

การวิเคราะห์ความเค้นในรากฟันเทียมของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



นายชาคริต ตั้งศิริมงคล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

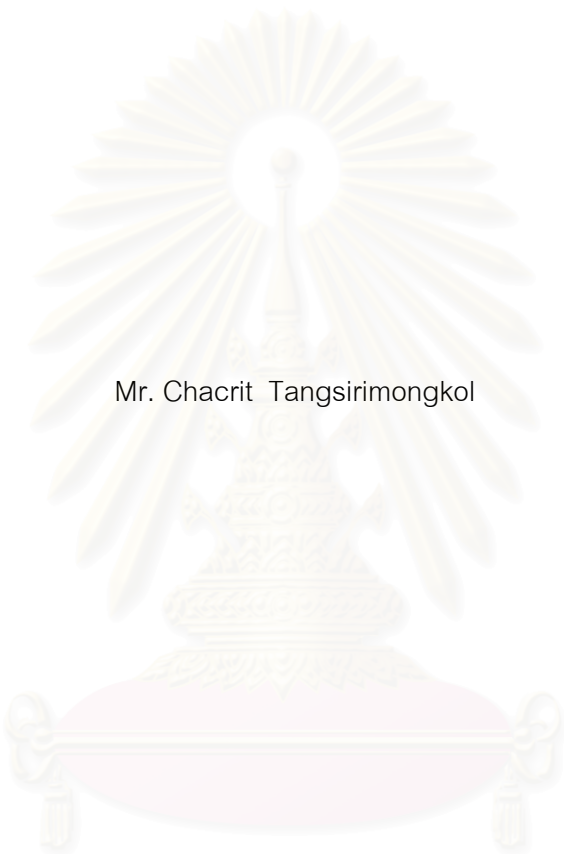
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9815-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRESS ANALYSIS IN HYBRID DENTURE BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Mr. Chacrit Tangsirimongkol



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9815-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความเค้นในรากฟันเทียมของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย	นายชาคริต ตั้งศิริมงคล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุติมา จินตนาวัน)

นายชาคริต ตั้งศิริมงคล : การวิเคราะห์ความเค้นในรากฟันเทียมของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ( STRESS ANALYSIS IN HYBRID DENTURE BY THE FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ , 195 หน้า. ISBN 974-17-9815-6

ในปัจจุบันการทำฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในบรรดาผู้ป่วยไร้ฟัน แต่การฝังรากฟันเทียมจำนวนหลายตัวลงในกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อรองรับชุดฟันปลอมนั้นเป็นปัญหาสำหรับผู้ป่วยบางกลุ่ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริดบนกระดูกขากรรไกรล่างโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปัญหาและแนวทางในการแก้ปัญหาซึ่งเกิดจากการลดจำนวนรากฟันเทียมที่รองรับฟันปลอมไฮบริดให้เหลือเพียง 3 ตัว โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งฝังรากฟันเทียม 3 ตัว และ 5 ตัว เมื่อมีแรงบดเคี้ยวกระจายทั้งปากและเมื่อมีแรงบดเคี้ยวเฉพาะฟันกรามด้านขวา กำหนดให้ความยาวรากฟันเทียม ระยะระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและหลังสุด และความยาวส่วนยื่นด้านท้ายฟันเทียมปลอมเท่ากัน จากการทำนายค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า การลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรล่างให้เหลือเพียง 3 ตัวทำให้ค่าความเค้นสูงสุดที่ตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุดนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการฝังรากฟันเทียมจำนวน 5 ตัว เนื่องจากรากฟันเทียมแต่ละตัวต้องรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวทางในการแก้ปัญหาก็คือเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างฟันปลอม ได้แก่ การเพิ่มขนาดของหลักยึดรากฟันเทียม หรือเสริมบารองรับให้แก่หลักรากฟันเทียม และอีกแนวทางในการแก้ปัญหาก็คือลดโมเมนต์ดัดที่ลงสู่รากฟันเทียมตัวหลังสุด ได้แก่ การเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะให้มีความแข็งแรงมากขึ้น หรือการออกแบบโครงสร้างฟันปลอมถ่ายทอดแรงในแนวแกนรากฟันเทียมลงสู่รากฟันเทียมเท่านั้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2545.....

# # 4270287621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: STRESS ANALYSIS / FINITE ELEMENT METHOD / IMPLANT

CHACRIT TANGSIRIMONGKOL : STRESS ANALYSIS IN HYBRID  
DENTURE BY THE FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR:  
CHIRDPUN VITTOORAPORN Ph.D. 195 pp. ISBN 974-17-9815-6.

The hybrid denture are broadly used nowadays for oral restoration in edentulous patients. However, for some patients, problems occur when placing many implants into the mandible. In order to investigate the probability of reducing the number of implants that are used to support the hybrid denture, the finite element method is used as a tool to study the stress distribution in this study. The hybrid denture supported with three and five implants is modelled and embedded in a model of the mandibular bone. The vertical chewing force is then applied on the denture in two different patterns, i.e. one as a concentrated force throughout the denture and the other as a concentrated force on the right molars. The length of the implant, the distance between the front end and the rear end of the implant and the length of the distal extension cantilevers are set to be equal. The results from the finite element method reveal that by reducing the number of implants to three, the maximum stress occurred in the implant at the rear end is higher than that when using five implants. This is because each implant must bear a higher bending moment. The solutions to this problem are to enhance the strength of the hybrid denture by increasing the size of the abutment or adding a chamfer at the neck of the abutment. Other solutions are to reduce the bending moment on the implant at the rear end by using other materials with higher strength, such as cobalt, or redesigning the structure of the denture so that it receives only the axial force.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2002

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูรภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด, รศ.ทพ. ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย และ ทพญ. อัญชลี ตั้งจาตุรนต์รัศมี ทันตแพทย์ผู้แนะนำเสนอปัญหา และข้อมูลทางทันตกรรมมาให้, ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นประธานของคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้, อาจารย์ ดร. กุณทิณี มณีรัตน์ และ ดร. สิริติมา จินตนาวัน ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากบุคคลท่านต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา, พี่น้อง และ เพื่อนๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์ทางการศึกษาอยู่บ้าง ผู้วิจัยขออุทิศให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ คุณย่า คุณตา คุณลุง พี่ชาย และเพื่อนของผู้วิจัยผู้ล่วงลับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฌ
สารบัญภาพ .....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	น
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ .....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6 ปรัชญ์ศรัทธาธรรม .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน .....	10
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองพันปลอมไฮบริดในซากกระดูกโครงกลาง.....	20
บทที่ 4 การกระจายความเค้นในพันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม.....	30
บทที่ 5 การกระจายความเค้นในพันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมเมื่อเปรียบเทียบกับ พันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม.....	41
บทที่ 6 การปรับปรุงพันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมโดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ หลักยึดรากฟันเทียม .....	56
บทที่ 7 การปรับปรุงพันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมโดยการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำ โครงโลหะ.....	72
บทที่ 8 การปรับปรุงพันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมโดยการเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อระหว่าง โครงโลหะกับหลักยึดรากฟันเทียม.....	84
บทที่ 9 บทสรุป ปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ .....	92
รายการอ้างอิง .....	96
บรรณานุกรม .....	98

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก .....	101
ภาคผนวก ก .....	101
ภาคผนวก ข .....	136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	195



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 5.1 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด เมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N.....	49
ตารางที่ 5.2 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด เมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N.....	50
ตารางที่ 5.3 ค่าความเค้นรวม(Combined Stress,MPa)สูงสุดและต่ำสุดบนหน้าตัดที่คอรากยึดรากฟันเทียมแต่ละตัว เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวชุด 155-175-195 N .....	51
ตารางที่ 5.4 ค่าความเค้นรวม(Combined Stress,MPa)สูงสุดและต่ำสุดบนหน้าตัดที่คอรากยึดรากฟันเทียมแต่ละตัว เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวชุด 190 N .....	51
ตารางที่ 5.5 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดรากฟันเทียมลงบนรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดเมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว155-175-195N .....	52
ตารางที่ 5.6 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดรากฟันเทียมลงบนรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด เมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N.....	53
ตารางที่ 5.7 ค่าความเค้นรวม(Combined Stress,MPa)สูงสุดและต่ำสุดบนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมแต่ละตัว เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวชุด 155-175-195 N .....	53
ตารางที่ 5.8 ค่าความเค้นรวม(Combined Stress,MPa)สูงสุดและต่ำสุดบนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมแต่ละตัว เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวชุด 190 N .....	53
ตารางที่ 6.1 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก.....	63
ตารางที่ 6.2 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข.....	69
ตารางที่ 7.1 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย.....	80
ตารางที่ 7.2 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย.....	81
ตารางที่ 8.1 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน.....	89
ตารางที่ 8.2 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน.....	90

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1ก สรุปค่าความเค้น(MPa)ที่เกิดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมและ ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม.....	136
ตารางที่ 2ก ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียม.....	137
ตารางที่ 3ก ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดสู่รากฟันเทียม.....	138
ตารางที่ 1ข สรุปค่าความเค้น(MPa)ที่เกิดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้ รับการปรับปรุงแล้ว.....	190
ตารางที่ 2ข ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลอง ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว.....	191
ตารางที่ 2ข (ต่อ) ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมในแบบ จำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว.....	192
ตารางที่ 3ข ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดรากสู่ฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอม ไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว.....	193
ตารางที่ 3ข (ต่อ) ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดสู่รากฟันเทียมในแบบจำลองฟัน ปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว.....	194

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 1.1 ภาพของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดในขากรรไกรบนและล่าง.....	5
ภาพที่ 1.2 ภาพด้านข้างของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด.....	5
ภาพที่ 1.3 ภาพหน้าตัดของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด.....	5
ภาพที่ 1.4 ภาพด้านหน้าของฟันปลอมไฮบริดในผู้ป่วยไร้ฟัน.....	7
ภาพที่ 1.5 ส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมไฮบริด.....	7
ภาพที่ 1.6 ระยะระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและหลังสุด (A-P Spread).....	8
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	16
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงหกเหลี่ยม.....	17
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	18
ภาพที่ 3.1 ภาพสามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างทั้งชิ้นที่สร้างขึ้นจากภาพที่ได้จากการทำ CT Scan.....	24
ภาพที่ 3.2 รูปร่างลักษณะครึ่งส่วนด้านขวาของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 5 ตัวในกระดูกขากรรไกรล่าง.....	24
ภาพที่ 3.3 รูปร่างของกระดูกทึบ (Cortical Bone) ที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัว.....	25
ภาพที่ 3.4 รูปร่างของกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) ที่ฝังรากฟัน 5 ตัว.....	25
ภาพที่ 3.5 การเรียงตัวของรากฟันเทียม.....	25
ภาพที่ 3.6 ลักษณะของโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม.....	26
ภาพที่ 3.7 ตำแหน่งจุดสบฟันบนโครงโลหะ.....	27
ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งของจุดรองรับบนแบบจำลอง.....	29
ภาพที่ 3.9 การแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดซึ่ง 5 รากฟันเทียมบน กระดูกขากรรไกรล่าง.....	30
ภาพที่ 3.10 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟัน ปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนกระดูกขากรรไกรล่าง.....	30
ภาพที่ 3.11 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นโครงโลหะ หลักยึดรากฟันเทียมและราก ฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม.....	31
ภาพที่ 3.12 การแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม.....	31
ภาพที่ 3.13 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟัน ปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนกระดูกขากรรไกรล่าง.....	32

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 3.14 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นโครงโลหะ หลักยึดรากฟันเทียมและรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม.....	32
ภาพที่ 4.1 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	36
ภาพที่ 4.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบน( ก )โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, ( ข )รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-175-195 N.....	36
ภาพที่ 4.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ ( ก ) เป็นภาพมุมบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	37
ภาพที่ 4.4 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ ( ก ) เป็นภาพมุมบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	37
ภาพที่ 4.5 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ ( ก ) เป็นภาพมุมบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 2.....	38
ภาพที่ 4.6 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมวชิ๊กขวา มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	39
ภาพที่ 4.7 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมวชิ๊กซ้าย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	39
ภาพที่ 4.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบน ( ก ) โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, ( ข ) รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	40

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 4.9 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน กระดุกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	41
ภาพที่ 4.10 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	41
ภาพที่ 4.11 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 2.....	41
ภาพที่ 5.1 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอม ไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N.....	46
ภาพที่ 5.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิด บน( ก )โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, ( ข )รากฟันเทียมในแบบจำลองฟัน ปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-175-195 N.....	46
ภาพที่ 5.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน กระดุกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดุกรอบรากฟัน เทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	47
ภาพที่ 5.4 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บน กระดุกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดุกรอบรากฟัน เทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	47

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 5.5 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟัน เทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....	48
ภาพที่ 5.6 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอม ไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N.....	49
ภาพที่ 5.7(ก) การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 ราก ฟันเทียม มีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N.....	49
ภาพที่ 5.7(ข) การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงบด เคี้ยว 190 N.....	49
ภาพที่ 5.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	50
ภาพที่ 6.9 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	50
ภาพที่ 5.10 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....	51
ภาพที่ 5.11 ลักษณะการกระจายความเค้นรวม (Combined Stress, $\sigma_{comb}$ )ที่เกิด จากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ตัดตามทฤษฎี บนหน้าตัดหลักยึดรากฟันเทียม.....	54

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 6.1 (ก) ลักษณะและขนาดของหลักยึดรูปทรง ก, (ข) แสดงลักษณะและขนาดของหลักยึดรูปทรง ข.....	61
ภาพที่ 6.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	62
ภาพที่ 6.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	62
ภาพที่ 6.4 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	63
ภาพที่ 6.5 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	63
ภาพที่ 6.6 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....	63
ภาพที่ 6.7 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	64

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 6.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	64
ภาพที่ 6.9 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	65
ภาพที่ 6.10 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	65
ภาพที่ 6.11 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....	66
ภาพที่ 6.12 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	68
ภาพที่ 6.13 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	68
ภาพที่ 6.14 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด( Maximum Shear Stress, MPa)บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	69



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 6.15 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้ หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของ กระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	69
ภาพที่ 6.16 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมอง บนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบราก ฟันเทียมตัวที่ 3.....	70
ภาพที่ 6.17 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บน หลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูป ทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	70
ภาพที่ 7.18 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บน โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	71
ภาพที่ 6.19 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของ กระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	71
ภาพที่ 6.20 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของ กระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	72
ภาพที่ 6.21 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของ กระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....	72

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 7.1 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บน โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	77
ภาพที่ 7.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บน รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์ อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....	77
ภาพที่ 7.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	78
ภาพที่ 7.4 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....	78
ภาพที่ 7.5 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บน กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....	79
ภาพที่ 7.6 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บน โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	80
ภาพที่ 7.7 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บน รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์ อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....	80

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
<p>ภาพที่ 7.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa)บนกระดูก                      ขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งโครงโลหะ                      โคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบ                      รากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....</p>	81
<p>ภาพที่ 7.9 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่                      (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม                      (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....</p>	81
<p>ภาพที่ 7.10 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa)                      บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟัน                      เทียมซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่                      (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม                      (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....</p>	81
<p>ภาพที่ 8.1 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่                      (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม                      (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....</p>	89
<p>ภาพที่ 8.2 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่                      (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม                      (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....</p>	89
<p>ภาพที่ 8.3 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่                      (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม                      (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....</p>	90

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
<p>ภาพที่ 8.4 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่</p> <p>(ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม</p> <p>(ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....</p>	91
<p>ภาพที่ 8.5 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่</p> <p>(ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม</p> <p>(ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1.....</p>	91
<p>ภาพที่ 8.6 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บน                      กระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่</p> <p>(ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม</p> <p>(ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3.....</p>	92
<p>ภาพที่ 1ก-18ก การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม                      บนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....</p>	105
<p>ภาพที่ 19ก-33ก การกระจายความเค้นบนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      บนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....</p>	115
<p>ภาพที่ 34ก-51ก การกระจายความเค้นบนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม                      บนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....</p>	123
<p>ภาพที่ 52ก-66ก การกระจายความเค้นบนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      บนกระดูกขากรรไกรล่าง ซึ่ง มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....</p>	132
<p>ภาพที่ 1ข-12ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N.....</p>	143
<p>ภาพที่ 13ข-24ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม                      ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N.....</p>	149

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 25ข-36ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N.....	155
ภาพที่ 37ข-48ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N.....	161
ภาพที่ 49ข-60ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N.....	168
ภาพที่ 61ข-72ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N.....	174
ภาพที่ 73ข-85ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N.....	180
ภาพที่ 86ข-98ข การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N.....	187

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$X, Y, Z$	แกนพิกัดฉาก(Rectangular Coordinates)
$\xi, \eta, \zeta$	แกนพิกัดธรรมชาติ(Natural Coordinates)
J	พลังงานศักย์รวม(Total Potential Energy)
U	พลังงานความเครียดในวัตถุ(Internal Strain Energy)
V	พลังงานศักย์จากแรงภายนอก(Potential Energy Due To External Force)
R	เศษตกค้าง(Residual)
W	ฟังก์ชันน้ำหนัก(Weighted Function)
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normal Components of Stress Parallel to X, Y, Z Axes
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	ความเค้นเฉือนในแกนพิกัดฉาก(Shear Stress in Rectangular Coordinate)
U, V, W	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X, Y, Z (Components of Displacement)
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	Normal Strains in X, Y And Z Directions
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Shearing Strain in X, Y And Z Directions
$F_x, F_y, F_z$	แรงวัตถุในแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ
$T_x, T_y, T_z$	ความเค้นที่ผิวในแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ
V	ปริมาตร
$\epsilon_0$	ความเครียดขั้นต้น(Prestrain)
E	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น(Modulus of Elasticity)
v	อัตราส่วนปัวซอง
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	ความเค้นหลัก (Principal Stress)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างนั้นก่อให้เกิดความสำเร็จอย่างสูงในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากปัญหาทางด้านวิศวกรรมกันอย่างแพร่หลาย ในการแก้ปัญหาทางด้านทันตกรรมนั้นก็มีการนำระเบียบวิธีนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาจากการฝังรากฟันเทียมลงในกระดูกขากรรไกรด้วยเช่นกัน ซึ่งการฝังรากฟันเทียมลงในกระดูกขากรรไกรล่างนี้สามารถพิจารณาให้อยู่ในลักษณะของโครงสร้างทางวิศวกรรมได้ โดยรากฟันเทียมนั้นเปรียบเสมือนเสาที่ปักลงในฐานรากซึ่งก็คือกระดูกอบรากฟันเทียม

การทำฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด (Hybrid Denture) ในกระดูกขากรรไกรล่างสำหรับผู้ป่วยไร้ฟัน ทันตแพทย์จะต้องทำการผ่าตัดฝังรากฟันเทียม (Implants) ลงในกระดูกขากรรไกรล่างจำนวนมากถึง 4-6 ตัว แล้วแต่สภาพของกระดูกขากรรไกร แต่ถ้าหากสามารถลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรให้เหลือเพียง 3 ตัวได้ ก็จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ป่วยที่ประสบกับปัญหาทางด้านสภาพร่างกายซึ่งไม่สามารถทนต่อการผ่าตัดฝังรากฟันเทียมจำนวนมากได้ รวมถึงผู้ป่วยที่ประสบปัญหาด้านการเงินซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงต่อการผ่าตัดฝังรากฟันเทียมหนึ่งตัว โดยความเป็นไปได้ในการลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรล่างนั้นสามารถพิจารณาได้จากการกระจายความเค้นในกระดูกอบรากฟันเทียม ความเค้นในรากฟันเทียม และความเค้นในส่วนของสะพานฟันปลอม

วิธีการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกบริเวณรอบๆรากฟันเทียมมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้เครื่องตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่สามารถคำนวณค่าความเค้นบริเวณจุดที่ติดเครื่องตรวจวัดซึ่งมีความแม่นยำสูง แต่มีสะดวกที่จะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดนี้ลงในช่องเล็กๆระหว่างกระดูกและรากฟันเทียม การใช้แบบจำลองโฟโตอีลาสติก (Photoelastic) นั้นสามารถแสดงลักษณะการกระจายของความเค้นได้ แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถกำหนดให้วัสดุในแบบจำลองมีคุณสมบัติเดียวกับกระดูกของมนุษย์ได้ ส่วนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถประมาณค่าความเค้นที่จุดใดๆในแบบจำลอง และสามารถแสดงการกระจายของความเค้นบนแบบจำลองได้ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความแม่นยำสูงเมื่อกำหนดคุณสมบัติวัสดุและเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ใกล้เคียงกับต้นแบบจริงตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่นอกเหนือจากโครงสร้างทางวิศวกรรม ซึ่งได้แก่โครงสร้างทางทันตกรรมรากฟันเทียม
2. วิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการใช้งานฟันปลอมไฮบริดที่ฝังรากฟันเทียมลงในขากรรไกรล่างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ
3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดจำนวนรากฟันเทียม ซึ่งจากเดิมนั้นต้องฝังในกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อรองรับฟันปลอมไฮบริดจาก 4-6 ตัวตามข้อกำหนดเดิมให้เหลือเพียง 3 ตัว โดยการเปรียบเทียบการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟันปลอมไฮบริดที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัวกับแบบจำลองที่ฝังรากฟันเทียมเพียง 3 ตัว

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัว และ 3 ตัว เพื่อรองรับชุดฟันปลอมไฮบริดในเชิงสถิติศาสตร์ โดยกำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชนิดเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous) และเป็นวัสดุในกลุ่มไอโซโทรปิก (Isotropic) โดยค่าความเค้นและความเครียดอยู่ในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น
2. คำนวณความเค้นชนิดต่างๆที่เกิดขึ้นในแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ แสดงการกระจายความเค้นที่ได้จากการคำนวณด้วยภาพ โดยวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้เน้นที่การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณ แต่ให้ความสำคัญต่อการกำหนดคุณสมบัติต่างๆของแบบจำลองเพื่อให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
3. การวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจะใช้การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบโดยการจำกัดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติทางกลของวัสดุ ขนาดเอลิเมนต์ มากกว่าการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพราะมีข้อจำกัดของการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณความเค้นบริเวณที่เกิดความเค้นชุมนุม (Stress Concentration) รวมถึงข้อจำกัดทางด้านชีววิทยาซึ่งเกิดจากความซับซ้อนของพฤติกรรมในการตอบสนองต่อแรงของกระดูกรอบรากฟันเทียม ซึ่งงานวิจัยทางด้านนี้มีไม่มากพอที่สรุปถึงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นหากความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงเกิน



#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีและการใช้งานระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้างต่างๆ อีกทั้งศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดในรากฟันเทียม
2. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟันปลอมไฮบริดซึ่งฝังรากฟันเทียม 5 ตัวและ 3 ตัวลงบนขากรรไกรล่าง แล้วจึงใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง และแสดงการกระจายความเค้นด้วยการใช้แถบสีแทนความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความเค้นบนแบบจำลอง
3. วิเคราะห์การกระจายความเค้นที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาข้อสรุปของการใช้งานรากฟันเทียม 3 ตัว
4. เขียนและพิมพ์วิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. จากผลการวิเคราะห์ความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทันตแพทย์สามารถวินิจฉัยร่วมกับผลการตรวจสอบทางคลินิกถึงความเหมาะสมในการฝังรากฟันเทียมเพียง 3 ตัวในกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อรองรับชุดฟันปลอมไฮบริด จากเดิมที่ต้องฝังรากฟันเทียมถึง 5 ตัว นอกจากนี้แล้วผลที่ได้จากการวิเคราะห์ยังสามารถใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างฟันปลอมไฮบริดและรากฟันเทียมเพื่อให้รองรับแรงบดเคี้ยวได้ดียิ่งขึ้น
2. เนื่องจากปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีให้เลือกใช้อย่างมากมาย และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีความสามารถในการคำนวณสูง ทันตแพทย์สามารถสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากกระดูกขากรรไกรที่จะทำการฝังรากฟันเทียมขึ้นโดยใช้ขั้นตอนตามวิทยานิพนธ์นี้เพื่อทำการวินิจฉัยก่อนทำการรักษาด้วยการฝังรากฟันเทียม ซึ่งจะทำให้ทันตแพทย์และผู้ป่วยมีความมั่นใจต่อผลสำเร็จในการรักษามากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถเก็บผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีเพื่อใช้สำหรับผู้ป่วยที่มีโครงสร้างกระดูกขากรรไกรที่ใกล้เคียงกัน รวมถึงสามารถเก็บเป็นข้อมูลทางสถิติได้อีกด้วย

## 1.6 ปรีทัศน์วรรณกรรม

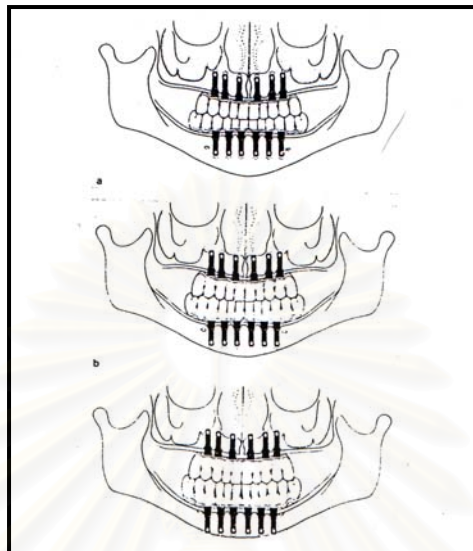
### 1.6.1 การบูรณะช่องปากด้วยรากฟันเทียมในผู้ป่วยไร้ฟัน

ตั้งแต่ในอดีตจวบจนถึงปัจจุบันการบูรณะช่องปากให้แก่ผู้ป่วยไร้ฟันมักจะใส่ฟันปลอมทั้งปากแบบธรรมดา (Conventional Complete Denture) ให้แก่ผู้ป่วย เนื่องจากฟันปลอมชนิดนี้เสียค่าใช้จ่ายน้อยและมีขั้นตอนการทำที่ไม่ยุ่งยาก การทำฟันปลอมชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผู้ป่วยสูงอายุซึ่งมีข้อจำกัดทางด้านสุขภาพร่างกายซึ่งไม่สามารถทนทานต่อขั้นตอนการรักษาที่ซับซ้อนและกินเวลานานได้ แต่ทว่าจากการศึกษาของ Zarb และ Bolender (1997) นั้นพบว่าในผู้ป่วยบางรายเกิดปัญหาในการปรับตัวให้เคยชินกับฟันปลอมทั้งปากแบบธรรมดา ผู้ป่วยบางส่วนก็ประสบปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพของเนื้อเยื่อซึ่งรองรับฟันปลอมแบบถอดได้นี้ อีกทั้งการศึกษาและพัฒนาความรู้ทางด้านทันตกรรมรากฟันเทียมมีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้การนำรากฟันเทียมมาใช้เพื่อใส่สะพานฟันปลอมชนิดติดแน่นให้แก่ผู้ป่วยไร้ฟันมีความปลอดภัยและประสบความสำเร็จอย่างสูง ดังนั้นในการบูรณะช่องปากในผู้ป่วยไร้ฟันจึงมีการใช้วิธีผ่าตัดฝังรากฟันเทียมกันอย่างแพร่หลาย

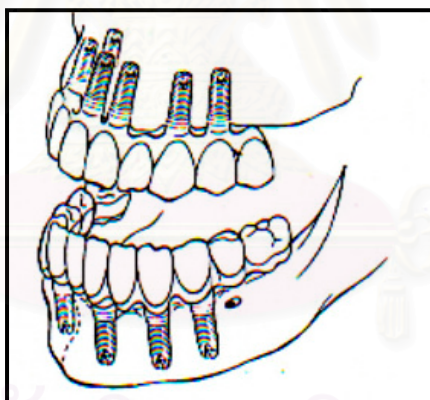
การทำสะพานฟันปลอมคร่อมทับรากฟันเทียมตามข้อกำหนดของ Branemark (1985) ที่นำเสนอโดย Adell และคณะ (1981) กำหนดไว้ว่าต้องมีการฝังรากฟันเทียม 6 ตัวในขากรรไกรล่างที่ด้านหน้าของรูเปิดเส้นประสาทเมนทัล หรือต้องฝังรากฟันเทียมจำนวน 6-8 ตัวในขากรรไกรบนที่ตำแหน่งระหว่างผนังด้านหน้าของโพรงอากาศแมกซิลลา (ภาพ 1.1, 1.2 และ 1.3) ภายหลังจากการฝังรากฟันเทียมตามตำแหน่งดังกล่าวแล้วจะต้องเย็บแผลเพื่อปิดรากฟันเทียมเอาไว้ในกระดูก รอจนกระทั่งแผลหายดีและกระดูกรอบๆรากฟันเทียมเข้ามาประชิดยึดติดกับรากฟันเทียม ในระหว่างนั้นจะต้องระวังไม่ให้มีแรงกดเคี้ยวกระทำบนรากฟันเทียม จนกระทั่งถึงเวลาที่รากฟันเทียมยึดติดแน่นกับรากฟันเทียมได้อย่างสมบูรณ์ดีแล้ว ผู้ป่วยที่ได้รับการบูรณะช่องปากด้วยการใส่สะพานฟันปลอมติดแน่นคร่อมทับรากฟันเทียมจะต้องผ่านการผ่าตัดสองครั้งได้แก่ การผ่าตัดครั้งแรกเพื่อฝังรากฟันเทียมในกระดูก และการผ่าตัดครั้งที่สองเพื่อเชื่อมต่อส่วนหลักยึดสำหรับฟันปลอม (Abutment) หลังจากการยึดติดของกระดูกและรากฟันเทียมเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ดีแล้ว

วัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำรากฟันเทียมได้แก่ไททาเนียมบริสุทธิ์ เพราะจะมีการตอบสนองของเนื้อเยื่อได้เป็นอย่างดี โดยไททาเนียมจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์กระดูกรอบรากฟันเทียมจนสามารถสร้างกระดูกเข้ามาประชิดผิวรากฟันเทียมได้ จากการติดตามผลการฝังรากฟันเทียมในผู้ป่วยในระยะ 10 ปีหลังจากการฝังรากฟันเทียม พบว่าจำนวนผู้ป่วยที่สะพานฟันปลอมชนิดติดแน่นในขากรรไกรล่างยังคงสภาพไว้อย่างดีมีอยู่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่จำนวนผู้ป่วย

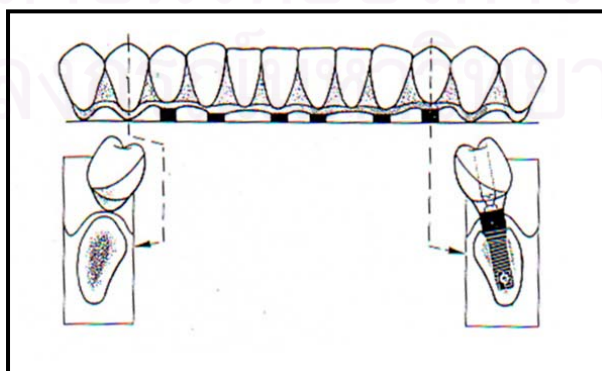
ซึ่งสะพานฟันปลอมชนิดติดแน่นในขากรรไกรบนยังคงสภาพไว้ได้อย่างสมบูรณ์มีอยู่ถึง 94 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ผู้ป่วยสามารถใช้ฟันปลอมได้ไม่แตกต่างจากผู้ที่มีฟันธรรมชาติ ซึ่งถือว่าประสบความสำเร็จอย่างสูงในการนำรากฟันเทียมมาช่วยในการบูรณะช่องปากให้แก่ผู้ป่วยไร้ฟัน



ภาพที่ 1.1 ภาพของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดในขากรรไกรบนและล่าง  
( Adell และคณะ,1981)



ภาพที่ 1.2 ภาพด้านข้างของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด (Adell และคณะ,1981)



ภาพที่ 1.3 ภาพหน้าตัดของฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด (Adell และคณะ,1981)

ทันตกรรมรากฟันเทียมได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับการบูรณะช่องปากจนกระทั่งได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย การศึกษาหลายชิ้นที่แสดงถึงความสำเร็จในลักษณะเดียวกัน ดังที่เห็นได้จากการศึกษาของ Adell และคณะ (1990) ซึ่งติดตามผลของผู้ป่วยที่ใส่สะพานฟันปลอมชนิดติดแน่นในระยะเวลาประมาณ 15 ปี ในผู้ป่วยทั้งหมดมีการฝังรากเทียมรวมจำนวน 2,768 ตัว พบว่าปัจจัยสำคัญที่บ่งชี้ถึงความสำเร็จของการใส่สะพานฟันปลอมคือความสัมพันธ์ของจำนวนรากฟันเทียมที่สามารถยึดติดกับกระดูกได้อย่างสมบูรณ์ต่อจำนวนรากฟันเทียมทั้งหมด (Anchorage Function) พบว่าสัดส่วนนั้นเท่ากับ 81-88 เปอร์เซ็นต์ในรากฟันเทียมที่ฝังในขากรรไกรบน และ 91-97 เปอร์เซ็นต์ในรากฟันเทียมที่ฝังลงบนกระดูกกรรไกรล่าง ซึ่งตัวที่บ่งชี้ถึงการยึดติดของรากฟันเทียมกับกระดูกได้อย่างสมบูรณ์ก็คือปริมาณการยึดติดของกระดูกรอบๆ รากฟันเทียมและความสูงของกระดูกสันเหงือก (Marginal Bone Height) ซึ่งสามารถสังเกตปริมาณการยึดติดของกระดูกได้จากภาพถ่ายรังสี โดยภาพถ่ายรังสีจะแสดงให้เห็นถึงการเจริญของกระดูกเข้าประชิดพื้นผิวของรากฟันเทียม ภาพถ่ายรังสีนี้ยังแสดงถึงลักษณะและความหนาแน่นของเส้นใยกระดูกรอบรากฟันเทียม ทางด้านความสูงของกระดูกสันเหงือกซึ่งมีความสัมพันธ์กับการกระจายของความเค้นบริเวณกระดูกสันเหงือก (Marginal Stress Distribution) และความสูงของกระดูกสันเหงือกยังมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของเนื้อเยื่อที่ปกคลุมอยู่โดยรอบ (Marginal Soft Tissue) ถึงแม้จะพบว่าบางตำแหน่งของรากฟันเทียมเริ่มมีการละลายตัวของกระดูกซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากความเค้นในบริเวณนั้น แต่สะพานฟันปลอมติดแน่นก็ยังคงสภาพอยู่ได้ถึง 89 เปอร์เซ็นต์ของในขากรรไกรบน และ 100 เปอร์เซ็นต์ในขากรรไกรล่าง การละลายตัวของกระดูกรอบรากฟันเทียมมีปริมาณสูงถึง 1.5 มม.ในปีแรก และหลังจากนั้นจะมีการละลายตัวของกระดูกรอบรากฟันเทียมโดยเฉลี่ย 0.1 มม. ต่อปี จากข้อมูลจากการติดตามผลของ Adell และคณะ (1990) ทำให้มีความมั่นใจต่อความสำเร็จในการฝังรากฟันเทียมเพื่อนำมาช่วยบูรณะช่องปากแก่ผู้ป่วยไร้ฟันเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเป็นเช่นนี้จึงก่อให้เกิดการตื่นตัวที่จะศึกษาความรู้เพื่อพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการใช้รากฟันเทียมช่วยในการบูรณะช่องปาก การพัฒนาความรู้และเทคโนโลยีด้านทันตกรรมรากฟันเทียมนั้นเป็นประโยชน์อย่างมาก ทำให้ผู้ป่วยไร้ฟันมีสภาพะการทำงานช่องปากที่มีประสิทธิภาพและสามารถดำรงชีวิตได้อย่างมีความสุข

#### 1.6.2 ลักษณะทั่วไปของฟันปลอมไฮบริด

ฟันปลอมไฮบริด (Hybrid Denture) คือฟันปลอมที่อยู่ในรูปของสะพานฟันยึดติดแน่นกับปาก(ภาพที่ 1.4) ซึ่งทันตแพทย์จะทำการผ่าตัดติดตั้งให้กับผู้ป่วยไร้ฟันบนขากรรไกรบนหรือล่าง ฟันปลอมชนิดนี้จะถ่ายทอดแรงบดเคี้ยวลงสู่กระดูกโดยผ่านรากฟันเทียม (Implant) ปกติแล้วจะใช้รากฟันเทียม 4-6 ตัวต่อขากรรไกร โดยที่ผู้ที่ใส่ฟันปลอมนั้นไม่สามารถถอดฟันปลอมออกด้วย

ตัวเองได้ แต่ที่ได้ฐานฟันปลอมจะมีช่องว่างเหนือสันกระดูกเพื่อให้ผู้ที่ใส่ฟันปลอมทำความสะอาดรอบหลักยึดรากฟันเทียม

ฟันปลอมไฮบริดประกอบด้วยโครงโลหะเป็นคานารูปเกือกม้ามีความโค้งเข้ากับความโค้งของกระดูกขากรรไกร ด้านบนของโครงโลหะคือส่วนของผิวหน้าด้านบดเคี้ยว (Occlusal Surface) ซึ่งเป็นพลาสติกรูปฟันทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหาร ด้านหน้าและด้านข้างของโครงโลหะมีอคริลิคสีชมพูปิดไว้เพื่อความสวยงาม

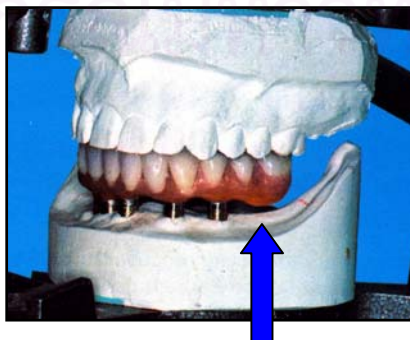
ฟันปลอมไฮบริดจะถูกยึดติดกับหลักยึด (Abutment) ที่อยู่บนรากฟันเทียมด้วยการขันสกรูทอง (Gold Screw) ผ่านผิวหน้าด้านบดเคี้ยวหรือด้านข้างลิ้นของสะพานฟัน ภายหลังจากขันสกรูแล้วช่องซึ่งเป็นทางผ่านของสกรูจะถูกปิดด้วยวัสดุอุดฟันชนิดคอมโพสิตเรซิน



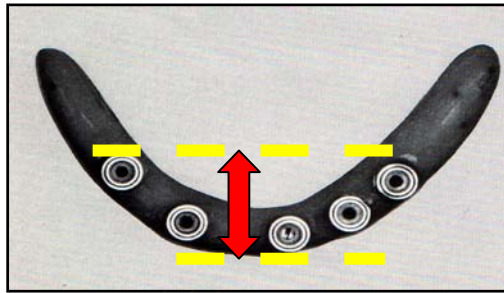
ภาพที่ 1.4 ภาพด้านหน้าของฟันปลอมไฮบริดในผู้ป่วยไร้ฟัน

### 1.6.3 ส่วนยื่นด้านท้ายของฟันปลอม

ส่วนยื่นด้านท้ายของฟันปลอม(Distal Extension Cantilivers) หมายถึงส่วนของฟันปลอมไฮบริดที่ยื่นออกไปทางด้านท้ายเลยตำแหน่งของหลักยึดบนรากฟันเทียมตัวหลังสุดออกไปทั้งสองข้างซ้ายขวา (ภาพที่ 1.5) ความยาวของส่วนนี้ถูกจำกัดไว้โดยปัจจัยต่างๆ ได้แก่ จำนวนของรากฟันเทียม ความยาวของรากฟันเทียม และระยะระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและหลังสุด (Anteroposterior Spread) (ภาพที่ 1.6)



ภาพที่ 1.5 ส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมไฮบริด



ภาพที่ 1.6 ระยะระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและหลังสุด (A-P Spread)

#### 1.6.4 ความล้มเหลวที่พบในฟันปลอมไฮบริด

ความเค้นที่เกิดจากแรงบดเคี้ยววันนั้นหากมีค่ามากกว่าค่าที่กระดูกสามารถทนรับได้อาจก่อให้เกิดการละลายของกระดูกรอบๆรากฟันเทียม ในที่สุดอาจเกิดการโยกและหลุดออกของรากฟันเทียมได้ นอกจากนี้ความเค้นที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวซึ่งมีค่าสูงและมีการกระจายไปยังส่วนต่างๆของโครงสร้างฟันปลอมอย่างไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการหลวมและการแตกหักของสกรูหรือตัวฟันปลอมได้ ในทางตรงกันข้ามหากความเค้นที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวมีค่าไม่สูงมากเกินไปและมีการกระจายค่าความเค้นบนกระดูกรอบๆรากฟันเทียมอย่างเหมาะสมสามารถกระตุ้นให้เกิดการเจริญของกระดูกรอบๆรากฟันเทียมซึ่ง ความสำเร็จในการฝังรากฟันเทียมสามารถวัดได้จากการรักษาระดับปริมาณของกระดูกรอบๆรากฟันเทียมให้คงที่มากที่สุด

จากการศึกษาของ Sertgoz และ Guvener (1996) พบว่าเมื่อมีแรงบดเคี้ยวบนฟันปลอมไฮบริด ตำแหน่งที่จะเกิดค่าความเค้นสูงอยู่ที่บริเวณกระดูกเบ้าฟัน (Marginal Bone) และกระดูกประชิดส่วนคอของรากฟันเทียม (รอยต่อของรากฟันเทียมและหลักยึด)

เนื่องจากกระดูกมีค่าความแข็งแรงอัด (Compressive Strength) เท่ากับ 193 MPa ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) เท่ากับ 133 MPa และค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear Strength) เท่ากับ 68 MPa หากค่าความเค้นที่เกิดจากแรงบดเคี้ยวมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูกจะทำให้มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการละลายของกระดูกบริเวณนั้นขึ้น

#### 1.6.5 การวิเคราะห์ความเค้นของกระดูกรอบรากฟันเทียม

วิธีวิเคราะห์ความเค้นที่นิยมใช้ในทางทันตกรรมรากฟันเทียมได้แก่ การใช้เครื่องวัดความเครียด (Strain Gauge) การใช้แบบจำลองโฟโตอีลาสติก (Photoelastic Model) และการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

จากการวิเคราะห์ความเค้นกระดูกรอบรากฟันเทียมของ Cleland และคณะ (1993) ด้วยการจำลองไฟโตอีลาสติก ร่วมกับ การใช้เครื่องวัดความเครียด พบว่าความเค้นที่วัดได้จากการวัดทั้งสองวิธีนี้มีค่าแตกต่างกันแต่มีความสอดคล้องกัน และจากการศึกษาของ Koriath และ Johann (1999) ซึ่งเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นบนหลักยึดเมื่อออกแบบให้ชิ้นส่วนที่อยู่เหนือรากฟันเทียมมีความแตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองได้ใกล้เคียงธรรมชาติมากกว่าการใช้เครื่องวัดความเครียดหรือการจำลองไฟโตอีลาสติก อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ยังไม่สามารถจำลองปริมาณ ทิศทาง และการกระจายของแรงบิดเคี้ยวให้เหมือนกับที่เกิดในช่องปากจริงได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองยังมีการศึกษาไม่มากเพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาในลักษณะของการควบคุมปัจจัย เช่น คุณสมบัติที่กระดูก เพื่อเป็นการยืนยันผลการคำนวณ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

### ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆตามตำแหน่งบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า ในการหาผลเฉลยแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าจำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แทน โดยมีหลักการคือทำการเปลี่ยนค่าผลเฉลยทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน

วิธีการดังกล่าวข้างต้นนี้เป็นนัยว่าค่าผลเฉลยในแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนหลักการที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพก็คือการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณตามที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆดังนี้

1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย
2. การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions)
3. การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) สามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้
  - 3.1 วิธีการโดยตรง (Direct Approach)
  - 3.2 วิธีการแปรผัน (Variational Approach)
  - 3.3 วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)
4. การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบกันเป็นสมการระบบรวม



5. ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) แล้วจึงแก้สมการระบบรวมนั้นเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns)
6. นำค่าที่คำนวณได้ที่จุดต่อต่างๆมาทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไป

ความแม่นยำของผลเฉลยโดยประมาณที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นอกจากนั้นความแม่นยำยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในที่ใช้ในแต่ละเอลิเมนต์ กล่าวคือฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากน้อยเพียงใด

## 2.1 วิธีการแปรผัน (Variation Method)

การแก้ปัญหาในภาวะต่อเนื่อง (Continuum Problems) ไม่ว่าจะเป็นทางด้านของแข็ง ของไหล ฯลฯ ปกติเราสามารถทำได้สองวิธีคือ

- . โดยการใช้สมการอนุพันธ์ (Differential Equations) ร่วมกับการใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่เหมาะสม
- . โดยการใช้สูตรการแปรผัน

หลักการสำคัญในการใช้สูตรการแปรผันคือ การหาฟังก์ชันหรือการสร้างฟังก์ชันที่เมื่อทำการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของฟังก์ชันแล้วจะเกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหานั้น ปัญหาที่ใช้วิธีการแปรผันโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปัญหาทางด้านโครงสร้าง ซึ่งมีพลังงานศักย์รวม (Total Potential Energy) สำหรับวัตถุที่ยึดหยุ่นได้ประกอบด้วยพลังงานอันเกิดจากความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัตถุนั้น (Internal Strain Energy) หลังการยึดหยุ่นและพลังงานอันเกิดจากแรงภายนอกที่มากระทำ (Potential Energy Due To External Forces) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = U + V$$

โดย J คือพลังงานศักย์รวม, U คือพลังงานความเครียดในเนื้อวัตถุ และ V คือพลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงภายนอก

เนื่องจากในภาวะสมดุลย์ค่าพลังงานศักย์รวมจะมีค่าต่ำสุด จากหลักการของค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวม (Principle of Minimum Potential Energy) ดังนั้นวิธีการแปรผันนี้จะมีเงื่อนไขว่า

$$\delta J = 0$$

## 2.2 วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง(Method of Weighted Residual)

วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างใช้หลักการสมมติผลเฉลยโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้นขึ้นมา โดยผลเฉลยที่สมมติขึ้นมาจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้น เนื่องจากการสมมติผลเฉลยนี้ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงดั่งนั้น เมื่อแทนค่าลงในสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแล้วจะทำให้เกิดเศษตกค้าง (Residual) หรือค่าคลาดเคลื่อน (Error) ขึ้น

ตัวอย่างเช่น เมื่อมีสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$f(x)=0$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขต

$$x(0)=0$$

เมื่อสมมติผลเฉลยโดยประมาณที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ในรูปของตัวแปรไม่ทราบค่า และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบค่า เช่น

$$x(t)=1+c_1t+c_2t^2$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาจะได้ว่า

$$f(x(t))=R$$

ซึ่งค่า  $R$  นี้คือค่าเศษตกค้างนั่นเอง

โดยปกติแล้ววิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างแต่ละวิธีนั้นต้องการให้ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นศูนย์บนช่วงใดช่วงหนึ่งหรือที่จุดใดจุดหนึ่ง วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างนี้สามารถแบ่งย่อยเป็นหลายวิธีการดังนี้

1. Collocation Method เป็นวิธีการที่กำหนดให้ค่าเศษตกค้างมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดต่างๆ โดยจุดเหล่านี้มีจำนวนเท่ากับสัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการผลเฉลยโดยประมาณที่สมมติขึ้นมา
2. Subdomain Method เป็นวิธีการที่กำหนดให้ค่าอินทิกรัลของค่าเศษตกค้างบนช่วงย่อยๆ บางช่วงมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยช่วงย่อยๆ มีจำนวนเท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบค่า
3. Galerkin Method เป็นวิธีการที่คูณฟังก์ชันเศษตกค้าง  $R$  ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function)  $W$  จากนั้นทำการอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนแล้วกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ ตัวอย่างเช่น

$$\int_a^b w_i(t)R(t)dt = 0, i = 1 \dots N$$

โดย  $N$  เท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ของตัวไม่ทราบค่าในผลเฉลยโดยประมาณที่สมมติขึ้น การเลือกฟังก์ชันน้ำหนักปกติจะเลือกจากฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับตัวไม่ทราบค่าที่ปรากฏอยู่ในสมการผลเฉลยโดยประมาณนั้น

4. Least-Squares Method ทำได้โดยการยกกำลังสองของเศษตกค้าง จากนั้นอินทิเกรตทั้งโดเมนแล้วจึงทำการหาค่าต่ำสุดโดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่ทราบค่าเหล่านั้น เช่น

$$\frac{\partial}{\partial c_i} \int_a^b R^2(t) dt = 0$$

## 2.3 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง

สมการพื้นฐานทั่วไปในสามมิติ

### 2.3.1 สมการเชิงอนุพันธ์

สมการสมดุลของของแข็งที่มีการยึดหยุ่นได้ในสามมิติสามารถเขียนในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

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

โดย  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  แทนความเค้นในแนวแกน X,Y,Z ตามลำดับ  $\tau_x, \tau_y, \tau_z$  แทนความเค้นเฉือน  $F_x, F_y, F_z$  แทนแรงวัตถุในแนวแกน X,Y,Z ตามลำดับ ตลอดผิวรอบนอกของแข็งอาจประกอบด้วยเงื่อนไขขอบเขตหลายชนิด เช่น การกำหนดระยะการเคลื่อนตัวของผิวบางส่วนในขณะที่ผิวส่วนอื่น ๆ มีการกำหนดเงื่อนไขความเค้นที่ผิวในรูปแบบทั่วไปคือ

$$\bar{T} = T_x \hat{i} + T_y \hat{j} + T_z \hat{k}$$

โดย  $T_x, T_y, T_z$  แทนความเค้นที่ผิวในทิศทางแกน X,Y,Z ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเค้นย่อยได้ดังนี้

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

ซึ่ง  $N_x, N_y, N_z$  เป็นทิศทางโคไซน์ของเวกเตอร์

$$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k}$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น

นอกจากเงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวเหล่านี้แล้ว ของแข็งในสามมิติอาจมีความเครียดชั้นต้นที่  
เกิดขึ้นอยู่ก่อน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยทั่วไปคือ

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

โดย

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

และ  $\{\varepsilon_0\}$  แทนเวกเตอร์ของความเครียดชั้นต้นซึ่งอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจาก  
อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆกันมีค่าไม่เท่ากัน หรืออาจเกิดมาจากกรณีที่โครงสร้างนั้นมีความเครียด  
อยู่ก่อนแล้วและอยู่ในสภาวะสมดุลย์ก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำ

### 2.3.2 ฟังก์ชันแปรผัน

ในของแข็งที่ยึดหยุ่นได้จะสามารถแสดงค่าพลังงานที่เกิดจากความเครียดในวัตถุได้ดังนี้

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0] \{\sigma\} dV$$

เมื่อแทนสมการของ  $\{\sigma\}$  ลงไปจะได้ว่า

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon\} dV - \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon_0\} dV + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0] [C] \{\varepsilon_0\} dV$$

และค่าพลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงวัตถุที่มีปริมาตร  $V$  และแรงที่ผิวบนผิวที่มีพื้นที่  $S$  สามารถเขียน  
ได้ในรูป

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

$\int_V (\text{1x3}) (\text{3x1}) \quad \int_S (\text{1x3}) (\text{3x1})$

โดย  $[\bar{\delta}]$  แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าเคลื่อนตัว  $U, V, W$  ในทิศทางแกน  $X, Y, Z$  ตามลำดับ  $\{F\}$  แทนแรงวัตถุในทิศทางแกน  $X, Y, Z$  ดังนั้นเราจะได้สมการพลังงานศักย์รวมดังนี้

$$J = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon\} dV - \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon_0\} dV + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0] [C] \{\varepsilon_0\} dV - \int_V [\bar{\delta}] \{F\} dV - \int_S [\bar{\delta}] \{T\} dS$$

### 2.3.3 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากได้ฟังก์ชันการแปรผันสำหรับวัตถุทั่วไปในสามมิติแล้วเราสามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสามมิติทั่วไปได้ดังนี้

ขั้นตอนแรกคือสมมติลักษณะการกระจายของค่าเคลื่อนตัวในสามทิศทาง โดยค่าเคลื่อนตัวในแต่ละทิศทางสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อต่างๆดังนี้

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

หรือเขียนรวมได้ว่า

$$[\bar{\delta}] = [N(x, y, z)] \{\delta\}$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนจุดต่อในเอลิเมนต์ และ

$$\begin{aligned} [\bar{\delta}]^T &= [u \quad v \quad w] \\ \{\delta\}^T &= [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad \dots \quad u_n \quad v_n \quad w_n] \end{aligned}$$

เวกเตอร์ความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าเคลื่อนตัวได้คือ

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

โดย  $[B(X,Y,Z)]$  แทนเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเคลื่อนตัว ดังนั้นเราจะได้สมการพลังงานศักย์รวมเป็น

$$J = \frac{1}{2} \int_V [\delta] [B]^T [C] [B] \{\delta\} dV - \int_V [\delta] [B]^T [C] \{\epsilon_0\} dV \\ + \frac{1}{2} \int_V [\epsilon_0] [C] \{\epsilon_0\} dV - \int_V [\delta] [N]^T \{F\} dV \\ - \int_S [\delta] [N]^T \{T\} dS$$

หรือเขียนย่อได้ว่า

$$J = \frac{1}{2} [\delta] [K] \{\delta\} - [\delta] \{F_0\} + \frac{1}{2} \int_V [\epsilon_0] [C] \{\epsilon_0\} dV - [\delta] \{F_B\} - [\delta] \{F_t\}$$

โดย

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dV \\ \{F_0\} = \int_V [B]^T [C] \{\epsilon_0\} dV \\ \{F_B\} = \int_V [N]^T \{F\} dV \\ \{F_t\} = \int_S [N]^T \{T\} dS$$

ในที่นี้  $[K]$  คือเอลิเมนต์เมตริกซ์ของความแข็งเกร็ง  $\{F_0\}, \{F_B\}, \{F_t\}$  คือโหนดเวกเตอร์เนื่องมาจากความเค้นดัด, แรงวัตถุ และแรงที่ผิวตามลำดับ

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสร้างได้จากหลักการค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวม นั่น

คือ

$$\frac{\partial J}{\partial \{\delta\}} = 0$$

ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์รวมทั้งสิ้น  $3n$  สมการย่อยสำหรับเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อทั้งหมด  $N$  จุดต่อ สมการย่อยนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ดังนี้

$$[K] \{\delta\} = \{F_0\} + \{F_B\} + \{F_t\}$$

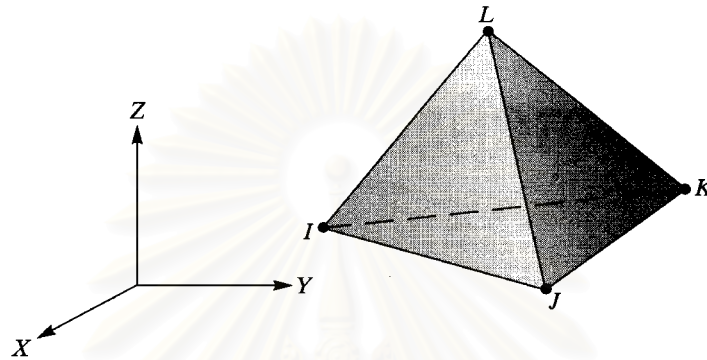
หลังจากประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากทุกเอลิเมนต์ขึ้นเป็นสมการระบบรวมของวัตถุสามมิติ แล้วทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและแก้สมการระบบรวมเพื่อหาผลลัพธ์ของค่าเคลื่อนตัวที่ทุกจุดต่อได้แล้ว ค่าความเค้นในทิศทางต่างๆสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$\{\sigma\} = [C] [B] \{\delta\} - [C] \{\epsilon_0\}$$

### 2.3.4 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์แบบสามมิติที่นิยมใช้กันในทางปฏิบัติมีอยู่สองแบบก็คือเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element) และเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral Element)

ก. เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ

การประดิษฐ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าประกอบด้วย 4 จุดต่อเริ่มด้วยการสมมติการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปแบบ

$$\phi(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z$$

โดย  $\alpha_i, i = 1 \dots 4$  เป็นค่าคงที่ที่หาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของค่าที่จุดต่อทั้งสี่ ซึ่งหลังจากการหาค่าคงที่ทั้งสี่นี้ได้แล้วเราสามารถเขียนลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปแบบของค่าที่จุดต่อดังต่อไปนี้

$$\phi = N_1 \phi_1 + N_2 \phi_2 + N_3 \phi_3 + N_4 \phi_4 = \underset{(1 \times 4)}{[N]} \underset{(4 \times 1)}{\{\phi\}}$$

โดย  $N_i, i = 1 \dots 4$  คือฟังก์ชันการประมาณภายในซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad i = 1 \dots 4$$

ในที่นี้

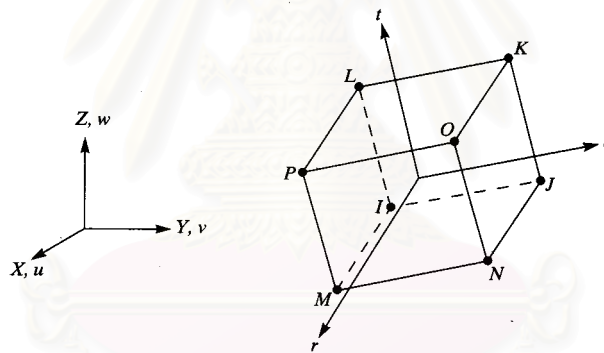
$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad c_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$b_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad d_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix}$$

และค่าคงที่อื่นๆก็มีลักษณะทำนองเดียวกัน และสามารถเขียนออกมาได้โดยวิธีการวนสลับเปลี่ยนตัวเลข (Cyclic Permutation)

ข. เอลิเมนต์ทรงหกหน้า 8 จุดต่อ



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงหกหน้าแปดจุดต่อ

การสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์ทรงหกหน้า 8 จุดต่อสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบพิกัดธรรมชาติ  $\xi, \eta, \zeta$  ดังต่อไปนี้  
การกระจายของผลเฉลยโดยประมาณภายในเอลิเมนต์

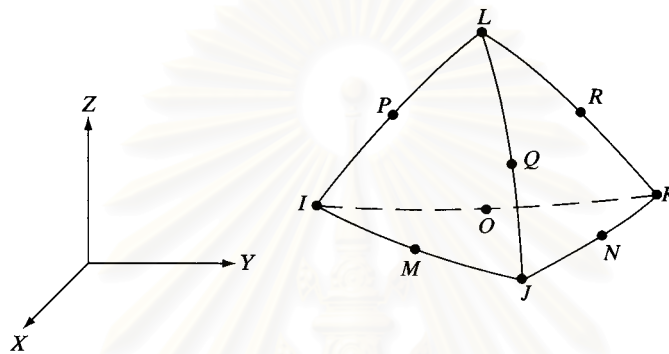
$$\phi = \sum_{i=1}^8 N_i \phi_i = \underset{(1 \times 8)}{[N]} \underset{(8 \times 1)}{\{\phi\}}$$

โดย  $\phi_i, i = 1 \dots 8$  คือค่าจุดต่อทั้งแปด และ  $N_i, i = 1 \dots 8$  คือฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้



$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & N_5 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta) \\
 N_2 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & N_6 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta) \\
 N_3 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta) & N_7 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \\
 N_4 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta) & N_8 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)
 \end{aligned}$$

ค. เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสิบจุดต่อ

มีสมการการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณภายในเอลิเมนต์คือ

$$\begin{aligned}
 \phi &= N_1(2N_1 - 1)\phi_1 + N_2(2N_2 - 1)\phi_2 + N_3(2N_3 - 1)\phi_3 + N_4(2N_4 - 1)\phi_4 \\
 &\quad + 4(N_1N_2\phi_5 + N_2N_3\phi_6 + N_1N_3\phi_7 + N_1N_4\phi_8 + N_2N_4\phi_9 + N_3N_4\phi_{10})
 \end{aligned}$$

โดย  $\phi_i, i = 1 \dots 8$  คือค่าจุดต่อทั้งสิบ และ  $N_i, i = 1 \dots 8$  คือฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

## การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ฟันปลอมไฮบริดในขากรรไกรล่าง

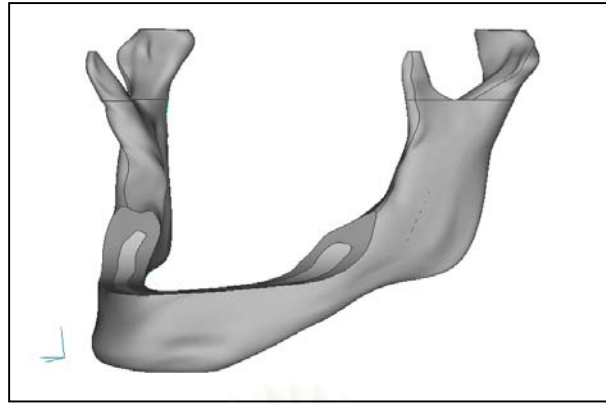
ในการศึกษาการทำงานของฟันปลอมไฮบริดในกระดูกขากรรไกรล่างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ ต้องสร้างแบบจำลองซึ่งจำลองรูปร่างลักษณะและคุณสมบัติของกระดูกขากรรไกรล่าง และโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด โดยที่การศึกษานี้ให้ความสนใจเฉพาะความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณรอบๆ รากฟันเทียมเนื่องจากเป็นบริเวณที่มักจะมีปัญหาเกิดขึ้นจากการฝังรากฟันเทียมในผู้ป่วยไร้ฟันควบคู่ไปกับความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอม ดังนั้นในแบบจำลองจึงได้ตัดชิ้นส่วนที่ไม่มีผลต่อการกระจายความเค้นในบริเวณดังกล่าวได้แก่ส่วนผิวหน้ารับแรงบดเคี้ยว ส่วนของสกรู และส่วนของกระดูกขากรรไกรล่างที่อยู่ห่างจากบริเวณที่ฝังรากฟันเทียมออกเพื่อลดภาระในการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์

การที่ไม่มีส่วนของผิวหน้ารับแรงบดเคี้ยวในแบบจำลองนั้นไม่มีผลต่อการกระจายแรงบดเคี้ยวลงสู่โครงโลหะ เนื่องจากแรงบดเคี้ยวที่ใช้เป็นแรงในแนวตั้งการเปลี่ยนจุดที่แรงบดเคี้ยวกระทำจากผิวหน้ารับแรงบดเคี้ยวไปเป็นจุดสนับสนุนโครงโลหะไม่ทำให้ค่าแรงและโมเมนต์รวมที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมเปลี่ยนแปลงไปด้วย อีกทั้งโครงโลหะที่ทำจากไททานเนียมมีความแข็งมากกว่าผิวหน้ารับแรงบดเคี้ยวซึ่งทำจากอคริลิกทำให้การกระจายแรงบดเคี้ยวลงโครงโลหะโดยตรงนั้นไม่มีความแตกต่างจากการกระจายแรงบดเคี้ยวผ่านผิวหน้ารับแรงบดเคี้ยว

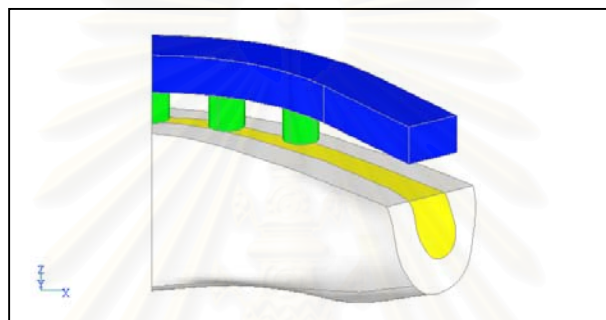
การจำลองกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อศึกษาการกระจายความเค้นรอบๆ รากฟันเทียมนั้นไม่จำเป็นต้องจำลองขากรรไกรล่างทั้งอัน เนื่องจากผลการทดสอบทางคลินิกพบว่าการจำลองขากรรไกรให้อยู่ในลักษณะของคานยื่น (Cantiliver Beam) โดยมีจุดรองรับแบบ Fixed End อยู่ที่หน้าตัดขวางของกระดูกขากรรไกรล่างบริเวณหลังรากฟันเทียมตัวสุดท้ายที่ระยะปลายสุดฟันปลอมนั้นเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณความเค้นรอบๆ รากฟันเทียมแล้ว ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองในการศึกษานี้จึงได้นำภาพสามมิติที่ใช้คอมพิวเตอร์สร้างขึ้นจากภาพที่ได้จากการทำ CT Scan (ภาพที่ 3.1) มาตัดกระดูกขากรรไกรล่างส่วนที่อยู่เลยระยะปลายสุดของฟันปลอมไปทางด้านท้ายออก เพื่อใช้เป็นแบบจำลองส่วนที่เป็นกระดูกขากรรไกรล่าง

จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดในกระดูกขากรรไกรล่างประกอบด้วยกระดูกขากรรไกรล่างตั้งแต่ส่วนหน้าสุดจนถึงตำแหน่งปลายสุดของฟันปลอม โครงสร้างฟันปลอมที่อยู่เหนือกระดูกได้แก่โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม และรากฟันเทียม

เนื่องจากกระดูกขากรรไกรล่างและชุดฟันปลอมไฮบริดในแบบจำลองมีความสมมาตรซ้ายขวาดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองเพียงครึ่งขวาเพียงครึ่งเดียว (ภาพที่ 3.2) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้น โดยมีหน้าตัดที่แบ่งครึ่งขากรรไกรเป็นหน้าตัดสมมาตร



ภาพที่ 3.1 ภาพสามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างทั้งชิ้นที่สร้างขึ้นจากภาพที่ได้จากการทำ CT Scan

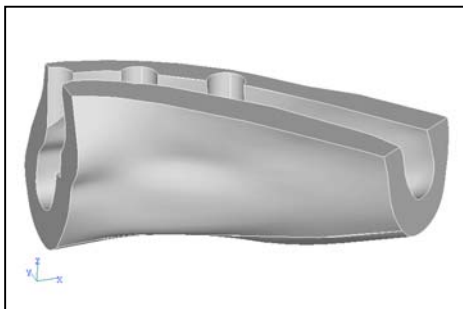


ภาพที่ 3.2 รูปร่างลักษณะครึ่งส่วนด้านขวาของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 5 ตัวในกระดูกขากรรไกรล่าง ชิ้นส่วนสีน้ำเงินคือโครงโลหะ (Frame) สีเขียวคือหลักยึด (Abutment) สีขาวคือกระดูกทึบ (Cortical Bone) สีเหลืองคือกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) ส่วนรากฟันเทียม (Implant) นั้นฝังอยู่ในกระดูกขากรรไกรล่างใต้หลักยึดรากฟันเทียม

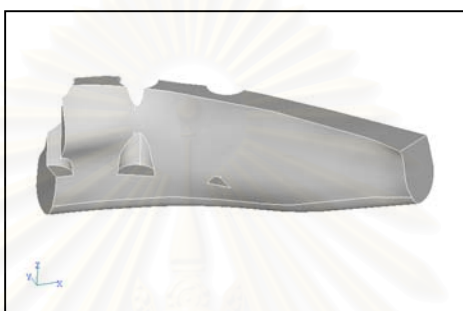
รายละเอียดของแบบจำลองมีดังต่อไปนี้

### 3.1 ลักษณะรูปร่างแบบจำลอง

3.1.1 ส่วนที่เป็นกระดูกขากรรไกรล่าง ประกอบด้วยกระดูก 2 ส่วนคือ กระดูกทึบ (Cortical Bone) และกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) ซึ่งเราสามารถสร้างภาพสามมิติของกระดูกทั้งสองส่วนได้ด้วยการนำเส้นโครงจาก CT Scan มาสร้างเป็นปริมาตรสามมิติของกระดูกขากรรไกรล่างแล้วตัดส่วนที่อยู่เลยระยะปลายฟันปลอมออก และสร้างรูสำหรับใส่รากฟันเทียมแต่ละตัวได้เป็นแบบจำลองกระดูกขากรรไกรล่างดังภาพที่ 3.3-3.4

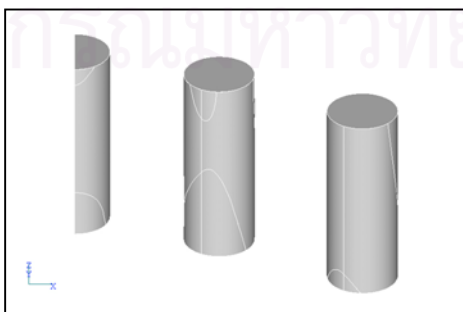


ภาพที่ 3.3 รูปร่างของกระดูกทึบ (Cortical Bone) ที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัว



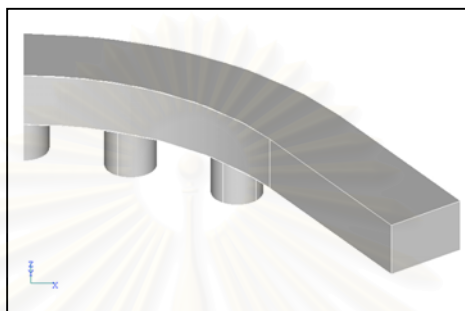
ภาพที่ 3.4 รูปร่างของกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) ที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัว

3.1.2 รากฟันเทียม (Implant) จำลองรูปร่างของรากฟันเทียมให้เป็นทรงกระบอกสูง 10 มม. มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.75 มม. ซึ่งรากฟันเทียมนั้นฝังตัวลงในกระดูกขากรรไกรล่างโดยให้แกนรากฟันเทียมอยู่ในแนวตั้ง ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัว จะฝังรากฟันเทียมกระจายอยู่ในขากรรไกร โดยกำหนดให้รากฟันเทียมแต่ละตัวอยู่ห่างจากกัน 11 มม. วัดจากจุดศูนย์กลางรากฟันเทียมตัวหนึ่งไปยังรากฟันเทียมอีกตัวหนึ่ง เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จึงกำหนดให้รากฟันเทียมตัวหลังสุดเป็นรากฟันเทียมตัวที่ 1 รากฟันเทียมตัวหน้าสุดเป็นรากฟันเทียมตัวที่ 3 และรากฟันเทียมที่อยู่ระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าและตัวหลังก็คือรากฟันเทียมตัวที่ 2 โดยที่หน้าตัดสมมาตรของแบบจำลองจะตัดผ่าครึ่งรากฟันเทียมตัวที่ 3 ดังรูปที่ 3.5 ส่วนในแบบจำลองที่ฝังรากฟันเทียม 3 ตัวจะไม่มีรากฟันเทียมตัวที่ 2



ภาพที่ 3.5 การเรียงตัวของรากฟันเทียม โดยที่ตัวขวาสุดคือรากฟันเทียมตัวที่ 1 ตัวถัดมาทางด้านซ้ายคือรากฟันเทียมตัวที่ 2 ส่วนรากฟันเทียมตัวซ้ายสุดคือรากฟันเทียมตัวที่ 3

3.1.3 ส่วนโครงสร้างฟันปลอมที่อยู่เหนือกระดูก ประกอบด้วยโครงโลหะ (Frame) และหลักยึดรากฟันเทียม (Abutment ) โดยที่จำลองรูปร่างของโครงโลหะให้มีรูปร่างเป็นคานโค้งรูปเกือกม้าซึ่งมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 6 มม. หนา 4 มม. และมีส่วนยื่นด้านท้ายยาว 20 มม.ทั้งด้านซ้ายและขวา ส่วนหลักยึดรากฟันเทียมเป็นทรงกระบอกมีหน้าตัดเท่ากับรากฟันเทียมแต่มีความสูง 4 มม. ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม

### 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

กำหนดให้ส่วนที่เป็นรากฟันเทียม โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมทำมาจากโลหะไททาเนียมอัลลอย (Ti-6%Al-7%Nb) ซึ่งเป็นโลหะที่เนื้อเยื่อสามารถตอบสนองได้ดีและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำรากฟันเทียม มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous) และอยู่ในกลุ่มไอโซโทรปิก (Isotropic) โดยมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) เท่ากับ 105 GPa มีอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.35 และมีความเค้นแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 830 MPa และความเค้นเฉือนที่จุดครากเท่ากับ 415 MPa (จาก Norman and Michale )

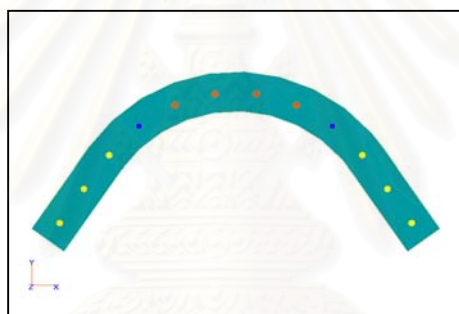
ส่วนการกำหนดคุณสมบัติวัสดุของกระดูกขากรรไกรที่มีความยุ่งยากซับซ้อน อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากความเป็นจริงแล้วกระดูกนั้นมีวัสดุอยู่ในรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอ (Nonhomogeneous) และอยู่ในกลุ่มออร์โทโทรปิก นอกจากนี้แล้วกระดูกขากรรไกรก็ยังมีความแตกต่างกันในแต่ละบุคคลขึ้นอยู่กับอายุ พันธุกรรม และปริมาณแร่ธาตุที่สะสมในกระดูก ดังนั้นการศึกษานี้จึงยึดถือคุณสมบัติที่ใช้ในงานวิจัยทางด้าน Biomechanics โดยส่วนใหญ่ซึ่งมักจะกำหนดให้กระดูกมีคุณสมบัติเป็น Homogeneous และอยู่ในกลุ่มของ Isotropic เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาที่ระบุถึงคุณสมบัติของกระดูกที่แน่นอนได้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดคุณสมบัติของกระดูกที่เป็นวัสดุเนื้อเดียวและอยู่ในกลุ่มของไอโซโทรปิก โดยใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดทางสถิติจากกลุ่มประชากรที่มีอายุ เพศ และ

พันธกรรมที่หลากหลาย ในการกำหนดเป็นคุณสมบัติให้กระดูกทึบ (Cortical Bone) มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 13.7 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3 และในกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 1.37 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3 (จาก Barbeir และคณะ (1998)) ส่วนค่าความแข็งแรงของกระดูกทึบซึ่งได้จากการทดสอบกำลังวัสดุ (Reilly และ Burstein (1975)) กำหนดค่าความแข็งแรงวัสดุ (Strength) จากการทดสอบแรงดึงเท่ากับ 133 MPa จากการทดสอบแรงกดเท่ากับ 193 MPa และจากการทดสอบแรงเฉือนเท่ากับ 68 MPa

### 3.3 การกำหนดแรงบิดเคี้ยวในแบบจำลอง (Load)

กำหนดให้แรงบิดเคี้ยวเป็นแรงในแนวตั้งกระทำบนจุดสบฟันซึ่งมีอยู่ 12 จุด กระจายอยู่ด้านบนของโครงโลหะด้วยระยะห่างที่คงที่ โดยมีจุดสบฟันหน้า 4 จุด จุดสบฟันเขี้ยว 2 จุด จุดสบฟันหลัง 6 จุด ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ตำแหน่งจุดสบฟันบนโครงโลหะ โดยจุดสีแดงเป็นจุดสบฟันหน้า สีน้ำเงินเป็นจุดสบฟันเขี้ยว และสีเหลืองเป็นจุดสบฟันกราม

ในการจำลองรูปแบบการบิดเคี้ยวที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริด นั้นอาศัยงานวิจัยที่ศึกษาแรงบิดเคี้ยวที่เกิดขึ้นในผู้ที่ใส่ฟันปลอมไฮบริดโดยการวัดค่าแรงกัดที่เกิดขึ้นจากการบิดเคี้ยว ซึ่งลักษณะการบิดเคี้ยวที่สำคัญนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีคือ

**กรณีที่ 1** แรงบิดเคี้ยวกระจายทั้งปาก ซึ่งก็คือมีแรงบิดเคี้ยวกระทำที่จุดสบฟันทุกจุดทั่วทั้งปาก จากการศึกษาของ Falk และคณะ(1989) กล่าวไว้ว่าแรงกัดที่เกิดบริเวณฟันหน้ามีค่าต่ำกว่าแรง กัดบริเวณฟันหลัง และจากการศึกษาของ Fontijn-Tekamp และคณะ(1998) กล่าวไว้ว่าแรงกัดที่วัดได้จากฟันหน้าจะมีค่าต่ำกว่าบริเวณฟันเขี้ยว และต่ำกว่าแรงกัดที่วัดได้ในบริเวณฟันกราม และจากการศึกษาของ Jemt และคณะ(1993) กล่าวไว้ว่าแรงกัดสูงสุดในตำแหน่งฟันกรามน้อยข้างขวามีค่าเฉลี่ย 160 N (75-320 N) ในตำแหน่งฟันกรามน้อยข้างซ้ายมีค่าเฉลี่ย 170 N (85-360 N) และที่ตำแหน่งปลายฟันหน้าค่าเฉลี่ย

135 N (45-235 N) เมื่อรวมทุกตำแหน่งแล้วมีค่าเฉลี่ย 167 N (85-295 N) ดังนั้นในกรณีนี้จึงกำหนดให้มีแรงบิดเคี้ยวที่ตำแหน่งจุดสบฟันหน้า และจุดสบฟันกรามให้ใกล้เคียงค่าเฉลี่ยของ Jemt โดยที่แรงบิดเคี้ยวที่จุดสบฟันหน้ามีค่าน้อยกว่าแรงบิดเคี้ยวที่จุดสบฟันเขี้ยว และมีค่าน้อยกว่าแรงบิดเคี้ยวที่จุดสบฟันกราม ซึ่งก็คือกำหนดให้ใช้ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N เป็นตัวแทนของการบิดเคี้ยวในกรณีที่ 1 โดยที่ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N หมายความว่ามีความแข็งแรงบิดเคี้ยวในแนวตั้งที่กระทำกับแต่ละจุดสบฟันหน้าจำนวน 4 จุดสบเท่ากับ 155 N มีแรงบิดเคี้ยวในแนวตั้งกระทำกับแต่ละจุดสบฟันเขี้ยวจำนวน 2 จุดสบเท่ากับ 175 N และมีแรงบิดเคี้ยวในแนวตั้งกระทำกับแต่ละจุดสบฟันกรามจำนวน 6 จุดเท่ากับ 195 N

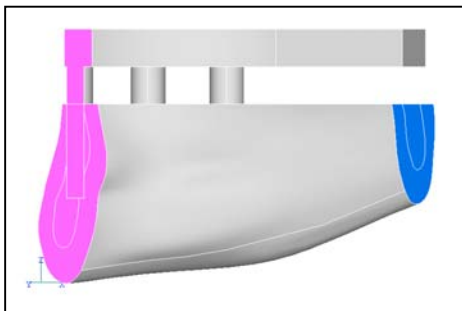
**กรณีที่ 2** แรงบิดเคี้ยวเฉพาะบริเวณฟันกรามด้านขวา จากการศึกษาการบิดเคี้ยวในผู้ที่ใส่ฟันปลอมไฮบริดของ Fontijn-Tekamp และคณะ (1998) แรงกัดในลักษณะดังกล่าวมีค่า 125.3-312.1 N ดังนั้นการศึกษาในกรณีนี้จึงกำหนดให้แรงบิดเคี้ยวที่จุดสบฟันหลังด้านขวาซึ่งอยู่ในตำแหน่งของจุดสบฟันหลังทั้ง 3 จุดมีค่าประมาณค่าเฉลี่ยของช่วงแรงบิดเคี้ยวดังกล่าว ซึ่งก็คือกำหนดให้ใช้ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N เป็นตัวแทนของการบิดเคี้ยวในกรณีที่ 2 ซึ่งหมายความว่ามีความแข็งแรงบิดเคี้ยวในแนวตั้งกระทำกับแต่ละจุดสบฟันกรามด้านขวาจำนวน 3 จุดเท่ากับ 190 N

### 3.4 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary Condition)

#### จุดรองรับในแบบจำลอง(Support)

จากการศึกษาของ Sertgöz (1997) กล่าวว่าในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูกขากรรไกรที่รองรับรากฟันเทียม เมื่อกำหนดให้มี Support แบบ Cantiliver ที่ระยะปลายสุดฟันปลอมบนกระดูกขากรรไกรล่าง จะมีแรงดัดเกิดขึ้นบนขากรรไกรทำให้ผลจากการคำนวณตรงกับผลการตรวจสอบทางคลินิก

ดังนั้นแบบจำลองในการศึกษานี้จึงกำหนดให้มีจุดรองรับที่ด้านทานการเคลื่อนที่และการหมุนของหน้าตัด (Fixed End) ที่ปลายแบบจำลองกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีตำแหน่งเดียวกับระยะปลายสุดของฟันปลอมในแนวตั้ง และแบบจำลองนั้นมีสมมาตรซ้ายขวาที่หน้าตัดสมมาตร ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งของจุดรองรับบนแบบจำลอง ซึ่งหน้าตัดสีฟ้าคือหน้าตัดที่กำหนดค่าขอบเขตให้ไม่มีการเคลื่อนที่และการหมุนของหน้าตัด และหน้าตัดสีชมพูคือหน้าตัดที่กำหนดให้แบบจำลองมีความสมมาตรของรูปร่างแบบจำลองที่หน้าตัดนี้

### 3.5 การแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

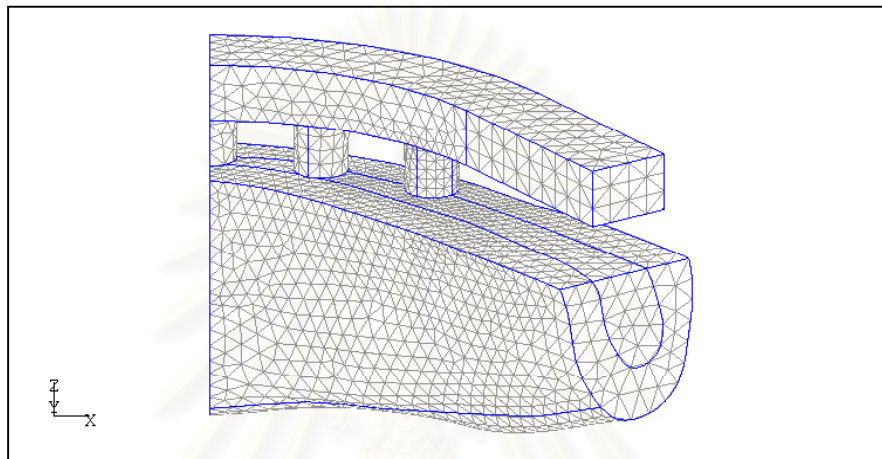
ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อกำหนดลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองแล้วแบบจำลองจะต้องถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยที่การศึกษานี้เลือกที่จะใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ เนื่องจากรูปทรงของเอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถเข้ากับลักษณะของโครงสร้างที่ซับซ้อนได้อย่างดี ซึ่งต่างจากเอลิเมนต์ทรงหกหน้าซึ่งมีปัญหามากในการใช้แบ่งเอลิเมนต์โครงสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อน และการประมาณค่าภายในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อนั้นใช้สมการพหุนามกำลังสองในการประมาณค่าภายใน ดังนั้นการแบ่งเอลิเมนต์ด้วยเอลิเมนต์ชนิดนี้ทำให้ได้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูงโดยไม่ต้องอาศัยการแบ่งเอลิเมนต์จำนวนมากเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำซึ่งยอมรับได้ ดังเช่นการใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ

โดยที่ในแต่ละส่วนของแบบจำลองจะกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้มีขนาดใหญ่เล็กไม่เท่ากัน โดยบริเวณที่ไม่ได้รับความสนใจในการศึกษานี้ซึ่งได้แก่บริเวณจุดที่กำหนดให้มีแรงบิดเคี้ยวและจุดที่กำหนดให้เป็นจุดรองรับของโครงสร้างนั้นจะกำหนดให้เอลิเมนต์มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 1.5 มม.) ส่วนของกระดูกอบรากฟันเทียมที่มีความเค้นสูงซึ่งเป็นจุดมีความสำคัญต่อการศึกษานี้จะกำหนดให้เอลิเมนต์มีขนาดเล็ก (ประมาณ 0.7 มม.) ซึ่งหากกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้เล็กกว่านี้ผลที่ได้จากการคำนวณจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

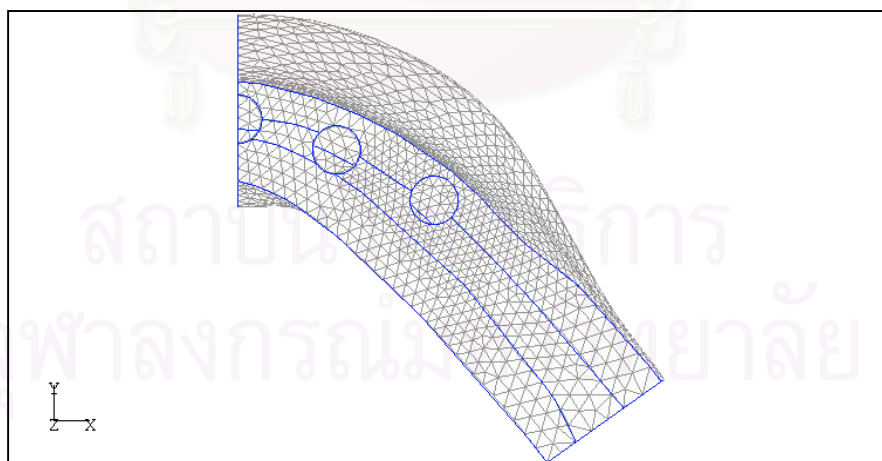
ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 5 ตัวบนขากรรไกรล่างจะแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองทั้งหมดเป็น 25,973 เอลิเมนต์ 39,994 จุดต่อ โดยที่ในส่วนหนึ่งของโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมนั้นมี 2,847 เอลิเมนต์ 5,504 จุดต่อ ส่วนของรากฟันเทียมทั้งหมดมี 2,091 เอลิเมนต์ 4,134 จุดต่อ ส่วนของกระดูกที่บีมี่ 12,869 เอลิเมนต์ 23,409 จุดต่อ และส่วนของกระดูกโปร่งมี 8,166 เอลิเมนต์ 14,744 จุดต่อ (ภาพที่ 3.9-3.11)



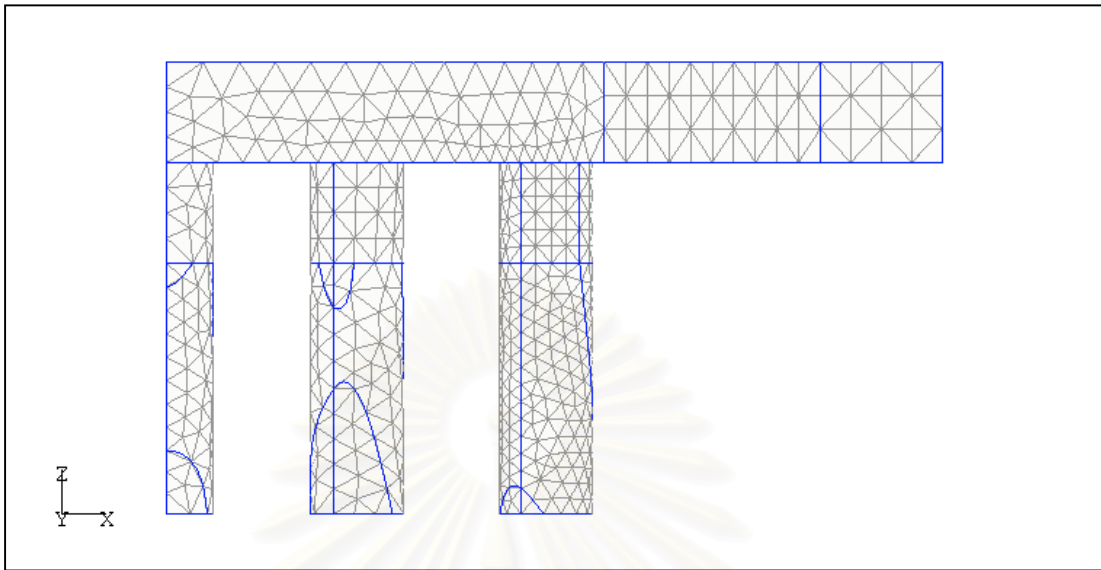
ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 3 ตัวบนขากรรไกรล่างจะแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองทั้งหมดเป็น 23,035 เอลิเมนต์ 35,793 จุดต่อ โดยที่ในส่วนของโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมนั้นมี 2,614 เอลิเมนต์ 5,057 จุดต่อ ส่วนของรากฟันเทียมทั้งหมดมี 1,675 เอลิเมนต์ 3,223 จุดต่อ ส่วนของกระดูกที่มี 11,583 เอลิเมนต์ 21,196 จุดต่อ และส่วนของกระดูกโปร่งมี 7,163 เอลิเมนต์ 12,925 จุดต่อ (ภาพที่ 3.12-3.14)



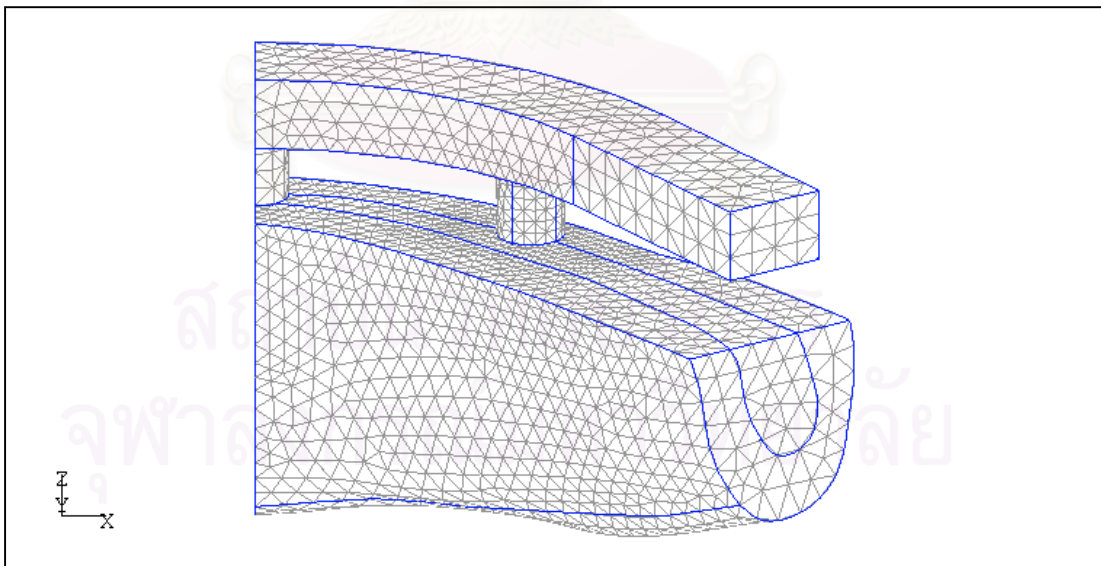
ภาพที่ 3.9 การแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 5 ตัวบนกระดูกขากรรไกรล่าง



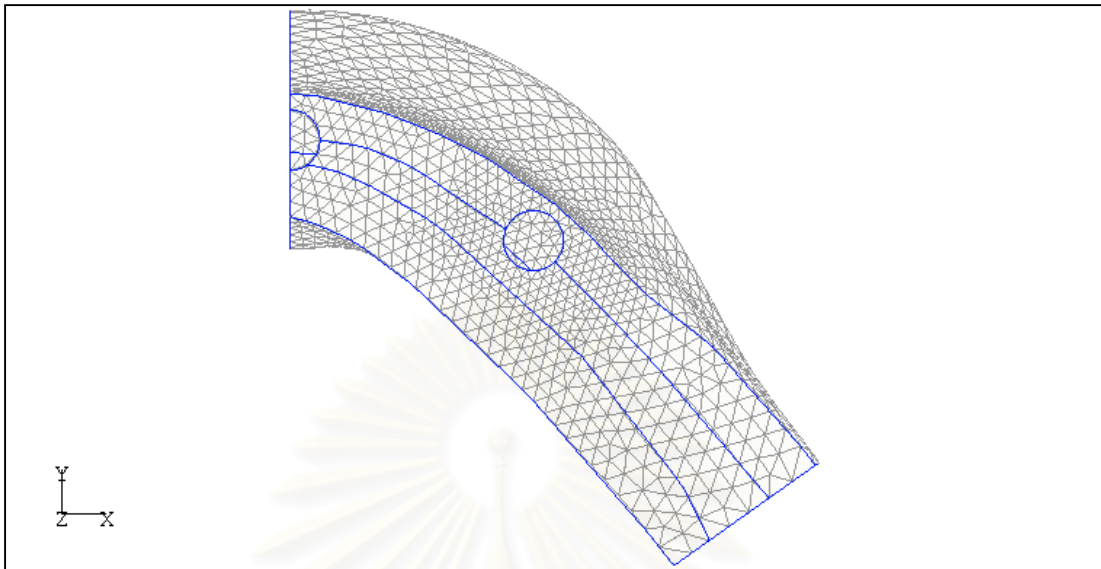
ภาพที่ 3.10 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากฟันเทียม 5 ตัวบนกระดูกขากรรไกรล่าง



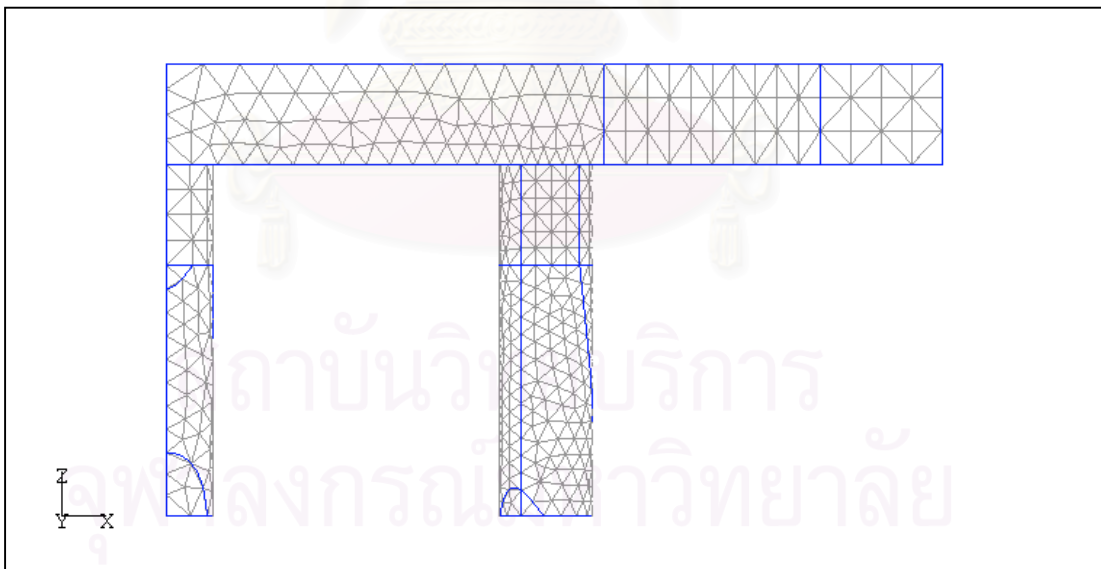
ภาพที่ 3.11 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นโครงโลหะ หลักยึดรากพื้นเทียมและรากพื้นเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากพื้นเทียม 5 ตัวบนกระดูกขากรรไกรล่าง



ภาพที่ 3.12 การแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดฝังรากพื้นเทียม 3 ตัวบนกระดูกขากรรไกรล่าง



ภาพที่ 3.13 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองพินปลอมไฮบริดฝักรากฟันเทียม 3 ตัวบนกระดุกขากรรไกรล่าง



ภาพที่ 3.14 การแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนที่เป็นโครงโลหะ หลักยึดรากฟันเทียมและรากฟันเทียมในแบบจำลองพินปลอมไฮบริดฝักรากฟันเทียม 3 ตัวบนกระดุกขากรรไกรล่าง

## บทที่ 4

### การกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม เป็นรูปแบบการใส่ฟันปลอมติดแน่นยึดกับรากฟันเทียมจำนวน 5 ตัวที่ฝังอยู่ในกระดูกขากรรไกรล่างของผู้ป่วยไร้ฟัน ซึ่งได้รับการยืนยันจากการศึกษาทางคลินิกว่าประสบความสำเร็จสูงในการติดตั้งชุดฟันปลอมชนิดนี้ให้แก่ผู้ป่วย ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้การทำงานของฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมเป็นมาตรฐานเพื่อศึกษาการทำงานกับฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม โดยการเปรียบเทียบระหว่างฟันปลอมทั้งสองแบบ ซึ่งฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมนี้นี้ยังไม่มีการศึกษาทางคลินิกใดๆที่สามารถยืนยันได้ว่าฟันปลอมจะประสบความสำเร็จในการใช้งานจริง ดังนั้นก่อนที่จะมีการศึกษาการทำงานของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมจึงจำเป็นต้องจำลองการทำงานของฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อใช้ศึกษาเปรียบเทียบการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด ได้แก่ โครงโลหะ หลักยึดรากฟันเทียม รากฟันเทียม และความเค้นที่เกิดขึ้นบนกระดูกขากรรไกรล่างรอบๆ รากฟันเทียมที่เกิดจากการใช้งานฟันปลอมไฮบริดทั้งสองแบบ

ในการจำลองรูปแบบการบิดเคี้ยวของมนุษย์โดยกำหนดให้แรงที่ได้จากการบิดเคี้ยวอาหารมีทิศทางอยู่ในแนวตั้ง กระทำที่จุดสบบนฟันปลอมไฮบริดนั้นสามารถแบ่งลักษณะการกระจายแรงบิดเคี้ยวบนฟันปลอมไฮบริดออกเป็น 2 กรณี ซึ่งมีลักษณะการกระจายแรงบิดเคี้ยวที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างฟันปลอม และกระดูกรอบรากฟันเทียมได้ ดังนี้

**กรณีที่ 1** เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวกระจายทั่วทั้งปาก โดยแรงบิดเคี้ยวจะกระจายไปยังทุกจุดสบฟันทั้ง 12 จุดสบ รวมถึงจุดที่อยู่บนส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมด้วย

**กรณีที่ 2** เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวบริเวณฟันกรามด้านขวา โดยแรงบิดเคี้ยวจะกระจายไปยังจุดสบฟันจำนวน 3 จุดสบบนส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมด้านขวา

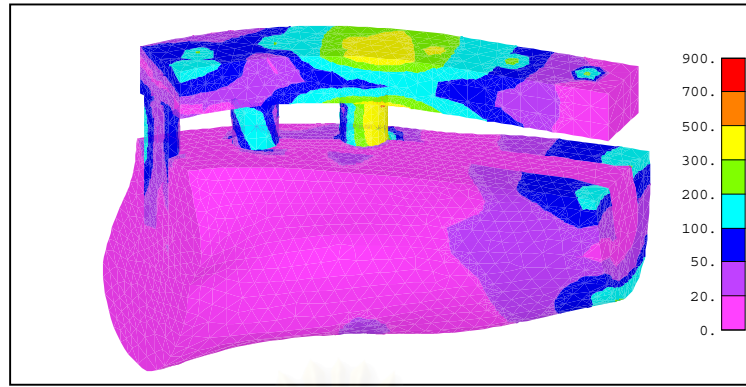
ขนาดของแรงกระทำที่จุดสบฟันในทั้งสองกรณีนั้น ได้มาจากการศึกษาแรงบิดเคี้ยวที่เกิดขึ้นในฟันปลอมไฮบริด ซึ่งวัดแรงบิดเคี้ยวในแต่ละจุดสบฟันด้วยส้อมกัด (Bite Fork) โดยทำการทดสอบแรงบิดเคี้ยวจากกลุ่มตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันทั้งเพศ และวัย ทำให้ค่าแรงกัดในแต่ละจุดสบที่ได้นั้นเป็นค่าแรงที่มีช่วงกว้างๆ ตั้งแต่ค่าแรงกัดต่ำสุดจนถึงค่าแรงกัดสูงสุดซึ่งสามารถวัดได้ที่แต่ละจุดสบในกลุ่มตัวอย่าง ดังนั้นในการศึกษาการทำงานของฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่างจึงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามข้อกำหนดในบทที่ 3 โดยกำหนดให้กรณีที่ 1 มีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N และกรณีที่ 2 มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการทำงานของฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมและ 3 รากฟันเทียม

เนื่องจากทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายการแตกหักของวัสดุนั้นแตกต่างกันในวัสดุเหนียว (Ductile Material) และวัสดุเปราะ (Brittle Material) ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจึงใช้ค่าความเค้นที่แตกต่างกันมาเป็นเกณฑ์ใช้ในการพิจารณา โดยที่ส่วนของแบบจำลองที่เป็นโลหะไททานเนียมอัลลอยซึ่งเป็นวัสดุเหนียวนั้นใช้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ ส่วนที่เป็นกระดูกซึ่งเป็นวัสดุเปราะนั้นใช้ค่าความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือนสูงสุด โดยที่สามารถศึกษาการกระจายค่าความเค้นดึงได้จากค่าความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress,  $\sigma_1$  ) และศึกษาการกระจายความเค้นกดได้จากการกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress,  $\sigma_3$  ) ส่วนค่าความเค้นเฉือนนั้นสามารถศึกษาการกระจายความเค้นได้จากการกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress,  $0.5(\sigma_1 - \sigma_3)$  )

สำหรับบรรทัดฐาน (Criteria) ที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมนั้นต้องมีค่าไม่เกินจุดครากของไททานเนียมอัลลอย ส่วนค่าความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่ากำลังวัสดุ (Strength of Material) ของกระดูกที่บซึ่งได้จากการทดสอบของ Reilly และ Burstein (1975) ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังต่อไปนี้

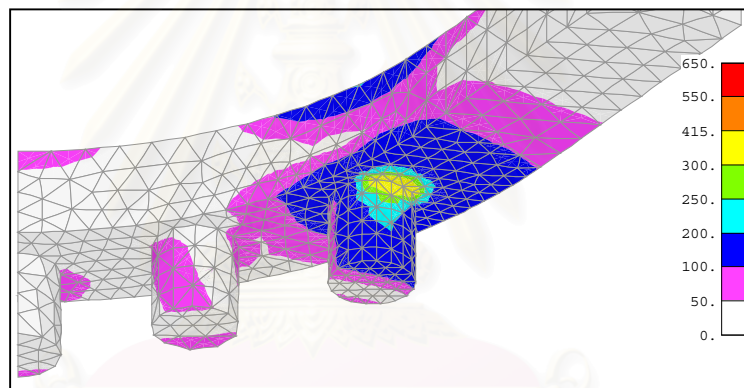
#### 4.1 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 1 เมื่อมีแรงกดเคี้ยวกระจายทั่วทั้งปาก โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

เนื่องจากในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งรับแรงกดเคี้ยวที่กระจายทั่วปากนั้นมีความสมมาตรของรูปร่างแบบจำลองและแรงกดเคี้ยวที่กระทำในแบบจำลอง ลักษณะการกระจายความเค้นในแบบจำลองนั้นย่อมมีความสมมาตรด้วยเช่นกัน ดังนั้นการประมาณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เฉพาะครึ่งขวาของฟันปลอมไฮบริดและกระดูกขากรรไกรล่างก็เพียงพอต่อการศึกษาระบายความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองทั้งหมด โดยที่ความเค้นที่กระจายอยู่ในบริเวณรากฟันเทียมตัวที่ 5 และ 4 ซึ่งฝังลงในกระดูกขากรรไกรล่างซี่ซ้ายนั้นตรงกับการกระจายความเค้นบริเวณของรากฟันเทียมตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

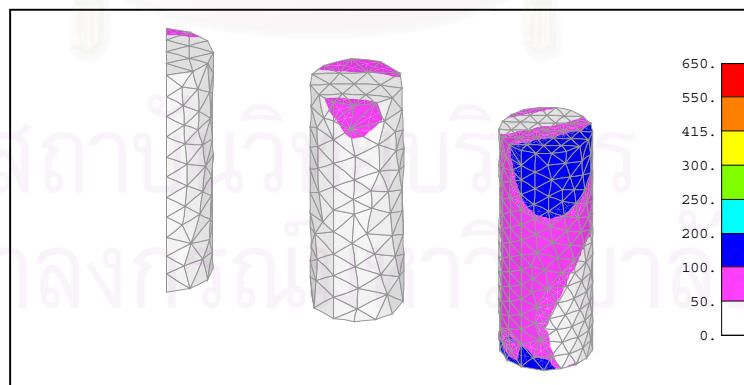


ภาพที่ 4.1 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟิสิกส์ไฮบริด 5 รากพื้นเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

#### 4.1.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟิสิกส์ไฮบริด



( ก )

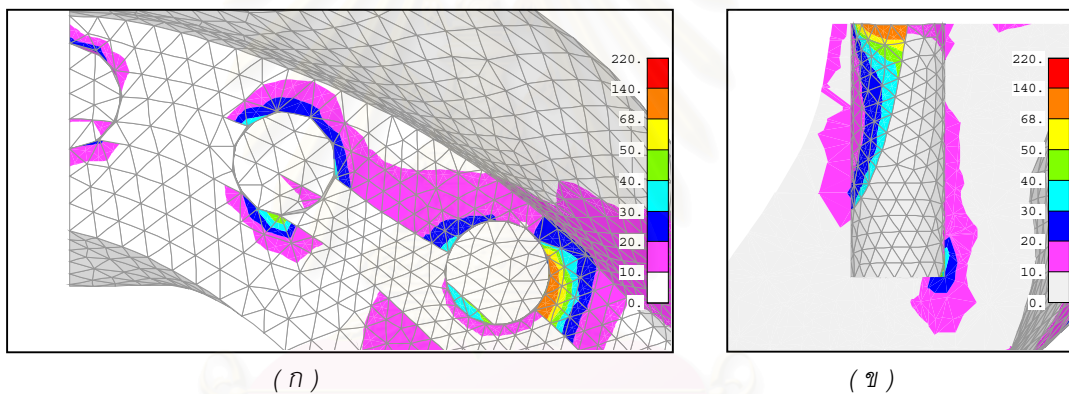


( ข )

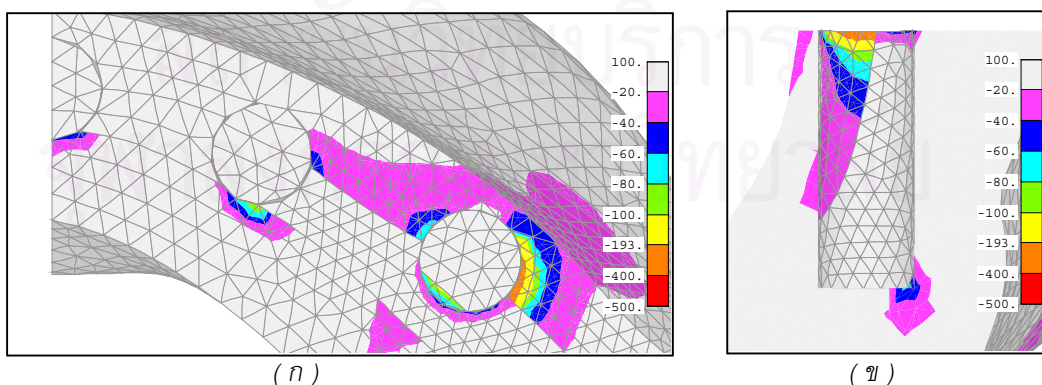
ภาพที่ 4.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบน ( ก ) โครงโลหะและหลักยึดรากพื้นเทียม, ( ข ) รากพื้นเทียมในแบบจำลองฟิสิกส์ไฮบริด 5 รากพื้นเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N บริเวณคอกหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าสูงกว่าความเค้นเฉือนในบริเวณอื่นๆ ในโครงสร้างฟันปลอม โดยที่มีความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งอยู่ที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมมีค่าเท่ากับ 410 MPa ใกล้เคียงกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททานเนียมอัลลอย (415 MPa) การกระจายความเค้นในบริเวณนี้อยู่ในลักษณะของความเค้นขุมขุม (Stress Concentration) สังเกตได้จากการที่ความเค้นที่มีค่าสูงเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ ที่มุมรอยต่อระหว่างหลักยึดกับโครงโลหะ ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณอื่น เช่น ในหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 2 และ 3 ในโครงโลหะที่ตรงกับหลักยึดตัวที่ 2 และ 3 รวมถึงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนรากฟันเทียมทั้งหมดมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททานเนียมอัลลอย

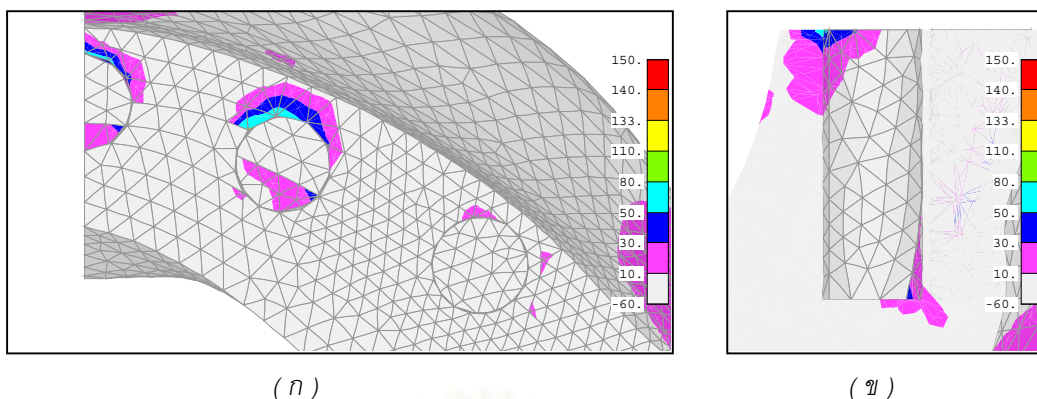
#### 4.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 4.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 4.4 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 4.5 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (*Maximum principal Stress, MPa*) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 2

ความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม กรณีที่มีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N นั้น ทั้งค่าความเค้นเฉือน ค่าความเค้นกด ค่าความเค้นดึง ในส่วนของกระดูกโปรงมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับความเค้นในกระดูกทึบ มีสาเหตุจากการที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของกระดูกโปรงมีค่าต่ำกว่ากระดูกทึบถึง 10 เท่า ทำให้การถ่ายทอดแรงจากรากฟันเทียมลงสู่กระดูกทึบมากกว่ากระดูกโปรง โดยที่ค่าความเค้นที่กระจายลงสู่กระดูกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวนั้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่กระดูกระดับบนสุดซึ่งตรงกับบริเวณคอของรากฟันเทียม ซึ่งความเค้นจะมีค่าลดลงในกระดูกที่อยู่ลึกลงไปจากรากฟันเทียม และอยู่ห่างจากรากฟันเทียมออกไปในแนวรัศมีของรากฟันเทียม

ความเค้นเฉือน ความเค้นกดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากำลังวัสดุเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆบนกระดูกบริเวณคอของรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยที่จุดนี้ค่าความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 124 MPa และค่าความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ -322 MPa

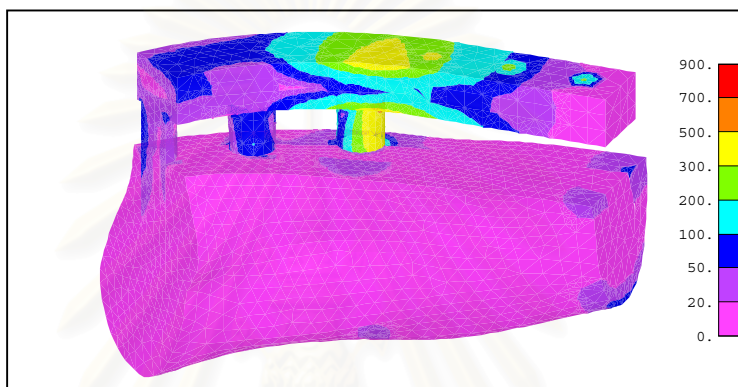
ความเค้นดึงที่มีค่าสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมอยู่กระดูกบริเวณคอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 83 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังวัสดุของกระดูก

#### 4.2 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 2 เมื่อมีแรงบดเคี้ยวเฉพาะบริเวณฟันกรามขวา โดยกำหนดชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

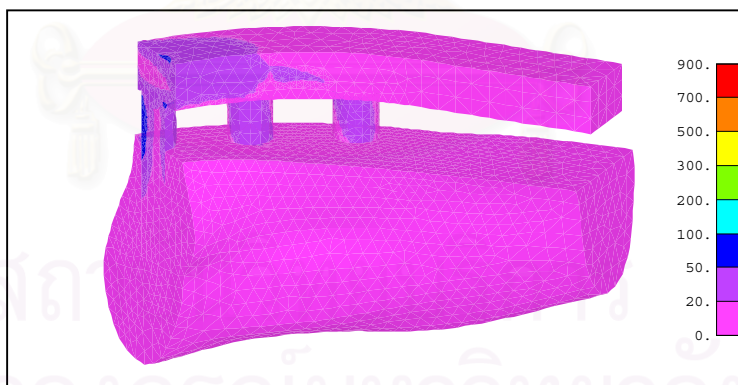
ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม เมื่อมีชุดแรงบดเคี้ยวชุด 190 N นั้นแม้ว่ารูปร่างรูปทรงของแบบจำลองจะมีความสมมาตรซ้ายขวา แต่ค่าแรงบดเคี้ยวซึ่งเป็นแรงในแนวตั้ง



ขนาด 190 N กระทำที่จุดสบพื้นกรามด้านขวาจำนวน 3 จุดสบนั้นไม่สมมาตรกับพื้นผิวสมมาตรของแบบจำลอง ดังนั้นจึงต้องคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งซี่ซ้ายและซี่ขวาของแบบจำลอง โดยที่แบบจำลองซี่ซ้ายนั้นยังคงใช้รูปทรงของแบบจำลองซี่ขวาในการคำนวณ ฉะนั้นในการแสดงการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองซี่ซ้ายอยู่ในลักษณะของภาพสะท้อนกลับ ซึ่ง รากฟันเทียมตัวที่ 5 ในแบบจำลองซี่ซ้ายนั้นอยู่ที่ตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองซี่ขวา และรากฟันเทียมตัวที่ 4 ในแบบจำลองซี่ซ้ายนั้นอยู่ที่ตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวที่ 2 ในแบบจำลองซี่ขวา ดังภาพที่ 4.6-4.7



ภาพที่ 4.6 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซี่ขวา มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

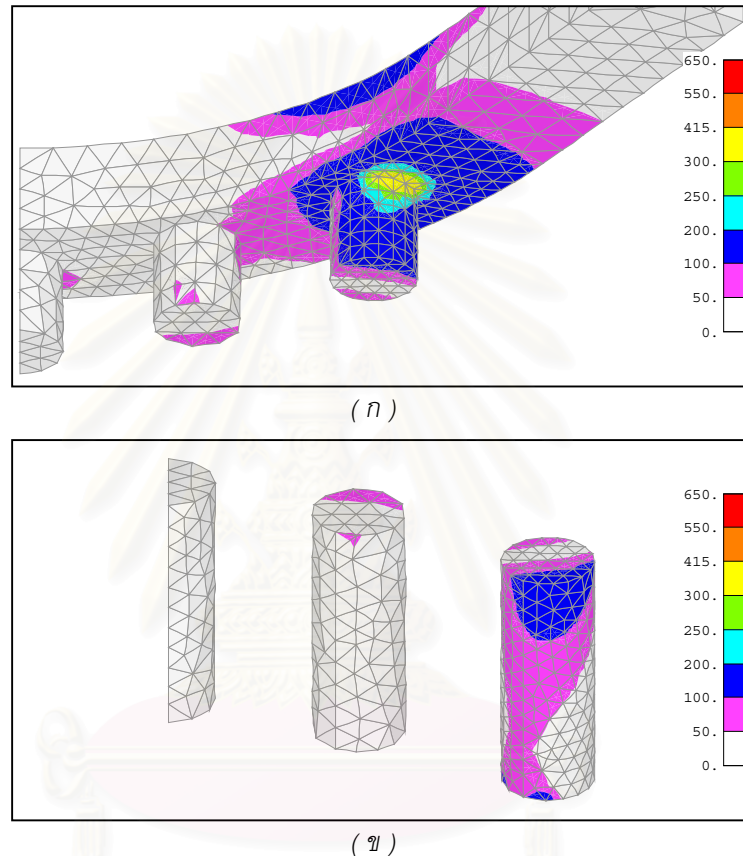


ภาพที่ 4.7 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซี่ซ้าย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

จากภาพที่ 4.6 –4.7 ซึ่งแสดงการกระจายความเค้น Von Mises Stress ของแบบจำลองที่มีแรงกดเคี้ยวซึ่งไม่สมมาตรซ้ายขวาของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม สังเกตได้ว่าความเค้นที่เกิดบนแบบจำลองซี่ซ้ายนั้นมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองซี่ขวา ในการศึกษานี้ให้ความสนใจต่อบริเวณที่มีความเค้นสูง ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเค้นกรณี

ที่เกิดจากแรงบิดเคี้ยวที่ไม่สมมาตรซ้ายขวาจึงใช้เฉพาะแบบจำลองซีกขวาในการวิเคราะห์ความเค้นเท่านั้น และละไว้ในฐานที่เข้าใจว่าแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดที่มีแรงบิดเคี้ยวซึ่งไม่สมมาตรกับพื้นผิวสมมาตรของแบบจำลอง นั่นก็คือแบบจำลองซีกขวาซึ่งอยู่ด้านเดียวกับจุดสบฟันกรามที่มีแรงบิดเคี้ยวเพียงซีกเดียว

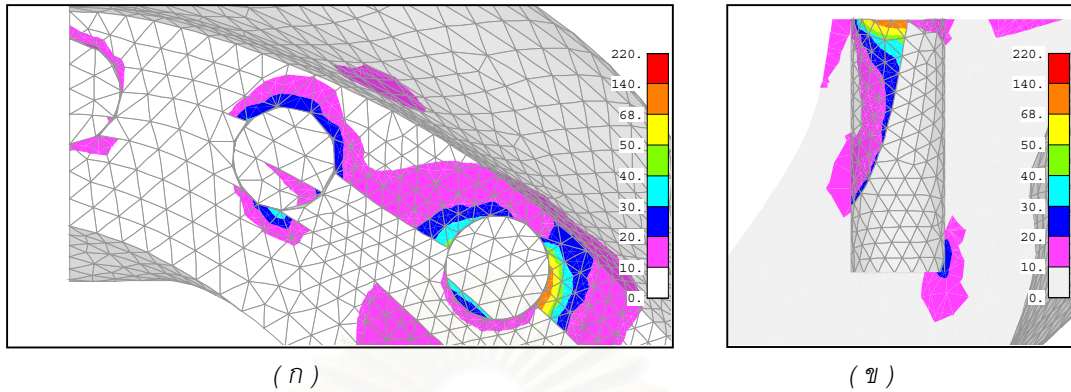
#### 4.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



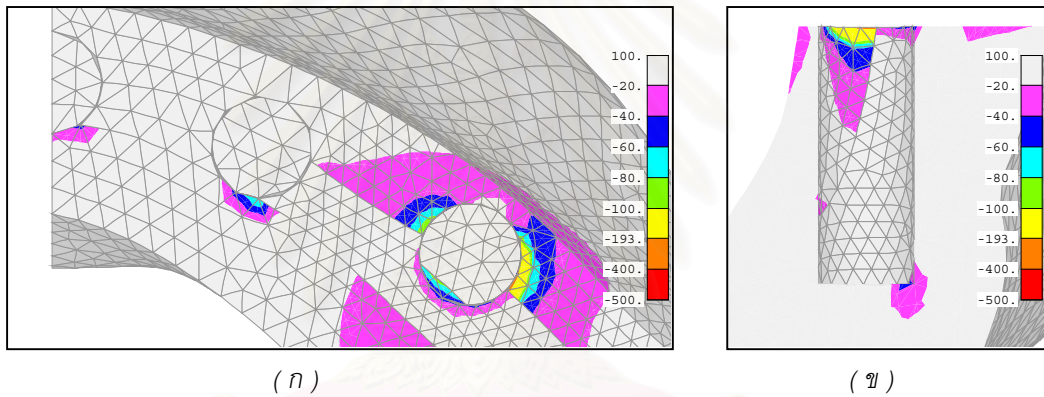
ภาพที่ 4.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบน ( ก ) โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, ( ข ) รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190N

ความเค้นเฉือนที่กระจายอยู่บนโครงสร้างฟันปลอมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม เมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N นั้นมีลักษณะการกระจายความเค้นไม่แตกต่างจากในกรณีที่ 1 โดยที่โครงสร้างฟันปลอมเกิดความเค้นสูงเป็นบริเวณเล็กๆในลักษณะของความเค้นชุมนุม (Stress Concentration) บริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าเข้าใกล้ค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททาเนียมอัลลอย โดยที่ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 411 MPa ส่วนค่าความเค้นเฉือนที่กระจายอยู่ในบริเวณอื่นๆของโครงสร้างฟันปลอมนั้นมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของโลหะ

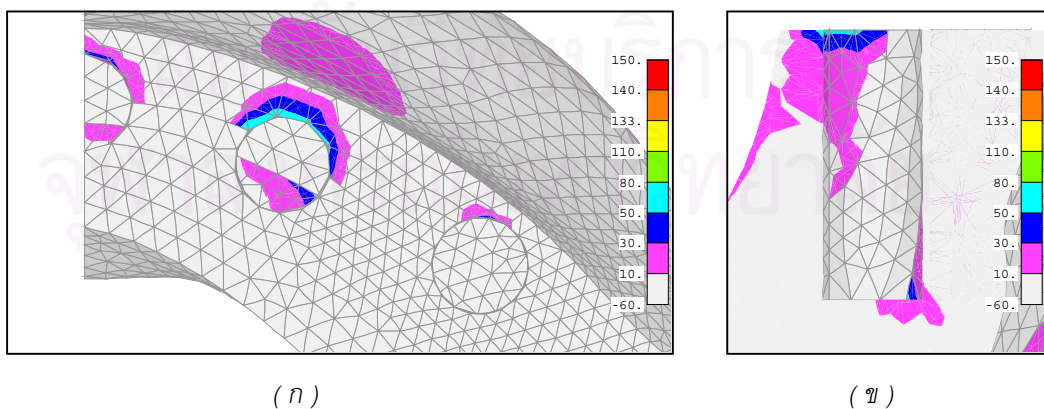
#### 4.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 4.9 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 4.10 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 4.11 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 2

ความเค้นเฉือนและความเค้นกดที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมเมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N นั้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณกระดูกรอบคอ รากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก ซึ่งความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในจุดนี้เท่ากับ 89 MPa และความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้นในจุดนี้มีค่าเท่ากับ -219 MPa

ส่วนค่าความเค้นดึงสูงสุดนั้นอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 2 ด้านหน้าซึ่งมีค่าความเค้น สูงสุดที่น้อยกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก โดยค่าความเค้นดึงสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 71 MPa

#### 4.3 สรุปการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม

ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟัน เทียมบนขากรรไกรล่างนั้นแสดงให้เห็นพฤติกรรมการกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม ( โครงโลหะ, หลักยึด และรากฟันเทียม ) และในกระดูกรอบรากฟันเทียมได้อย่างชัดเจน การ กระจายความเค้นแบบ Von Mises แสดงให้เห็นความไม่ต่อเนื่องของความเค้นที่กระจายอยู่บน แบบจำลองเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่มีคุณสมบัติวัสดุ (โมดูลัสความยืดหยุ่น, E ) แตก ต่างกัน นอกจากนี้การกระจายความเค้นแบบ Von Mises ยังแสดงให้เห็นความไม่สมมาตรซ้าย ขวาของความเค้นที่กระจายลงบนแบบจำลองในกรณีที่มีแรงบิดเคี้ยวเฉพาะบริเวณกรามขวา แต่มี การกระจายความเค้นไปยังแบบจำลองซีกซ้ายของขากรรไกรน้อยมากเมื่อเทียบกับความเค้นที่เกิด ขึ้นบนแบบจำลองซีกขวาของขากรรไกรซึ่งอยู่ด้านเดียวกับตำแหน่งของแรงบิดเคี้ยว

ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่าง (เฉพาะซีกขวาของขา กรรไกร) เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 นั้นมีรูปแบบของการกระจายความเค้นที่ คล้ายกัน โดยที่บนโครงสร้างฟันปลอมความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่คอหลักยึดตัวที่ 1 (รอยต่อระหว่าง หลักยึดกับโครงโลหะ) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดความเค้นขมขม (Stress Concentration) เนื่องจาก ลักษณะรูปร่างของแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดอย่างกะทันหันจากหน้าตัดที่ใหญ่กว่าของ โครงโลหะสู่หน้าตัดที่เล็กกว่าของหลักยึดรากฟันเทียม ส่วนในกระดูกรอบรากฟันเทียม ความเค้น ที่กระจายบนกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเค้นที่กระจายอยู่บน กระดูกทึบ โดยที่กระดูกที่บรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวนั้นมีความเค้นสูงอยู่ที่บริเวณคอรากฟัน เทียม

การกำหนดให้แรงบิดเคี้ยวชุด 155-175-195 N เป็นชุดแรงบิดเคี้ยวในการบิดเคี้ยวกรณีที่ 1 และชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N เป็นชุดแรงบิดเคี้ยวในการบิดเคี้ยวกรณีที่ 2 ทำให้ความเค้นเฉือนที่มี

ค่าสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอม (ที่คอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของโลหะไททาเนียมอัลลอย (415 MPa) ส่วนค่าความเค้นเฉือนและค่าความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (ที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม) มีค่าสูงเกินกว่าค่าความแข็งแรงวัสดุของกระดูกทึบ (Shear Strength, 68 MPa และ และ Compressive Strength, -198 MPa) แต่กระดูกรอบรากฟันเทียมมีความเค้นดึงสูงสุดบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 2 ต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงของกระดูกเล็กน้อย

#### 4.4 อภิปรายผลการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม

ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่างนั้นประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนต่างๆที่มีคุณสมบัติวัสดุ (โมดูลัสความยืดหยุ่น) ที่ต่างกัน ได้แก่ โลหะไททาเนียมอัลลอยกระดูกทึบ (Cortical Bone) และกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) ดังนั้นเมื่อนำสมการที่แสดงค่าความเครียดที่จุดใดจุดหนึ่งซึ่งมีความต่อเนื่องกันทั้งแบบจำลอง มาแปลงเป็นค่าความเค้นด้วยสมการ  $\sigma = E\varepsilon$  แม้ว่าค่าความเครียด  $\varepsilon$  จะมีความต่อเนื่องแต่เมื่อคูณกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  $E$  ซึ่งไม่ต่อเนื่องทำให้ค่าความเค้นบนแบบจำลองที่ได้มีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นขอบเขตรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดดังที่เห็นได้จากภาพแสดงการกระจายความเค้นบนแบบจำลอง

ส่วนความสมมาตรที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงบิดเคี้ยวกระจายทั้งปากนั้นเกิดจากการที่แบบจำลองมีรูปร่างลักษณะและแรงบิดเคี้ยวที่สมมาตรซ้ายขวา ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่างเมื่อมีแรงบิดเคี้ยวกรณีที่ 1 จึงมีความสมมาตรของแบบจำลองซีกซ้ายและขวาของขากรรไกรตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันกับในกรณีที่ 1 มีแรงบิดเคี้ยวบนกรามขวาด้านเดียวทำให้แรงบนแบบจำลองเกิดความไม่สมมาตร ดังนั้นความเค้นที่กระจายบนแบบจำลองในกรณีที่ 2 นี้จึงมีการกระจายความเค้นที่ไม่สมมาตรกันของแบบจำลองซีกขวาและซีกซ้ายของขากรรไกร แต่เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองซีกซ้ายของขากรรไกรมีค่าน้อยจนไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความเค้นที่เกิดบนแบบจำลองซีกขวาของขากรรไกร ดังนั้นในการศึกษาความเค้นที่เกิดจากแรงบิดเคี้ยวทั้งสองกรณีบนแบบจำลองซีกขวาของขากรรไกรก็เพียงพอแล้ว

ความเค้นหลักที่คำนวณได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่างแสดงให้เห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวหลังสุดโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นความเค้นกด ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมสองตัวหน้า

โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นความเค้นดึง โดยที่ความเค้นหลักที่เกิดขึ้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวหลัง สูดนั้นมีค่าสูงกว่าในกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวหน้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Rangert et al. (1989) ที่ระบุว่าแรงภายในรากฟันเทียมนั้นเกิดจากการต้านแรงและโมเมนต์จากแรงบดเคี้ยวบนโครงโลหะในรูปแบบของคานติดคานงัดโดยมีตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุดเป็นจุดหมุนเสมือน ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองในตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหน้านั้นจึงเกิดจากแรงดึงในรากฟันเทียม ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองในตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังนั้นเกิดจากแรงกดในรากฟันเทียม

ตำแหน่งที่มีความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดที่คำนวณได้นี้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันที่ได้จากงานวิจัยในอดีตของ Sertgoz และ Guvener (1996) ที่ระบุว่าความเค้นสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม นั้นอยู่ที่คอรากฟันเทียมตัวหลังสุด ทิศทางเดียวกับคานยื่นด้านท้ายฟันปลอม แต่ขัดแย้งกับผลการตรวจสอบทางคลินิกของ Lindquist, Rockler และ Carlsson (1988) ที่ระบุว่าการโยกหลุดของรากฟันเทียมมีอัตราการเกิดขึ้นที่ตัวหน้ามากกว่าตัวหลัง ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าการโยกหลุดของรากฟันเทียมนั้นไม่ได้เกิดจากการที่มีความเค้นกดมากเกินไป แต่เกิดจากความเค้นดึงที่มีค่าสูงที่กระดูกรอบรากฟันเทียมตัวหน้าทำให้เกิดการละลายตัวจนเป็นสาเหตุทำให้รากฟันเทียมโยกหลุด

การกำหนดชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N สำหรับการบดเคี้ยวในกรณีที่ 1 และ 190 N สำหรับการบดเคี้ยวในกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นชุดแรงบดเคี้ยวที่มีแรงบดเคี้ยวในแต่ละจุดสบฟันเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่วัดได้จากการศึกษาของ Jemt และคณะ(1993) ให้แก่แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่าง ทำให้ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมมีค่าสูงจนเกือบถึงจุดครากของวัสดุ และทำให้ความเค้นเฉือนและความเค้นกดในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงเกินกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก แต่ความเค้นดึงในกระดูกรอบรากฟันเทียมยังมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูกที่บดเล็กน้อย

ในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นมีส่วนเล็กๆของกระดูกที่คอรากฟันเทียมตัวหลังสุดซึ่งมีความเค้นสูงจนเกินค่าความแข็งแรงของกระดูก โดยที่กระดูกส่วนที่เกิดความเค้นสูงนี้อาจจะเกิดการละลายตัวของกระดูกขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ แต่การละลายตัวของกระดูกส่วนนี้ไม่น่าจะทำให้รากฟันเทียมโยกหลุดออกจากกระดูกขากรรไกรได้ สังเกตได้จากการตรวจสอบปริมาณกระดูกประชิดรากฟันเทียมของ Adell และคณะ (1990) ซึ่งตรวจพบการละลายของกระดูกที่คอรากฟันเทียมลึกลงไปจากสันกระดูกประมาณ 1.5 มม. ในปีแรกของการฝังรากฟันเทียม และการพบการละลายของกระดูกเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 0.1 มม.ต่อปี แต่ยังคงใช้งานรากฟันเทียมที่เกิดการละลายของกระดูกได้ดี

## บทที่ 5

### การกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม เมื่อเปรียบเทียบกับฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม

การทำฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในหมู่ผู้ป่วยไร้ฟัน เนื่องจากมีความทนทานและสามารถใช้งานได้ใกล้เคียงกับฟันตามธรรมชาติ อีกทั้งภายหลังจากการปลูกฝังรากฟันเทียมเพื่อรองรับฟันปลอมชนิดนี้พบว่าความล้มเหลวจากการแตกหักของชิ้นส่วนต่างๆ การละลายตัวของกระดูกรอบรากฟันเทียม และการโยกหลุดของรากฟันเทียมเกิดขึ้นน้อยมาก แต่ตามข้อกำหนดเดิมนั้นกำหนดให้ต้องฝังรากฟันเทียมถึง 4-6 ตัวลงในกระดูกขากรรไกรล่าง ต้องใช้เวลาในการผ่าตัดนานและค่าใช้จ่ายในการผ่าตัดสูง แต่จากการศึกษาของ Branemark และคณะ (1999) กล่าวไว้ว่าการกระจายแรงลงรากฟันเทียมไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนรากฟันเทียมที่รองรับฟันปลอม แต่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและตัวหลังสุด แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงในกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อรองรับฟันปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดในผู้ป่วยไร้ฟัน

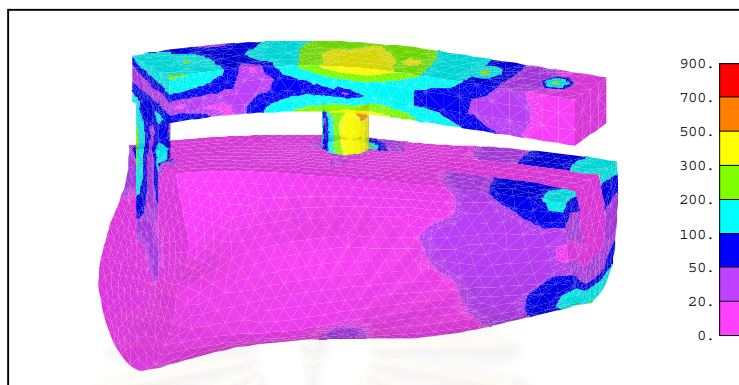
เพื่อเป็นการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการลดจำนวนรากฟันเทียมด้วยวิธีการที่แสดงให้เห็นการทำงานของฟันปลอม ดังนั้นจึงต้องจำลองระบบการทำงานของฟันปลอมไฮบริดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมบนกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการทำงานกับฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีการวางตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหน้าสุดและตัวหลังสุดอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน และกำหนดให้มีแรงบิดเคี้ยวเท่ากันคือ ในกรณีที่ 1 มีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N และในกรณีที่ 2 มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1 การกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

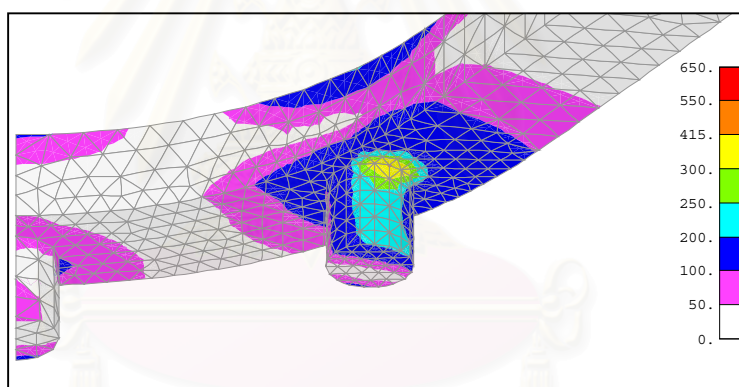
5.1.1 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 1 ของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

เมื่อมีมีแรงบดเคี้ยวกระจายทั่วทั้งปาก โดยกำหนดชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

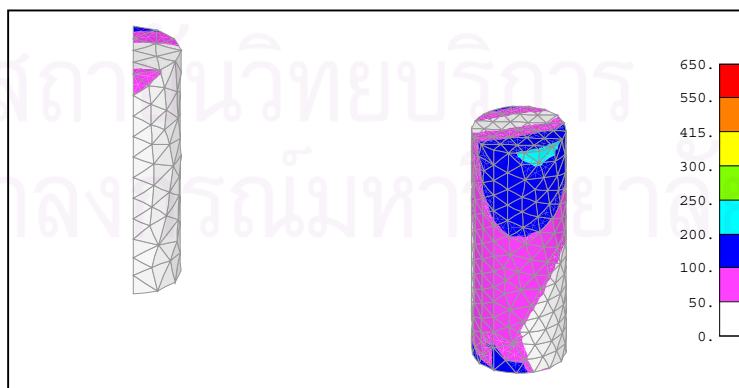


ภาพที่ 5.1 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

5.1.1.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



( ก )



( ข )

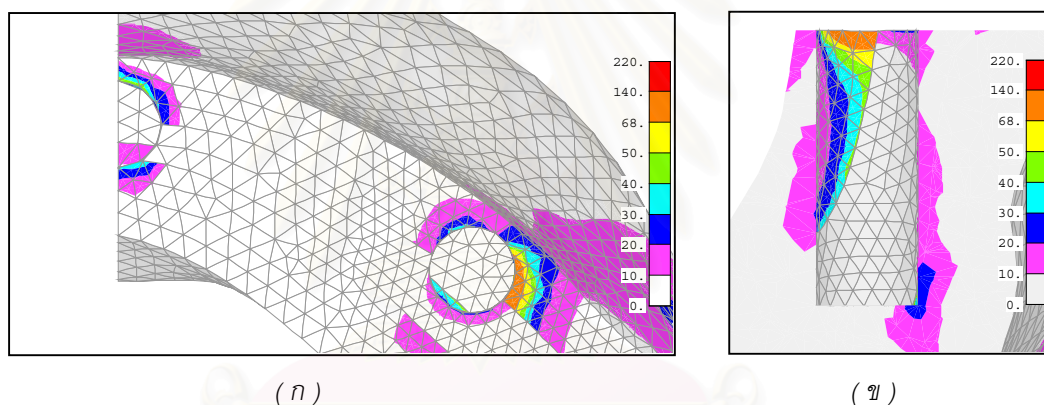
ภาพที่ 5.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบน( ก )โครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม, ( ข ) รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N



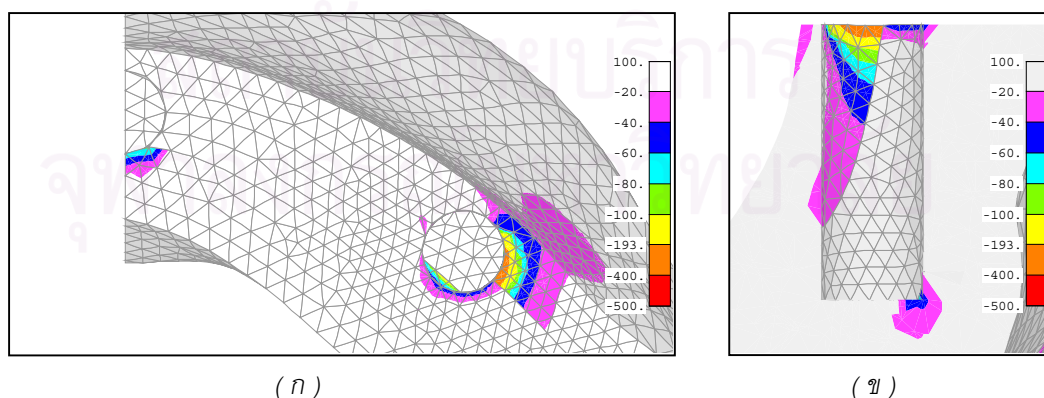
ความเค้นเฉือนที่เกิดบนโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมเมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N นั้นมีการกระจายความเค้นบนโครงสร้างโดยรวมแล้วคล้ายกับในฟันปลอม ไฮบริด 3 รากฟันเทียม โดยการขาดหายไปของรากฟันเทียมตัวที่ 2 ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 และตัวที่ 3 เพิ่มขึ้น แต่จุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงยังคงอยู่ในบริเวณเดิมคือบริเวณคอคหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 432 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททานเนียมอัลลอย

ส่วนค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในบริเวณอื่นของโครงสร้างฟันปลอมยังคงมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททานเนียมอัลลอย

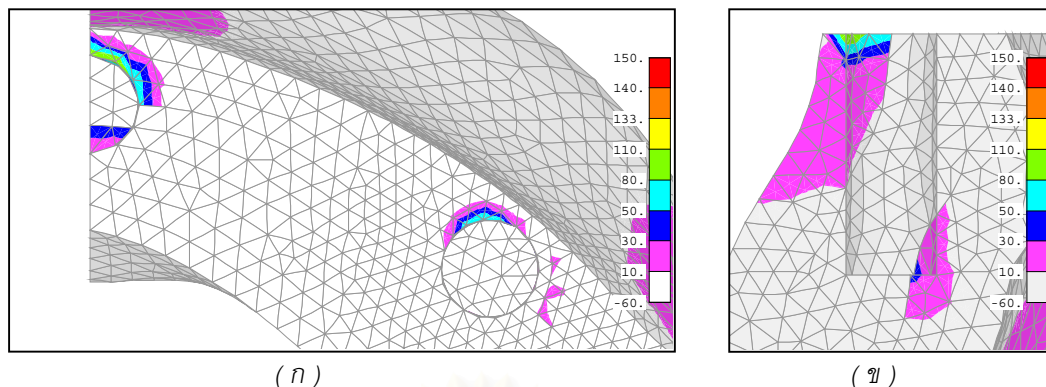
### 5.1.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 5.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 5.4 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1

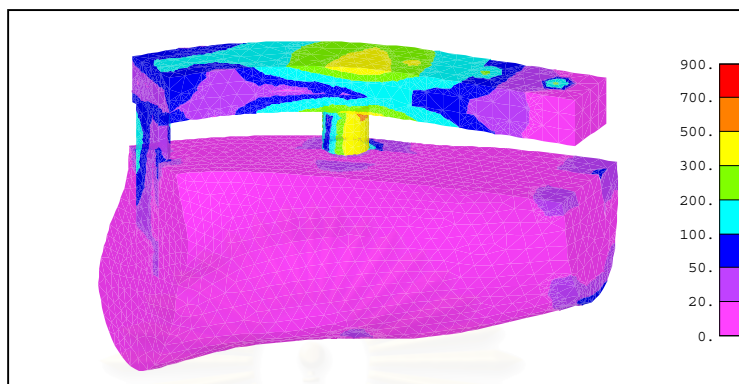


ภาพที่ 5.5 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (*Maximum principal Stress, MPa*) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

ลักษณะการกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมในกรณีที่มีแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N นั้นมีรูปแบบของการกระจายความเค้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวคล้ายกับการกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม โดยค่าความเค้นสูงจะอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมแต่ละตัว และความเค้นจะมีค่าน้อยลงในกระดูกที่อยู่ห่างจากคอรากฟันเทียมทั้งในแนวรัศมีของรากฟันเทียมและในแนวแกนของรากฟันเทียม และจุดที่พบค่าสูงสุดนั้นอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ซึ่งในจุดนี้จะมีค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูก โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมเท่ากับ 144 MPa ความเค้นกดที่มีค่าสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมเท่ากับ -370 MPa

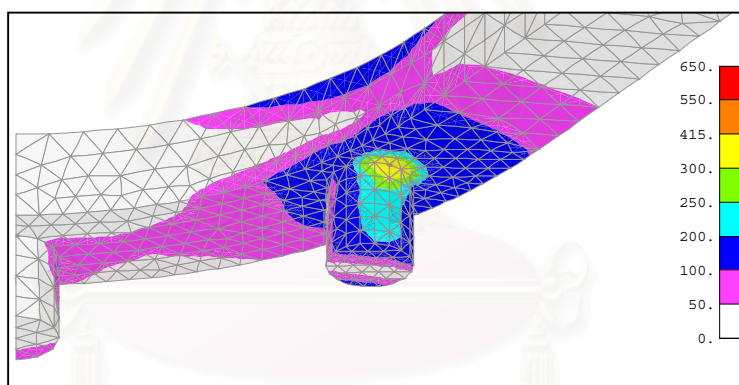
ส่วนค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 3 เท่ากับ 112 MPa ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของกระดูกที่

5.1.2 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 2 ของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม  
เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเฉพาะบริเวณฟันกรามด้านขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

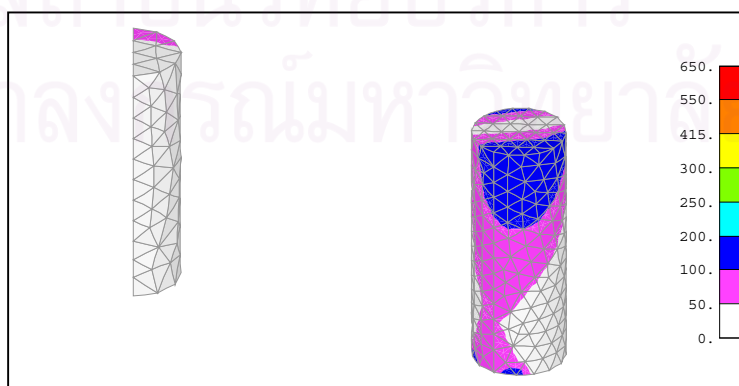


ภาพที่ 5.6 การกระจายความเค้น Von Mises Stress (MPa) ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

5.1.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



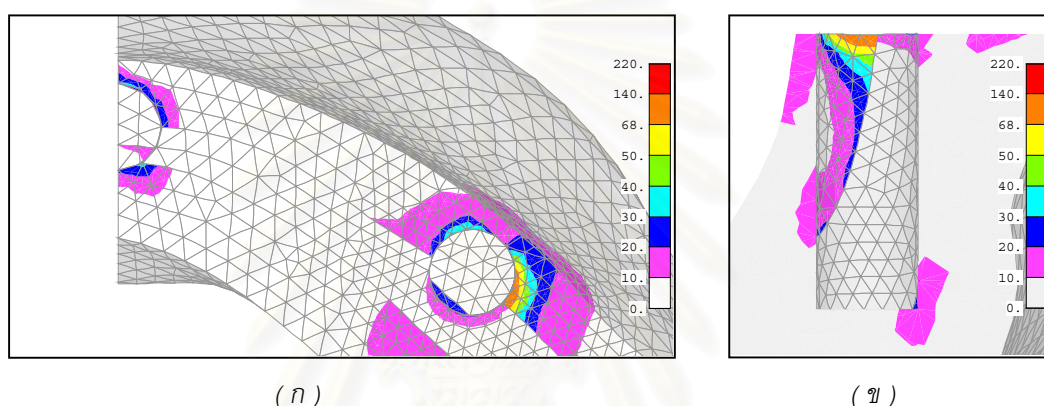
ภาพที่ 5.7(ก) การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



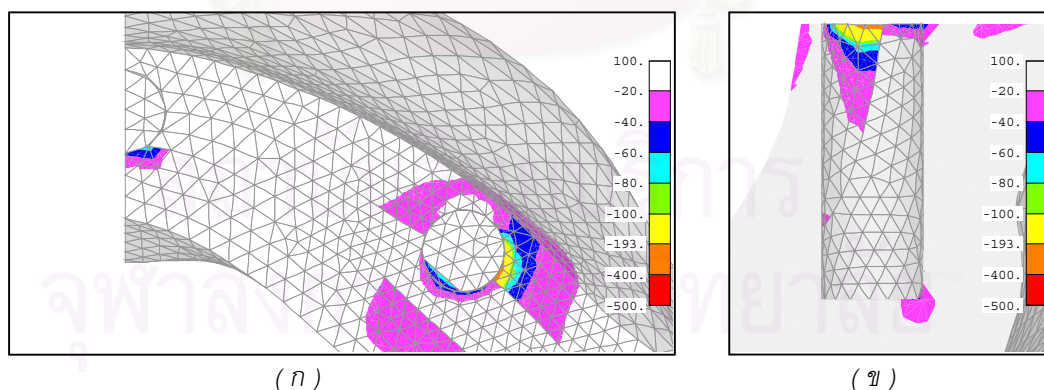
ภาพที่ 5.7(ข) การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) ที่เกิดบนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

ลักษณะการกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริดเมื่อมีชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N นั้นมีลักษณะของการกระจายที่ไม่แตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมเมื่อมีแรงบิดเดี่ยวเท่ากัน โดยที่ค่าความเค้นเฉือนที่มีค่าสูงสุดนั้นยังคงอยู่ที่คอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 436 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของไททานเนียมอัลลอยเพียงเล็กน้อย

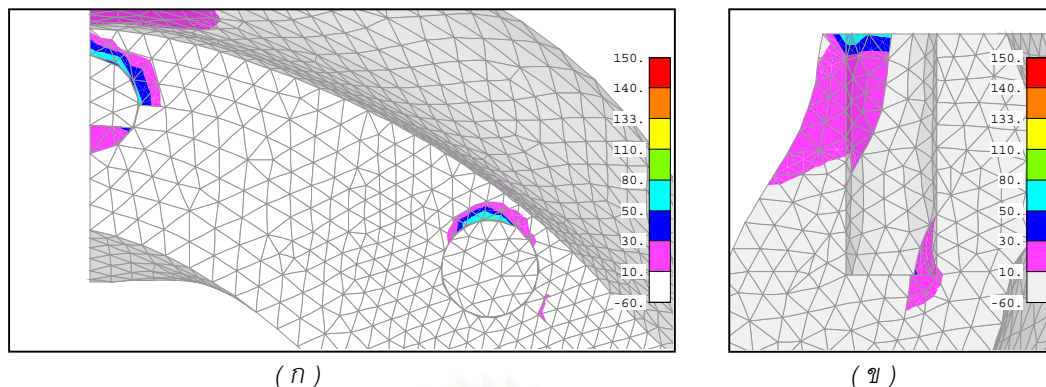
### 5.1.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 5.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบิดเดี่ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 5.9 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบิดเดี่ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 5.10 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีแรงบดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมอง บนของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมเมื่อมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N นั้นมีลักษณะ การกระจายความเค้นบนกระดุกรอบรากฟันเทียมแต่ละตัวเหมือนกับลักษณะการกระจายความ เค้นที่เกิดขึ้นบนกระดุกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมเมื่อมีแรง บดเคี้ยวเท่ากัน โดยความเค้นที่มีค่าสูงจะอยู่ในกระดุกประชิดผิวรากฟันเทียมบริเวณคอรากฟัน เทียมและความเค้นจะมีค่าลดลงอยู่ห่างจากจุดดังกล่าว

ค่าความเค้นเฉือนและค่าความเค้นกดสูงสุดในกระดุกรอบรากฟันเทียมนั้นอยู่ที่บริเวณคอ รากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 102 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งแรงของกระดุก ส่วนค่าความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณ เดียวกันนี้มีค่าเท่ากับ -247 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งแรงของกระดุก

ส่วนค่าความเค้นดึงบนกระดุกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัว ที่ 3 ด้านหน้าของรากฟันเทียม ค่าความเค้นดึงสูงสุดนี้มีค่าเท่ากับ 71 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า ความแข็งแรงของกระดุกที่บ

## 5.2 สรุปการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมบนขากรรไกรล่าง เมื่อมีแรงบดเคี้ยว กระจายทั่วปากและเมื่อมีแรงบดเคี้ยวบนกรามด้านขวาเพียงด้านเดียว มีลักษณะการกระจาย ความเค้นโดยทั่วไปคล้ายกับแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม คือ ความเค้นที่มีค่าสูง จะอยู่ที่ตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุดในแบบจำลอง โดยที่บนโครงสร้างฟันปลอม (โครง โลหะ หลักยึด และรากฟันเทียม) จะพบความเค้นสูงในลักษณะของความเค้นขุมขุม (Stress Concentration) ที่คอหลักยึดซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหลักยึดกับโครงโลหะ ส่วนบนกระดุกรอบราก

พื้นที่เย็บแต่ละตัวนั้นจะพบความเค้นสูงที่บริเวณคอรากพื้นที่เย็บ โดยที่ความเค้นในกระดุมรอบรากพื้นที่เย็บจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ลึกลงไปจากสันกระดุมและเมื่ออยู่ห่างจากคอหลักยึดรากพื้นที่เย็บไปตามทิศทางรัศมีของรากพื้นที่เย็บ

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นที่มีค่าสูงสุดในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บกับแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 5 รากพื้นที่เย็บเมื่อมีแรงบิดเคี้ยวเท่ากันพบว่า ในโครงสร้างพื้นที่เย็บซึ่งเป็นโลหะ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่อยู่ที่ยึดคอหลักยึดรากพื้นที่เย็บตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายพื้นที่เย็บนั้นในแบบจำลองไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บมีค่ามากกว่าในแบบจำลอง 5 รากพื้นที่เย็บ ( $\approx 5.4\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 6.1\%$  ในกรณีที่ 2)

ในกระดุมรอบรากพื้นที่เย็บนั้นค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดที่มีค่าสูงสุดซึ่งอยู่บริเวณคอรากพื้นที่เย็บตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายพื้นที่เย็บ โดยที่ความเค้นเฉือนสูงสุดในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บมีค่าสูงกว่าในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 5 รากพื้นที่เย็บ ( $\approx 16.1\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 14.6\%$  ในกรณีที่ 2) ความเค้นกดสูงสุดในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บก็มีค่าสูงกว่าในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 5 รากพื้นที่เย็บ ( $\approx 14.9\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 12.8\%$  ในกรณีที่ 2)

ส่วนความเค้นดึงสูงสุดบนกระดุมรอบรากพื้นที่เย็บในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บซึ่งอยู่ที่คอรากพื้นที่เย็บตัวที่ 3 นั้นเมื่อเทียบกับความเค้นดึงสูงสุดในกระดุมรอบรากพื้นที่เย็บในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 5 รากพื้นที่เย็บซึ่งอยู่ที่คอรากพื้นที่เย็บตัวที่ 2 พบว่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดุมรอบรากพื้นที่เย็บในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บจะมีค่าสูงกว่าสำหรับในกรณีที่ 1 ( $\approx 34.9\%$ ) แต่ค่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดุมรอบรากพื้นที่เย็บในแบบจำลองพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บมีค่าเท่ากันสำหรับในกรณีที่ 2

จากการศึกษาการกระจายความเค้นบนพื้นที่เย็บไฮบริด 3 รากพื้นที่เย็บ และ 5 รากพื้นที่เย็บแสดงให้เห็นว่าการลดจำนวนรากพื้นที่เย็บลงให้เหลือเพียงแค่ 3 ตัวนั้นทำให้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่งของรากพื้นที่เย็บตัวหลังสุด ซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้ขัดแย้งกับการศึกษาของ Branemark และคณะ (1999)

### 5.3 การกระจายแรงและโมเมนต์ในหลักยึดและรากฟันเทียม

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นอกจากสามารถคำนวณการขจัด (Displacement) ของจุดต่อ (Node) ในแบบจำลอง ความเครียดและความเค้นภายในแบบจำลองแล้วยังสามารถคำนวณแรงปฏิกิริยาภายในของจุดต่อได้อีกด้วย ซึ่งเมื่อทราบค่าแรงปฏิกิริยาภายในจุดต่อทุกจุดต่อบนหน้าตัดใด ๆ ก็สามารถที่จะคำนวณแรงและโมเมนต์ภายในของหน้าตัดนั้นๆ ได้ จากหลักการนี้เราสามารถนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายทอดแรงและโมเมนต์ลงสู่หลักยึดหรือรากฟันเทียมแต่ละตัวเพื่อใช้ในการอธิบายถึงการกระจายความเค้นบนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด

#### 5.3.1 แรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึด

แรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่หลักยึดรากฟันเทียมสามารถคำนวณได้จากการค่าแรงปฏิกิริยาภายในของจุดต่อทุกจุดต่อบนหน้าตัดที่คอคหลักยึดรากฟันเทียม เมื่อทำการรวมค่าแรงปฏิกิริยาภายในที่มีทิศทางเดียวกันของจุดต่อทั้งหมดบนหน้าตัดจะได้ออกมาเป็นค่าแรงภายในบนหน้าตัดที่คอคหลักยึดรากฟันเทียมในทิศทางนั้นๆ ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) และค่าโมเมนต์ภายในก็เกิดจากการรวมโมเมนต์ในทิศทางเดียวกันซึ่งเกิดจากแรงปฏิกิริยาภายในแต่ละทิศทางคูณด้วยระยะทางตั้งฉากของแรงภายในกับจุด Centroid ของหน้าตัดนั้นได้ออกมาเป็นค่าโมเมนต์ภายในบนหน้าตัดที่คอคหลักยึดรากฟันเทียมในทิศทางต่างๆ ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) ดังที่แสดงไว้ในแต่ตารางที่ 2ก ในภาคผนวก ก

ค่าแรงและโมเมนต์ภายในบนหน้าตัดที่คอคหลักยึดรากฟันเทียมซึ่งแสดงให้เห็นการกระจายค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่หลักยึดแต่ละตัว สามารถใช้ในการอธิบายถึงความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงและโมเมนต์ในทิศทางต่างๆ ที่ระยะคอคหลักยึดได้โดยอาศัยทฤษฎีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนคานและเพลลา เนื่องจากค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดจากแรง  $F_x$ ,  $F_y$  ซึ่งเป็นแรงเฉือนและโมเมนต์  $M_z$  ซึ่งเป็นแรงบิด มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากค่าแรงตั้งฉาก  $F_z$  และค่าโมเมนต์ดัด  $M_x$ ,  $M_y$  ดังนั้นการพิจารณาค่าแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับหลักยึดจึงใช้เฉพาะค่า  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  ที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 เท่านั้น

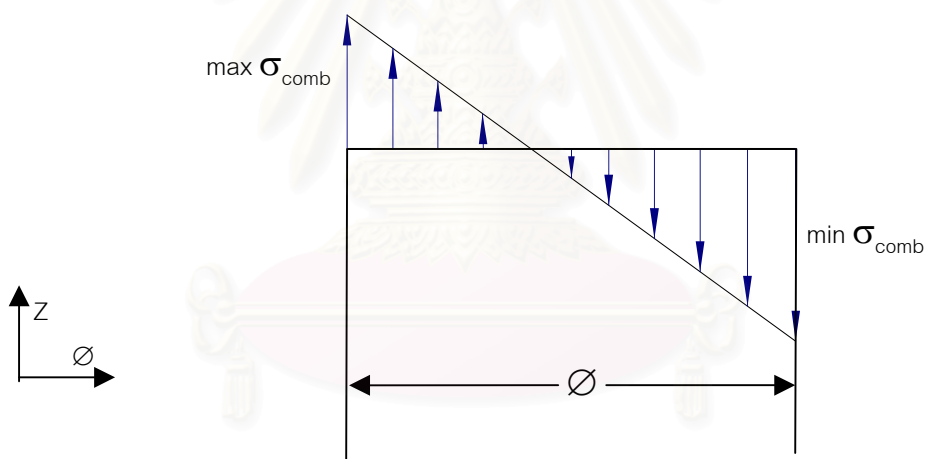
ตารางที่ 5.1 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด ในกรณีนี้ 1 เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	
$F_z$	-1426	224	266	$F_z$	-1359	577
$M_x$	1576	442	451	$M_x$	1839	574
$M_y$	627	-780	0	$M_y$	384	0

ตารางที่ 5.2 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากพื้นเทียมแต่ละตัวในระบบจำลองฟันปลอมไฮบริด ในกรณีนี้ที่ 2 เมื่อมีชุดแรงบิดเดียว 190 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากพื้นเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$	-1085	382	203	$F_z$	-926	450
$M_x$	1682	408	223	$M_x$	1971	270
$M_y$	911	-494	-256	$M_y$	896	-645

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 นี้สามารถคำนวณค่าความเค้นรวม (Combined Stress) ตามทฤษฎีบนหน้าตัดที่คอหลักยึดซึ่งเกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัด โดยความเค้นรวมนี้เป็นความเค้นตั้งฉากกับหน้าตัดของหลักยึด (Z Normal Stress) กระจายอยู่บนหน้าตัดของหลักยึดโดยมีค่าความเค้นรวมสูงสุดที่ขอบด้านหนึ่งและมีขนาดลดลงไปตามเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นจนกระทั่งมีค่าที่ต่ำสุดที่ขอบอีกด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกันดังภาพที่ 5.11



ภาพที่ 5.11 ลักษณะการกระจายความเค้นรวม (Combined Stress,  $\sigma_{comb}$ ) ที่เกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดตามทฤษฎี บนหน้าตัดหลักยึดรากพื้นเทียม

โดยค่าความเค้นรวมสูงสุด (Maximum Combined Stress,  $\max \sigma_{comb}$ ) และค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress,  $\min \sigma_{comb}$ ) บนหลักยึดรากพื้นเทียมที่คำนวณได้จากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดตามทฤษฎีนั้นแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และ 5.4



ตารางที่ 5.3 ค่าความเค้นรวมสูงสุด (Maximum Combined Stress,  $\max \sigma_{comb}$  [MPa]) และค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress,  $\min \sigma_{comb}$  [MPa]) บนหน้าตัดที่คอหลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัว ในกรณีที่ 1 เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวชุด 155-175-195 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$\max \sigma_{comb}$	199	194	111	$\max \sigma_{comb}$	240	163
$\min \sigma_{comb}$	-457	-153	-63	$\min \sigma_{comb}$	-486	-59

ตารางที่ 5.4 ค่าความเค้นรวมสูงสุด (Maximum Combined Stress,  $\max \sigma_{comb}$  [MPa]) และค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress,  $\min \sigma_{comb}$  [MPa]) บนหน้าตัดที่คอหลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัว ในกรณีที่ 2 เมื่อมีแรงบิดเคี้ยวชุด 190 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$\max \sigma_{comb}$	271	158	84	$\max \sigma_{comb}$	335	176
$\min \sigma_{comb}$	-468	-89	-47	$\min \sigma_{comb}$	-502	-94

ค่าความเค้นรวมที่เป็นลบก็คือค่าความเค้นกด ดังนั้นค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress) ก็คือค่าความเค้นกดรวมสูงสุด (Maximum Compressive Combined Stress) ส่วนค่าความเค้นรวมสูงสุด (Maximum Combined Stress) ก็คือค่าความเค้นดึงรวมสูงสุด (Maximum Tensile Combined Stress) นั่นเอง

จากการคำนวณค่าความเค้นรวม (Combined Stress) ที่เกิดจากแรงในแนวแกนหลักยึดรากฟันเทียมและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดที่คอหลักยึดรากฟันเทียมตามทฤษฎีนั้นพบว่า จุดที่มีค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress) ในหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 อยู่บริเวณเดียวกับจุดที่เกิดค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมไฮบริดซึ่งก็คือบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม

จากตารางที่ 5.1-5.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแรงบิดเคี้ยวทั้งสองกรณี แม้ว่าแรงกดตามแนวแกนในหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 จะมีค่าลดลงเมื่อลดรากฟันเทียมจาก 5 ตัวเหลือ 3 ตัว ซึ่งตรงกับข้อสรุปที่ได้จากการคำนวณขั้นพื้นฐาน แต่ค่าโมเมนต์ดัดบนคอหลักยึดรากฟันเทียมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจนทำให้ค่าความเค้นกดรวมสูงสุด (Maximum Compressive Combined Stress) ที่ได้จากแรงกดและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดที่คอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ของแบบจำลอง 3 รากฟัน

เทียมมีค่ามากกว่าในแบบจำลอง 5 รากฟันเทียม โดยมีเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของความเค้นกดรวมสูงสุดใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดในโครงสร้างฟันปลอมเมื่อลดจำนวนรากฟันเทียมให้เหลือเพียงแค่ 3 ตัว ทำให้สามารถสรุปได้ว่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเค้นกดรวมสูงสุดบนหน้าตัดที่คอหลักยึดรากฟันเทียม

จากการที่ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมในแบบจำลอง 3 รากฟันเทียมมีค่ามากกว่าในแบบจำลอง 5 รากฟันเทียม มีสาเหตุมากจากการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดัดบนหลักยึดรากฟันเทียมตัวสุดท้าย ซึ่งเกิดจากการที่มีรากฟันเทียมลดลง โดยที่การเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดัดนี้มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นกดรวมสูงสุดบนหน้าตัดมากกว่าการลดลงของแรงในแนวแกน ทำให้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมมีค่าสูงกว่าในแบบจำลอง 5 รากฟันเทียม

### 5.3.2 แรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดรากฟันเทียมลงสู่รากฟันเทียม

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมนั้นก็คือแรงและโมเมนต์ภายใน บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียม โดยแรงที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมนั้นก็คือค่าแรงที่ถ่ายทอดลงสู่หลักยึดรากฟันเทียม แต่เนื่องจากมีแรงเฉือน ( $F_x$  ,  $F_y$ ) เกิดขึ้นบนหน้าตัดหลักยึดรากฟันเทียมทำให้โมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าโมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดลงสู่หลักยึด ซึ่งสามารถคำนวณค่าแรงและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนรากฟันเทียมได้จากแรงและโมเมนต์ภายในบนหน้าตัดที่คอหลักยึดดังนี้

ตารางที่ 5.5 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดรากฟันเทียมลงบนรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด ในกรณีนี้ที่ 1 เมื่อมีชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$	-1426	224	266	$F_z$	-1359	577
$M_x$	1184	771	581	$M_x$	1632	996
$M_y$	699	-85	0	$M_y$	739	0

ตารางที่ 5.6 ค่าแรง(N)และโมเมนต์(N-mm)ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดรากฟันเทียมลงบนรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด ในกรณีนี้ที่ 2 เมื่อมีชุดแรงบิดเดียว 190 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$	-1085	382	203	$F_z$	-926	450
$M_x$	1215	716	353	$M_x$	1654	579
$M_y$	467	-148	-9	$M_y$	546	-122

จากตารางที่ 5.5 และ 5.6 สามารถคำนวณค่าความเค้นรวม (Combined Stress)บนหน้าตัดที่คอหลักยึดซึ่งเกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดได้ดังตารางที่ 5.7 และ 5.8

ตารางที่ 5.7 ค่าความเค้นรวมสูงสุด (Maximum Combined Stress,  $\max \sigma_{comb}$  [MPa]) และค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress,  $\min \sigma_{comb}$  [MPa]) บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมแต่ละตัว ในกรณีนี้ที่ 1 เมื่อมีแรงบิดเดียวชุด 155-175-195 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$\max \sigma_{comb}$	137	170	136	$\max \sigma_{comb}$	223	245
$\min \sigma_{comb}$	-395	-130	-88	$\min \sigma_{comb}$	-469	-140

ตารางที่ 5.8 ค่าความเค้นรวมสูงสุด (Maximum Combined Stress,  $\max \sigma_{comb}$  [MPa]) และค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress,  $\min \sigma_{comb}$  [MPa]) บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมแต่ละตัว ในกรณีนี้ที่ 2 เมื่อมีแรงบิดเดียวชุด 190 N

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม			ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม			
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3		หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$\max \sigma_{comb}$	153	176	87	$\max \sigma_{comb}$	253	155
$\min \sigma_{comb}$	-350	-107	-50	$\min \sigma_{comb}$	-421	-74

ค่าความเค้นรวม (Combined Stress) ที่เกิดจากแรงในแนวแกนรากฟันเทียมและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมนั้นมีนัยสำคัญต่อความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในกระดูกครอบรากฟัน

เทียม เนื่องจากจุดที่เกิดความเค้นกดรวมสูงสุด (Maximum Compressive Combined Stress) ซึ่งก็คือค่าความเค้นรวมต่ำสุด (Minimum Combined Stress) บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมนั้นอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดที่เกิดค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (คือบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม) และการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของความเค้นกดรวมสูงสุด (Maximum Compressive Combined Stress) เมื่อมีการลดรากฟันเทียมจาก 5 ตัวเหลือ 3 ตัว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการที่ค่าความเค้นกดสูงสุดซึ่งเกิดที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีผลมาจากการที่ลดรากฟันเทียมลงนั้นทำให้โมเมนต์ดัดในรากฟันเทียมตัวหลังสุดมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ ค่าความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้นในรากฟันเทียมตัวท้ายสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

### 5.3.3 สรุปการกระจายแรงและโมเมนต์ดัด

ลักษณะการถ่ายแรงลงสู่รากฟันเทียมซึ่งมีทั้งแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดนั้นทำให้ในรากฟันเทียมแต่ละตัวมีทั้งแรงดึงและแรงกดในตัวเดียวกันดังภาพที่ 5.11 ซึ่งค่าความเค้นกดและค่าความเค้นดึงสูงสุดจะอยู่ในตำแหน่งผิวนอกของรากฟันเทียมที่อยู่ห่างจาก Neutral Surface ของโมเมนต์แรงดัดรวมในรากฟันเทียม

จะเห็นได้ว่าการที่มีรากฟันเทียมจำนวนมาก แม้ไม่ได้ช่วยลดแรงที่กระจายลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวให้มีค่าลดลง แต่สามารถช่วยลดโมเมนต์ดัดที่กระจายลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวได้ และเหตุปัจจัยสำคัญที่อาจทำให้การฝังรากฟันเทียมจำนวน 3 ตัวเกิดความล้มเหลวนั้นก็คือค่าโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นในรากฟันเทียมตัวหลังสุด มิใช่การเพิ่มขึ้นของแรงกดหรือแรงดึงในรากฟันเทียม ดังนั้นหากเราสามารถลดโมเมนต์ดัดในรากฟันเทียมหลังสุดให้มีค่าลดลงเราก็สามารถลดค่าความเค้นสูงสุดที่จะเกิดขึ้นในโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมได้ ส่งผลให้การฝังรากฟันเทียมเพียงแค่ 3 ตัวเพื่อรองรับฟันปลอมไฮบริดนั้นมีความเป็นไปได้สูงที่จะประสบความสำเร็จในการติดตั้งให้แก่ผู้ป่วยไร้ฟัน โดยที่แนวทางในการลดโมเมนต์ดัดในรากฟันเทียมตัวที่ 1 นั้นมีอยู่สองแนวทางก็คือทำให้รากฟันเทียมตัวหน้ารับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น หรือการลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในรากฟันเทียมทั้งระบบโดยการทำให้รากฟันเทียมทั้งสามตัวนั้นต่อต้านการหมุนของโครงโลหะด้วยแรงตามแนวแกนรากฟันเทียมในลักษณะของคานดีคานงัดแทนค่าโมเมนต์ดัด ซึ่งแนวทางที่สองนั้นมีความปลอดภัยมากกว่าในแนวทางแรก เนื่องจากการเพิ่มโมเมนต์ดัดให้แก่รากฟันเทียมตัวหน้าจะทำให้ค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์ดัดนั้นมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความ

เค้นแรงดึงนั้นมีความเสี่ยงต่อการโยกหลุดของรากฟันเทียมมากกว่าความเค้นกดหากจะเกิดแรงในลักษณะของแรงที่กระทำซ้ำ ดังนั้นในการแก้ไขปัญหาคความเค้นกดที่มีค่าสูงสุดในบริเวณรากฟันเทียมตัวหลังก็ไม่สมควรที่จะให้ค่าความเค้นดึงสูงสุดในรากฟันเทียมตัวหน้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ฝังรากฟันเทียม 5 ตัวมากนัก

#### 5.4 ความเป็นไปได้ในการลดจำนวนรากฟันเทียมเหลือเพียง 3 ตัว

จากผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าการลดจำนวนรากฟันเทียมเพื่อรองรับฟันปลอมไฮบริดจาก 5 ตัวเหลือเพียงแค่ 3 ตัวนั้นทำให้ความเค้นเค้นสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าความเค้นเค้นสูงสุดเพิ่มประมาณ 15-16% ค่าความเค้นกดสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 13-15% ดังนั้นการลดจำนวนรากฟันเทียมที่ต้องฝังลงกระดูกขากรรไกรล่างเพื่อรองรับฟันปลอมไฮบริดนั้นอาจก่อให้เกิดความล้มเหลวเนื่องจากความเค้นที่มีค่าสูงขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอม หรือความเค้นที่สูงขึ้นในกระดูกรอบรากฟันเทียม

การที่ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการหายไปของรากฟันเทียมตัวที่ 2 ทำให้โมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวนั้นมีค่ามากขึ้น แม้ว่าแรงในแนวแกนรากฟันเทียมจะมีค่าลดลง โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดที่ถูกถ่ายทอดจากโครงโลหะนั้นส่งผลต่อค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมมากกว่าแรงกดในแนวแกนรากฟันเทียม

ดังนั้นการที่จะนำฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมไปใช้ในผู้ป่วยไร้ฟันนั้นอาจจะต้องลดความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายในโครงสร้างฟันปลอมได้ด้วยแนวทางดังต่อไปนี้

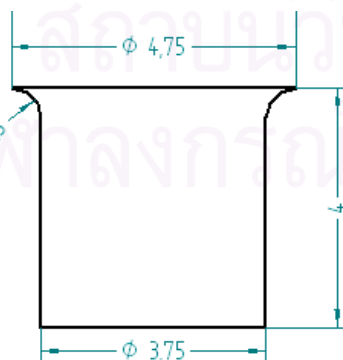
1. การลดโมเมนต์ที่พยายามทำให้เกิดการหมุนของโครงโลหะรอบตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุด ซึ่งเกิดจากแรงบิดเคี้ยวบนฟันปลอมที่กระทำบนส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม เช่น การลดแรงบิดเคี้ยวบนฟันปลอม การลดความยาวของส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม
2. เปลี่ยนรูปร่างของหลักยึดรากฟันเทียม เพื่อช่วยเพื่อลดค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมซึ่งเกิด Stress Concentration โดยการออกแบบให้หลักยึดสามารถรับโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น เช่น การเพิ่มบ่ารองรับ (Chamfer) บริเวณคอรากฟันเทียม หรือการเพิ่มขนาดหลักยึดรากฟันเทียมให้ใหญ่กว่าเดิม ( มีค่า Moment of Inertia เพิ่มขึ้น )
3. เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะให้โครงโลหะมีความแข็งมากขึ้น
4. เปลี่ยนโครงสร้างฟันปลอม ทำให้แรงที่ลงไปในรากฟันเทียมแต่ละตัวเป็นแรงตามแนวแกนหลักเลี่ยงการถ่ายทอดโมเมนต์แรงดัดลงสู่หลักยึดและรากฟันเทียม

## บทที่ 6

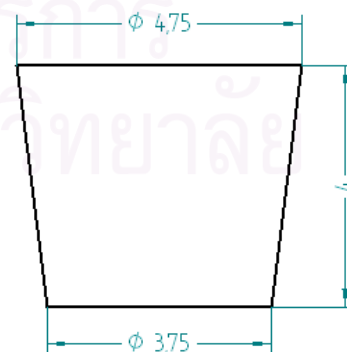
### การปรับปรุงฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมโดยการเปลี่ยนแปลง รูปร่างของหลักยึดรากฟันเทียม

การจากเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างฟันปลอมไฮบริดเมื่อลดรากฟันเทียมให้เหลือเพียง 3 ตัวกับฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมตามข้อกำหนดเดิม พบว่าค่าความเค้นที่มีค่าสูงสุดอยู่บริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นจนทำให้โครงสร้างฟันปลอมเกิดความเสี่ยงต่อการเสียหายในบริเวณดังกล่าวจากความเค้นเฉือนซึ่งสูงเกินจุดครากของไททานเนียมอัลลอยด์ ดังนั้นหากจะมีการนำฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมมาใช้งานจริงจำเป็นต้องแก้ไขลักษณะโครงสร้างในบริเวณดังกล่าวเสียก่อน โดยแนวทางการแก้ไขมีดังนี้

1. การใช้หลักยึดรูปทรง ก จากลักษณะการกระจายความเค้นที่มีค่าสูงสุดจนทำให้วัสดุมีความเค้นเกินจุดครากนั้นอยู่ในลักษณะของ Stress Concentration บริเวณมุมรอยต่อระหว่างโครงโลหะและหลักยึด ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดในบริเวณดังกล่าวด้วยการเสริมบ่ารองรับ (Chamfer) ให้แก่หลักยึด โดยมีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 6.1(ก)
2. การใช้หลักยึดรูปทรง ข จากภาพที่แสดงการกระจายความเค้นเฉือนสูงสุดบนหลักยึดตัวที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นจะมีค่าสูงบริเวณคอของหลักยึดแล้วค่อยๆลดลงจนถึงบริเวณคอรากฟันเทียม และความเค้นที่เกิดในหลักยึดโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากความเค้นในแนวแกนรากฟันเทียม ดังนั้นเราสามารถลดค่าความเค้นที่มีค่าสูงบริเวณคอรากฟันเทียมได้ด้วยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของหลักยึดรากฟันเทียมเฉพาะบริเวณคอของหลักยึด และเพื่อไม่ให้เกิดมุมไตบนหลักยึดอันจะทำให้เกิด Stress Concentration ดังนั้นจึงให้หน้าตัดของหลักยึดค่อยลดขนาดลงมาจนเท่ากับหน้าตัดของรากฟันเทียมที่คอรากฟันเทียม โดยมีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 6.1(ข)



(ก) หลกยัดรูปทรง ก



(ข) หลกยัดรูปทรง ข

ภาพที่ 6.1 (ก) ลักษณะและขนาดของหลักยึดรูปทรง ก

(ข) ลักษณะและขนาดของหลักยึดรูปทรง ข

เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของฟลักโคมไฮบริด 3 รากฟันทึยมซึ่งใช้หลักยึดราก ฟันทึยมรูปทรง ก และรูปทรง ข ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟลักโคมดังกล่าว ขึ้น โดยใช้ข้อกำหนดต่างๆ ของแบบจำลองเหมือนกับแบบจำลองฟลักโคมไฮบริด 3 รากฟันทึยม รูปแบบปกติทุกอย่าง ยกเว้นที่หลักยึดรากฟันทึยมตัวหลังสุด ซึ่งเปลี่ยนมาใช้หลักยึดรูปทรง ก และรูปทรง ข โดยนำผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับแบบจำลองฟลักโคม ไฮบริดรูปแบบปกติ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



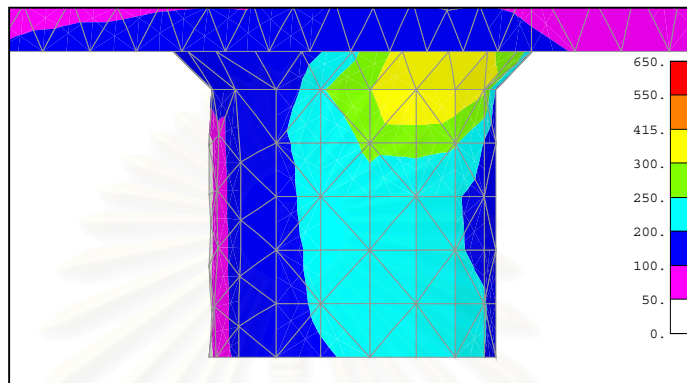
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.1 แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมเมื่อใช้หลักยึดรูปทรง ก

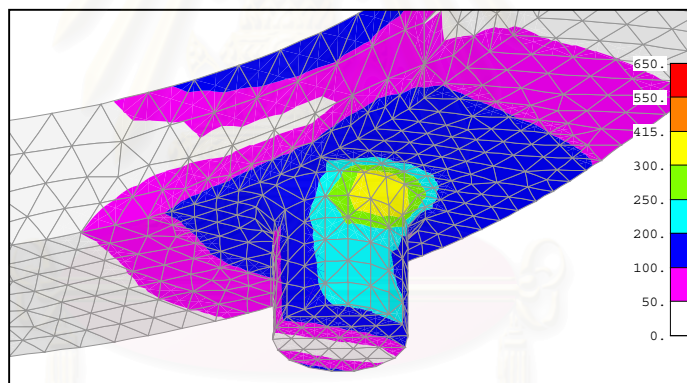
### 6.1.1 การกระจายความเค้นกรณีที่ 1

เมื่อมีแรงกดเคี้ยวกระจายทั่วปาก โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

#### 6.1.1.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



ภาพที่ 6.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

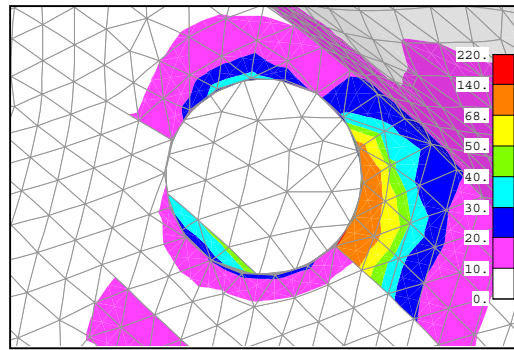


ภาพที่ 6.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

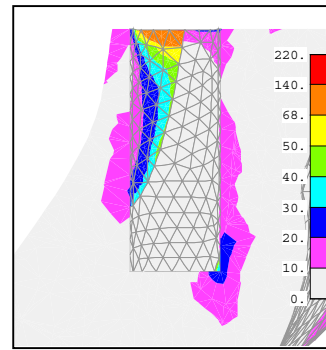
ลักษณะการกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอมนี้มีลักษณะคล้ายกับการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมในรูปแบบปกติ โดยที่ค่าความเค้นเฉือนที่มีค่าสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมนั้นอยู่บริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมบนส่วนที่เป็น Chamfer โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 382 MPa

#### 6.1.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



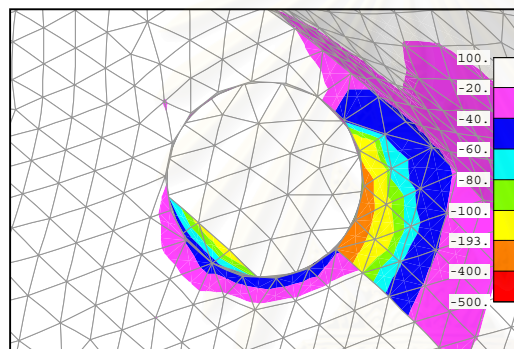


(ก)

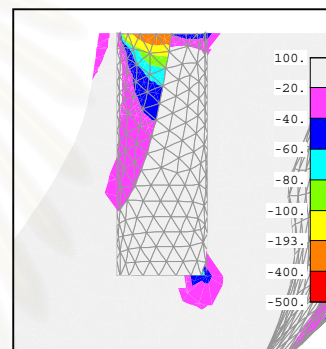


(ข)

ภาพที่ 6.4 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบรอก รากพื้นเทียมในแบบจำลองพินปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากพื้นเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบ รากพื้นเทียมตัวที่ 1

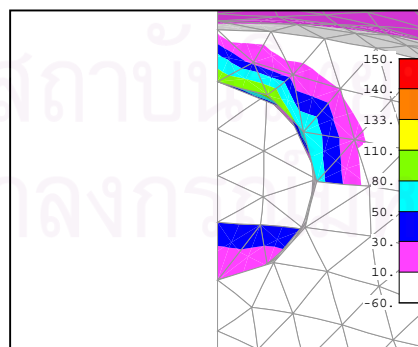


(ก)

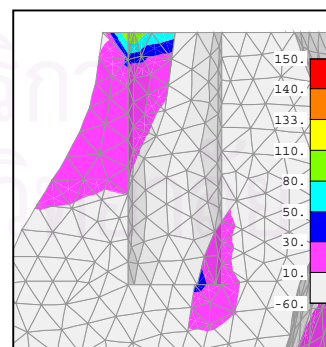


(ข)

ภาพที่ 6.5 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากพื้นเทียมในแบบจำลองพินปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากพื้นเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบ รากพื้นเทียมตัวที่ 1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6.6 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากพื้นเทียมในแบบจำลองพินปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากพื้นเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบ รากพื้นเทียมตัวที่ 3

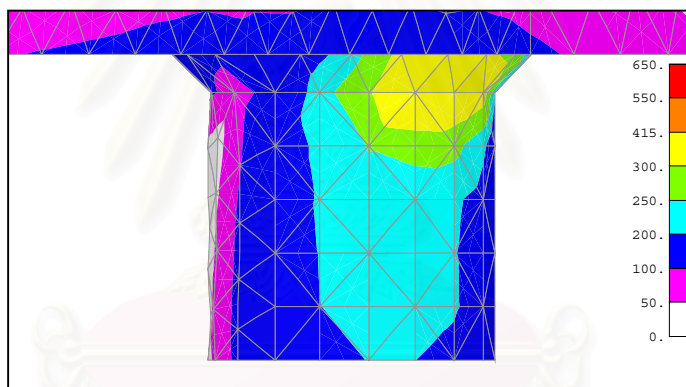
ลักษณะการกระจายความเค้นเหมือนกับการกระจายความเค้นที่เกิดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมในรูปแบบปกติ และมีค่าความเค้นสูงสุดไม่แตกต่างกัน คือ

- ค่าความเค้นเฉือนในบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าสูงที่สุดในกระดูกออบรากฟันเทียม โดยมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 144 MPa
- ค่าความเค้นกดในบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าสูงที่สุดในกระดูกออบรากฟันเทียม โดยมีค่าความเค้นกดสูงสุดเท่ากับ -371 MPa
- ค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 3 โดยมีค่าความเค้นดึงสูงสุดเท่ากับ 110 MPa

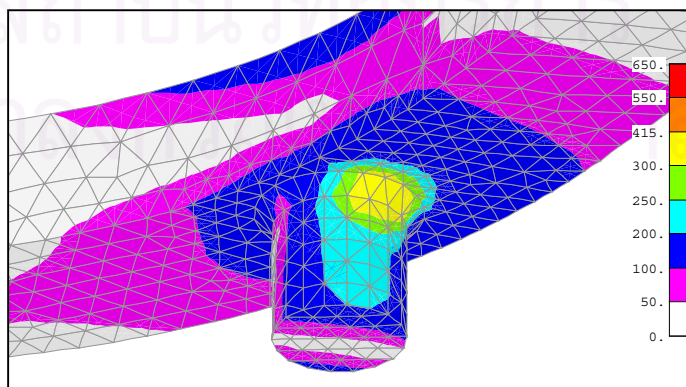
### 6.1.2 การกระจายความเค้นกรณีที่ 2

เมื่อมีแรงกดเคี้ยววดเคี้ยวบริเวณฟันกรามด้านขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

#### 6.1.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



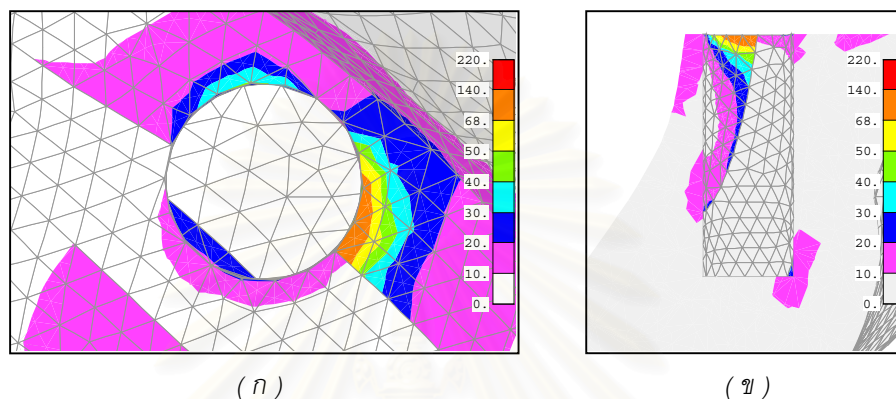
ภาพที่ 6.7 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



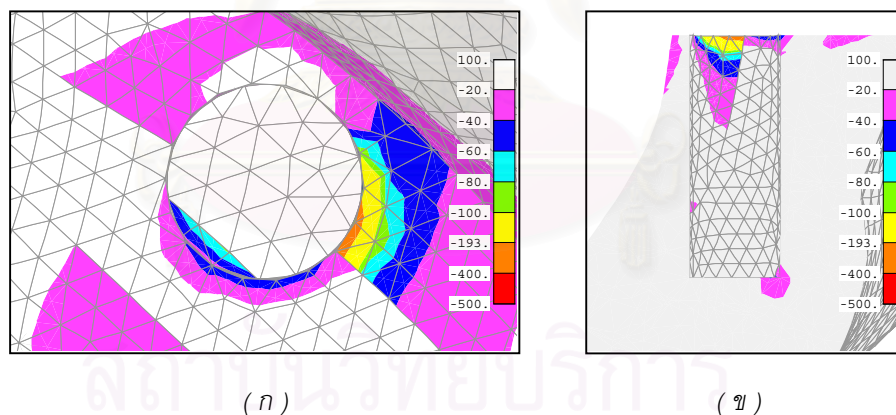
ภาพที่ 6.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอมโดยทั่วไปไม่แตกต่างจากแบบจำลองไฮบริด 3 รากฟันเทียมในแบบปกติ โดยที่จุดที่มีความเค้นสูงสุดอยู่บริเวณ Chamfer บริเวณคอหลักยึด รากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมมีค่าเท่ากับ 389 MPa

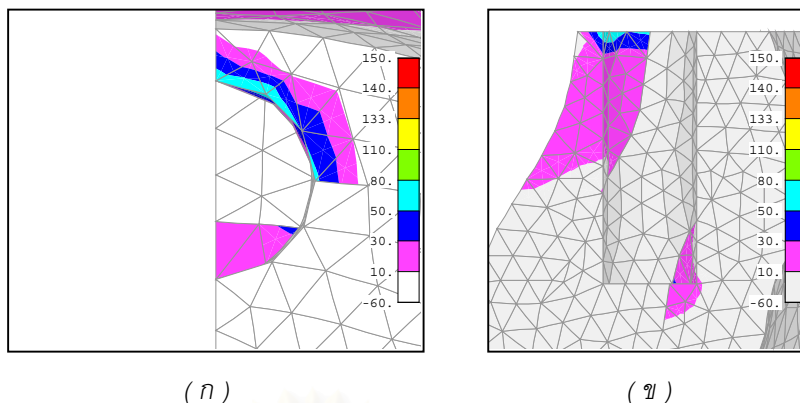
### 6.1.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 6.9 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 6.10 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 6.11 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก เมื่อมีชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

ลักษณะการกระจายความเค้นและค่าความเค้นต่างๆที่เกิดบนกระดุกรอบรากฟันเทียมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับที่เกิดในแบบจำลอง 3 รากฟันเทียมในแบบปกติ โดยที่

- ค่าความเค้นเฉือนในกระดุกรอบรากฟันเทียมบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 104 MPa
- ค่าความเค้นกดในกระดุกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ -251 MPa
- ค่าความเค้นดึงในกระดุกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 70 MPa

### 6.1.3 สรุปการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก

ในโครงสร้างฟันปลอมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่อยู่บริเวณคอหลักยึดตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมต่ำกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 11.6\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 10.8\%$  ในกรณีที่ 2) และมีค่าต่ำกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 6.8\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 5.4\%$  ในกรณีที่ 2) ด้วย

ในกระดุกรอบรากฟันเทียมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก ซึ่งมีค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม และมีค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอด้านหน้าของรากฟัน

เทียมตัวที่ 3 โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในกรณีนี้ 1 มีค่าเท่ากับกับในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ แต่มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดสูงกว่าในรูปแบบปกติเพียงเล็กน้อยในกรณีนี้ 2 ( $\approx 2.0\%$ ) ส่วนค่าความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงกว่าในรูปแบบปกติเพียงเล็กน้อย ( $\approx 0.3\%$  ในกรณีนี้ 1 และ  $\approx 1.6\%$  ในกรณีนี้ 2) และค่าความเค้นดึงสูงสุดนั้นมีค่าต่ำกว่าในรูปแบบปกติเพียงเล็กน้อย ( $\approx 1.8\%$  ในกรณีนี้ 1 และ  $\approx 1.4\%$  ในกรณีนี้ 2)

#### 6.1.4 การกระจายแรงลงบนรากฟันเทียม

ตารางที่ 6.1 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก				
	ชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N	
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$ (N)	-1354	569	-919	441
$M_x$ (N-mm)	1902	522	2055	242
$M_y$ (N-mm)	412	0	963	-644

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังโดยการเสริมส่วนที่เป็น Chamfer ในบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมนั้นไม่ทำให้การกระจายแรงและโมเมนต์ลดลงสู่หลักยึดรากฟันเทียมแตกต่างไปจากเดิมทั้งในกรณีนี้ 1 และกรณีนี้ 2

#### 6.1.5 อภิปรายผลการใช้หลักยึดรูปทรง ก ในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

การเปลี่ยนรูปทรงของหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังสุดโดยการเพิ่มปารองรับ (Chamfer) ให้แก่คอหลักยึดรากฟันเทียมในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมนั้นเป็นการลดค่าความเค้นเฉพาะจุดโดยไม่ทำให้ลักษณะการกระจายความเค้นทั้งในโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมเปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบปกติ แต่ช่วยลดความเค้นที่มีค่าสูงในโครงสร้างฟันปลอมในบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมซึ่งเป็นบริเวณที่เกิด Stress Concentration โดยสามารถลดความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมได้ประมาณ 12% จนกระทั่งค่าความเค้นเฉือนสูงสุดนั้นมีค่าน้อยกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติด้วย และเนื่องจากการการเพิ่มปารองรับนั้นไม่ได้เพิ่ม Rigidity ให้แก่หลักยึดรากฟัน

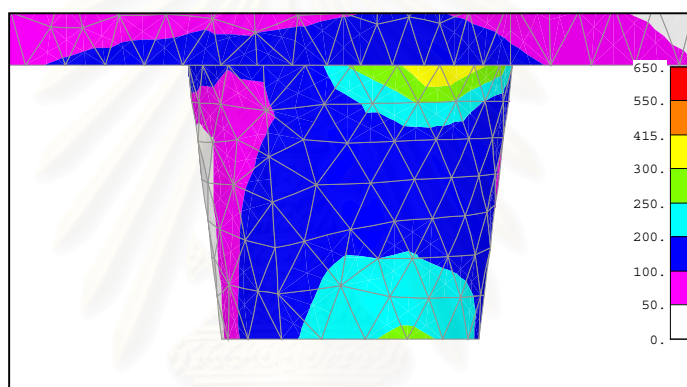
เทียมโดยรวม ดังนั้นพฤติกรรมกรรับแรงและโมเมนต์ตัดจากโครงโลหะของหลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวจึงไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากการใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปแบบปกติเลย ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นรอบรากฟันเทียมนั้นไม่แตกต่างจากการใช้หลักยึดรูปแบบปกติ

## 6.2 แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข

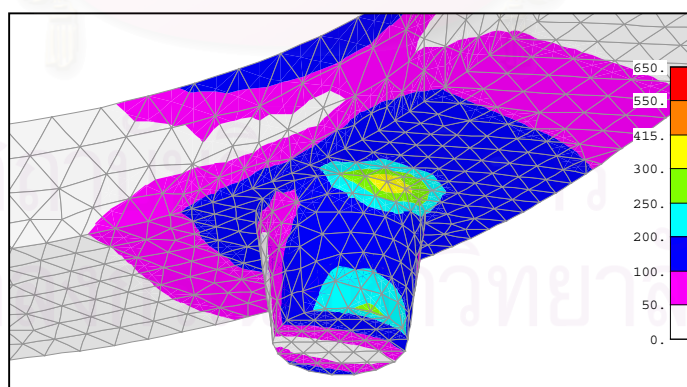
### 6.2.1 การกระจายความเค้นกรณีที่ 1

เมื่อมีแรงบดเคี้ยวกระจายทั้งปาก โดยกำหนดชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

#### 6.2.1.1 การกระจายความเค้นบน โครงสร้างฟันปลอม



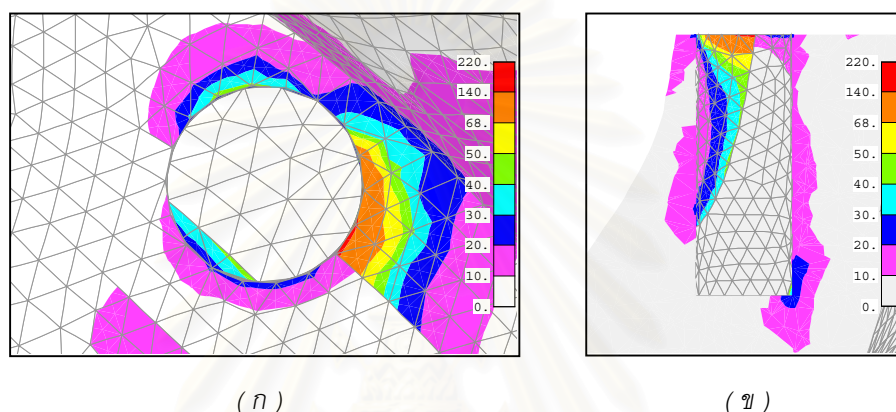
ภาพที่ 6.12 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N



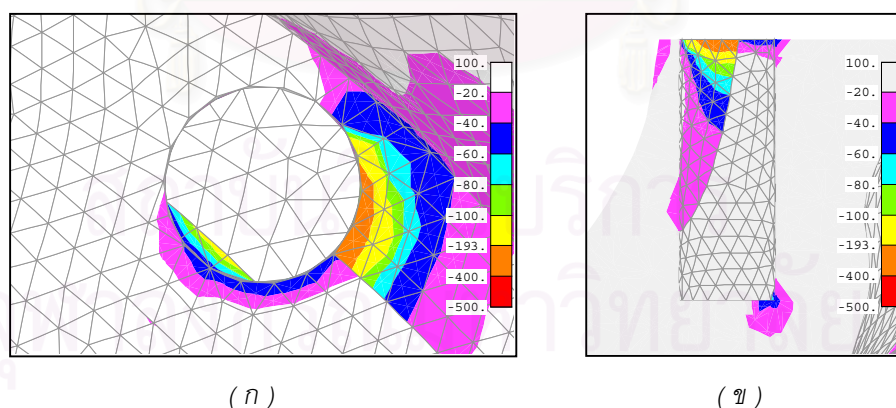
ภาพที่ 6.13 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

ลักษณะการกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอมโดยทั่วไปนั้นเหมือนกับการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ยกเว้นในหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังสุดที่มีรูปทรง ข ซึ่งมีความเค้นลดลง โดยที่ความเค้นเฉือนสูงสุดยังคงอยู่ที่คอหลักยึดตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงโลหะกับหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังสุด โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 369 MPa

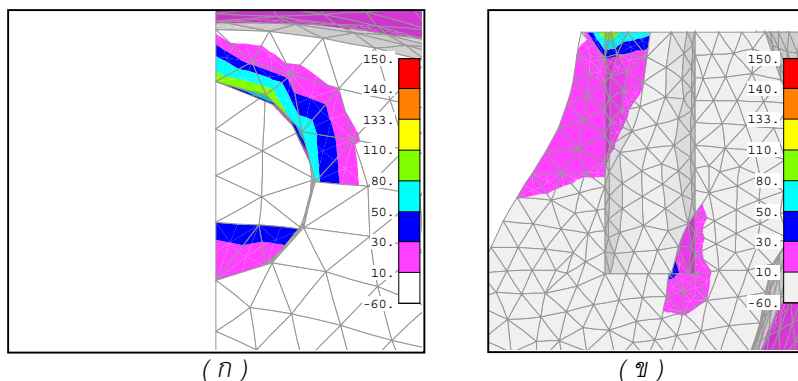
### 6.2.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 6.14 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 6.15 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 6.16 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบ รากฟันเทียมตัวที่ 3

ลักษณะการกระจายความเค้นโดยรวมไม่แตกต่างจากรูปแบบปกติ แต่ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดสูงสุดที่เกิดในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นมีค่าสูงขึ้น ดังนี้

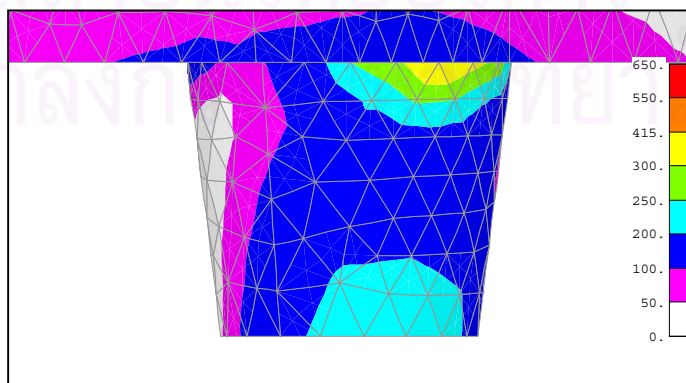
- ความเค้นเฉือนซึ่งมีค่าสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้าน ทำยมีค่าเท่ากับ 151 MPa
- ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านทำยฟันปลอมมีค่าเท่ากับ -388 MPa

ส่วนค่าความเค้นดึงสูงสุดซึ่งอยู่ในกระดูกรอบรากฟันเทียมบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 3 นั้นมีค่าลดลงจากรูปแบบปกติเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 102 MPa

## 6.2.2 การกระจายความเค้นกรณีที่ 2

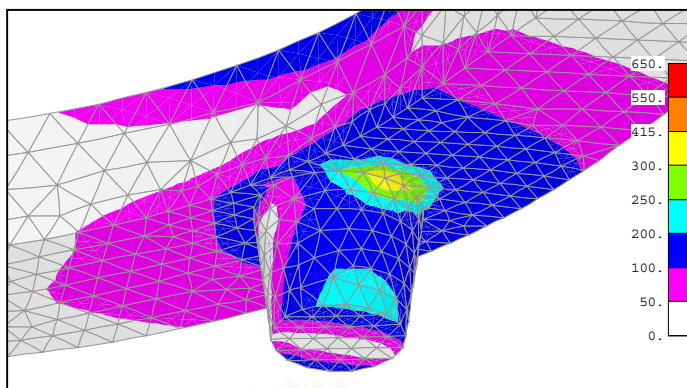
เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเฉพาะบริเวณพื้นกรามด้านขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

### 6.2.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



ภาพที่ 6.17 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

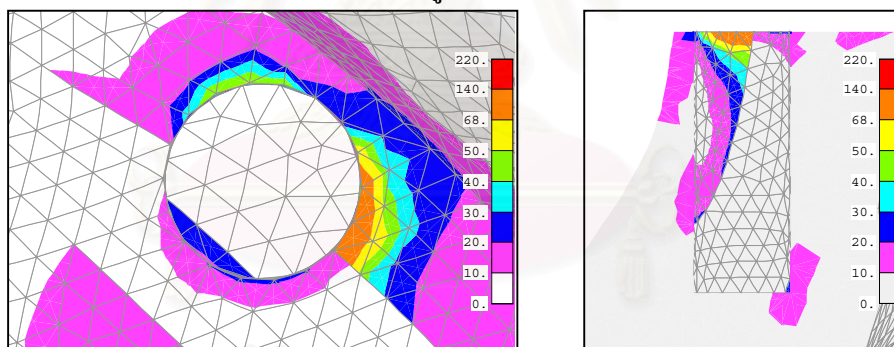




ภาพที่ 6.18 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa)บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

ลักษณะการกระจายความเค้นโดยรวมบนโครงสร้างฟันปลอมไม่แตกต่างจากการกระจายความเค้นในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ยกเว้นบริเวณหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังสุดซึ่งค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนหลักยึดนั้นมีค่าลดลงจากรูปแบบปกติ โดยเฉพาะจุดที่มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 370 MPa

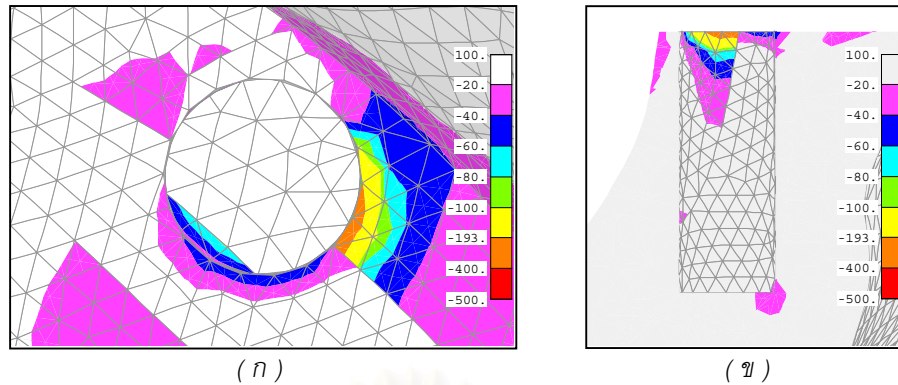
#### 6.2.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



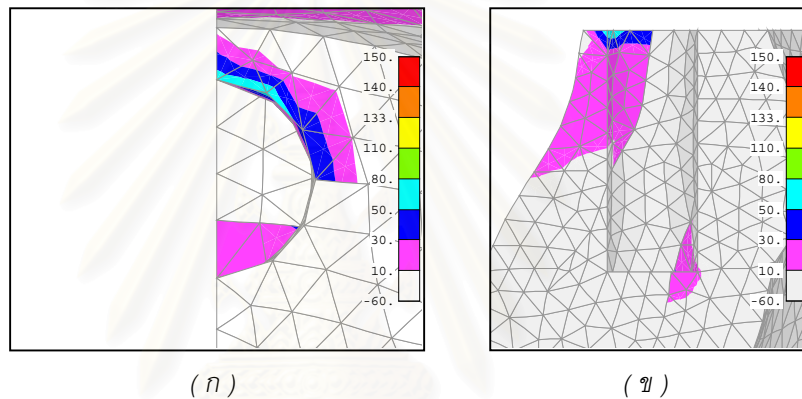
( ก )

( ข )

ภาพที่ 6.19 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ ( ก ) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 6.20 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 6.21 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

ลักษณะการกระจายความเค้นในกระดุกรอบรากฟันเทียมนั้นไม่แตกต่างจากรูปแบบเดิม แต่ค่าความเค้นกดและความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่

- ความเค้นเฉือนในกระดุกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดในบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมมีค่าเท่ากับ 114 MPa
- ความเค้นกดในกระดุกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงสุดในบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม

ส่วนค่าความเค้นดึง 65 MPa สูงสุดซึ่งอยู่ในกระดุกรอบรากฟันเทียมบริเวณคอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 3

### 6.2.3 สรุปการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข

ในโครงสร้างฟันปลอมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดอยู่ที่คอคหลักยึดตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดนี้มีค่าต่ำกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 14.6\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 15.1\%$  ในกรณีที่ 2) และมีค่าต่ำกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 10.0\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 10.0\%$  ในกรณีที่ 2)

ในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดสูงสุดอยู่คอครากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม และมีค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอคด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 3 โดยที่ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 4.9\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 11.8\%$  ในกรณีที่ 2) และค่าความเค้นกดสูงสุดก็มีค่าสูงกว่าในรูปแบบปกติ ( $\approx 4.9\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 11.7\%$  ในกรณีที่ 2) ส่วนค่าความเค้นดึงสูงสุดมีค่าต่ำกว่าในรูปแบบปกติ ( $\approx 8.9\%$  ในกรณีที่ 1 และ  $\approx 8.4\%$  ในกรณีที่ 2)

### 6.2.4 การกระจายแรงในรากฟันเทียม

ตารางที่ 6.2 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข				
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N	
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$ (N)	-1334	530	-898	414
$M_x$ (N-mm)	2061	471	2253	202
$M_y$ (N-mm)	571	0	1169	-637

จากตารางที่ 6.2 พบว่าการใช้หลักยึดรูปทรง ข แทนหลักยึดรูปแบบเดิมที่เป็นทรงกระบอกทำให้แรงและความเค้นซึ่งถ่ายทอดสู่หลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังมีค่ามากขึ้นในขณะที่มีค่าลดลงในรากฟันเทียมตัวหน้า

แม้ว่าค่าแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดในหลักยึดรากฟันเทียมตัวสุดท้ายในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข จะมีค่าเพิ่มจากการใช้หลักยึดรูปแบบปกติ แต่ค่า Moment of Inertia ที่หน้าตัดบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น จนทำให้ค่าความเค้นกดรวมที่มีค่าสูงสุดบนหน้าตัดที่คอหลักยึดซึ่งเกิดจากแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดนั้นมีค่าน้อยกว่าการใช้หลักยึดในรูปแบบปกติ ดังนั้นจึงส่งผลให้ความเค้นเฉือนสูงสุดที่คอหลักยึดรากฟันเทียมมีค่าน้อยลงตามไปด้วย

#### 6.2.5 อภิปรายผลการใช้หลักยึดรูปทรง ข ในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมโดยการเปลี่ยนรูปทรงหลักยึดรากฟันเทียมให้อยู่ในรูปทรง ข นั้น แม้ว่าจะทำให้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมซึ่งอยู่บริเวณคอหลักยึดด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมมีค่าลดลง แต่ก็ทำให้ความเค้นสูงสุดค่าต่างๆในกระดูกครอบรากฟันเทียมมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนรูปทรงหลักยึดให้เป็นรูปทรง ข นั้นทำให้พฤติกรรมในการกระจายแรงและโมเมนต์ดัดลงสู่หลักยึดรากฟันเทียมและรากฟันเทียมเปลี่ยนไป โดยทำให้ทั้งค่าแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดในรากฟันเทียมตัวหลังสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

### 6.3 สรุปการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างฟันปลอมโดยการเปลี่ยนรูปทรงหลักยึด

การเปลี่ยนรูปทรงของหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังสุดโดยการเพิ่มบ่ารองรับที่คอหลักยึดรากฟันเทียมดังรูปทรง ก และการขยายหน้าตัดหลักยึดดังรูปทรง ข นั้นทำให้โครงสร้างของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการลดค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณคอหลักยึดตัวหลังสุดจนกระทั่งความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก และรูปทรง ข นี้มีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ

แต่ทว่าการเปลี่ยนรูปทรงของหลักยึดรากฟันเทียมนี้มีได้ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนกระดูกครอบรากฟันเทียมลดลงจากรูปแบบปกติ โดยที่ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก นั้นมีความเค้นสูงสุดบนกระดูกครอบรากฟันเทียมไม่ต่างจากรูปแบบปกติ ส่วนในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข นั้นทำให้ความเค้นสูงสุดบนกระดูกครอบรากฟันเทียมตัวหลังสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติ

การที่ความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมมีค่าสูงขึ้นจากรูปแบบปกติเนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปทรง ข นั้นทำให้หลักยึดตัวหลังมี Rigidity มากขึ้นส่งผลให้การกระจายโมเมนต์ลดลงรากฟันเทียมตัวหลังมากขึ้น ดังนั้นหากจะเทียบกันระหว่างการใช้หลักยึดรูปทรง ก และรูปทรง ข แล้ว การใช้หลักยึดรูปทรง ก นั้นทำให้ความเค้นสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมลดลงแต่ไม่ทำให้ความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมเปลี่ยนแปลง แต่การใช้หลักยึดรูปทรง ข นั้นแม้ว่าจะทำให้ความเค้นสูงในโครงสร้างฟันปลอมลดลงมากกว่าแต่ก็ทำให้ความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นมีค่าสูงขึ้นจากรูปแบบปกติ

แม้ว่าการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างฟันปลอมโดยการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหลักยึดรากฟันเทียมในฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมนั้นสามารถขจัดปัญหาที่เกิดบนโครงสร้างฟันปลอมได้ก็จริง แต่ก็มีความเสี่ยงต่อการละลายของกระดูกเนื่องจากความเค้นสูง ดังนั้นก่อนที่จะนำฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมในลักษณะดังกล่าวไปใช้ในผู้ป่วยไร้นั้นก็ควรจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจเสียก่อนว่าความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมที่สูงขึ้นจะไม่ทำให้เกิดการละลายตัวของกระดูกรอบรากฟันเทียมจนทำให้เกิดความล้มเหลวในการทำฟันปลอมด้วยการทดสอบวิธีอื่นๆในทางคลินิกต่อไป

## บทที่ 7

### การปรับปรุงฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม โดยการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะ

นอกจากการแก้ปัญหาในจุดที่มีความเค้นสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมด้วยการเปลี่ยนรูปทรงของหลักยึดรากฟันเทียมแล้วยังสามารถลดความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฟันปลอมได้ด้วยการลดโมเมนต์ดัดที่ส่งผ่านมายังหลักยึดรากฟันเทียมด้วยการเพิ่มความแข็งของโครงโลหะ โดยการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะจากไททาเนียมอัลลอยเป็นโคบอลต์อัลลอย (Co-Cr-Mo) ซึ่งเป็นโลหะอีกชนิดหนึ่งที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) สูงกว่าไททาเนียมอัลลอยประมาณ 2 เท่า

โคบอลต์อัลลอย (Co-Cr-Mo) ซึ่งใช้ในทางทันตกรรมรากฟันเทียมนั้นเป็นอัลลอยที่มีโคบอลต์เป็นหลัก โดยมีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และมีโมลิบดีนัมประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 200 GPa มีค่า Yield Strength เท่ากับ 490 MPa และ Ultimate Strength เท่ากับ 690 MPa (Bidez and Misch)

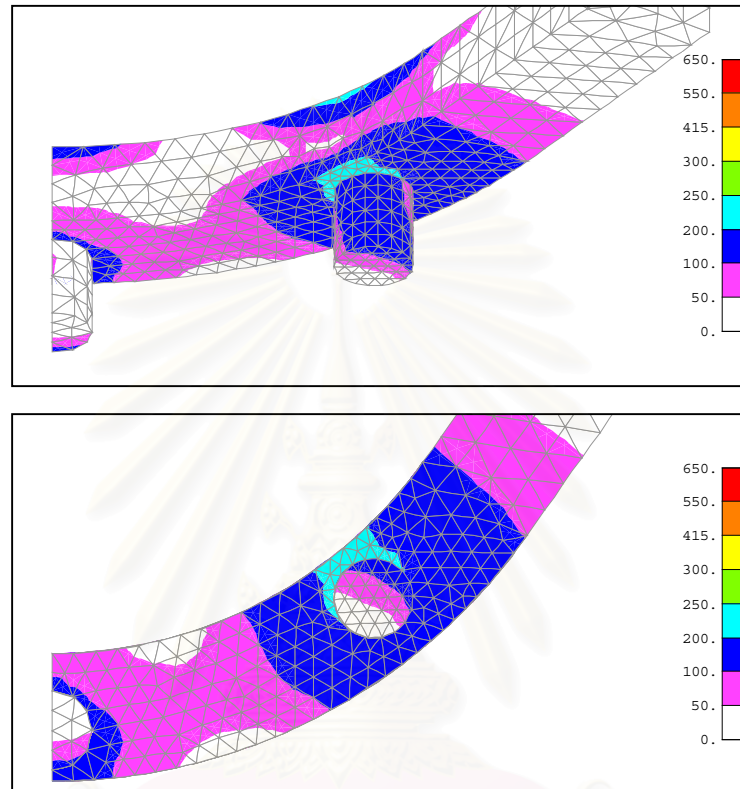
เพื่อเป็นการตรวจสอบของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟันปลอมดังกล่าวขึ้น โดยกำหนดลักษณะคุณสมบัติต่างๆของแบบจำลองเช่นเดียวกับที่กำหนดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมแบบปกติ เพียงเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะจากเดิมที่ใช้ไททาเนียมอัลลอยมาใช้โคบอลต์อัลลอยแทน แต่ส่วนประกอบอื่นๆของโครงสร้างฟันปลอม ได้แก่ หลักยึดและรากฟันเทียม ยังคงใช้วัสดุไททาเนียมอัลลอยตามปกติ และนำผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยเทียบกับผลที่ได้จากฟันปลอมไฮบริดรูปแบบปกติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

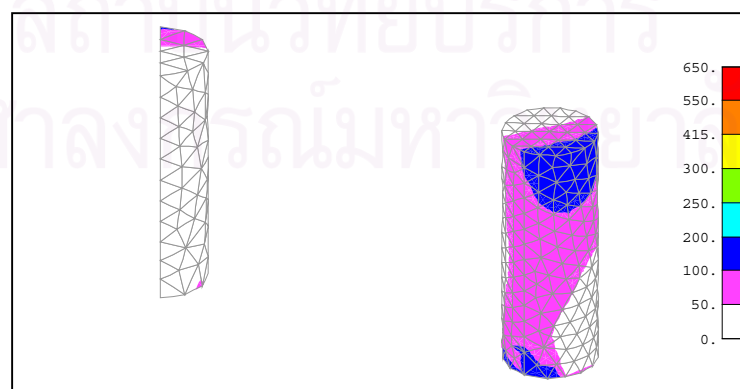
## 7.1 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 1

เมื่อมีแรงกดเคี้ยวกระจายทั่วปาก โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

### 7.1.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



ภาพที่ 7.1 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

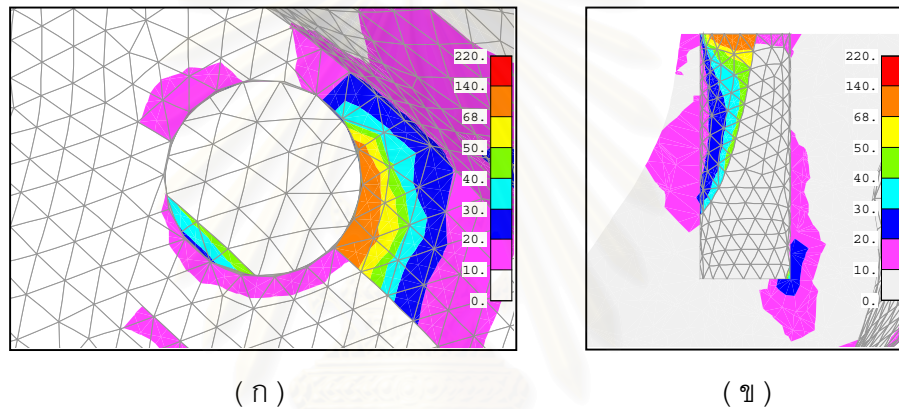


ภาพที่ 7.2 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

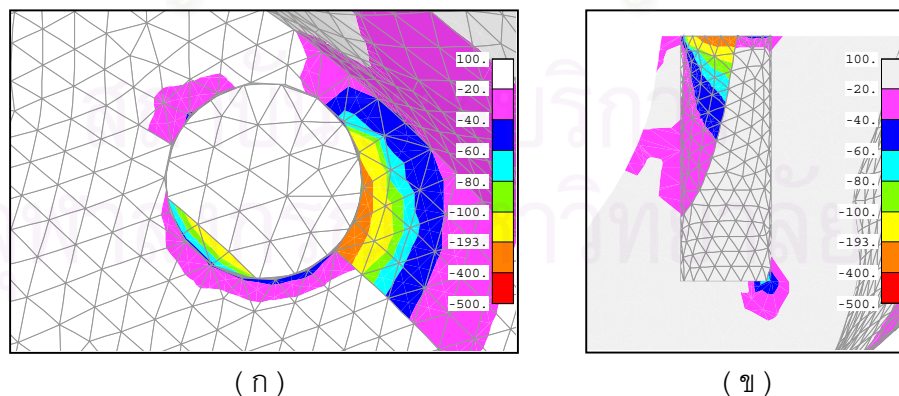
การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยในกรณีนี้ นั้นมีความแตกต่างจากในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะไททานเนียมอัลลอย โดยที่

- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงโลหะโคบอลต์อัลลอยอยู่บริเวณรอยต่อที่คอด้านหลังของหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 237 MPa
- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนหลักยึดรากฟันเทียมไททานเนียมอัลลอยอยู่บริเวณคอด้านหลังของหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 161 MPa

### 7.1.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม

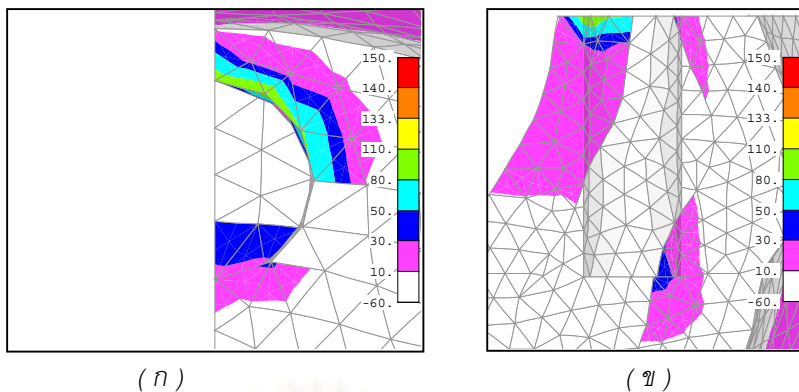


ภาพที่ 7.3 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 7.4 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1





ภาพที่ 7.5 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกด เคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูก รอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

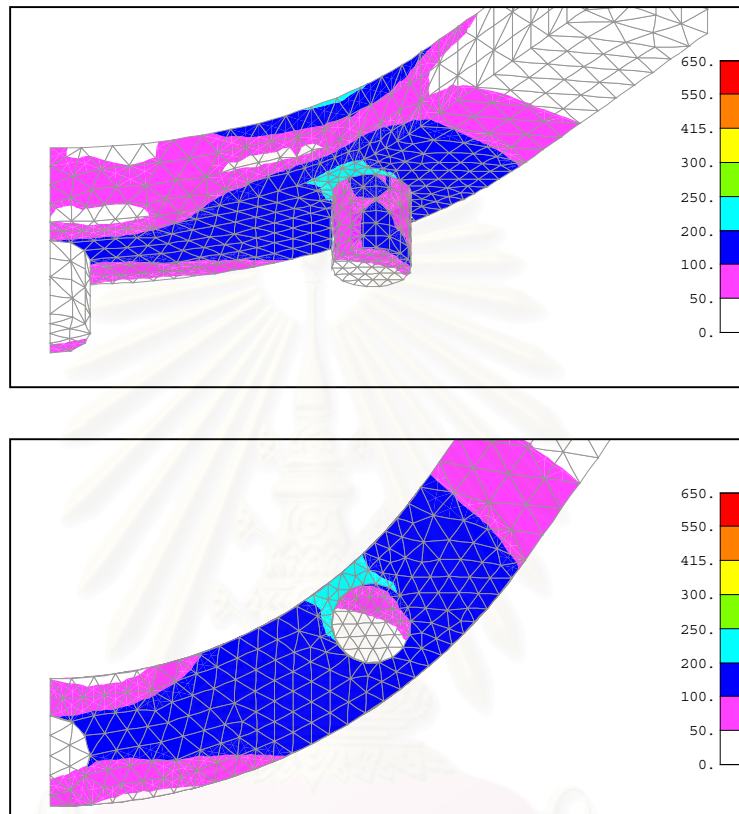
ความเค้นสูงสุดที่กระจายอยู่ในกระดูกรอบคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในกรณีนี้ นั้นมีค่าลดลง จากรูปแบบปกติเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงมีค่ามากกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมอยู่ โดยที่

- ความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้าน ท้ายฟันปลอมมีค่าเท่ากับ 136 MPa
- ความเค้นกดมีค่าสูงสุดอยู่ในกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้าน ท้ายเช่นเดียวกับความเค้นเฉือน โดยค่าความเค้นกดสูงสุดมีค่าเท่ากับ -356 MPa
- ค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ด้านหน้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 110 MPa

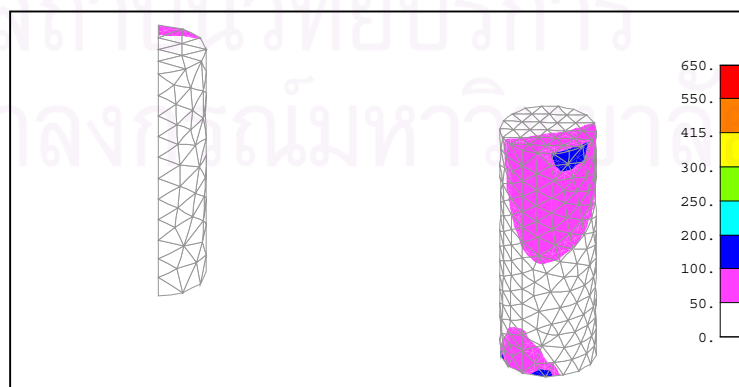
## 7.2 การกระจายความเค้นในกรณีที่ 2

เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเฉพาะบริเวณพื้นกรามด้านขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

### 7.2.1 การกระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอม



ภาพที่ 7.6 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

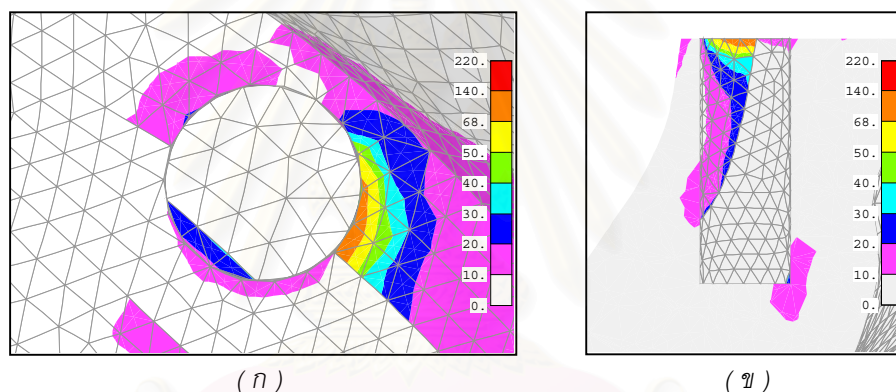


ภาพที่ 7.7 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

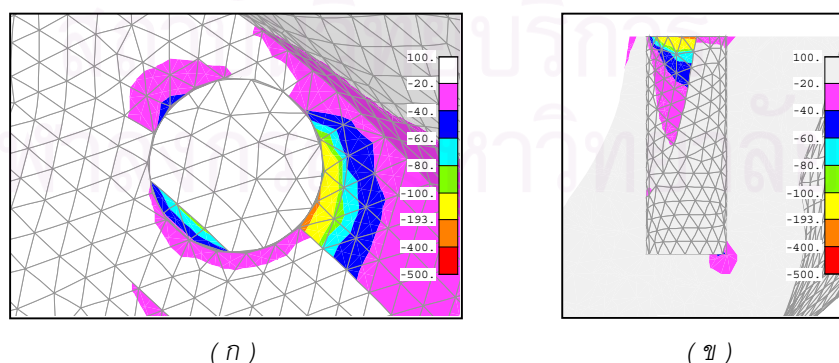
การกระจายความเค้นในโครงสร้างฟันปลอมของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยในกรณีนี้นั้นมีลักษณะที่แตกต่างจากฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ความเค้นที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านหลัง ซึ่งในรูปแบบปกตินั้นค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้านหลัง ฟันปลอมที่เอียงไปทางด้านข้างของหลักยึด

- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงโลหะโคบอลต์อัลลอยซึ่งอยู่ที่รอยต่อบริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านหลังนั้นมีค่าเท่ากับ 222 MPa ซึ่งน้อยกว่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของโคบอลต์อัลลอย (245 MPa)
- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนหลักยึดรากฟันเทียมอยู่บริเวณคอหลักยึดตัวที่ 1 นั้นมีค่าเท่ากับ 105 MPa

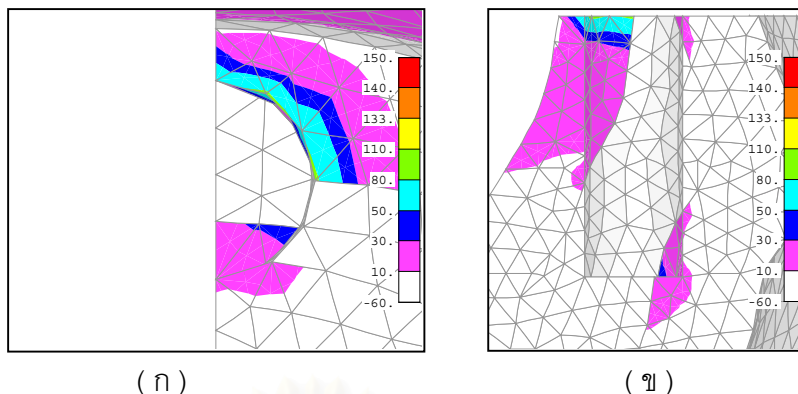
### 7.2.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียม



ภาพที่ 7.8 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 7.9 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 7.10 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งโครงโลหะโคบอลต์อัลลอย เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดุกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3

ความเค้นที่สูงสุดที่กระจายอยู่ในกระดุกรอบคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในกรณีนี้ นั้นมีค่าลดลงจากรูปแบบปกติ จนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม โดยที่

- ความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมมีค่าเท่ากับ 91 MPa
- ความเค้นกดมีค่าสูงสุดอยู่ในกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านที่ติดกับส่วนยื่นด้านท้ายเช่นเดียวกับความเค้นเฉือน โดยค่าความเค้นกดสูงสุดมีค่าเท่ากับ -233 MPa
- ค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบนกระดุกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ด้านหน้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 83 MPa

### 7.3 สรุปการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย

ในโครงสร้างฟันปลอมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย ประกอบไปด้วยวัสดุสองชนิด คือ โคบอลต์อัลลอยในโครงโลหะ และไททานเนียมอัลลอยในหลักยึดและรากฟันเทียม ความเค้นสูงสุดในโลหะทั้งสองชนิดนั้นอยู่ในบริเวณเดียวกันคือบริเวณรอยต่อที่คอด้านหลังของหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 โดยที่ความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงโลหะโคบอลต์อัลลอยนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของโลหะโคบอลต์อัลลอยซึ่งเท่ากับ 245 MPa ( $\approx 3.3\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 9.4\%$  ในกรณีที่ 2) ส่วนค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในส่วนที่เป็นไททานเนียมอัลลอยซึ่งอยู่ที่คอหลักยึดตัวที่ 1 มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นเฉือนที่จุดคราก

ของไททาเนียมอัลลอย ( $\approx 61.2\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 74.7\%$  ในกรณีที่ 2) และมีค่าต่ำกว่าความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมซึ่งเป็นไททาเนียมอัลลอยในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 62.7\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 75.9\%$  ในกรณีที่ 2) อีกทั้งยังมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอมซึ่งเป็นไททาเนียมอัลลอยในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 60.7\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 74.4\%$  ในกรณีที่ 2)

ในกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นมีความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นกดสูงสุดอยู่ที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม และมีค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่ที่คอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 3 โดยที่

- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นมีความต่ำกว่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 5.5\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 10.8\%$  ในกรณีที่ 2) แต่มีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 9.7\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 2.2\%$  ในกรณีที่ 2)
- ความเค้นกดสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นมีความต่ำกว่าความเค้นกดสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 3.8\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 5.7\%$  ในกรณีที่ 2) แต่มีค่าสูงกว่าค่าความเค้นกดสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 10.6\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 6.4\%$  ในกรณีที่ 2)
- ความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในกรณีที่ 1 นั้นมีค่าต่ำกว่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 1.8\%$ ) แต่มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ 2 ( $\approx 21.1\%$ )

## 7.4 การกระจายแรงและโมเมนต์ในหลักยึดและรากฟันเทียม

### 7.4.1 การกระจายแรงและโมเมนต์ลงหลักยึดรากฟันเทียม

ตารางที่ 7.1 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย				
	ชุดแรงบิดเคียว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคียว 190 N	
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$ (N)	-1483	826	-977	544
$M_x$ (N-mm)	793	1107	622	648
$M_y$ (N-mm)	-430	0	-96	365

เมื่อพิจารณาแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะลงสู่หลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยจากตารางที่ 7.1 เมื่อเทียบกับค่าแรงและโมเมนต์ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติในตารางที่ 7.1-7.2 พบว่า

- ในกรณีที่ 1 แม้ว่าค่าแรงในแนวแกนของหลักยึดตัวที่ 1 จะเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติแต่ค่าโมเมนต์ดัดบนคอหลักยึดรากฟันเทียมมีค่าลดลงทำให้ค่า Maximum Compressive Combine Stress บนหน้าตัดคอหลักยึดที่เกิดจากแรงและโมเมนต์ดัดมีค่าเพียง -308 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติประมาณ 36.6 %
- ในกรณีที่ 2 แม้ว่าค่าแรงในแนวแกนของหลักยึดตัวที่ 1 จะเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติแต่ค่าโมเมนต์ดัดบนคอหลักยึดรากฟันเทียมมีค่าลดลงทำให้ค่า Maximum Compressive Combined Stress บนหน้าตัดคอหลักยึดที่เกิดจากแรงและโมเมนต์ดัดมีค่าเพียง -210 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติประมาณ 58.2 %

จากการลดลงของค่า Maximum Compressive Combine Stress บนหน้าตัดบนคอหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในทั้งสองกรณีนั้นทำให้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนหลักยึดซึ่งอยู่ในตำแหน่งเดียวกันนี้มีค่าลดลงจากแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ

โมเมนต์  $M_y$  ของทั้งสองกรณีมีทิศทางตรงกันข้ามกับฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติทำให้จุดที่มี Maximum Compressive Combined Stress ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดบนหลักยึดรากฟันเทียมย้ายตำแหน่งจากคอกหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมมาเป็นด้านหลังคอกหลักยึดรากฟันเทียมตัวที่ 1

#### 7.4.2 การกระจายแรงและโมเมนต์ลงสู่รากฟันเทียม

ตารางที่ 7.2 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย				
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N	
	รากฟันตัวที่ 1	รากฟันตัวที่ 3	รากฟันตัวที่ 1	รากฟันตัวที่ 3
$F_z$ (N)	-1483	826	-977	544
$M_x$ (N-mm)	898	901	735	589
$M_y$ (N-mm)	463	0	273	0

- ในกรณีที่ 1 นั้นแม้ว่าค่าแรงในแนวแกนบนรากฟันเทียมตัวที่ 1 นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติแต่ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าลดลง ทำให้ค่า Maximum Compressive Combined Stress บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมซึ่งเกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดนั้นมีค่าลดลงเหลือ -330 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในฟันปลอม 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติประมาณ 29.6%
- ในกรณีที่ 2 นั้นแม้ว่าค่าแรงในแนวแกนบนรากฟันเทียมตัวที่ 1 นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติแต่ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าลดลง ทำให้ค่า Maximum Compressive Combined Stress บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมซึ่งเกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดนั้นมีค่าลดลงเหลือ -240 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในฟันปลอม 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติประมาณ 43%

จากการลดลงของ Maximum Compressive Combined Stress บนรากฟันเทียมนั้นทำให้ค่าความเค้นกดและความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกออบรากฟันเทียมซึ่งอยู่ติดกันนั้นมีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับรูปแบบปกติ

## 7.5 สรุปการปรับปรุงโครงสร้างพื้นปloomโดยใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย

การเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโลหะจากไททาเนียมอัลลอยมาเป็นโคบอลต์อัลลอยซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า 2 เท่านี้ทำให้การกระจายแรงและโมเมนต์ลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวเปลี่ยนไป โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมตัวหลังสุดมีค่าลดลงอย่างมาก ทำให้แรงในรากฟันเทียมทั้งตัวหน้าและตัวหลังมีค่าเพิ่มขึ้น และโมเมนต์ดัดบนรากฟันเทียมตัวหลังก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

การเปลี่ยนแปลงการกระจายแรงสู่รากฟันเทียมนดังกล่าวทำให้ค่า Maximum Compressive Combined Stress บนคอหลักยึดรากฟันเทียมและบนคอรากฟันเทียมลดลงจากรากฟันปloomไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติส่งผลให้ความเค้นสูงสุดที่อยู่บริเวณเดียวกันนั้นได้แก่ความเค้นเฉือนที่คอหลักยึดตัวที่ 1 ความเค้นกดและความเค้นเฉือนในกระดูกรอบรากฟันเทียมบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 มีค่าลดลง

แม้ว่าความเค้นเฉือนที่จุดครากของโคบอลต์อัลลอย ( 245 MPa) จะน้อยกว่าไททาเนียมอัลลอย ( 415 MPa ) แต่การลดลงอย่างมากของความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงโลหะโคบอลต์อัลลอยนั้นกลับทำให้ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงโลหะมีค่าต่ำกว่าจุดครากของโคบอลต์อัลลอย อีกทั้งค่าความเค้นเฉือนที่มีค่าสูงสุดในส่วนที่ยังคงเป็นไททาเนียมอัลลอยซึ่งก็คือหลักยึดและรากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่บริเวณคอหลักยึดรากฟันเทียมหลังสุดนั้นมีค่าต่ำกว่าจุดครากของไททาเนียมอัลลอยอีกด้วย

ส่วนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองนี้ค่าความเค้นกดและความเค้นเฉือนสูงสุดยังคงอยู่ที่เดิมคือบริเวณคอรากฟันเทียมตัวหลังสุดนั้นมีค่าลดลงจากแบบจำลองพื้นปloomไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ แต่ยังคงมีค่ามากกว่าในแบบจำลองพื้นปloomไฮบริด 5 รากฟันเทียม ส่วนค่าความเค้นดึงสูงสุดบริเวณคอรากฟันเทียมตัวหน้านั้นมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีที่มีแรงบิดเคี้ยวบนกรามด้านขวา

สรุปได้ว่าการใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยนั้นทำให้การกระจายความเค้นบนโครงสร้างพื้นปloomดีกว่าการใช้โครงโลหะไททาเนียมอัลลอย สังเกตได้จากการที่ค่าความเค้นบนโครงสร้างพื้นปloomทั้งหมดนั้นมีค่าต่ำกว่าจุดครากของวัสดุ (ไททาเนียมอัลลอยและโคบอลต์อัลลอย) อีกทั้งค่าความเค้นสูงสุดบนโครงสร้างพื้นปloomนั้นยังมีค่าน้อยกว่าความเค้นสูงสุดในโครงสร้างพื้นปloomไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ และโครงสร้างพื้นปloomไฮบริด 5 รากฟันเทียมอีกด้วย ส่วนการกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมนั้นดีกว่าในรูปแบบปกติซึ่งใช้โครงโลหะไททาเนียมอัลลอยเนื่องจากค่าความเค้นสูงสุดที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวหลังสุดนั้นมีค่าต่ำกว่าในพื้นปloomไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ แต่ค่าความเค้นสูงสุดรอบรากฟันเทียมในพื้นปloomไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยนั้นยังคงมีค่าที่สูงกว่าในพื้นปloomไฮ



บริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ฉะนั้นการใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยนั้นสามารถช่วยแก้ปัญหากระจายความเค้นบนโครงสร้างฟันปลอมได้อย่างมาก แต่ช่วยในการแก้ปัญหาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกรอบรากฟันเทียมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และมีข้อควรระวังในการใช้ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอยก็คือความเค้นดึงบนกระดูกที่คอรากฟันเทียมตัวหน้าสุดซึ่งมีค่าสูงขึ้นในกรณีที่มีแรงบิดเคี้ยวบนกรามด้านใดด้านหนึ่ง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 8

### การปรับปรุงพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมโดยการเปลี่ยน จุดเชื่อมต่อระหว่างโครงโลหะกับหลักยึดรากพันเทียม

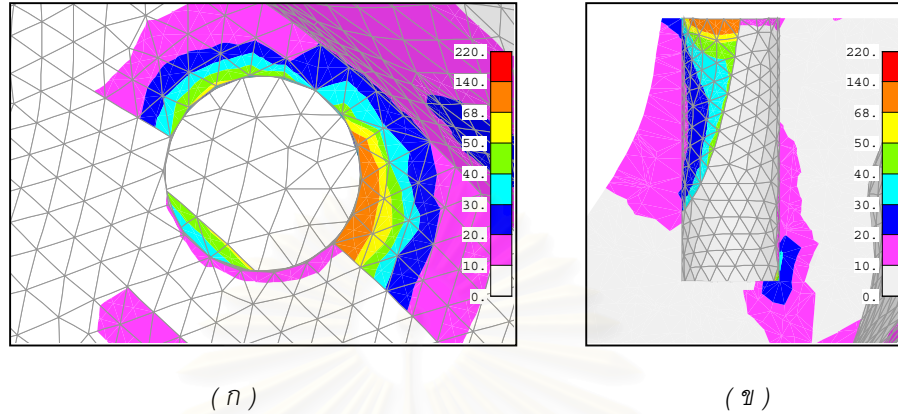
จากบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าการที่ความเค้นสูงสุดในแบบจำลองพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมมีค่ามากกว่าในแบบจำลอง 5 รากพันเทียม เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะลงสู่รากพันเทียมมีค่าสูงขึ้น ฉะนั้นหากสามารถกำจัดโมเมนต์ดัดที่โครงโลหะถ่ายทอดลงสู่หลักยึดรากพันเทียมได้ก็จะทำให้การฝังรากพันเทียมด้วยจำนวนแค่ 3 ตัวเกิดความเค้นในกระดูกรอบรากพันเทียมตัวหลังสุดน้อยกว่าการฝังรากพันเทียม 5 ตัว

ดังนั้นหากต้องการแก้ปัญหาจากการที่ความเค้นสูงสุดที่เกิดจากพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมนั้นมีค่าสูงกว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดจากพันปลอมไฮบริด 5 รากพันเทียม จึงต้องให้มีเฉพาะแรงในแนวแกนถ่ายทอดลงสู่รากพันเทียมโดยไม่มีโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดรากพันเทียม ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดให้จุดต่อระหว่างหลักยึดกับรากพันเทียมให้อยู่ในลักษณะของจุดหมุน แต่เนื่องจากการกำหนดให้จุดหมุนอยู่ที่รากพันเทียมดังกล่าวนี้มีความเสี่ยงต่อการเสียหายของรากพันเทียมเนื่องจากความเค้นที่มีค่าสูงที่เกิดบริเวณจุดต่อ ฉะนั้นจึงต้องย้ายจุดต่อให้มาอยู่บนคอกหลักยึดซึ่งเชื่อมต่อกับโครงโลหะแทน ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับรากพันเทียม อีกทั้งการปรับเปลี่ยนลักษณะจุดเชื่อมต่อที่คอกหลักยึดด้านบนนั้นสามารถทำได้สะดวกกว่า

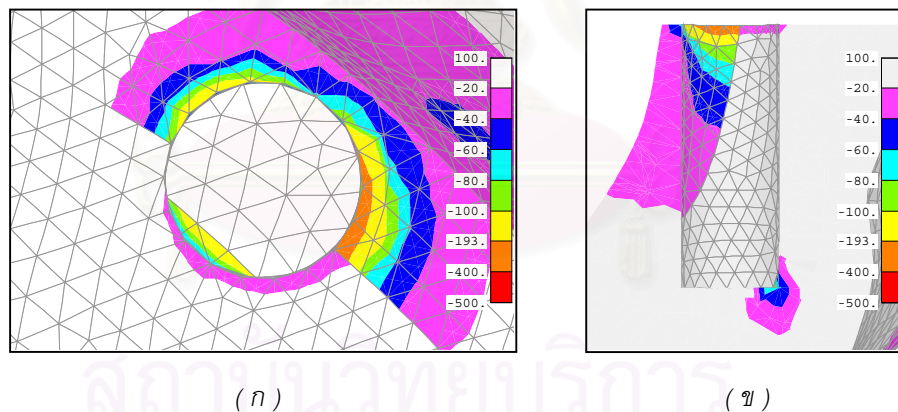
เพื่อเป็นการศึกษาการทำงานของพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมซึ่งใช้หลักยึดที่มีจุดเชื่อมต่อกับโครงโลหะแบบจุดหมุน ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาโดยมีข้อกำหนดต่างๆเหมือนกับพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมรูปแบบปกติ เพียงแต่กำหนดให้โครงโลหะและหลักยึดรากพันเทียมเชื่อมต่อกันแบบจุดหมุน แล้วนำผลการคำนวณจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมรูปแบบปกติ

ทั้งนี้ในแบบจำลองพันปลอมไฮบริด 3 รากพันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุนนี้มุ่งเน้นที่แก้ปัญหาความเค้นที่มีค่าสูงบนกระดูกรอบรากพันเทียม โดยที่แบบจำลองนี้มิได้นำเสนอการลดความเค้นที่มีค่าสูงที่จุดหมุนบนคอกหลักยึดซึ่งอยู่ในลักษณะเดียวกับความเค้นสูงที่เกิดจากการกำหนดแรงแบบจุด

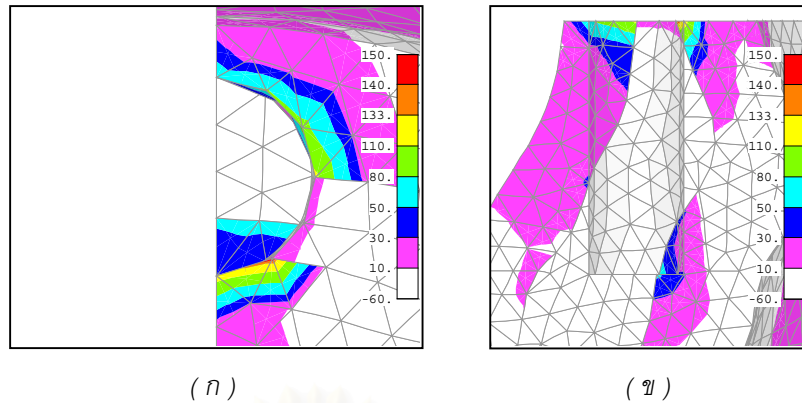
8.1 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในกรณีที่ 1  
 เมื่อมีแรงกดเคี้ยวกระทำทั้งปาก โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



ภาพที่ 8.1 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 8.2 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองบนของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1



ภาพที่ 8.3 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบ รากฟันเทียมตัวที่ 3

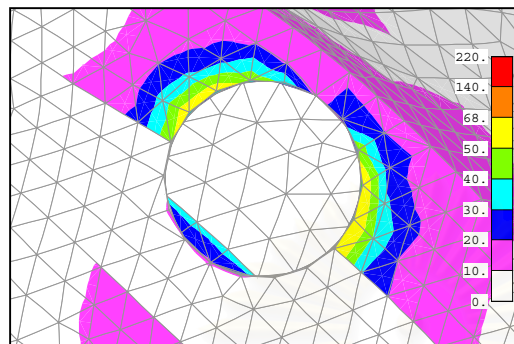
ความเค้นที่กระจายบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองนี้แตกต่างจากแบบจำลอง ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ คือ ความเค้นที่มีค่าสูงที่คอรากฟันเทียมซึ่งเดิมนั้นจะ กระจายอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของคอรากฟันเทียม แต่ในแบบจำลองนี้ความเค้นที่มีค่าสูงนั้นจะ กระจายไปยังส่วนที่เป็นกระดูกที่บอกรากฟันเทียมด้วยขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากเหมือนที่เกิดค่า ความเค้นสูงเฉพาะบริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมดังในรูป แบบปกติ โดยที่

- ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมนั้นมีค่าเท่ากับ 118 MPa
- ค่าความเค้นกดสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่บริเวณเดียวกับค่าความเค้น เฉือนสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ -315 MPa
- ค่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่คอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัว ที่ 3 นั้นมีค่าเท่ากับ 115 MPa

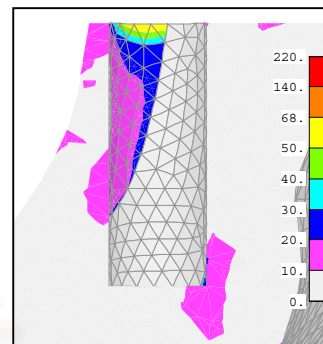
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 8.2 การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในกรณีที่ 2

เมื่อมีแรงกดเคี้ยวเฉพาะบริเวณพื้นกรามด้านขวา โดยกำหนดชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

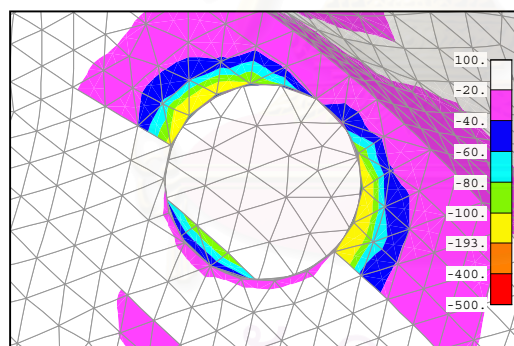


( ก )

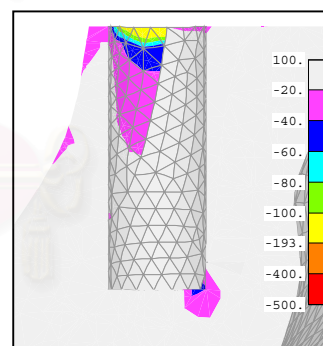


( ข )

ภาพที่ 8.4 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด ( Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 1

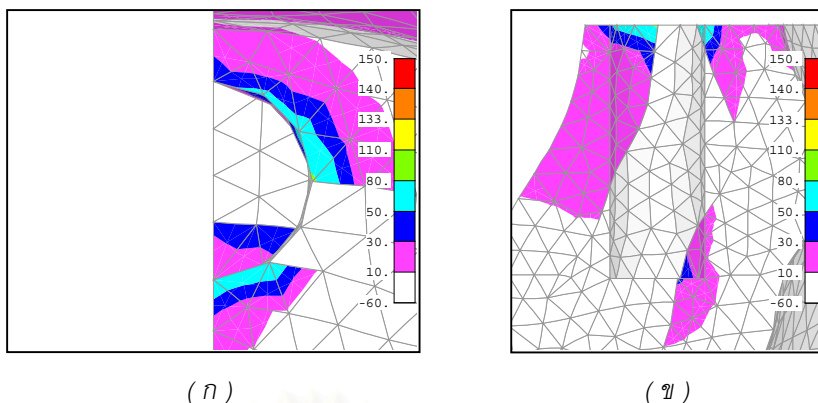


( ก )



( ข )

ภาพที่ 8.5 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด ( Minimum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 1



ภาพที่ 8.6 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด ( Maximum Principal Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรรอบ รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน เมื่อมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N โดยที่ (ก) เป็นภาพมุมมองของกระดูกรอบรากฟันเทียม (ข) เป็นภาพหน้าตัดของกระดูกรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 3

การกระจายความเค้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในกรณีนี้ก็อยู่ในลักษณะเดียวกับในกรณีที่ 1 คือ การกระจายความเค้นด้วยค่าที่ใกล้เคียงกันบนกระดูกรอบคอรากฟันเทียม โดยที่

- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมนั้นมีค่าเท่ากับ 64 MPa
- ความเค้นกดสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่ที่เดียวกับค่าความเค้นเฉือนสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ -162 MPa
- ความเค้นดึงสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่บริเวณคอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 85 MPa

### 8.3 สรุปการกระจายความเค้นในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน

ในกระดูกรอบรากฟันเทียมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและความเค้นกดสูงสุดอยู่ที่คอรากฟันเทียมตัวที่ 1 ด้านติดกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม และมีค่าความเค้นดึงสูงสุดอยู่ที่คอด้านหน้าของรากฟันเทียมตัวที่ 3 โดยที่

- ความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าต่ำกว่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 18.0\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 37.2\%$  ในกรณีที่ 2) และมีค่าต่ำกว่าความเค้นเฉือนสูงสุดใน

กระดุมครอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 4.8\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 28.1\%$  ในกรณีที่ 2)

- ความเค้นกดสูงสุดบนกระดุมครอบรากฟันเทียมมีค่าต่ำกว่าความเค้นกดสูงสุดบนกระดุมครอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 14.9\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 34.4\%$  ในกรณีที่ 2) และมีค่าต่ำกว่าความเค้นกดสูงสุดในกระดุมครอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 2.2\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 26.0\%$  ในกรณีที่ 2)
- ความเค้นดึงสูงสุดบนกระดุมครอบรากฟันเทียมมีค่าสูงกว่าความเค้นดึงสูงสุดบนกระดุมครอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 2.7\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 19.7\%$  ในกรณีที่ 2) และมีค่าสูงกว่าความเค้นดึงสูงสุดในกระดุมครอบรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมรูปแบบปกติ ( $\approx 38.6\%$  ในกรณีที่ 1,  $\approx 19.7\%$  ในกรณีที่ 2)

#### 8.4 การกระจายแรงในรากฟันเทียม

##### 8.4.1 การกระจายแรงและโมเมนต์ลงหลักยึดรากฟันเทียม

เนื่องจากจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมซึ่งเป็นแบบจุดหมุน ทำให้สามารถถ่ายทอดเฉพาะแรง ไม่สามารถถ่ายทอดโมเมนต์ลงหลักยึดได้ ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียม แต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย				
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N	
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3
$F_z$ (N)	-1700	1261	-1135	836
$M_x$ (N-mm)	0	0	0	0
$M_y$ (N-mm)	0	0	0	0

จากตารางจะเห็นได้ว่าการใช้หลักยึดที่เชื่อมต่อกับโครงโลหะแบบจุดหมุนนั้นทำให้ค่าแรงที่กระจายลงรากฟันเทียมแต่ละตัวเพิ่มขึ้น เพื่อช่วยต้านทานการหมุนของโครงโลหะที่เกิดจากแรงบิดเคี้ยวบนส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมแทนโมเมนต์ดัดบนคอหลักยึดที่หายไป

#### 8.4.2 การกระจายแรงและโมเมนต์ลงสู่รากฟันเทียม

จากค่าแรงที่ลงหลักยึดรากฟันเทียมสามารถคำนวณค่าแรงและโมเมนต์ที่ลงสู่รากฟันเทียมได้ ดังนี้

ตารางที่ 8.2 ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมแต่ละตัวในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย				
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N	
	รากฟันตัวที่ 1	รากฟันตัวที่ 3	รากฟันตัวที่ 1	รากฟันตัวที่ 3
$F_z$ (N)	-1700	1261	-1135	836
$M_x$ (N-mm)	12	-20	-30	38
$M_y$ (N-mm)	609	-11	78	56

จากตารางที่ 8.2 จะเห็นได้ว่า

- ในกรณีที่ 1 นั้นแม้ว่าค่าแรงในแนวแกนบนรากฟันเทียมตัวที่ 1 นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติแต่ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าลดลง ทำให้ค่า Maximum Compressive Combined Stress บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมซึ่งเกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดนั้นมีค่าลดลงเหลือ -271 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในฟันปลอม 5 รากฟันเทียมเมื่อมีแรงบิดเคี้ยวเท่ากันประมาณ 31.4 %
- ในกรณีที่ 2 นั้นแม้ว่าค่าแรงในแนวแกนบนรากฟันเทียมตัวที่ 1 นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากรูปแบบปกติมากแต่ค่าโมเมนต์ดัดบนคอรากฟันเทียมนั้นแทบจะไม่มีเลย ทำให้ค่า Maximum Compressive Combined Stress บนหน้าตัดที่คอรากฟันเทียมซึ่งเกิดจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดนั้นมีค่าลดลงเหลือ -119 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในฟันปลอม 5 รากฟันเทียมประมาณ 66%

จากการลดลงของค่า Maximum Compressive Combined Stress ที่คำนวณได้ตามทฤษฎีบนคอรากฟันเทียมตัวที่ 1 นั้นทำให้ค่าความเค้นกดและความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนกระดูกอบคอรากฟันเทียมในบริเวณเดียวกันนั้นมีค่าลดลงจากฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม



## 8.5 สรุปการปรับปรุงโครงสร้างพันปลอมโดยใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุนบนหลักยึด

การเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงโลหะกับหลักยึดรากฟันเทียมให้เป็นแบบจุดหมุนซึ่งสามารถส่งผ่านแรงได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถส่งโมเมนต์ผ่านจุดหมุนนี้ได้ ทำให้โมเมนต์ดัดที่ลงสู่รากฟันเทียมนั้นมีค่าลดลง ดังนั้นค่าแรงในแนวแกนจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อดำเนินการหมุนของโครงโลหะจากแรงบิดเคี้ยวที่กระทำบนส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมแทนค่าโมเมนต์ดัดที่หายไป โดยที่ค่าแรงที่เพิ่มขึ้นบนรากฟันเทียมตัวที่หลังสุดไม่ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลในทางกลับกันคือสามารถทำให้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวหลังสุดซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปัญหาในฟันปลอม 3 รากฟันเทียมนั้นมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าน้อยกว่าความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวหลังสุดในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมตามข้อกำหนดเดิมอีกด้วย ส่วนค่าแรงบนรากฟันเทียมตัวหน้าสุดมีค่าเพิ่มขึ้นมากจนทำให้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณคอรากฟันเทียมตัวหน้าสุดนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นแม้ว่าโมเมนต์ดัดที่ถ่ายทอดลงสู่รากฟันเทียมนั้นแทบจะไม่มีเลย

สรุปแล้วโครงสร้างฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้จุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุนนั้นทำให้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นกดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนกระดูกรอบรากฟันเทียมซึ่งอยู่บริเวณคอรากฟันเทียมตัวหลังสุดมีค่าต่ำกว่าในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมตามข้อกำหนดเดิม แม้ว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณคอรากฟันเทียมตัวหน้าจะเพิ่มขึ้นแต่ก็เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ไม่ทำให้ค่าความเค้นถึงเกินค่ากำลังวัสดุของกระดูก หากนำฟันปลอมรูปแบบนี้ไปใช้ในทางปฏิบัติจะสามารถลดความเสี่ยงต่อการละลายของกระดูกรอบรากฟันเทียมเนื่องจากความเค้นสูงที่คอรากฟันเทียมตัวหลังสุดได้ แต่ก็ต้องเพิ่มความระมัดระวังขึ้นเล็กน้อยต่อความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในกระดูกรอบคอรากฟันเทียมตัวหน้าสุด และยังมีจุดที่ต้องแก้ไขอีกก็คือลักษณะโครงสร้างบริเวณจุดหมุนซึ่งจำลองให้ถ่ายทอดแรงผ่านแค่จุดเดียวบนหลักยึดรากฟันเทียมเท่านั้น

## บทที่ 9

### บทสรุป ปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ

#### 9.1 บทสรุป

1. การบดเคี้ยวที่เกิดขึ้นบนฟันปลอมไฮบริด ซึ่งแรงบดเคี้ยวส่วนใหญ่กระทำที่ส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอม ทำให้เกิดแรงในแนวแกนรากฟันเทียมและโมเมนต์ดัดกระจายลงสู่หลักยึดและรากฟันเทียม โดยที่แรงในแนวแกนของรากฟันเทียมตัวหลังสุดเป็นแรงกด ส่วนแรงในแนวแกนของรากฟันเทียมตัวที่เหลือเป็นแรงดึง ซึ่งแรงกดในรากฟันเทียมตัวหลังนั้นมีค่ามากที่สุด โดยมีค่ามากกว่าแรงดึงในรากฟันเทียมตัวที่เหลือ เพราะค่าแรงกดในรากฟันเทียมตัวหลังคือผลรวมของแรงดึงในรากฟันเทียมตัวหน้ากับแรงบดเคี้ยวที่กดลงบนโครงโลหะ การที่เกิดแรงกดและโมเมนต์ดัดในรากฟันเทียมตัวหลังนี้ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างมีค่าสูงสุดในตำแหน่งของรากฟันเทียมตัวหลังสุด
2. การลดจำนวนรากฟันเทียมในฟันปลอมไฮบริดจาก 5 ตัว ตามข้อกำหนดเดิมให้เหลือเพียงแค่ 3 ตัวนั้น แม้จะทำให้ค่าแรงที่กระจายลงรากฟันเทียมแต่ละตัวมีค่าลดลง แต่การขาดหายไปของรากฟันเทียมทั้งสองตัวนั้นทำให้รากฟันเทียมที่เหลือต้องรับภาระโมเมนต์ดัดบนรากฟันเทียมมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มของโมเมนต์ดัดบนรากฟันเทียมนั้นทำให้ค่าความเค้นสูงสุดบนโครงสร้างมีค่ามากขึ้น โดยจุดที่ความเค้นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดจำนวนรากฟันเทียมเหลือเพียงแค่ 3 ตัวมีดังนี้
  - 2.1 บริเวณคอคหลักยึดรากฟันเทียมตัวหลังสุดด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมซึ่งเกิดความเค้นสูงสุดในโครงสร้างฟันปลอม
  - 2.2 กระจุกบริเวณคอครากฟันเทียมตัวหลังสุดด้านเดียวกับส่วนยื่นด้านท้ายฟันปลอมซึ่งเกิดความเค้นเฉือนและความเค้นดึงสูงสุดในกระจุกรอบรากฟันเทียม
  - 2.3 กระจุกบริเวณรากฟันเทียมตัวหน้าสุดด้านหน้าซึ่งเกิดความเค้นดึงสูงสุดในกระจุกรอบรากฟันเทียม
3. การนำฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมมาใช้แทนฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนกระดูกขากรรไกรล่าง ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างฟันปลอมและกระจุกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงขึ้นไม่มากนัก ดังนั้นหากจะนำฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมมาใช้ในทางปฏิบัติต้องมีการตรวจสอบอย่างระมัดระวังมิให้ความเค้นที่สูงขึ้นก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างฟันปลอมและกระจุกรอบรากฟันเทียมได้ แต่หากต้องการความมั่นใจในการใช้งานจริงอาจจะต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางประการเพื่อให้

ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับการใช้ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม ซึ่งมีแนวทางดังต่อไปนี้

- 3.1 ลดความยาวของส่วนยื่นด้านท้าย ทำให้โมเมนต์ที่เกิดจากแรงบิดเคี้ยวบนโครงโลหะมีค่าลดลง
- 3.2 ปรับเปลี่ยนรูปทรงหลักยึด ซึ่งสามารถแก้ปัญหาความเค้นสูงสุดบนโครงโลหะได้ แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียม โดยการปรับเปลี่ยนรูปทรงของหลักยึดรากฟันเทียมมีข้อควรระวังคือ การปรับเปลี่ยนต้องไม่ทำให้การกระจายแรงและโมเมนต์บนรากฟันเทียมเปลี่ยนไปจนทำให้ความเค้นสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าสูงขึ้นกว่าเดิม
- 3.3 การเปลี่ยนโครงโลหะจากไททานเนียมอัลลอยเป็นโคบอลต์อัลลอยซึ่งมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้โมเมนต์ดัดในรากฟันเทียมตัวหลังสุดมีค่าลดลงส่งผลให้ความเค้นสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมและกระดูกรอบรากฟันเทียมมีค่าลดลง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาความเค้นสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมได้อย่างสิ้นเชิงเพราะสามารถลดความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอมจนกระทั่งมีค่าต่ำกว่าจุดครากของโลหะ แต่สามารถแก้ปัญหาโดยการลดค่าความเค้นสูงในกระดูกรอบรากฟันเทียมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมที่ลดลงยังมีค่าสูงกว่าในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมอยู่
- 3.4 การเปลี่ยนโครงสร้างฟันปลอมโดยให้โครงโลหะเชื่อมต่อกับหลักยึดรากฟันเทียมแบบจุดหมุน ทำให้มีเพียงแค่แรงแต่ไม่มีโมเมนต์ดัดบนหลักยึดรากฟันเทียม ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถแก้ปัญหาความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมได้อย่างสิ้นเชิงเพราะสามารถลดค่าความเค้นสูงสุดบนกระดูกรอบรากฟันเทียมให้มีค่าต่ำกว่าในฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม แต่ก็มีข้อควรระวังก็คือค่าความเค้นดึงที่กระดูกรอบคอรากฟันเทียมตัวหน้าซึ่งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

## 9.2 ปัญหาที่พบ

1. ความเค้นสูงสุดที่ได้รับความสนใจในการศึกษานี้ อยู่บริเวณที่มีความเค้นสูงเนื่องจากการเกิด Stress Concentration ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดในบริเวณนี้มีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเอลิเมนต์ในจุดนี้เล็กลงโดยไม่ผู้เข้าหาค่าใดค่าหนึ่ง
2. ลักษณะรูปร่างที่ซับซ้อนของแบบจำลองทำให้เอลิเมนต์ต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดแบบจำลองและต้องใช้เอลิเมนต์จำนวนมาก ดังนั้นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำมากและความเร็วในการประมวลผลสูง แต่เนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณนั้นเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลซึ่งมีข้อจำกัดทั้งด้านหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผล ทำให้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่มีจำนวนเอลิเมนต์มากกว่านี้ได้
3. การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของกระดูกขากรรไกรยังมีอยู่จำกัด และไม่สามารถวัดคุณสมบัติโดยตรงจากกระดูกขากรรไกรล่างที่นำมาสร้างแบบจำลองได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำร้อยละหนึ่งได้ การวิเคราะห์ความเค้นบนแบบจำลองจึงจำเป็นต้องทำในรูปแบบของเชิงเปรียบเทียบโดยจำกัดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
4. การทำ CT Scan ซึ่งเป็นการถ่ายภาพด้วยรังสีนั้นอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างแบบจำลองขากรรไกรล่างจำนวนมากให้ครอบคลุมกับลักษณะขากรรไกรของมนุษย์กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งได้

### 9.3 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อความแม่นยำควรนำผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปตรวจสอบเทียบเคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดทางคลินิก หรือการตรวจวัดความเค้นด้วย Strain Gauge
2. หากต้องการให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มี Accuracy มากขึ้นควรแบ่งให้เอลิเมนต์มีความละเอียดมากกว่านี้ นั่นก็คือต้องคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพมากกว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีอยู่ในปัจจุบัน
3. ควรมีการศึกษาวิจัยคุณสมบัติเชิงกลของกระดูกให้มากกว่าในปัจจุบันซึ่งจะสามารถกำหนดคุณสมบัติที่แน่นอนของกระดูกได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ทำให้ค่าความเค้นที่คำนวณได้ออกมามีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงด้วย
4. ควรจะสร้างแบบจำลองขากรรไกรล่างจำนวนมากเพื่อใช้ในการศึกษา จะทำให้สามารถวิเคราะห์ในเชิงสถิติได้
5. การปรับปรุงฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมนั้นยังสามารถทำได้อีกหลายแบบ โดยต้องคำนึงถึงลักษณะและคุณสมบัติทางชีววิทยาของช่องปากด้วย

## บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2540. กลศาสตร์ของวัสดุ. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2542. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัญชลี ตั้งจาดูรณศิริศรี. 2545. การวิเคราะห์การกระจายของแรงเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในพื้นที่ปลอมติดแน่นชนิดไฮบริดที่พื้นผิวประชิดของรากเทียมและกระดูกอันเป็นผลมาจากจำนวนรากเทียมและตำแหน่งของรากเทียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Andersen, K. L., Pedersen, E. H. and Melsen, B. 1991. Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament. Am J Orthod Dentofac Orthop 99 (1991) :427-440.
- Becker, W., Becker, B. E. and Israelson, H. 1997. One step surgical placement of Brånemark implants: a prospective clinical multicenter study. Int J Oral Maxillofac implants 12(1997):454-462.
- Beer, F.P. and Johnston, R., Jr. 1992. Mechanics of materials. 2 nd ed. London: McGraw-Hill
- Bidez, M. W., Chen, Y., Mcloughlin, S. W. and English, C. E. 1992. Finite element analysis (FEA) studies in 2.5 mm round bar design: The effects of bar length and material composition on bar failure. J oral Implantol 18(1992):122-128.
- Budynas, R.G. 1999. Advanced strength and applied stress analysis. 2 nd ed. Boaton: McGraw-hill
- Collaert, B., deBryne, H. 1998. Comparison of Brånemark fixture integration and short-term survival using one-stage or two-stage surgery in completely and partially edentulous mandibles. Clin Oral Impl Res 9(1998):131-135.
- Cook, R.D. 1995. Finite element modeling for stress analysis. New York: John Wiley & Sons
- Duelli, A. J. 1967. Applied stress analysis. New Jersey: Prentice-Hall
- Elias, J., Brunski, J. B. 1991. 3-D Finite element analysis of axial loads on dental implants [Abstracts]. J Dent Res 70(1991):460.

- Ericsson, I., Randaw, K., Nilner, K. and Petersson, A. 1997. Some clinical and radiographical features of submerged and non-submerged titanium implants. A 5 year follow-up study. Clin Oral Impl Res 8(1997):422-426.
- Guerra, L. R. and Cardash, H. S. 1995. Hybrid dentures. In Block, M. S. and Kent, J. N. Endosseous implant for maxillofacial reconstruction, 178-192. W.B. Saunders company.
- Haraldson, T. and Carlsson, G. E. 1997. Bite force and oral function in patients with osseointegrated oral implants. Scand J Dent Res 85(1977):200-208.
- Ismail, Y. H., Pahountis, L. N., and Fleming, J. F. 1987. Comparison of two-dimensional and three-dimensional finite element analysis of a blade implant. Int J oral implantol 4(1987):25-29.
- Lindquist, L. W., Rockler, B. and Carlsson, G. E. 1988. Bone resorption around fixtures in edentulous patients treated with mandibular fixed tissue-integrated prostheses. J Prosthet Dent 1988(59):59-65.
- Lundgren, D., Falk, H., Laurell, L. 1989. The influence of number and distribution of occlusal cantilever contacts on closing and chewing forces in dentition with implant-supported fixed prostheses occluding with complete dentures. Int J Oral Maxillofac Implants 4(1989):277-283.
- Meijer, H.J.A., Kuiper, J. H., Starmans, F.J.M. and Bosman, F. 1992. Stress distribution around the dental implants. J Prosthet Dent 68(1992):96-102.
- Meijer, H. J. A., Starmans, F. J. M., Steen, W. H. A. and Bosman, F.A. 1993. three-dimensional, finite-element analysis of bone around dental implants in an edentulous human mandible. Archs oral Biol 38(1993):491-496.
- Mendelson, M., Brunski, J. B. 1991. Force distribution among dental implants: measurements from laboratory models [Abstracts]. J Dent Res 70(1991):460.
- Moaveni, S. 1999. Finite element analysis: Theory and application with Ansys. New Jersey: Prentice-Hall.
- Monteith, B. D. Minimizing biomechanical overload in implant prostheses: A computerized aid to design. J Prosthet Dent 69(1993):495-502.

- Murphy, W. M., Williams, K. R. And Gregory, M. C. 1995. Stress in bone adjacent to dental implants. J Oral Rehab 22(1995):897-903.
- Rangert, B., Jemt, T., Jorneus, L. 1989. Force and moments on Branemark implants. Int J Oral Maxillofac implants 4(1989):241-247.
- Renouard, F. and Rangert, B. 1999. Treatment of the edentulous mandible. In Renouard, F. and Rangert, B. Risk factors in implant dentistry. Simplified clinical analysis for predictable treatment. 111-142 Chicaco: Quintessence Publishing.
- Shackleton, L., Carr, L., Slabbert, C. and Becker, P. J. 1994. Survival of fixed implant-supported prostheses related to cantilever lengths. J Prosthet Dent 71:23-26.
- Shaoan, W. and Hobkirk, J. A. 1996. Load Distribution on implants with a cantilevered superstructure : An in vitro pilot study. Implant Dent 5(1996):36-42.
- Skalak, R. 1983. Biomechanical considerations in osseointegrated prostheses. J Prosthet Dent 49(1983):843-848.
- Suzuki, T., Kumagai, H., Yoshitomi, N. and McGlumphy, E. A. 1999. Occlusal contacts of edentulous patients with mandibular hybrid dentures opposing maxillary complete dentures. Int J Oral Maxillofac implants 14(1999):504-509.
- Takayama, H. 1989. Biomechanical considerations on osseointegrated implants. In Hobo, S., Ishida, E., Garcia, L. Osseointegration and occlusal rehabilitation 265-280. Tokyo: Quintessence.
- Teixeira, E. R., Sato, Y., Akagawa, Y. and Shindoi, N. 1998. A Comparative evaluation of mandibular finite element models with different lengths and elements for implant biomechanics. J Oral Rehab 25(1998):299-303.
- Waterman, N.A., and Achby, M.F. The material selector. 2 nd ed. Vol.2. London: Chapman & Hall
- White, S. N. and Lewis, S. G. 1992. Framework design for bone-anchored fixed prostheses. J Prosthet Dent 67(1992):264-268.
- Zarb, G. A. and Schmitt, A. 1996. The edentulous predicament II: The longitudinal effectiveness of implant-supported overdentures. J Am Dent Assoc 127 (1996):66-72.
- Zieniewicz, O.C., and Taylor, R.L. 2000. The finite element method. Vol. I: The Basis. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

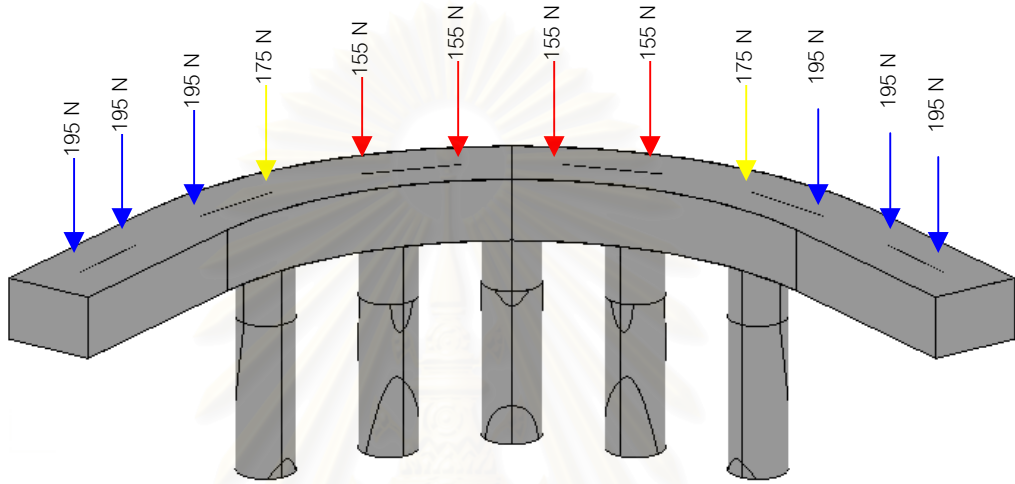


## ภาคผนวก ก

ลักษณะการกระจายความเค้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

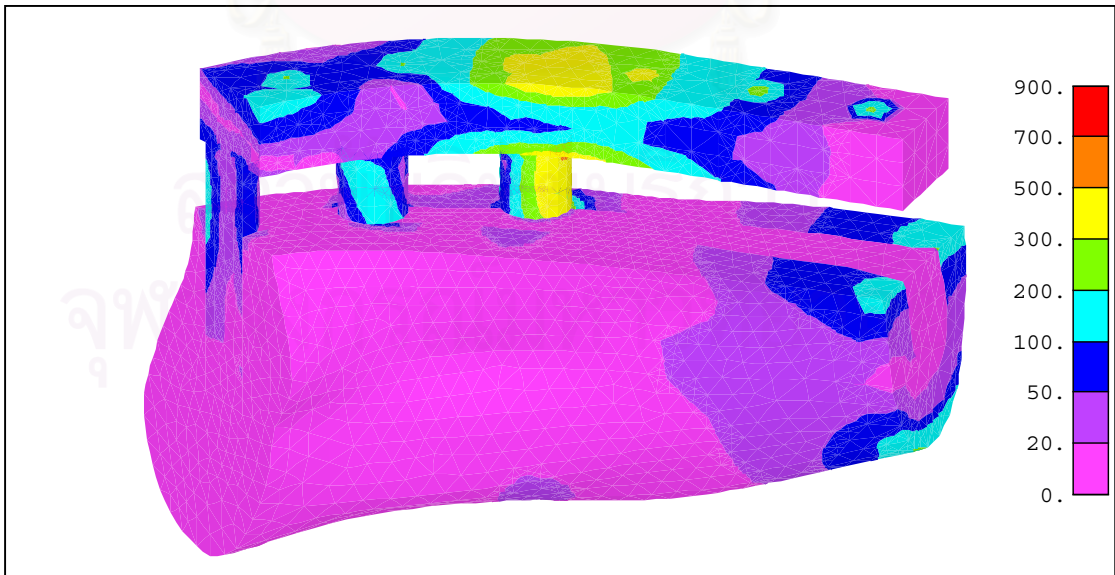
ชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม



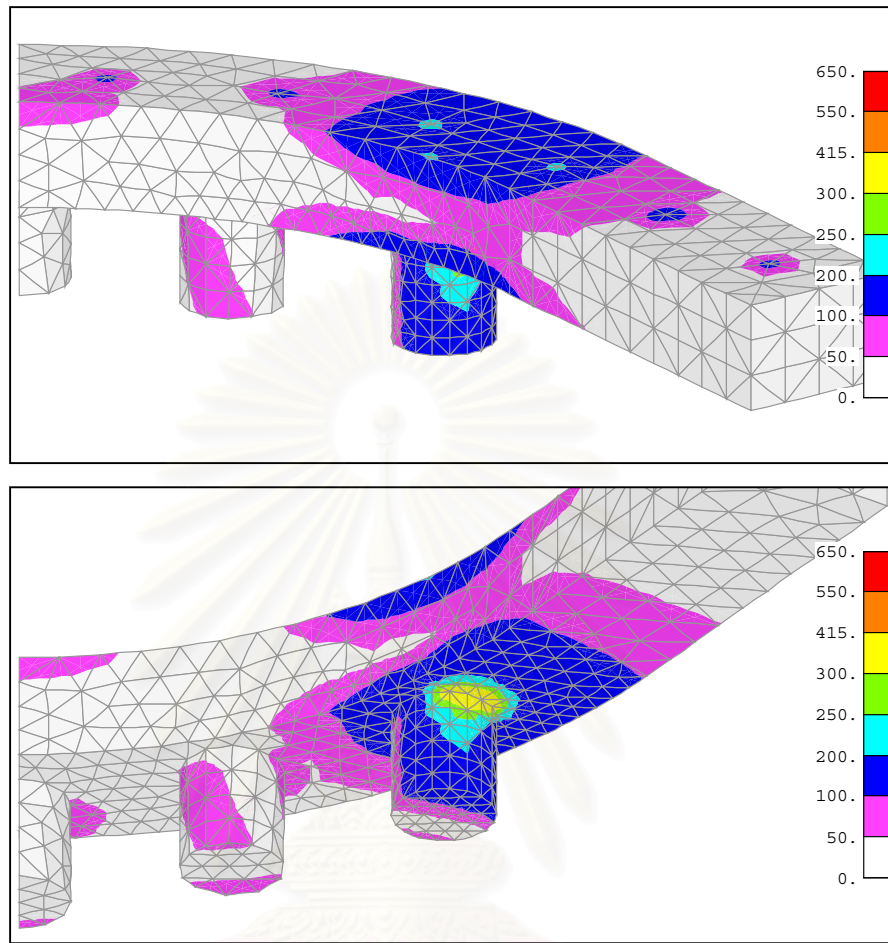
ภาพที่ 1ก ลักษณะของฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Von Mises Stress

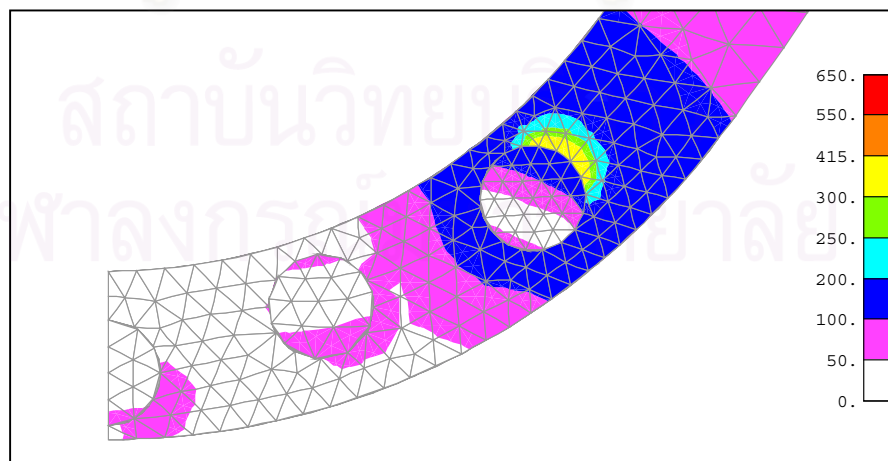


ภาพที่ 2ก การกระจายความเค้น Von Mises Stress(MPa) บนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมบนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในโครงโลหะและหลักยึด

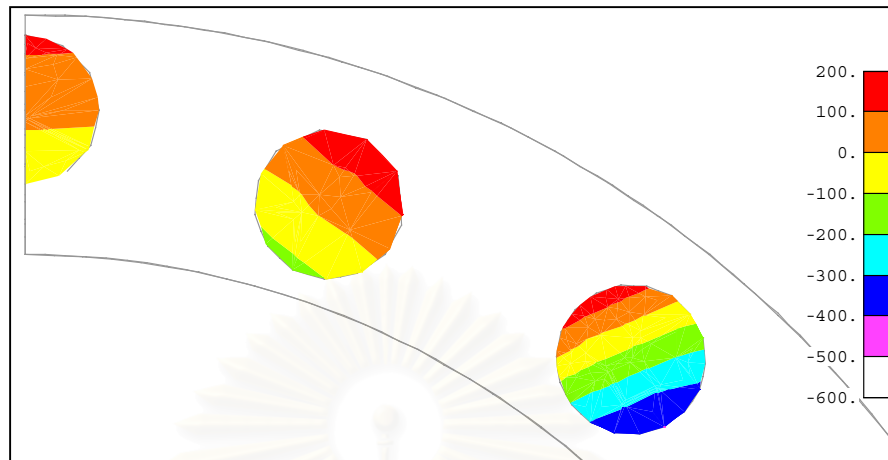


ภาพที่ 3ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนส่วนของโครงโลหะและหลักยึดรอกพันเทียมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รอกพันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N



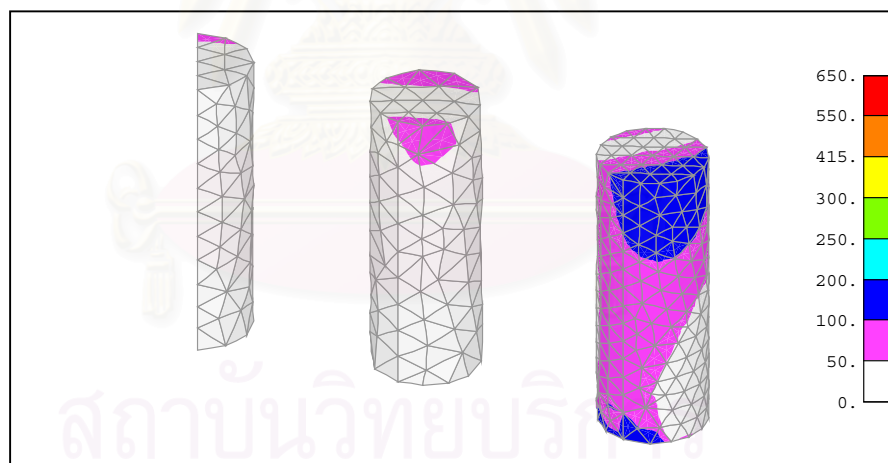
ภาพที่ 4ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) เมื่อมองในมุมกลางของส่วนโครงโลหะและหลักยึดรอกพันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รอกพันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N

Z Normal stress ในหลักยึด



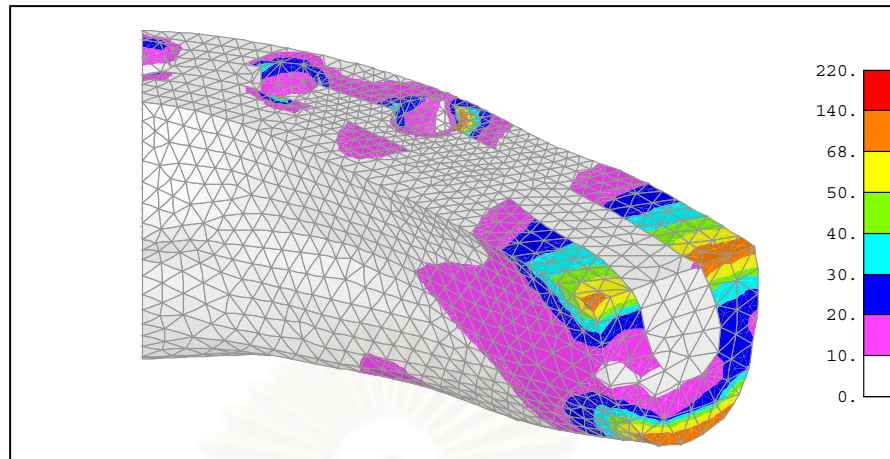
ภาพที่ 5ก การกระจายความเค้นตั้งฉาก (Z Normal Stress,MPa) บนหน้าตัดตั้งฉากกับแนวแกนของหลักยึดรากฟันเทียมที่ระยะกึ่งกลางหลักยึดในแบบจำลองฟันปลอม 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในรากฟันเทียม

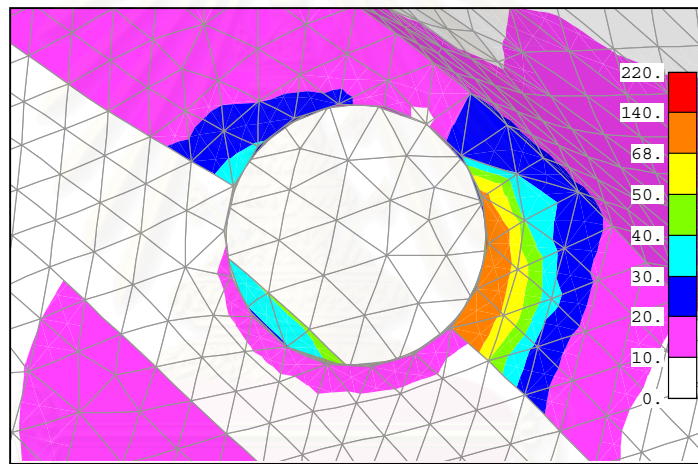


ภาพที่ 6ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

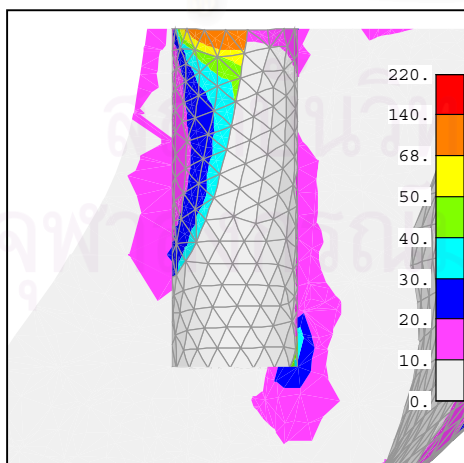
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในกระดุกขากรรไกรล่าง



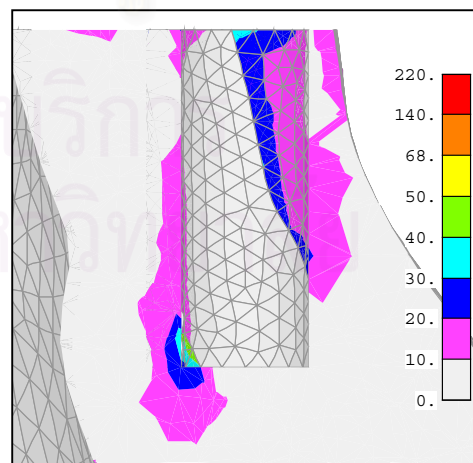
ภาพที่ 7ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

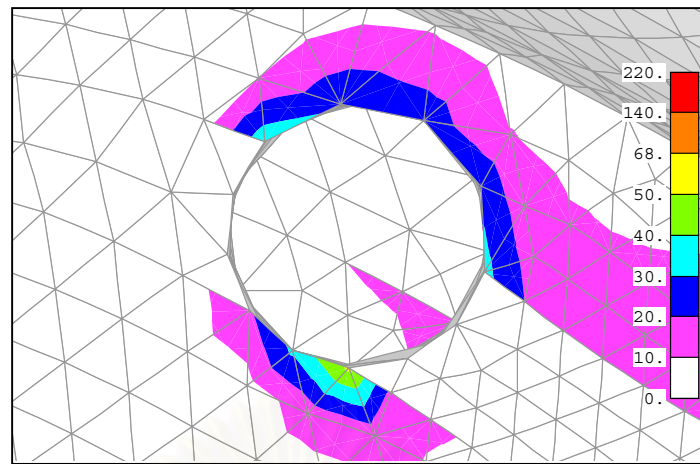


SECTION 1R-1R

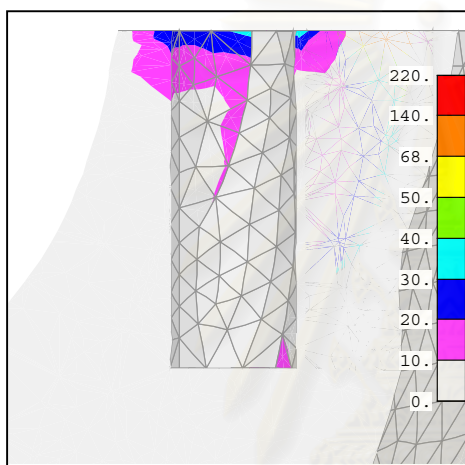


SECTION 1L-1L

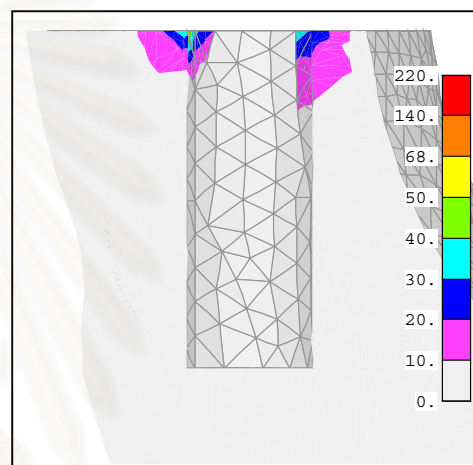
ภาพที่ 8ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

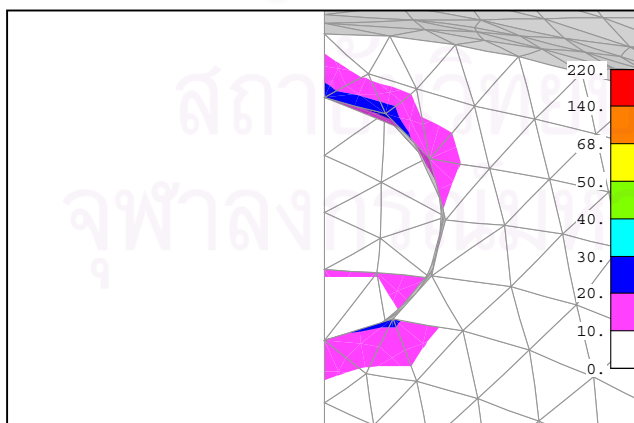


SECTION 2R-2R

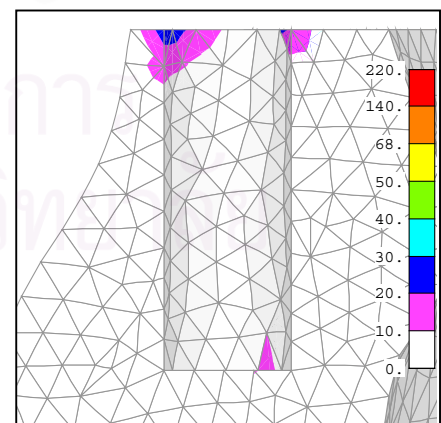


SECTION 2L-2L

ภาพที่ 9ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 2 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

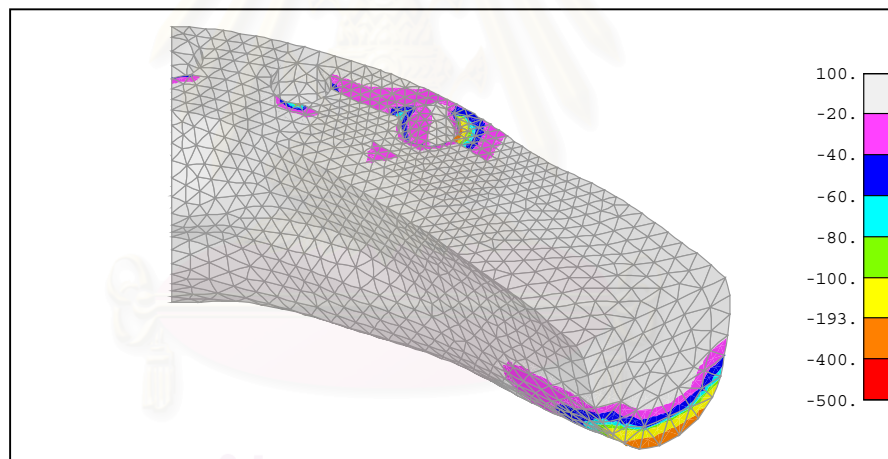


SECTION 3R-3R

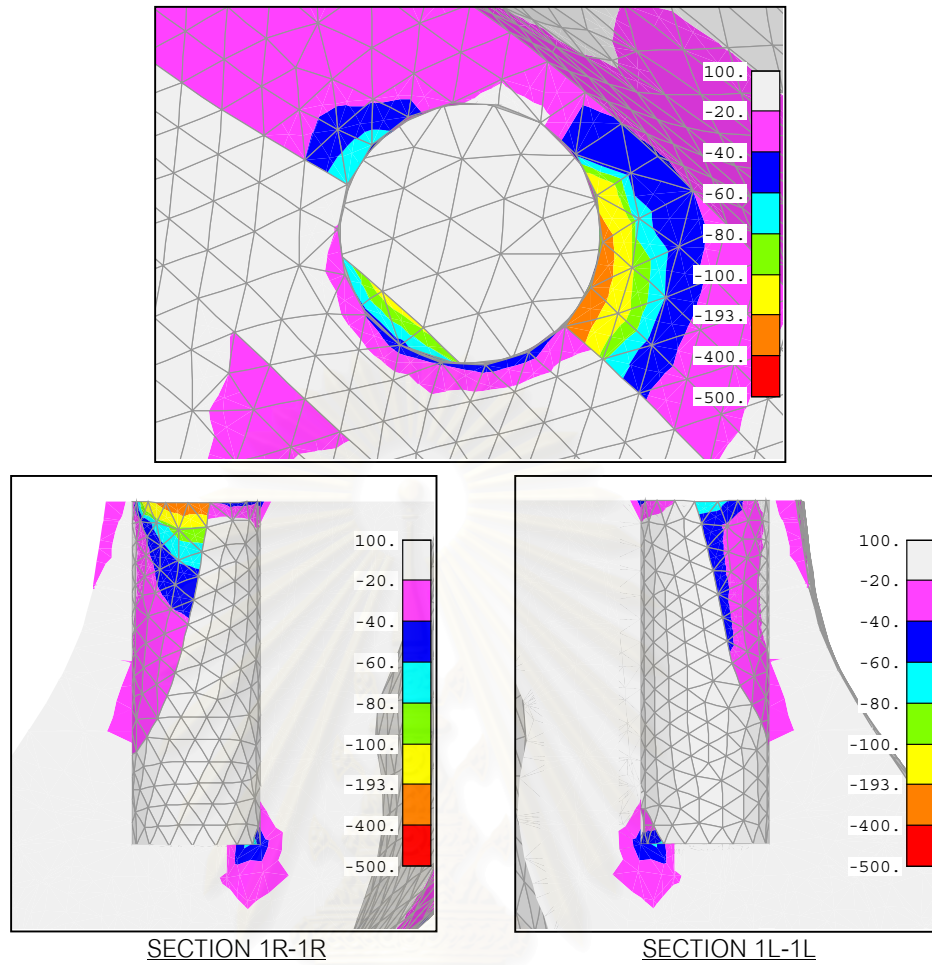
ภาพที่ 10ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

- หมายเหตุ SECTION 1R-1R คือภาพหน้าตัดด้านขวาบนส่วนที่เป็นกระดูกด้วยระนาบซึ่งขนานกับระนาบ YZ ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของรากฟันเทียมตัวที่ 1
- SECTION 1L-1L คือภาพหน้าตัดด้านซ้ายบนส่วนที่เป็นกระดูกด้วยระนาบซึ่งขนานกับระนาบ YZ ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของรากฟันเทียมตัวที่ 1
- SECTION 2R-2R คือภาพหน้าตัดด้านขวาบนส่วนที่เป็นกระดูกด้วยระนาบซึ่งขนานกับระนาบ YZ ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของรากฟันเทียมตัวที่ 2
- SECTION 2L-2L คือภาพหน้าตัดด้านซ้ายบนส่วนที่เป็นกระดูกด้วยระนาบซึ่งขนานกับระนาบ YZ ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของรากฟันเทียมตัวที่ 2
- SECTION 3R-3R คือภาพหน้าตัดด้านขวาบนส่วนที่เป็นกระดูกด้วยระนาบซึ่งขนานกับระนาบ YZ ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของรากฟันเทียมตัวที่ 3

Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง

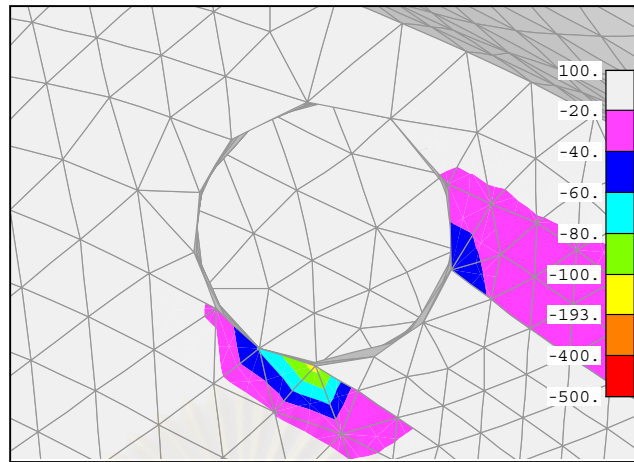


ภาพที่ 11ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

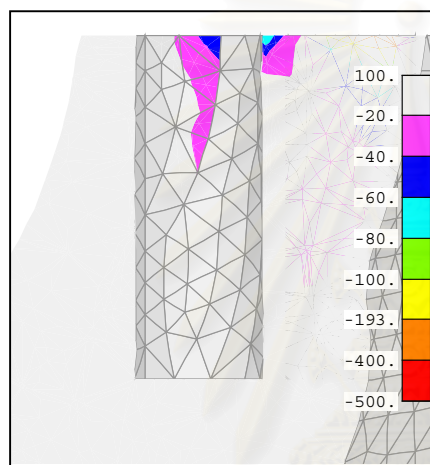


ภาพที่ 12ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

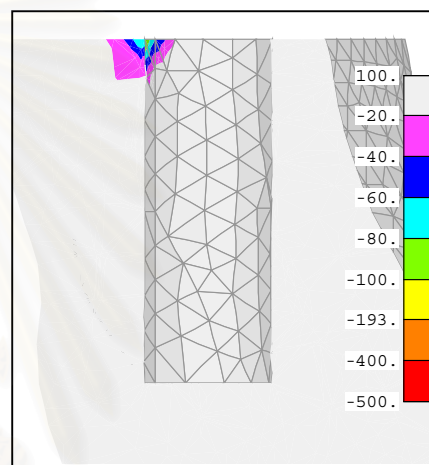
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



TOP VIEW

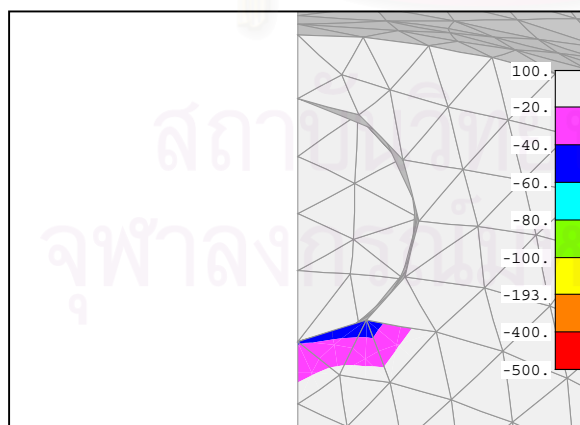


SECTION 2R-2R

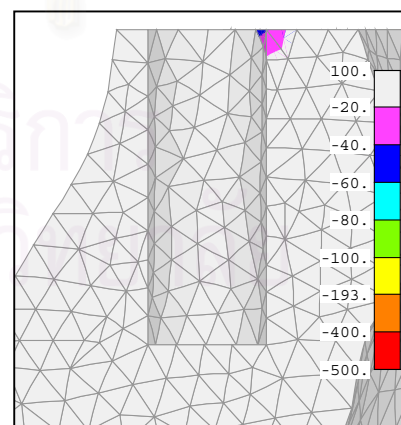


SECTION 2L-2L

ภาพที่ 13ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม ตัวที่ 2 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

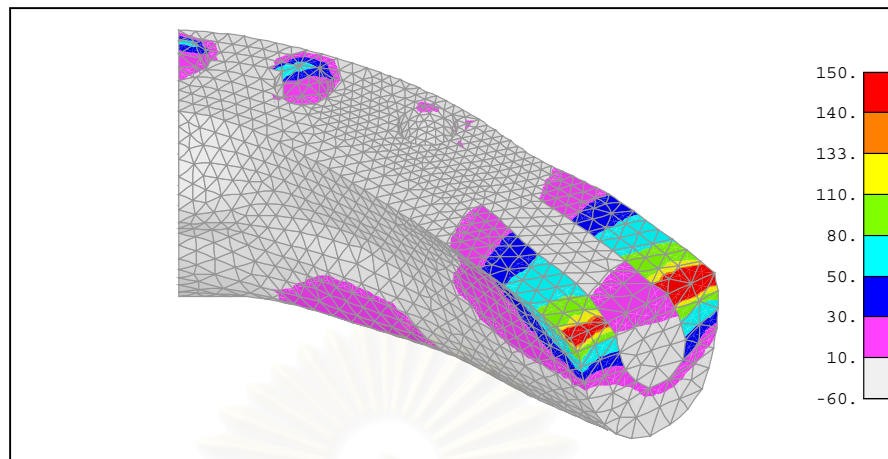


SECTION 3R-3R

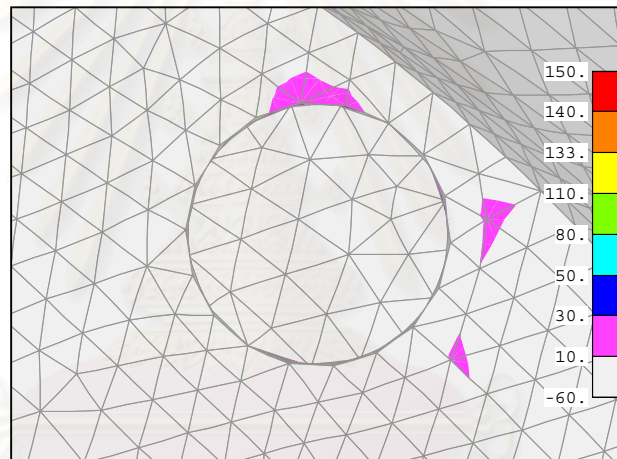
ภาพที่ 14ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



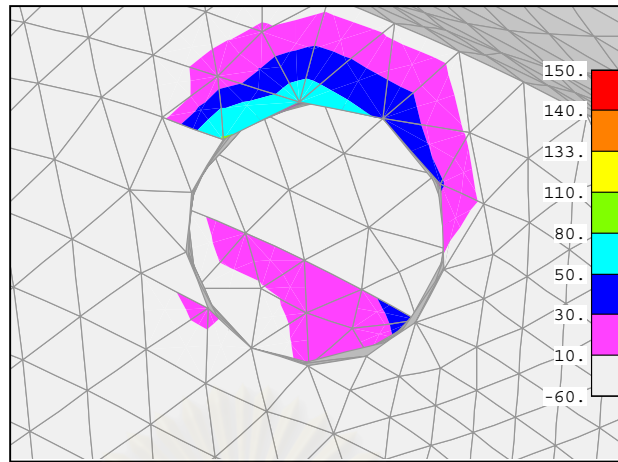
ภาพที่ 15ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N



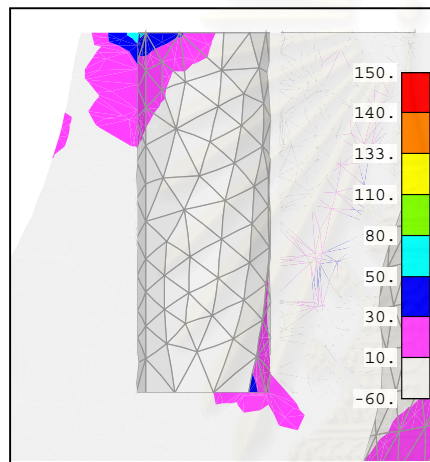
TOP VIEW

ภาพที่ 16ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N

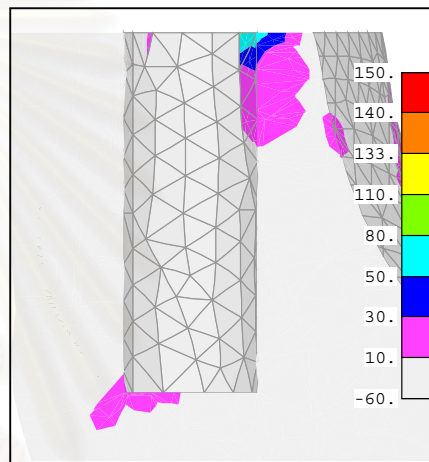
สถาบันนวัตยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



TOP VIEW

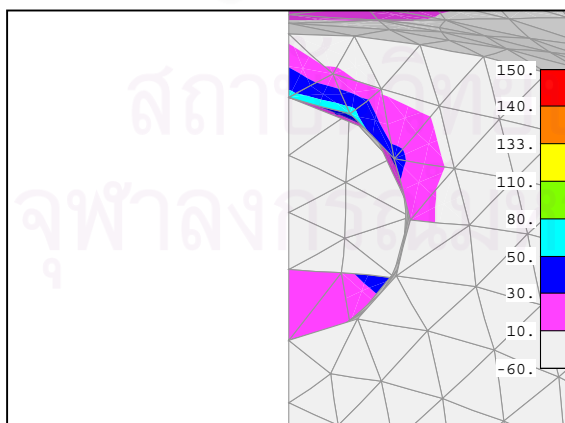


SECTION 2R-2R

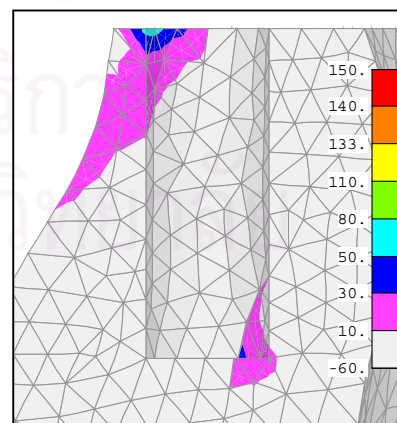


SECTION 2L-2L

ภาพที่ 17ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 2 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

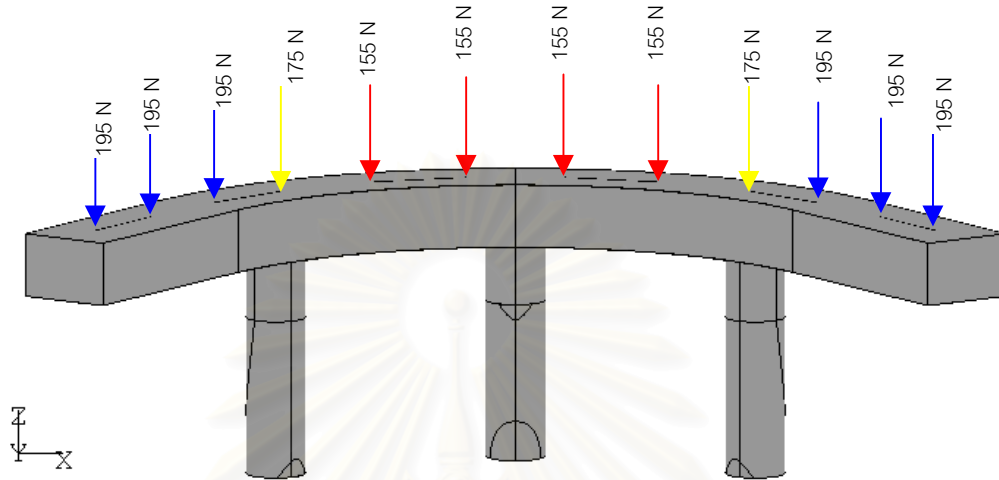


SECTION 3R-3R

ภาพที่ 18ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

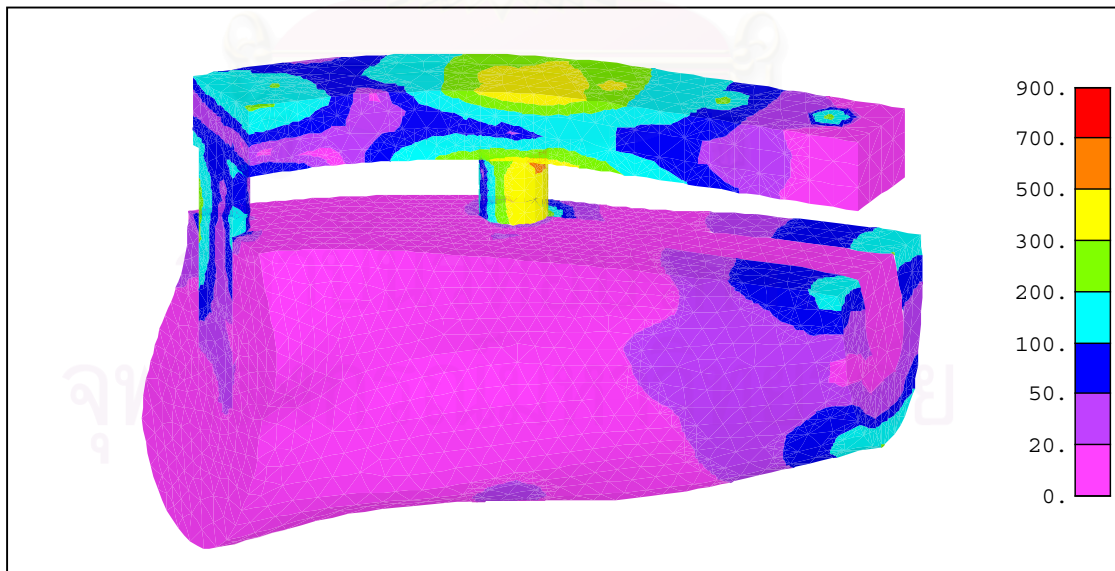
ชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม



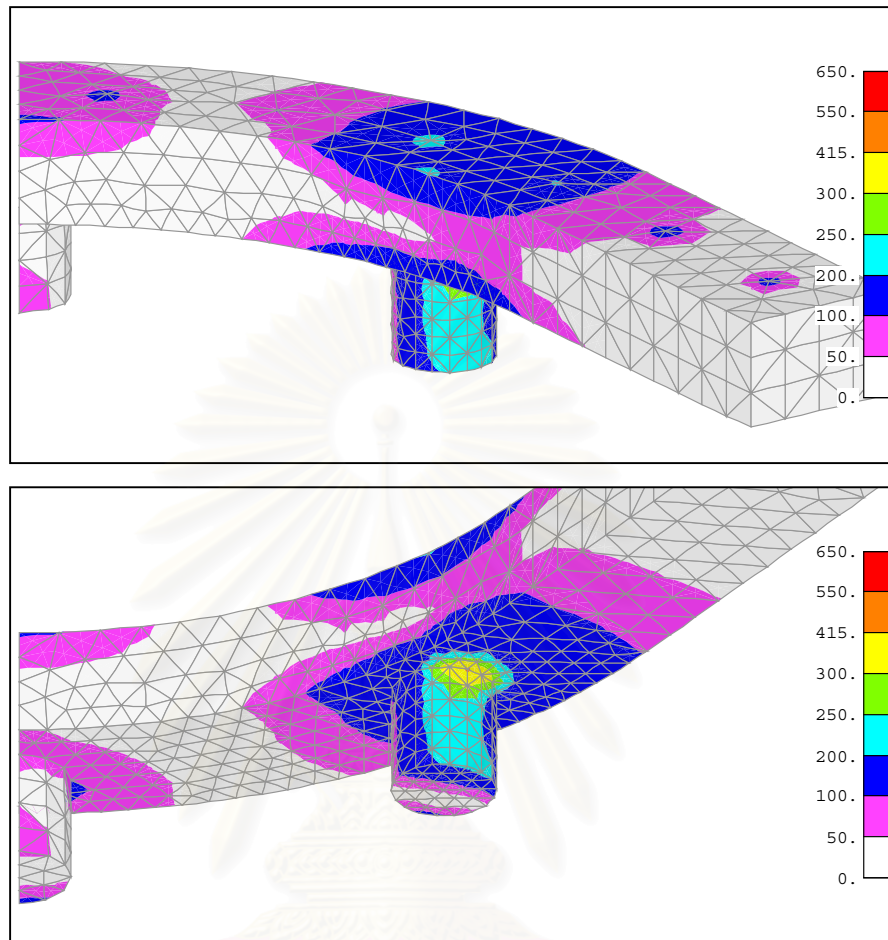
ภาพที่ 19ก ลักษณะของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Von Mises Stress

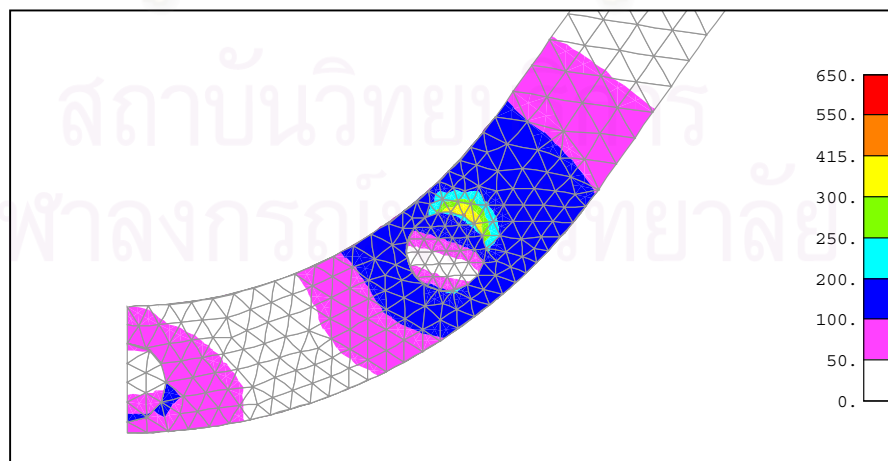


ภาพที่ 20ก การกระจายความเค้น Von Mises Stress(MPa) บนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม บนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในโครงโลหะและหลักยึด

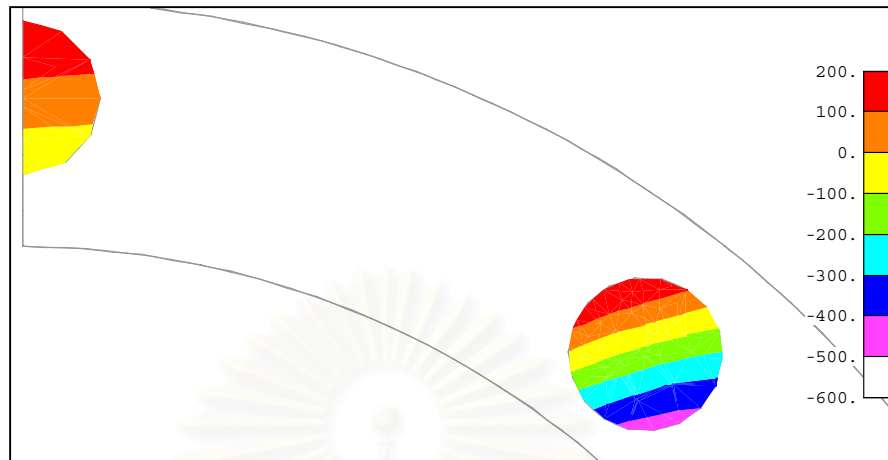


ภาพที่ 21ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนส่วนของโครงโลหะและหลักยึดรอกฟันเฟืองของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รอกฟันเฟืองซึ่งมีชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N



ภาพที่ 22ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) เมื่อมองในมุมมองของส่วนโครงโลหะและหลักยึดรอกฟันเฟืองในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รอกฟันเฟืองซึ่งมีชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N

Z Normal stress ในหลักยึด



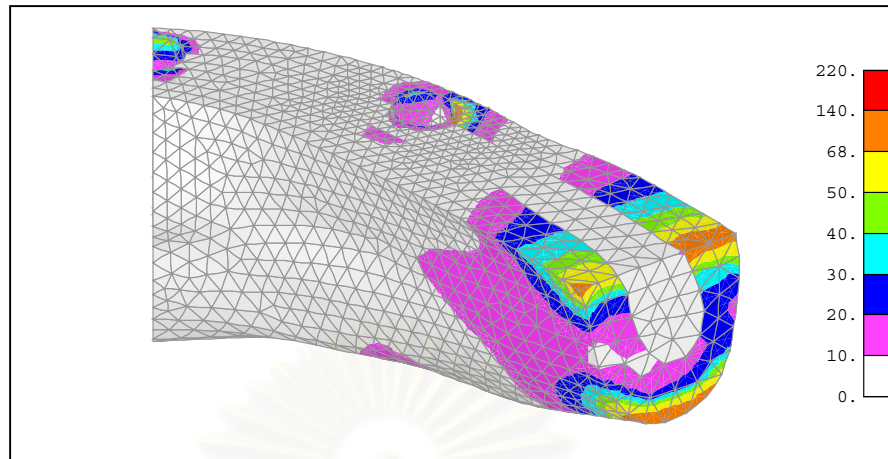
ภาพที่ 23ก การกระจายความเค้นดึงจาก (Z Normal Stress,MPa) บนหน้าตัดตั้งฉากกับแนวแกนของหลักยึดรากฟันเทียมที่ระยะกึ่งกลางหลักยึดในแบบจำลองฟันปลอม 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในรากฟันเทียม

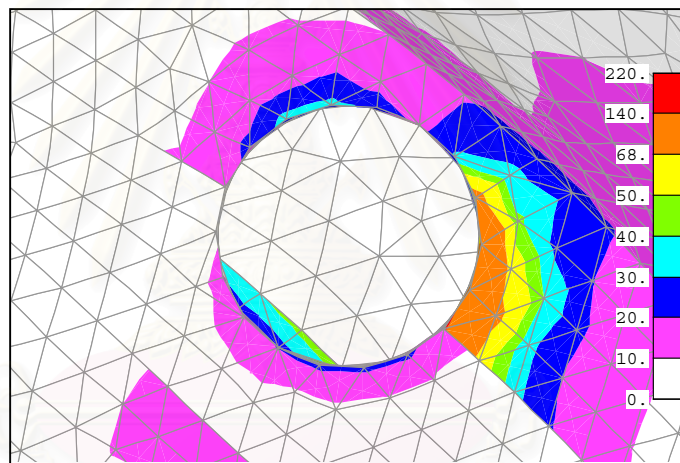


ภาพที่ 24ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N

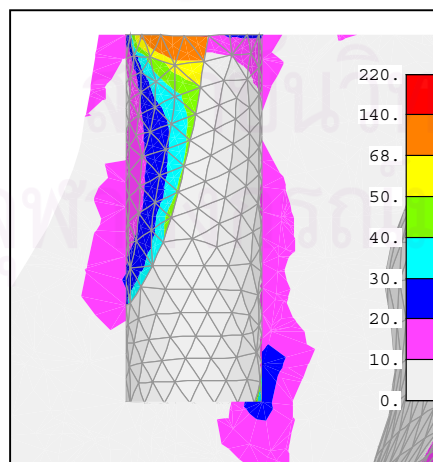
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในกระดุกขากรรไกรล่าง



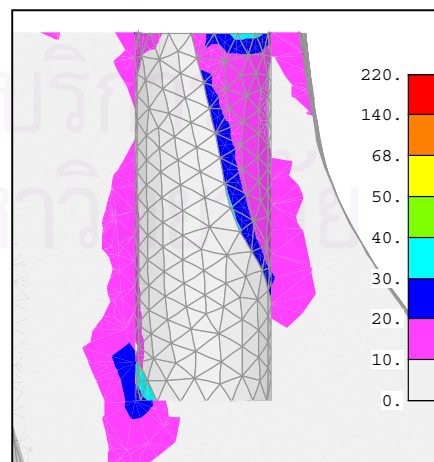
ภาพที่ 25ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

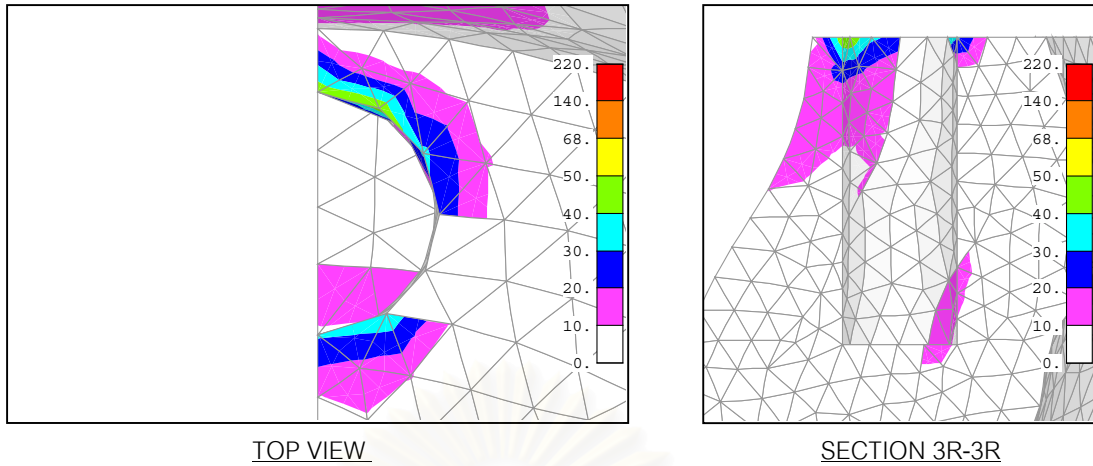


SECTION 1R-1R



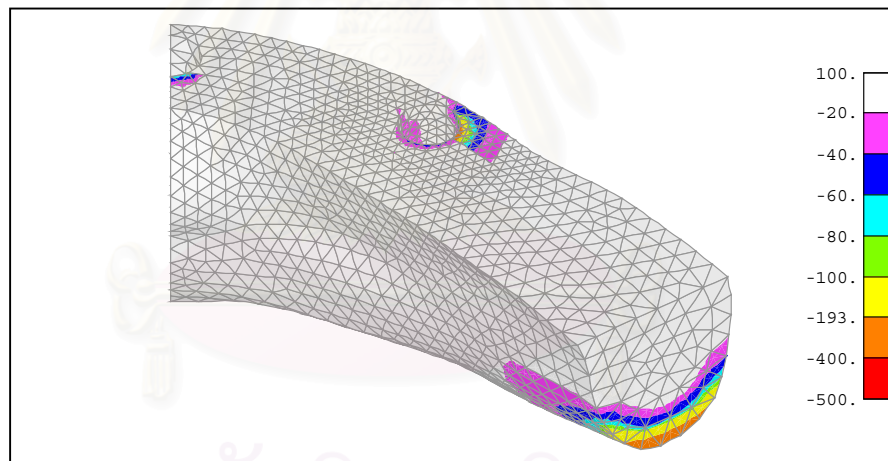
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 26ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุกครอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

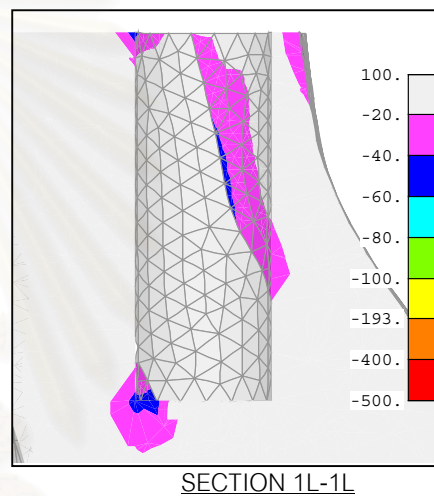
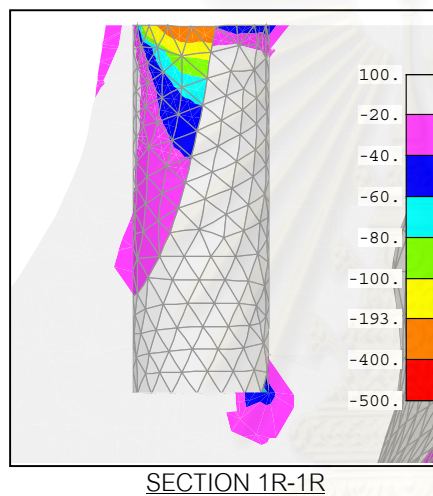
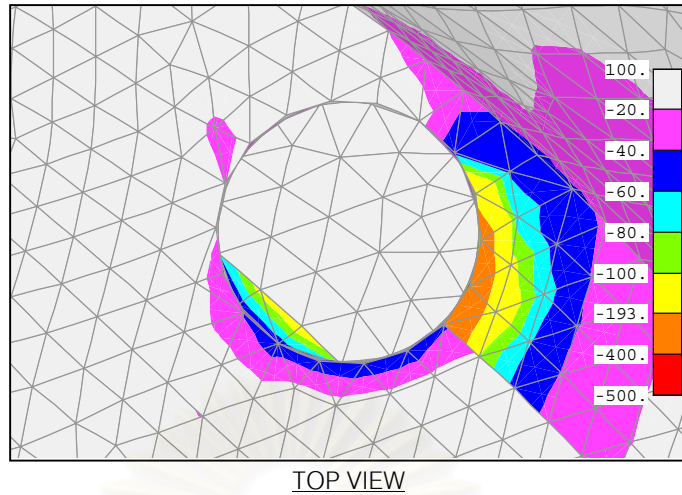


ภาพที่ 27ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

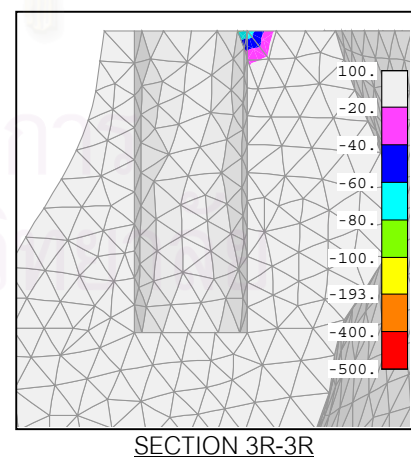
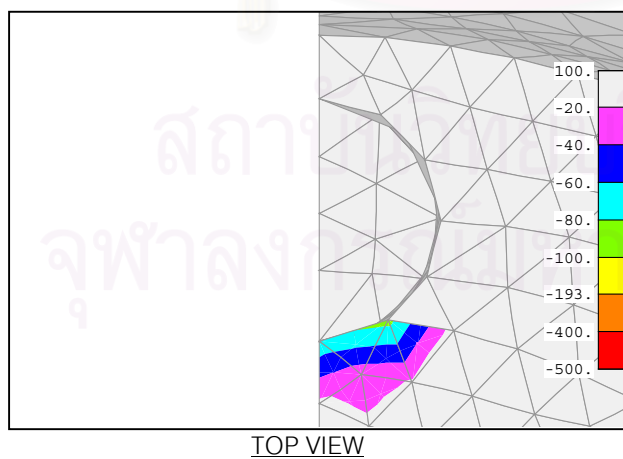
*Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง*



ภาพที่ 28ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



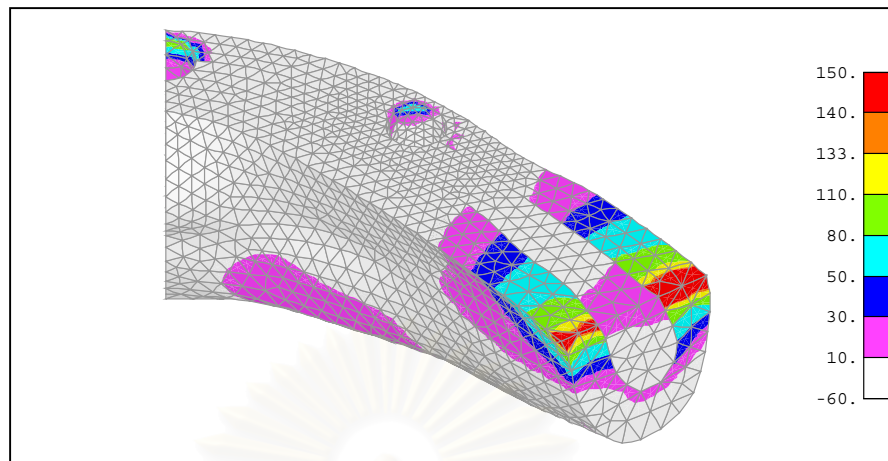
ภาพที่ 29ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



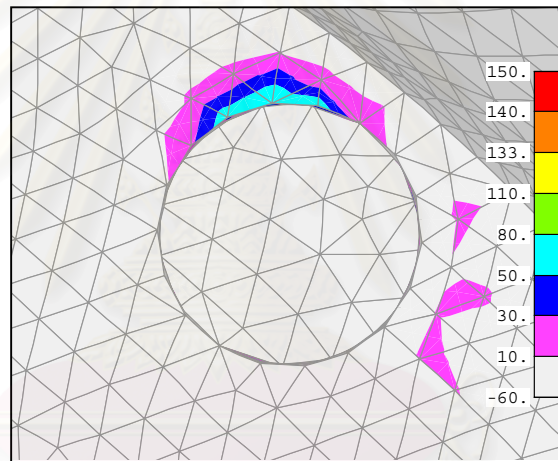
ภาพที่ 30ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



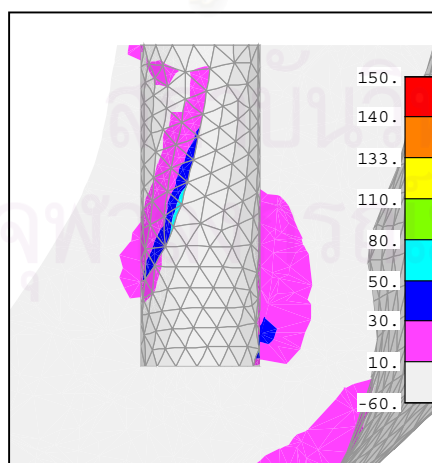
Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



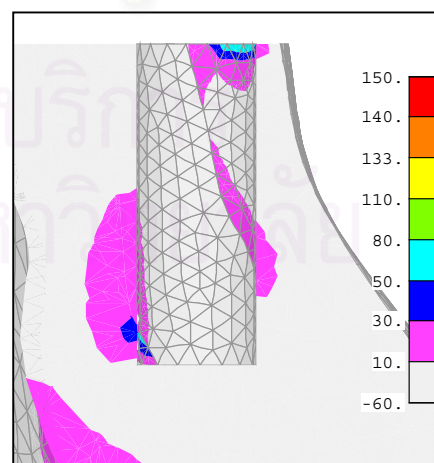
ภาพที่ 31ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

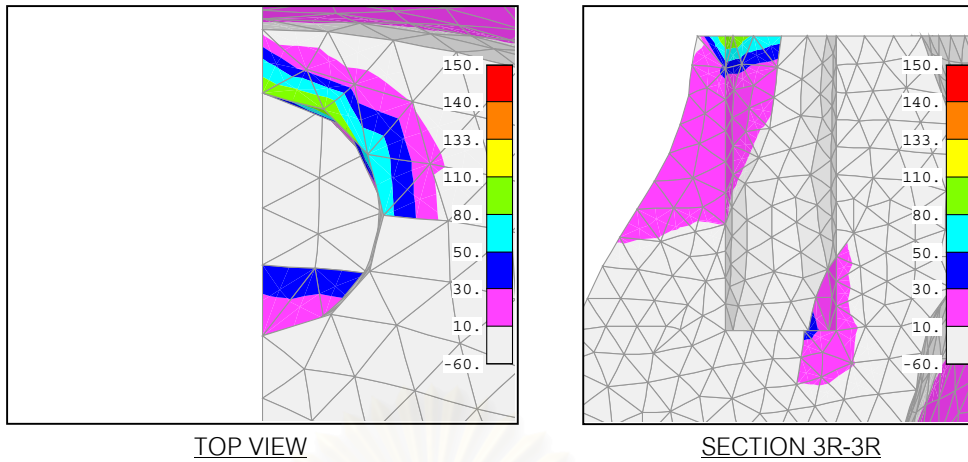


SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

ภาพที่ 32ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

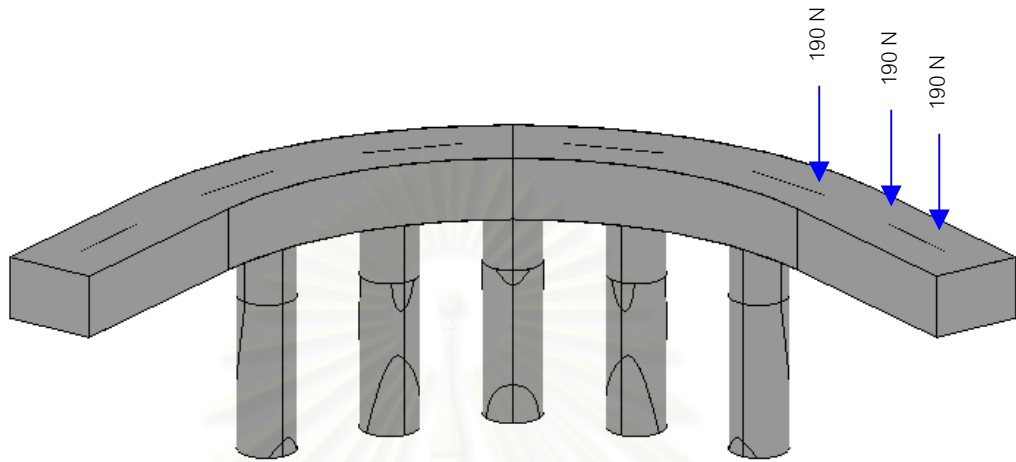


ภาพที่ 33ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม  
ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

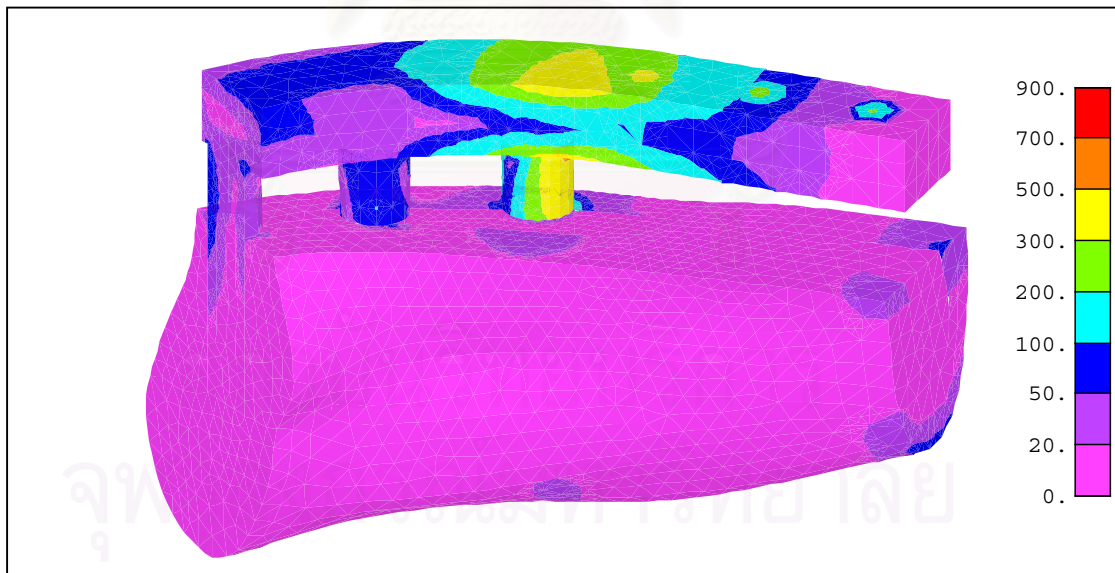
ชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 จากฟันเทียม



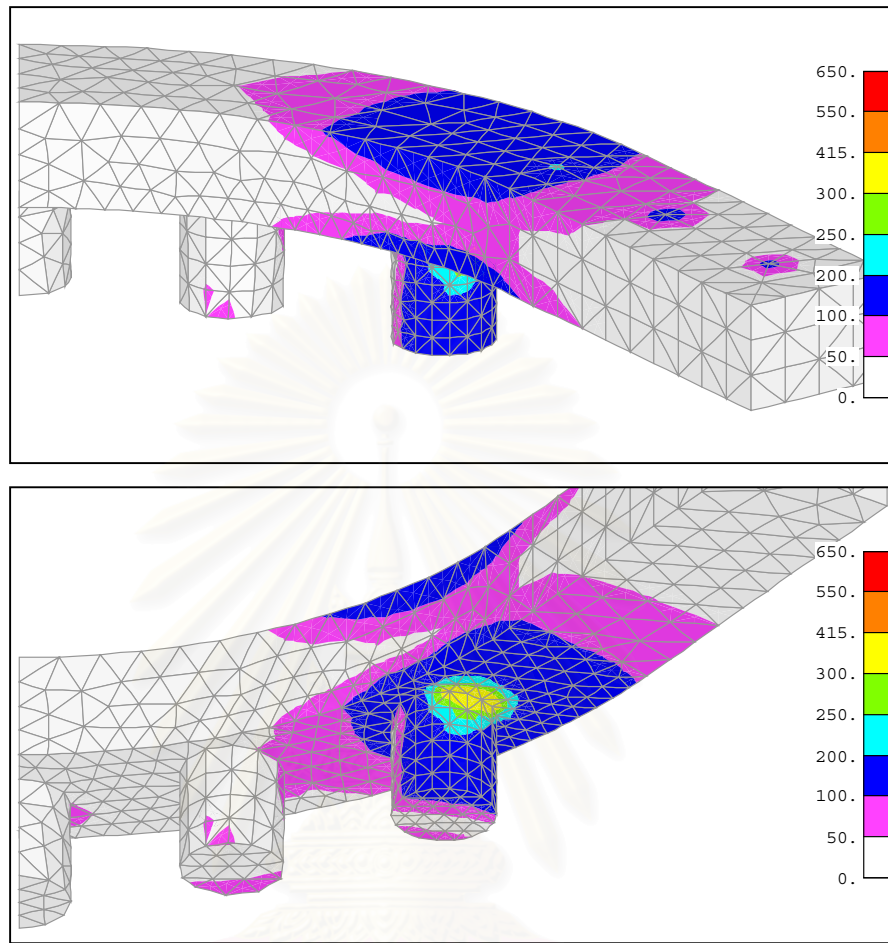
ภาพที่ 34ก ลักษณะของฟันปลอมไฮบริด 5 จากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Von Mises Stress

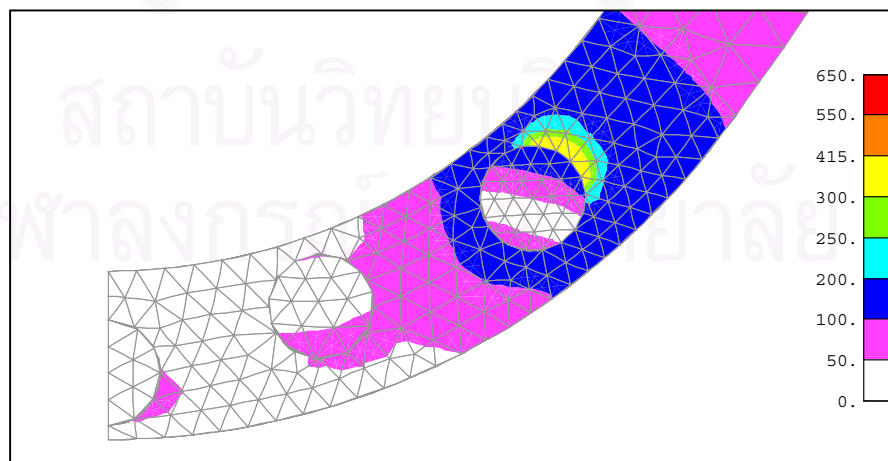


ภาพที่ 35ก การกระจายความเค้น Von Mises Stress(MPa) บนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 จากฟันเทียม บนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในโครงโลหะและหลักยึด

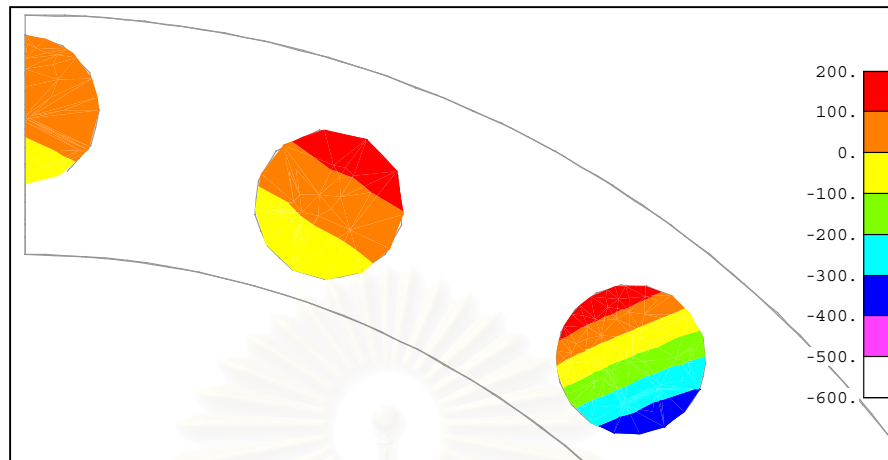


ภาพที่ 36ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนส่วนของโครงโลหะและหลักยึดรอกพันเทียมของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รอกพันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N



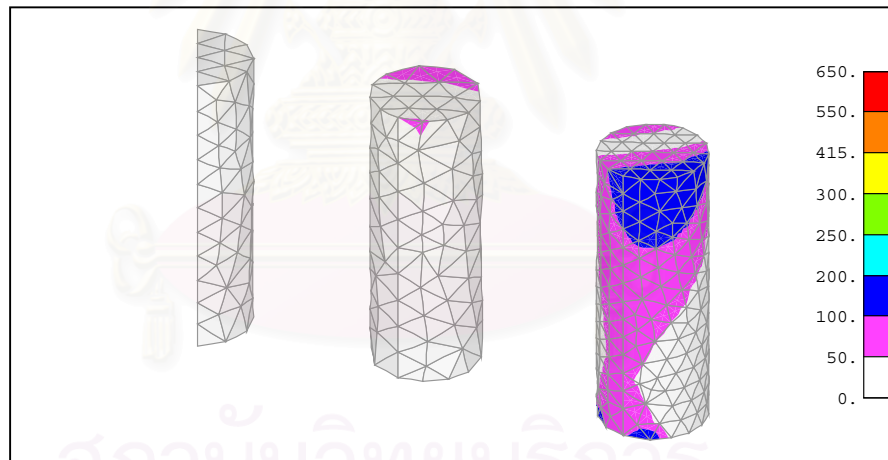
ภาพที่ 37ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) เมื่อมองในมุมกลางของส่วนโครงโลหะและหลักยึดรอกพันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รอกพันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N

Z Normal stress ในหลักยึด



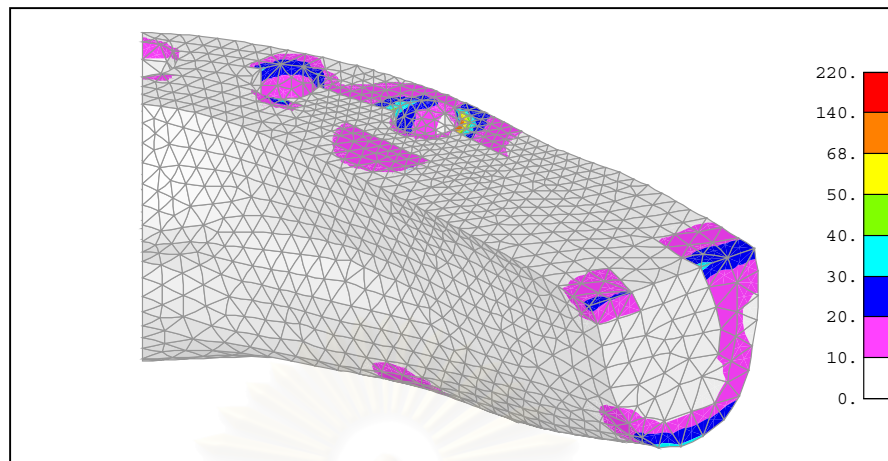
ภาพที่ 38ก การกระจายความเค้นตั้งฉาก(Z Normal Stress,MPa) บนหน้าตัดตั้งฉากกับแนวแกนของหลักยึดรากฟันเทียมที่ระยะกึ่งกลางหลักยึดในแบบจำลองฟันปลอม 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเดียว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในรากฟันเทียม

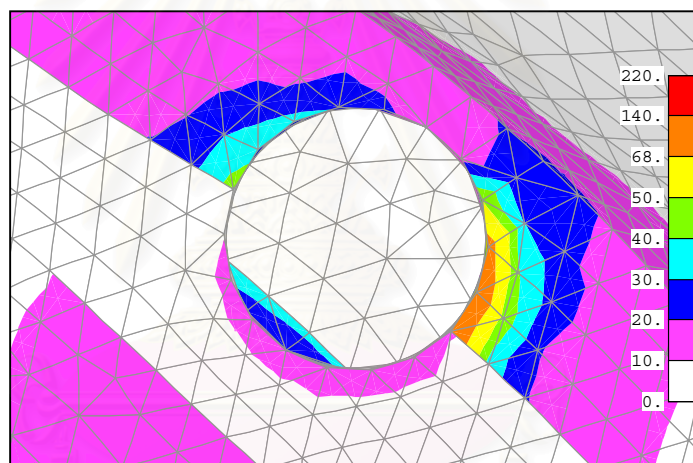


ภาพที่ 39ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเดียว 190 N

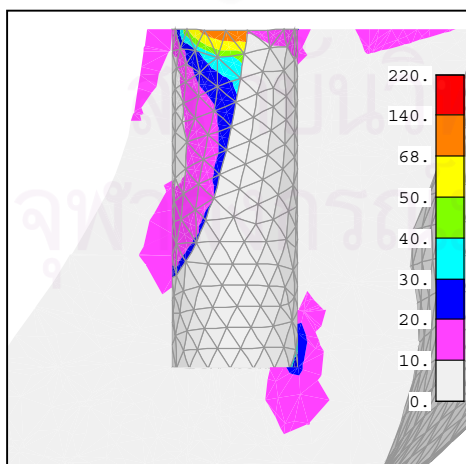
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



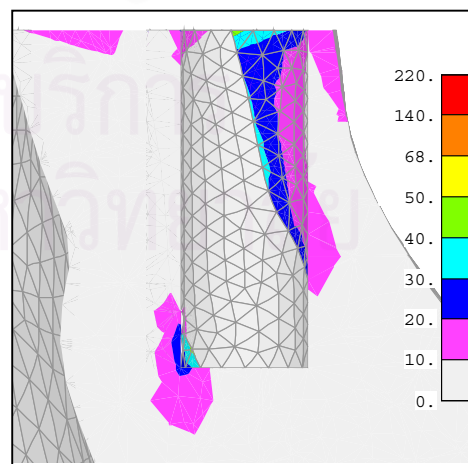
ภาพที่ 40ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

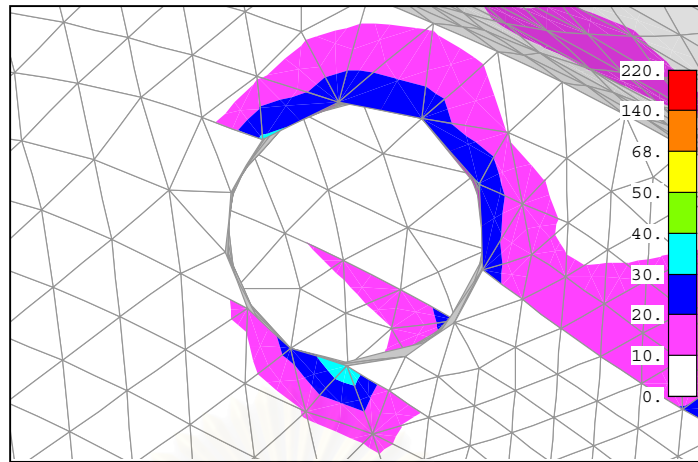


SECTION 1R-1R

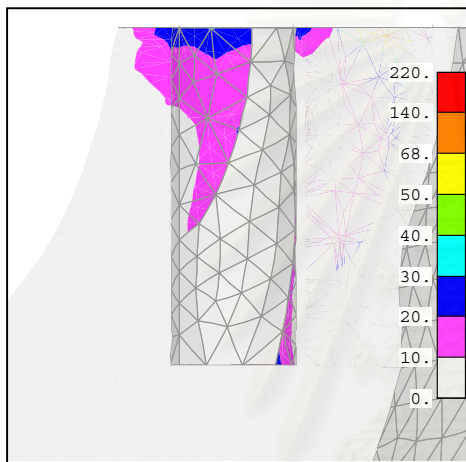


SECTION 1L-1L

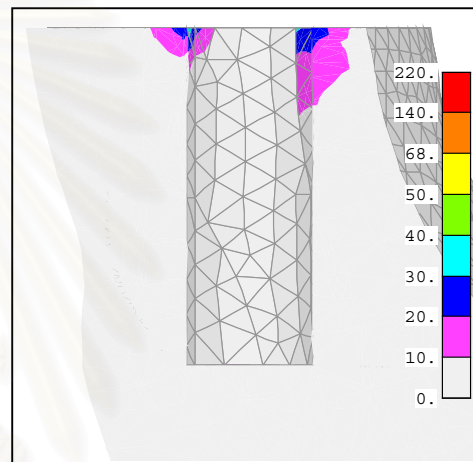
ภาพที่ 41ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

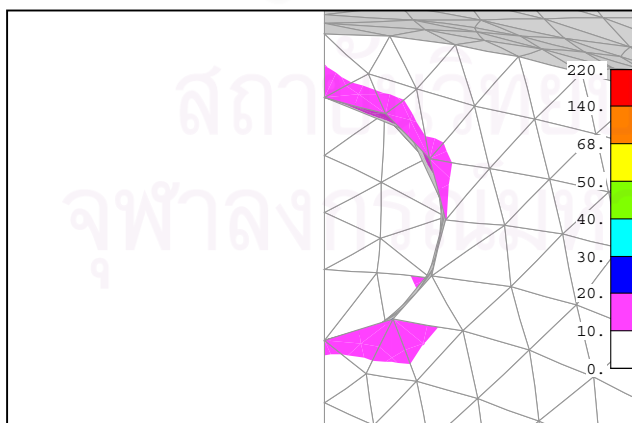


SECTION 2R-2R

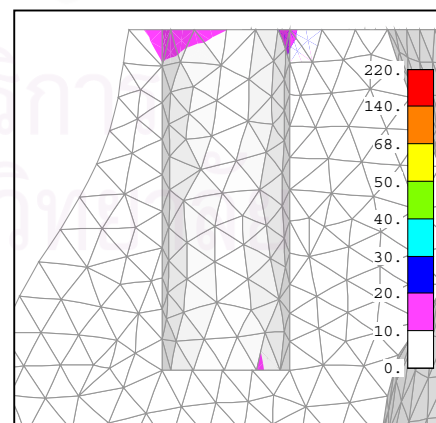


SECTION 2L-2L

ภาพที่ 42ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 2 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



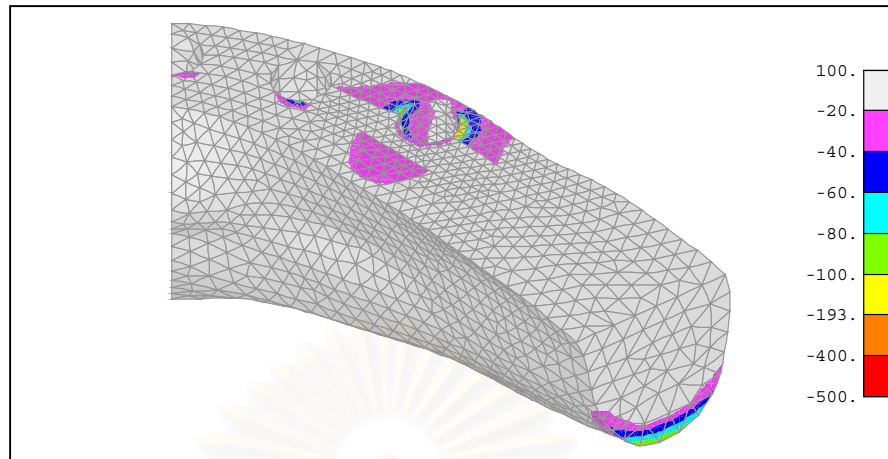
TOP VIEW



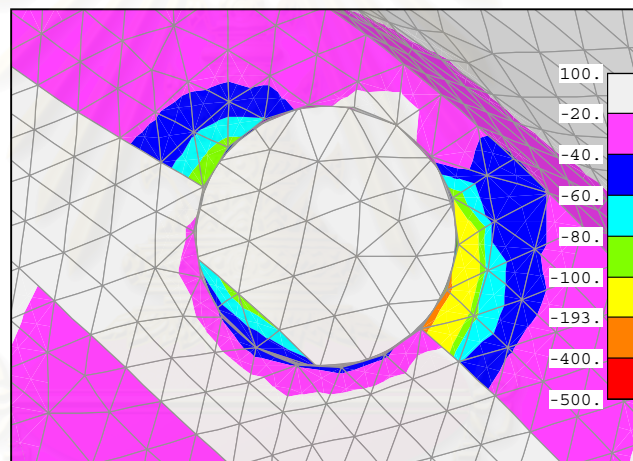
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 43ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

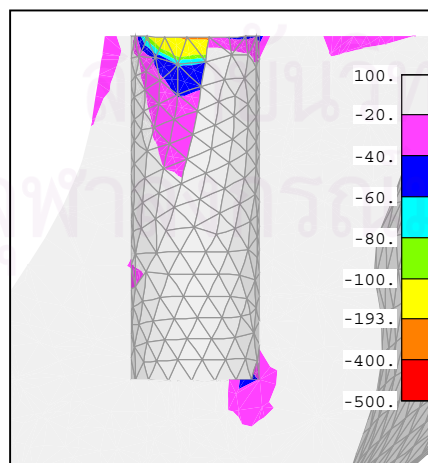
Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



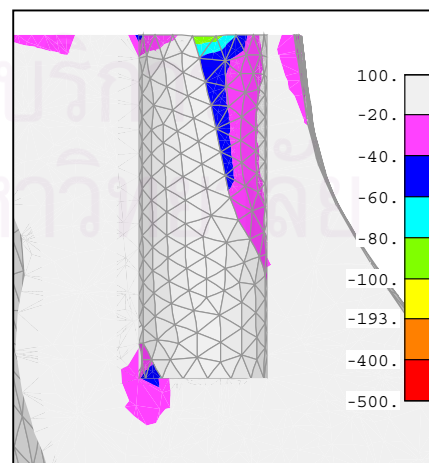
ภาพที่ 44ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบังคับเฉื่อย 190 N



TOP VIEW



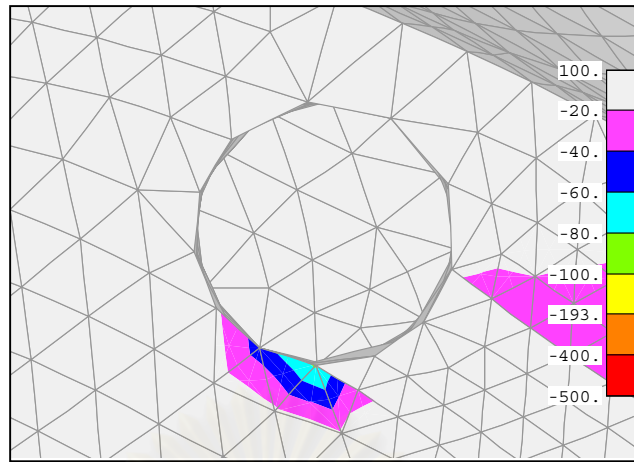
SECTION 1R-1R



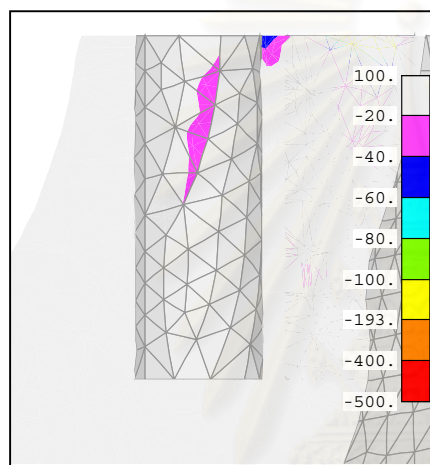
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 45ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa)บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบังคับเฉื่อย 190 N

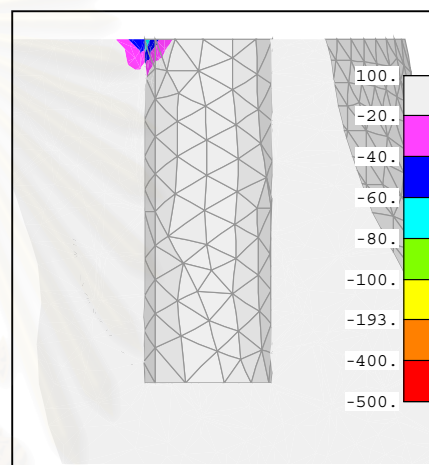




TOP VIEW

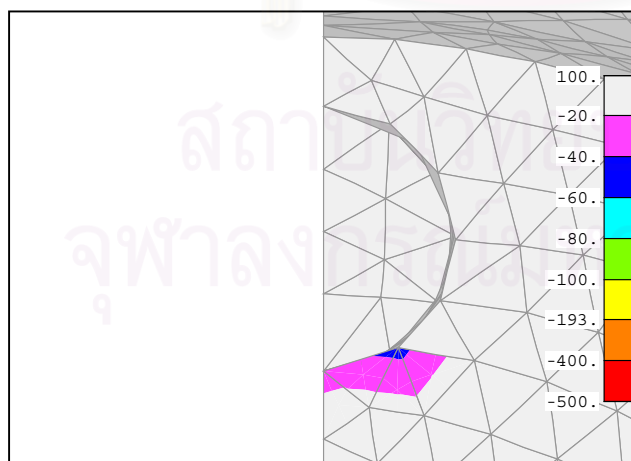


SECTION 2R-2R

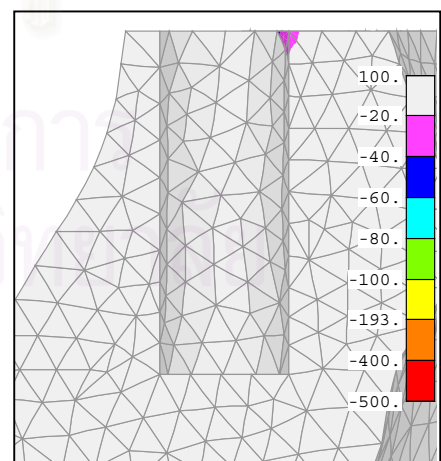


SECTION 2L-2L

ภาพที่ 46ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa)บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 2 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



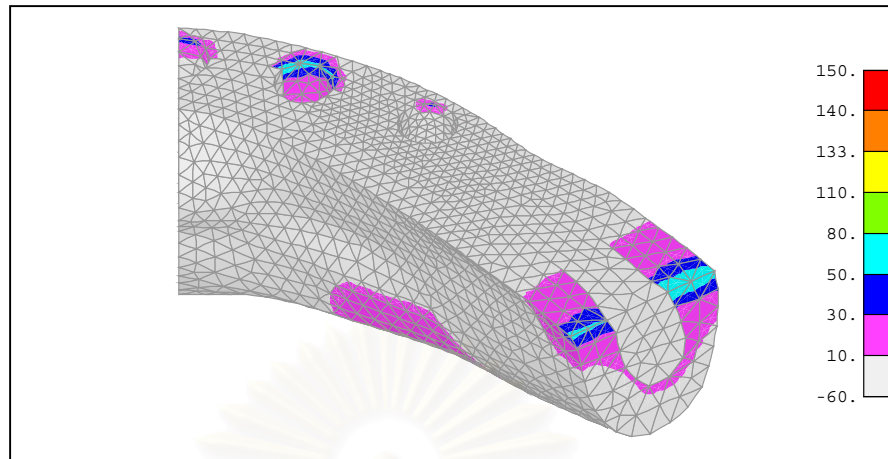
TOP VIEW



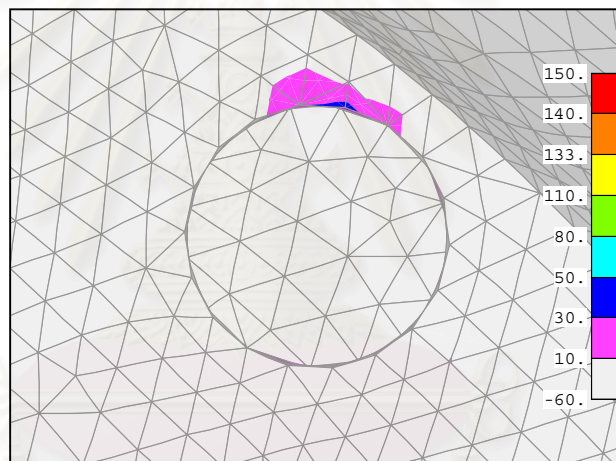
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 47ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa)บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



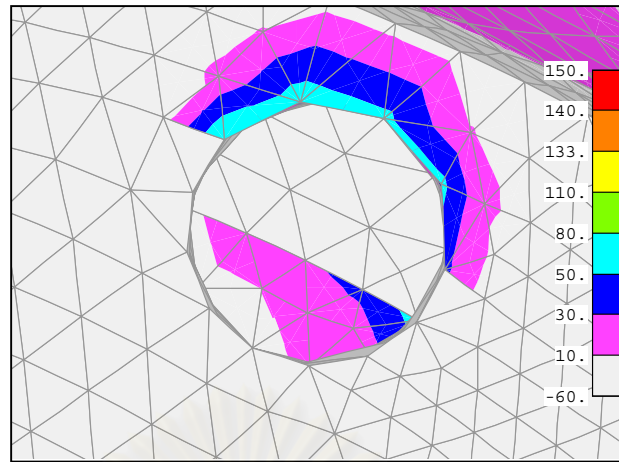
ภาพที่ 48ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่าง ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



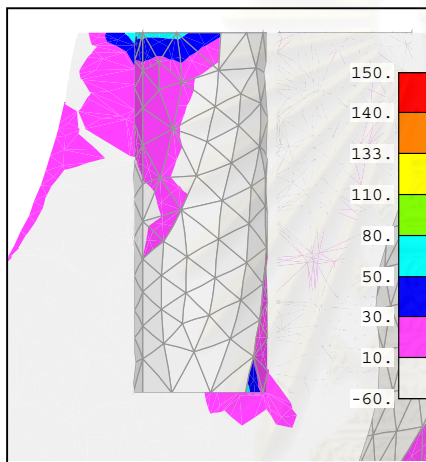
TOP VIEW

ภาพที่ 49ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

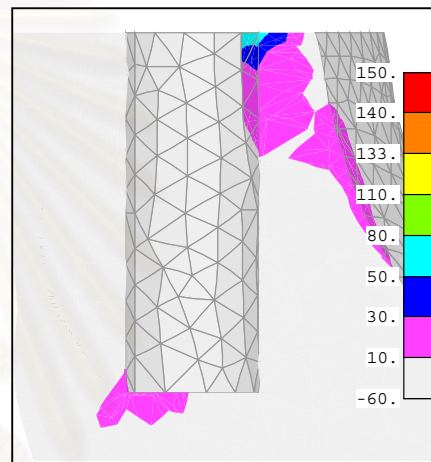
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



TOP VIEW

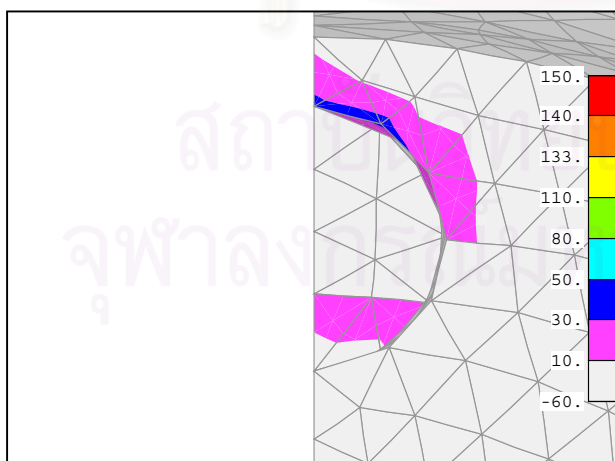


SECTION 2R-2R

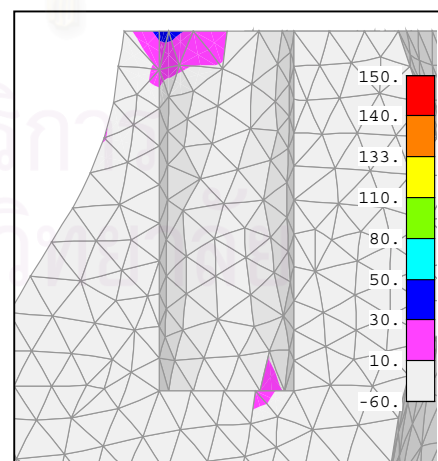


SECTION 2L-2L

ภาพที่ 50ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม ตัวที่ 2 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

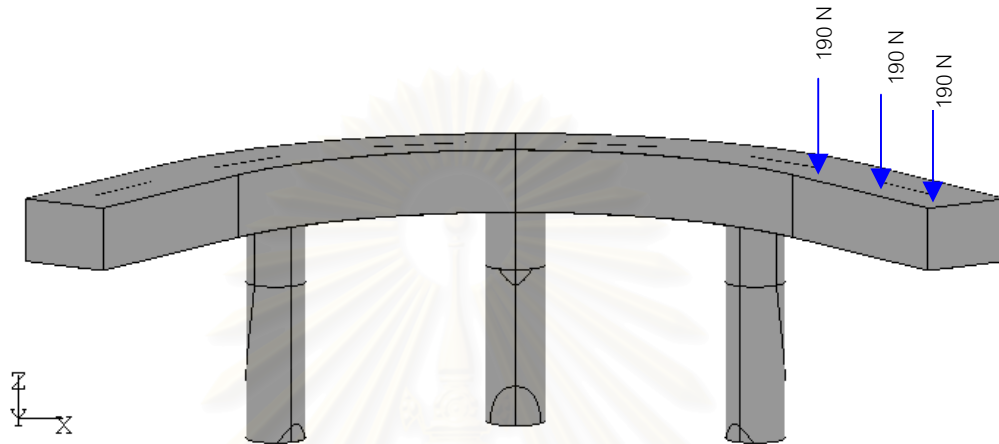


SECTION 3R-3R

ภาพที่ 51ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

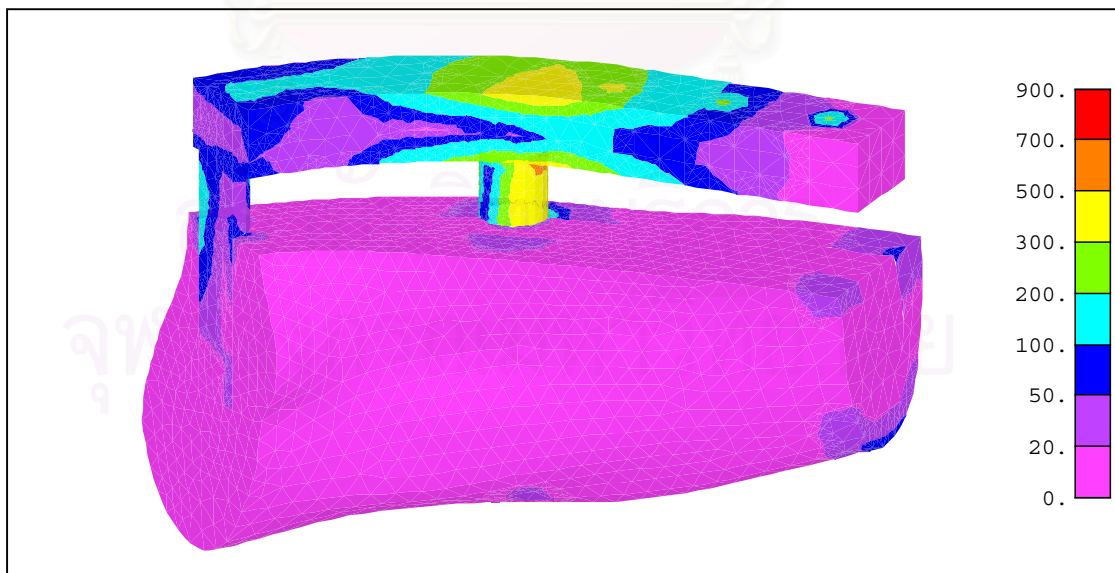
ชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม



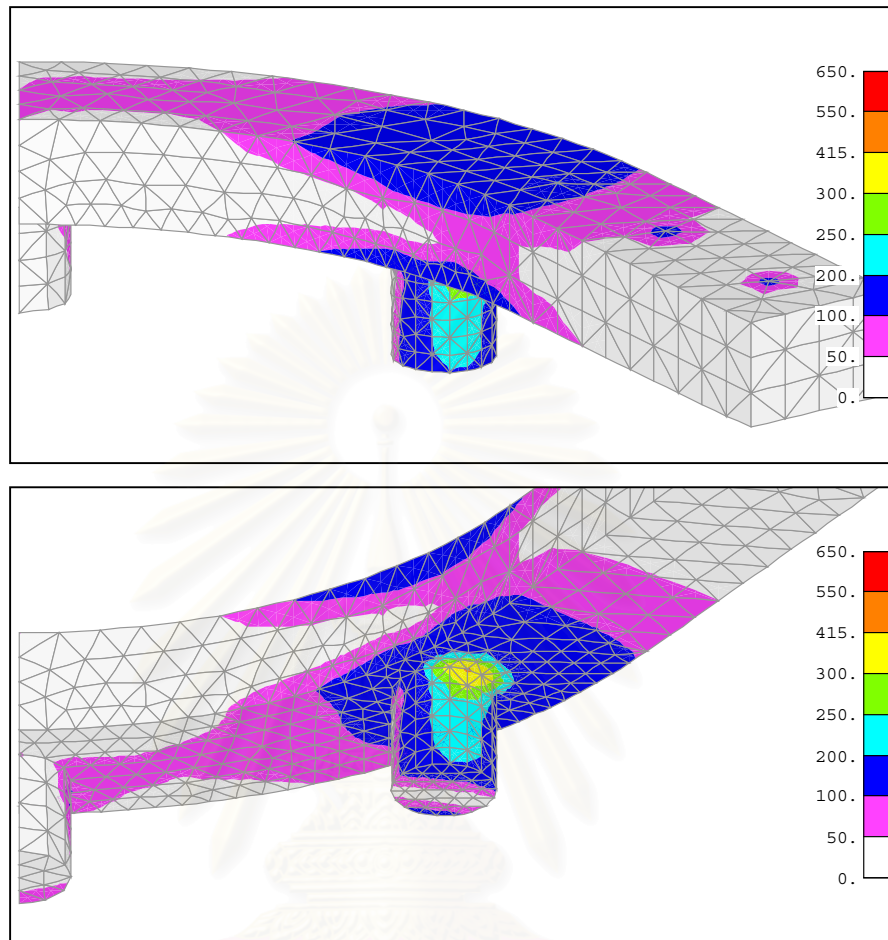
ภาพที่ 52ก ลักษณะของฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Von Mises Stress

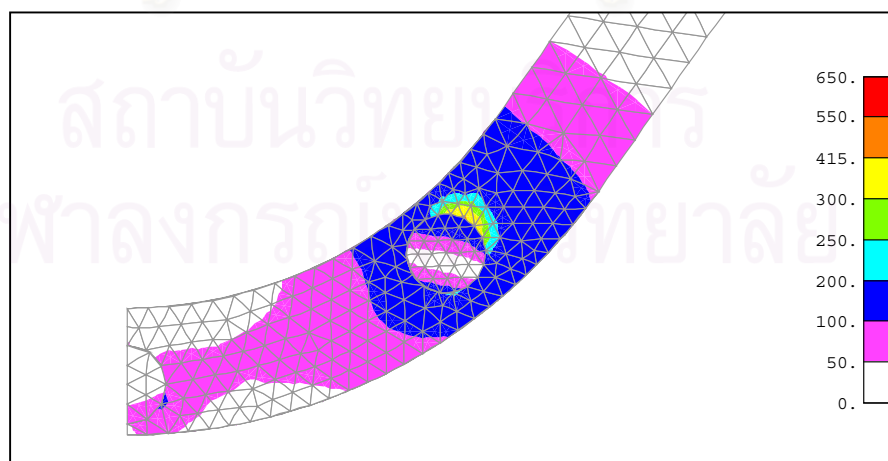


ภาพที่ 53ก การกระจายความเค้น Von Mises Stress(MPa) บนแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม บนกระดูกขากรรไกรล่างซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในโครงโลหะและหลักยึด

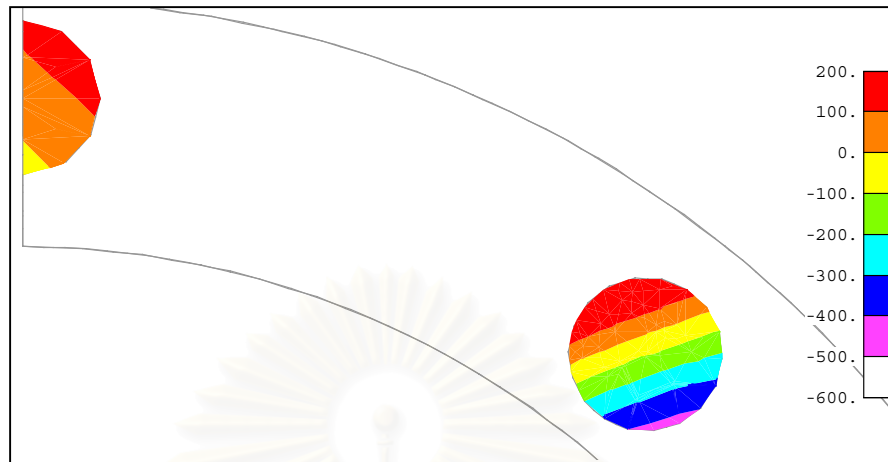


ภาพที่ 54ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนส่วนของโครงโลหะและหลักยึดรอกฟันเฟืองของแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รอกฟันเฟืองซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N



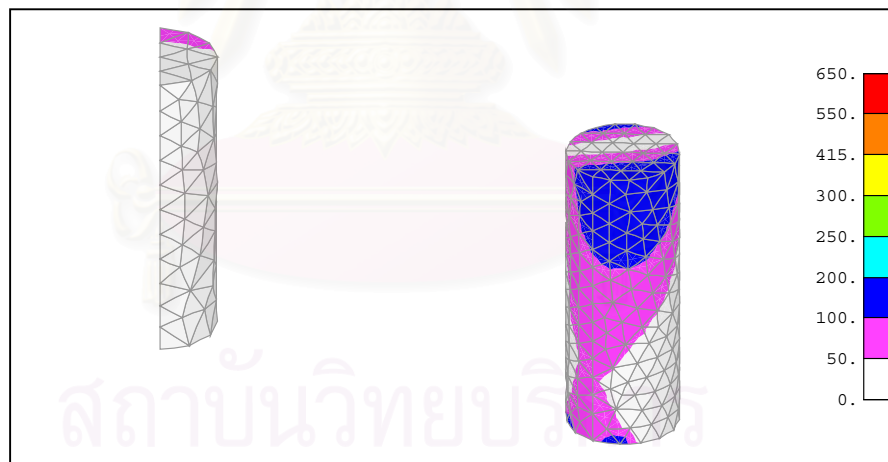
ภาพที่ 55ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) เมื่อมองในมุมล่างของส่วนโครงโลหะและหลักยึดรอกฟันเฟืองในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รอกฟันเฟืองซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

Z Normal stress ในหลักยึด



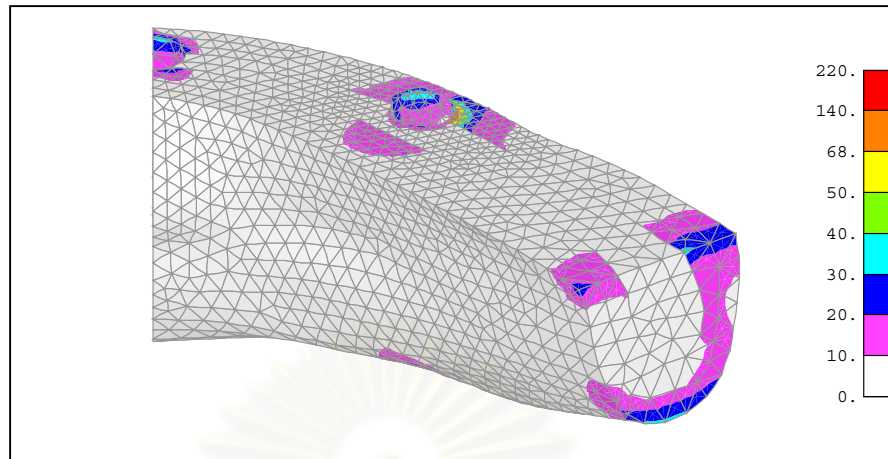
ภาพที่ 56ก การกระจายความเค้นตั้งฉาก(Z Normal Stress,MPa) บนหน้าตัดตั้งฉากกับแนวแกนของหลักยึดรากฟันเทียมที่ระยะกึ่งกลางหลักยึดในแบบจำลองฟันปลอม 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในรากฟันเทียม

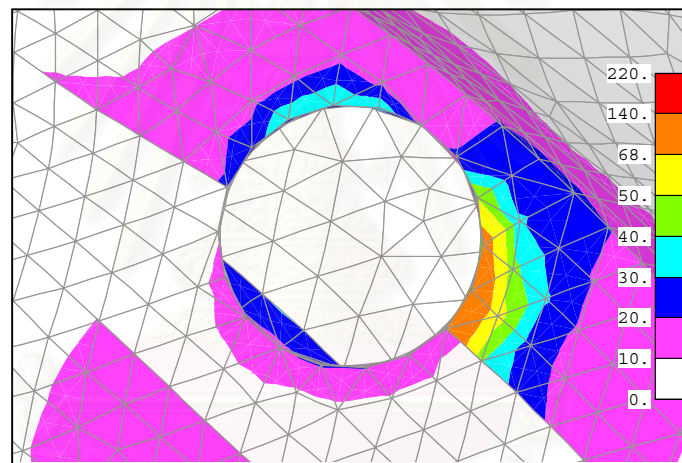


ภาพที่ 57ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

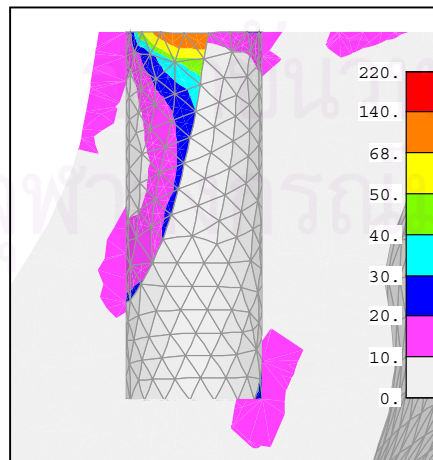
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



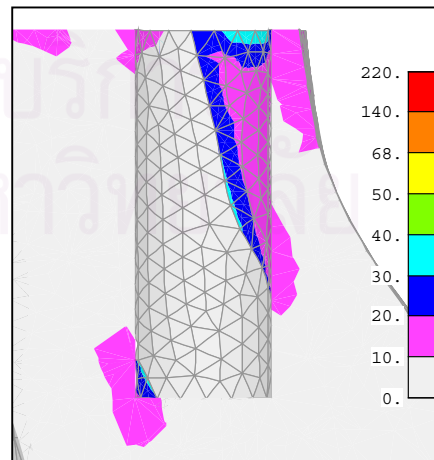
ภาพที่ 58ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

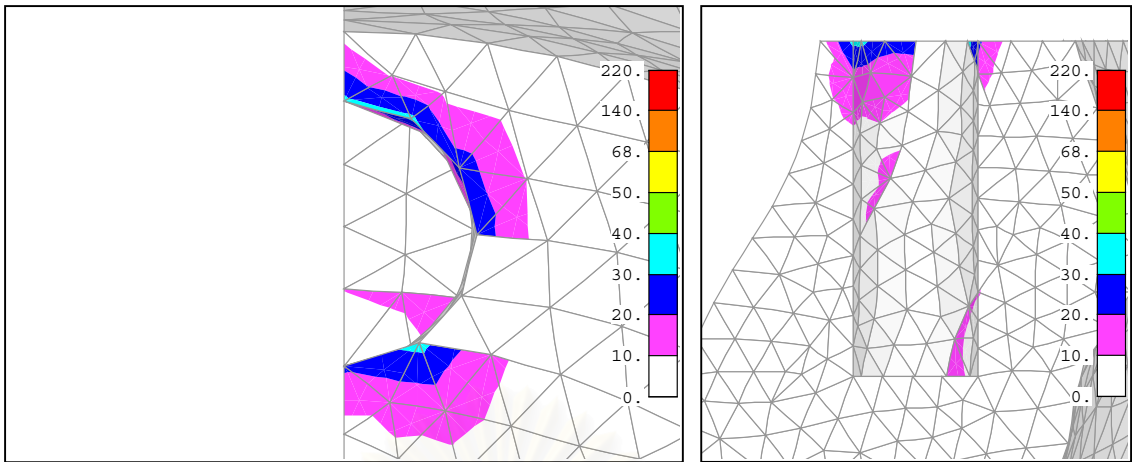


SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

ภาพที่ 59ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

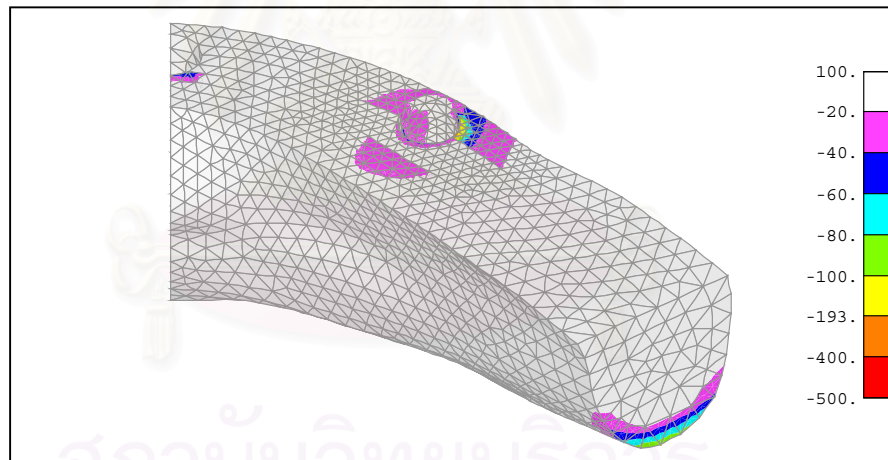


TOP VIEW

SECTION 3R-3R

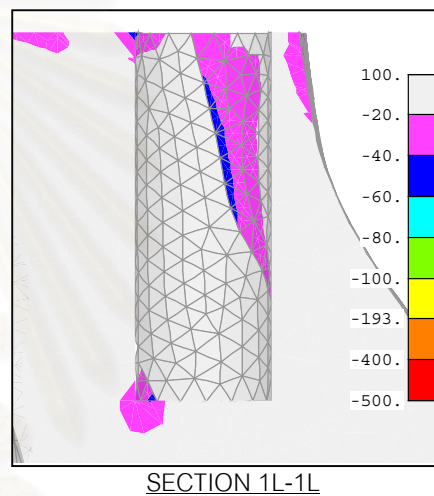
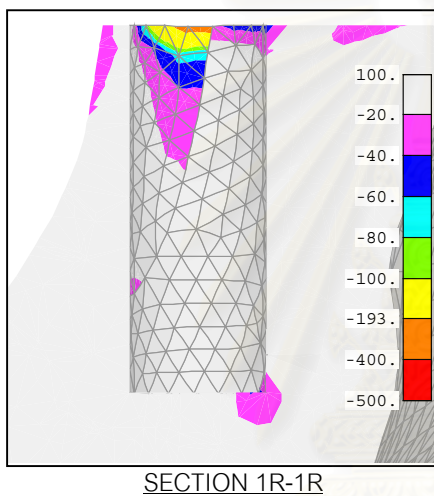
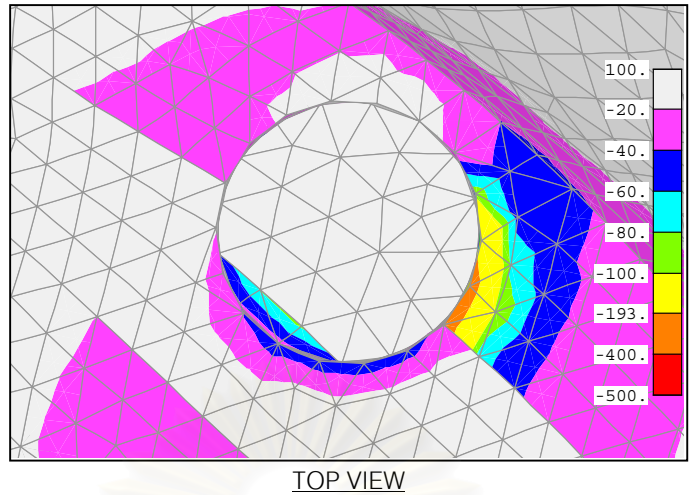
ภาพที่ 60ก การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress,MPa) บนกระดูกงูรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง

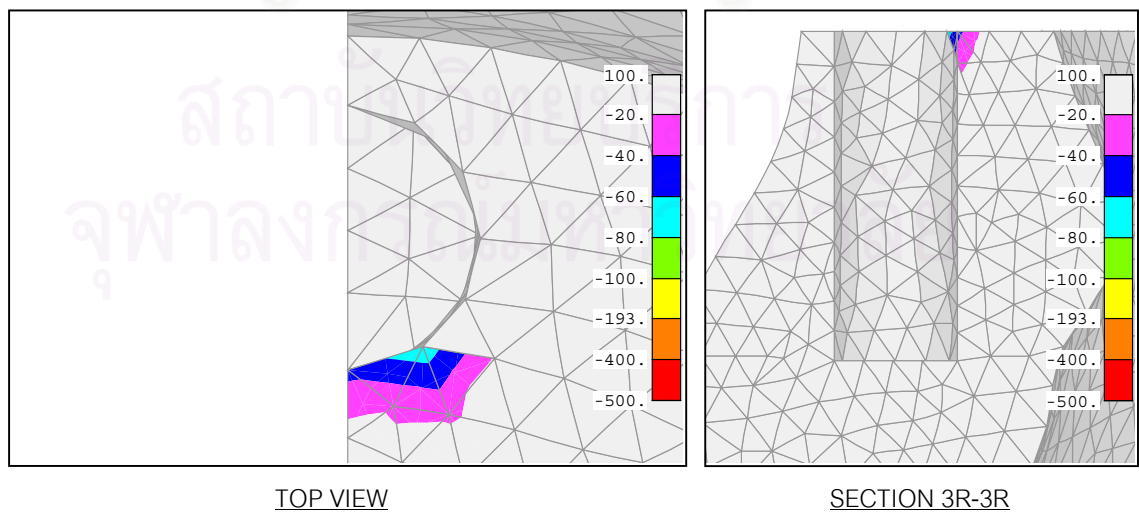


ภาพที่ 61ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N



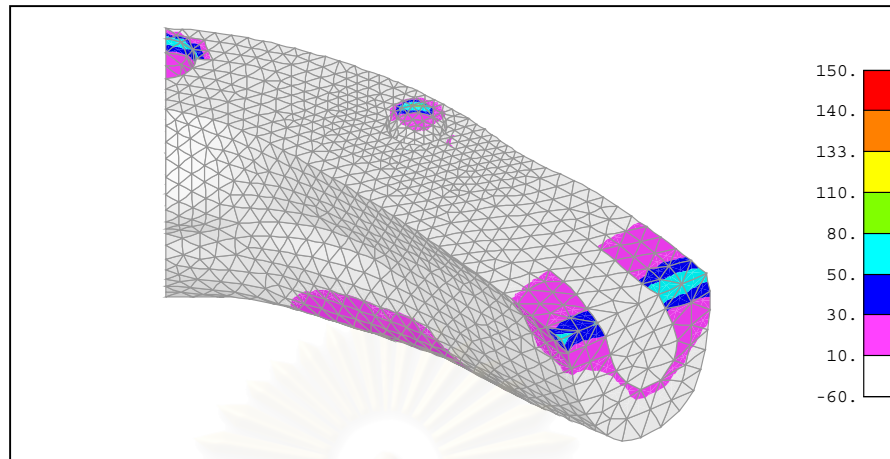


ภาพที่ 62ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

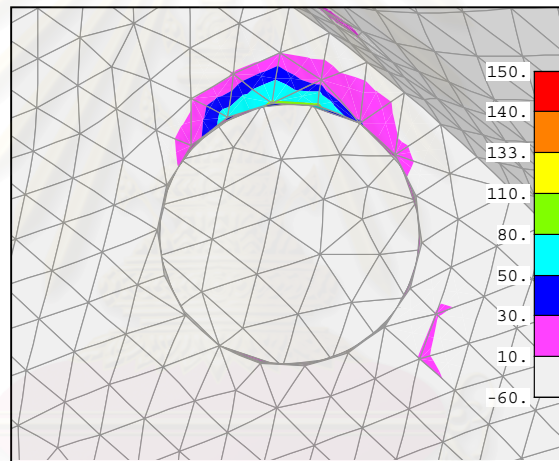


ภาพที่ 63ก การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

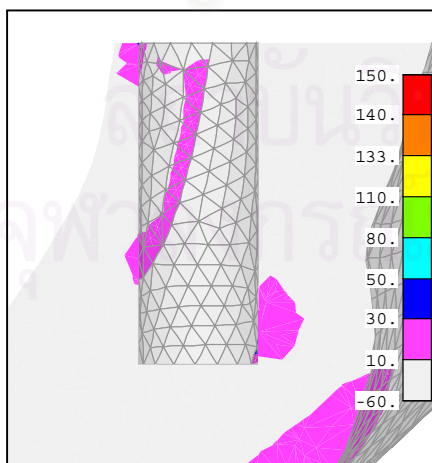
Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) ในกระดูกขากรรไกรล่าง



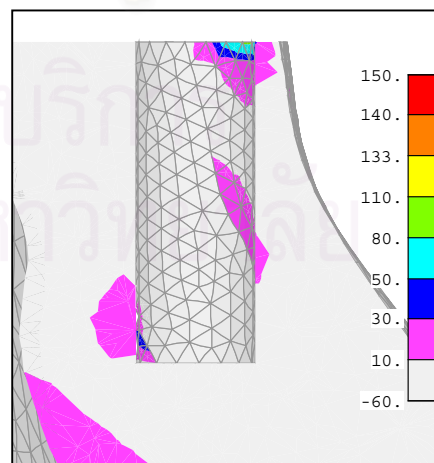
ภาพที่ 64ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

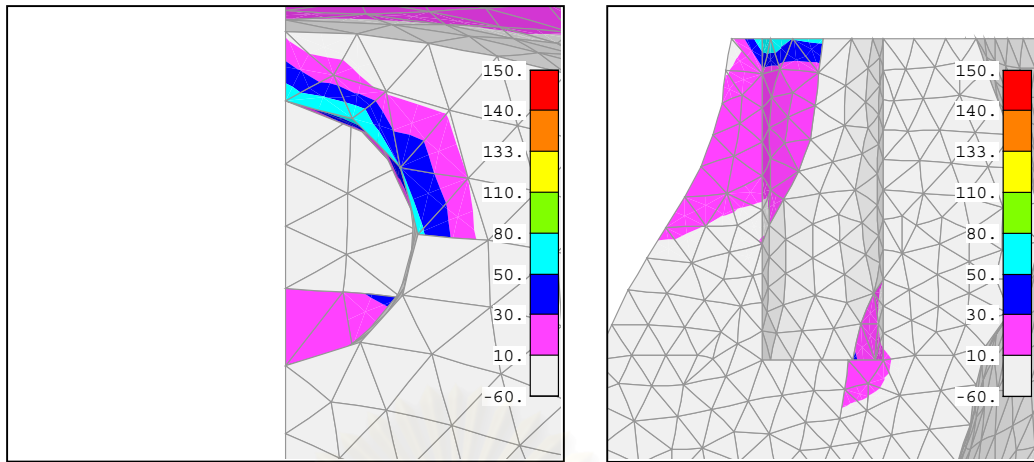


SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

ภาพที่ 65ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

SECTION 3R-3R

ภาพที่ 66ก การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียม  
ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1ก สรุปค่าความเค้น(MPa)ที่เกิดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียมและฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม

ฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม		
	ชุดแรงบิดเดี่ยว	
	155-175-195 N	190 N
ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอม (MPa)	410	411
ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	124	89
ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	-322	-219
ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	83	71

ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม		
	ชุดแรงบิดเดี่ยว	
	155-175-195 N	190 N
ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอม (MPa)	432	436
ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	144	102
ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	-370	-247
ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	112	71

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การกระจายแรงและโมเมนต์ในหลักยึดและรากฟันเทียมรากฟันเทียม

ตารางที่ 2ก ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียม

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากฟันเทียม								
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N			ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N				
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 4	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	18	174	0	-111	86	62	-16	-21
$F_y$ (N)	98	-82	-33	117	-77	-32	-13	6
$F_z$ (N)	-1426	224	266	-1085	382	203	-29	-40
$M_x$ (N-mm)	1576	442	451	1682	408	223	139	131
$M_y$ (N-mm)	627	-780	0	911	-494	-256	112	128
$M_z$ (N-mm)	-166	-151	0	-153	-150	-104	-71	-62
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม								
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N			ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N				
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 4	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	89	-	0	-88	-	131	-	-43
$F_y$ (N)	52	-	-106	79	-	-77	-	-2
$F_z$ (N)	-1359	-	577	-926	-	450	-	-94
$M_x$ (N-mm)	1839	-	574	1971	-	270	-	172
$M_y$ (N-mm)	384	-	0	896	-	-645	-	249
$M_z$ (N-mm)	-186	-	0	-171	-	-156	-	-85

ตารางที่ 3ก ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดสู่รากพื้นเทียม

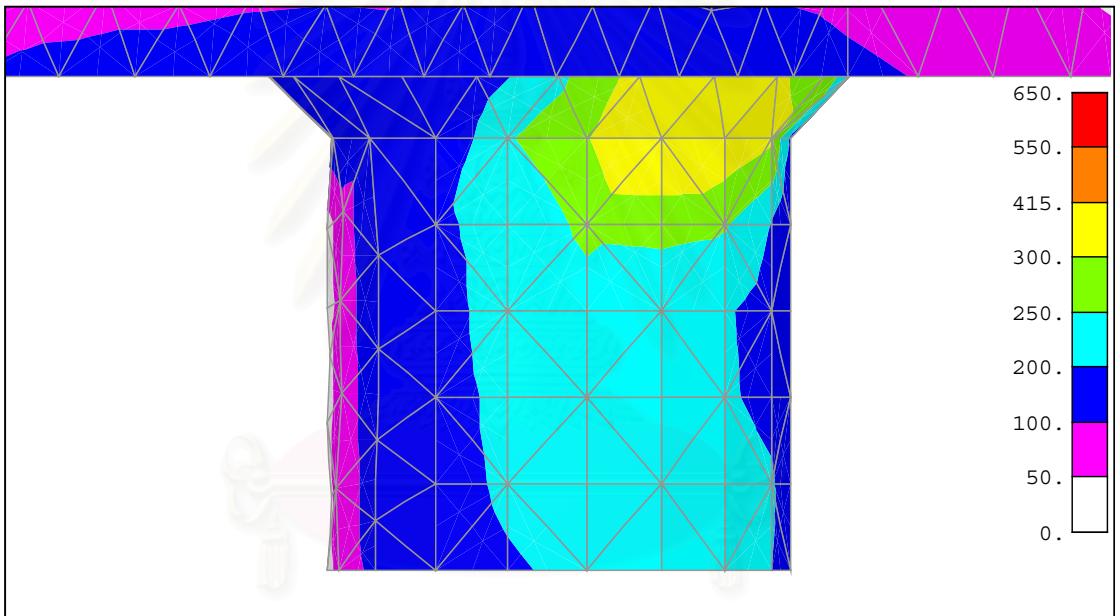
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 5 รากพื้นเทียม								
	ชุดแรงบิดเคียว 155-175-195 N			ชุดแรงบิดเคียว 190 N				
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 4	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	18	174	0	-111	86	62	-16	-21
$F_y$ (N)	98	-82	-33	117	-77	-32	-13	6
$F_z$ (N)	-1426	224	266	-1085	382	203	-29	-40
$M_x$ (N-mm)	1184	771	581	1215	716	353	192	108
$M_y$ (N-mm)	699	-85	0	467	-148	-9	47	45
$M_z$ (N-mm)	-166	-151	0	-153	-150	-104	-71	-62
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม								
	ชุดแรงบิดเคียว 155-175-195 N			ชุดแรงบิดเคียว 190 N				
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 2	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 4	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	89	-	0	-88	-	131	-	-43
$F_y$ (N)	52	-	-106	79	-	-77	-	-2
$F_z$ (N)	-1359	-	577	-926	-	450	-	-94
$M_x$ (N-mm)	1632	-	996	1654	-	579	-	180
$M_y$ (N-mm)	739	-	0	546	-	-122	-	76
$M_z$ (N-mm)	-186	-	0	-171	-	-156	-	-85

## ภาคผนวก ข

ลักษณะการกระจายความเค้นในแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้วของฟันปลอมไฮบริด 3 ราก  
ฟันเทียม

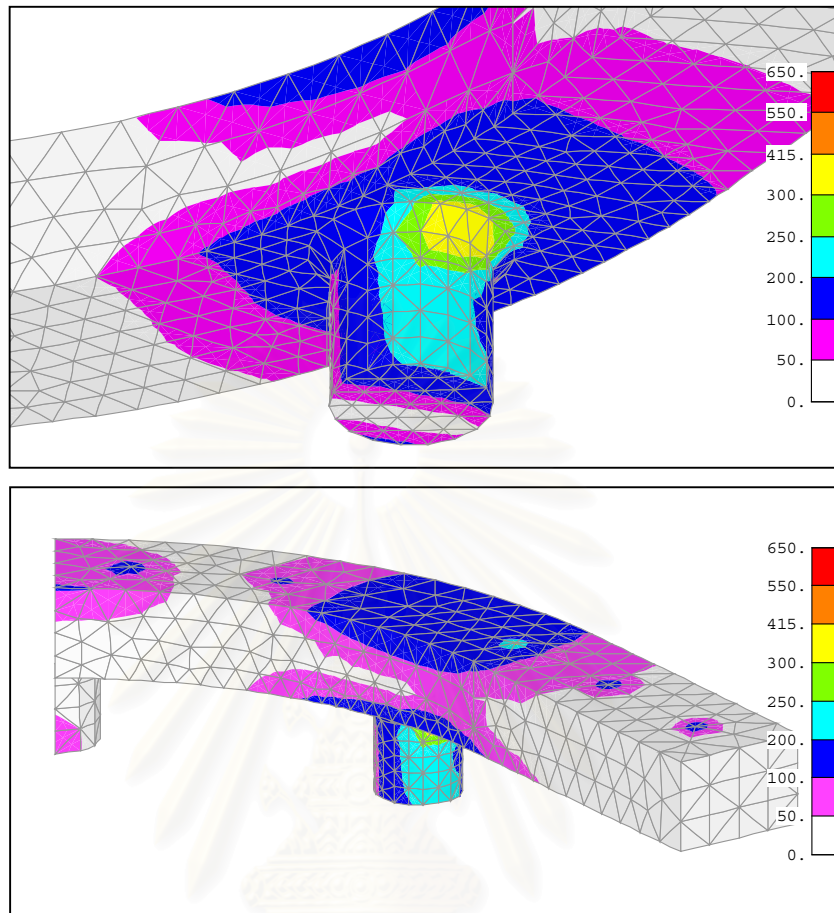
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก  
ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนหลักยึดรากฟันเทียม



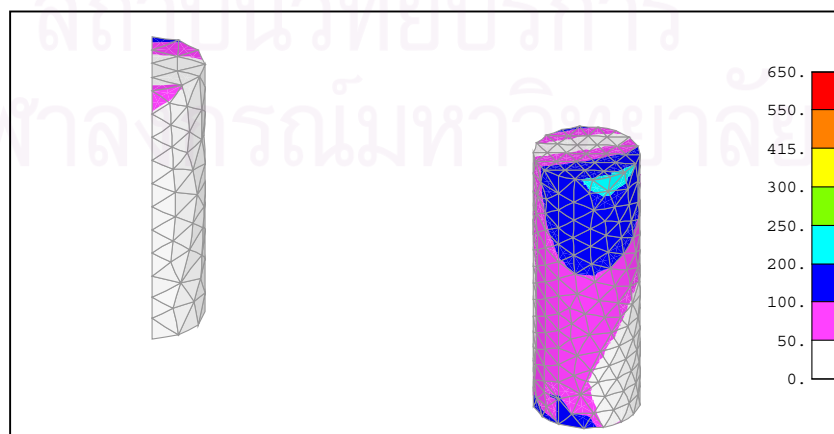
ภาพที่ 1ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด(Maximum Shear Stress ,MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบ  
จำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงบิดเคี้ยว  
155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



ภาพที่ 2ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

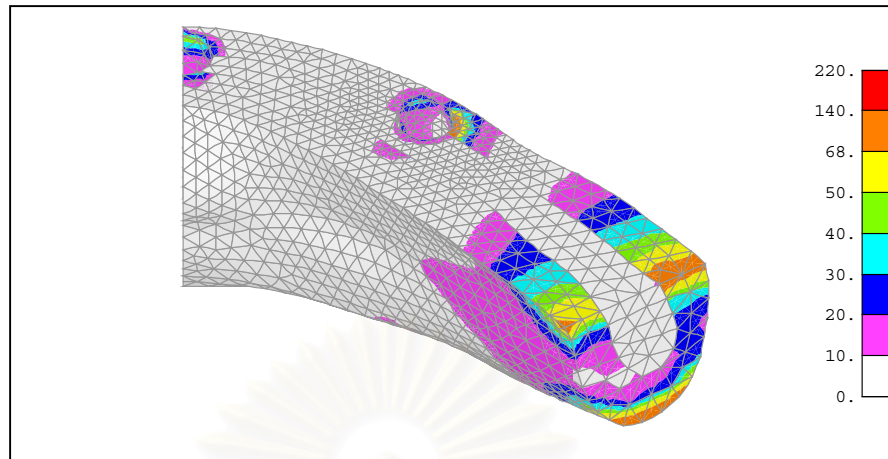
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม



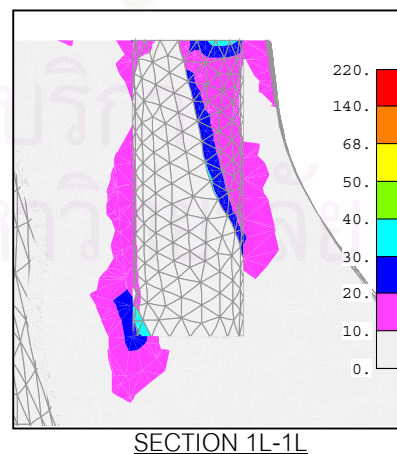
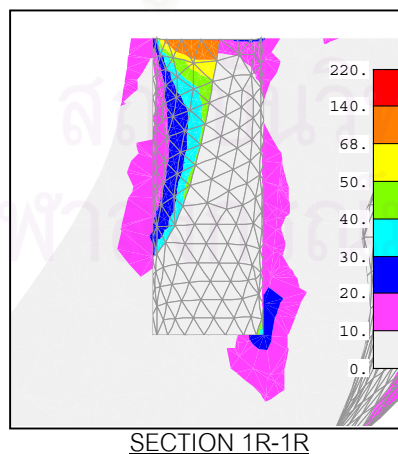
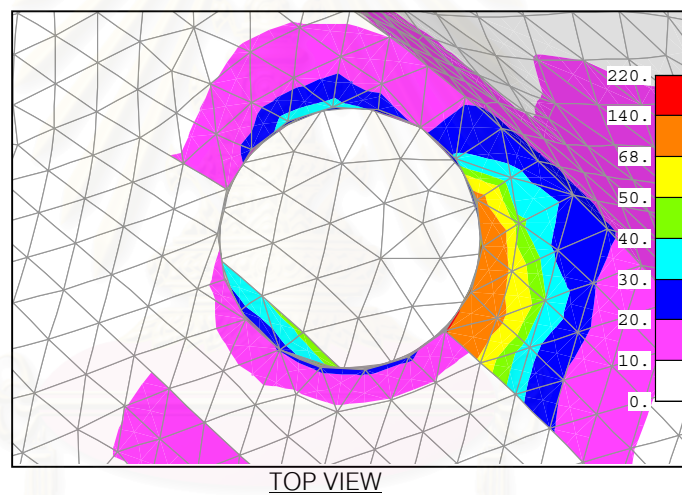
ภาพที่ 3ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



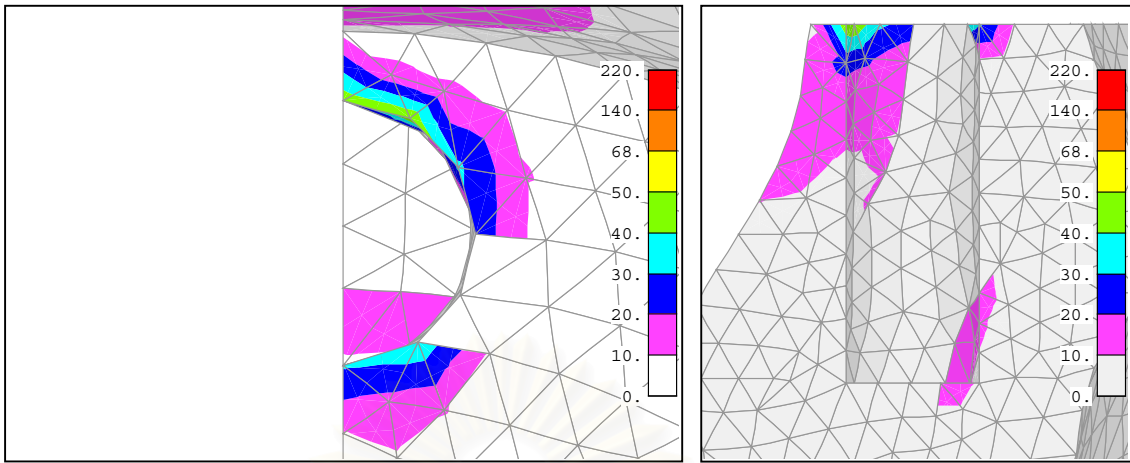
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



ภาพที่ 4 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 155-175-195 N



ภาพที่ 5 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกครอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 155-175-195 N

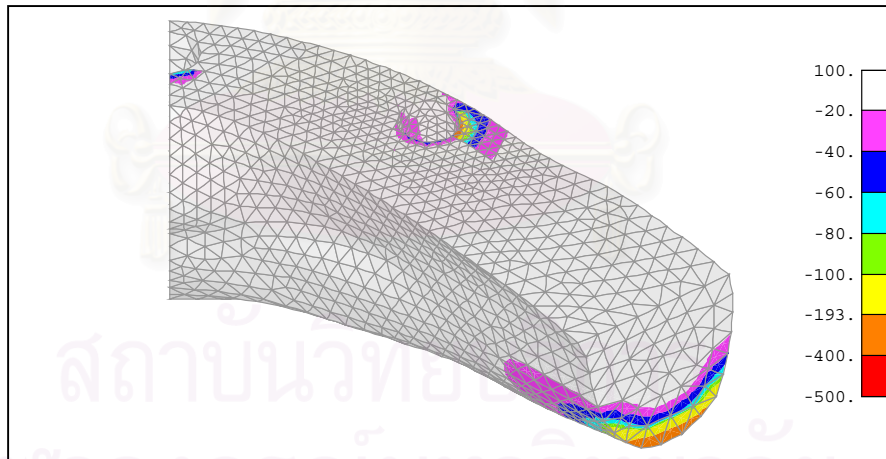


TOP VIEW

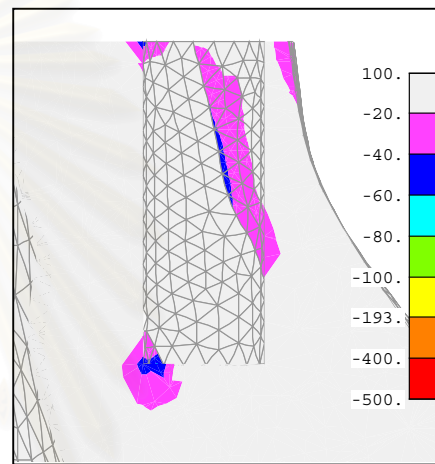
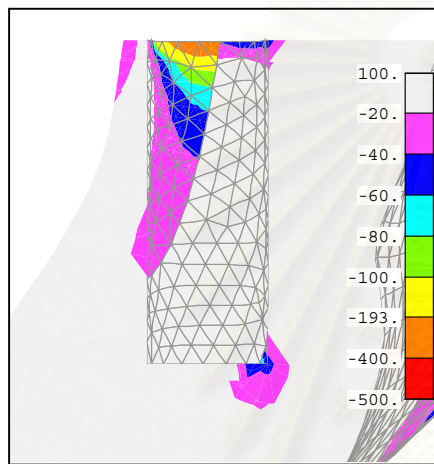
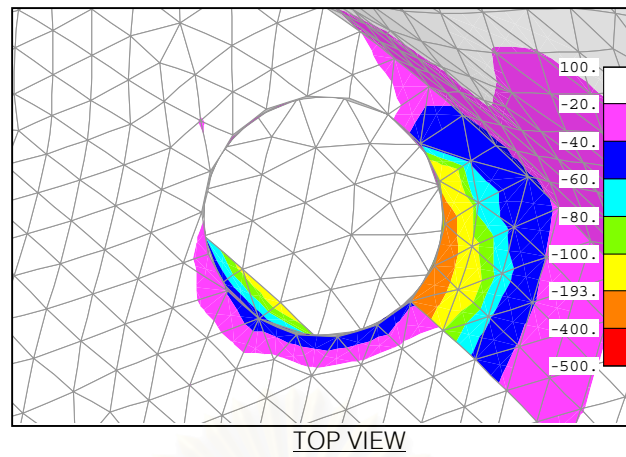
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 6ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

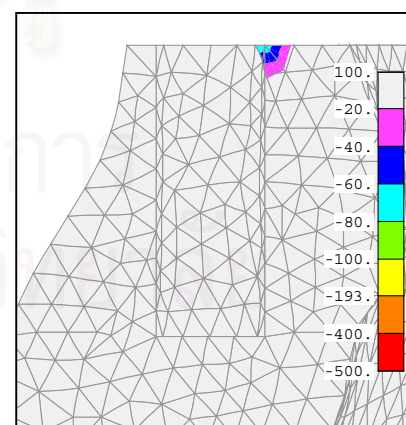
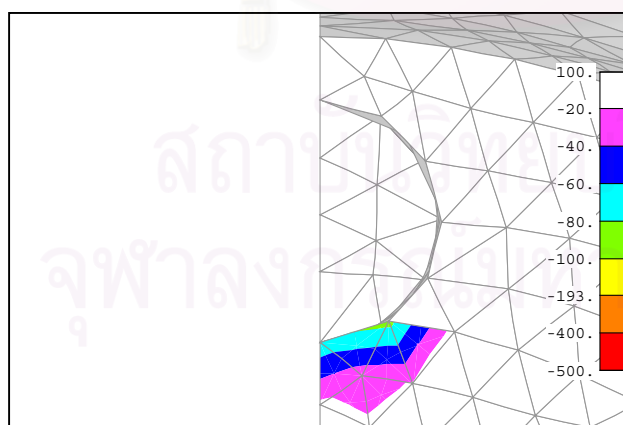
Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



ภาพที่ 7ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

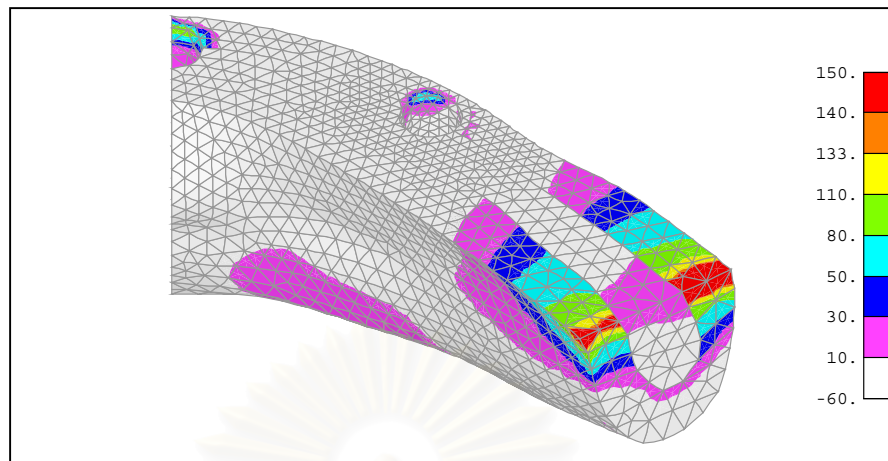


ภาพที่ 8ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองพื้นปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากพื้นเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดี่ยว 155-175-195 N

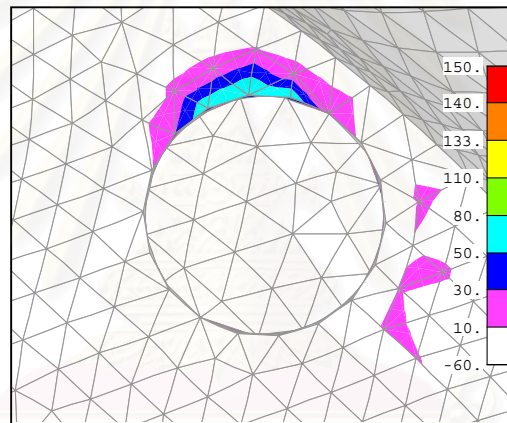


ภาพที่ 9ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองพื้นปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากพื้นเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดี่ยว 155-175-195 N

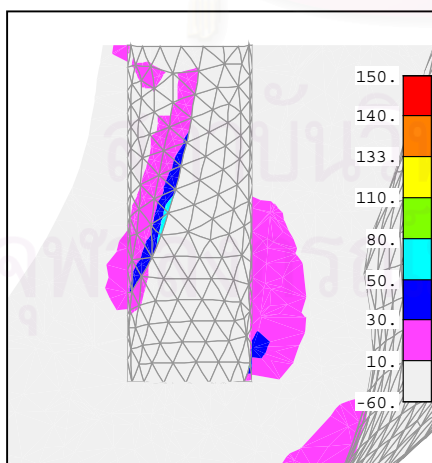
Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



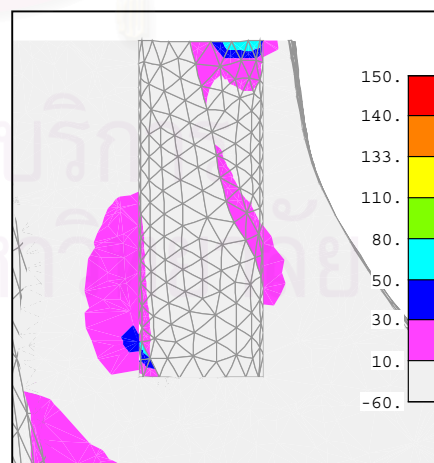
ภาพที่ 10 ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 155-175-195 N



TOP VIEW

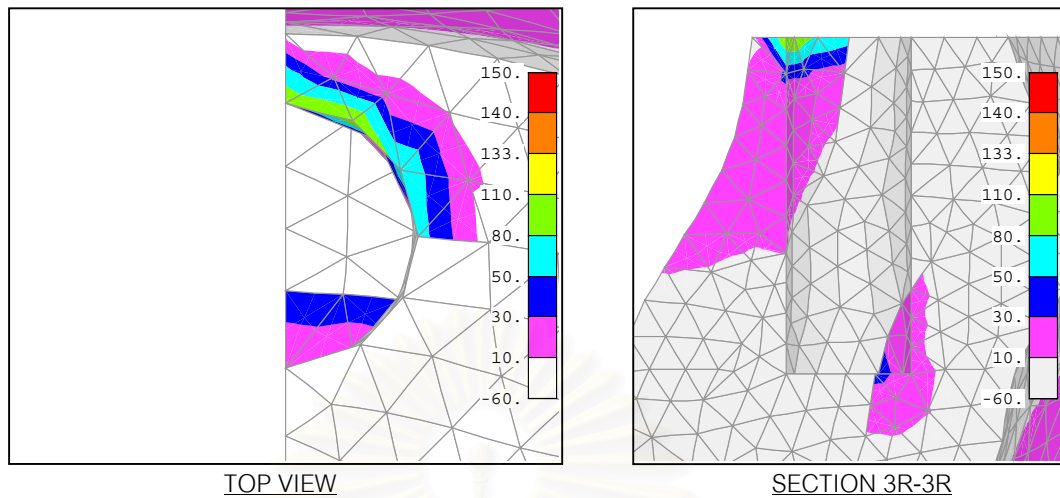


SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

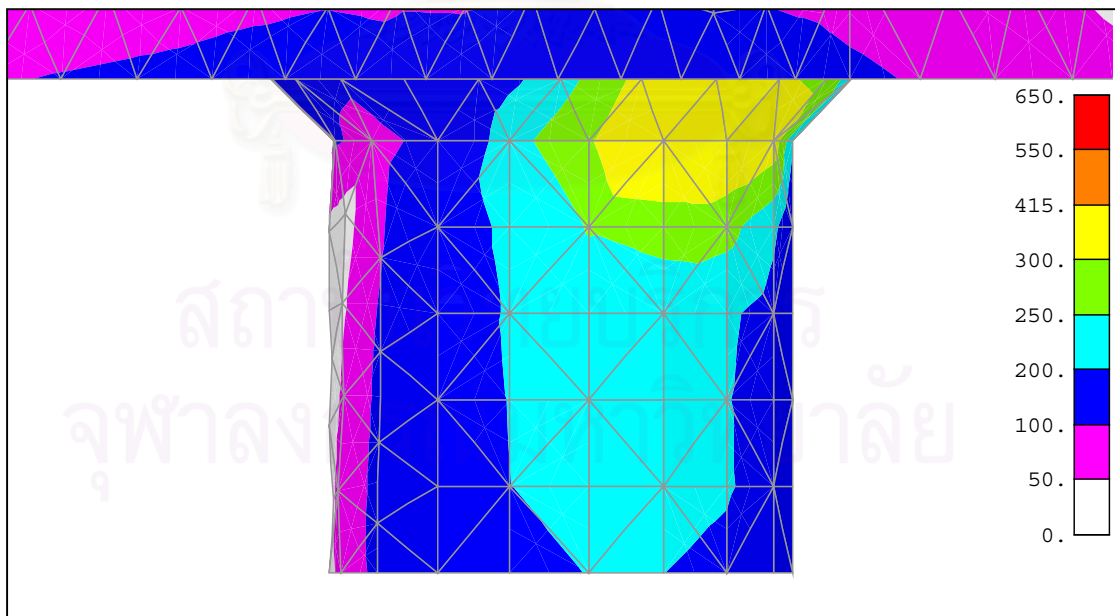
ภาพที่ 11 ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 155-175-195 N



ภาพที่ 12ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมรอบปากพื่นเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองพื่นปลอมไฮบริด 3 รากพื่นเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากพื่นเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N

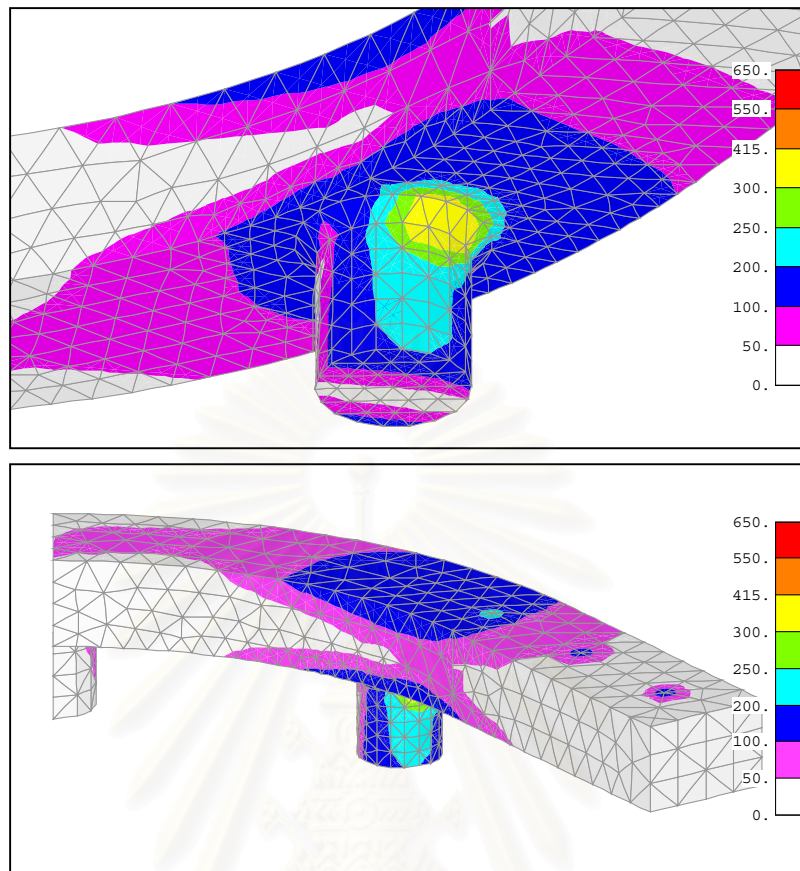
แบบจำลองพื่นปลอมไฮบริด 3 รากพื่นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก  
ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

*Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนหลักยึดรากพื่นเทียม*



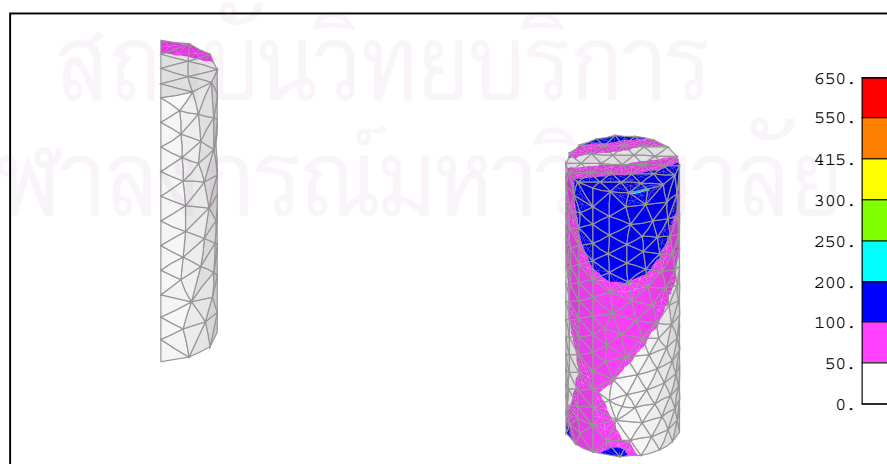
ภาพที่ 13ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนหลักยึดรากพื่นเทียมในแบบจำลองพื่นปลอมไฮบริด 3 รากพื่นเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากพื่นเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



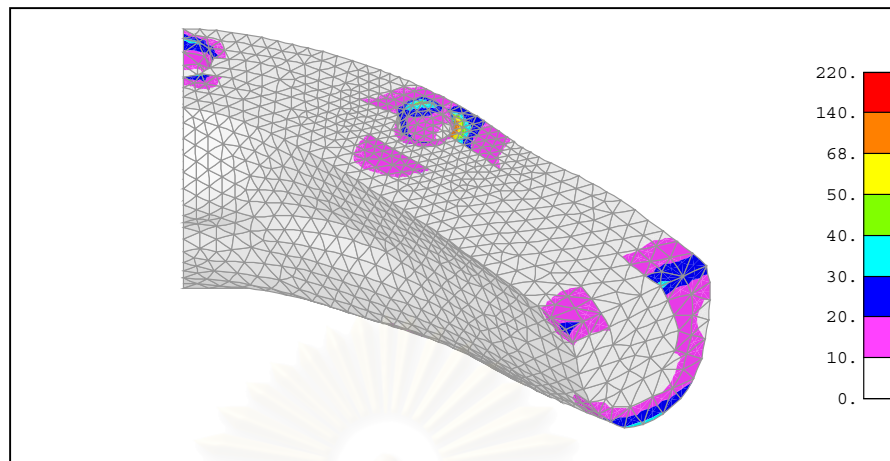
ภาพที่ 14 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

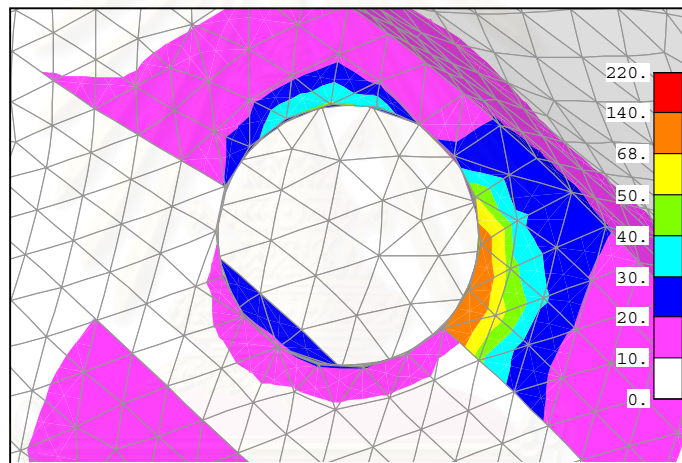


ภาพที่ 15 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

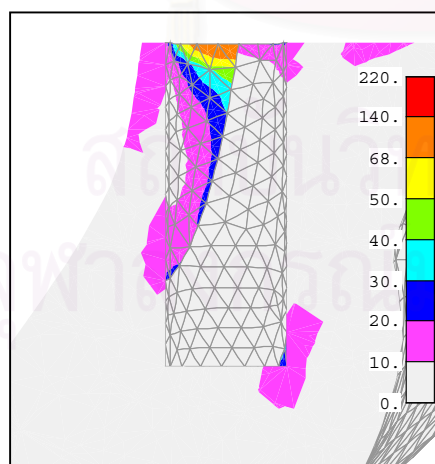
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



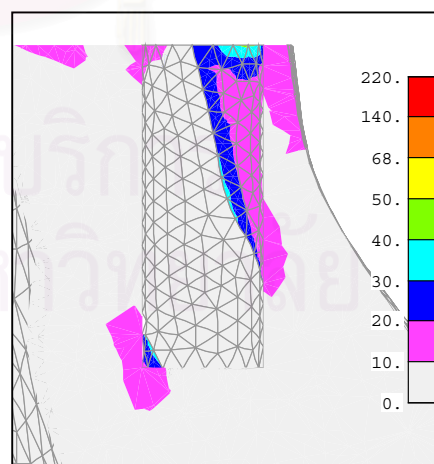
ภาพที่ 16 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 190 N



TOP VIEW

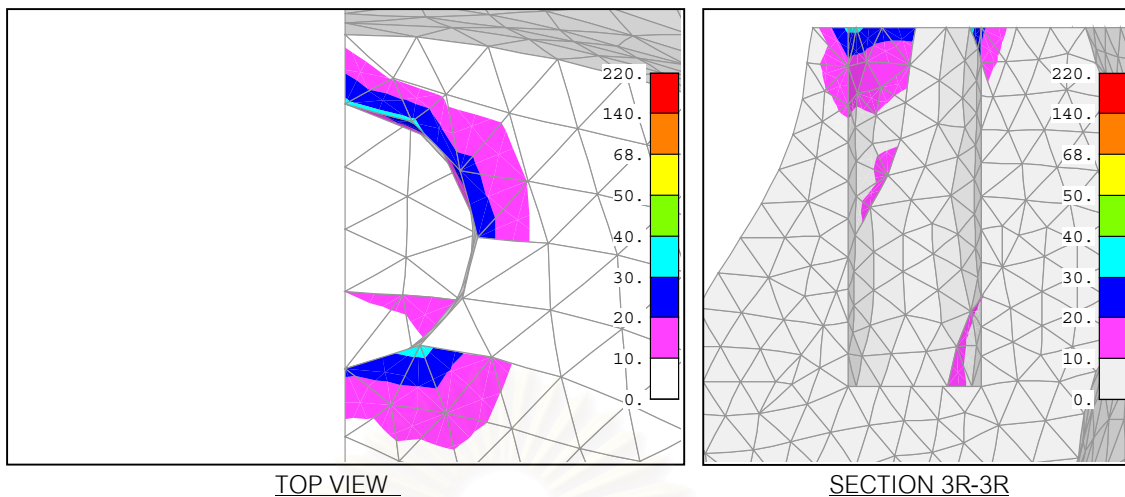


SECTION 1R-1R



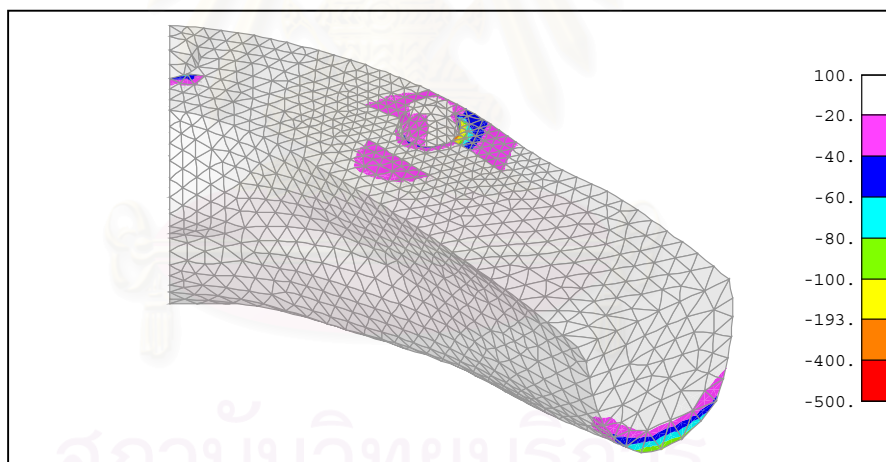
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 17 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 190 N



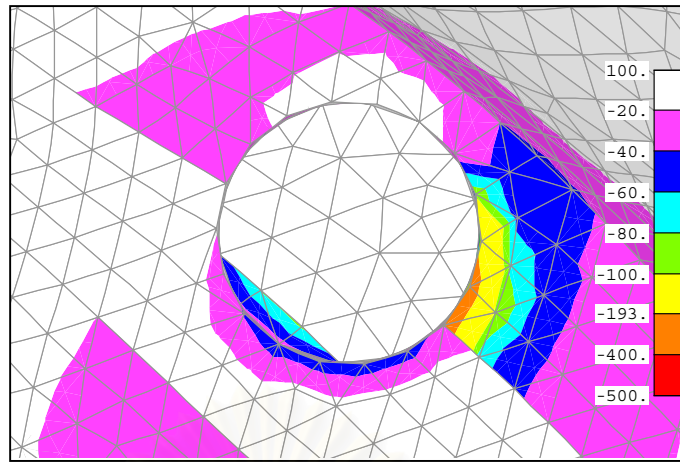
ภาพที่ 18 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

*Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง*

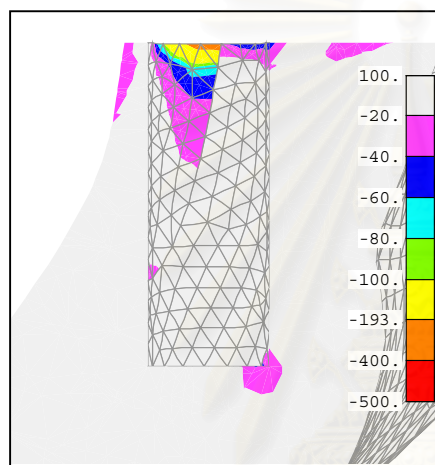


ภาพที่ 19 ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

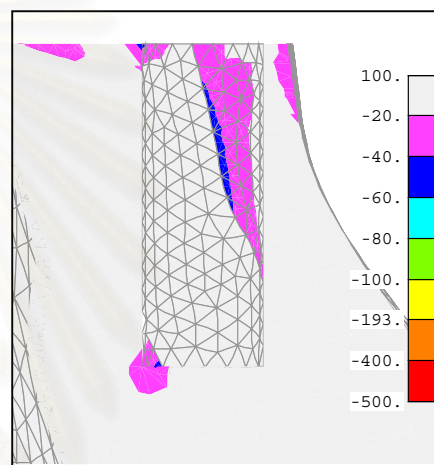




TOP VIEW

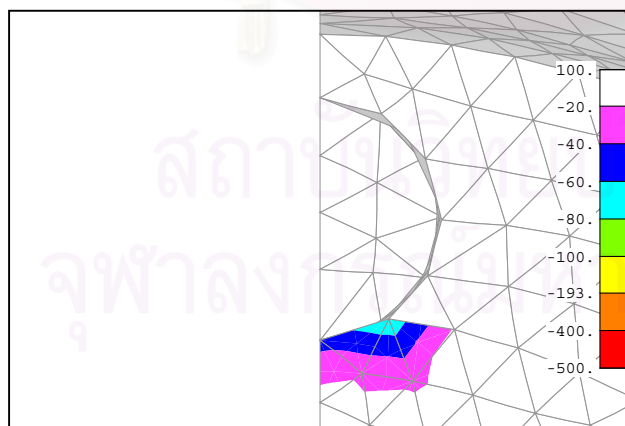


SECTION 1R-1R

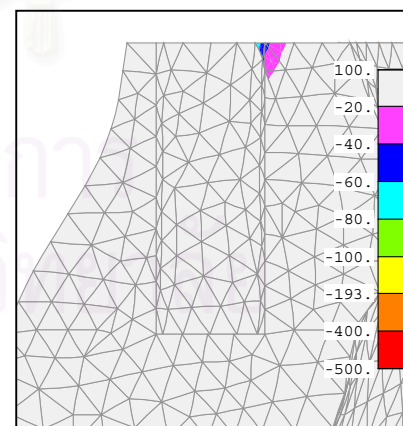


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 20ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190N



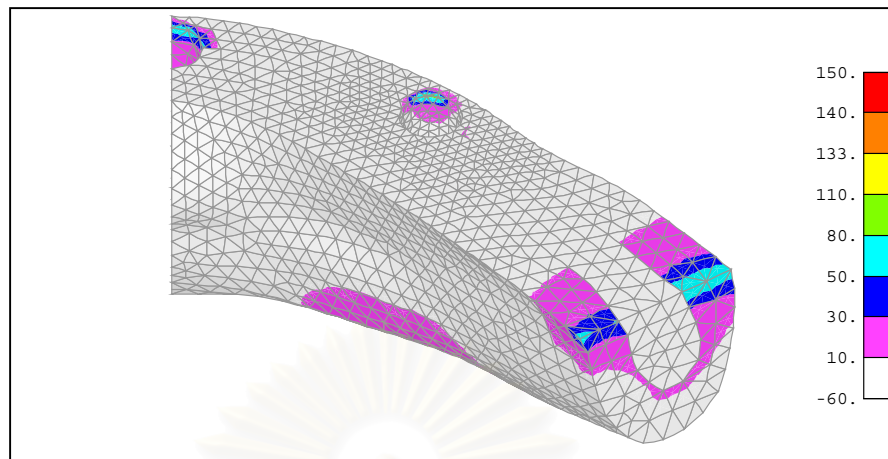
TOP VIEW



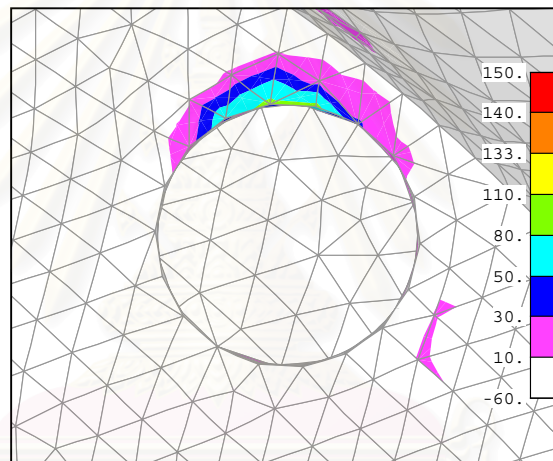
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 21ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress,MPa)บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเคี้ยว 190N

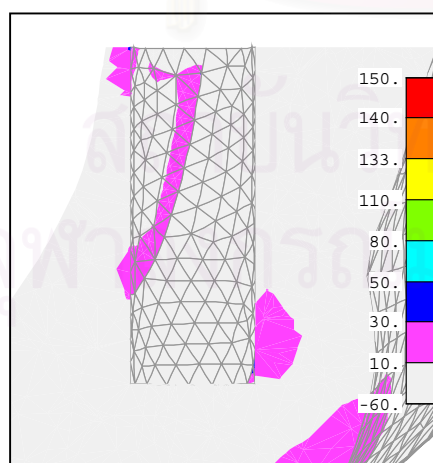
Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



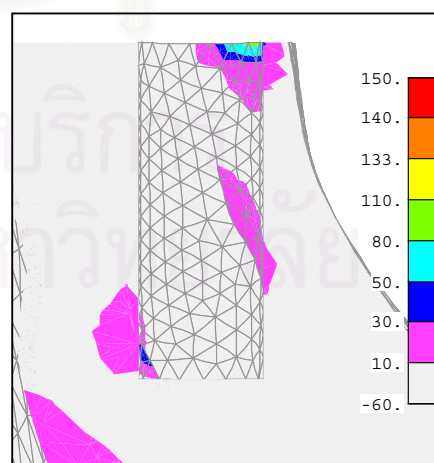
ภาพที่ 22ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 190 N



TOP VIEW

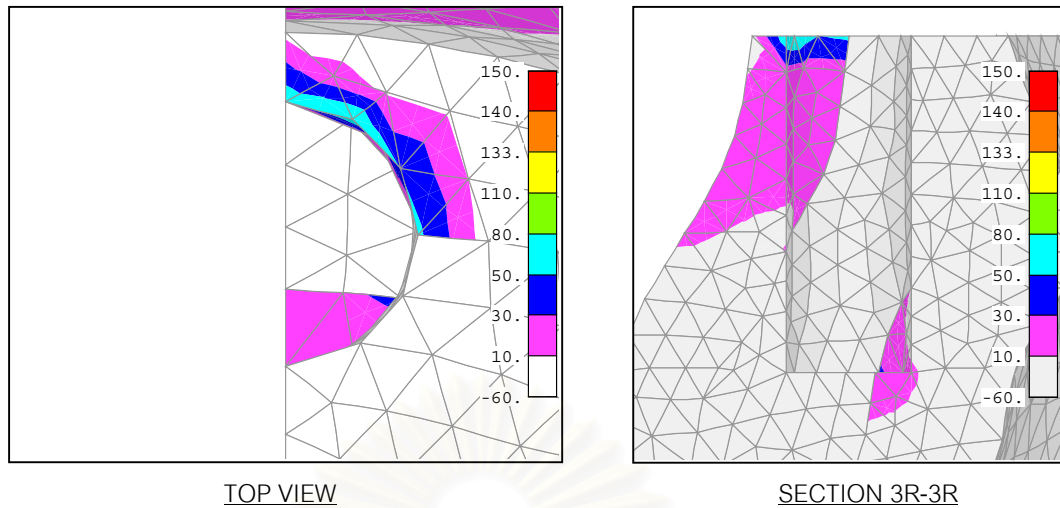


SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

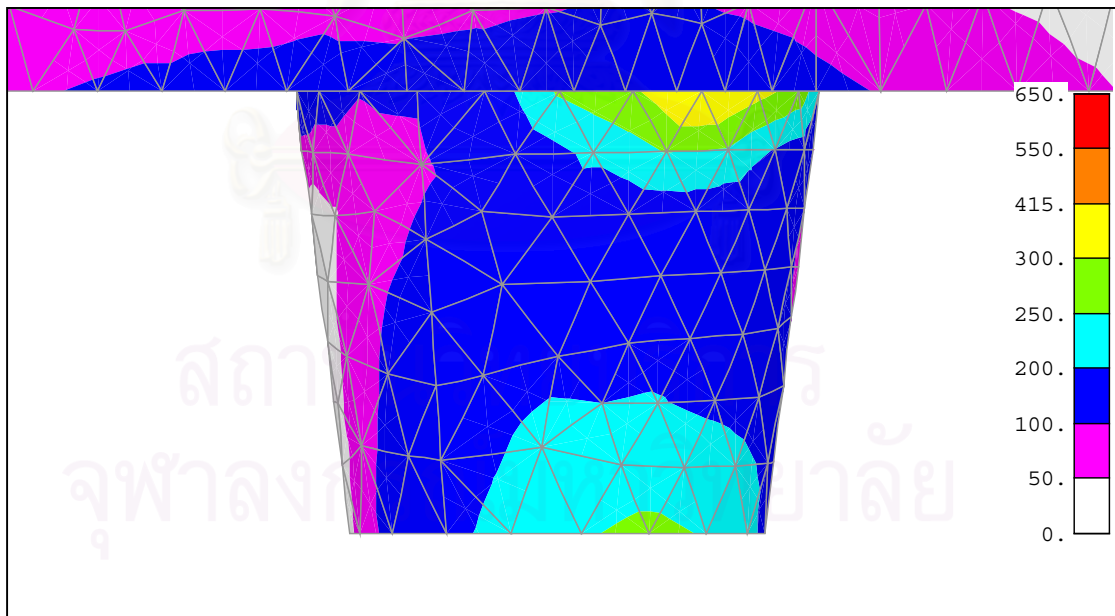
ภาพที่ 23ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด(Maximum Principal Stress,MPa)บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงกดเดียว 190 N



ภาพที่ 24ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress,MPa)บนกระดุมรอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรากพื้นเทียมรูปทรง ก มีชุดแรงบดเคี้ยว 190N

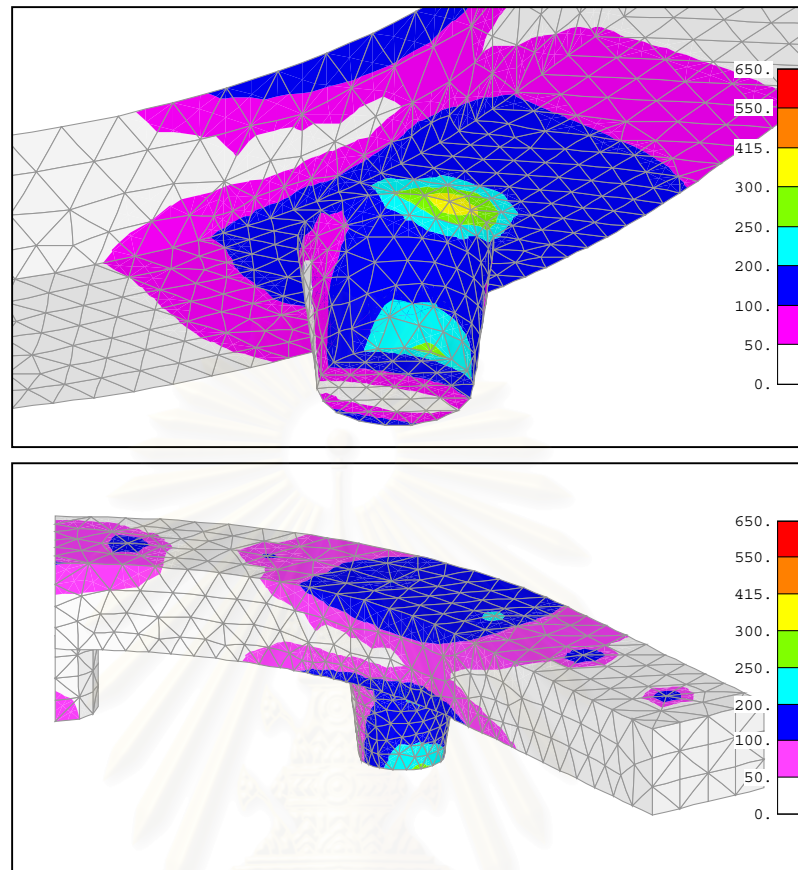
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข  
ชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

*Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนหลักยึดรากพื้นเทียม*



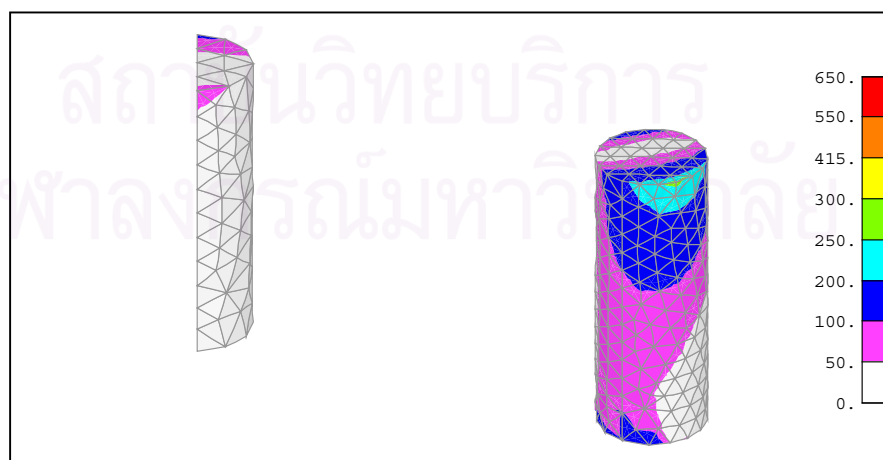
ภาพที่ 25ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนหลักยึดรากพื้นเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากพื้นเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



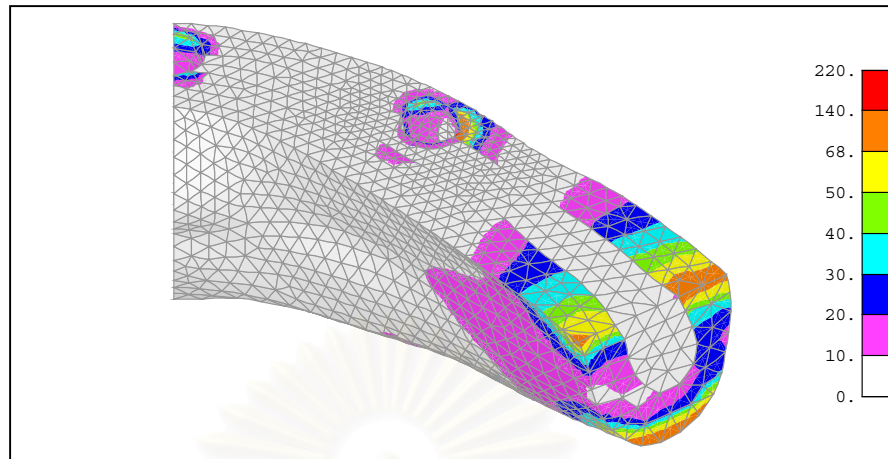
ภาพที่ 26 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

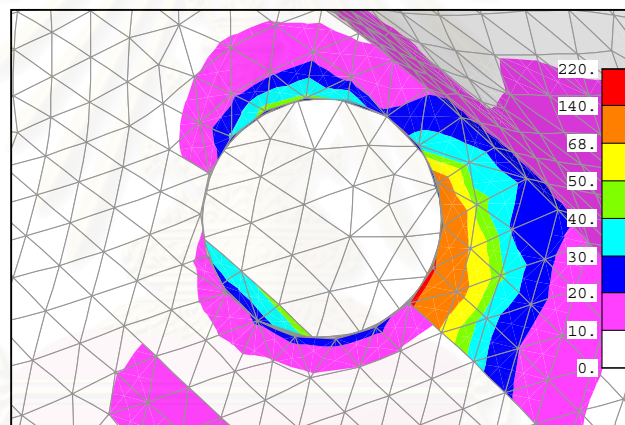


ภาพที่ 27 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

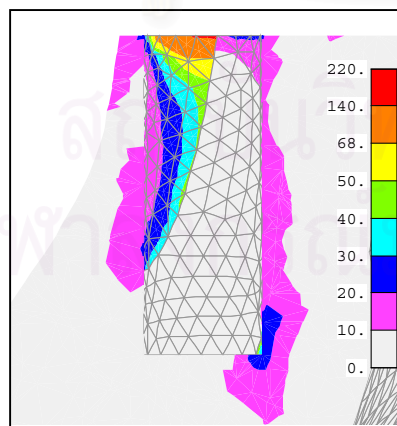
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



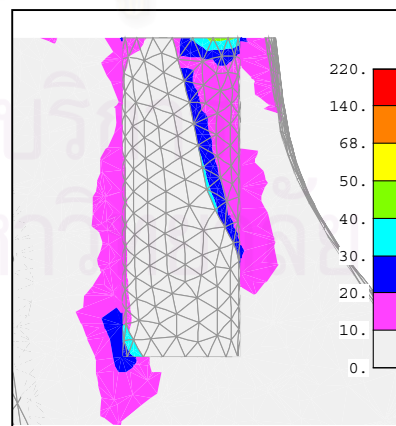
ภาพที่ 28 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

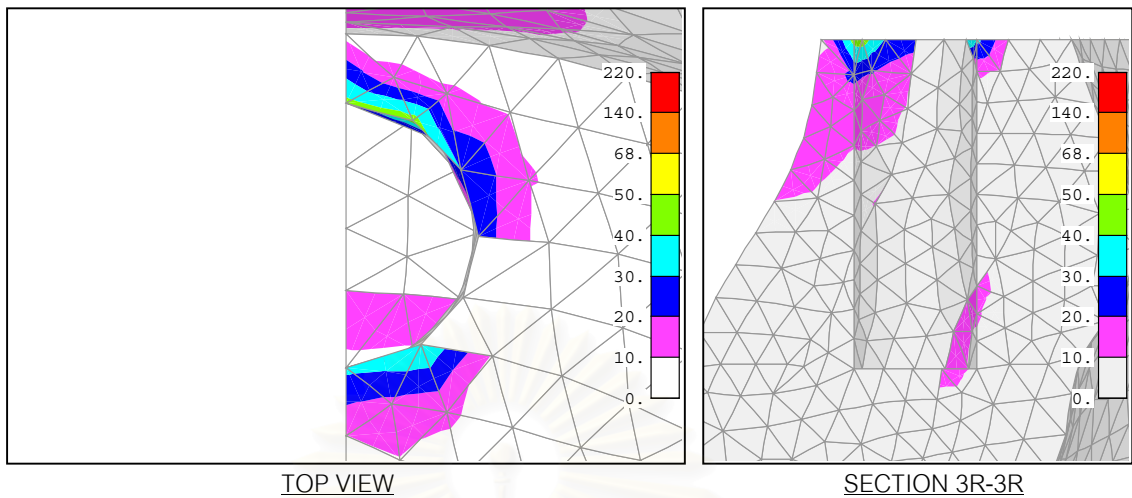


SECTION 1R-1R



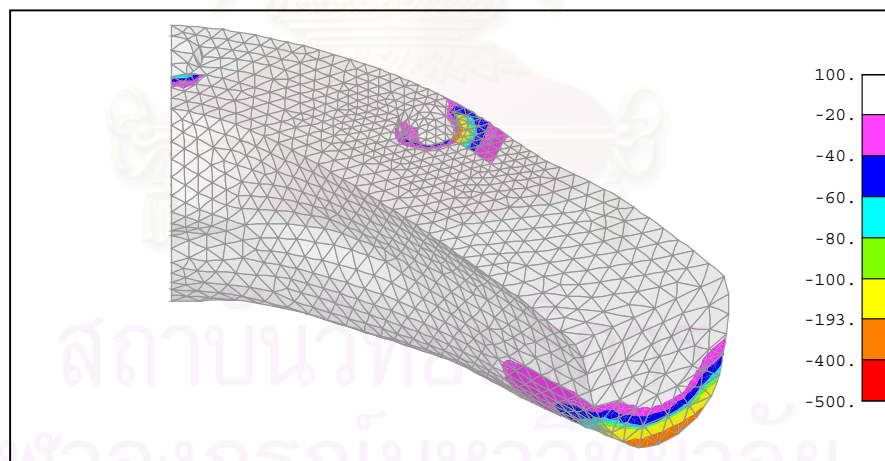
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 29 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



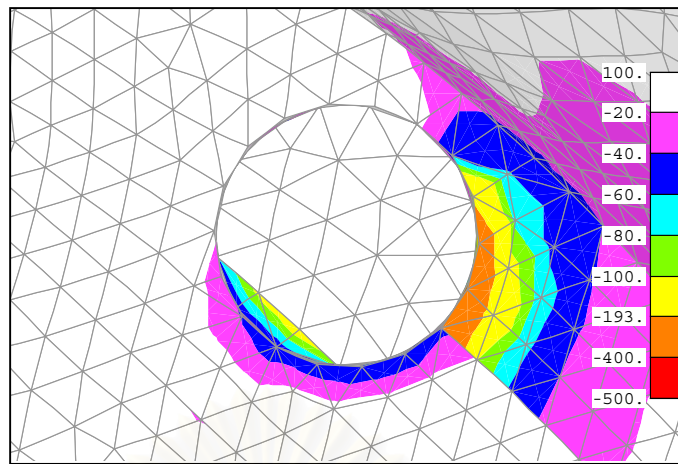
ภาพที่ 30x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

*Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง*

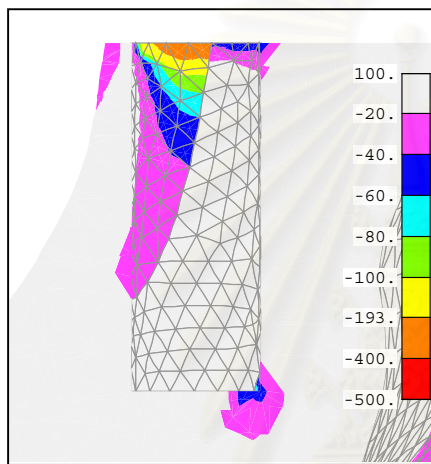


ภาพที่ 31x การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว

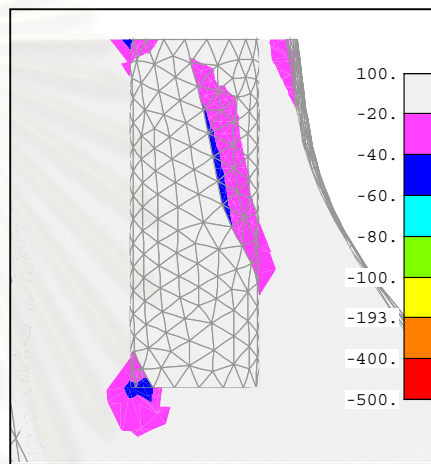
155-175-195 N



TOP VIEW

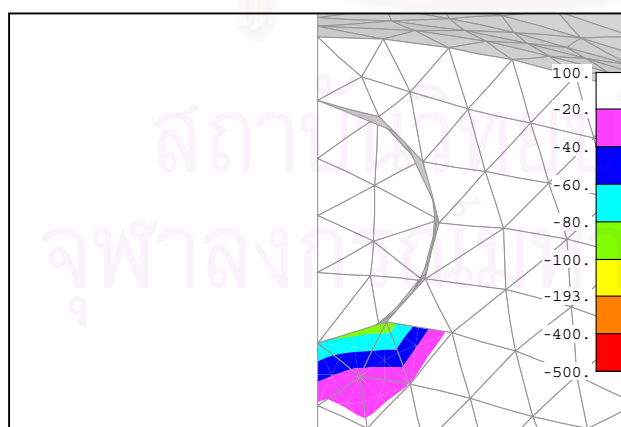


SECTION 1R-1R

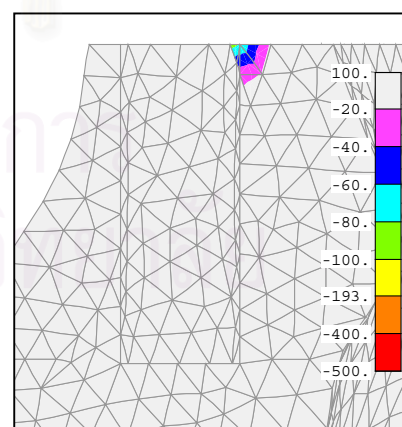


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 32ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



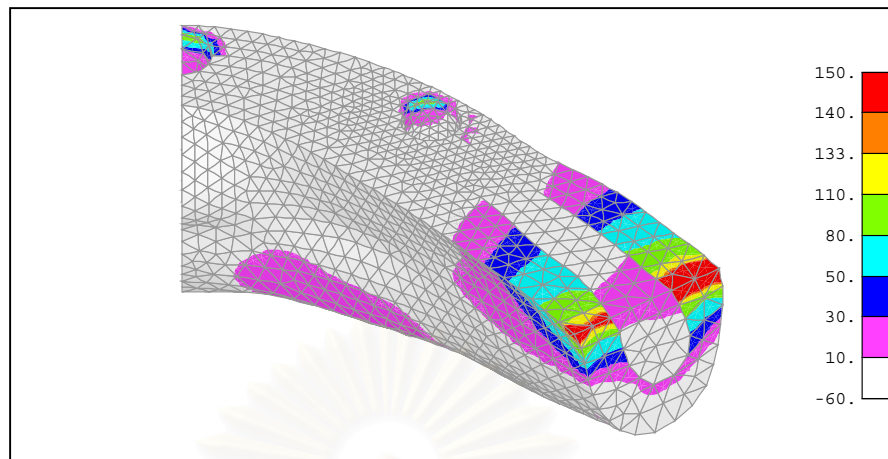
TOP VIEW



SECTION 3R-3R

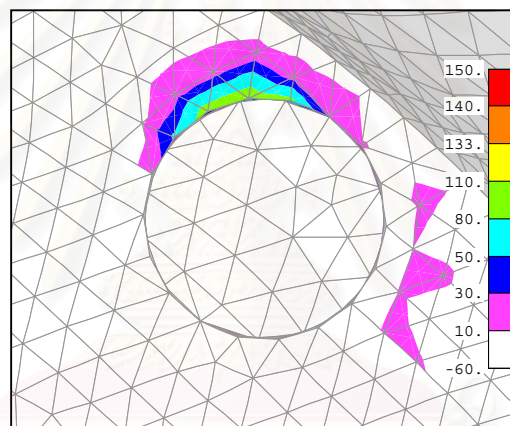
ภาพที่ 33ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง

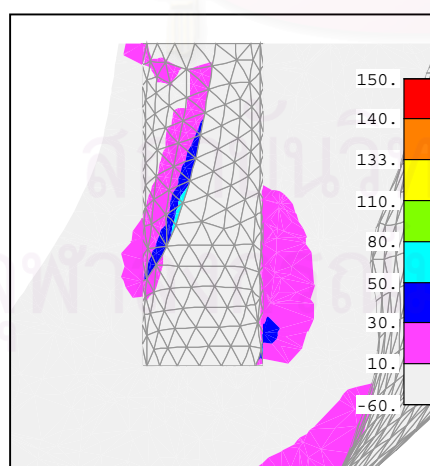


ภาพที่ 34 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเดียว

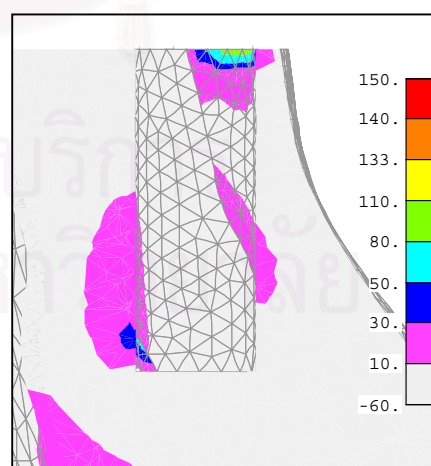
155-175-195 N



TOP VIEW



SECTION 1R-1R

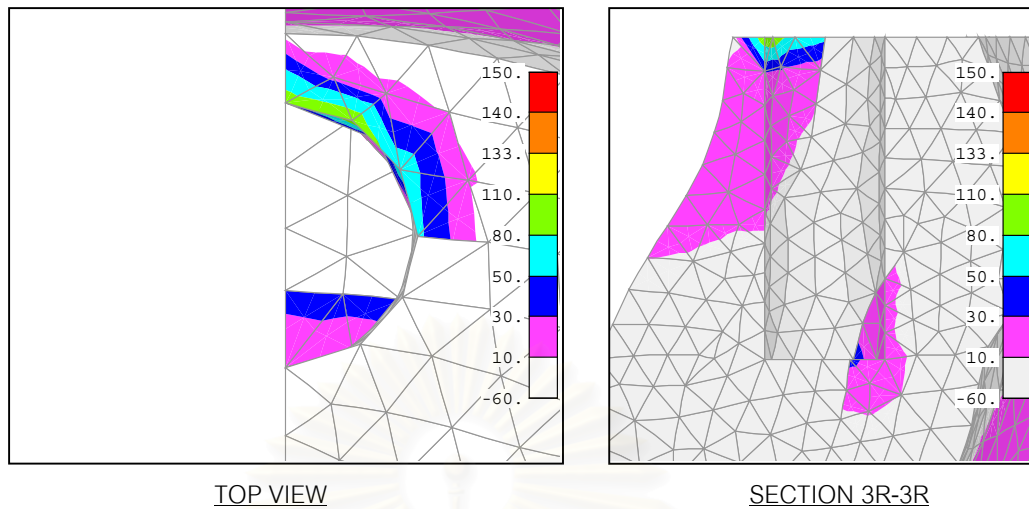


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 35 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเดียว

155-175-195 N

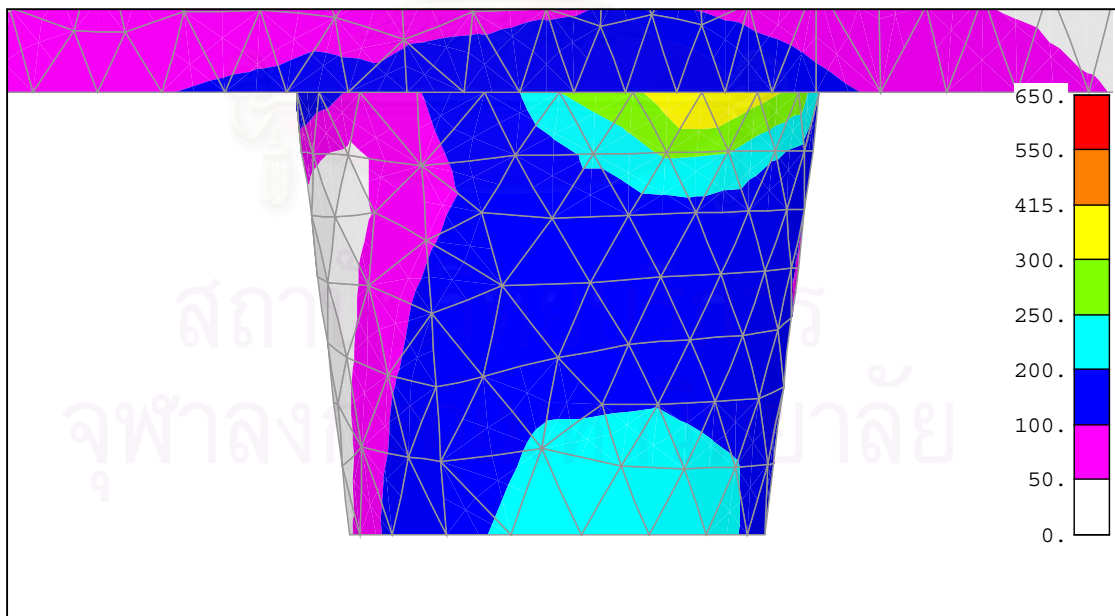




ภาพที่ 36ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

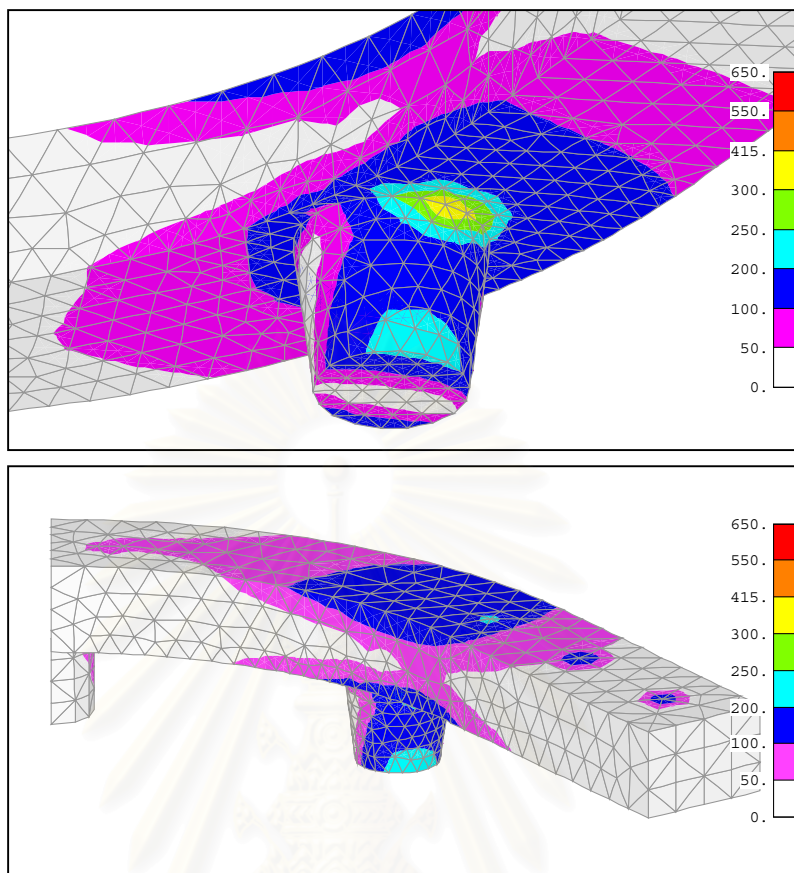
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข  
ชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

*Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนหลักยึดรากฟันเทียม*



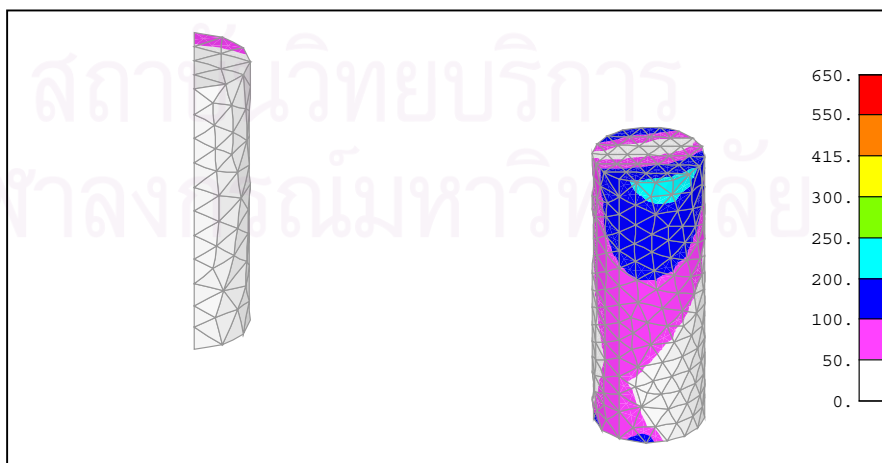
ภาพที่ 37ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



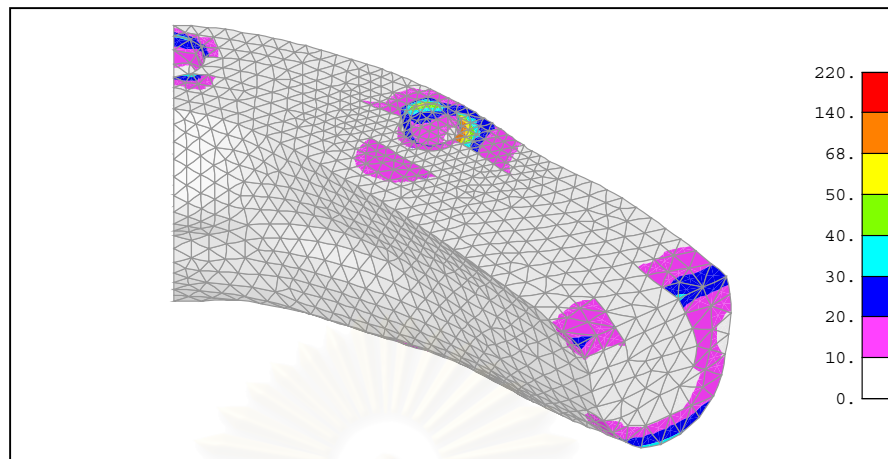
ภาพที่ 38 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

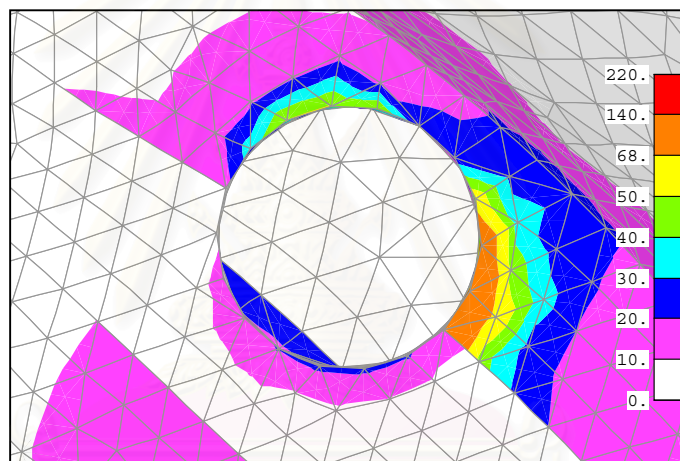


ภาพที่ 39 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

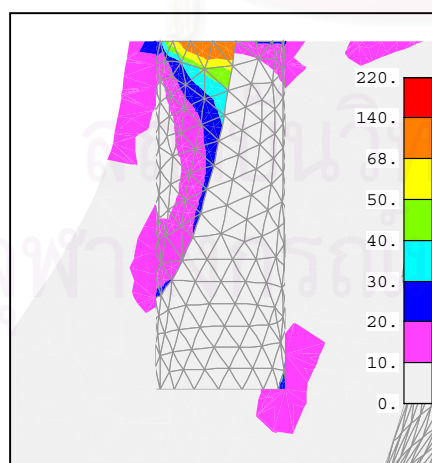
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



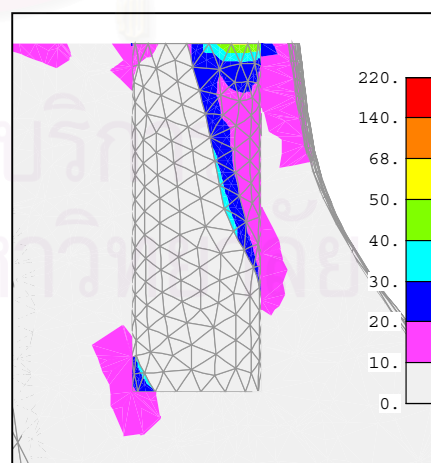
ภาพที่ 40 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

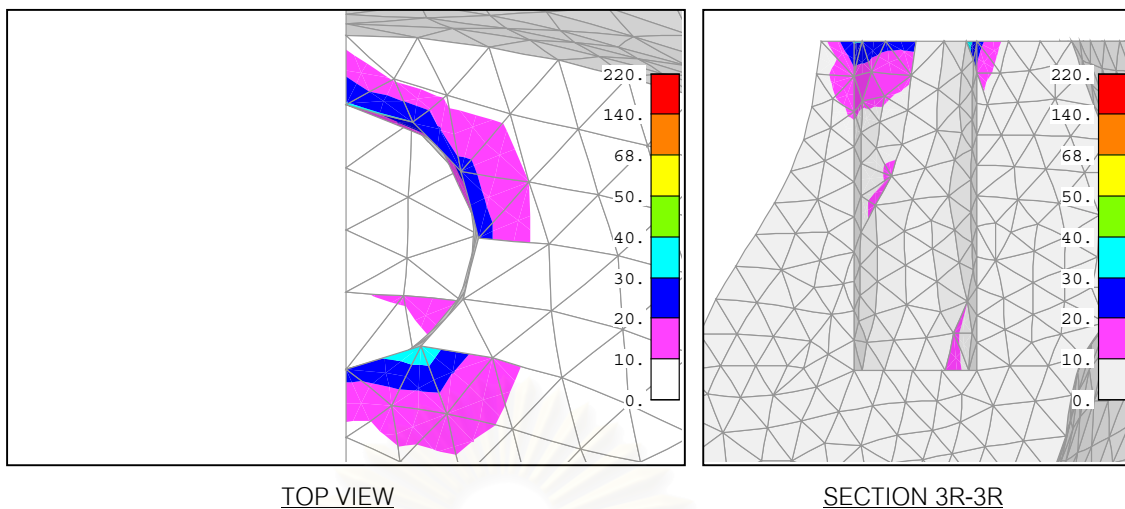


SECTION 1R-1R



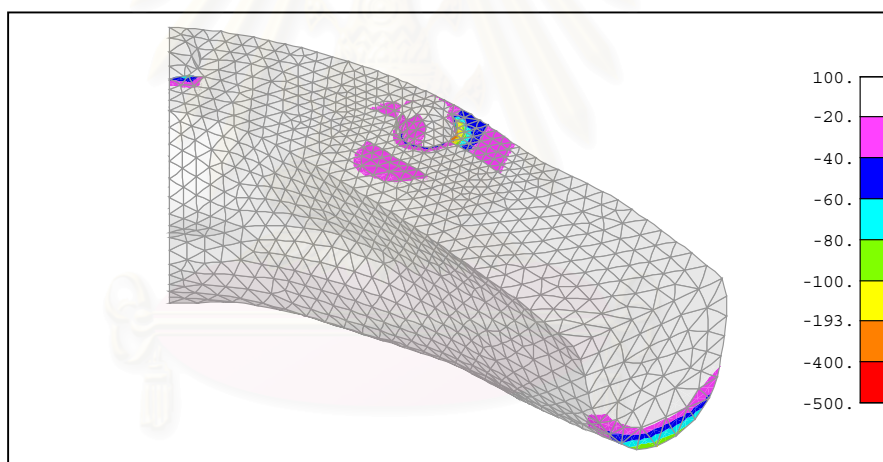
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 41 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



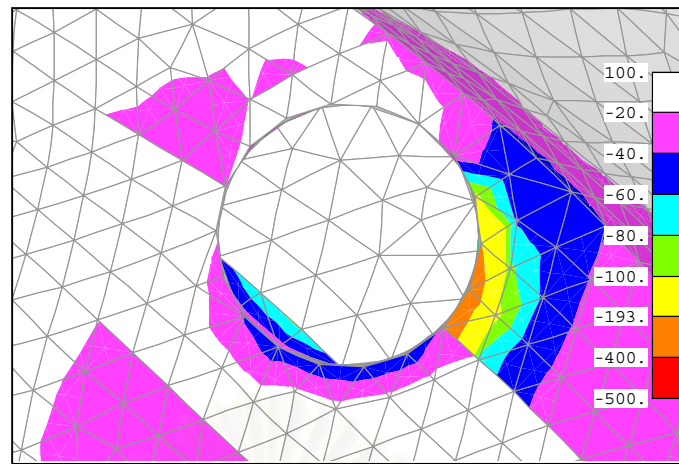
ภาพที่ 42x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุกครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง X มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง

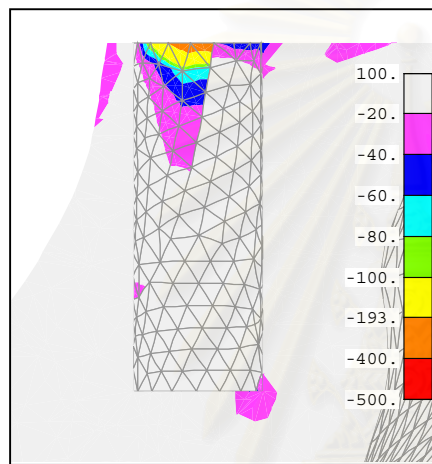


ภาพที่ 43x การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง X มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

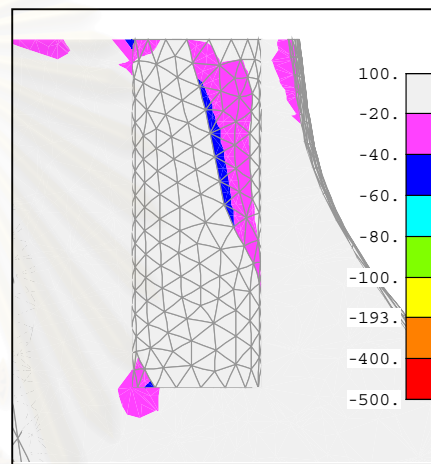
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



TOP VIEW

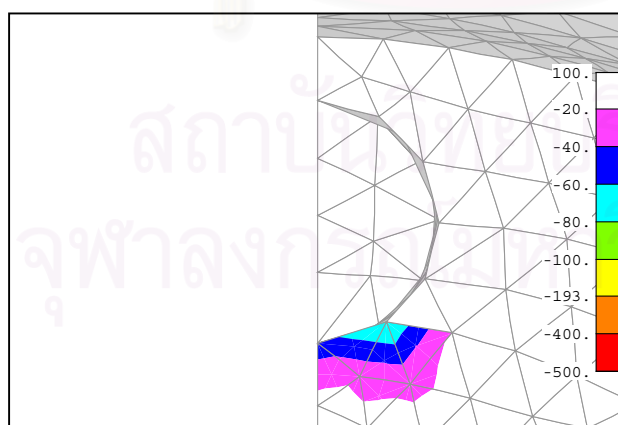


SECTION 1R-1R

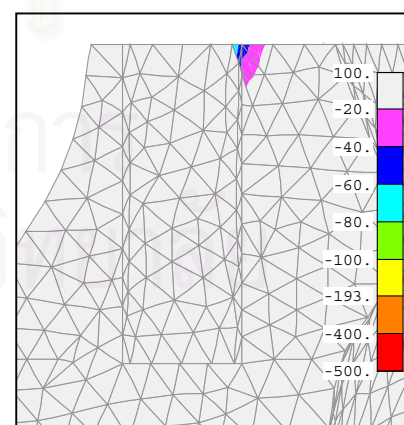


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 44 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมรอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



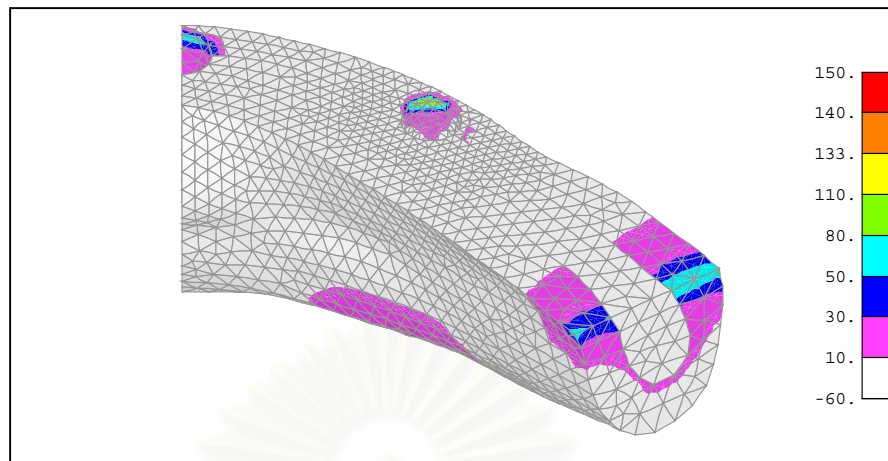
TOP VIEW



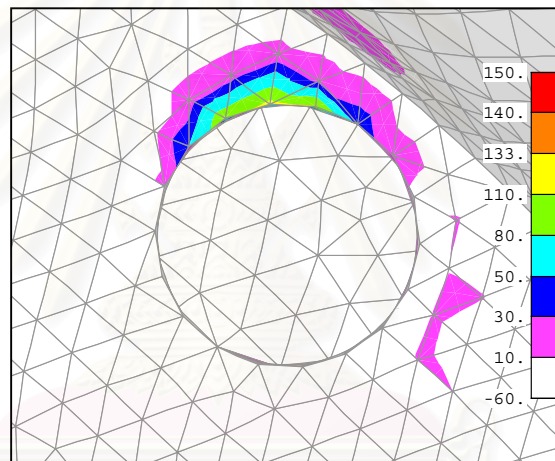
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 45 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมรอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

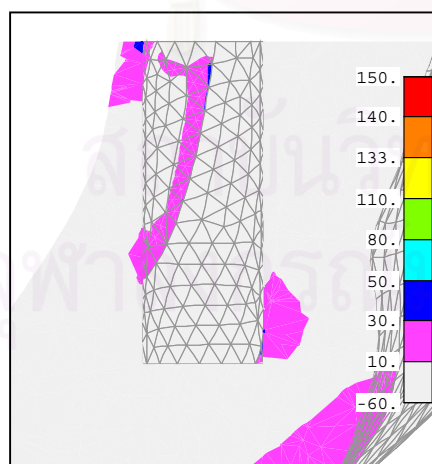
Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



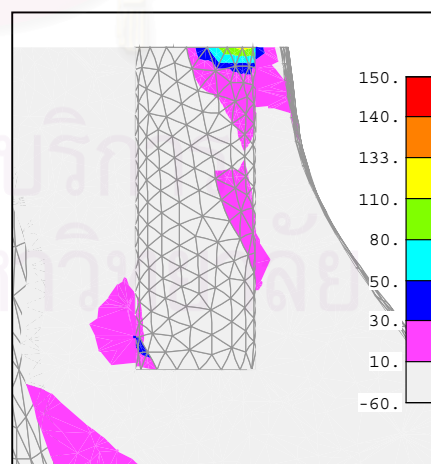
ภาพที่ 46 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเดียว 190 N



TOP VIEW

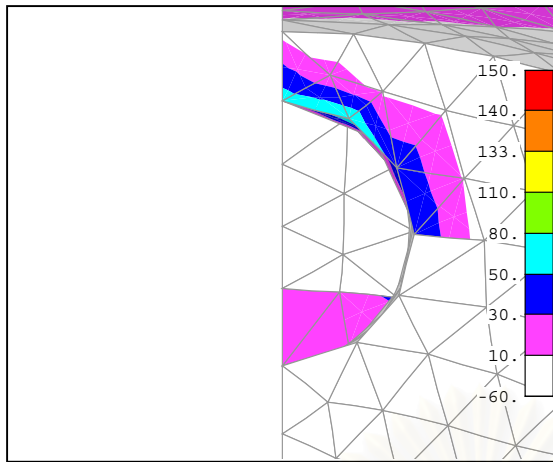


SECTION 1R-1R

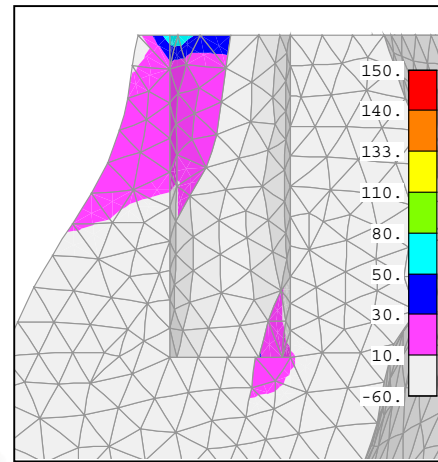


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 47 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเดียว 190 N



TOP VIEW



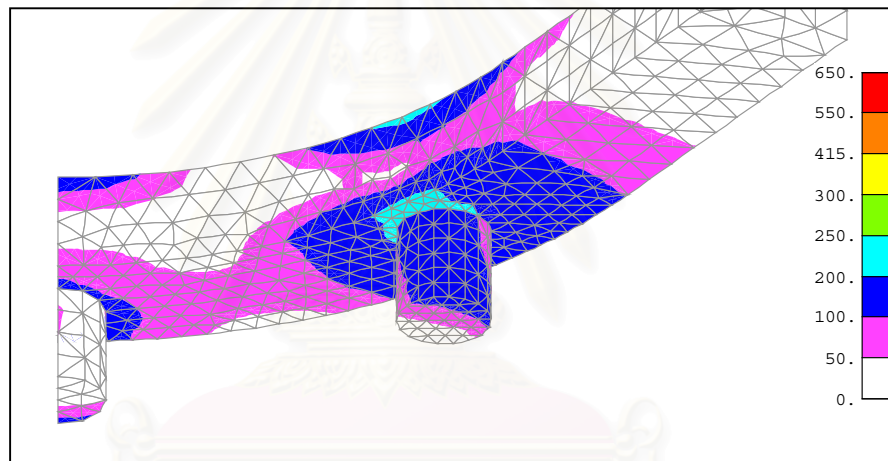
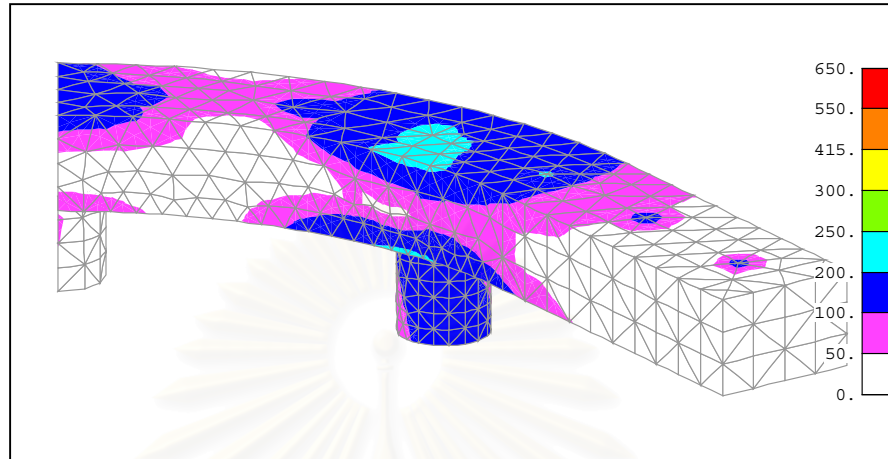
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 48ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้หลักยึดรากฟันเทียมรูปทรง ข มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

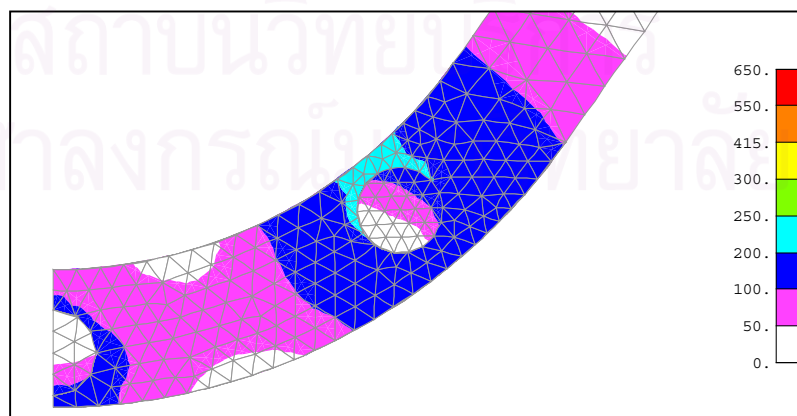
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย  
ชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



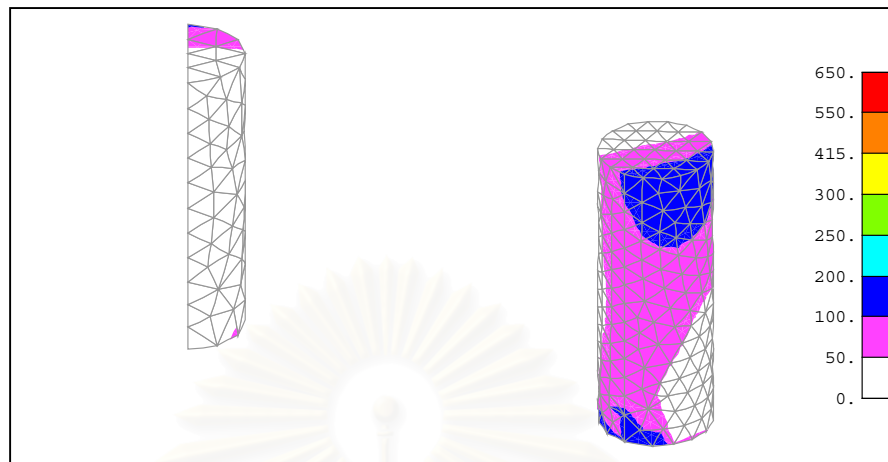
ภาพที่ 49x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N



ภาพที่ 50x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N

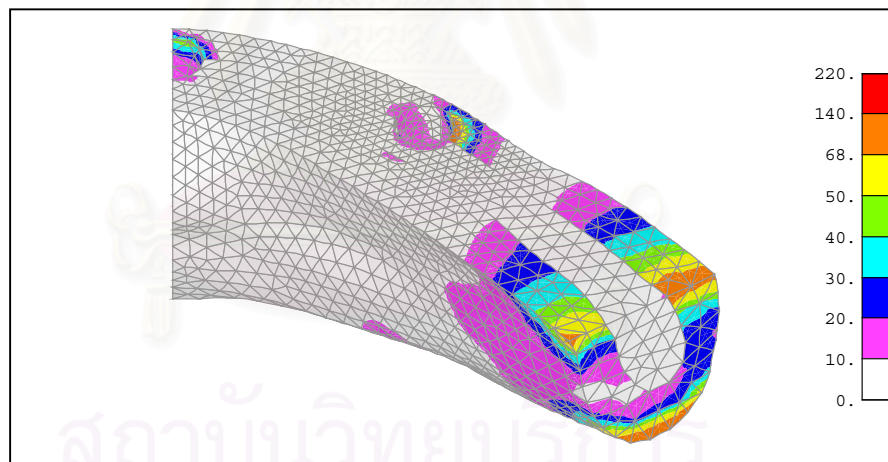


Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

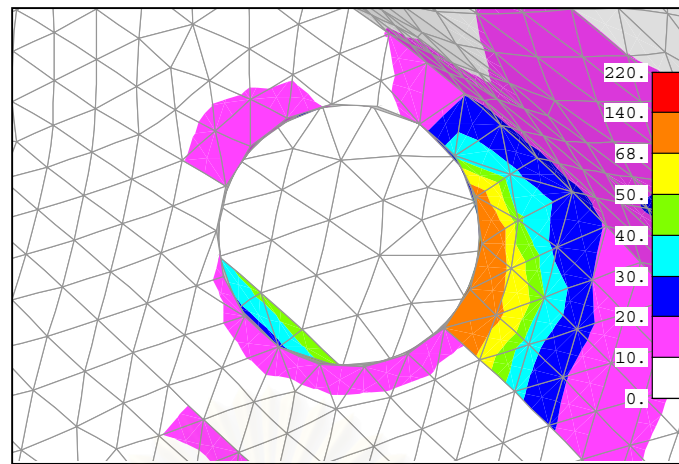


ภาพที่ 51x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

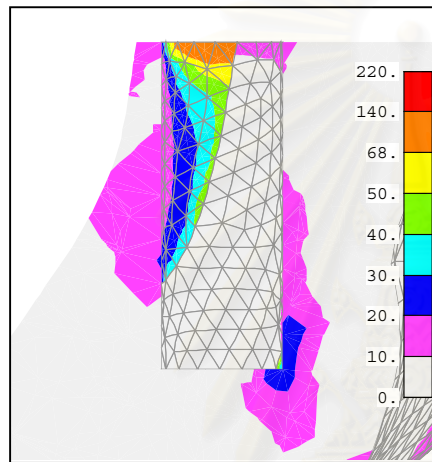
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



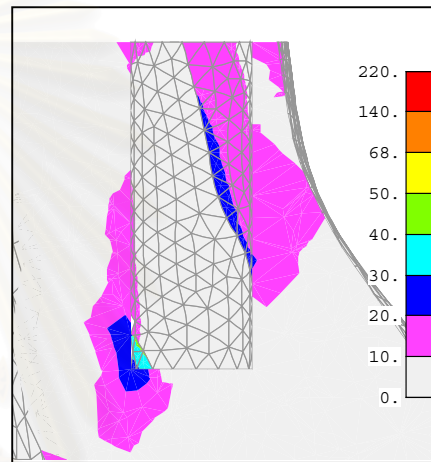
ภาพที่ 52x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

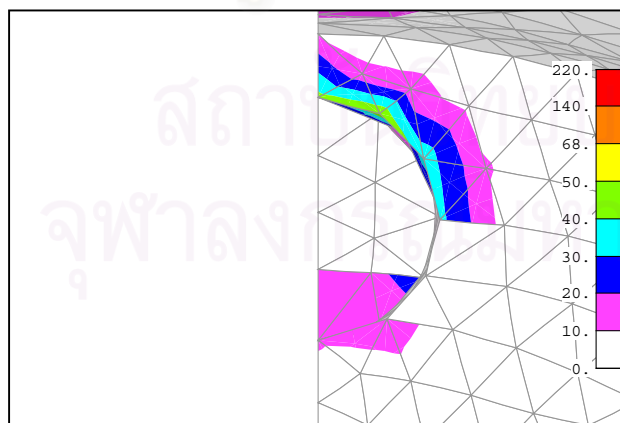


SECTION 1R-1R

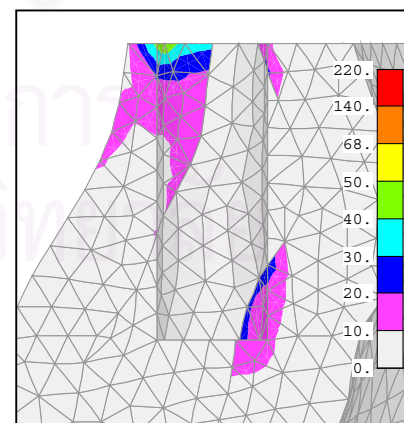


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 53 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



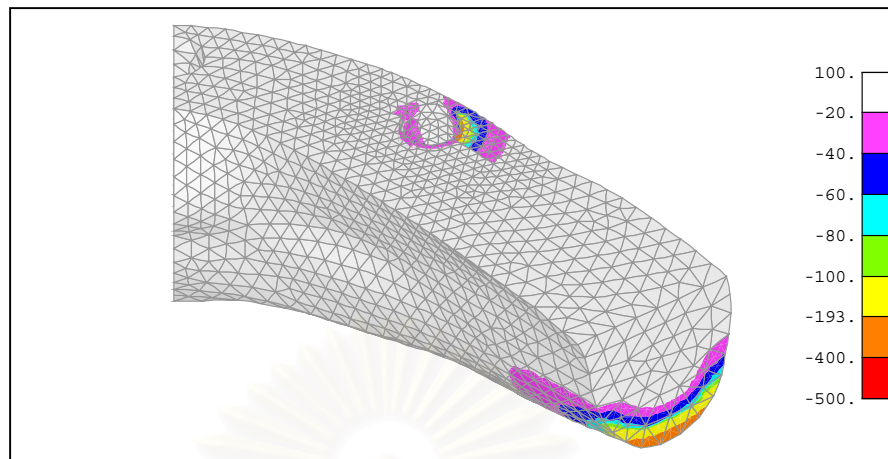
TOP VIEW



SECTION 3R-3R

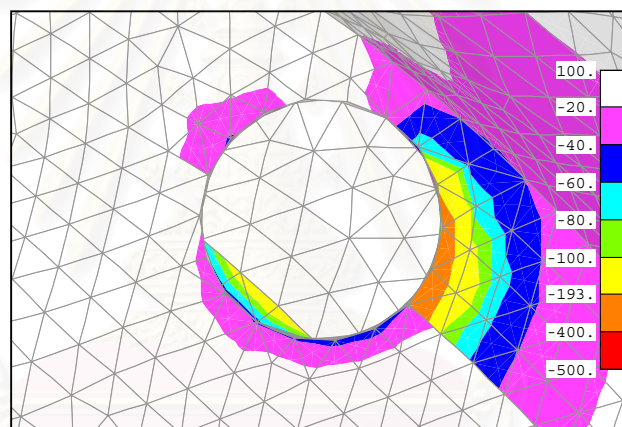
ภาพที่ 54 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง

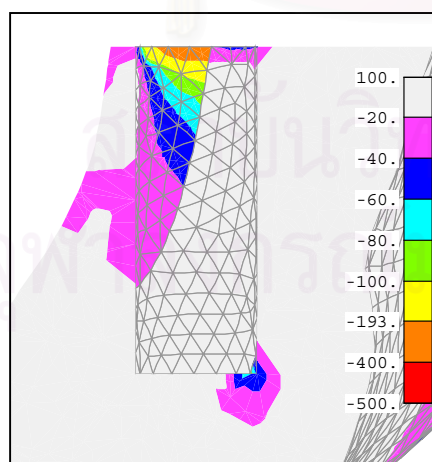


ภาพที่ 55x การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเดียว

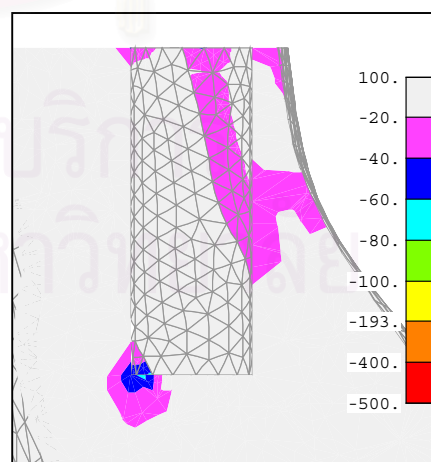
155-175-195 N



TOP VIEW



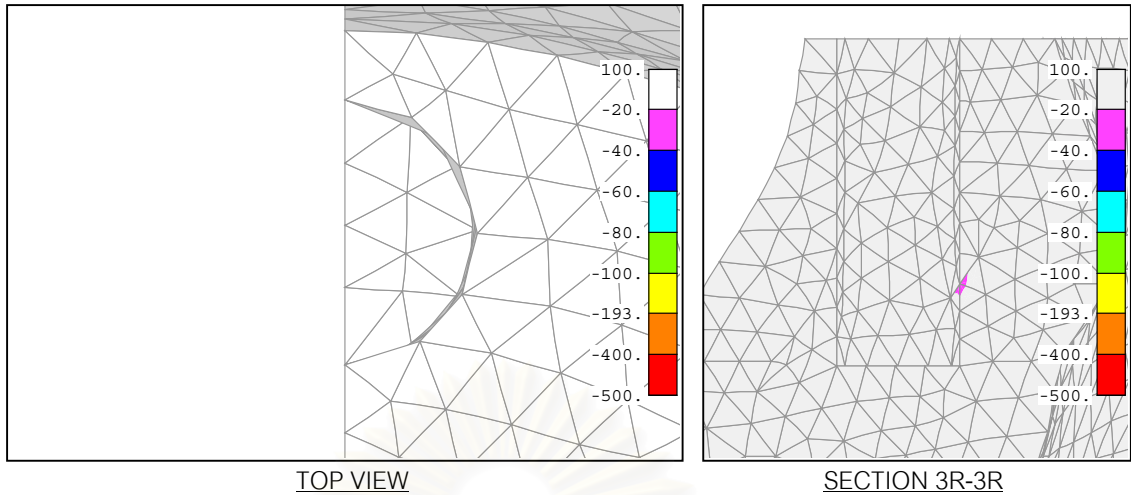
SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

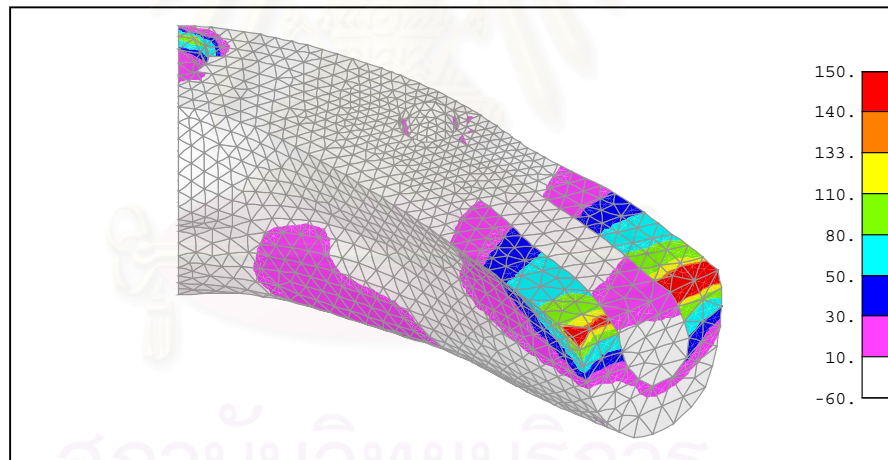
ภาพที่ 56x การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเดียว

155-175-195 N

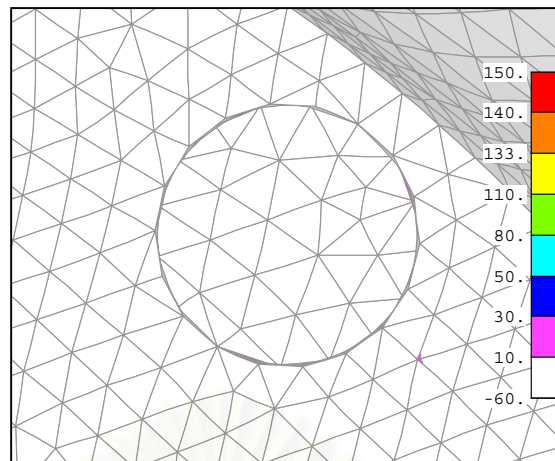


ภาพที่ 57x การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง

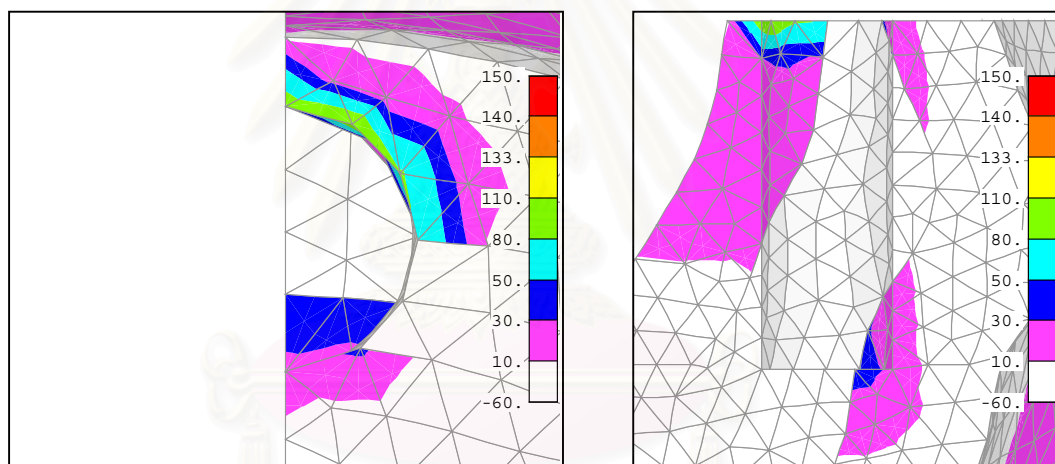


ภาพที่ 58x การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

ภาพที่ 59 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองพินปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



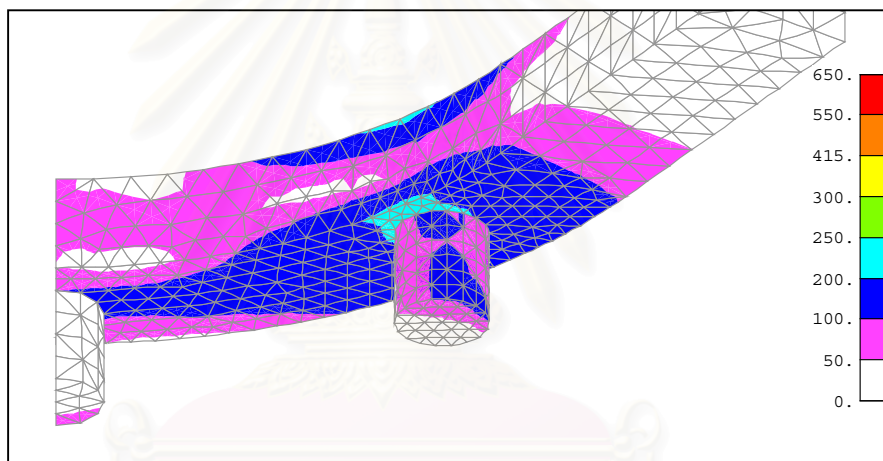
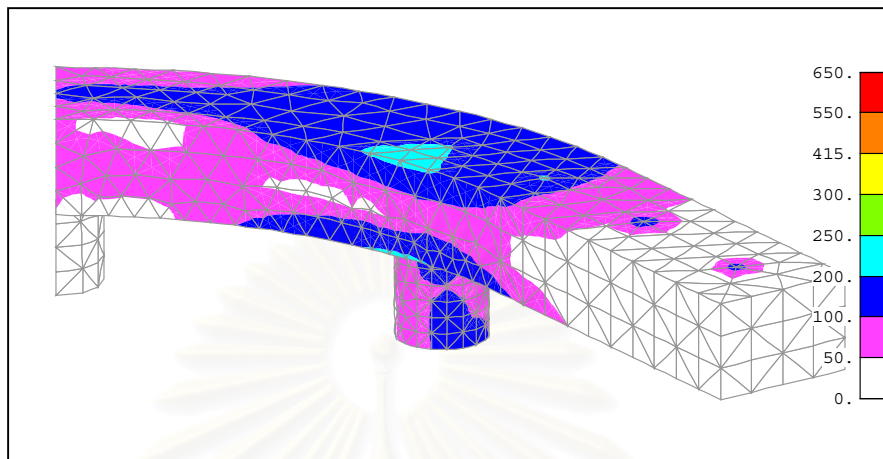
TOP VIEW

SECTION 3R-3R

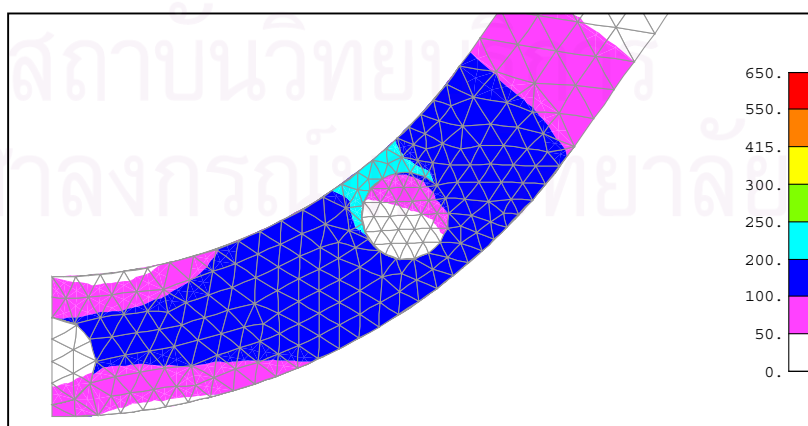
ภาพที่ 60 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองพินปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย  
 ชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม

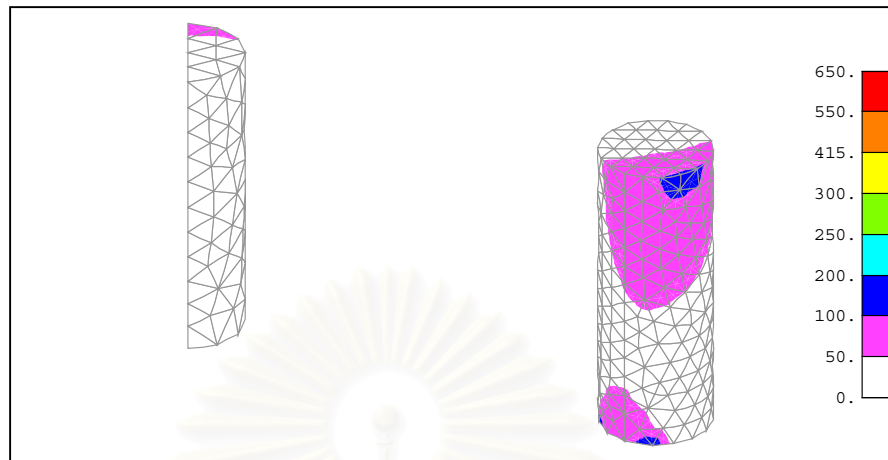


ภาพที่ 61x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



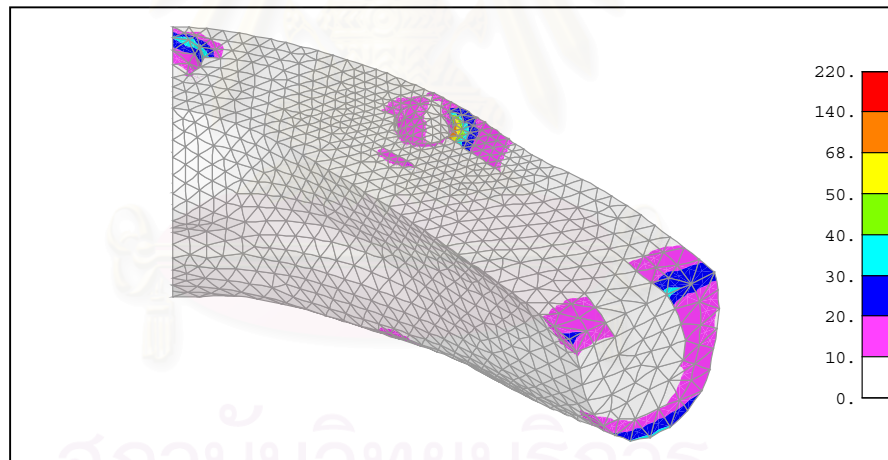
ภาพที่ 62x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

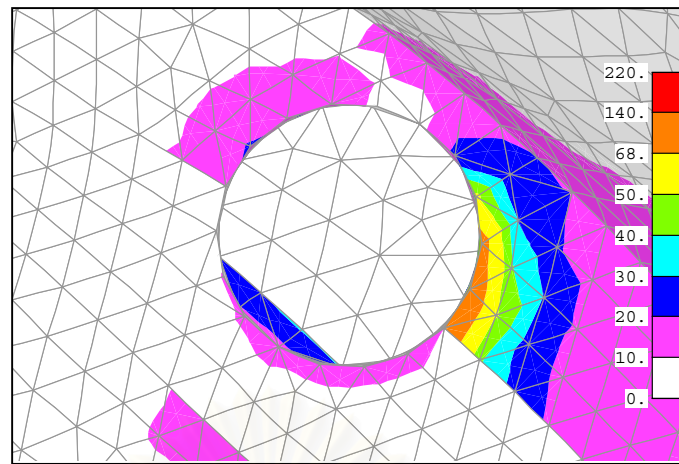


ภาพที่ 63ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

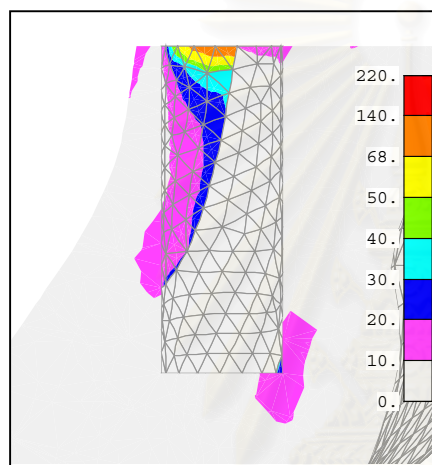
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



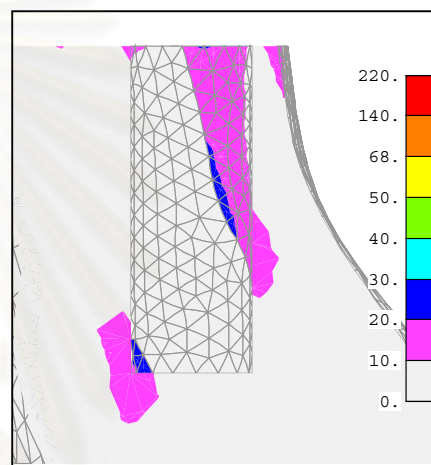
ภาพที่ 64ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

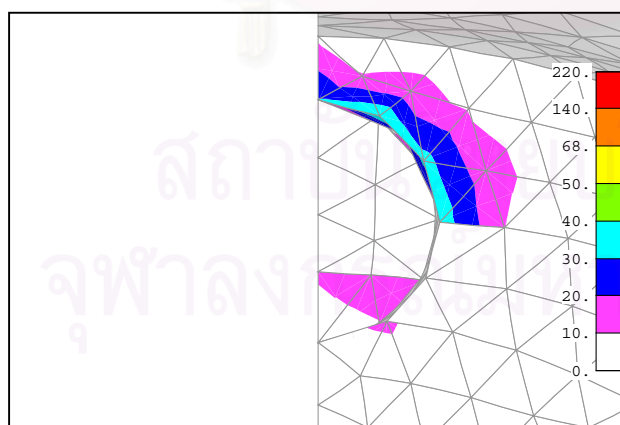


SECTION 1R-1R

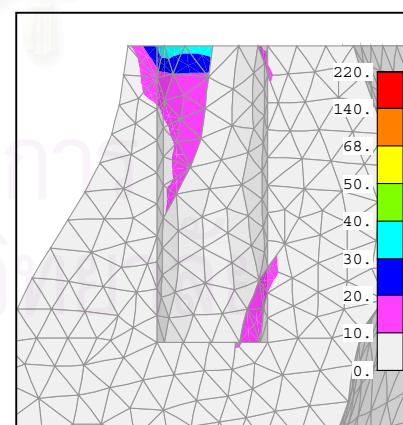


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 65x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

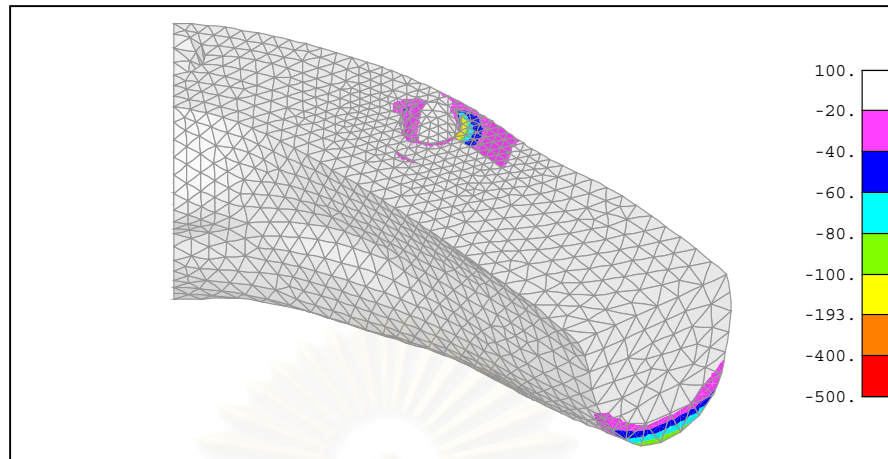


SECTION 3R-3R

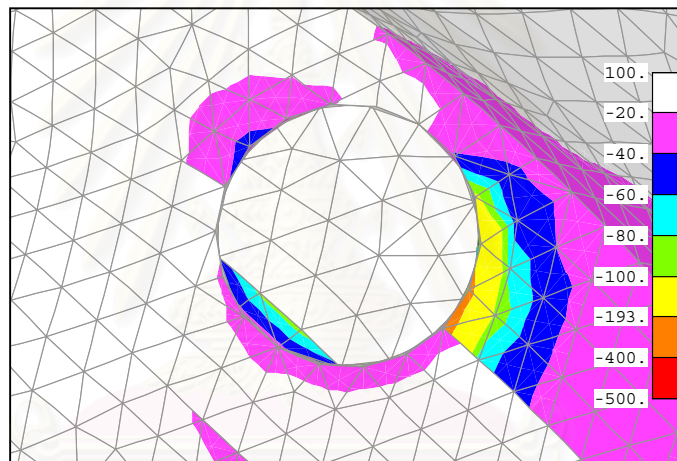
ภาพที่ 66x การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



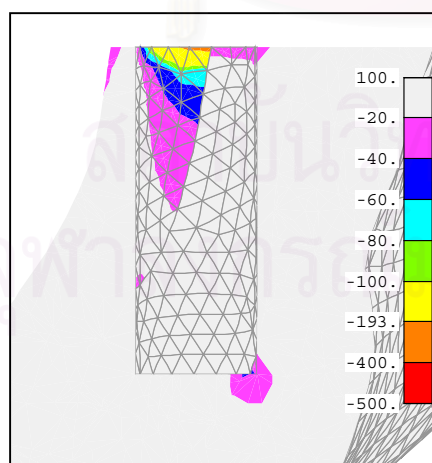
Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



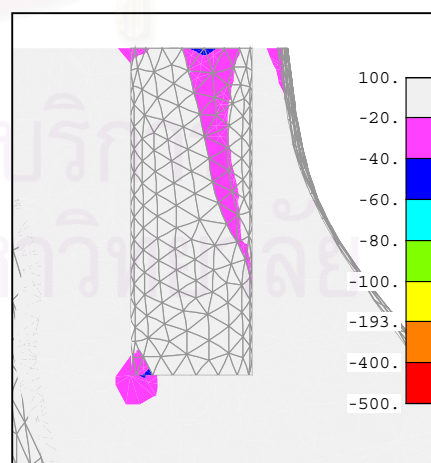
ภาพที่ 67 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

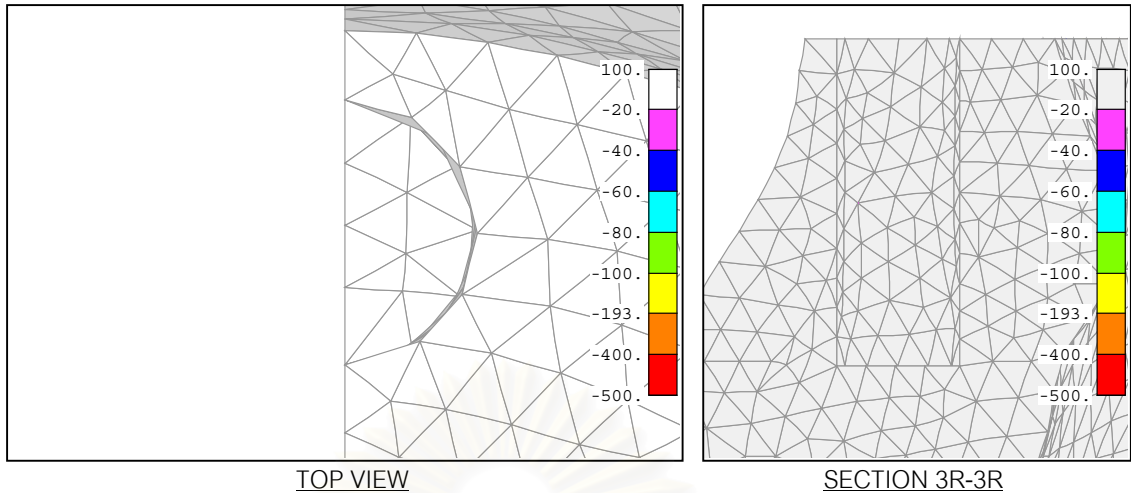


SECTION 1R-1R



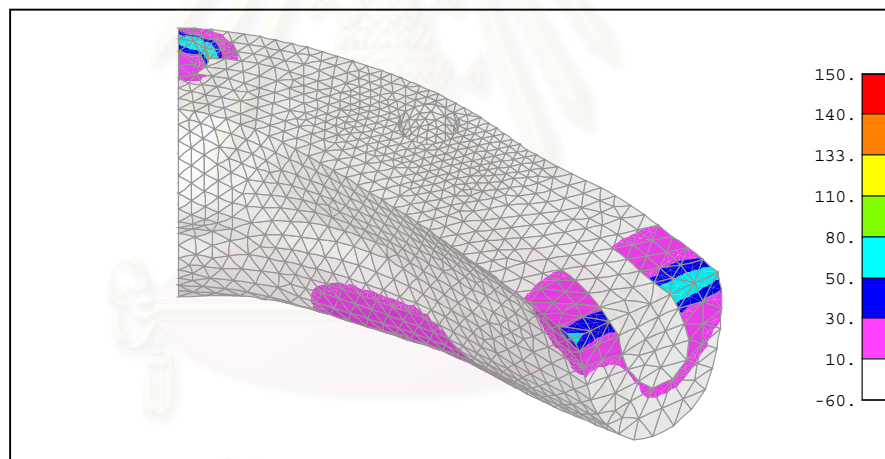
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 68 การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



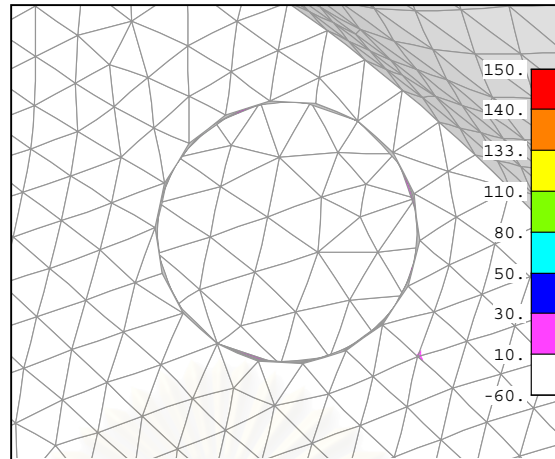
ภาพที่ 69ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

*Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง*



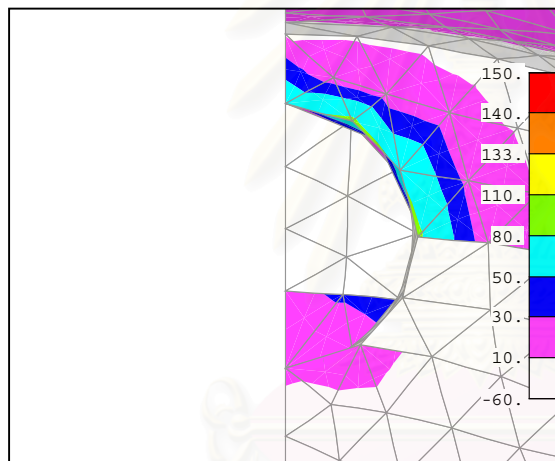
ภาพที่ 70ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงบดเคี้ยว 190 N

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

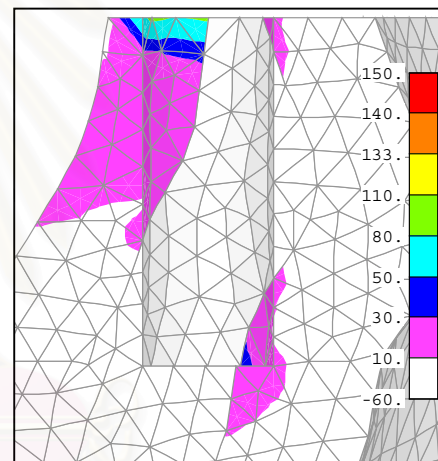


TOP VIEW

ภาพที่ 71 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมรอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW



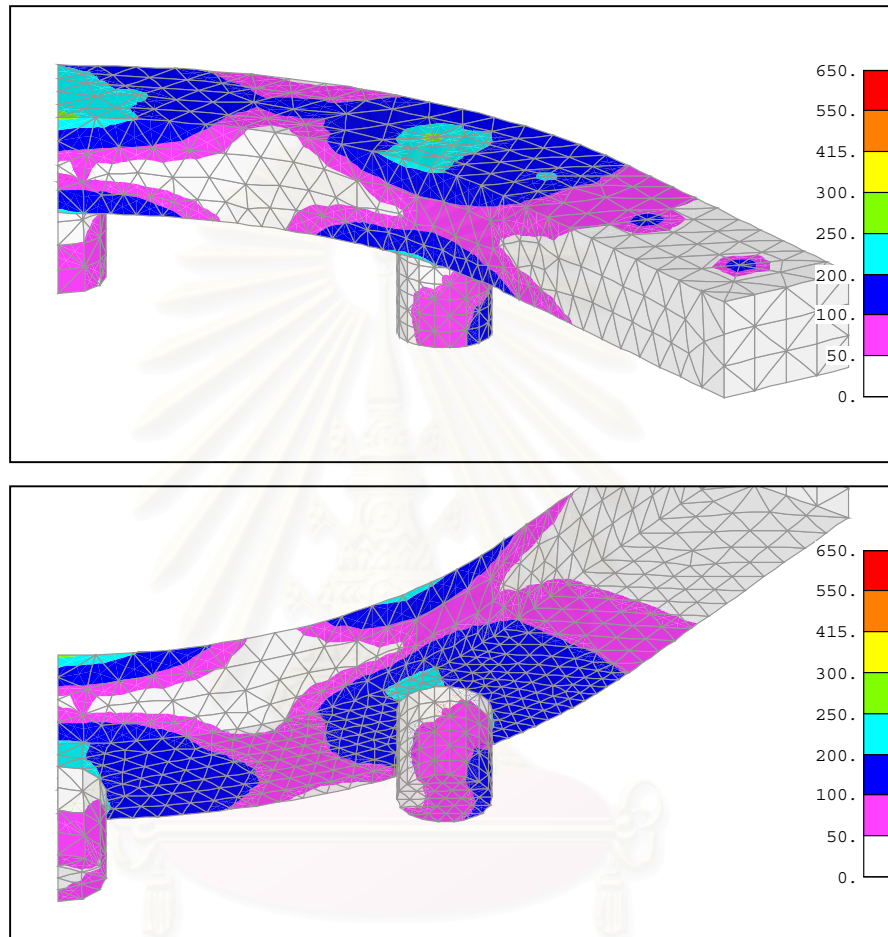
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 72 การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมรอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน  
 ชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N

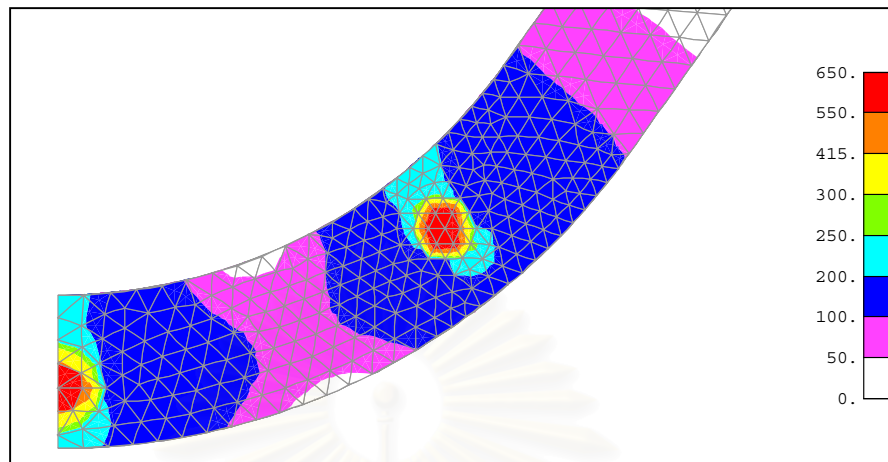
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



ภาพที่ 73ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะ



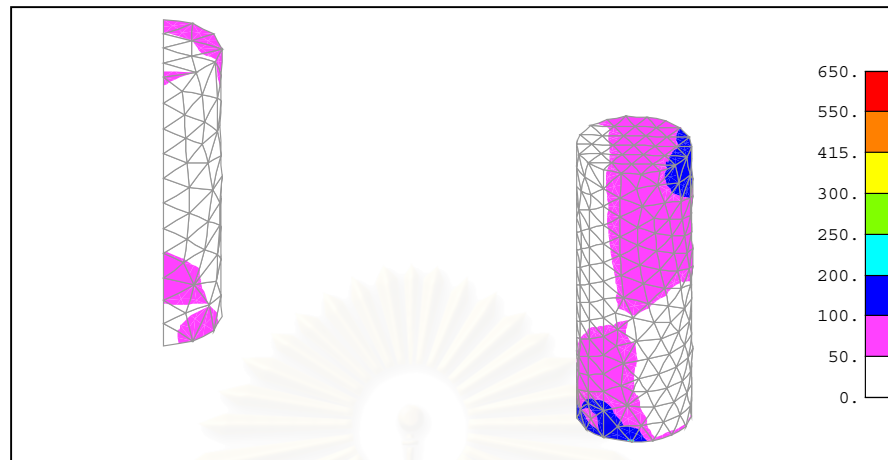
ภาพที่ 74ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะในแบบจำลอง ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนหลักยึดรากฟันเทียม



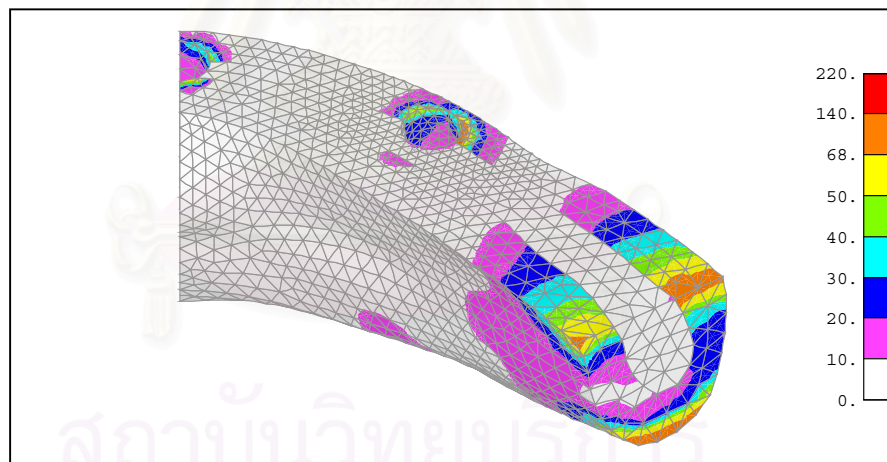
ภาพที่ 75ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมใน แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

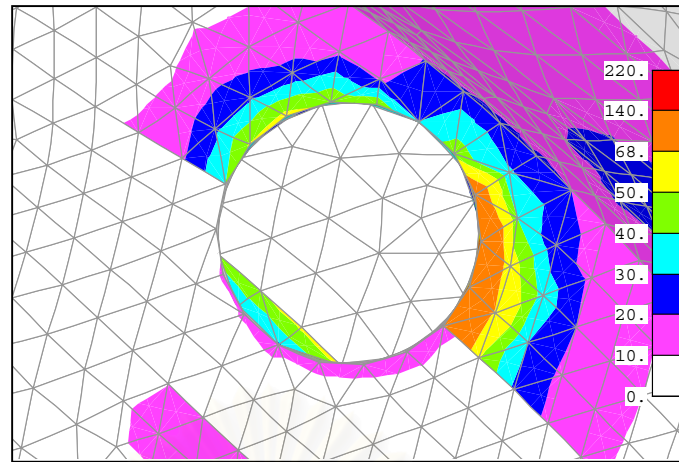


ภาพที่ 76ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N

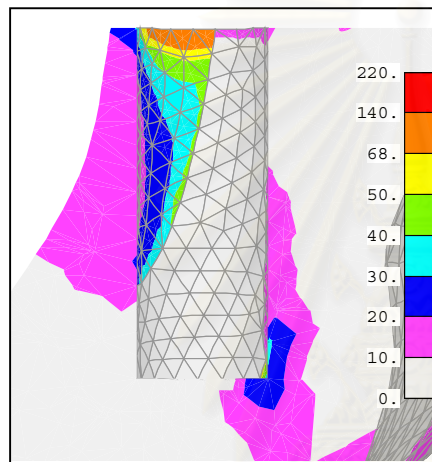
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



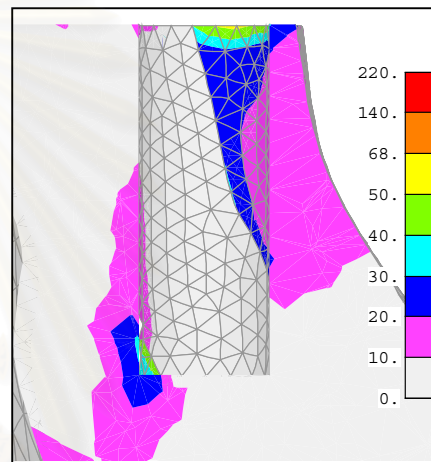
ภาพที่ 77ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

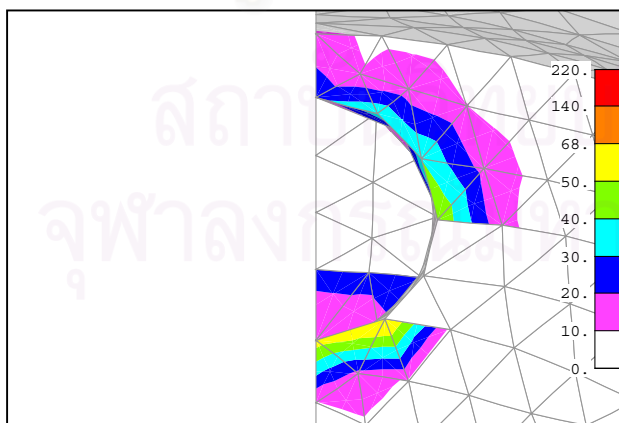


SECTION 1R-1R

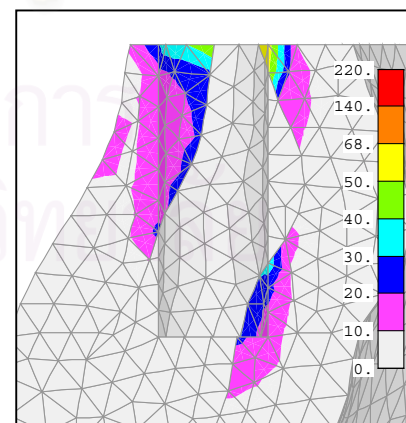


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 78 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

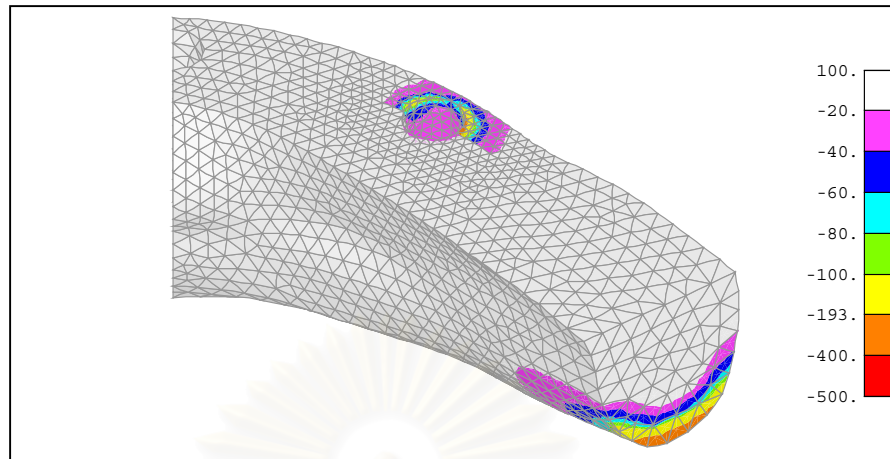


SECTION 3R-3R

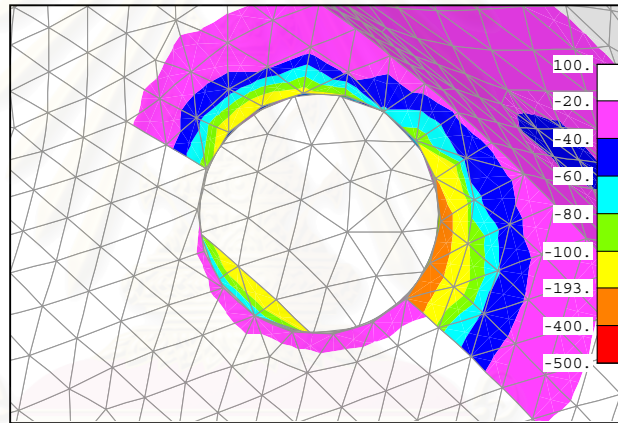
ภาพที่ 79 การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว

155-175-195 N

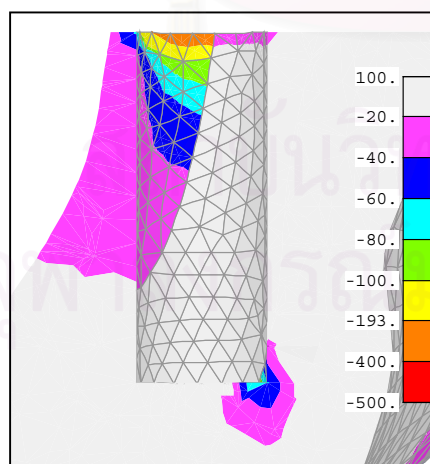
Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



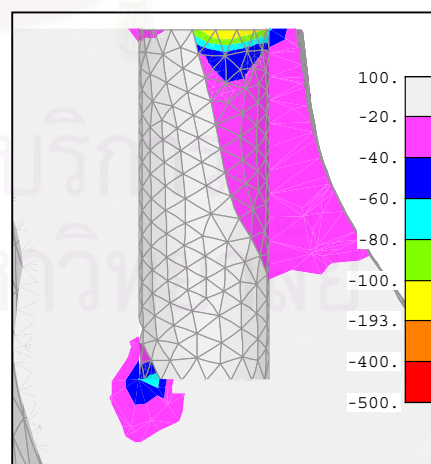
ภาพที่ 80ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW



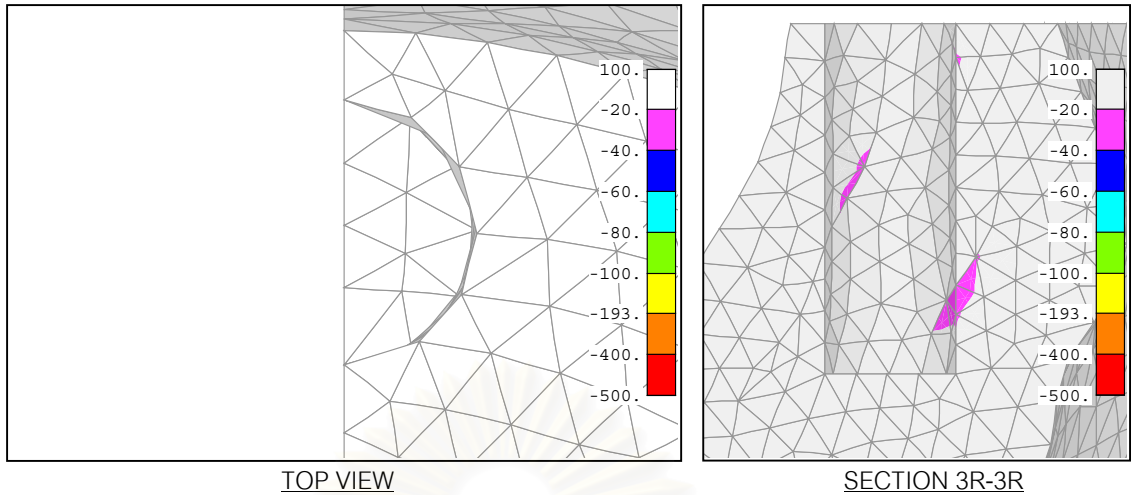
SECTION 1R-1R



SECTION 1L-1L

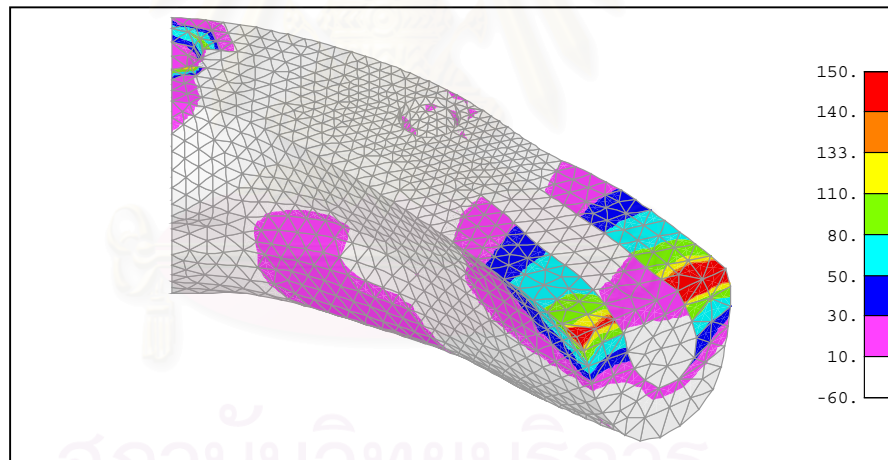
ภาพที่ 81ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 155-175-195 N



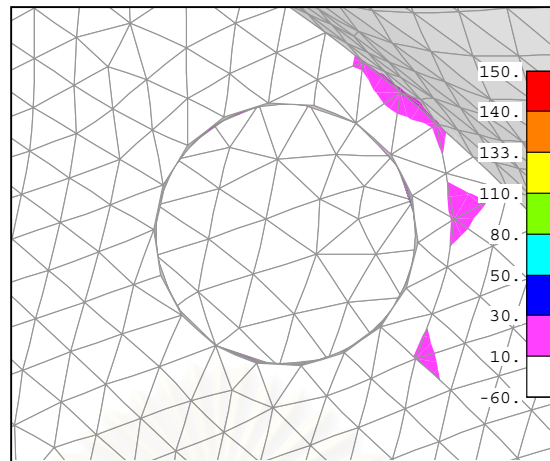


ภาพที่ 82ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N

Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



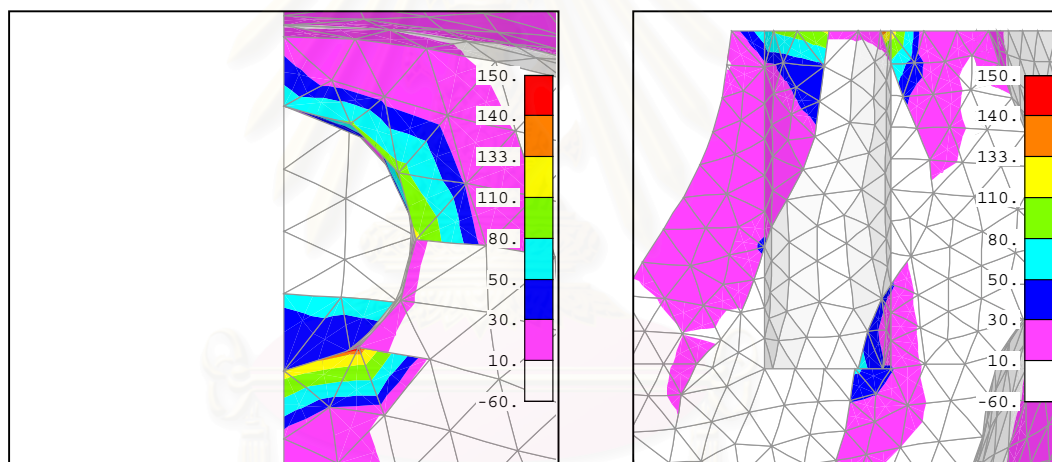
ภาพที่ 83ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงบดเคี้ยว 155-175-195 N



TOP VIEW

ภาพที่ 84x การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเดียว

155-175-195 N



TOP VIEW

SECTION 3R-3R

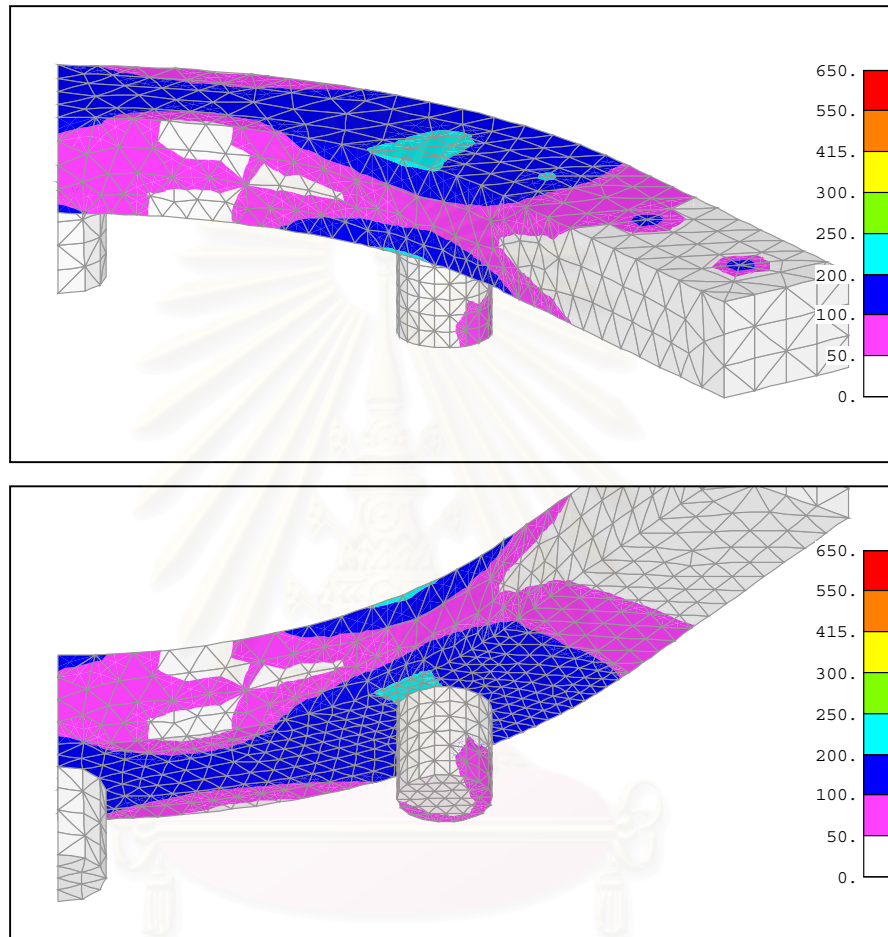
ภาพที่ 85x การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมครอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเดียว

155-175-195 N

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน  
 ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

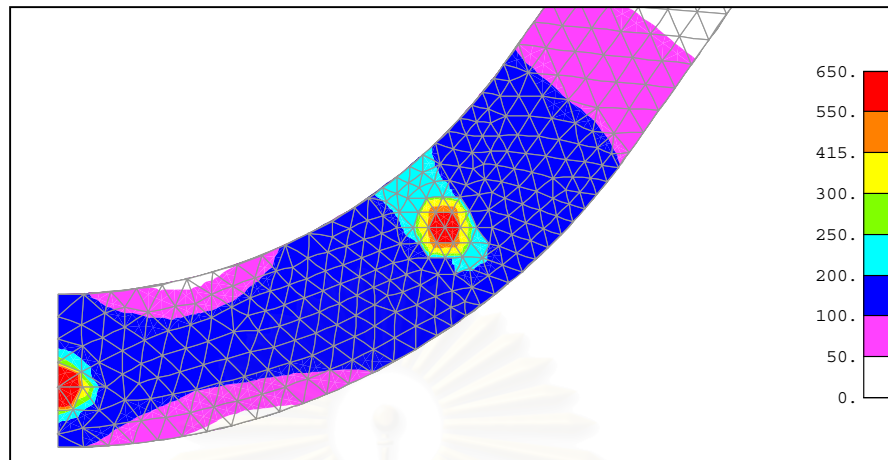
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียม



ภาพที่ 86ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะและหลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N

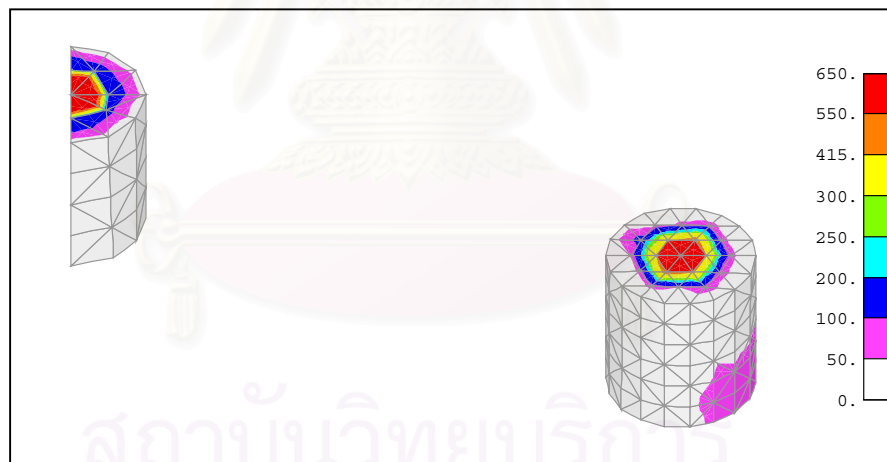
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนโครงโลหะ



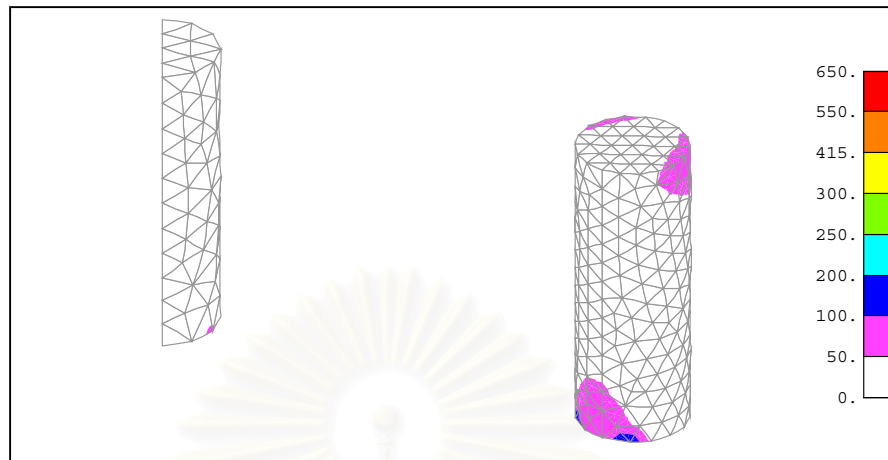
ภาพที่ 87ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนโครงโลหะในแบบจำลอง ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนหลักยึดรากฟันเทียม



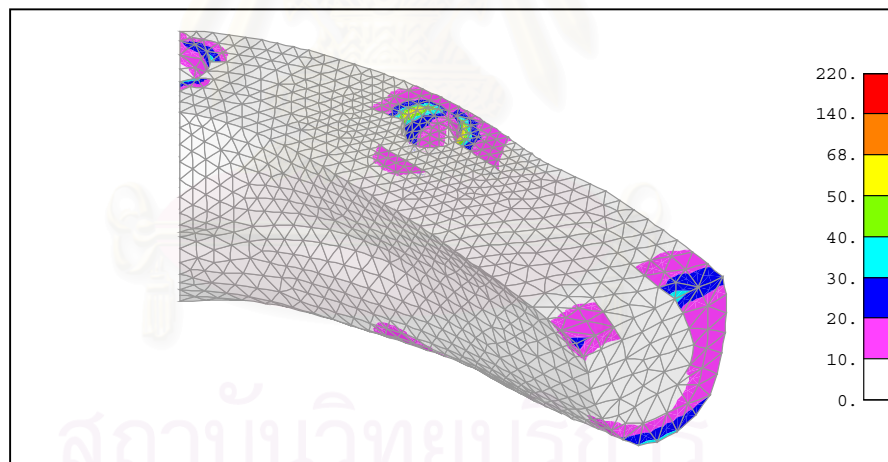
ภาพที่ 88ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนหลักยึดรากฟันเทียมใน แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนรากฟันเทียม

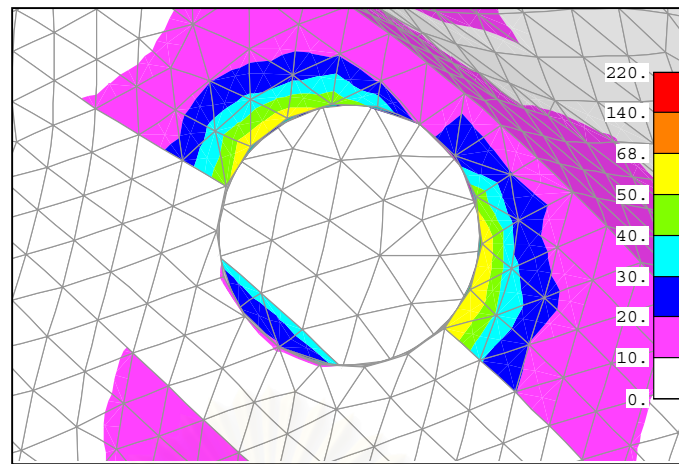


ภาพที่ 89ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress ,MPa) บนรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

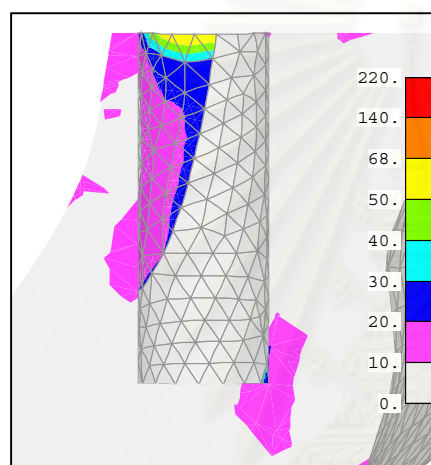
Maximum Shear Stress ( $0.5[\sigma_1 - \sigma_3]$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง



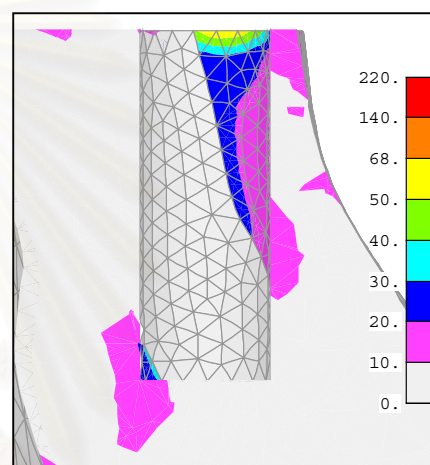
ภาพที่ 90ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

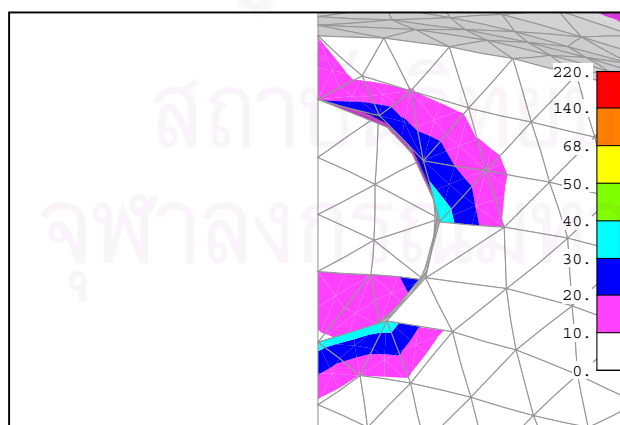


SECTION 1R-1R

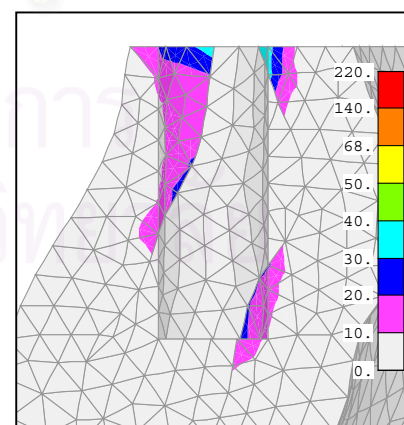


SECTION 1L-1L

ภาพที่ 91 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



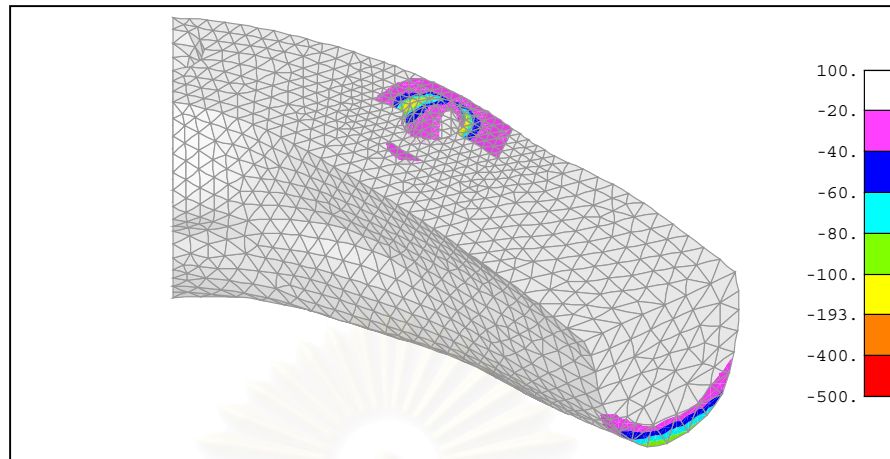
TOP VIEW



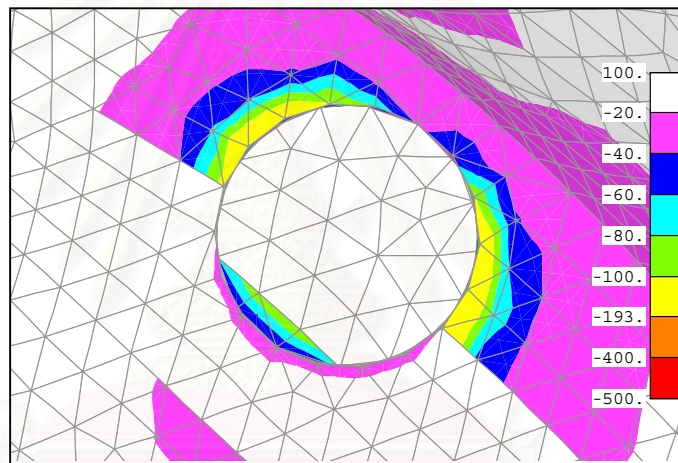
SECTION 3R-3R

ภาพที่ 92 ข การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress, MPa) บนกระดุมครอบปากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

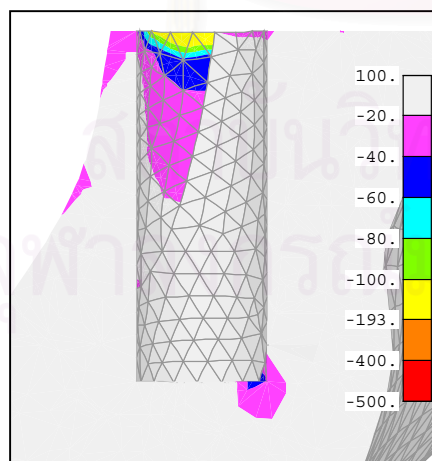
Minimum Principal Stress ( $\sigma_3$ ) บนกระดุกขากรรไกรล่าง



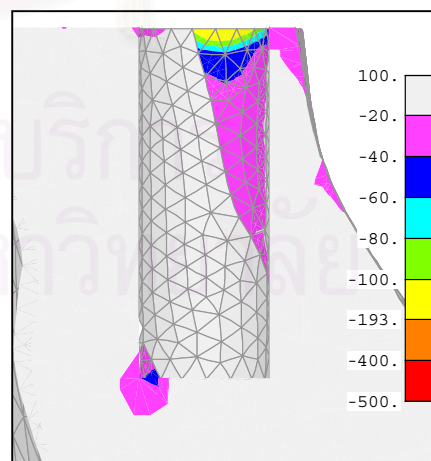
ภาพที่ 93ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



TOP VIEW

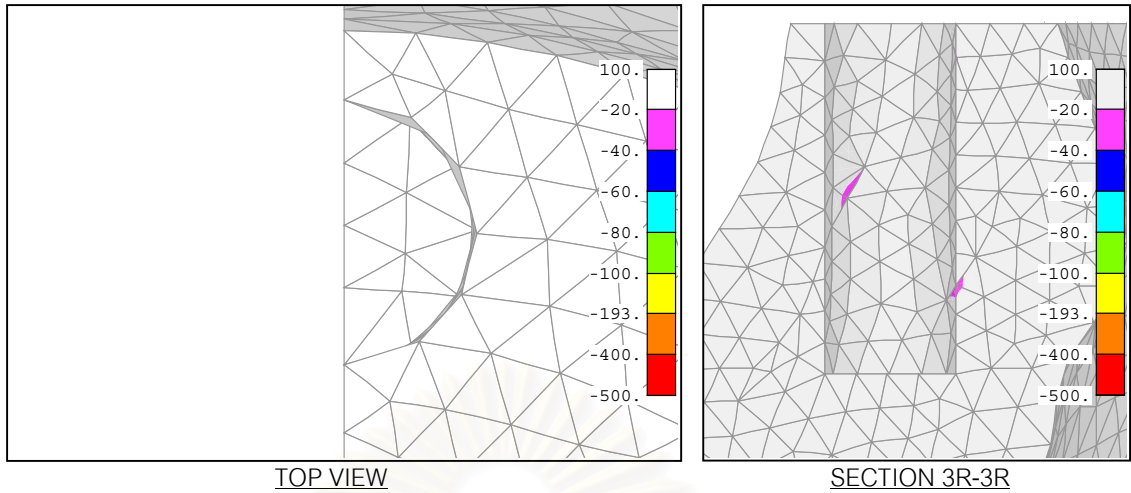


SECTION 1R-1R



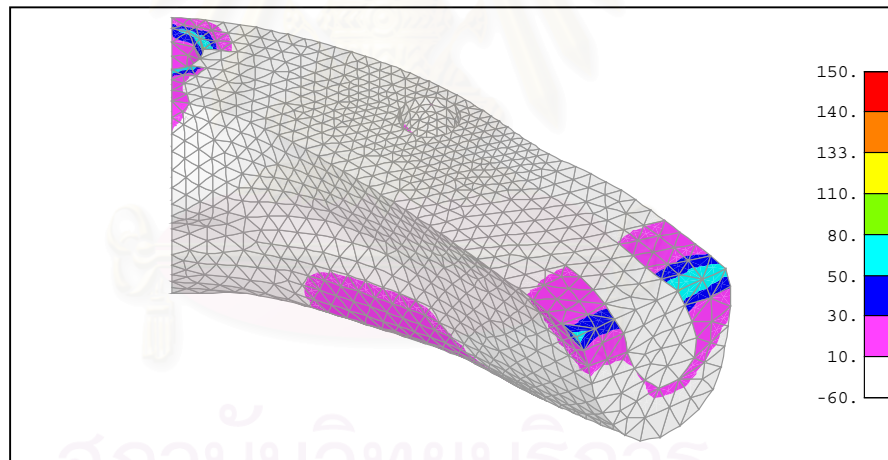
SECTION 1L-1L

ภาพที่ 94ข การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดูกรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



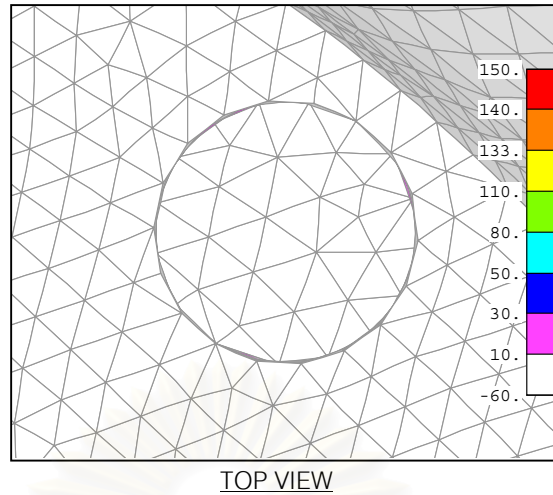
ภาพที่ 95x การกระจายความเค้นหลักต่ำสุด (Minimum Principal Stress ,MPa) บนกระดุกอบจากพื้นเทียม ตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

Maximum Principal Stress ( $\sigma_1$ ) บนกระดูกขากรรไกรล่าง

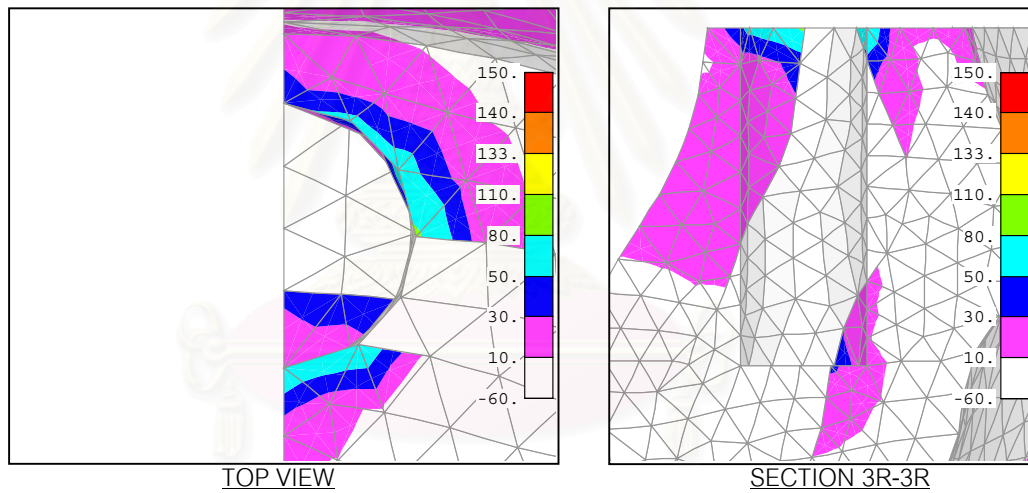


ภาพที่ 96x การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดูกขากรรไกรล่างในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N





ภาพที่ 97ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียมตัวที่ 1 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N



ภาพที่ 98ข การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress , MPa) บนกระดุมรอบรากฟันเทียมตัวที่ 3 ในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียม ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน มีชุดแรงกดเคี้ยว 190 N

ตารางที่ 1ข สรุปค่าความเค้น(MPa)ที่เกิดในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว

ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก		
	ชุดแรงบิดเดียว	
	155-175-195 N	190 N
ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอม (MPa)	382	389
ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	144	104
ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	-371	-251
ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	110	70
ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข		
	ชุดแรงบิดเดียว	
	155-175-195 N	190 N
ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอม (MPa)	369	370
ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	151	114
ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	-388	-276
ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	102	65
ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย		
	ชุดแรงบิดเดียว	
	155-175-195 N	190 N
ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอม (MPa)	161	102
ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	136	91
ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	-356	-233
ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	110	86
ฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดที่มีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน		
	ชุดแรงบิดเดียว	
	155-175-195 N	190 N
ความเค้นเฉือนสูงสุดบนโครงสร้างฟันปลอม (MPa)	-	-
ความเค้นเฉือนสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	118	64
ความเค้นกดสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	-315	-162
ความเค้นดึงสูงสุดในกระดูกรอบรากฟันเทียม (MPa)	115	85

### การกระจายแรงในรากฟันเทียม

ตารางที่ 2 ข ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก					
	ชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	90	0	-90	133	-43
$F_y$ (N)	55	-110	82	-81	-2
$F_z$ (N)	-1354	569	-919	441	-92
$M_x$ (N-mm)	1902	522	2055	242	171
$M_y$ (N-mm)	412	0	963	-644	260
$M_z$ (N-mm)	-217	0	-199	-159	-91
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข					
	ชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	86	0	-97	137	-40
$F_y$ (N)	58	-114	86	-86	-1
$F_z$ (N)	-1334	530	-898	414	-86
$M_x$ (N-mm)	2061	471	2253	202	177
$M_y$ (N-mm)	571	0	1169	-637	268
$M_z$ (N-mm)	-227	0	-203	-161	-104
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย					
	ชุดแรงบิดเดี่ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเดี่ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	223	0	92	-91	-1
$F_y$ (N)	-26	51	-28	15	14
$F_z$ (N)	-1483	826	-977	544	-137
$M_x$ (N-mm)	793	1107	622	648	554
$M_y$ (N-mm)	-430	0	-96	365	110
$M_z$ (N-mm)	-91	0	-16	58	22

ตารางที่ 2ข (ต่อ) ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากโครงโลหะสู่หลักยึดรากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดที่มีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน					
	ชุดแรงบิดเดียว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเดียว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	152	-3	20	14	-34
$F_y$ (N)	-3	5	8	-9	2
$F_z$ (N)	-1700	1261	-1135	836	-270
$M_x$ (N-mm)	0	0	0	0	0
$M_y$ (N-mm)	0	0	0	0	0
$M_z$ (N-mm)	0	0	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3ข ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดสู่รากพื้นเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ก					
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	90	0	-90	133	-43
$F_y$ (N)	55	-110	82	-81	-2
$F_z$ (N)	-1354	569	-919	441	-92
$M_x$ (N-mm)	1682	961	1725	565	178
$M_y$ (N-mm)	772	0	603	-113	89
$M_z$ (N-mm)	-217	0	-199	-159	-91
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้หลักยึดรูปทรง ข					
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	86	0	-97	137	-40
$F_y$ (N)	58	-114	86	-86	-1
$F_z$ (N)	-1334	530	-898	414	-86
$M_x$ (N-mm)	1831	926	1908	545	180
$M_y$ (N-mm)	916	0	781	-91	110
$M_z$ (N-mm)	-227	0	-203	-161	-104
แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากพื้นเทียมซึ่งใช้โครงโลหะโคบอลต์อัลลอย					
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	223	0	92	-91	-1
$F_y$ (N)	-26	51	-28	15	14
$F_z$ (N)	-1483	826	-977	544	-137
$M_x$ (N-mm)	898	901	735	589	500
$M_y$ (N-mm)	463	0	273	1	106
$M_z$ (N-mm)	-91	0	-16	58	22

ตารางที่ 3ข (ต่อ) ค่าแรงและโมเมนต์ที่ถ่ายทอดจากหลักยึดสู่รากฟันเทียมในแบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้ว

แบบจำลองฟันปลอมไฮบริด 3 รากฟันเทียมซึ่งใช้หลักยึดที่มีจุดเชื่อมต่อแบบจุดหมุน					
	ชุดแรงบิดเคี้ยว 155-175-195 N		ชุดแรงบิดเคี้ยว 190 N		
	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 1	หลักยึดตัวที่ 3	หลักยึดตัวที่ 5
$F_x$ (N)	152	-3	20	14	-34
$F_y$ (N)	-3	5	8	-9	2
$F_z$ (N)	-1700	1261	-1135	836	-270
$M_x$ (N-mm)	12	-20	-30	38	-7
$M_y$ (N-mm)	609	-11	78	56	-134
$M_z$ (N-mm)	0	0	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชาคกริต ตั้งศิริมงคล เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2520 ที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย