่วนต้นมากกว่าเซรามิกที่มีความอดดูล์ของสภาพยึดหยุ่นต่ำกว่าเนื้อฟันมาก
4. ชนิดของเดือยมีผลต่อค่าความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันและความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันส่วนต้น โดยเดือยที่มีความอดดูล์ของสภาพยึดหยุ่นมากทำให้ความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันมีค่ามากกว่า แต่ความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันส่วนต้นน้อยกว่าเดือยที่มีความอดดูล์ของสภาพยึดหยุ่นน้อย
5. ในการบูรณะฟันที่มีผนังคลองรากฟันบาง การใช้เรซินคอมโพสิตเป็นวัสดุเสริมคลองรากฟันและสร้างแกน ร่วมกับการใช้เดือยเส้นใยคาร์บอนน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากช่วยลดความเค้นดิ่งสูงสุดในเนื้อฟันได้ดีกว่าการบูรณะด้วยวิธีอื่น และทำให้เกิดความเค้นในเนื้อฟันที่ใกล้เคียงกันในแต่ละบริเวณของรากฟัน

ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับระยะเวลาในการทำวิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติ ซึ่งหากมีเวลามากเพียงพอการวิเคราะห์แบบสามมิติย่อมให้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า นอกจากนี้ข้อกำหนดเบื้องต้นที่กำหนดให้เนื้อฟัน เนื้อเยื่ออื่น ๆ และวัสดุบูรณะมีสมบัติเชิงกลเหมือนกันในทุก ๆ ส่วนของวัสดุ สมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง และสมบัติยืดหยุ่นเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งแตกต่างจากสภาพความเป็นจริงที่เนื้อเยื่อและวัสดุไม่ได้มีความเหมือนกันในแต่ละบริเวณ เช่น เนื้อฟันซึ่งประกอบด้วยท่อเนื้อฟัน (dentinal tubule) เรียงตัวตามแนวขวางหรือเฉียงเส้นใยคาร์บอนซึ่งมีเส้นใยคาร์บอนขนาดเล็กเรียงตัวตามแนวยาวทำให้สามารถทนแรงที่กระทำตามแนวยาวได้ดีกว่าแรงตามแนวขวาง ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นตามแนวขวางโดยเฉลี่ย 21 GPa ในการคำนวณ (ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นตามแนวยาว 124 GPa ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นตามแนวขวาง 8.5 GPa) ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงเมื่อเนื้อเยื่อเส้นใยคาร์บอนได้รับแรงทำมุม 130 องศาเช่นในการศึกษานี้ จึงน่าจะเกิดการโค้งงอได้ง่ายขึ้นทำให้ความเค้นที่บริเวณรากฟันส่วนต้นน่าจะมากขึ้นและความเค้นที่บริเวณปลายเดือยน่าจะลดลงกว่าผลที่ได้จากการศึกษานี้ แรงที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแรงแบบสถิตย์ที่มีเพียงทิศทางเดียว แต่ในความเป็นจริงแรงบิดเคี้ยวที่มักกระทำมาได้หลายแนวและเป็นแรงที่เกิดซ้ำ ๆ กันเป็นวงจร (cyclic load) นอกจากนี้ลักษณะการเชื่อมยึดของวัสดุในสภาพจริงอาจไม่ได้เป็นการยึดอย่างสมบูรณ์ ทำให้อาจเกิดความล้มเหลวขึ้นได้ที่ระหว่างผิวเชื่อมยึดของวัสดุ เช่น ระหว่างเดือยกับแกนฟัน แกนฟันกับครอบฟัน เป็นต้น จึงอาจเกิดความล้มเหลวโดยเกิดการหลุดของวัสดุออกก่อนที่จะเกิดการแตกของรากฟัน ผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้จึงเป็นเพียงการทำนายแนวโน้ม และเปรียบเทียบโอกาสเกิดความล้มเหลวของการบูรณะแต่ละวิธีภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงอาจต้องทำการศึกษาดูด้วยแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การกำหนดให้วัสดุเชื่อมต่อกันอย่างมีเงื่อนไข (contact element) และอาจทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการร่วมด้วย เพื่อศึกษาปริมาณแรงที่ก่อให้เกิดความล้มเหลว รูปแบบความล้มเหลวและตำแหน่งที่เกิดความล้มเหลวต่อไป อย่างไรก็ตามการวิจัยครั้งนี้สามารถคัดเลือกวิธีการบูรณะที่เหมาะสมจากหลายวิธีที่สร้างสมมติฐานขึ้น เพื่อจำกัดจำนวนวิธีการบูรณะที่เหมาะสมให้น้อยลง และเป็นแนวทางในการวิจัยหาวิธีที่ดีที่สุดต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Holmes, D.C., Diaz-Arnold, A.M., and Leary, J.M. Influence of post dimension on stress distribution in dentin. J Prosthet Dent 75(1996):140-147.
2. Rosen, H. Operative procedures on mutilated endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 11(1961):973-986.
3. Reeh, E.S., Messer, H.H., and Douglas, W.H. Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. J Endodont 15(1989):512-516.
4. Robbins, J.W. Guidelines for the restoration of endodontically treated teeth. J Am Dent Assoc 120(1990):558-565.
5. Linn, J. and Messer, H.H. Effect of restorative procedures on the strength of endodontically treated molars. J Endodont 20(1994):479-485.
6. Sorensen, J. and Martinoff, J. Intracoronal reinforcement and coronal coverage: a study of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 51(1984):780-784.
7. Hunter, A. and Flood, A. The restoration of endodontically treated teeth. Part 1. Treatment planning and restorative principles. Aust Dent J 33(1988):481-490.
8. Abou-Rass, M. Post and core restoration of endodontically treated teeth. Curr Opin Dent 2(1992):99-107.
9. Guzy, G.E. and Nicholls, J.I. In vitro comparison of intact endodontically treated teeth with and without endo-post reinforcement. J Prosthet Dent 42(1979):39-44.
10. Lovdahl, P.E. and Nicholls, J.I. Pin-retained amalgam cores vs. cast-gold dowel-cores. J Prosthet Dent 38(1977):507-514.
11. McDonald, A.V., King, P.A. and Setchell, D.J. An in vitro study to compare impact fracture resistance of intact root-treated teeth. Int Endodont J 23(1991):304-312.
12. Frank, A.L. Protective coronal coverage of the pulpless tooth. J Am Dent Assoc 59(1959):895-900.
13. Silverstein, W.H. The reinforcement of weakened pulpless teeth. J Prosthet Dent 14(1964):372-381.
14. Lau, V.M.S. The reinforcement of endodontically treated teeth. Dent Clin North Am 20(1976):313-328.

15. Micknick, B.T and Raskin, R.B. A multiple post-core technique. J Prosthet Dent 39(1978):622-626.
16. Kantor, M.E. and Pines, M.S. A comparative study of restorative techniques for pulpless teeth. J Prosthet Dent 38(1977):405-412.
17. Trabert, K.C., Caputo, A.A. and Abou-Rass, M. Tooth fracture, a comparison of endodontic and restorative treatment. J Endodont 4(1978):341-345.
18. Sivers, J.E. and Johnson, W.T. Restoration of endodontically treated teeth. Dent Clin North Am 36(1992):631-650.
19. Sorensen, J.A. and Martinoff, J.T. Endodontically treated teeth as abutments. J Prosthet Dent 53(1985):631-636.
20. Sidoli, G.E., King, P.A. and Setchell, D.J. An in vitro evaluation of a carbon fiber-based post and core system. J Prosthet Dent 78(1997):5-9.
21. Mertz, K.A., Parker, M.W. and Pellew, G.B. Shear strength of two coronal radicular amalgam and pin-retained amalgam. J Dent Res 66(1987):289.
22. Kern, S.B., Von Fraunhofer, J.A. and Mueninghoff, L.A. An in vitro comparison of two dowel and core techniques for endodontically treated molars. J Prosthet Dent 51(1984):509-514.
23. Orkin, A.D. and Louw, N.P. Comparative study of the retentive strengths of dowels of different diameter in combination with one or two different-sized threaded pins. J Prosthet Dent 63(1990):144-150.
24. Nayyar, A., Walton, R.E. and Leonard, L.A. An amalgam coronal radicular dowel and core technique for endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 43(1980):511-515.
25. Kane, J.J., Burgess, J.O. and Summitt, J.B. Fracture resistance of amalgam coronal-radicular restorations. J Prosthet Dent 63(1990):607-613.
26. Gelfand, M., Goldman, M. and Sanderman, E. Effects of complete veneer crown on the compressive strength of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 52(1984):635-638.
27. Hoag, E.P. and Dwyer, T.G. A comparative evaluation of three post and core technique. J Prosthet Dent 47(1982):177-181.

28. Plasman, P.J.J.M., Visseren, I.S.H., Vrijhoef, M.M.A. and Kayser, A.F. In vitro comparison of dowel and core technique for endodontically treated molars. J Prosthet Dent 12(1986):382-387.
29. Chan, R.W. and Bryant, R.W. Post –core foundations for endodontically treated posterior teeth. J Prosthet Dent 48(1982):401-406.
30. Sorensen, J.A. and Engelman, M.J. Effect of post adaptation on fracture resistance of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 64(1990):419-424.
31. Isidor, F., Odman, P. and Brendum, K. Intermittent Loading of Teeth restored using prefabricated carbon fiber posts. Int J Prosthodont 9(1996):131-136.
32. Fraga, R.C., Chaves, B.T., Mello, G.S. and Sequeira, J.F. Jr. Fracture resistance of endodontically treated roots after restoration. J Oral Rehabil 25(1998):809-813.
33. Torbjorner, A., Karlsson, S. and Odman, P.A. Survival rate and failure characteristics for two post designs. J Prosthet Dent 73(1995):439-444.
34. Mentink, A.G., Meeuwissen, R., Kayser, A.F. and Mulder, J. Survival rate and failure characteristics of the all metal post and core restoration. J Oral Rehabil 20(1993):455-461.
35. Colley, I.T., Hampson, E.L. and Lehman, M. Retention of post crowns. Br Dent J 124(1968):63-69.
36. Standlee, J.P., Caputo, A.A. and Hanson, E.C. Retention of endodontic dowels: effects of cement, dowel length, diameter, and design. J Prosthet Dent 39(1978):400-405.
37. Mattison, G.D. Photoelastic stress analysis of cast-gold endodontic posts. J Prosthet Dent 48(1982):407-411.
38. Henry, P.J. Photoelastic analysis of post and core restoration. Aus Dent J 22(1977):157-159.
39. Assif, D., Oren, E., Marshak, B.L. and Aviv, I. Photoelastic analysis of stress transfer by endodontically treated teeth to the supporting structure using different restorative techniques. J Prosthet Dent 61(1989):535-543.
40. Standlee, J.P., Caputo, A.A., Collard, E.W. and Pollack, M.H. Analysis of stress distribution by endodontic posts. Oral Surg 33(1972):952-960.

41. Coony, J.P., Caputo, M. and Trabert, K.C. Retention and stress distribution of tapered-end endodontic posts. J Prosthet Dent 55(1986):540-546.
42. Trabert, K.C. and Coony, J.P. The endodontically treated teeth. Restorative concepts and techniques. Dent Clin North Am 28(1984):923-951.
43. Peters, M.C.R.B., Poort, H.W., Farah, J.W. and Craig, R.G. Stress analysis of a tooth restored with a post and core. J Dent Res 62(1983):760-763.
44. Assif, D., Bitenski, A., Pilo, R. and Oren, E. Effect of post design on resistance to fracture of endodontically treated teeth with complete crowns. J Prosthet Dent 69(1993):36-40.
45. Tjan, A.H.L. and Whang, S.B. Resistance to root fracture of dowel channels with various thickness of buccal dentin walls. J Prosthet Dent 53(1985):496-500.
46. Standlee, J.P., Caputo, A.A., Holcomb, J. and Trabert, K.C. The retentive and stress-distributing properties of a threaded endodontic dowel. J Prosthet Dent 44(1980):398-404.
47. Hussey, D.L. Resin retained posts, possible strengthening effects on dentin. J Dent Res 68(1989):spec abstr. No 554.
48. Caputo, A.A. and Standlee, J.P. Pins and posts-why, when and how. Dent Clin North Am 20(1976):299-312.
49. Davy, D.T., Dilley, G.L. and Krejci, R.F. Determination of stress patterns in root-filled teeth incorporating various dowel designs. J Dent Res 60(1981):1301-1310.
50. Sorensen, J.A. and Martinoff, J.T. Clinically significant factors in dowel design. J Prosthet Dent 52(1984):28-35.
51. Scherrer, S.S. and De Rijk, W.G. The fracture resistance of all-ceramic crowns on supporting structures with different elastic moduli. Int J Prosthodont 6(1993):462-467.
52. Hew, Y.S., Purton, D.G. and Love, R.M. Evaluation of pre-fabricated root canal posts. J Oral Rehabil 28(2001):207-211.
53. Assif, D. and Bleicher, S. Retention of serrated endodontic posts with a composite luting agent : effect of cement thickness. J Prosthet Dent 56(1986):689-691.
54. Dietschi, D., Romelli, M. and Goretti, A. Adaptation of adhesive posts and cores to dentin after fatigue testing. Int J Prosthodont 10(1997):498-507.

55. Barkhordar, R.A., Radke, R. and Abbasi, J. Effect of metal collars on resistance of endodontically treated teeth to root fracture. J Prosthet Dent 61(1989):676-678.
56. Rosner, D. Function, placement and reproduction of bevels for gold castings. J Prosthet Dent 13(1963):1160-1199.
57. Shillingburg, H.T., Hobo, S. and Whisett, L.O. Fundamentals of fixed prosthodontics. 2nd ed. Chicago : Quintessence, 1982.
58. Sorensen, J.A. and Engelman, M.J. Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 63(1990):529-536.
59. Potts, R.G., Shillingburg, H.T. and Duncanson, M.G. Retention and resistance of preparations for cast restorations. J Prosthet Dent 43(1980):303-308.
60. Loney, R.W., Kotowicz, W.E. and McDowell, G.C. Three dimensional photoelastic stress analysis of the ferrule effect in cast post and cores. J Prosthet Dent 63(1990):506-512.
61. Ko, C-C., Chu, C-S., Chung, K-H. and Lee, M-C. Effects of posts on dentin stress distribution in pulpless teeth. J Prosthet Dent 68(1992):421-427.
62. Mojon, P., Hawbolt, E.B., Macentee, M.I. and Belser, UC. Maximum bond strength of dental luting cement to amalgam alloy. J Dent Res 68(1989):1545-1549.
63. Mendoza, D.B., Eakle, W.S., Kahl, E.A. and Ho, R. Root reinforcement with a resin-bonded performed post. J Prosthet Dent 78(1997):10-15.
64. Nayyar, A., Mcdonald, T.R., Turner, F. and Koth, D.L. Strength of premolar coronoradicular buildups restores with cast crowns (Abstract). J Dent Res 61(1982):70.
65. Silness, J., Gustavsen, F. and Hunsbeth, J. Distribution of corrosion products in teeth restored with metal crowns retained by stainless steel posts. Acta Odontol Scand 37(1979):317-321.
66. Oden, A. and Tullberg, M. Cracks in gold crowns cemented on amalgam restorations. Acta Odontol Scand 43(1985):15-17.
67. Rud, J. and Omnell, K. Root fractures due to corrosion : diagnostic aspects. Scan J Dent Res 78(1970):397-403.

68. Karna, J.C. A fiber composite laminate endodontic post and core. Am J Dent 9(1996):230-232.
69. Sirimai, S., Riis, D.N. and Morgano, S.M. An in vitro study of the fracture resistance and the incidence of vertical root fracture of pulpless teeth restored with six post-and-core systems. J Prosthet Dent 81(1999):262-269.
70. Composipost technical document : Meylan Cedex. France : RTD,1994.
71. Purton, D.G. and Payne, J.A. Comparison of carbon fiber versus stainless steel root canal posts. Int Endodont J 29(1990):262-265.
72. Martinez-Insua, A., Silva, L.D., Rilo, B. and Santana, U. Comparison of the fracture resistances of pulpless teeth restored with a cast post and core or carbon-fiber post with a composite core. J Prosthet Dent 80(1998):527-532.
73. King, P.A. and Setchell, D.J. An in vitro evaluation of prototype CFRC prefabricated post developed for the restoration of pulpless teeth. J Oral Rehabil 17(1990):599-609.
74. Purton, D.G. and Payne, J.A. Comparison of carbon fiber and stainless steel root canal posts. Quintessence Int 27(1996):93-97.
75. Isidor, F. and Brondum, K. Intermittent loading of teeth with tapered, individual cast or prefabricated parallel-sided posts. Int J Prosthodont 5(1992):257-261.
76. Dean, J.P., Jeansonne, B.G. and Sarkar, N. In vitro evaluation of a carbon fiber post. J Endodont 24(1998):807-810.
77. Cohen, B.I., Pagnillo, M.K., Condos, S. and Deutsch, A.S. Four materials measured for fracture strength in combination with five designs of endodontic posts. J Prosthet Dent 76(1996):487-495.
78. Freedman, G.A. Esthetic post-and-core treatment. Dent Clin North Am 45(2001):103-116.
79. Craig, R.G. Restorative dental materials. 10th ed. St Louis : Mosby,1997.
80. Davidson, C. and Mjor, I.A. Advances in glass-ionomer cements. Chicago: Quintessence,1999.
81. McLean, J.W. and Gasser, O. Glass-cermet cements. Quintessence Int 16(1985):333-343.

82. Walls, A.W.G., et al. The properties of glass polyalkenoate (ionomer) cement incorporating sintered metallic particles. Dent Mater 3(1987):113-116.
83. Rabie, G., Trope, M. and Tronstad, L. Strengthening of immature teeth during long-term endodontic therapy. Endod Dent Traumatol 2(1986):43-47.
84. McLean, J.W. Cermet cements. J Am Dent Assoc 120(1990):43-47.
85. Lui, J.L. A technique to reinforce weakened roots with post canals. Endod Dent Traumatol 3(1987):310-314.
86. Stern, N. and Hirshfeld, Z. Principles of preparing endodontically treated teeth for dowel and core restorations. J Prosthet Dent 30(1973):162-165.
87. Guttman, J.L. Preparation of endodontically treated teeth to receive a post-core restoration. J Prosthet Dent 38(1977):413-419.
88. Zmener, O. Adaptation of threaded dowels to dentin. J Prosthet Dent 43(1980):530-535.
89. Deutsch, A.S., et al. Root fracture and the design of prefabricated posts. J Prosthet Dent 53(1985):637-640.
90. Trope, M., Maltz, D.O. and Tronstad, L. Resistance to fracture of restored endodontically treated teeth. Endod Dent Traumatol 1(1985):108-111.
91. Lui, J.L. Cermet reinforcement of a weakened endodontically treated root: a case report. Quintessence Int 23(1992):533-538.
92. Thornton, J.B., Retief, D.H. and Badley, E.L. Fluoride release from and tensile bond strength of Ketac-Fil and Ketac-Silver to enamel and dentin. Dent Mater 2(1986):241-245.
93. Goldman G. Polymerization shrinkage of resin bonded restorative materials. Aust Dent J 28(1983):156-161.
94. Feilzer, A.J., Degee, A.J. and Davidson, C.L. Curing contraction of composites and glass ionomer cements. J Prosthet Dent 60(1988):297-300.
95. Wilson, A.D. and Prosser, H.J. A survey of inorganic and polyelectrolyte cements. Br Dent J 157(1984):449-454.
96. Bassiouny, M. and Racz, W. Abrasion resistance of glass-ionomer restoratives. J Dent Res 65(1986):779 (abstr No. 480).

97. Lui, J.L. Composite resin reinforcement of flared canals using light-transmitting plastic posts. Quintessence Int 25(1994):313-319.
98. Saupe, W.A., Gluskin, A.H. and Radke, R.A. A comparative study of fracture resistance between morphologic dowel and cores and resin-reinforced dowel system in the intraradicular restoration of structurally compromised roots. Quintessence Int 27(1996):483-491.
99. Craig, R.G., O'Brien, W.J. and Powers, J.M. Dental Materials. 4th ed. St Louis : Mosby, 1987.
100. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ศาสตราจารย์ ดร. ไฟไนต์เคลิเมนต์ในงานวิศกรรม. พิมพ์ครั้งที่ ๒. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ๒๕๔๒.
101. Cailleateau, J.G., Rieger, M.R. and Akin, J.E. A comparison of intracanal stresses in a post-restored tooth utilizing the finite element method. J Endodont 18(1992):540-544.
102. Rieger, M.R., Adam, W.K. and Kinzel, G.L. Finite element survey of eleven endosseous implants. J Prosthet Dent 63(1990):457-465.
103. Ash, M.M. Wheeler's Dental anatomy, Physiology and Occlusion. 7th ed. Philadelphia : W.B. Saunders, 1993.
104. Kasahara, E., Yasuda, E., Yamamoto, A. and Anzai, M. Root canal system of the maxillary cantral incisor. J Endodont 16(1990):158.
105. Manson, J.D. and Eley, B.M. Outline of Periodontics. 4th ed. Oxford : Wright, 2000.
106. Farah, J.W., Craig, R.G. and Meroueh, K.A. Finite element analysis of a mandibular model. J Oral Rehabil 15(1988):615-624.
107. Peyton, F.A., Mahler, D.B. and Hershenov, B. Physical properties of dentin. J Dent Res 31(1952):366-370.
108. Weinstein, A.M., Klawitter, J.J. and Cook, S.D. Implant –bone interface characteristics of bioglass dental implants. J Biomed Mater Res 14(1980):23-29.
109. Kydd, W.L. and Mandley, J. The stiffness of palatal mucoperiosteum. J Prosthet Dent 18(1967):116-121.
110. Friedman, C.M., Sandrik, J.L., Heuer, M.A. and Rapp, G.W. Composition and mechanical properties of gutta-percha endodontic points. J Dent Res 54(1975):921-925.

111. Craig, R.G., O'Brien, W.J. and Powers, J.M. Restorative dental material properties and manipulation. St Louis : CV Mosby, 1987.
112. Reinhardt, R.A., Krejci, R.F., Pao, Y.C. and Stannard, J.G. Dentin stresses in post-reconstructed teeth with diminishing bone support. J Dent Res 62(1983):1002-1008.
113. O'brien, W.J. Dental Materials and Their Selection. 2nd ed. Chicago : Quintessence, 1997.
114. Williams, K.R., Edmundson, J.T. and Rees, J.S. Finite element analysis of restored teeth. Dent Mater 3(1987):200-206.
115. Roulet, J-F and Degrange M. Adhesion : the silent revolution in dentistry. Chicago : Quintessence, 2000.
116. Craig, R.G. Restorative Dental Materials. 10th ed. St Louis : CV Mosby, 1997.
117. Farah, J.W. and Craig, R.G. Distribution of stresses in porcelain-fused to metal and porcelain jacket crowns. J Dent Res 54(1975):255-261.
118. Moyers, R.E. Handbook of orthodontics. 4th ed. Chicago: Year Book Medical, 1988.
119. Yang, H-S, Lang, L-A, Molina, A. and Felton, D.A. The effects of dowel design and load direction on dowel-and-core restorations. J Prosthet Dent 85(2001):558-567.
120. Ho, M-H, Lee, S-Y, Chen, H-H and Lee M-C. Three dimensional finite element analysis of the effects of posts on stress distribution in dentin. J Prosthet Dent 72(1994):367-372.
121. Akkayan, B. and Gulmez, T. Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems. J Prosthet Dent 87(2002):431-437.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริพร อรุณประดิษฐ์กุล สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิต ในปีพ.ศ. 2541 จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นเข้ารับราชการเป็นอาจารย์ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ต่อมาในปี พ.ศ. 2543 จึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ที่คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย