

การประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมหน้าตัดแบบต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟ  
ไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF ENDODONTIC ROTARY FILES WITH DIFFERENT CROSS-  
SECTIONAL DESIGNS USING FINITE ELEMENT METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม    |
|                                 | หน้าตัดแบบต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ |
| โดย                             | นายณัชพล นันทประทีป                               |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมเครื่องกล                                 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นาคกิจ                |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.เสกฐ์วรรช สุจริตภวัตสกุล                       |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นาคกิจ)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.เสกฐ์วรรช สุจริตภวัตสกุล)

----- กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สรिता โมรากุล)

----- กรรมการ  
(อาจารย์ ทันทแพทย์ศิริวุฒิ หิรัญอุศว์)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ทันทแพทย์ ดร.วีรชัย สิงห์นาคกิจ)

ณัชพล นันทประทีป : การประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมหน้าตัดแบบต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ( FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF ENDODONTIC ROTARY FILES WITH DIFFERENT CROSS-SECTIONAL DESIGNS USING FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.เสกฐ์วรรธ สุขจิตภวัตสกุล

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และอายุความล้าของตะไบแบบหมุนนิกเกิลไทเทเนียมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษานี้ได้พิจารณาตะไบแบบหมุนที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม และได้จำลองให้ตะไบสอดเข้าไปในแบบจำลองคลองรากฟันที่มีความโค้งแตกต่างกัน โดยกำหนดรัศมีโค้งของคลองรากฟันให้มีขนาด 2 มม. 5 มม. และ 8 มม. และมุมโค้งมีขนาด 30 องศา 45 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ เพื่อจำลองให้ตะไบเสียรูปไปตามส่วนโค้งของคลองรากฟันเหมือนการทำงานจริงในการรักษาคลองรากฟัน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตะไบรับภาระแกนเดียว โดยมีลักษณะความเค้นและความเครียดเป็นคาบรูปไซน์ จากนั้นจึงพิจารณาแอมพลิจูดของความเค้นและความเครียดสูงสุดในวัฏจักรความล้า ซึ่งพบว่าแอมพลิจูดของความเครียดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามรัศมีโค้งและมุมโค้งของคลองรากฟัน โดยรัศมีโค้งมีอิทธิพลต่อแอมพลิจูดของความเครียดมากกว่ามุมโค้งและรูปร่างหน้าตัดของตะไบ ในขณะที่แอมพลิจูดของความเค้นไม่ได้แปรผันตามพารามิเตอร์ของรูปร่างคลองรากฟันดังเช่นกรณีของความเครียด เนื่องจากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของนิกเกิลไทเทเนียมที่ไม่ได้แปรผันตรงต่อกัน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดถูกนำไปใช้ประเมินอายุความล้าของตะไบโดยใช้วิธีหาอายุความล้าจากความเค้น และหาอายุความล้าจากความเครียด ซึ่งพบว่าวิธีหาอายุความล้าจากความเครียดมีผลการประเมินอายุความล้าที่สอดคล้องมากกว่าวิธีหาอายุความล้าจากความเค้น

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6570077521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: rotary file, finite element method, stress and strain, cyclic fatigue, fatigue life

Natchaphon Nanthapraphip : FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF ENDODONTIC ROTARY FILES WITH DIFFERENT CROSS-SECTIONAL DESIGNS USING FINITE ELEMENT METHOD. Advisor: Prof. PAIROD SINGHATANADGID, Ph.D. Co-advisor: Sedthawatt Sucharitpwatskul, Ph.D.

This thesis focuses on the analysis of stress, strain, and fatigue life of nickel-titanium rotary files using the finite element method. Four cross-sectional designs considered in this study are equilateral triangle, square, S-shaped, and convex triangle. The study simulated the insertion of files into artificial root canals with various curvatures, i.e. the radius of curvature of 2 mm, 5 mm, and 8 mm, and the angle of curvature of 30°, 45°, and 60°, respectively. The files were rotated mimicking the actual operation of a root canal treatment. The finite element results showed that the files undergo primarily uniaxial sinusoidal stress and strain patterns. The maximum stress and strain amplitudes during cyclic fatigue were determined. The findings demonstrated that the strain amplitude varies with the radius and angle of curvature. The radius of curvature has a more significant influence on the strain amplitude compared to both the angle of curvature and the cross-sectional designs of the file. In contrast, the stress amplitude does not vary with respect to the root canal parameters as those of the strain, due to the nonlinear relationship between stress and strain of nickel-titanium. Furthermore, the stress and strain amplitude were then used to evaluate the fatigue life of the files using both stress-life and strain-life methods. It was found that the strain-life method yielded more consistent results than the stress-life method.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน ขอบพระคุณ ศ. ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ และ ดร. เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทั้งสองท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ อ. ทพ.ศิริวุฒิ หิรัญอัศว์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และแบ่งปันความรู้ทางด้านทันตกรรม โดยเฉพาะเรื่องตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้ม

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

ณัชพล นันทประทีป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| .....   | ค    |
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                  | ค    |
| .....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                               | ง    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                  | จ    |
| สารบัญ.....   | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....                                      | ญ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                     | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                     | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....                            | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....                         | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....                               | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                    | 3    |
| 1.5 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์.....                  | 3    |
| บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพินและตะไบแบบหมุน..... | 5    |
| 2.1 กายวิภาคของพิน.....                               | 5    |
| 2.2 การรักษาคลองรากพิน.....                           | 5    |
| 2.3 ตะไบทางทันตกรรม.....                              | 7    |
| 2.3.1 รูปร่างของตะไบแบบหมุน.....                      | 8    |
| 2.3.1.1 ส่วนใช้งาน.....                               | 8    |
| 2.3.1.2 ส่วนจับยึด.....                               | 11   |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.3.2   | วิวัฒนาการของตะไบแบบหมุน .....   | 11 |
| บทที่ 3 | ปรีทัศน์วรรณกรรม .....   | 15 |
| 3.1     | ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับตะไบแบบหมุน .....  | 15 |
| 3.2     | ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... | 17 |
| 3.3     | ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองคลอกรากฟัน .....                                   | 18 |
| 3.4     | ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....  | 19 |
| 3.5     | ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับรูปแบบความเสียหายของตะไบแบบหมุน .....                      | 21 |
| บทที่ 4 | ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....   | 23 |
| 4.1     | ความเค้น และความเครียด .....   | 23 |
| 4.1.1   | ความเค้น .....   | 23 |
| 4.1.2   | ความเครียด .....   | 25 |
| 4.1.3   | การแปลงรูปความเค้นและความเครียด .....  | 27 |
| 4.1.3.1 | การแปลงรูปความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ .....                                  | 27 |
| 4.1.3.2 | การแปลงความเค้นและความเครียดในสามมิติ .....                                      | 29 |
| 4.2     | พฤติกรรมทางกลของวัสดุ .....  | 30 |
| 4.2.1   | พฤติกรรมยืดหยุ่น .....   | 31 |
| 4.2.2   | พฤติกรรมพลาสติก .....  | 31 |
| 4.3     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด .....                                   | 31 |
| 4.4     | วัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ .....   | 33 |
| 4.5     | พฤติกรรมของนิกเกิลไทเทเนียม .....  | 35 |
| 4.6     | ทฤษฎีของคาน .....  | 38 |
| 4.6.1   | ความเค้นดัด .....  | 38 |
| 4.6.2   | การสั่นสะเทือนของคาน .....   | 39 |
| 4.7     | ทฤษฎีความล้า .....   | 41 |



|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.7.1   | วิธี stress-life .....  | 42 |
| 4.7.2   | วิธี strain-life.....   | 44 |
| 4.8     | ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....                                  | 45 |
| 4.8.1   | รูปร่างของเอลิเมนต์.....  | 46 |
| 4.8.2   | การวิเคราะห์ปัญหาโครงสร้างแบบสถิต .....                           | 47 |
| 4.8.3   | การวิเคราะห์การโก่งตัวของคานที่มีการเสียรูปมาก .....              | 48 |
| 4.8.4   | การวิเคราะห์การสัมผัส .....                                       | 49 |
| 4.9     | การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....                                   | 52 |
| บทที่ 5 | การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น .....     | 54 |
| 5.1     | การสร้างแบบจำลองหน้าตัดแบบต่าง ๆ .....                            | 54 |
| 5.2     | ลักษณะของตะไบบแบบหมุนและคลองรากฟันที่ใช้ศึกษา.....                | 55 |
| 5.3     | การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตะไบบแบบหมุน .....                   | 58 |
| 5.4     | วิธีการตรวจสอบผลความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... | 59 |
| 5.5     | การวิเคราะห์การลู่เข้าของผลลัพธ์ .....                            | 61 |
| 5.6     | กำหนดเงื่อนไขภาระ และเงื่อนไขขอบเขต .....                         | 62 |
| บทที่ 6 | ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของตะไบบแบบหมุน .....          | 66 |
| 6.1     | ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบความเค้นและความเครียด.....                | 66 |
| 6.2     | ผลการวิเคราะห์แอมพลิจูดความเค้นและความเครียด.....                 | 70 |
| 6.3     | อิทธิพลของรูปร่างคลองรากฟัน.....                                  | 74 |
| 6.4     | อิทธิพลของรูปร่างหน้าตัด.....                                     | 83 |
| 6.5     | การกระจายตัวของความเค้นและความเครียด.....                         | 85 |
| บทที่ 7 | การวิเคราะห์อายุความล้าของตะไบบแบบหมุน .....                      | 88 |
| 7.1     | การประเมินอายุความล้าด้วยวิธี strain-life .....                   | 88 |
| 7.2     | การประเมินอายุความล้าด้วยวิธี stress-life.....                    | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.3 อภิปรายผล .....  | 98  |
| บทที่ 8   สรุปผลการศึกษา .....   | 99  |
| 8.1 สรุปผลการศึกษา .....   | 99  |
| 8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต .....                                  | 100 |
| บรรณานุกรม .....   | 102 |
| ภาคผนวก .....  | 106 |
| ภาคผนวก ก   ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองตะไบแบบหมุน .....                       | 107 |
| ภาคผนวก ข   ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคลองรากฟัน .....                        | 114 |
| ภาคผนวก ค   ขั้นตอนการตั้งค่าซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... | 120 |
| ประวัติผู้เขียน .....  | 127 |



## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติวัสดุของนิกเกิลไทเทเนียม [35] .....                                     | 37   |
| ตารางที่ 5.1 ความถี่ธรรมชาติในโหมดต่าง ๆ ของตะไบแบบหมุน.....                                      | 59   |
| ตารางที่ 6.1 แอมพลิจูดความเค้นตั้งฉากสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ).....                        | 73   |
| ตารางที่ 6.2 แอมพลิจูดความเครียดตั้งฉากสูงสุด ( $\epsilon_{amp}^{node}$ ).....                    | 74   |
| ตารางที่ 6.3 สัมประสิทธิ์ถดถอยของความเครียดในตะไบแต่ละประเภท .....                                | 83   |
| ตารางที่ 7.1 อายุความล้าของตะไบจาก $\epsilon$ -N curve.....                                       | 90   |
| ตารางที่ 7.2 อายุความล้าของตะไบจากงานวิจัยและความเค้นสูงสุดจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์<br>..... | 95   |
| ตารางที่ 7.3 อายุความล้าของตะไบจาก S-N curve.....   | 95   |

## สารบัญรูปภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 ลักษณะของตะไบแบบหมุน .....  | 1    |
| รูปที่ 2.1 กายวิภาคของฟันมนุษย์ [1] .....  | 6    |
| รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการรักษาคลองรากฟัน (ก) ฟันที่มีเนื้อเยื่อที่อักเสบ (ข) เจาะรูเปิดโพรงประสาทฟัน (ค) ทำความสะอาดและปรับแต่งรูปร่างของคลองรากฟัน (ง) อุดคลองรากฟันเพื่อป้องกันการติดเชื้อ ..... | 7    |
| รูปที่ 2.3 การรักษาคลองรากฟันโดยใช้ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม .....  | 7    |
| รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม .....   | 8    |
| รูปที่ 2.5 ส่วนใช้งานของตะไบ .....   | 9    |
| รูปที่ 2.6 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $D_o$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $D_i$ ) ของตะไบ .....   | 9    |
| รูปที่ 2.7 ความผายของตะไบ .....  | 10   |
| รูปที่ 2.8 ระยะพิทช์ของตะไบ .....  | 10   |
| รูปที่ 2.9 attachment section ของตะไบ .....  | 11   |
| รูปที่ 2.10 ลักษณะหน้าตัดของตะไบรุ่นที่ 1 .....  | 12   |
| รูปที่ 2.11 ลักษณะหน้าตัดของตะไบรุ่นที่ 2 .....  | 12   |
| รูปที่ 2.12 ลักษณะหมุนของตะไบรุ่นที่ 4 .....   | 13   |
| รูปที่ 2.13 ลักษณะการเอียงศูนย์กลางของตะไบรุ่นที่ 5 .....  | 14   |
| รูปที่ 3.1 แสดงวิธีการวัดของ Schneider .....   | 18   |
| รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการวัดของ Pruett .....  | 19   |
| รูปที่ 3.3 ฟันผิวแตกหัก (ก) การทดสอบการล้า (ข) การทดสอบการบิด .....  | 22   |
| รูปที่ 4.1 วัดถูรับแรงภายนอก .....   | 24   |
| รูปที่ 4.2 เอลิเมนต์ความเค้น .....   | 25   |
| รูปที่ 4.3 ระยะยึดของแท่งวัสดุยาว เมื่อได้รับแรงภายนอกกระทำ .....  | 25   |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.4 เอลิเมนต์ความเครียด.....  | 26 |
| รูปที่ 4.5 การแปลงเอลิเมนต์ความเค้นจากระนาบ $x-y$ ไปเป็นระนาบ $x'-y'$ .....              | 28 |
| รูปที่ 4.6 การแปลงเอลิเมนต์ความเครียดจากระนาบ $x-y$ ไปเป็นระนาบ $x'-y'$ .....            | 29 |
| รูปที่ 4.7 การแปลงเอลิเมนต์ความเค้นจากแกนอ้างอิง $x-y-z$ ไปที่แกนอ้างอิง $x'-y'-z'$ .... | 30 |
| รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด.....                                 | 32 |
| รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวและเปราะ.....           | 33 |
| รูปที่ 4.10 ลักษณะการแตกหัก (ก) วัสดุเหนียว (ข) วัสดุเปราะ.....                          | 34 |
| รูปที่ 4.11 กราฟความเค้น-ความเครียดที่อธิบาย ก) สมบัติการจำรูป ข) สมบัติยืดหยุ่นสูง..... | 36 |
| รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของวัสดุและอุณหภูมิของโลหะจำรูป .....              | 36 |
| รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง ..... | 37 |
| รูปที่ 4.14 การเสียรูปของคานเมื่อได้รับแรงดัด.....                                       | 38 |
| รูปที่ 4.15 การสันสเทือนของคาน.....  | 40 |
| รูปที่ 4.16 วัฏจักรความล้า .....   | 41 |
| รูปที่ 4.17 อัตราส่วนภาระในแต่ละลักษณะ.....  | 42 |
| รูปที่ 4.18 S-N curve .....  | 43 |
| รูปที่ 4.19 S-N curve ที่ mean stress ต่าง ๆ.....  | 43 |
| รูปที่ 4.20 $\epsilon$ -N curve .....  | 45 |
| รูปที่ 4.21 ประเภทของเอลิเมนต์ (ก) ทรงสี่หน้า (ข) ทรงหกหน้า.....                         | 47 |
| รูปที่ 4.22 การโค้งตัวมากในเบ็ดตกปลา .....   | 49 |
| รูปที่ 4.23 การสัมผัสแบบยึดติด.....  | 50 |
| รูปที่ 4.24 การสัมผัสแบบไม่มีการแยก .....  | 50 |
| รูปที่ 4.25 การสัมผัสแบบไม่มีแรงเสียดทาน .....   | 51 |
| รูปที่ 4.26 การสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน .....  | 51 |
| รูปที่ 4.27 การสัมผัสแบบหยาบ.....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.28 วิธี Lagrange based.....  | 52 |
| รูปที่ 4.29 วิธี Penalty based.....   | 52 |
| รูปที่ 5.1 รูปร่างหน้าตัดและแบบจำลองตะไบของตะไบแบบหมุนทั้ง 4 ประเภทที่ใช้ในการศึกษานี้<br>(ก) สามเหลี่ยมด้านเท่า .06/#25 (ข) สี่เหลี่ยมจัตุรัส .06/#25 (ค) รูปตัว S .06/#25 (ง) สามเหลี่ยม<br>นูน .06/#25 ..... | 55 |
| รูปที่ 5.2 การสร้างแบบจำลองคลองรากฟัน .....   | 56 |
| รูปที่ 5.3 นิยามพื้นผิวของแบบจำลองคลองรากฟัน .....  | 57 |
| รูปที่ 5.4 แบบจำลองคลองรากฟันลักษณะต่าง ๆ .....   | 57 |
| รูปที่ 5.5 การสันสะท้อนของคานแบบตัดโค้งในโหมดต่าง ๆ .....   | 59 |
| รูปที่ 5.6 คานตรงรับโมเมนต์ ( $M$ ).....  | 60 |
| รูปที่ 5.7 การตรวจสอบผลความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....   | 61 |
| รูปที่ 5.8 ความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....   | 61 |
| รูปที่ 5.9 การวิเคราะห์การลู่เข้าของผลลัพธ์.....  | 62 |
| รูปที่ 5.10 การกำหนดเงื่อนไขภาระและเงื่อนไขขอบเขตของการศึกษา.....   | 64 |
| รูปที่ 5.11 การแบ่งเอลิเมนต์.....   | 64 |
| รูปที่ 5.12 การกำหนดเงื่อนไขภาระ (ก) ระบายการเคลื่อนที่ลงในทิศ $y$ (ข) ระบายการหมุนรอบ<br>แกน $y$ .....   | 65 |
| รูปที่ 6.1 ผลความเค้น von mises สูงสุด ณ เวลาใด ๆ ของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ใน<br>คลองรากฟันที่มีรัศมีโค้งขนาด 8 มม. และมุมโค้ง 60 องศา.....   | 67 |
| รูปที่ 6.2 ผลความเค้น von mises สูงสุด ณ เวลาใด ๆ ของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ใน<br>คลองรากฟันที่มีรัศมีโค้งขนาด 2 มม. และมุมโค้ง 60 องศา.....   | 67 |
| รูปที่ 6.3 จุดบนตะไบแบบหมุนที่เกิดความเค้นสูงสุดตลอดการจำลอง .....  | 69 |
| รูปที่ 6.4 องค์ประกอบความเค้นสูงสุด.....  | 70 |
| รูปที่ 6.5 องค์ประกอบความเครียดสูงสุด.....  | 70 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 6.6 วัฏจักรความล้าของจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุดในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุนภายใน<br>คลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา .....   | 71 |
| รูปที่ 6.7 วัฏจักรความล้าของจุดต่อที่มีความเครียดสูงสุดในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุน<br>ภายในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา ..... | 72 |
| รูปที่ 6.8 กระบวนการหาแอมพลิจูดความเค้นสูงสุดจากจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุดและต่ำสุด ตลอดการ<br>จำลอง โดยให้ตะไบทำงานในคลองรากฟัน .....                  | 72 |
| รูปที่ 6.9 กระบวนการหาแอมพลิจูดความเครียดสูงสุดจากจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุดและต่ำสุด ตลอด<br>การจำลอง โดยให้ตะไบทำงานในคลองรากฟัน .....                | 73 |
| รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม เมื่อ<br>พิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน .....                         | 77 |
| รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อ<br>พิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน .....                         | 77 |
| รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S เมื่อ<br>พิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน .....                           | 78 |
| รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม<br>เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน .....                       | 78 |
| รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม เมื่อ<br>พิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน .....                       | 79 |
| รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อ<br>พิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน .....                       | 79 |
| รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S เมื่อ<br>พิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน .....                         | 80 |
| รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม<br>เมื่อพิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน .....                     | 80 |
| รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม เมื่อ<br>พิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน .....                           | 81 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน.....                                | 81 |
| รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน.....                                  | 82 |
| รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน.....                             | 82 |
| รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างหน้าตัดในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม.....   | 84 |
| รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างหน้าตัดในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. ...   | 85 |
| รูปที่ 6.24 ความเค้นที่เกิดขึ้น ณ เวลาสุดท้าย ของการจำลอง ในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุนภายในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา .....  | 86 |
| รูปที่ 6.25 ความเครียดที่เกิดขึ้น ณ เวลาสุดท้าย ของการจำลอง ในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุนภายในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา..... | 87 |
| รูปที่ 7.1 $\epsilon$ -N curve จากงานวิจัยของ Cheung [45] .....  | 89 |
| รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างหน้าตัดที่มุมโค้งต่าง ๆ .....   | 90 |
| รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม.....   | 91 |
| รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม .....  | 91 |
| รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S.....   | 92 |
| รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม   | 92 |
| รูปที่ 7.7 component S-N curve .....   | 94 |
| รูปที่ 7.8 ลักษณะคลองรากฟันที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยของ Sobotkiewicz [46].....   | 95 |
| รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม.....   | 96 |
| รูปที่ 7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....  | 96 |
| รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S.....  | 97 |
| รูปที่ 7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม .....  | 97 |





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การรักษาสุขอนามัยช่องปากที่ดีจะมีประโยชน์อย่างมากในด้านสุขภาพฟัน แนวทางการรักษาฟันที่ทันตแพทย์มักจะทำเพื่อให้แน่ใจว่าผู้ป่วยมีสุขภาพฟันที่ดีมีหลายแนวทาง เช่น การอุดฟัน การถอนฟัน การครอบฟัน การทำรากฟันเทียม เป็นต้น หากผู้ป่วยมีอาการฟันผุลึกเข้าไปจนถึงโพรงประสาทฟัน ทำให้ไม่สามารถใช้การอุดฟันแก้ปัญหาได้ บางครั้งอาจส่งผลให้แบคทีเรียสามารถเข้าไปด้านใน และเกิดการติดเชื้อแบคทีเรียจนเกิดเป็นหนองบริเวณปลายรากฟันในเวลาต่อมา การรักษา รากฟันจึงเป็นวิธีที่จะช่วยรักษาฟันให้มีจำนวนครบดังเดิม โดยจะกำจัดเนื้อเยื่อประสาทฟันส่วนที่ อักเสบหรือติดเชื้อออก โดยการใช้เครื่องขยายคลองรากฟันเพื่อเปิดทางในการทำความสะอาดฆ่าเชื้อ ไรโคในโพรงประสาทฟัน และอุดฟันเพื่อปิดรอยผุนั้น ๆ

ปัจจุบันเครื่องขยายคลองรากฟันที่ใช้ในงานทันตกรรมอย่างแพร่หลายคือ ตะไบแบบหมุน (rotary file) ซึ่งตัวตะไบมีรูปร่างเรียวยาว มีคมตัดเป็นเกลียว และมีหน้าตัดรูปร่างแตกต่างกัน ดัง แสดงในรูปที่ 1.1 ตัวตะไบทำจากโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม (Nickle Titanium, NiTi) ซึ่งได้รับความนิยมใช้เป็นเครื่องมือในการรักษาคลองรากฟันในปัจจุบัน เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีความ ยืดหยุ่นสูง ทำให้มีความต้านทานการแตกหักจากแรงบิด (torsion load) และแรงดัด (flexural load) มากกว่าโลหะอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)



รูปที่ 1.1 ลักษณะของตะไบแบบหมุน

ปัญหาอย่างหนึ่งของการใช้ตะไบแบบหมุน คือ ตัวตะไบสามารถหักคาอยู่ภายในคลองรากฟัน ได้ และการนำชิ้นส่วนที่หักออกมาเป็นไปได้ยาก ซึ่งอาจจะส่งผลให้การรักษาคคลองรากฟันไม่ สัมฤทธิ์ผล การหักของตะไบสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การหักจากแรงบิด เกิดจากบริเวณส่วน ปลายของตะไบฝังติดกับผนังคลองรากฟัน ในขณะที่เครื่องขยายคลองรากฟันยังหมุนอยู่ ทำให้ตะไบ รับแรงบิดมากเกินไปจนเกินกว่าความแข็งแรงของมัน จึงเกิดการหักได้ และการหักจากความล้าของโลหะผสม เกิดจากการงอของตัวตะไบขณะเคลื่อนที่เข้าไปในรากฟัน และมีการโค้งบิดกลับไปมาระหว่างการหมุน

พื้นผิวของตะไบด้านนอกส่วนโค้งจะได้รับความเค้นดึง (tension stress) ในขณะที่พื้นผิวภายในส่วนโค้งได้รับความเค้นกด (compressive stress) เมื่อตะไบหมุนไป ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ของวัสดุจะรับความเค้นดึงและความเค้นกดสลับกันไปมา เนื่องจากการรับความเค้นดึงและความเค้นกดสลับกันไปมา ทำให้วัสดุที่ตำแหน่งนั้นเกิดความล้าและเสียหายในที่สุด

ในการรักษาคคลองรากฟัน ตะไบแบบหมุนจะถูกสอดเข้าไปในรากฟันที่มีลักษณะโค้งงอแล้ว หมุนและตัดเพื่อกำจัดสิ่งไม่พึงประสงค์ (irritants) ต่าง ๆ ออกจากคลองรากฟัน ไม่ว่าจะเป็นอย่างใดก็ตาม เนื้อเยื่อที่เน่าตาย (necrotic tissue) เนื้อฟันที่มีการติดเชื้อ (infected dentin) ฯลฯ นอกจากนี้ยังเป็นการเตรียมคลองรากฟันให้มีรูปร่างที่เหมาะสม และสะดวกต่อการอุดคลองรากฟันต่อไป คลองรากฟันที่ผ่านการเตรียมอย่างถูกต้องควรมีลักษณะเป็นรูปกรวยซึ่งมีผนังเรียบ โดยมีส่วนแคบที่สุดอยู่บริเวณปลายราก ดังนั้นตะไบที่สอดเข้าไปก็จะต้องมีความโค้งงอตามลักษณะของรากฟันนั้น ๆ จึงมีโอกาสที่ตะไบจะได้รับความเสียหายจากความล้า วิชยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการจำลองการทำงานของตัวตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เพื่อวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และพฤติกรรมความล้าของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นวัดจักรความล้าที่เกิดขึ้นเมื่อตะไบหมุนในคลองรากฟัน และอายุความล้าของตะไบที่สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) ประเมินความเค้นและความเครียดในตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมเมื่อตะไบหมุนอยู่ภายในคลองรากฟัน โดยการจำลองให้ตะไบมีหน้าตัดตามตะไบที่ใช้จริง มีรูปร่างเรียวยาว มีลักษณะเป็นเกลียว และคลองรากฟันมีลักษณะโค้งงอ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการพิจารณา

2) วิเคราะห์วัฏจักรความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประเมินอายุความล้าของตะไบด้วยวิธี strain-life และ stress-life แล้วเปรียบเทียบอายุความล้าของตะไบที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน และทำงานในแบบจำลองคลองรากฟันที่มีมุมโค้งและรัศมีโค้งที่แตกต่างกัน

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาพฤติกรรมทางกลของตะไบทางทันตกรรมโดยสร้างแบบจำลองของตะไบที่มีลักษณะเรียวยาว และมีเกลียวคมสำหรับตัด โดยในการศึกษาจะวิเคราะห์ตะไบที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangle), สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square), รูปตัว S (S-Shape) และสามเหลี่ยมนูน (Convex Triangle) และคลองรากฟันที่มีมุมโค้ง 30, 45, 60 องศา และมีรัศมีโค้ง 2, 5, 8 มม. โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษา และจำลองให้ตะไบหมุนภายในคลองรากฟันที่มีลักษณะโค้งงอ เพื่อศึกษาผลของรูปร่างหน้าตัดที่มีต่อความเค้นและอายุความล้าของตะไบ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาจากวิทยานิพนธ์นี้จะช่วยในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นในตะไบแบบหมุน และอายุความล้าของตะไบแบบหมุน ซึ่งสามารถช่วยในการประเมินอายุการใช้งานของตะไบ และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาตะไบให้มีความแข็งแรง ทนต่อการแตกหักมากขึ้น ส่งผลให้การรักษาคคลองรากฟันประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ผลการศึกษายังเป็นแนวทางในการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมให้กับทันตแพทย์และนักวิจัยที่เกี่ยวข้องในสายงานทันตกรรม ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาวิธีการและเครื่องมือใหม่ ๆ ได้ในอนาคต

### 1.5 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหา 8 บท และภาคผนวก โดยเนื้อหาในบทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมถึงเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์นี้ บทที่ 2 นำเสนอเกี่ยวกับกายวิภาคและโครงสร้างของฟัน และลงลึกไปถึงโครงสร้างและหน้าที่ของคลองรากฟัน รวมถึงการรักษาคคลองรากฟันเมื่อเกิดอาการติดเชื้อ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบและวิวัฒนาการของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการรักษาคคลองรากฟัน และเนื้อหาในบทที่ 3 กล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมและแบบจำลองคลองรากฟัน และการศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของตะไบแบบหมุนที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการรักษา รวมถึงการวิเคราะห์ความล้าในตะไบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในบทถัดไปจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานทางทันตกรรมของตะไบแบบหมุน และทฤษฎีใช้ในการวิเคราะห์วัฏจักรความล้าและอายุความล้า รวมถึงหลักการทางวิศวกรรมที่ใช้อธิบายพฤติกรรม

ของวัสดุ และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อแก้ปัญหา ปัญหาทางวิศวกรรม บทที่ 5 เป็นบทที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของตะไบและคลองรากฟัน และวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้ หลังจากนั้นในบทที่ 6 จะนำเสนอการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในตะไบแบบหมุนขณะทำงานอยู่ในคลองรากฟัน โดยจะกล่าวถึงเงื่อนไขภาระและเงื่อนไขขอบเขต รวมถึงนำเสนออิทธิพลของรูปร่างหน้าตัดและรูปร่างของคลองรากฟันที่มีต่อความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น เพื่อนำข้อมูลวัฏจักรความล้าไปต่อยอดประเมินอายุความล้าของตะไบต่อไป และในบทที่ 7 จะนำเสนอการวิเคราะห์ความล้าและการประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุน โดยนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์อายุความล้าโดยประมาณจากการประยุกต์ใช้ทั้ง S-N curve และ  $\epsilon$ -N curve เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมล้าและเปรียบเทียบอายุความล้าของตะไบแต่ละประเภท และบทสุดท้ายจะสรุปผลการศึกษาของวิทยานิพนธ์ โดยให้ความเข้าใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์วัฏจักรความล้าและความล้าของตะไบแบบหมุนขณะทำงานในแบบจำลองคลองรากฟัน รวมถึงข้อจำกัดและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

## บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฟันและตะไบแบบหมุน

ในบทนี้ให้ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการรักษาคลองรากฟัน ไม่ว่าจะเป็นกายวิภาคของฟัน และโครงสร้างของคลองรากฟัน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำความเข้าใจกระบวนการรักษาคลองรากฟัน นอกจากนี้ ยังนำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับตะไบแบบหมุน ซึ่งเป็นเครื่องมือในการรักษาคลองรากฟันที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นรูปร่างของตะไบแบบหมุนที่มีลักษณะเฉพาะตัวและมีความซับซ้อน รวมถึงวิวัฒนาการของตะไบแบบหมุนที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดสองถึงสามทศวรรษที่ผ่านมา

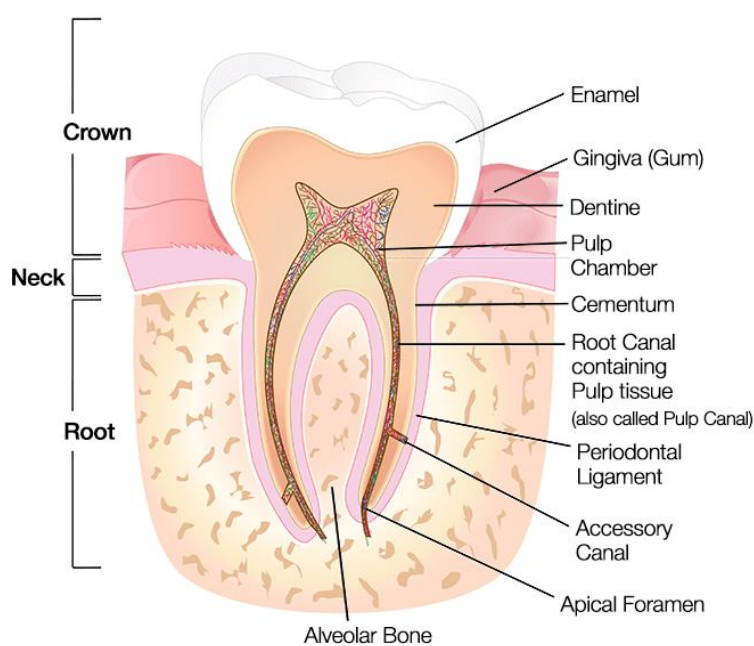
### 2.1 กายวิภาคของฟัน

รูปที่ 2.1 แสดงกายวิภาคของฟันมนุษย์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ตัวฟัน (crown) และรากฟัน (root) โดยตัวฟันคือส่วนของฟันที่ยื่นออกมาจากเหงือก (gum) และถูกเคลือบด้วยเคลือบฟัน (enamel) ซึ่งเป็นส่วนที่แข็งที่สุดและช่วยปกป้องเนื้อฟัน (dentine) ที่อยู่ด้านล่าง สำหรับรากฟันจะฝังอยู่ภายในกระดูกขากรรไกร (jawbones) และมีเหงือกคลุมอีกชั้น ซึ่งจะเรียกชั้นนอกสุดของรากฟันว่า เคลือบรากฟัน (cementum) และจะเรียกโพรงข้างในรากฟันว่า โพรงประสาทฟัน (pulp chamber) ซึ่งประกอบไปด้วย เส้นเลือด (blood vessels) ท่อน้ำเหลือง (lymph vessels) และเส้นประสาทเล็ก ๆ (nerves) มีหน้าที่ส่งเลือดและสารอาหารไปหล่อเลี้ยงให้ฟันมีชีวิต และช่วยให้ฟันรับรู้อุณหภูมิ รวมถึงความรู้สึกเจ็บปวดได้ โดยฟันประเภทต่าง ๆ มีจำนวนรากฟันที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปฟันหน้า (incisors) ฟันเขี้ยว (canines) และฟันกรามน้อย (premolars) จะมีรากฟันเพียง 1 ราก ในขณะที่ฟันกราม (molars) จะมีรากฟันจำนวน 2 ถึง 3 ราก

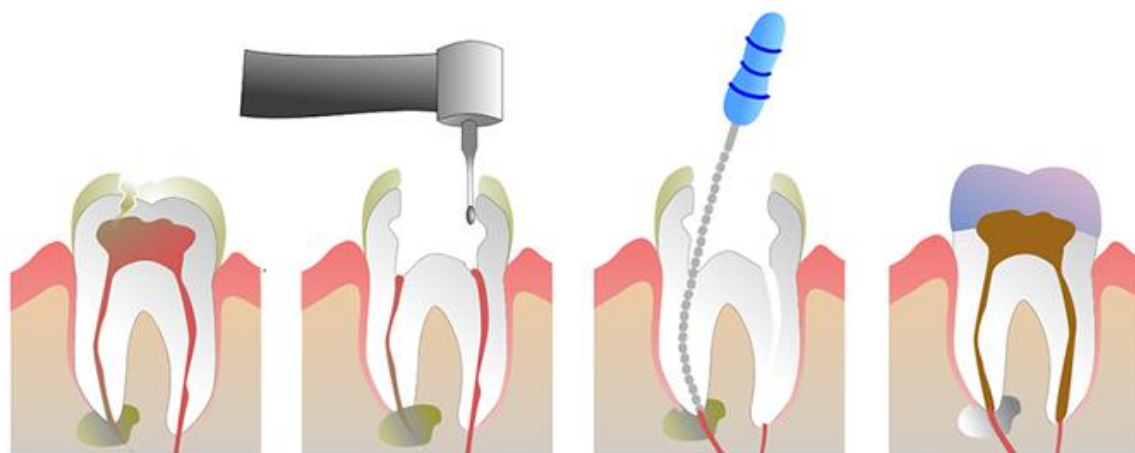
### 2.2 การรักษาคลองรากฟัน

คลองรากฟัน (root canal) เป็นโพรงภายในรากฟันที่ต่อมาจากโพรงประสาทฟัน มีหน้าที่เป็นทางผ่านของเส้นประสาทและหลอดเลือดที่จะเคลื่อนเข้าและออกจากโพรงประสาทฟันผ่านทางรูปลายรากฟัน (apical foramen) ซึ่งหากไม่ได้ทำการดูแลรักษาฟันอย่างเหมาะสม อาจนำไปสู่การอักเสบหรือติดเชื้อที่เนื้อเยื่อใน (pulp tissue) ได้

การรักษาคลองรากฟันจึงเป็นขั้นตอนทางทันตกรรมเพื่อขจัดเนื้อเยื่อที่อักเสบหรือติดเชื้อภายในคลองรากฟันออก โดยขั้นตอนแรกของการรักษาคือการวินิจฉัยหาสาเหตุดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งการใช้เอกซเรย์สามารถช่วยให้ทันตแพทย์เห็นภาพโครงสร้างคลองรากฟันและประเมินความผิดปกติได้ จากนั้นจึงเริ่มให้ยาฆ่าเชื้อเพื่อทำให้ผู้ป่วยรู้สึกสบายและลดความเจ็บปวดให้กับผู้ป่วยในระหว่างทำการรักษา จากนั้นทันตแพทย์จะเจาะรูเล็ก ๆ เข้าไปในตัวฟันจนเข้าถึงโพรงประสาทฟันดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) ทำให้สามารถใส่ตะไบแบบหมุนเข้าไปในคลองรากฟันเพื่อทำความสะอาดเนื้อเยื่อที่อักเสบหรือติดเชื้อออกจากบริเวณนั้นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ค) และเริ่มทำความสะอาดฆ่าเชื้อเพื่อเตรียมอุดคลองรากฟันต่อไป หลังจากนั้นจะมีการอุดคลองรากฟันเพื่อปิดช่องว่าง โดยทั่วไปจะใช้วัสดุคล้ายยางที่เรียกว่า gutta-percha ตามด้วยการใช้วัสดุอุดฟันชั่วคราว (temporary filling) อย่าง Cavit, Fermin และ IRM เพื่อป้องกันการรั่วซึมของเชื้อโรคจากช่องปากเข้าสู่คลองรากฟันจนทำให้ติดเชื้ออีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ง)



รูปที่ 2.1 กายวิภาคของฟันมนุษย์ [1]



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการรักษาคอนกรากฟัน (ก) ฟันที่มีเนื้อเยื่อที่อักเสบ (ข) เจาะรูเปิดโพรงประสาทฟัน (ค) ทำความสะอาดและปรับแต่งรูปร่างของคอนกรากฟัน (ง) อุดคอนกรากฟันเพื่อป้องกันการติดเชื้อ

### 2.3 ตะไบทางทันตกรรม

ตะไบทางทันตกรรม (endodontic file) เป็นเครื่องมือที่ทันตแพทย์นิยมใช้ในการรักษาคอนกรากฟันในปัจจุบัน ใช้สำหรับเตรียมคอนกรากฟันหรือเพื่อขจัดเนื้อเยื่อและเนื้อฟันส่วนที่ตายและอุดคอนกรากฟันขณะทำการรักษารากฟันดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตะไบทางทันตกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ตะไบแบบหมุนด้วยมือ (hand files) และตะไบแบบหมุนด้วยมอเตอร์ (rotary files) ซึ่งได้รับการออกแบบมาให้ใช้กับด้ามจับ (handpiece) เพื่อส่งแรงบิดจากมอเตอร์สู่ตัวตะไบ



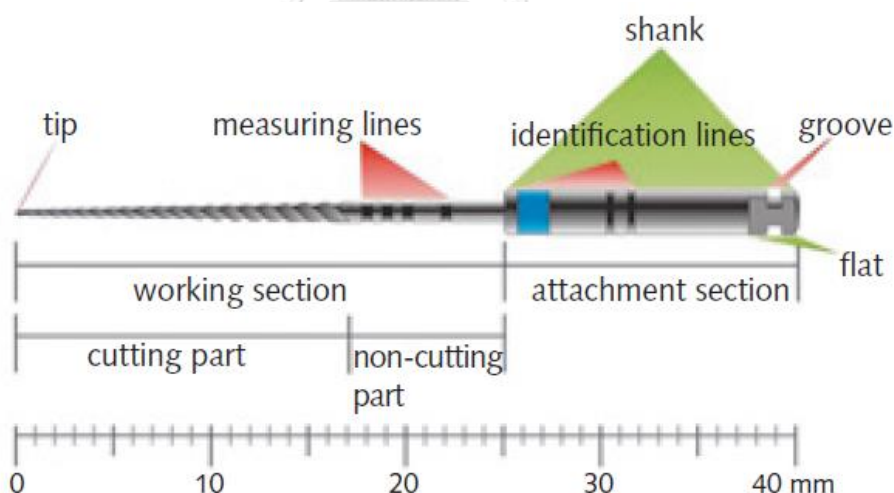
รูปที่ 2.3 การรักษาคอนกรากฟันโดยใช้ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม



การออกแบบเครื่องมือทางทันตกรรมที่ใช้ในการขุดคลองรากฟันใด ๆ พิจารณาจากวัตถุประสงค์และวิธีการใช้งานเป็นหลัก ลักษณะการออกแบบของผู้ผลิตแต่ละรายจึงมีความแตกต่างกัน ทั้งการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม รูปร่างหน้าตัด ระยะพิทช์ ความผายและอื่น ๆ อีกมากมาย เพื่อให้เครื่องมือมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น การสร้างแบบจำลองของตะไบแบบหมุนจึงต้องศึกษาองค์ประกอบต่าง ๆ ของตะไบ ดังนี้

### 2.3.1 รูปร่างของตะไบแบบหมุน

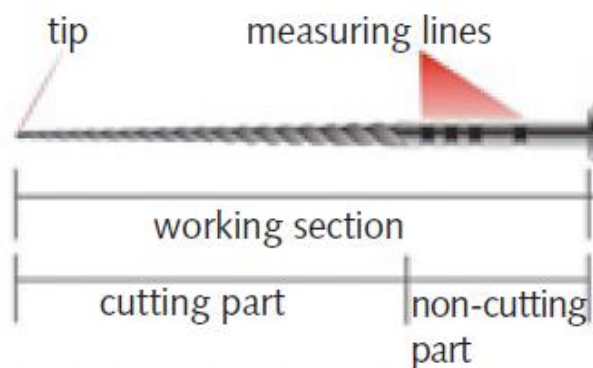
ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือส่วนใช้งาน (working section) ที่มีไว้สำหรับการเตรียมคลองรากฟัน ซึ่งอาจมีความยาวตั้งแต่ 17 มม. ถึง 27 มม. โดยจะแบ่งออกเป็นอีก 2 ส่วนย่อย คือส่วนมีคม (cutting part) ที่เป็นใบมีด และส่วนไม่มีคม (non-cutting part) ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกผิวเรียบ ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนตัดกับส่วนไม่มีคมบริเวณนี้จะมีเส้นรอบวงบอกระยะ (measuring lines) หรือจุกยาง (rubber stop) เพื่อบ่งบอกระยะที่ใส่เครื่องมือลงไปในการขุดฟัน และส่วนที่ 2 ของตะไบ คือส่วนจับยึด (attachment section) ที่ใช้สำหรับประกอบกับด้ามจับ และส่งแรงบิดจากชุดขับเคลื่อนไปยังส่วนใช้งานของตะไบ [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม

#### 2.3.1.1 ส่วนใช้งาน

ส่วนใช้งานของตะไบมีไว้สำหรับการเตรียมคลองรากฟัน ประกอบด้วย 2 ส่วนย่อยหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนมีคมและส่วนไม่มีคมดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยความยาวรวมของส่วนใช้งานมีค่าเท่ากับ 21 มม. โดยแบ่งเป็นส่วนมีคมยาว 16 มม. และส่วนไม่มีคมยาว 5 มม.



รูปที่ 2.5 ส่วนใช้งานของตะไบ

### 1) เส้นผ่านศูนย์กลาง

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวตะไบแบ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนใน (inner core diameter) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่ปิดล้อมหน้าตัดของส่วนมีคม โดยจะเรียกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่จุดเริ่มต้นของส่วนมีคมว่า  $D_0$  ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนในคือเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่อยู่ในหน้าตัดของส่วนมีคม

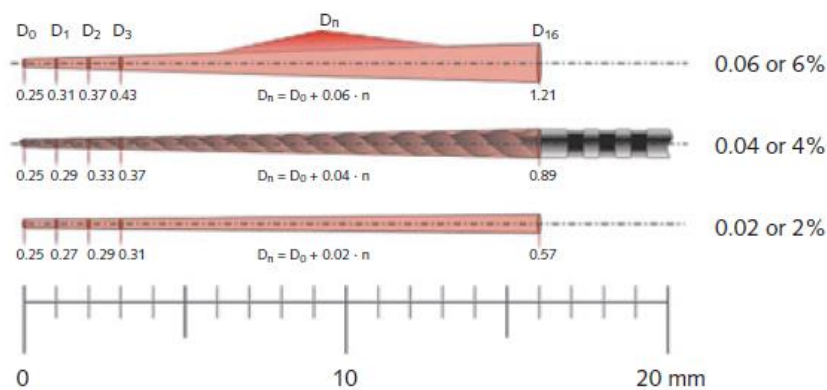


รูปที่ 2.6 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $D_e$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $D_i$ ) ของตะไบ

### 2) ความผาย (taper)

ความผายของตะไบแบบหมุนเป็นพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการทำงานของเครื่องมือนี้ ซึ่งความผาย หมายถึงอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง

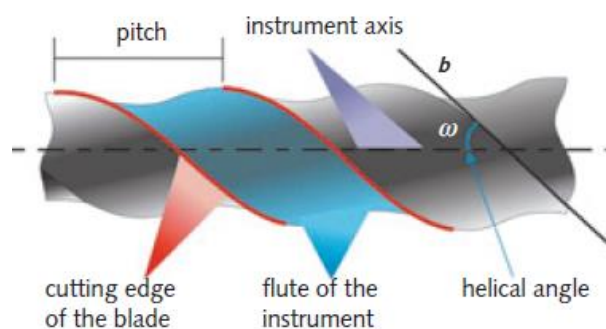
ของตะไบที่จุดที่แตกต่างกันสองจุดของส่วนมีคมกับระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองนั้น โดยความผายสามารถแสดงได้ทั้งในรูปแบบทศนิยมและเปอร์เซ็นต์ เช่น taper .04 หรือ taper 4% หมายถึงทุก ๆ ความยาว 1 มม.ของส่วนมีคม เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $D_e$ ) จะเพิ่มขึ้น 0.04 มม. จากส่วนปลายไปทางส่วนด้ามจับดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งความผายมีผลอย่างมากต่อความสามารถของตะไบในการสร้างรูปร่างคลองรากฟัน



รูปที่ 2.7 ความผายของตะไบ

### 3) ระยะพิทช์ (pitch)

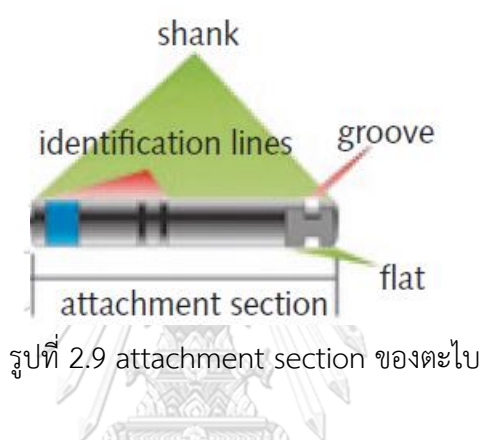
ระยะพิทช์เป็นลักษณะทางเรขาคณิตที่สำคัญของตะไบแบบหมุน โดยหมายถึงระยะห่างระหว่างขอบหรือยอดของใบมีด (cutting blade) 2 ยอดที่อยู่ใกล้กันดังแสดงในรูปที่ 2.8 ระยะพิทช์อาจคงที่ (constant pitch) หรือไม่คงที่ (variable pitch) ขึ้นอยู่กับการออกแบบของตะไบแต่ละแบบ การที่ระยะพิทช์คงที่อาจทำให้การตัดและการกำจัดเศษเนื้อเยื่อเป็นไปตามที่คาดไว้ ในขณะที่ระยะพิทช์แบบไม่คงที่อาจมีข้อได้เปรียบในการจัดการกับความโค้งงอหรือลักษณะของคลองรากฟันที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.8 ระยะพิทช์ของตะไบ

### 2.3.1.2 ส่วนจับยึด

ส่วนจับยึด หรือเรียกอีกอย่างว่า ก้าน (shank) เป็นส่วนหนึ่งของตะไบที่ใช้ประกอบกับด้ามจับ และใช้ส่งแรงบิดจากชุดขับเคลื่อนไปยังส่วนใช้งานของตะไบ โดยทั่วไปก้านของตะไบแบบหมุนจะเป็นไปตามมาตรฐานของ International Organization for Standardization (ISO) ซึ่งตามมาตรฐานของ ISO ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 มม. และยาว 13.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยที่ปลายด้านหนึ่งของส่วนยึดติดจะมีระนาบ (flat) และร่อง (groove) ไว้เพื่อยึดแน่นกับส่วนหัวของด้ามจับ



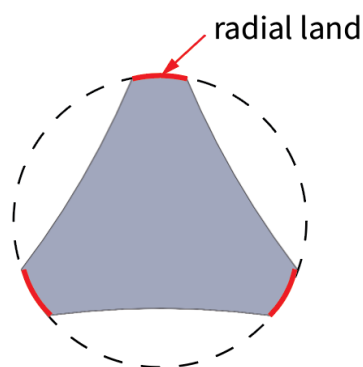
รูปที่ 2.9 attachment section ของตะไบ

### 2.3.2 วิวัฒนาการของตะไบแบบหมุน

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา เครื่องขยายคลองรากฟันที่ใช้ในงานทันตกรรมอย่างแพร่หลายคือ ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมประเภทนิกเกิลไทเทเนียม ซึ่งได้รับการพัฒนาคุณภาพของการทำความสะอาดคลองรากฟันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคุณสมบัติความยืดหยุ่นสูงของตะไบสามารถช่วยประหยัดเวลาการทำงานของทันตแพทย์ได้อย่างมาก ปัจจุบันนี้มีผู้ผลิตหลากหลายรายที่พัฒนาเครื่องมือชนิดนี้ โดยผู้ผลิตแต่ละรายจะปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม รวมถึงรูปร่างหน้าตัด ระยะพิทช์ ความผาย และอื่น ๆ เพื่อให้ตะไบแบบหมุนมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนามาถึง 5 รุ่น [3] ได้แก่

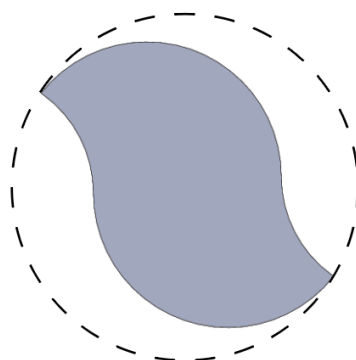
1) **รุ่นที่ 1:** ตะไบแบบหมุนรุ่นนี้เปิดตัวครั้งแรกสู่ตลาดในช่วงกลางทศวรรษ 1990 โดย Dr. John McSpadden ซึ่งลักษณะที่สำคัญที่สุดของตะไบรุ่นแรกคือมีเรเดียลแลนด์ (passive cutting radial land) หรือจุดสัมผัสเป็นพื้นที่ราบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และมีความผายคงที่ตลอดความยาวของตะไบ ซึ่งพื้นที่ราบนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้ตะไบยึดติดอยู่ในเนื้อฟันในขณะที่ทำความสะอาดคลองราก

ฟัน และตะไบรุ่นนี้มีมวลแกนมาก ทำให้มีความยืดหยุ่นต่ำ แต่ทนต่อแรงบิดได้สูง ตัวอย่างตะไบรุ่นแรก ได้แก่ Lightspeed (Lightspeed Endodontics – 1992), Profile (Dentsply Tulsa – 1993), Quantec (Sybron Endo – 1996), System GT (Dentsply Tulsa – 1998)



รูปที่ 2.10 ลักษณะหน้าตัดของตะไบรุ่นที่ 1

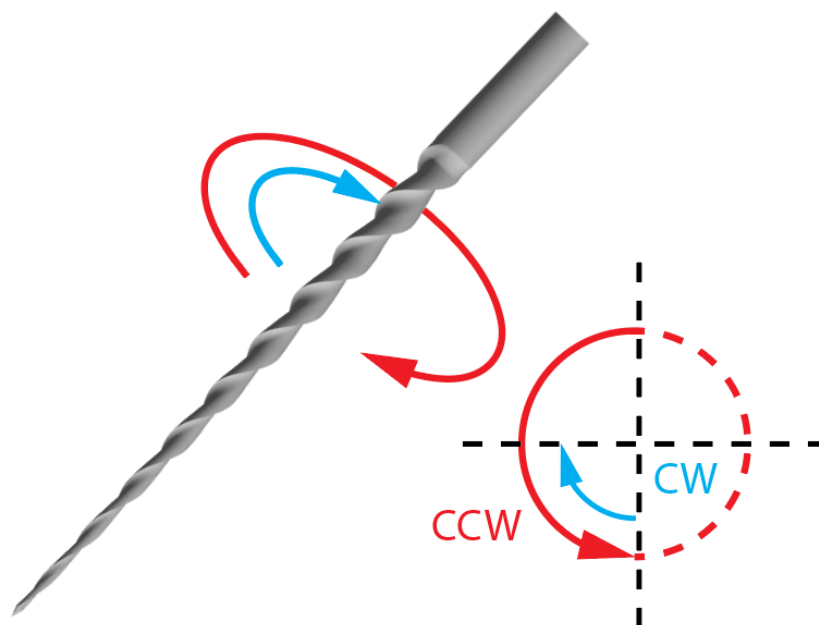
2) **รุ่นที่ 2:** ตะไบแบบหมุนรุ่นนี้เปิดตัวสู่ตลาดในปี 2001 และมีการพัฒนาเรื่องขอบตัดเป็นจุด (active cutting edges) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการตัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับรุ่นก่อน นอกจากนี้ยังมีลักษณะเด่นคือสามารถลดความเสี่ยงของการที่เครื่องมือจะถูกดึงเข้าไปในคลองรากฟันได้ (screw-in effect) และยังมีคามยืดหยุ่นสูงสามารถทนต่อความล้าได้ดี ตัวอย่างของตะไบรุ่นนี้ ได้แก่ ProTaper Universal (Dentsply), K3 (Sybron Endo), M-Two (VDW), Hero Shaper (Micro Mega), iRace & iRace Plus (FKG Dentaire)



รูปที่ 2.11 ลักษณะหน้าตัดของตะไบรุ่นที่ 2

3) **รุ่นที่ 3:** ตะไบแบบหมุนรุ่นนี้เปิดตัวในช่วงปลายปี 2007 ได้รับการพัฒนาเรื่องคุณสมบัติทางโลหวิทยาของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม โดยใช้กระบวนการให้ความร้อนและความเย็น ซึ่งส่งผลให้ตะไบมีความสามารถในการต้านทานความล้าสูงขึ้น และลดความเสี่ยงในการแตกหัก เพิ่มความปลอดภัยในการรักษาคลองรากฟัน ตัวอย่างของตะไบรุ่นนี้ ได้แก่ Twisted Files & K3 XF Files (Sybron Endo), Profile GT Series X (Dentsply), Hyflex CM (Coltene)

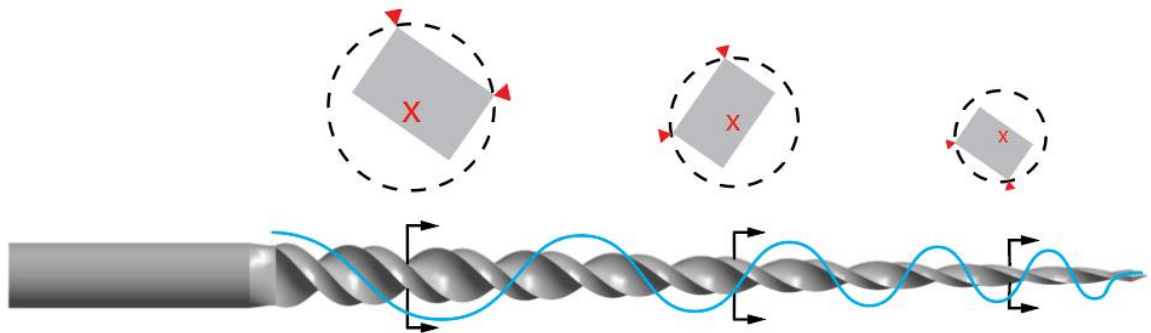
4) **รุ่นที่ 4:** ตะไบแบบหมุนรุ่นนี้มีการพัฒนาให้ตะไบหมุนแบบกลับไปมา (reciprocating) โดยมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกาตามเข็มนาฬิกาแสดงในรูปที่ 2.12 จึงช่วยในการตัดอย่างมีประสิทธิภาพ ลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายจากตะไบที่หมุนอย่างรวดเร็วจนเกิดการยึดติดกับผนังคลองรากฟัน ทำให้การทำความสะอาดคลองรากฟันมีความปลอดภัยและประหยัดเวลามากขึ้น ตัวอย่างของตะไบรุ่นนี้ ได้แก่ Liberator (Integra Miltex), Wave One (Dentsply), Reciproc (VDW), the Self-adjusting File (Redent Nova)



รูปที่ 2.12 ลักษณะหมุนของตะไบรุ่นที่ 4

5) **รุ่นที่ 5:** ตะไบแบบหมุนในรุ่นนี้ได้รับการปรับปรุงเรื่องประสิทธิภาพการทำงานโดยการทำให้น้ำตัดมีการเอียงจากศูนย์กลางของตะไบ (offset design) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อตะไบ

ประเภทนี้ทำงานจะเกิดคลื่นกล (mechanical wave) กระจายตลอดความยาวช่วยปรับปรุงการตัด และขจัดเศษเนื้อเยื่อได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตะไบรุ่นก่อน ๆ ที่ไม่มีการเยื้องศูนย์ ตัวอย่างของ ตะไบรุ่นนี้ ได้แก่ Liberator (Integra Miltex), Wave One (Dentsply), Reciproc (VDW), the Self-adjusting File (Redent Nova)



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเยื้องศูนย์ของตะไบรุ่นที่ 5

### บทที่ 3    ปรีทัศน์วรรณกรรม

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมที่ทำจากวัสดุ निकิลไทเทเนียม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง โดยวิเคราะห์ความเค้นดัดและอายุความล้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยงานวิจัยเกี่ยวกับตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมทั้งในภาพรวมและในแง่ของการวิเคราะห์ความล้า และหัวข้อสุดท้ายเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับรากฟันของมนุษย์ ในแง่ของการประเมินลักษณะความโค้งของคลองรากฟันที่มีความสำคัญต่อวิทยานิพนธ์นี้

#### 3.1 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับตะไบแบบหมุน

ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมเป็นเครื่องมือสำคัญในการรักษาคคลองรากฟัน โดยทำหน้าที่กำจัดเนื้อเยื่อฟันที่ติดเชื้อและกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในคลองรากฟันให้เหลือปริมาณน้อยที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อปลายราก นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เตรียมคลองรากฟันให้ใหญ่พอที่จะรองรับวัสดุอุดคลองรากฟันเพื่อให้อุดได้อย่างสมบูรณ์ [4] ในปัจจุบันมีตะไบหลากหลายประเภทให้ทันตแพทย์ได้เลือกใช้ตามความเหมาะสม โดยตะไบแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันที่วัสดุ การออกแบบ และหน้าตัด สำหรับตะไบสเตนเลส (K-file) เป็นตะไบที่เคยได้รับความนิยมในอดีต แต่ในปัจจุบันตะไบ निकิลไทเทเนียมเป็นที่ได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นสูง (superelastic) และสมบัติการจำรูป (shape memory effects) [5] งานวิจัยของ Parashos และคณะ [6] ได้ระบุว่าตะไบ निकิลไทเทเนียมมีความเสี่ยงต่อการแตกหักน้อยกว่า และยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าในการสร้างคลองรากฟันให้มีรูปร่างที่เหมาะสม

การออกแบบรูปร่างหน้าตัดของตะไบแบบหมุนยังมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงาน โดยงานวิจัยต่าง ๆ มีการนำเสนอรูปร่างหน้าตัดของตะไบแบบต่าง ๆ เช่น สามเหลี่ยมสี่เหลี่ยม และรูปร่างหน้าตัดที่มีความซับซ้อนและแปลกใหม่ เช่น รูปตัว S สามเหลี่ยมเว้า หรือสามเหลี่ยมนูน งานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตะไบส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตัด การกำจัดเศษ และการกระจายความเค้น ซึ่งส่งผลต่อความเสี่ยงของการแตกหักของตะไบในที่สุด [7]

การหักของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมคือปัญหาที่สามารถเกิดได้จากทั้งแรงบิดและแรงดัด จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาความเค้นของตะไบแบบหมุน การศึกษาเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ



การทดลองเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงในการรับภาระของตะไบแต่ละรุ่น ตัวอย่างการศึกษาในการทดลองเปรียบเทียบนี้ ได้แก่ การศึกษาของ Larsen และคณะ [8] และ Pedulla และคณะ [9] ได้นำตะไบในแต่ละรุ่นที่มีลักษณะการออกแบบที่แตกต่างกันมาประเมินความต้านทานการหักเนื่องจากความล้าของโลหะ โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาด ความผาย คุณสมบัติของโลหะ เป็นต้น ซึ่งการศึกษาในกลุ่มนี้เป็นการทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข และตะไบตามที่มีอยู่ในท้องตลาดเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตะไบที่จะศึกษาได้ตามต้องการ

ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงในการรับภาระของหัวตะไบแบบหมุนเช่นเดียวกับกลุ่มแรก แต่จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาความเค้นแทนการนำตะไบมาทดลองจริง ตัวอย่างงานวิจัยเหล่านี้ ได้แก่ งานวิจัยของ Zanza และคณะ [10] ที่ศึกษาผลของมวล (mass) และโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมุม (polar moment of inertia) ที่มีต่อพฤติกรรมการบิดของหัวตะไบแบบหมุนนิกเกิลไทเทเนียม ซึ่งผลของโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมุมจะสอดคล้องกับสมการการบิดของเพลากลม สำหรับปัจจัยอื่น ๆ ก็มีการศึกษาของ Galal และ Hamdy [11] ที่ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ รูปเรขาคณิตของหน้าตัด, ระยะพิทช์ (pitch), ความผาย (taper) และ การเยื้องศูนย์ของหน้าตัดจากแก่นกลางของตะไบ (off-centered cross-sectional) ซึ่งส่งผลให้รูปแบบการกระจายตัวของความเค้นมีความแตกต่างกัน และในการศึกษาของ Zhang และคณะ [12] แสดงถึงการสร้างตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ (mathematical model) สำหรับอธิบายพฤติกรรมทางกลของตะไบแบบหมุนโดยผสมผสานการใช้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีกับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการอธิบายค่าความเค้นที่เกิดขึ้น

สาเหตุความเสียหายของตะไบที่สามารถเกิดขึ้นได้จาก 2 ลักษณะ คือ เสียหายจากแรงบิด (torsional overload) และเสียหายจากความล้า (bending fatigue) Wei และคณะ [13] ได้ทำการทดสอบสาเหตุความเสียหายของตะไบ ProTaper โดยนำมาใช้งานในการเตรียมคลองรากฟันจนกระทั่งตะไบเกิดความเสียหาย แล้ววิเคราะห์พื้นผิวที่แตกหักด้วยกล้องกำลังขยายสูง พบว่าสาเหตุความเสียหายมาจากความล้าจากการดัดเป็นหลัก ในขณะที่งานวิจัยของ Peng และคณะ [14] ได้สนับสนุนข้อสรุปนี้เช่นกัน โดยการทดสอบด้วยตะไบ ProTaper S1 ในฟันหน้า (anterior) ฟันกรามน้อย (premolar) และฟันกราม (molar) พบว่าสาเหตุหลักของความเสียหายมาจากความล้า มีเพียงส่วนน้อยที่เสียหายจากแรงบิด

### 3.2 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม โดยการหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่เกิดขึ้น และมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์การกระจายความเค้นภายใต้เงื่อนไขภาระที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในการวิเคราะห์ตะไบแบบหมุนที่สามารถเกิดความเสียหายได้จากทั้งแรงบิด และความล้า ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมตะไบ ด้วยการศึกษาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในตะไบเมื่อได้รับแรงบิด หรือแรงดัด วิธีนี้จึงเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ความเสียหายของตะไบแบบหมุน

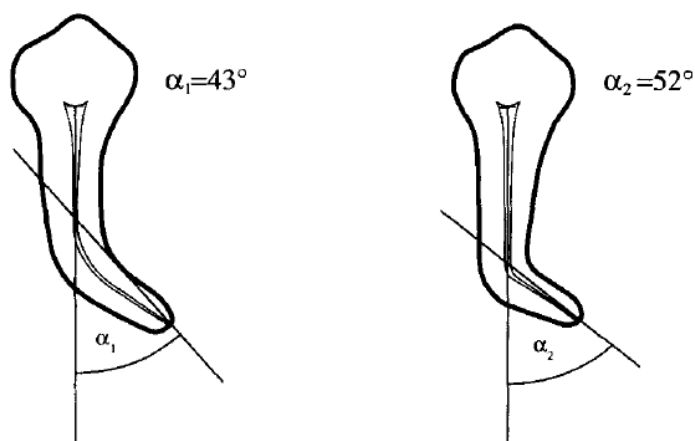
ความเสียหายจากแรงบิดสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการรักษาคลองรากฟันเมื่อส่วนปลายของตะไบยึดติดกับผนังคลองรากฟันที่อาจมีความโค้งหรือมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ในขณะที่ชุดขับเคลื่อน (drive unit) ยังคงหมุนอยู่ทำให้เกิดแรงบิดมากเกินไป จนนำไปสู่การแตกหักบริเวณปลายของตะไบ มีงานวิจัยหลายงานที่ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมการบิดของตะไบแบบหมุน ตัวอย่างเช่น Niño-Barrera และคณะ [15] ได้ศึกษาพฤติกรรมการบิดของตะไบภายใต้เงื่อนไขแรงบิดขนาดต่าง ๆ และแสดงให้เห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในตะไบสามารถเพิ่มไปถึงระดับที่ตะไบสามารถเสียหายได้ ในทำนองเดียวกัน Zhang และคณะ [16] ศึกษาพฤติกรรมการบิดของตะไบที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน และแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของหน้าตัดมีอิทธิพลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีหน้าตัดขนาดเล็ก โดยสรุปแล้วงานวิจัยเหล่านี้เน้นย้ำถึงความเสี่ยงของความเสียหายจากแรงบิดและความจำเป็นในการออกแบบตะไบให้มีความทนทานต่อแรงบิดมากเพียงพอ

ความล้าจากการดัดเกิดขึ้นเมื่อตะไบหมุนภายในคลองรากฟันที่โค้งงอ ทำให้เกิดความเค้นดึงและความเค้นกดสลับกันไปมาที่จุดใดของตะไบจนนำไปสู่การแตกหัก ซึ่งเป็นเรื่องปกติในการใช้งานทางทันตกรรมที่มีการใส่ตะไบเข้าและออกจากคลองรากฟันซ้ำๆ ทำให้ตะไบโค้งงอไปมา มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความล้าจากการดัด ตัวอย่างเช่น Zhang และคณะ [16] ศึกษาพฤติกรรมการดัดของตะไบที่มีรูปร่างหน้าตัด ขนาด และความผายแตกต่างกัน และแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของหน้าตัดมีผลต่อความเค้นมากกว่าขนาดและความผาย นอกจากนี้หากมุมการโค้งตัวเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

กล่าวโดยสรุป ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสำคัญอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการกระจายความเค้นภายใต้แรงบิดและแรงคัตของตะไบแบบหมุน ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่เพียงแต่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมความเสียหายของตะไบ แต่ยังช่วยในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทางทันตกรรมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 3.3 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองคลองรากฟัน

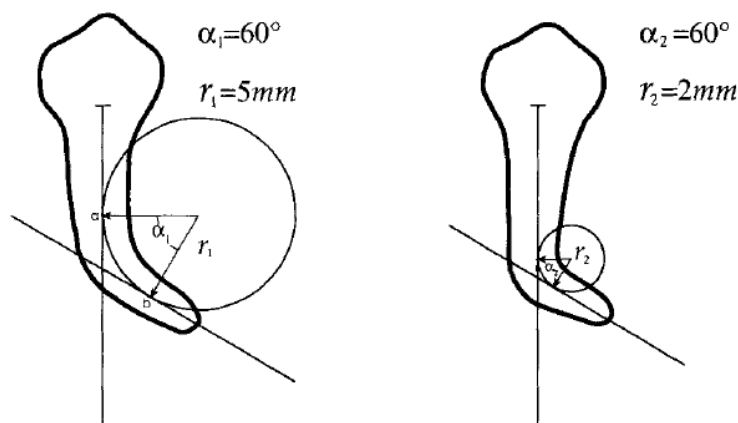
กายวิภาคของคลองรากฟันมีความซับซ้อนสูงและแตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล ทั้งรูปร่าง ขนาด รวมถึงความโค้ง การทำความเข้าใจลักษณะทางกายวิภาคนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการรักษาคลองรากฟันให้ประสบความสำเร็จ ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของคลองรากฟันมีอยู่จำนวนมาก จุดประสงค์หนึ่งในการศึกษาคือการค้นหาวิธีการที่จะสามารถระบุความโค้งของคลองรากฟันได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากลักษณะของคลองรากฟันมนุษย์มีความแตกต่างกันในแต่ละบุคคล ทำให้การกำหนดพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ความโค้งของคลองรากฟันจึงมีความสำคัญ [17] งานวิจัยของ Schneider และคณะ [18] ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงความโค้งของคลองรากฟัน โดยใช้มุม ( $\alpha$ ) ที่เกิดจากเส้นตรงที่ลากขนานกับแกนยาวของคลองกับเส้นตรงที่ลากมาจากปลายรากฟัน (apical foramen) มาตัด ณ จุดที่คลองรากฟันเริ่มเบนออกจากแนวยาวของฟันดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงวิธีการวัดของ Schneider

Pruett และคณะ [19] นำเสนอการอธิบายความโค้งของคลองรากฟันอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยการใช้พารามิเตอร์สองตัว ได้แก่ มุมโค้ง ( $\alpha$ ) และรัศมีโค้ง ( $r$ ) ในการสร้างพารามิเตอร์

เหล่านี้ จะลากเส้นตรงเส้นแรกไปตามแกนยาวของส่วนคอฟัน (coronal portion) และมีเส้นตรงเส้นที่สองลากไปตามแกนยาวของส่วนปลายรากฟัน (apical portion) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 รัศมีโค้งคือความยาวของรัศมีของวงกลมที่สัมผัสกับเส้นตรงสองเส้นข้างต้นที่จุด a และ b และมุมโค้งคือมุมภายในวงกลมระหว่างจุด a และ b



รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการวัดของ Pruet

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ [20-23] ที่พยายามพัฒนาวิธีการกำหนดรูปร่างคลองรากฟันให้แบบจำลองมีความสมจริงมากขึ้น โดยมีพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แก่ ตำแหน่ง ความสูง หรือความยาว เข้ามาใช้พิจารณาด้วย อย่างไรก็ตามยังไม่มีมาตรฐานที่ชัดเจนเกี่ยวกับการกำหนดรูปร่างที่เป็นที่ยอมรับโดยสากล ซึ่งแต่ละวิธีการอาจเหมาะสมกับงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่แตกต่างกันออกไป

### 3.4 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ความล้าของตะไบแบบหมุนเกิดขึ้นจากการงอของตัวตะไบเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในรากฟัน และมีการโค้งบิดกลับขึ้นมา พื้นผิวของตะไบด้านนอกส่วนโค้งจะได้รับความเค้นดึง ในขณะที่พื้นผิวภายในส่วนโค้งจะได้รับความเค้นกด เมื่อตะไบหมุนไปครบหนึ่งรอบ วัสดุจะรับความเค้นดึงและความเค้นกดสลับไปมา เนื่องจากการงอสลับกันไปมา ทำให้วัสดุที่ตำแหน่งนั้นเกิดความล้าและเสียหายในที่สุด มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Chueng และคณะ [24] วิเคราะห์ความล้าบนตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมและนิเกิลไทเทเนียม โดยพิจารณาทั้งความล้าที่รอบต่ำ (low cycle fatigue) และความล้าที่รอบสูง (high cycle fatigue) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าตะไบ

หน้าตัดสามเหลี่ยมจะมีความต้านทานความล้า (fatigue resistance) ดีกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม และวัสดุ นิกเกิลไทเทเนียมจะมีความต้านทานความล้าดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองปัจจัยจึงมีผล ต่ออายุความล้า (failure life)

งานวิจัยของ Lee และคณะ [25] ใช้การสแกนและสร้างแบบจำลอง 3 มิติจากตะไบพันตกรรรมจริงโดยใช้เครื่องไมโครซีทีสแกน (micro-computed tomography scanner) และนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยนำตะไบใส่เข้าไปในคลองรากฟันที่มีความโค้งแตกต่างกัน ได้แก่  $25^\circ$   $35^\circ$  และ  $45^\circ$  มาเปรียบเทียบกับการนำตะไบจริงมาทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบลักษณะเดียวกัน พบว่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน โดยตะไบที่เกิดความเค้นสูงสุดจะมีจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย (number cycles to failure) น้อยที่สุด นอกจากนี้หากความโค้งของคลองรากฟันมากขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นสูงขึ้นเช่นกัน หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเงื่อนไขการให้ภาระ (loading condition) ให้ดูสมจริงมากยิ่งขึ้น Roda-Casanova และคณะ [26] ได้เสนอการวิเคราะห์แบบใหม่ โดยการสร้างแบบจำลองของตะไบและคลองรากฟัน แล้วทำการใส่ตะไบเข้าไปในคลองรากฟันซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นรัศมีโค้ง (radius of curvature) และมุมโค้ง (angle of curvature) จากนั้นตะไบก็จะโค้งงอตามความโค้งภายในของรากฟันและหมุนตะไบแบบครบรอบ (complete rotation) และใช้ความสัมพันธ์ของ Manson-Coffin มาประมาณอายุความล้า ผลที่ได้พบว่ารูปร่างของคลองรากฟันมีผลต่ออายุความล้าของตะไบแบบหมุน ยิ่งรากฟันมีความโค้งมากก็จะทำให้ตะไบที่โค้งตามรูปร่างของรากฟันมีความเครียดเกิดขึ้นมากเช่นกัน

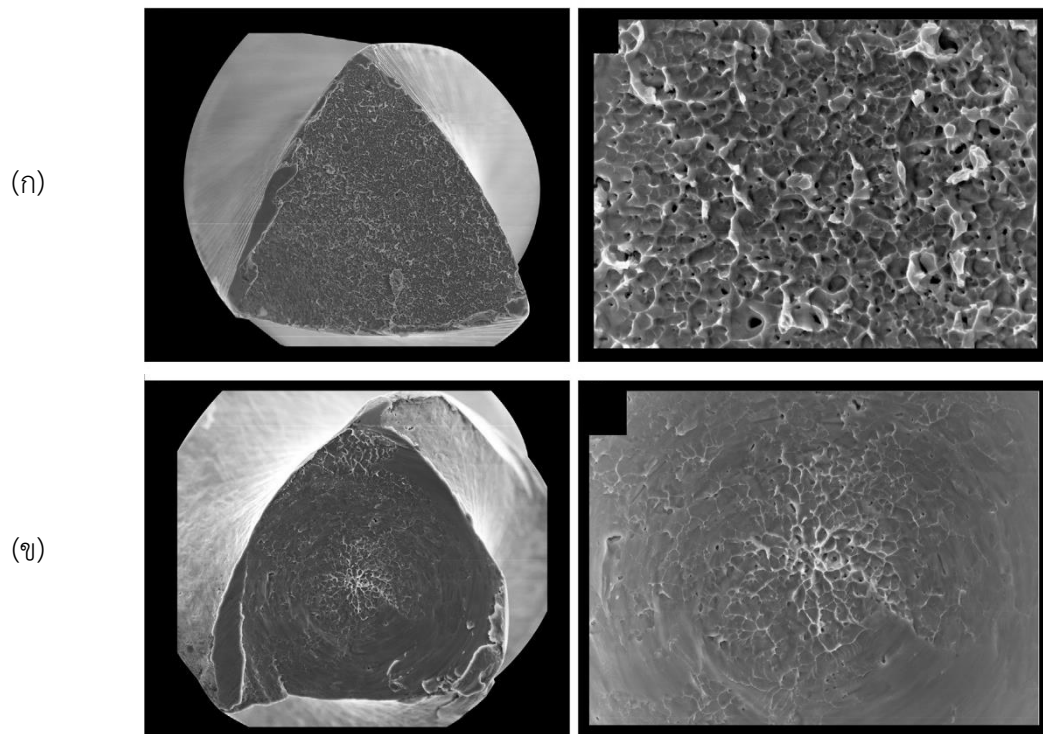
โดยสรุป งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความล้าโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานทันตกรรมมีจำนวนไม่มาก และยังมีความจำเป็นในการศึกษาต่อไปเพื่อเพิ่มความเข้าใจและพัฒนาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความล้าในตะไบทันตกรรม งานวิจัยได้สรุปถึงความสอดคล้องระหว่างผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและผลทางการทดสอบ และมีการศึกษาเกี่ยวกับความล้าจากการดัดและความเสี่ยงของความล้าจากแรงบิดในตะไบทันตกรรม นอกจากนี้ ยังมีความจำเป็นในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสถานการณ์ที่หลากหลาย ซึ่งสามารถใช้ในงานทันตกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ งานวิจัยเชิงตัวเลขและทดลองเพิ่มเติมนี้อาจช่วยเสริมสร้างความเข้าใจและพัฒนาการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมเกี่ยวกับความล้าในตะไบทันตกรรมได้ในอนาคต

### 3.5 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับรูปแบบความเสียหายของตะไบแบบหมุน

การศึกษาพื้นผิวแตกหัก (surface fracture) ของตะไบแบบหมุนที่ทำจากวัสดุเหล็กไทเทเนียม เป็นส่วนสำคัญในการทำความเข้าใจสาเหตุและประเภทของความเค้นที่นำไปสู่การแตกหักของตะไบ ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากได้นำตะไบแบบหมุนประเภทต่าง ๆ มาทดสอบวัฏจักรความล้า (cyclic fatigue test) และทดสอบการบิด (torsional test)

สำหรับการทดสอบวัฏจักรความล้าของ Pawar และคณะ [27] เริ่มด้วยการสร้างคลอกรากพื้นเทียมขึ้นมาแล้วนำตะไบไปหมุนจนเกิดการแตกหัก และได้แสดงพื้นผิวแตกหักจากกล้อง SEM ให้เห็นถึงร่องหลุม (dimple) และช่องว่างขนาดเล็ก (microvoid) กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวน้ำตัดที่แตกหัก นอกจากนี้ยังพบริ้วลายขนาน (striation) ซึ่งเป็นหลักฐานที่แสดงการขยายตัวของรอยแตกในแต่ละคาบของแรงที่กระทำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mecholsky Jr และคณะ [28] ที่พบริ้วลายขนานจากการทดสอบวัฏจักรความล้าเช่นเดียวกัน

ในขณะที่งานวิจัยของ Ahn และคณะ [29] ได้นำตะไบแบบหมุนมาทดสอบวัฏจักรความล้าด้วยการสร้างคลอกรากพื้นเทียมขึ้นมาแล้วนำตะไบไปหมุนจนเกิดการแตกหัก และการทดสอบการบิดด้วยการนำตะไบไปทดสอบกับชุดทดลองตามมาตรฐาน ISO 3630-1 จนเกิดการแตกหัก ซึ่งจากการตรวจสอบพื้นผิวแตกหักของตะไบที่รับการทดสอบการล้าพบว่ารอยร้าวเริ่มเติบโตจากมุมด้านหนึ่งของหน้าตัด และเริ่มขยายตัวไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งแตกหัก ในขณะที่พื้นผิวแตกหักของตะไบที่รับการทดสอบการบิดจะพบร่องหลุมรูปวงรี (shear dimple, elongated dimple, skew dimple) ใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางของการหมุน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gavini และคณะ [30] ที่ได้พบร่องหลุมรูปวงรีเช่นเดียวกันในการทดสอบการบิด ทั้งนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ระบุถึงลักษณะผิวการแตกหักของนิกเกิลไทเทเนียมว่าเป็นการแตกหักแบบเหนียว แต่ไม่ได้ระบุถึงหลักฐานที่บ่งบอกประเภทของความเค้นที่นำไปสู่การแตกหักของตะไบ จนมีงานวิจัยหนึ่งของ Silva และคณะ [31] ที่ได้แสดงผลการตรวจสอบในระดับจุลภาคและส่องกล้อง SEM พบว่าพื้นผิวแตกหักของตะไบที่รับการทดสอบการล้าจะพบร่องหลุมกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวน้ำตัดที่แตกหัก โดยลักษณะของร่องหลุมที่พบเป็นร่องหลุมแบบสมมาตร (equiaxed dimple) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดจากวัสดุได้รับความเค้นตั้งฉาก (normal stress) ในขณะที่พื้นผิวแตกหักของตะไบที่รับการทดสอบการบิดจะพบร่องหลุมรูปวงรีดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) กระจายอยู่โดยรอบแกนกลางของตะไบ (core) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดจากวัสดุได้รับความเค้นแรงเฉือน (Shear stress)



รูปที่ 3.3 พื้นผิวแตกหัก (ก) การทดสอบการล้า (ข) การทดสอบการบิด

## บทที่ 4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์วัฏจักรความล้าและอายุความล้าในตัวตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม โดยเนื้อหาประกอบไปด้วยความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมที่ใช้ อธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุ ซึ่งประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับความเค้น ความเครียด พฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะวัสดุอย่างนิกเกิลไทเทเนียม รวมทั้งความรู้ทางด้านทฤษฎีความล้าและระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้

### 4.1 ความเค้น และความเครียด

การวิเคราะห์ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ในตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมที่สอดเข้าไปในคลองรากฟันจำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของกลศาสตร์วัสดุ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของตะไบแบบหมุนให้ดียิ่งขึ้น สำหรับความเค้นและความเครียดเป็นแนวคิดพื้นฐานในทฤษฎีกลศาสตร์วัสดุ ความเค้นคือการวัดแรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ที่วัสดุได้รับเมื่อรับแรงกระทำจากภายนอก ในขณะที่ความเครียดคือการวัดความเปลี่ยนแปลงของรูปทรงหรือขนาดของวัสดุที่เกิดจากการรับแรงกระทำต่าง ๆ แนวคิดเหล่านี้ใช้อธิบายด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งช่วยให้วิศวกรสามารถคำนวณและทำนายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุภายใต้เงื่อนไขภาระที่แตกต่างกันได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.1.1 ความเค้น

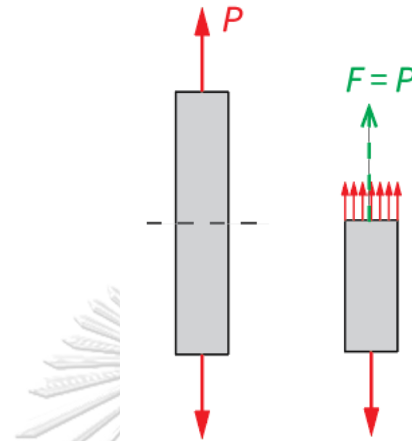
เมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับวัตถุจะทำให้เกิดแรงภายในกระจายทั่วหน้าตัดที่สนใจ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แรงภายในเหล่านี้สามารถรวมเป็นแรงลัพธ์ภายในที่กระทำที่จุดหนึ่ง ๆ ได้ จึงเรียกแรงลัพธ์ ( $F$ ) ต่อพื้นที่หน้าตัดนั้น ๆ ( $A$ ) ว่าความเข้มของแรง หรือความเค้นดังสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

สำหรับตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม การวิเคราะห์ความเค้นจะช่วยให้เข้าใจว่าตัวตะไบตอบสนองต่อแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการรักษาคอนกรีตอย่างไร โดยความเค้นแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความเค้นตั้งฉาก ( $\sigma$ ) เกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำในทิศตั้งฉากกับพื้นผิว ซึ่งสามารถจำแนกเป็น



ความเค้นดึง (tensile stress) และความเค้นกด (compressive stress) การวิเคราะห์ความเค้นดึงฉากเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุต่อแรงภายนอก ซึ่งอาจมีผลต่อความทนทานและประสิทธิภาพของตะไบแบบหมุน



รูปที่ 4.1 วัตถุรับแรงภายนอก

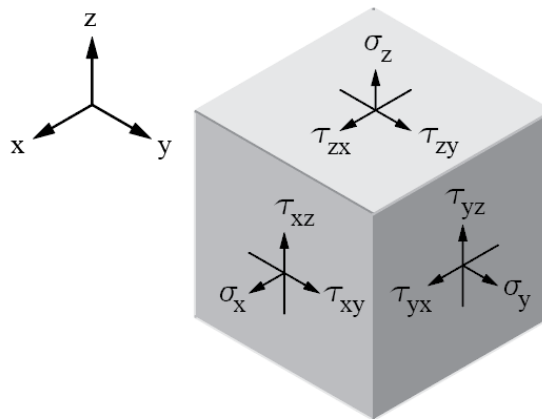
สำหรับความเค้นอีกประเภทหนึ่งคือ ความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) เกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำในทิศขนานกับพื้นผิว โดยเรียกแรงกระทำนี้ว่าแรงเฉือน ( $V$ ) ความเค้นเฉือนจึงเป็นส่วนหนึ่งของแรงเฉือนต่อพื้นที่ที่รับแรงเฉือนดังสมการ

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (4.2)$$

ในทางวิศวกรรมการวิเคราะห์ความเค้นในระบบ 3 มิติเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เข้าใจถึงแรงที่กระทำต่อวัตถุ โดยการหาความเค้นที่ตำแหน่งใด ๆ ของวัตถุใน 3 มิติตามแนวแกนอ้างอิง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  ที่เรียกว่าเทนเซอร์ความเค้น (stress tensor)

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

โดยที่  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  และ  $\sigma_z$  คือความเค้นดึงฉากที่กระทำในทิศแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  และ  $\tau_{yz}$  คือความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในแต่ละระนาบดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  และ  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$  ซึ่งการวิเคราะห์องค์ประกอบความเค้น (stress component) จะช่วยให้เข้าใจการกระจายความเค้นในตะไบแบบหมุนระหว่างการรักษาคอลงรากฟันได้ดียิ่งขึ้น

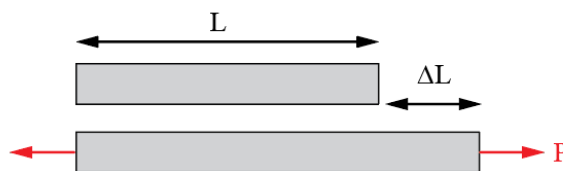


รูปที่ 4.2 เอลิเมนต์ความเค้น

#### 4.1.2 ความเครียด

เมื่อวัตถุได้รับแรงภายนอกจะทำให้วัตถุเปลี่ยนขนาดและรูปร่างไป หรือกล่าวคือวัตถุเกิดการเสียรูปไป (deformation) ซึ่งในการพิจารณาการเสียรูปสามารถเกิดได้จาก 2 ลักษณะคือ การเปลี่ยนแปลงความยาว และการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างเส้นตรงที่แต่เดิมตั้งฉากกัน [32] โดยทั่วไปแล้วการเสียรูปจะไม่สมำเสมอกันตลอดทั้งวัตถุ ดังนั้นจะนิยามปริมาณไร้มิติที่เป็นสัดส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิมนี้ว่า ความเครียด ซึ่งความเครียดจะแบ่งเป็น 2 ประเภท เช่นเดียวกับความเค้น รูปที่ 4.3 แสดงความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเสียรูปในทิศทางเดียวกับที่แรงกระทำ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นตรง ( $\Delta L$ ) เทียบกับความยาวเดิมของเส้นตรง ( $L$ ) ดังแสดงในสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.3 ระยะยืดของแท่งวัตถุยาว เมื่อได้รับแรงภายนอกกระทำ

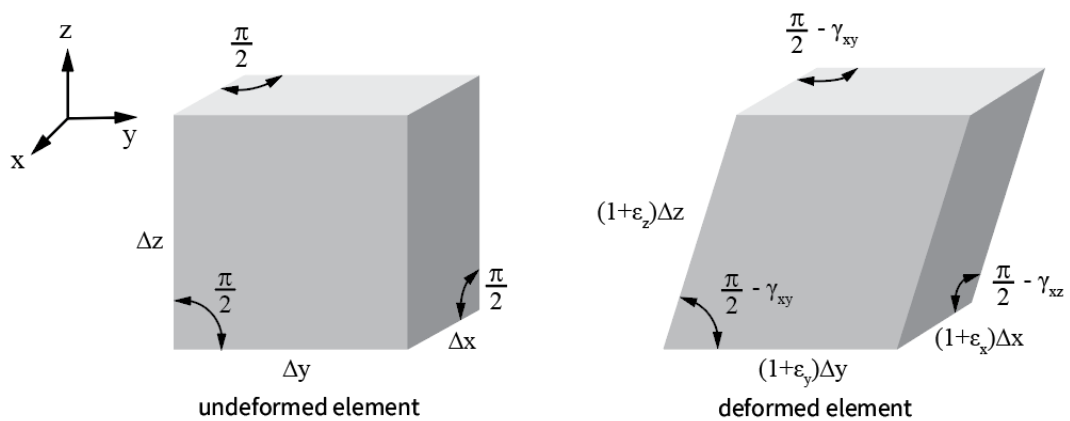
ในขณะที่หากวัตถุเสียรูปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งไปกับแรงกระทำเรียกว่า ความเครียดเฉือน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงมุมที่จุดตัดของเส้นตั้งฉากดั่งสมการ

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (4.5)$$

ในการทำงานเกี่ยวกับความเค้น การวิเคราะห์ความเครียดในระบบ 3 มิติก็มีความสำคัญในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเสียรูปของตะไบแบบหมุน โดยการหาความเครียดที่ตำแหน่งใด ๆ ของวัตถุใน 3 มิติตามแนวแกนอ้างอิง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  หรือที่เรียกว่าเทนเซอร์ความเครียด (strain tensor) :

$$e = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

โดยที่  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  และ  $\varepsilon_z$  คือความเครียดตั้งฉากที่กระทำบนระนาบ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$  และ  $\gamma_{yz}$  คือความเครียดเฉือนที่กระทำบนระนาบที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยที่  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ ,  $\gamma_{xz} = \gamma_{zx}$  และ  $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$



รูปที่ 4.4 เอลิเมนต์ความเครียด

### 4.1.3 การแปลงรูปความเค้นและความเครียด

ชิ้นงานในงานด้านวิศวกรรมมักจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการให้ภาระที่ซับซ้อน โดยความเค้นและความเครียดจะวางตัวในทิศทาง หรือระนาบที่แตกต่างกันออกไป วิธีการแปลงความเค้นและความเครียด (Stress - strain transformation) จะช่วยให้วิศวกรสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของชิ้นงานนั้น ๆ ได้ว่าทิศทางหรือระนาบใดที่มีความเค้นสูงสุด โดยการทราบค่าความเค้นที่วางตัวในทิศทางหนึ่ง ๆ อย่างครบถ้วน ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเค้นและออกแบบชิ้นส่วนนั้น ๆ ได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากความเสียหายของวัสดุจะเกิดในทิศทางหรือระนาบใดที่มีความเค้นหรือความเครียดสูงสุด

#### 4.1.3.1 การแปลงรูปความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ

จากที่ได้กล่าวมาไว้ข้างต้น ความเค้น ณ จุดหนึ่งประกอบไปด้วย ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนทั้งหมด 6 ค่า อย่างไรก็ตามชิ้นงานในงานวิศวกรรมมักอยู่ภายใต้เงื่อนไขการให้ภาระที่ซับซ้อน โดยความเค้นจะวางตัวในทิศทางหรือระนาบที่แตกต่างกัน ในกรณีที่ความเค้นอยู่ในแนวอกระนาบที่สนใจมีค่าเป็นศูนย์สามารถพิจารณาว่าวัสดุอยู่ภายใต้ความเค้นระนาบ (plane stress)

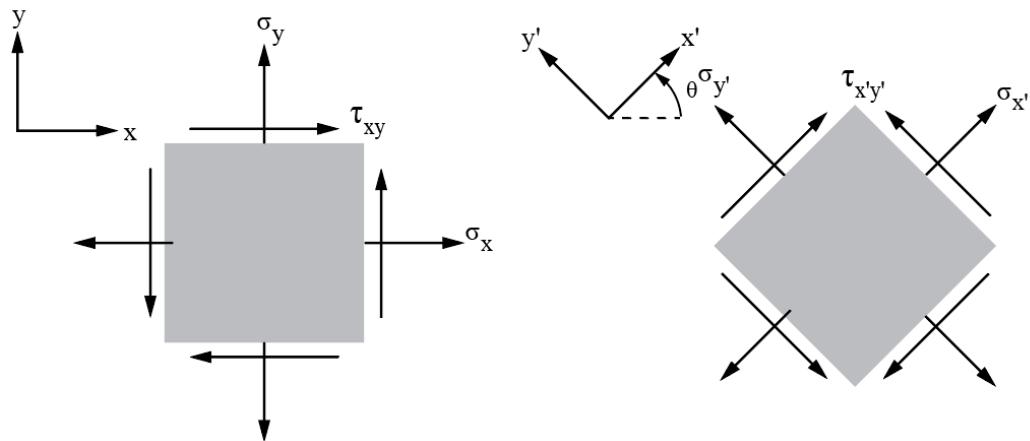
พิจารณาความเค้นระนาบ  $x-y$  ณ จุดหนึ่ง สามารถแสดงด้วยความเค้นตั้งฉาก 2 ค่า ได้แก่  $\sigma_x$  และ  $\sigma_y$  และความเค้นเฉือน 1 ค่า คือ  $\tau_{xy}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งการแปลงรูปความเค้นระนาบหาได้จาก

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (4.7)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (4.8)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (4.9)$$

สมการที่ 7 ถึง 9 แสดงความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนบนระนาบ  $x'-y'$  ที่หมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) โดยที่  $\sigma_x$  และ  $\sigma_y$  คือความเค้นตั้งฉากในทิศทาง  $x$  และ  $y$ ,  $\tau_{xy}$  คือความเค้นเฉือนในระนาบ  $x-y$ ,  $\theta$  คือมุมของการหมุน (ทวนเข็มนาฬิกา) และ  $\sigma_{x'}$ ,  $\sigma_{y'}$  และ  $\tau_{x'y'}$  คือ ความเค้นที่แปลงรูปไปในระนาบใหม่ ความเค้นทั้งสามนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวางแนวของระนาบที่พิจารณา



รูปที่ 4.5 การแปลงเอลิเมนต์ความเค้นจากระนาบ  $x-y$  ไปเป็นระนาบ  $x'-y'$

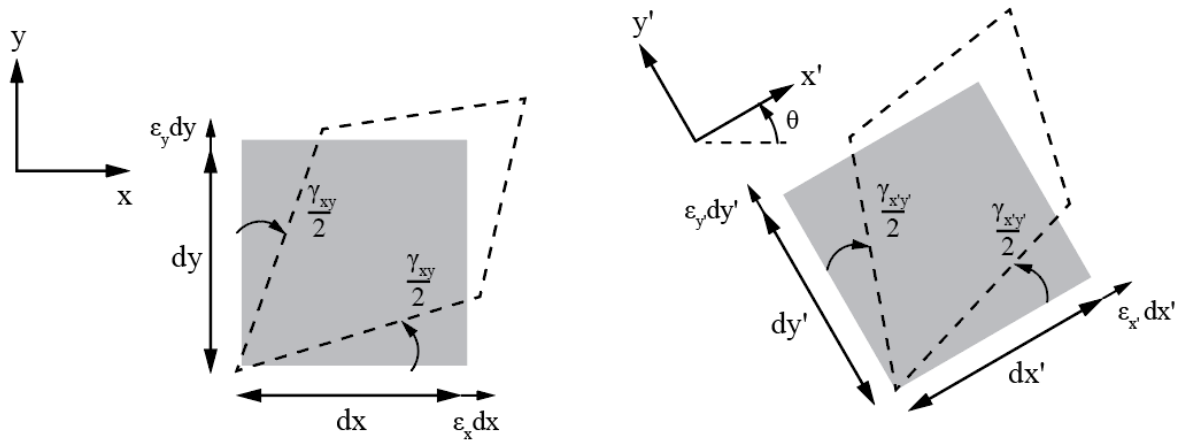
ความเครียดที่เกิดขึ้น ณ จุดหนึ่งประกอบไปด้วย ความเครียดตั้งฉากและความเครียดเฉือน ทั้งหมด 6 ค่า ซึ่งความเครียดตั้งฉากจะส่งผลให้ปริมาตรของเอลิเมนต์เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ความเครียดเฉือนทำให้รูปร่างของเอลิเมนต์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความเครียดทั้ง 6 ค่านี้นั้นขึ้นอยู่กับ การวางแนวของเอลิเมนต์เช่นเดียวกับความเค้น นอกจากนี้วิศวกรจำเป็นต้องแปลงความเครียดอยู่ บ่อยครั้งเพื่อพิจารณาค่าในทิศทางต่าง ๆ สำหรับความเครียดระนาบ (plane strain) เมื่อพิจารณา ระนาบอ้างอิง  $x-y$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) สมการการแปลงรูปความเครียดหาได้จาก

$$\varepsilon_{x'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{y'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (4.11)$$

$$\gamma_{x'y'} = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{2} \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad (4.12)$$

สมการที่ 10 ถึง 12 แสดงความเครียดตั้งฉากและความเครียดเฉือนบนระนาบ  $x'-y'$  ที่ หมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) โดยที่  $\varepsilon_x$  และ  $\varepsilon_y$  คือความเครียดตั้งฉากในทิศทาง  $x$  และ  $y$ ,  $\gamma_{xy}$  คือความเครียดเฉือนในระนาบ  $x-y$ ,  $\theta$  คือมุมของการหมุน (ทวนเข็มนาฬิกา) และ  $\varepsilon_{x'}$ ,  $\varepsilon_{y'}$  และ  $\gamma_{x'y'}$  คือ ความเครียดที่แปลงรูปไปในระนาบใหม่ ความเครียดทั้งสามนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ การวางแนวของระนาบที่พิจารณาเช่นเดียวกันกับความเค้น



รูปที่ 4.6 การแปลงเอลิเมนต์ความเค้นจากกระนาบ  $x-y$  ไปเป็นระนาบ  $x'-y'$

#### 4.1.3.2 การแปลงความเค้นและความเครียดในสามมิติ

การแปลงรูปความเค้นในสามมิติเป็นการแปลงรูปสำหรับเอลิเมนต์มีหลักการเหมือนกับการแปลงรูปความเค้นในสองมิติ แต่การแปลงรูปความเค้นในสามมิติมีความซับซ้อนมากกว่า ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ tensor notation และ matrix operation เมื่อพิจารณาเอลิเมนต์ความเค้นในระนาบอ้างอิง  $x-y-z$  ไต ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) ซึ่ง สมการการแปลงรูปความเค้นสำหรับปัญหาสามมิติคือ

$$\sigma_{x'} = \sigma_x l_1^2 + \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2(\tau_{xy} l_1 m_1 + \tau_{yz} m_1 n_1 + \tau_{zx} n_1 l_1) \quad (4.13)$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_x l_2^2 + \sigma_y m_2^2 + \sigma_z n_2^2 + 2(\tau_{xy} l_2 m_2 + \tau_{yz} m_2 n_2 + \tau_{zx} n_2 l_2) \quad (4.14)$$

$$\sigma_{z'} = \sigma_x l_3^2 + \sigma_y m_3^2 + \sigma_z n_3^2 + 2(\tau_{xy} l_3 m_3 + \tau_{yz} m_3 n_3 + \tau_{zx} n_3 l_3) \quad (4.15)$$

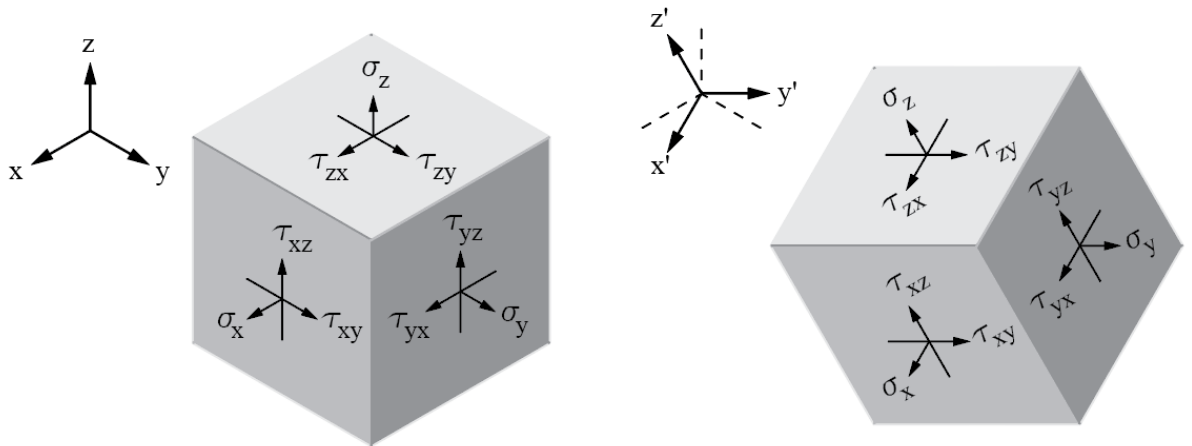
$$\tau_{x'y'} = \sigma_x l_1 l_2 + \sigma_y m_1 m_2 + \sigma_z n_1 n_2 + \tau_{xy} (l_1 m_2 + m_1 l_2) + \tau_{yz} (m_1 n_2 + n_1 m_2) + \tau_{zx} (n_1 l_2 + l_1 n_2) \quad (4.16)$$

$$\tau_{y'z'} = \sigma_x l_2 l_3 + \sigma_y m_2 m_3 + \sigma_z n_2 n_3 + \tau_{xy} (l_2 m_3 + m_2 l_3) + \tau_{yz} (m_2 n_3 + n_2 m_3) + \tau_{zx} (n_2 l_3 + l_2 n_3) \quad (4.17)$$

$$\tau_{z'x'} = \sigma_x l_3 l_1 + \sigma_y m_3 m_1 + \sigma_z n_3 n_1 + \tau_{xy} (l_3 m_1 + m_3 l_1) + \tau_{yz} (m_3 n_1 + n_3 m_1) + \tau_{zx} (n_3 l_1 + l_3 n_1) \quad (4.18)$$

สมการที่ 13 ถึง 18 แสดงความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนที่อยู่ในระนาบอ้างอิง  $x'-y'-z'$  ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) โดยค่า  $l$ ,  $m$  และ  $n$  เป็นค่าโคไซน์ของมุมระหว่างแกน  $i$  และ  $j$  ดังสมการ

$$Q_{ij} = \cos(x'_i, x_j) = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.7 การแปลงเอลิเมนต์ความเค้นจากแกนอ้างอิง  $x-y-z$  ไปที่แกนอ้างอิง  $x'-y'-z'$

การแปลงรูปความเครียดในสามมิติสามารถทำได้ทำนองเดียวกับการแปลงรูปความเค้นในสามมิติ ดังนั้น เมื่อพิจารณาเอลิเมนต์ความเครียดในระนาบอ้างอิง  $x-y-z$  ใด ๆ จะได้สมการการแปลงรูปความเครียดในระนาบอ้างอิง  $x'-y'-z'$  แสดงในสมการที่ 20 ถึง 25

$$\varepsilon_{x'} = \varepsilon_x l_1^2 + \varepsilon_y m_1^2 + \varepsilon_z n_1^2 + \gamma_{xy} l_1 m_1 + \gamma_{yz} m_1 n_1 + \gamma_{zx} n_1 l_1 \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{y'} = \varepsilon_x l_2^2 + \varepsilon_y m_2^2 + \varepsilon_z n_2^2 + \gamma_{xy} l_2 m_2 + \gamma_{yz} m_2 n_2 + \gamma_{zx} n_2 l_2 \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_{z'} = \varepsilon_x l_3^2 + \varepsilon_y m_3^2 + \varepsilon_z n_3^2 + \gamma_{xy} l_3 m_3 + \gamma_{yz} m_3 n_3 + \gamma_{zx} n_3 l_3 \quad (4.22)$$

$$\gamma_{x'y'} = \varepsilon_x l_1 l_2 + \varepsilon_y m_1 m_2 + \varepsilon_z n_1 n_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} (l_1 m_2 + m_1 l_2) + \frac{\gamma_{yz}}{2} (m_1 n_2 + n_1 m_2) + \frac{\gamma_{zx}}{2} (n_1 l_2 + l_1 n_2) \quad (4.23)$$

$$\gamma_{y'z'} = \varepsilon_x l_2 l_3 + \varepsilon_y m_2 m_3 + \varepsilon_z n_2 n_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} (l_2 m_3 + m_2 l_3) + \frac{\gamma_{yz}}{2} (m_2 n_3 + n_2 m_3) + \frac{\gamma_{zx}}{2} (n_2 l_3 + l_2 n_3) \quad (4.24)$$

$$\gamma_{z'x'} = \varepsilon_x l_3 l_1 + \varepsilon_y m_3 m_1 + \varepsilon_z n_3 n_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} (l_3 m_1 + m_3 l_1) + \frac{\gamma_{yz}}{2} (m_3 n_1 + n_3 m_1) + \frac{\gamma_{zx}}{2} (n_3 l_1 + l_3 n_1) \quad (4.25)$$

## 4.2 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุ (material behavior) เมื่อได้รับภาระรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นงานนั้นได้ โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ รวมถึงพฤติกรรมยืดหยุ่น (elastic behavior) พฤติกรรมพลาสติก (plastic behavior) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้

#### 4.2.1 พฤติกรรมยืดหยุ่น

ความยืดหยุ่น คือความสามารถของวัสดุในการคืนตัวกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมหลังจากที่นำภาระที่กระทำออก พฤติกรรมยืดหยุ่นของวัสดุสามารถอธิบายด้วยกฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งระบุว่าความเค้นเป็นสัดส่วนกับความเครียดภายใต้ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ดังสมการ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.26)$$

โดย  $E$  คือ มอดุลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity, Young's modulus) ซึ่งค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นจะแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุและเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุนั้น ๆ การวัดค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นสามารถทำได้ด้วยการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายในบริเวณยืดหยุ่น (elastic region) ของวัสดุซึ่งเป็นเส้นตรง นอกจากนี้ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นยังมีความสำคัญในการใช้งานด้านวิศวกรรมต่าง ๆ เนื่องจากช่วยประเมินการเสียรูปแบบยืดหยุ่นของวัสดุและโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขภาระแบบต่าง ๆ ได้ โดยปกติแล้วหน่วยของมอดุลัสของความยืดหยุ่นจะแสดงในรูปของความดัน เช่น ปาสกาล (Pa) นิวตันต่อตารางเมตร ( $\text{N/m}^2$ ) ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi)

#### 4.2.2 พฤติกรรมพลาสติก

ความเป็นพลาสติก หมายถึงความสามารถของวัสดุในการเสียรูปร่างอย่างถาวรเมื่อมีภาระมากระทำจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้นเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่นแล้ววัสดุนั้นจะเกิดการเสียรูปพลาสติก ซึ่งในช่วงบริเวณนี้วัสดุไม่เป็นไปตามกฎของฮุกอีกต่อไป และไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหลังจากนำภาระออก สำหรับตะไบแบบหมุนหากได้รับความเค้นที่สูงเกินไปก็จะนำไปสู่การเสียรูปพลาสติกและอาจทำให้ตะไบได้รับความเสียหายจนบิดเบี้ยวหรือแตกหักได้

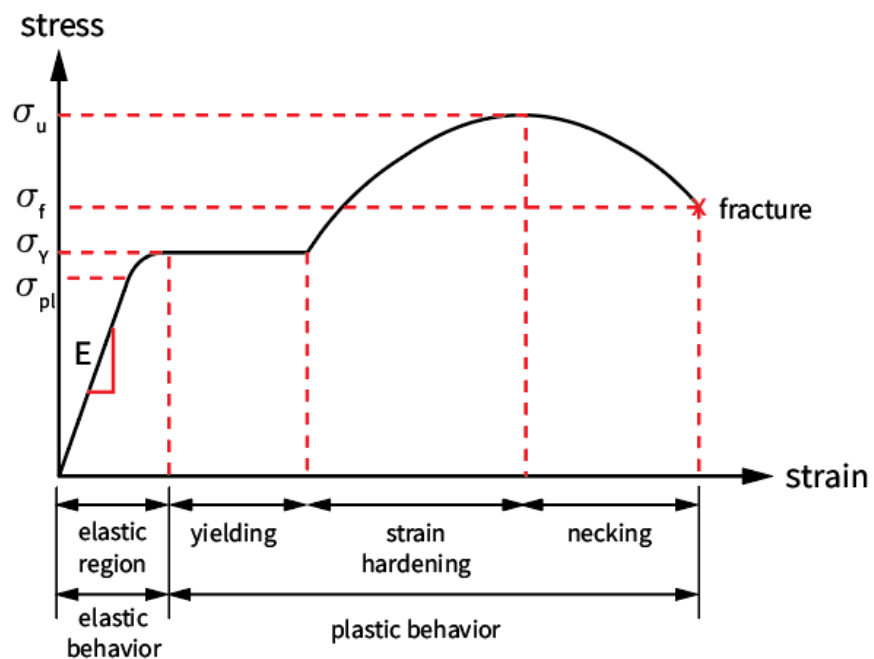
#### 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด (stress - strain relationship) เป็นแนวคิดพื้นฐานในกลศาสตร์วัสดุ เนื่องจากอธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ตอบสนองต่อภาระหรือความเค้นที่กระทำโดยการเปลี่ยนรูปร่างหรือความเครียด ความสัมพันธ์นี้จึงมีความจำเป็นสำหรับการทำความเข้าใจ



เข้าใจพฤติกรรมของวัสดุ การประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้าง และการออกแบบอุปกรณ์หรือโครงสร้างที่สามารถทนต่อเงื่อนไขภาระต่าง ๆ ได้ ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุทั้งในบริเวณยืดหยุ่นและพลาสติกที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุเปลี่ยนไปอย่างไรภายใต้ค่าความเค้นที่แตกต่างกัน

พฤติกรรมทางกลของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ช่วงแรกของเส้นโค้งนี้แสดงถึงความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงยืดหยุ่น (elastic region) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายถึงเมื่อวัสดุได้รับภาระจนยืดออกจะสามารถหดกลับมาที่ความยาวเดิมได้เมื่อหยุดให้ภาระ โดยเส้นโค้งในบริเวณนี้จะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดที่เรียกว่า ขีดจำกัดการแปรผันตรง (proportional limit) เมื่อความเค้นมีค่าเกินจากจุดนี้เส้นตรงจะค่อย ๆ โค้งขึ้นจนถึงจุดที่เรียกว่า ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นอยู่ หากให้ภาระเกินกว่านี้ วัสดุจะเข้าสู่ช่วงที่เกิดการคราก (yielding) ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกิดการเสียรูปถาวร (plastic deformation) โดยค่าความเค้นที่ทำให้เกิดการครากนี้เรียกว่า ความเค้นคราก (yield stress) ซึ่งความเค้นครากนี้ใช้เป็นตัวกำหนดว่าวัสดุเกิดความเสียหายหรือไม่ในการออกแบบชิ้นส่วนทางกล

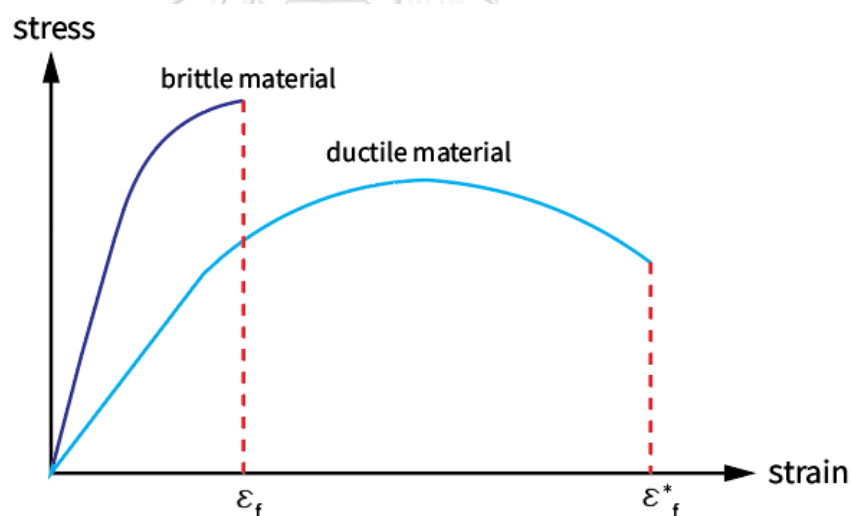


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด

หลังจากวัสดุเกิดการคราก ความเค้นของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงความแข็งแรงเพิ่มจากการเพิ่มความเครียด (strain hardening) ความเค้นในช่วงนี้จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุดที่เรียกว่า ความเค้นสูงสุด (ultimate stress) และหลังจากที่ความเค้นเกินจากจุดนี้ไป พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ หรือเรียกว่าช่วงที่เกิดคอคอด (necking) และชิ้นงานก็จะขาดในที่สุด โดยความเค้นสุดท้ายก่อนชิ้นงานจะขาดเรียกว่า ความเค้นแตกหัก (fracture stress)

#### 4.4 วัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

วัสดุสามารถจำแนกตามลักษณะความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือวัสดุเหนียว (ductile material) และวัสดุเปราะ (brittle material) ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องคุณสมบัติทางกลและพฤติกรรมภายใต้เงื่อนไขภาระต่าง ๆ และคุณลักษณะเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อความเหมาะสมในการใช้งานประเภทต่าง ๆ รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุทั้งสองประเภท

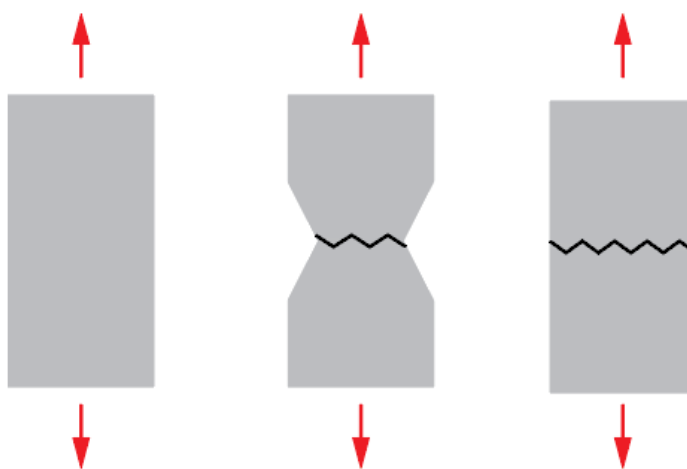


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวและเปราะ

สำหรับวัสดุเหนียวเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับความเครียดได้มาก จึงทำให้วัสดุประเภทนี้เกิดการเสียรูปพลาสติกได้มากก่อนการแตกหัก หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือวัสดุสามารถยืดออกเป็นเส้นยาว ๆ ได้โดยไม่ขาด ตัวอย่างของวัสดุเหนียว ได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็กกล้า ฯลฯ ซึ่งวัสดุเหล่านี้นิยมมาใช้ในงานออกแบบต่าง ๆ เนื่องจากวัสดุมีความสามารถในการดูดซับแรง

กระแทกหรือพลังงานได้มากก่อนจะเกิดความเสียหาย การเริ่มต้นของรอยแตกจะเกิดขึ้นบริเวณจุดบกพร่องของวัสดุ ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็ก (void) และขยายเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่จนเกิดการแตกหักในที่สุด ซึ่งมีลักษณะเป็น Cup and Cone ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) และผิวการแตกหักมีลักษณะหยาบ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) จะปรากฏหลุมเล็ก ๆ และช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของผิวการแตกหักของวัสดุเหนียว

ในทางกลับกันวัสดุเปราะจะเกิดการแตกหักที่ความเครียดต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุเหนียว เนื่องจากวัสดุเปราะไม่สามารถดูดซับพลังงานได้มากจึงเกิดการแตกหักอย่างกะทันหัน โดยเกิดการเสียรูปพลาสติกน้อยหรือไม่เกิดการเสียรูปพลาสติกเลย ตัวอย่างของวัสดุเปราะ ได้แก่ แก้ว เซรามิก และคอนกรีต ฯลฯ วัสดุเหล่านี้มักจะเกิดรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นหลักและมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) ซึ่งมีความแตกต่างจากรอยแตกของวัสดุเหนียวที่เกิดรอยแตกหักทำมุม 45 องศา กับทิศของความเค้นที่กระทำ



รูปที่ 4.10 ลักษณะการแตกหัก (ก) วัสดุเหนียว (ข) วัสดุเปราะ

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานออกแบบหรือการใช้งานใด ๆ การทำความเข้าใจในพฤติกรรมทางกลของวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติและการตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่แตกต่างกัน ทั้งวัสดุเหนียวที่สามารถรับความเครียดได้มากกว่าก่อนที่จะแตกหัก และวัสดุเปราะที่จะแตกหักได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีความเครียด ดังนั้น การทำความเข้าใจสมบัติเหล่านี้ จะช่วยให้เราเลือกวัสดุที่เหมาะสมและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

#### 4.5 พฤติกรรมของนิกเกิลไทเทเนียม

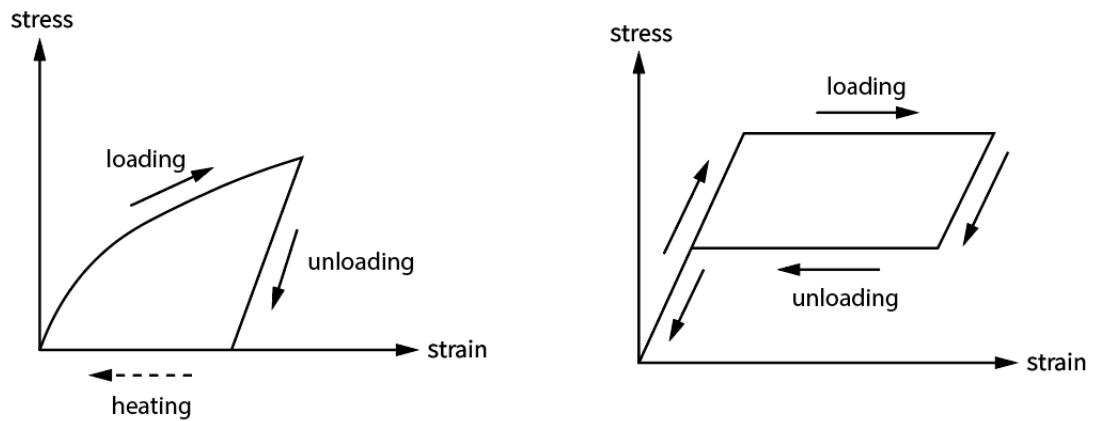
โลหะจำรูป (shape memory alloys) เป็นโลหะผสมที่สามารถกลับคืนรูปร่างเดิมของตัวเองได้หลังจากที่ถูกเปลี่ยนรูปร่างไปแล้ว โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ สมบัติการจำรูป ซึ่งเป็นความสามารถในการคืนรูปเมื่อได้รับความร้อน และสมบัติยืดหยุ่นสูง ซึ่งเป็นสมบัติในการคืนรูปเมื่อปล่อยแรงที่มากระทำต่อวัสดุ พฤติกรรมของวัสดุดังกล่าวสามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.11

การเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transformation) ของวัสดุชนิดนี้มีลักษณะดังต่อไปนี้ ที่อุณหภูมิห้อง โลหะผสมเหล่านี้อยู่ในรูปโครงสร้างออสเทนไนต์ (austenite) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ body center cubic ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงและเมื่อเย็นลง โครงสร้างออสเทนไนต์จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (martensite) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ monoclinic crystal ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ และหากให้ความร้อนอีกครั้งก็จะเกิดกระบวนการย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะเปลี่ยนกลับมาเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์เหมือนเดิม [5, 33]

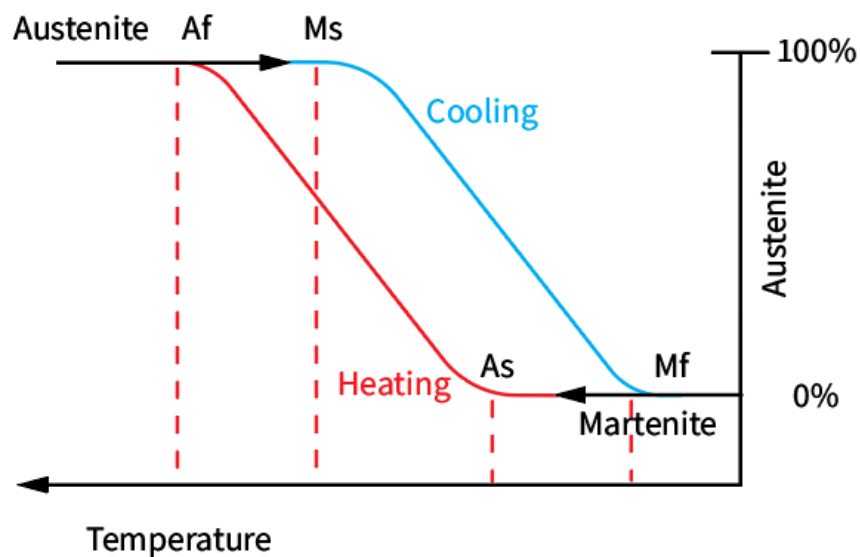
เมื่อมีความเค้นภายนอกกระทำกับวัสดุในกรณีที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง โครงสร้างออสเทนไนต์จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ซึ่งสามารถรับภาระความเค้นมากขึ้นโดยไม่เพิ่มความเครียด วัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูงเหล่านี้จะมีแผนภาพความเค้นและความเครียดตามอุดมคติเป็นไปตามรูปที่ 4.13 โดยปกติแล้วสมบัติยืดหยุ่นสูงจะเหมาะสมสำหรับงานที่วัสดุเกิดเสียรูปมาก ตัวอย่างเช่น ในกรณีของลวดนิกเกิลไทเทเนียมจะสามารถรับความเครียดและกลับสู่สภาพเดิมได้ประมาณ 6-8% ซึ่งมากกว่าโลหะทั่วไปอย่างมาก

ในการจำลองโลหะจำรูปในโปรแกรมแอนซิสต้องกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ( $D$ ), โมดูลัสของความยืดหยุ่นของเฟสออสเทนไนต์ ( $E_A$ ), อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) และจากรูปที่ 4.13 จะพบว่าวัสดุมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหลายค่า ซึ่งในการจำลองพฤติกรรมยืดหยุ่นสูงของโลหะจำรูปในโปรแกรมแอนซิสต้องกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มอีก 7 ค่า ได้แก่ ความเค้นเริ่มต้นของการแปลงเฟสไปข้างหน้า ( $\sigma_s^{AS}$ ), ความเค้นสุดท้ายของการแปลงเฟสไปข้างหน้า ( $\sigma_f^{AS}$ ), ความเค้นเริ่มต้นของการแปลงเฟสย้อนกลับ ( $\sigma_s^{SA}$ ), ความเค้นสุดท้ายของการแปลงเฟสย้อนกลับ ( $\sigma_f^{SA}$ ), ความเครียดตกค้างสูงสุด ( $\bar{\epsilon}_L$ ), ค่าความแตกต่างของการตอบสนองระหว่างความเค้นดึงและความเค้นกด ( $\alpha$ ), โมดูลัสของความยืดหยุ่นของเฟสมาร์เทนไซต์ ( $E_S$ ) สำหรับนิกเกิลไทเทเนียมเป็นโลหะผสมที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.1 ค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งได้มาจากค่าเฉลี่ยของการ

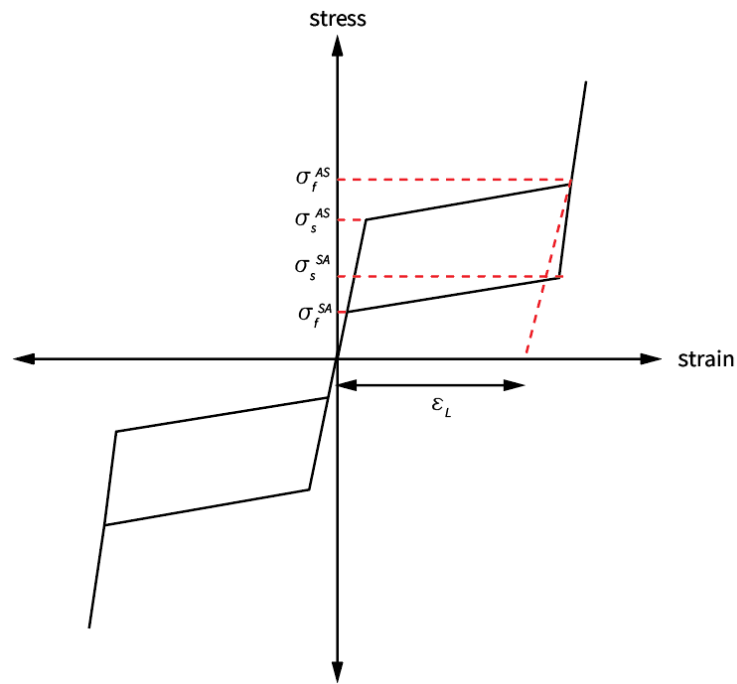
ทดสอบแรงดึง 3 ครั้ง (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 3%) ที่ดำเนินการกับลวดนิเกิลไทเทเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ซึ่งลวดที่ใช้ทดสอบมีคุณสมบัติคล้ายกับลวดนิเกิลไทเทเนียมทั่วไปที่ใช้ในการผลิตตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม [34]



รูปที่ 4.11 กราฟความเค้น-ความเครียดที่อธิบาย ก) สมบัติการจำรูป ข) สมบัติยืดหยุ่นสูง



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของวัสดุและอุณหภูมิของโลหะจำรูป



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติวัสดุของนิเกิลไทเทเนียม [35]

|    | คุณสมบัติทางกล  | ค่า                    |
|----|---|------------------------|
| 1  | ความหนาแน่น ( $D$ )   | 6.45 g/cm <sup>3</sup> |
| 2  | มอดูลัสของความยืดหยุ่นของเฟสออสเทนไนต์ ( $E_A$ )                        | 42530 MPa              |
| 3  | อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ )   | 0.3                    |
| 4  | ความเค้นเริ่มต้นของการแปลงเฟสไปข้างหน้า ( $\sigma_s^{AS}$ )             | 492 MPa                |
| 5  | ความเค้นสุดท้ายของการแปลงเฟสไปข้างหน้า ( $\sigma_f^{AS}$ )              | 630 MPa                |
| 6  | ความเค้นเริ่มต้นของการแปลงเฟสย้อนกลับ ( $\sigma_s^{SA}$ ),              | 192 MPa                |
| 7  | ความเค้นสุดท้ายของการแปลงเฟสย้อนกลับ ( $\sigma_f^{SA}$ ),               | 97 MPa                 |
| 8  | ความเครียดตกค้างสูงสุด ( $\epsilon_L$ )                                 | 0.06                   |
| 9  | ค่าความแตกต่างของการตอบสนองระหว่างความเค้นดึงและความเค้นกด ( $\alpha$ ) | 0                      |
| 10 | มอดูลัสของความยืดหยุ่นของเฟสมาเทนไซต์ ( $E_S$ )                         | 12828 MPa              |

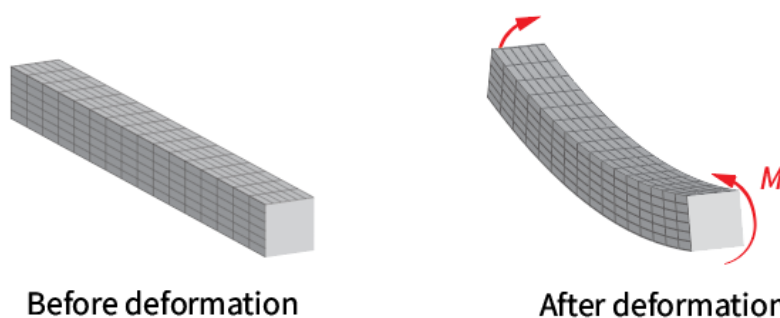
## 4.6 ทฤษฎีของคาน

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมสามารถพิจารณาให้เป็นคานที่รับภาระต่าง ๆ ในระหว่างการรักษารากฟัน ซึ่งการศึกษาทฤษฎีของคาน (theory of beam) จะช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของตะไบแบบหมุนภายใต้เงื่อนไขการให้ภาระที่แตกต่างกันได้ดียิ่งขึ้น

### 4.6.1 ความเค้นดัด

เมื่อคานได้รับแรงภายนอกในทิศตามขวางกับแกนของคาน หรือรับโมเมนต์รอบแกนที่ขวางกับแกนของคานจนเกิดการเสียรูป กล่าวคือแกนของคานจะเบนออกไปจากแนวเดิม ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ลัพท์ และแรงเฉือนภายใน ที่หน้าตัดใด ๆ ของคาน โมเมนต์ดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้นดัด (bending stress) ซึ่งเกิดขึ้นที่หน้าตัดของคานที่ตั้งฉากกับแกนตามความยาวของคานนั้น และการโก่งจากการดัด (bending deflection) ของคาน ซึ่งกระทำตั้งฉากกับคานนั้น และสำหรับแรงเฉือนภายในจะทำให้เกิดความเค้นเฉือนตามขวาง (transverse shear stress) และการโก่งจากแรงเฉือน (shear deflection)

จากที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อมีแรงกระทำต่อคาน คานจะเกิดการแอ่นตัว หรือโก่งงอ ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรง ขนาดของคาน และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำคานนั้น ๆ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดการสมดุลของหน้าตัด หรือให้คานนั้นอยู่ในภาวะสมดุล จึงเกิดโมเมนต์ต้านทานต่อการแอ่นตัว หรือการโก่งงอ ดังกล่าวนั้นไว้ หรืออาจกล่าวได้ว่า โมเมนต์ดัด หมายถึง โมเมนต์ที่พยายามจะต้านทานการดัด หรือหมุนส่วนของโครงสร้างให้โก่งงอ เมื่อพิจารณาที่คานที่โก่งตัวตามรูปที่ 4.14 เส้นแนวนอนจะค่อย ๆ โค้งขึ้น ในขณะที่เส้นแนวตั้งยังคงเป็นเส้นตรง ทำให้ส่วนกลางของคานยื่นออก และส่วนบนของคานถูกบีบอัด โดยเส้นแนวนอนที่แบ่งส่วนนี้เรียกว่า แกนสะเทิน (neutral axis)



รูปที่ 4.14 การเสียรูปของคานเมื่อได้รับแรงดัด

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นจะกระจายตัวรอบแกนสะเทิน เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในคานจะเป็นไปตามสมการ

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad (4.27)$$

เมื่อ  $\sigma_{\max}$  = ความเค้นตั้งฉากสูงสุด

$M$  = โมเมนต์ลัพท์ภายใน

$c$  = ระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงจุดที่ห่างแกนสะเทินมากที่สุด

$I$  = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนสะเทิน

ซึ่งสมการนี้สามารถใช้ได้กับคานที่ทำจากวัสดุเดียวกันตลอดทั้งคาน และความเค้นที่เกิดขึ้นจะต้องอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic regime) กล่าวคือจะต้องมีขนาดความเค้นไม่เกินค่าขีดจำกัดความยืดหยุ่นของคาน (elastic limit)

#### 4.6.2 การสั่นสะเทือนของคาน

ในการรักษาคลองรากฟันตะไบแบบหมุนจะต้องรับภาระทางกลในหลายรูปแบบ เช่น การบิดและการตัด การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอาจส่งผลเสียได้ หากความถี่ของการใช้งานตรงกับความถี่ธรรมชาติของตะไบ ส่งผลให้เกิดการสั่นพ้อง (resonance) ดังนั้น วิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของตะไบจึงมีความสำคัญ เพื่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการรักษา

การสั่นสะเทือนของคาน (vibration of beams) หมายถึงการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา (oscillatory) ของคานเมื่อได้รับการกระตุ้นจากภาระภายนอก โดยการสั่นของคานมีหลายประเภท เช่น การสั่นในแนวแกน (axial vibration) การสั่นแบบบิด (torsional vibration) และการสั่นแบบดัดโค้ง (flexural vibration) ซึ่งในหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นไปที่การสั่นแบบดัดโค้ง

การสั่นแบบดัดโค้งเกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของคานเมื่อได้รับภาระตัด ทำให้คานเกิดการเสีयरูปไป ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การสั่นรูปแบบนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบร์นูลลี-ออยเลอร์ [36]

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (4.28)$$



ที่พิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ ขนาดของคาน และเงื่อนไขขอบเขต เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่น (mode shape) โดย  $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (area moment of inertia)  $w$  คือระยะเคลื่อนที่ตามแนวขวางของคาน  $x$  คือระยะห่างจากปลายคาน  $t$  คือเวลา และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของคาน สำหรับการสั่นฮาร์มอนิกแบบอิสระ (harmonic free vibration) จะมีผลเฉลยคือ

$$w(x, t) = W(x)e^{i\omega t} \quad (4.29)$$

โดย  $\omega$  คือความถี่ และ  $W(x)$  คือฟังก์ชันรูปแบบการสั่น แทนค่าสมการ 29 ลงในสมการ 28 [36] จะได้ว่า

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - k^4 W(x) = 0 \quad (4.30)$$

โดย

$$k = \left( \frac{\omega^2 \rho A}{EI} \right)^{1/4} \quad (4.31)$$

ผลเฉลยของสมการที่ 30 จะอยู่ในรูป

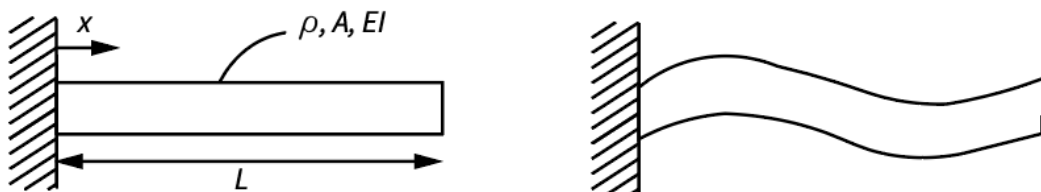
$$W(x) = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \sinh kx + C_4 \cosh kx \quad (4.32)$$

โดยที่ค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  และ  $C_4$  ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต

เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขขอบเขตแบบ fixed-free และวัสดุมีค่า  $E$ ,  $I$  คงที่ จะได้ว่า

$$f_n = \frac{c_n}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (4.33)$$

โดย  $f_n$  คือความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมด,  $L$  คือความยาวของคาน,  $c_n$  คือค่าคงที่ในแต่ละโหมด สำหรับในโหมดที่ 1, 2 และ 3 จะมีค่า 1.875, 4.694, 7.855 ตามลำดับ

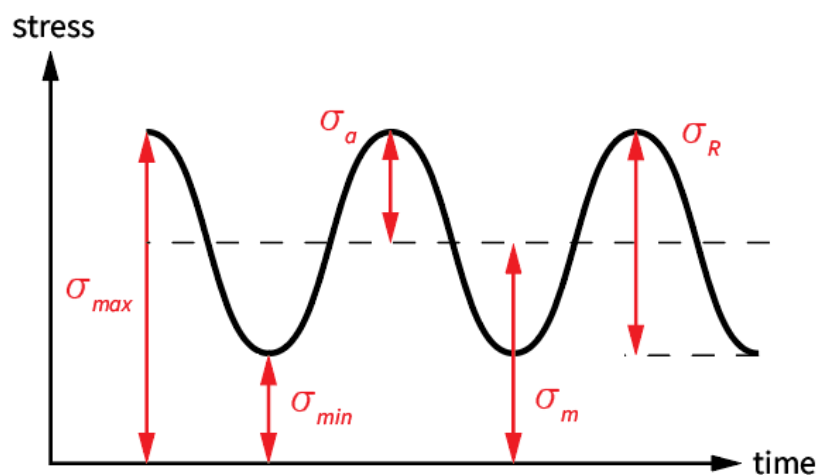


รูปที่ 4.15 การสั่นสะเทือนของคาน

#### 4.7 ทฤษฎีความล้า

ความเสียหายจากความล้า (fatigue failure) เป็นปัญหาหลักในการออกแบบทางวิศวกรรม ความล้าเกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนได้รับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเรียกว่าวัฏจักรความล้า (cyclic fatigue) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จนโครงสร้างเริ่มเสียรูปถาวรในระดับจุลภาค ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเริ่มได้จากบริเวณที่เป็นจุดบกพร่อง (defect) ของชิ้นงาน ได้แก่ ร่อง หลุม และจุดบกพร่องอื่นๆ จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าชิ้นงานดังกล่าวจะได้รับวัฏจักรความล้า จนเกิดการสะสมของความเค้นจนเกินขีดจำกัดของความแข็งแรง ทำให้ ณ จุดนั้นของชิ้นงานรอยร้าวเริ่มต้น (crack initial) และเมื่อเวลาผ่านไปรอยร้าวจะเติบโตไปเรื่อย ๆ (crack propagation) ทำให้พื้นที่รับแรงที่เหลืออยู่ค่อย ๆ น้อยลง จนสุดท้ายชิ้นงานรับภาระไม่ได้อีกต่อไปก็จะแตกหักในที่สุด (final rupture) ในปัจจุบันมีสามแนวทางหลักในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายจากความล้า ได้แก่ วิธี stress-life วิธี strain-life และวิธี fracture mechanics (หรือเรียกว่า fatigue crack growth)

สำหรับวิธี stress-life จะสนใจที่ความล้ารอบสูง ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ไม่มีความเครียดพลาสติกเกิดขึ้นในชิ้นงานนั้น ซึ่งสามารถหาอายุความล้าได้จากข้อมูลการทดสอบความแข็งแรงล้า (fatigue strength) สำหรับวิธี stress-life จะใช้ความสัมพันธ์ของ S-N curve ในขณะที่วิธี strain-life จะใช้ความสัมพันธ์ของ  $\epsilon$ -N curve ซึ่งสนใจที่ความล้ารอบต่ำ เหมาะกับปัญหาที่ต้องพิจารณาทั้งช่วงยืดหยุ่น และช่วงพลาสติก

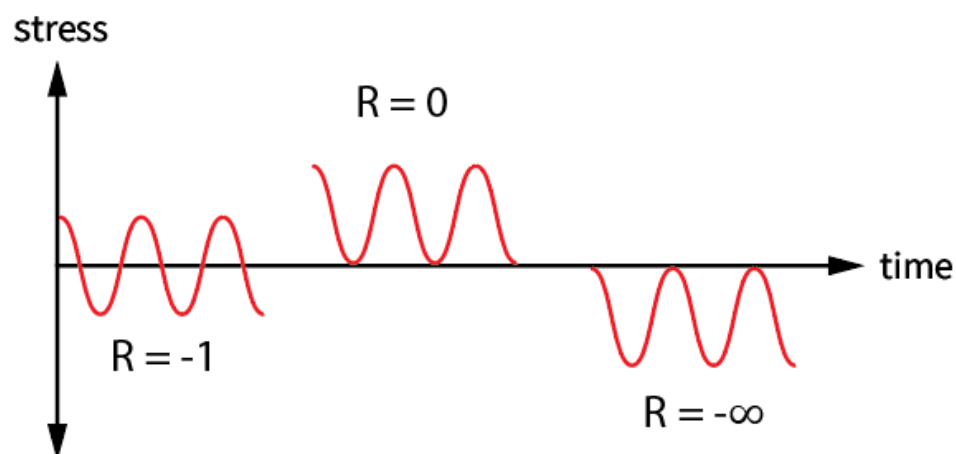


รูปที่ 4.16 วัฏจักรความล้า

#### 4.7.1 วิธี stress-life

วัฏจักรความล้า หรือลักษณะการให้ภาระซ้ำไปซ้ำมาตามเวลาที่มีแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude loading) สามารถอธิบายด้วยอัตราส่วนภาระ (stress ratio, R-ratio, R) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าภาระต่ำสุดของวัฏจักรหารด้วยค่าภาระมากที่สุดของวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 4.17 ค่าของอัตราส่วนภาระมีด้วยกัน 3 ลักษณะ ได้แก่

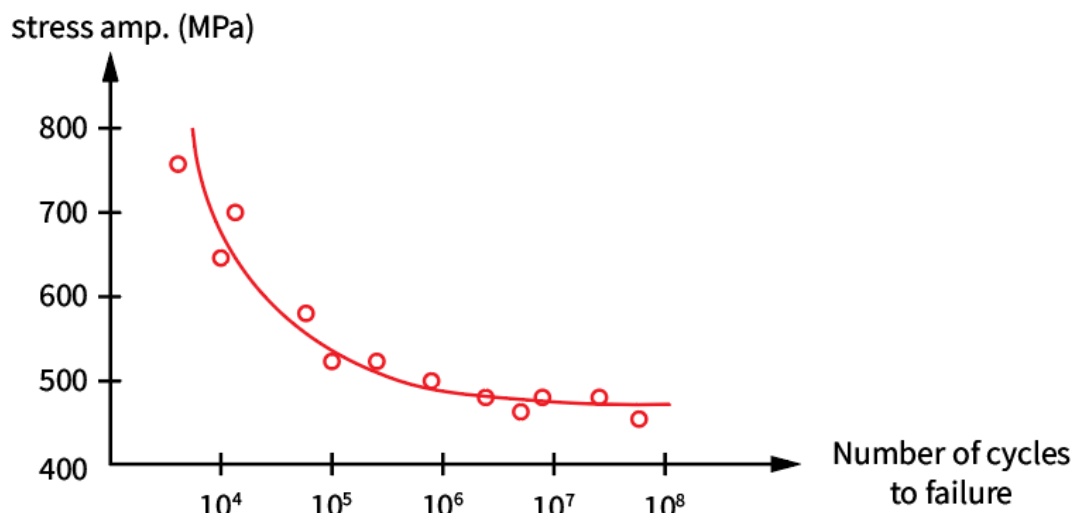
1.  $R = -1$  หรือค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นศูนย์ (zero mean stress) หมายถึงค่าความเค้นสูงสุดและต่ำสุดมีขนาดเท่ากัน แต่เครื่องหมายตรงกันข้าม เรียกอัตราส่วนภาระลักษณะนี้ว่า fully reverse
2.  $R = 0$  หมายถึงค่าความเค้นต่ำสุดเป็นศูนย์ ส่วนขนาดความเค้นสูงสุดและความเค้นเฉลี่ยมีค่าเป็นบวก ทำให้วัฏจักรนี้เป็น tension ทั้งหมด หรือเรียกอัตราส่วนภาระลักษณะนี้ว่า pulsating tension
3.  $R = -\infty$  หมายถึงค่าความเค้นสูงสุดเป็นศูนย์ ส่วนขนาดความเค้นสูงสุดและความเค้นเฉลี่ยมีค่าเป็นลบ ทำให้วัฏจักรนี้เป็น compression ทั้งหมด



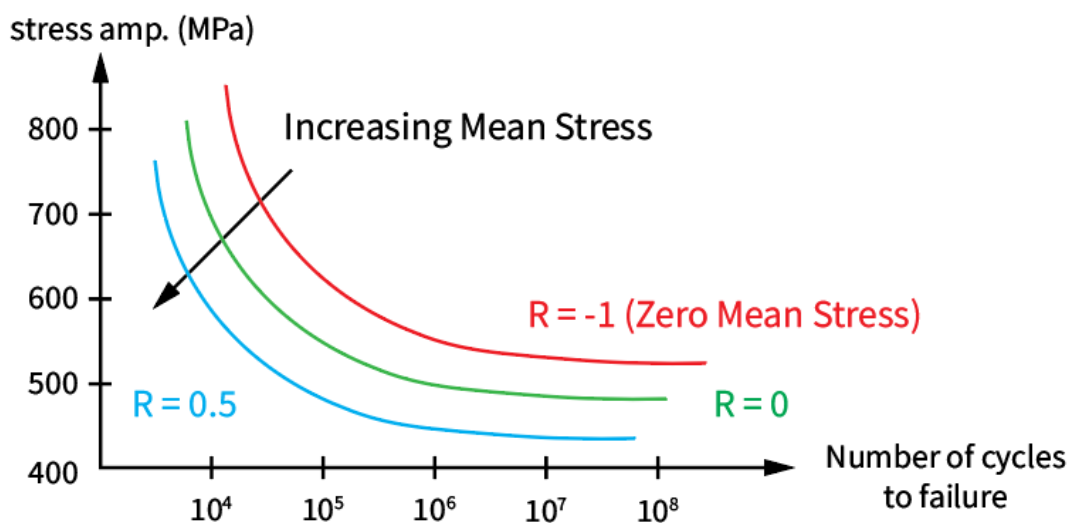
รูปที่ 4.17 อัตราส่วนภาระในแต่ละลักษณะ

สมบัติความล้าของวัสดุมักจะอธิบายโดยใช้ S-N curve ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเค้น ( $\sigma_a$ ) กับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย ( $N_f$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดย S-N curve มาจากการทดสอบความล้า ซึ่งทดสอบโดยใช้ความเค้นที่มีแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude) กับชิ้นงานทดสอบจนกว่าชิ้นงานนั้นจะเสียหาย แต่ในบางกรณีการทดสอบจะยุติลง

หลังจากการทดสอบผ่านไปตามจำนวนรอบที่กำหนด เช่น  $N_f > 10^6$  ผลลัพธ์จะถูกตีความว่าวัสดุมีอายุใช้งานไม่จำกัด (infinite life) เรียกจุดนี้ว่าขีดจำกัดความทนทาน (fatigue limit, endurance limit) เมื่อวัสดุได้รับความเค้นน้อยกว่าความเค้นนี้ จะไม่เกิดความเสียหาย ไม่ว่าจะรับความเค้นไปกี่รอบก็ตาม นอกจากนี้ความสัมพันธ์ S-N curve สามารถใช้ได้กับวัฏจักรแบบ fully reverse เท่านั้น เนื่องจากความเค้นเฉลี่ยจะส่งผลต่อพฤติกรรมความล้าดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยหากอัตราส่วนภาระมีค่าเป็นบวกมากขึ้น จะทำให้เส้นกราฟขยับลงมาเรื่อย ๆ ซึ่งโดยปกติแล้วจะส่งผลให้วัสดุมีอายุสั้นลง



รูปที่ 4.18 S-N curve



รูปที่ 4.19 S-N curve ที่ mean stress ต่าง ๆ

#### 4.7.2 วิธี strain-life

วิธี strain-life จะพิจารณาการเสียรูปพลาสติก (plastic deformation) ซึ่งมักเป็นกรณีของวัสดุเหนียว (ductile) ที่มีความล้ารอบต่ำ วิธี strain-life สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความเครียด (strain amplitude,  $\varepsilon_a$ ) กับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย ( $N_f$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยที่แอมพลิจูดของความเครียด ประกอบด้วยช่วงยืดหยุ่น และช่วงพลาสติก ดังนั้นแอมพลิจูดของความเครียดจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

เมื่อ  $\varepsilon_e$  และ  $\varepsilon_p$  คือความเครียดยืดหยุ่น และความเครียดพลาสติกตามลำดับ จากกราฟระหว่างแอมพลิจูดของความเครียดกับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหายในช่วงยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง และจากกฎของ Basquin จะได้ว่า

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (4.35)$$

และ 
$$\varepsilon_p = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (4.36)$$

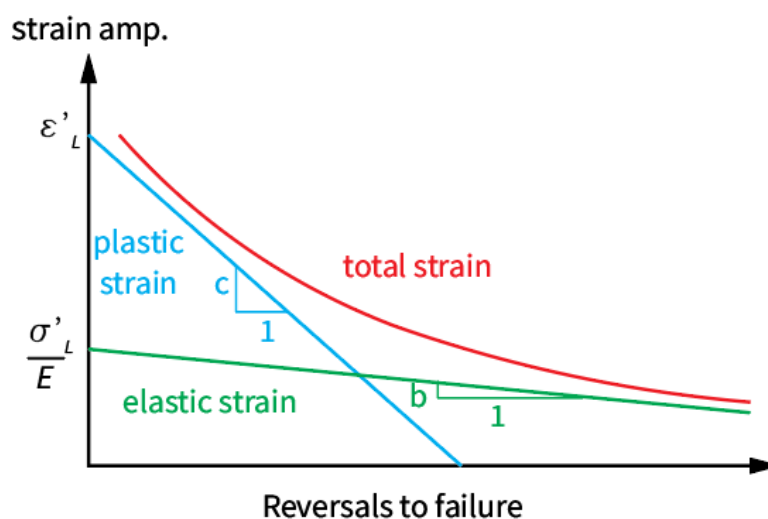
แทนค่าสมการที่ 3 และ 4 ในสมการที่ 2 จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (4.37)$$

เรียกสมการนี้ว่าสมการความสัมพันธ์ Coffin-Manson โดย  $\sigma'_f, \varepsilon'_f, b, c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (strength coefficient), ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียว (ductility coefficient), เลขยกกำลังความแข็งแรง (strength exponent), เลขยกกำลังความเหนียว (ductility exponent) ตามลำดับ โดยค่าคงที่  $b$  และ  $c$  คือความชันของความเครียดยืดหยุ่นและพลาสติกในกราฟล็อก-ล็อก (log-log) ระหว่างแอมพลิจูดของความเครียดกับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหายตามลำดับ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดยังสามารถเขียนอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของ Ramberg-Osgood ได้ดังนี้

$$2\varepsilon_a = \Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2K}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.38)$$

โดย  $K$  และ  $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงแบบวัฏจักร (cyclic strength coefficient) และ เลขยกกำลังความแข็งแรงจากความเครียดแบบวัฏจักร (cyclic strain hardening exponent) ตามลำดับ



รูปที่ 4.20  $\varepsilon$ -N curve

#### 4.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้รับประโยชน์อย่างมากจากเทคโนโลยีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ทำให้การแก้ปัญหาเป็นเรื่องง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์มี 2 แนวคิดหลัก คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical method) และวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) สำหรับวิธีเชิงวิเคราะห์ จะเป็นการใช้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาผลลัพธ์แม่นยำ (exact solution) อย่างไรก็ตาม หลายปัญหาในโลกความเป็นจริงมีความซับซ้อนและยากต่อการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของรูปร่างของโดเมนปัญหาหรือความซับซ้อนของสมการครอบคลุม (governing equation) ซึ่งทำให้วิธีเชิงวิเคราะห์ไม่สามารถแก้ปัญหาหรือยากต่อการประยุกต์ใช้ ดังนั้นจึงนำมาสู่การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ต่าง ๆ ไปเป็นสมการพีชคณิต โดยใช้การคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาผลลัพธ์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถแบ่งออกเป็นหลายวิธี ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่จะหาคำตอบ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงความแม่นยำและความเร็วในการคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการในเวลาที่มีจำกัด [37, 38]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขที่ใช้เพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ (approximate solution) ของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ แนวคิดหลักคือการแบ่งโดเมน (domain) ของปัญหาออกเป็นโดเมนย่อยหรือเอลิเมนต์ (element) แล้วสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ นำสมการจากทุกเอลิเมนต์มารวมกัน และประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาผลลัพธ์ การแก้ปัญหโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. กำหนดปัญหา (Problem Definition) เป็นขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับบริเวณที่สนใจ (domain) รวมถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ต้องแก้ไข และสร้างรูปร่างของปัญหา ซึ่งอาจประกอบด้วย พื้นผิว ขอบตรง ขอบโค้ง ฯลฯ

2. การแบ่งขนาดเอลิเมนต์ (Meshing) เป็นการแบ่งโดเมนรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาตัวไม่รู้ค่า (unknown) จำนวนจุดต่อมีผลต่อลักษณะการกระจายของผลลัพธ์บนเอลิเมนต์นั้น ๆ เรียกว่าฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation function) ยิ่งจำนวนจุดต่อต่อเอลิเมนต์เยอะ จะส่งผลให้ผลลัพธ์มีความเที่ยงตรงมากขึ้น แต่ก็จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วย เนื่องจากจำนวนจุดต่อบ่งบอกจำนวนตัวไม่รู้ค่าของปัญหานั้น

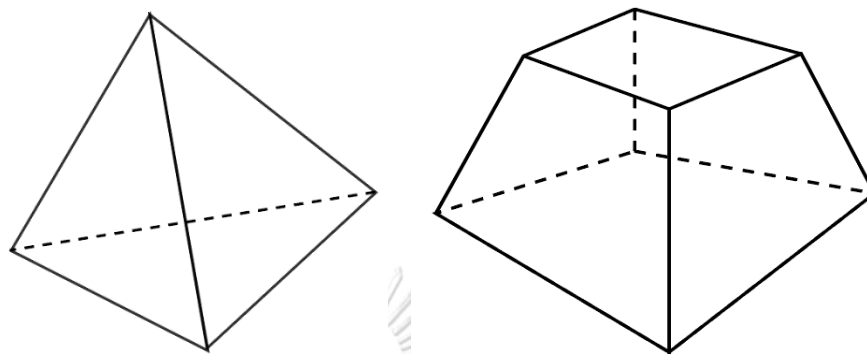
3. การสร้างฟังก์ชันของเอลิเมนต์ (Formulation of Element Equations) เป็นการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น และนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากทุกเอลิเมนต์มารวมกันขึ้นเป็นระบบสมการทางพีชคณิต (system of algebraic equations) ขนาดใหญ่

4. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Application of Boundary Conditions) เป็นการประยุกต์เงื่อนไขต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นระยะการเคลื่อนที่ที่ทราบ แรงที่ทราบ หรืออุณหภูมิที่ทราบ นำมาใช้เข้ากับระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่ เพื่อแก้หาผลลัพธ์ที่จุดต่อต่าง ๆ

#### 4.8.1 รูปร่างของเอลิเมนต์

ประเภทของเอลิเมนต์มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากเอลิเมนต์เหล่านี้มีหน้าที่กำหนดรูปร่างและคุณสมบัติของแบบจำลอง ซึ่งการเลือกประเภทของเอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับ

กับความซับซ้อนของปัญหา ระดับความแม่นยำที่ต้องการ และทรัพยากรการคำนวณที่มีอยู่ สำหรับการวิเคราะห์ใน 3 มิติส่วนใหญ่จะนิยมใช้เอลิเมนต์ทรงหกหน้า (hexahedral element) และเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral element) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 [39]



รูปที่ 4.21 ประเภทของเอลิเมนต์ (ก) ทรงสี่หน้า (ข) ทรงหกหน้า

เอลิเมนต์ทรงหกหน้าที่ประกอบด้วย 20 จุดต่อเรียกว่า SOLID186 และแต่ละจุดต่อจะมี 3 องศาอิสระ (degree of freedom) กล่าวคือสามารถเคลื่อนที่ (translation) ในทิศ  $x y z$  ในขณะที่เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่ประกอบด้วย 10 จุดต่อ เรียกว่า SOLID187 ซึ่งมี 3 องศาอิสระเช่นเดียวกัน ซึ่งการเลือกใช้งานระหว่าง SOLID186 หรือ SOLID187 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นความซับซ้อนของรูปร่างแบบจำลอง ระดับความแม่นยำที่ต้องการ และทรัพยากรการคำนวณที่มี เป็นต้น ซึ่งสำหรับ SOLID187 จะเหมาะสมกับปัญหาที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (irregular shape) และมีการใช้ทรัพยากรการคำนวณน้อยกว่า SOLID186 เนื่องจาก SOLID187 มีจำนวนจุดต่อน้อยกว่าในระดับความแม่นยำที่เท่ากัน แต่ในขณะเดียวกันการมีจำนวนจุดต่อจำนวนมากของ SOLID186 ก็เหมาะสมกับปัญหาที่ต้องการความแม่นยำสูง อย่างปัญหาการหาความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration)

#### 4.8.2 การวิเคราะห์ปัญหาโครงสร้างแบบสถิต

ในการวิเคราะห์แบบสถิต (static condition) จะสมมติให้ภาระที่กระทำค่อย ๆ กระทำอย่างช้า ๆ จนเพียงพอที่จะละเว้นผลของ inertia effect เนื่องจากในโลกของความเป็นจริงภาระต่าง ๆ จะเป็นฟังก์ชันของเวลา แต่อย่างไรก็ตามปัญหาส่วนใหญ่ทางวิศวกรรมจะสนใจที่สถานะสมดุล



(equilibrium state) ในขณะที่การวิเคราะห์แบบพลวัต (dynamic condition) ภาวะที่กระทำจะเป็นฟังก์ชันของเวลา และผลของ inertia และ damping effect เช่น ความเร็ว ความเร่ง โมเมนตัม จะมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ โดยสามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$M \{u''\} + C\{u'\} + K\{u\} = \{f\} \quad (4.39)$$

โดยพจน์ของ  $M \{u''\}$  คือ inertia force  $C\{u'\}$  คือ damping force และ  $K\{u\}$  คือ restoring force สำหรับปัญหาแบบสถิตจะละเว้น inertia force และ damping force ทำให้สมการลดรูปเป็น

$$K\{u\} = \{f\} \quad (4.40)$$

#### 4.8.3 การวิเคราะห์การโก่งตัวของคานที่มีการเสียรูปมาก

ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมเมื่อเกิดการโก่งตัวในระหว่างการรักษาคอลงรากฟันมักเป็นการโก่งตัวที่มีการเสียรูปมาก (large deformation) เนื่องจากคอลงรากฟันของมนุษย์มีลักษณะความโค้งที่มากน้อยแตกต่างกัน การใช้ซอฟต์แวร์ช่วยในการคำนวณจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์การโก่งตัวมากที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

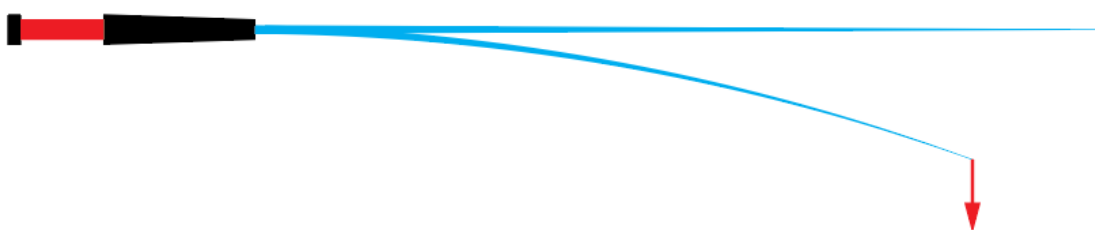
การวิเคราะห์การโก่งตัวที่มีการเสียรูปมากในซอฟต์แวร์แอนซิสจะพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ (material nonlinearity) และความไม่เชิงเส้นเชิงเรขาคณิต (geometry nonlinearity) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการคำนวณความแข็งแรงที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ในกรณีที่วัสดุมีการเสียรูปมากและรูปร่างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดอย่างเบ็ดเตล็ดปลาที่รับน้ำหนักของปลาที่ตะขอเกี่ยวไว้หรือตะไบแบบหมุนที่มีการเสียรูปเมื่อสอดเข้าไปในคอลงรากฟัน จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งปลายของคานจะโก่งตัวลงด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของคานมีค่าสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติการคำนวณแบบการเสียรูปน้อย (small deformation) พจน์  $K$  จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะการกระจัด ซึ่งหมายถึงหากเพิ่มแรงขึ้นสองเท่าจะส่งผลให้การกระจัดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน แต่สำหรับการคำนวณของการโก่งตัวที่มีการเสียรูปมาก พจน์  $K$  จะมีค่าไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้ต้องใช้แรงมากขึ้นกว่าเดิมเพื่อเพิ่มความกระจัดเป็นสองเท่า เนื่องจากความแข็งแรงเป็นฟังก์ชันของการกระจัด ดังแสดงในสมการ

$$K' = K(\{u\}) \quad (4.41)$$

ซึ่ง  $K$  เป็นฟังก์ชันของการกระจัด ดังนั้นสมการที่ 40 ซึ่งเป็นกฎของฮุกสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$K(\{u\})\{u\} = \{f\} \quad (4.42)$$

ในปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นเช่นนี้ การคำนวณความแข็งเกร็งเมื่อโครงสร้างเกิดการโก่งตัวจะต้องเปิดใช้งานการโก่งตัวมากในซอฟต์แวร์แอนซิส ซึ่งหากไม่มีการเปิดการโก่งตัวมาก ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกคำนวณโดยใช้สมการเชิงเส้น และไม่ว่าโครงสร้างจะโก่งไปมากเพียงใดจะยังคงใช้ความแข็งเกร็งเดิม

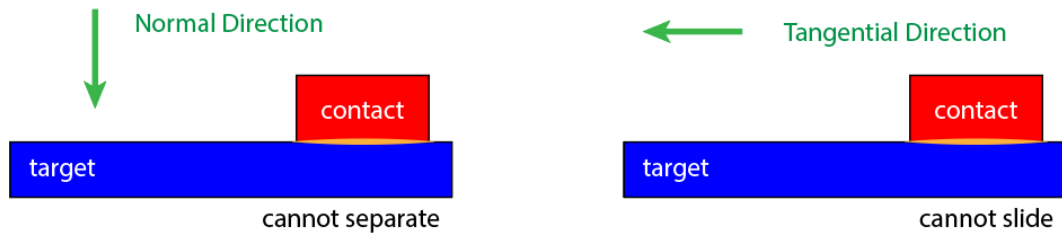


รูปที่ 4.22 การโก่งตัวมากในเบ็ดตกปลา

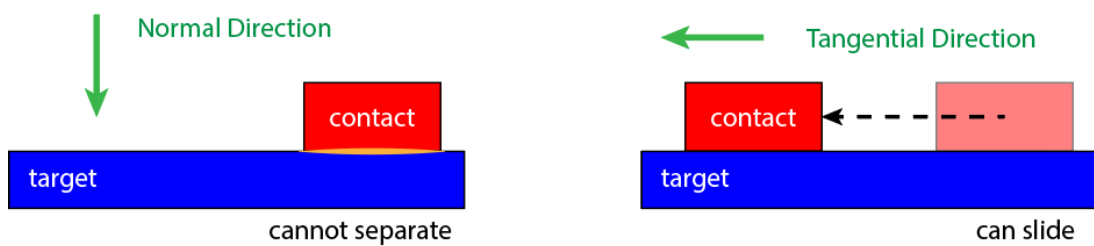
#### 4.8.4 การวิเคราะห์การสัมผัส

ปัญหาของการสัมผัสเป็นปัญหาที่ยากต่อการวิเคราะห์ เนื่องจากเราไม่มีทางทราบว่าบริเวณใดจะสัมผัสกับบริเวณใด และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นยังขึ้นอยู่กับภาวะที่กระทำ ประเภทของวัสดุ เงื่อนไขขอบเขต และปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมาย นอกจากนี้ปัญหาส่วนใหญ่จะมีความต้านทาน ซึ่งจะทำให้ปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้นและอาจทำให้การหาผลลัพธ์ทำได้ยาก ซึ่งประเภทของการสัมผัสแบ่งเป็น 5 ประเภท ได้แก่ ยึดติด (Bonded), ไม่มีการแยก (No Separation), ไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless), หยาบ (Rough) และมีแรงเสียดทาน (Frictional) [40,41]

การสัมผัสแบบยึดติด (bond) คือการที่ผิวสัมผัสทั้งสองไม่มีการเลื่อน (sliding) หรือแยกออก (separation) จากกัน เปรียบเสมือนว่าผิวสัมผัสทั้งสองถูกทากาวติดกันไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งการสัมผัสลักษณะนี้เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาเชิงเส้น (linear) เนื่องจากพื้นที่หน้าสัมผัสจะไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างการให้ภาวะ ในขณะที่การสัมผัสแบบไม่มีการแยก (no separation) คือการที่ผิวสัมผัสทั้งสองสามารถเลื่อนได้โดยไม่มีแรงเสียดทาน แต่จะไม่แยกออกจากกันดังแสดงในรูปที่ 4.24

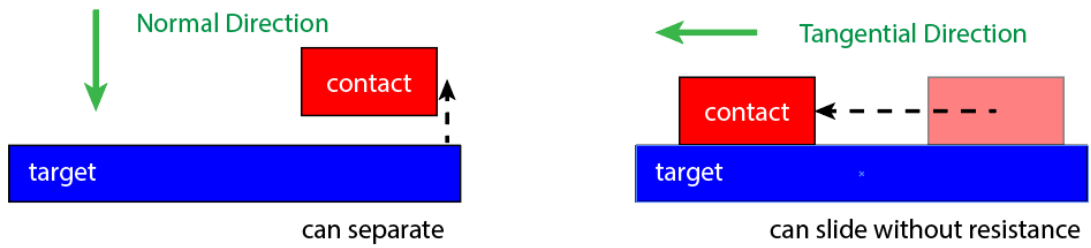


รูปที่ 4.23 การสัมผัสแบบยึดติด

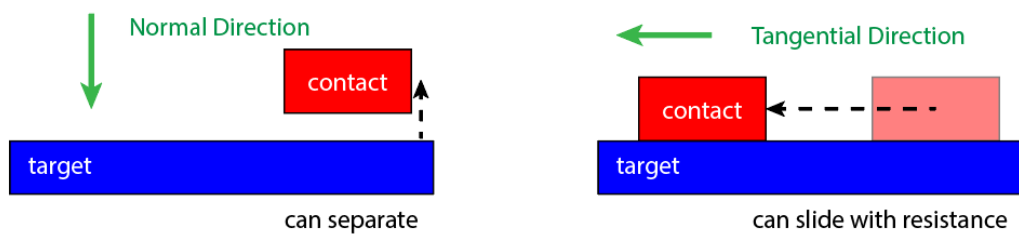


รูปที่ 4.24 การสัมผัสแบบไม่มีการแยก

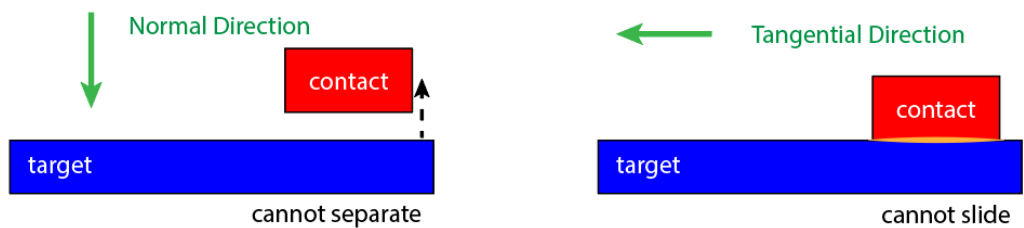
ในทางตรงข้ามหากมีการแยกตัวเกิดขึ้น และอาจก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างวัตถุทั้งสอง จึงทำให้การแก้ปัญหานี้ไม่เชิงเส้น (nonlinear) เนื่องจากผิวสัมผัสอาจเปลี่ยนแปลงเมื่อมีภาระมากระทำ การสัมผัสแบบไม่มีแรงเสียดทาน (frictionless) จะสมมติให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งช่วยให้เกิดการเลื่อนได้อย่างอิสระดังแสดงในรูปที่ 4.25 นอกจากนี้หากปัญหาดังกล่าวมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น การกำหนดการสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน (frictional) จะช่วยให้สองวัตถุที่สัมผัสกันสามารถรับแรงเสียดทานและยังคงอยู่กันได้จนถึงระดับหนึ่ง วัตถุสองชิ้นจะเริ่มเกิดการเลื่อนสัมพัทธ์กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และการสัมผัสลักษณะสุดท้ายคือแบบหยาบ (rough) ซึ่งสามารถแยกตัวได้ แต่จะไม่มี การเลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างสองผิวสัมผัสมีค่าเป็นอนันต์ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 การสัมผัสแบบไม่มีแรงเสียดทาน

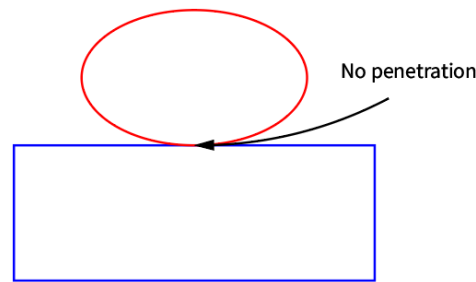


รูปที่ 4.26 การสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน



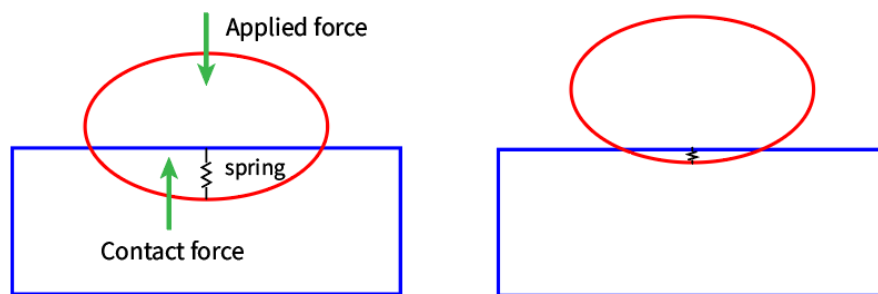
รูปที่ 4.27 การสัมผัสแบบหยาบ

ทฤษฎีการสัมผัสในโปรแกรม ANSYS มีวิธีพื้นฐานหลัก ๆ 2 วิธีคือ Lagrange based และ Penalty based ซึ่งทั้ง 2 วิธีจะมีความแตกต่างในเรื่องการมีปฏิสัมพันธ์กันของ 2 พื้นผิวสัมผัส สำหรับวิธี Lagrange based จุดสัมผัสของวัตถุหนึ่งจะไม่มี การเจาะ (penetration) เข้าไปในเนื้อของ อีกวัตถุหนึ่งดังแสดงรูปที่ 4.28 [40, 41]



รูปที่ 4.28 วิธี Lagrange based

ในขณะที่ Penalty based จะอนุญาตให้จุดสัมผัสของวัตถุหนึ่งสามารถเจาะเข้าไปในเนื้อของอีกวัตถุหนึ่งได้ แต่ในความเป็นจริงการสัมผัสจะไม่มี การเจาะเข้าไปเนื้อของวัตถุ จึงมีการสมมติสปริงเทียมดังแสดงในรูปที่ 4.29 เพื่อให้สปริงดึงกลับ เพื่อลดการเจาะให้มากที่สุดพอที่จะทำให้ผลลัพธ์ลู่เข้า



รูปที่ 4.29 วิธี Penalty based

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การหาอิทธิพลของตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตามสามารถทำได้โดยการหาสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐาน (standardize regression coefficient) ซึ่งเป็นการแปลงตัวแปรต้นและตัวแปรตามให้เป็นคะแนนมาตรฐาน (Z-score) ด้วยสมการ

$$z = \frac{x - \bar{x}}{S.D.} \quad (4.43)$$

โดย  $x$  คือข้อมูลดิบ  $\bar{x}$  คือค่าเฉลี่ยของข้อมูล  $S.D.$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ซึ่งเป็นกระบวนการทางสถิติใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม ( $y$ ) และตัวแปรต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ตัว ( $x_1, x_2, \dots, x_i$ ) แสดงด้วยสมการ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i \quad (4.44)$$

โดย  $\beta_0$  คือจุดตัดแกน  $y$  และ  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นนี้มีประโยชน์ในการพิจารณาว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อสิ่งที่เราสนใจ ตัวอย่างเช่น ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ภาระที่กระทำ เงื่อนไขขอบเขต อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งทำให้เข้าใจถึงสาเหตุหลักของปัญหานั้น และสามารถปรับปรุงแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นได้

### บทสรุป

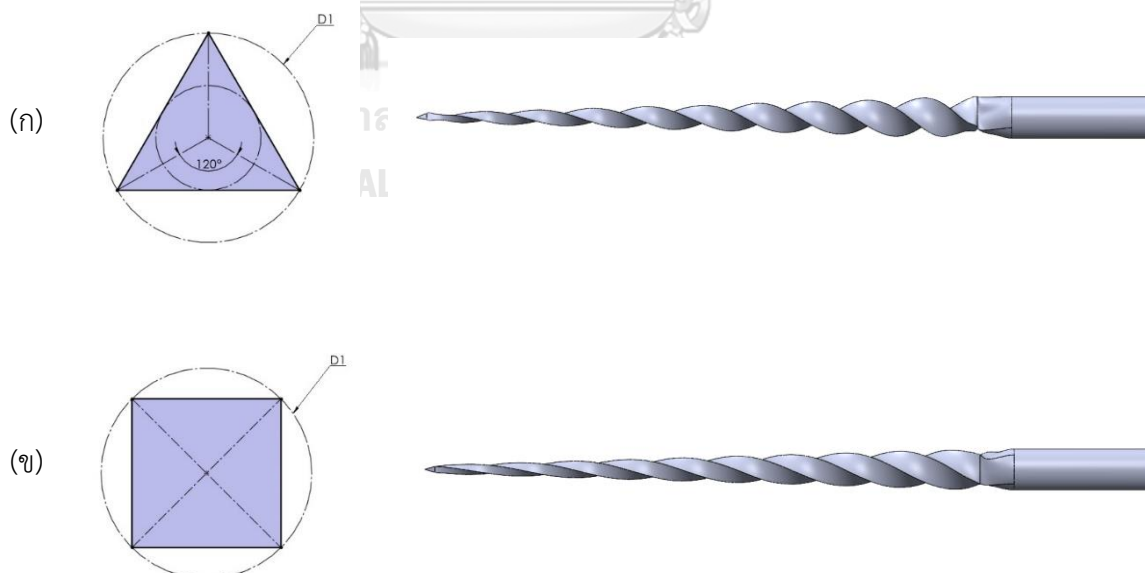
ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์วัฏจักรความล้าและอายุความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม เพื่อทำความเข้าใจและนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุที่ใช้ทำตะไบแบบหมุน โดยเริ่มจากการหาความเค้นและความเครียด ซึ่งเป็นพื้นฐานทางวิศวกรรมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และได้นำเสนอพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทต่างๆ โดยเฉพาะวัสดุ निकิลไทเทเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติยืดหยุ่นสูง และนำมาสู่การประยุกต์ใช้ทฤษฎีความล้ามาใช้อธิบายวัฏจักรความล้าและอายุความล้าของตะไบ

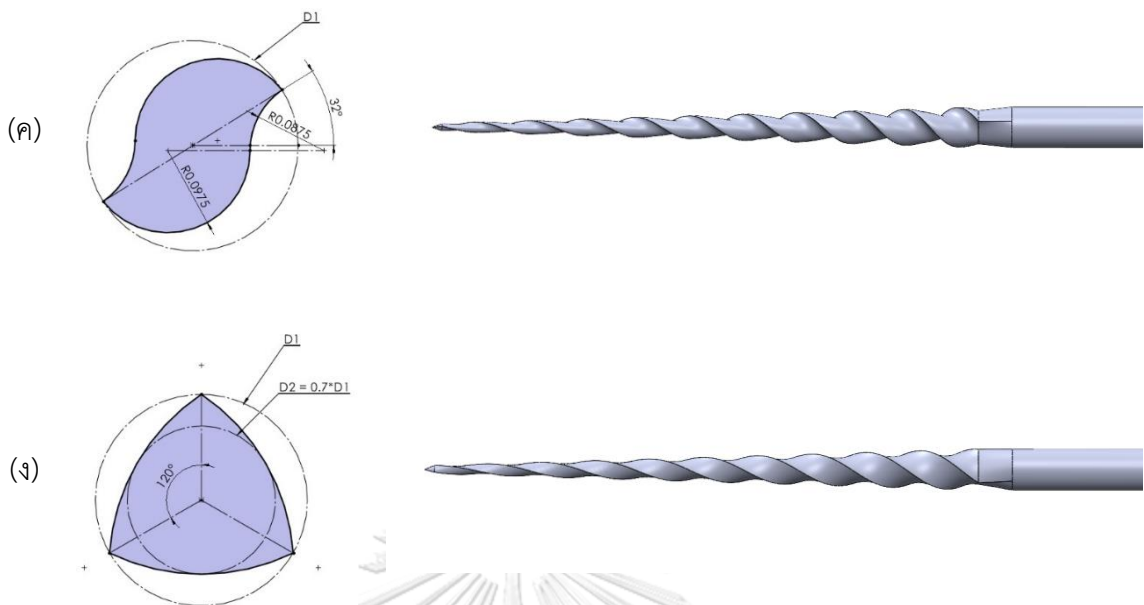
## บทที่ 5 การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมโดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองของตะไบและคลองรากฟัน รวมถึงวิธีการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของผลลัพธ์

### 5.1 การสร้างแบบจำลองหน้าตัดแบบต่าง ๆ

แบบจำลองถูกสร้างสำหรับหน้าตัดที่แตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งรูปแบบหน้าตัดที่สร้างขึ้นอ้างอิงมาจากรูปแบบหน้าตัดที่มีการใช้งานอยู่จริง [42-44] และได้สร้างแบบจำลองให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มม. taper 6% ส่วนมีคมยาว 16 มม. และส่วนไม่มีคมยาว 5 มม. โดยสามารถศึกษาวิธีการสร้างแบบละเอียดที่ภาคผนวก ก.





รูปที่ 5.1 รูปร่างหน้าตัดและแบบจำลองตะไบของตะไบแบบหมุนทั้ง 4 ประเภทที่ใช้ในการศึกษานี้

(ก) สามเหลี่ยมด้านเท่า .06/#25 (ข) สี่เหลี่ยมจัตุรัส .06/#25

(ค) รูปตัว S .06/#25 (ง) สามเหลี่ยมมุม .06/#25

## 5.2 ลักษณะของตะไบแบบหมุนและคลองรากฟันที่ใช้ศึกษา

สำหรับการศึกษาเพื่อหาอายุของตะไบโดยพิจารณาขณะที่ตะไบหมุนในคลองรากฟัน จำเป็นต้องมีการจำลองคลองรากฟันเพื่อเป็นเงื่อนไขขอบเขตให้ตะไบหมุนอยู่ในรูปร่างของแบบจำลองคลองรากฟันที่สร้างขึ้นอ้างอิงจากวิธีการวัดของ Pruett [19] ซึ่งมีพารามิเตอร์ 2 ค่าให้พิจารณาคือ มุมโค้ง ( $\theta$ ) และรัศมีโค้ง ( $r$ ) การเปลี่ยนแปลงขนาดของพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ช่วยให้สามารถพิจารณาคลองรากฟันที่มีรูปทรงแบบต่าง ๆ ได้โดยง่าย

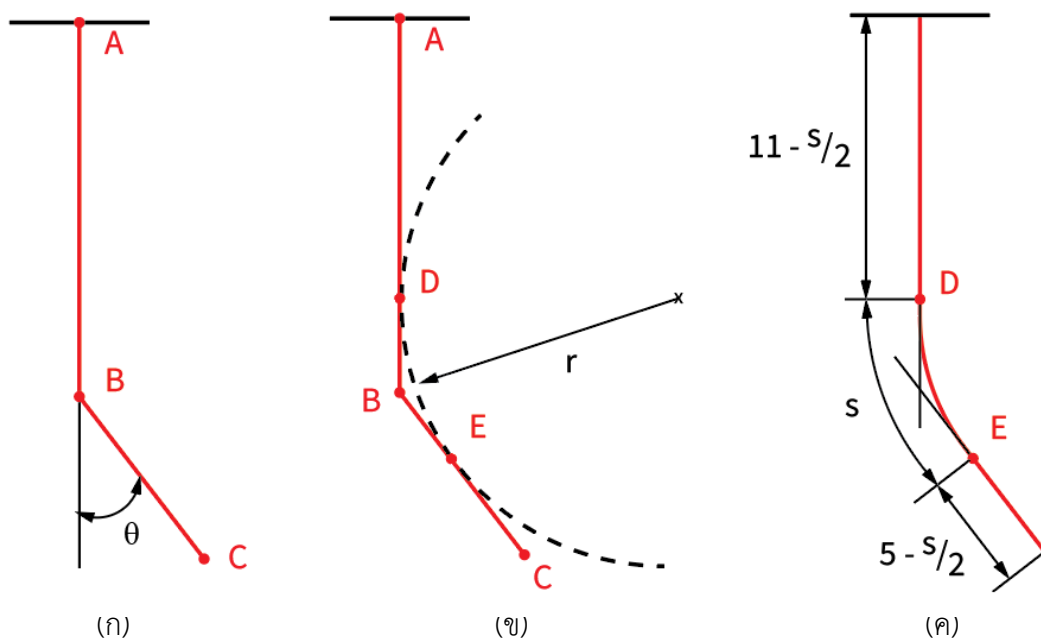
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคลองรากฟันเริ่มจากวาดส่วนของเส้นตรง AB ให้ตั้งฉากกับระนาบอ้างอิง จากนั้นวาดส่วนของเส้นตรง BC ให้ทำมุม  $\theta$  กับเส้นตรง AB ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก) และสร้างฟิลเลต (fillet) โดยการวาดวงกลมรัศมี  $r$  สัมผัสกับส่วนของเส้นตรง AB และส่วนของเส้นตรง BC ที่จุด D และ E ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ข) ซึ่งรัศมีของวงกลมจะตั้งฉากกับเส้นตรงนั้น ๆ ในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ต้องการให้จุดกึ่งกลางของส่วนโค้ง DE ของแบบจำลองคลองรากฟันทุกแบบที่ใช้ศึกษาอยู่ตำแหน่งเดียวกัน คือที่ตำแหน่ง  $D_5$  (ระยะห่างจากปลายตะไบ 5



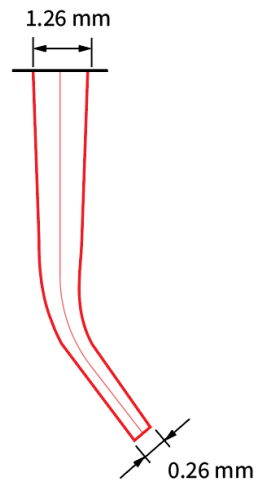
มม.) ดังนั้นเส้นตรง EC จึงมีขนาด  $5 - \frac{s}{2}$  เมื่อ  $s$  คือความยาวส่วนโค้ง ( $s = \theta r$ ) และต้องการให้ความยาวรวม ( $L$ ) มีขนาด 16 มม. จึงทำให้เส้นตรง AD มีขนาด  $11 - \frac{s}{2}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ค)

เมื่อได้เส้นกึ่งกลาง (centerline) สำหรับการสร้างคลองรากฟันแล้ว จึงดำเนินการสร้างพื้นผิวกรวยของรากฟันตามเส้นกึ่งกลาง โดยในการศึกษานี้กำหนดให้ทางเข้าของคลองรากฟันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.26 มม. และทางออกของคลองรากฟันมีขนาด 0.26 มม. [26] และให้ผนังคลองรากฟันมีความหนา 0.1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.3

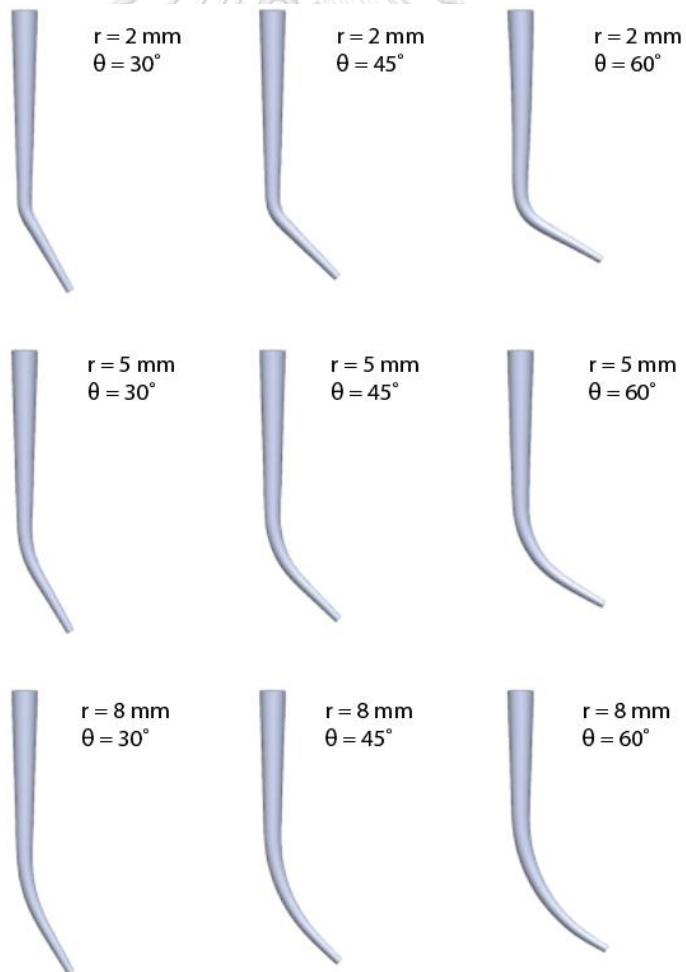
ในการศึกษานี้จะวิเคราะห์ผลของรูปร่างหน้าตัดและรูปร่างของคลองรากฟันที่ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในตะไบแบบหมุน โดยในการศึกษานี้จะกำหนดรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปร่างของคลองรากฟันที่แตกต่างกัน 9 แบบ [19] ได้แก่ คลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 2 มม. 5 มม. และ 8 มม. โดยมีคลองรากฟันที่มีมุมโค้ง 30 องศา 45 องศา และ 60 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยสามารถศึกษาวิธีการสร้างแบบละเอียดที่ภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.2 การสร้างแบบจำลองคลองรากฟัน



รูปที่ 5.3 นิยามพื้นผิวของแบบจำลองคลองรากฟัน



รูปที่ 5.4 แบบจำลองคลองรากฟันลักษณะต่าง ๆ

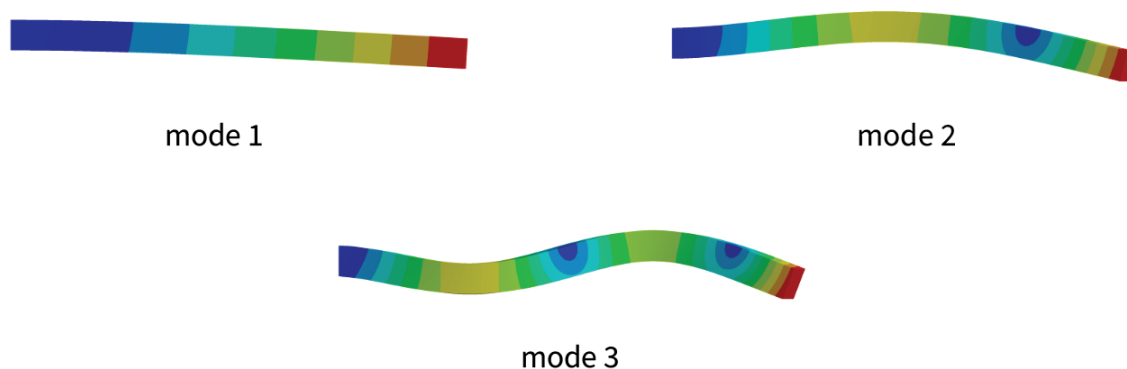
### 5.3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตะไบแบบหมุน

ตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมที่ใช้ในขั้นตอนการรักษาคลองรากฟันมักจะต้องรับภาระทางกลในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น การตัดงอ หรือการบิด ซึ่งทำให้ตะไบเกิดการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนนี้เป็นปรากฏการณ์สำคัญที่อาจนำไปสู่ความเสียหายเนื่องจากความถี่ที่ใช้งานอาจตรงกับความถี่ธรรมชาติของตะไบจนเกิดการสั่นพ้อง (resonance) ดังนั้น การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของตะไบจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องทำเพื่อให้มั่นใจถึงการใช้งานที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในระหว่างการรักษา

การวิเคราะห์โหมดัล (modal analysis) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวัตถุที่รับแรงสั่นสะเทือนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) หรือรูปแบบการสั่น (mode shape) การวิเคราะห์โหมดัลนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจการสั่นของตะไบแบบหมุน และสามารถช่วยปรับปรุงพัฒนาตะไบให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานอย่างปลอดภัยระหว่างการรักษา

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของคานแบบตัดโค้ง โดยใช้สมการที่ 33 ในการหาความถี่ธรรมชาติของเพลตตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวด้านละ 2 มม. ใน mode ที่ 1, 2 และ 3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 1809 Hz, 11342 Hz และ 31746 Hz ตามลำดับ และเมื่อใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์แต่ละโหมด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 1811 Hz, 11122 Hz และ 30212 Hz ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถยืนยันความถูกต้องของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

จากนั้นนำตะไบหน้าตัดต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษามาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในลักษณะเดียวกัน พบว่าสำหรับหน้าตัดทั้ง 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม มีความถี่ธรรมชาติในโหมดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยสำหรับตะไบแบบหมุนลักษณะนี้ จะมีความเร็วรอบที่ใช้งานอยู่ที่ 250 ถึง 500 rpm หรือ 4.2 ถึง 8.3 Hz จะเห็นได้ชัดว่าความถี่ในการทำงานจริงของตะไบแบบหมุนห่างจากความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 อย่างมาก ดังนั้นจึงไม่เกิดการสั่นพ้องขึ้น



รูปที่ 5.5 การสั่นสะเทือนของคานแบบดัดโค้งในโหมดต่าง ๆ

ตารางที่ 5.1 ความถี่ธรรมชาติในโหมดต่าง ๆ ของตะโบแบบหมุน

|                    | โหมดที่ 1 (Hz) | โหมดที่ 2 (Hz) | โหมดที่ 3 (Hz) |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| สามเหลี่ยมด้านเท่า | 1819           | 5130           | 10114          |
| สี่เหลี่ยมจัตุรัส  | 1960           | 5364           | 10872          |
| สามเหลี่ยมมุม      | 1955           | 5362           | 10868          |
| รูปตัว S           | 1783           | 4927           | 9756           |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 5.4 วิธีการตรวจสอบผลความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการตรวจสอบความถูกต้องจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้โดยการเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับผลลัพธ์ที่ได้จากผลเฉลย (closed form solution) ของปัญหาลักษณะเดียวกัน โดยในการศึกษานี้เป็นการนำตะโบสอดเข้าไปในคลองรากฟันเทียมที่มีลักษณะโค้งงอ ทำให้ตะโบที่สอดเข้าไปต้องเสียรูปและโค้งไปตามลักษณะของคลองรากฟัน

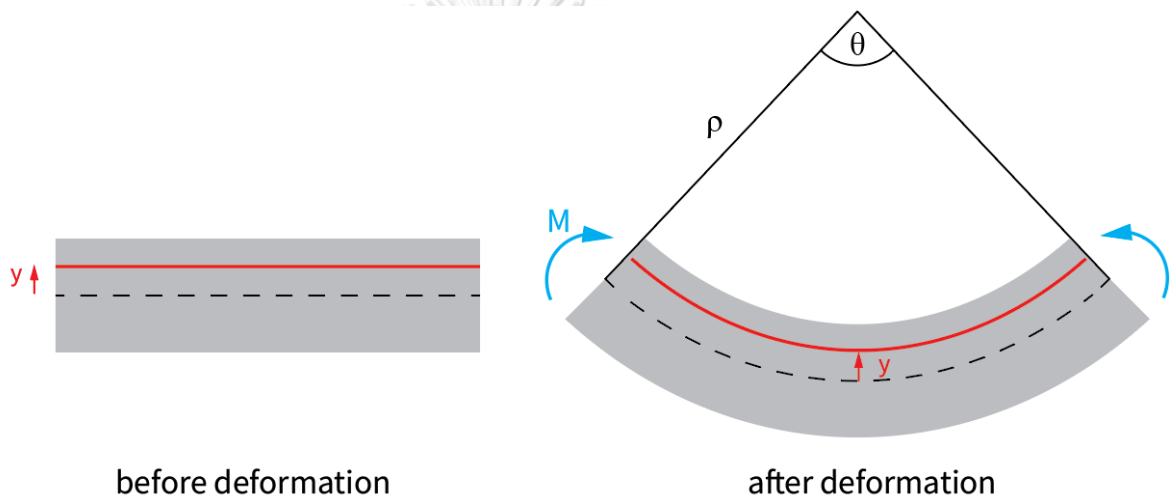
เมื่อพิจารณาคานตรงที่มีหน้าตัดคงที่ (Prismatic beam) ที่ได้รับโมเมนต์ดัดแนวตั้งฉากกับแกนสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 5.6 จะทำให้คานเสียรูปไปจากเดิม โดยโมเมนต์ดัดนี้ทำให้วัสดุภายในส่วนล่างของคานยืดออกและวัสดุภายในส่วนบนถูกบีบอัด เมื่อพิจารณาความเครียดจากพฤติกรรมดังกล่าวจะได้ว่า

$$\varepsilon = -\frac{y}{\rho} \quad (45)$$

โดยความโค้งของคานที่เกิดการเสียรูปเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมรัศมี ( $\rho$ ) และความเค้นสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามสมการที่ 26 ดังนั้นจะได้ว่า

$$\sigma = -E \frac{y}{\rho} \quad (46)$$

ดังนั้น วิธีการตรวจสอบความเค้นนั้นจะทำได้โดยการนำคานตรงหน้าตัดคงที่มาสอดเข้าไปในช่องที่มีลักษณะโค้ง สร้างขึ้นเพื่อให้คานดังกล่าวเกิดการเสียรูปไปตามรูปร่างที่ต้องการ



before deformation

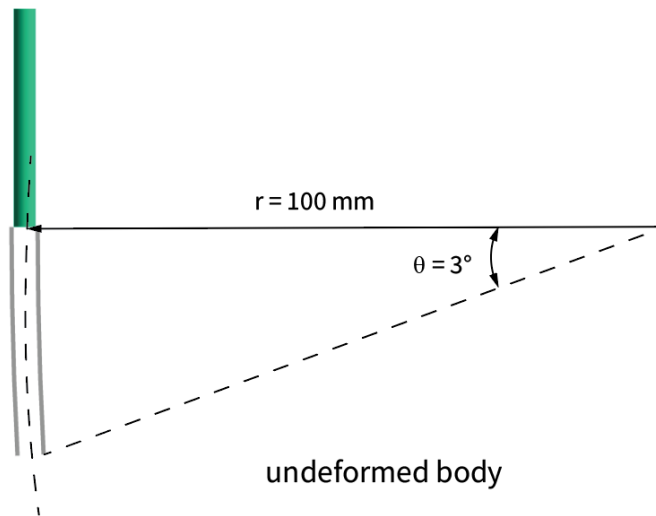
after deformation

รูปที่ 5.6 คานตรงรับโมเมนต์ ( $M$ )

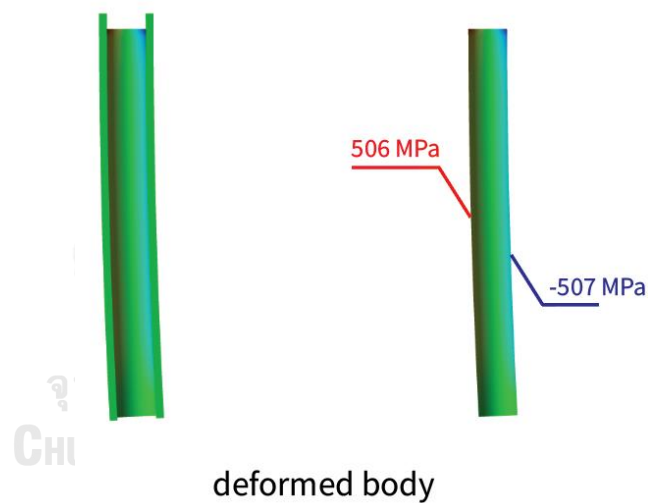
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดำเนินการโดยการนำเพลากลม หน้าตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มม. ยาว 5 มม. สอดเข้าไปในผนังโค้ง 2 ด้านที่มีรัศมีโค้ง 100 มม. และมีมุมโค้ง 3 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ทั้งนี้ได้กำหนดองศาที่น้อยเพื่อให้เกิด small deformation ทำให้สามารถเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่กล่าวมาข้างต้นได้ จากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่า 506 MPa ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และจากสมการ 44 คำนวณได้ 500 MPa จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธีดังกล่าวมีความถูกต้อง ดังนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์กับตะไบแบบหมุนต่อไป



รูปที่ 5.7 การตรวจสอบผลความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

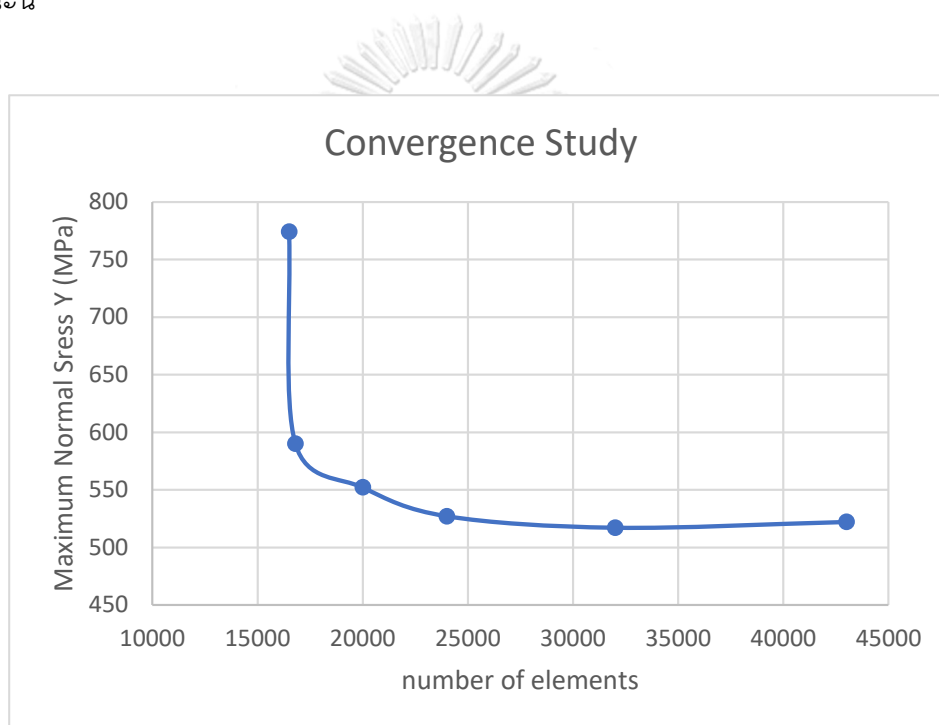


รูปที่ 5.8 ความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 5.5 การวิเคราะห์การลู่เข้าของผลลัพธ์

ผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะขึ้นอยู่กับขนาดของเอลิเมนต์ หากเอลิเมนต์มีคุณภาพมากพอผลลัพธ์ที่ได้จะมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ การที่จะยืนยันคุณภาพเอลิเมนต์นั้นทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมคือการศึกษาค่าการลู่เข้าของผลลัพธ์ (convergence study) หรือการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับความหนาแน่นของเอลิเมนต์ (element density) โดยทั่วไป การศึกษาค่าการลู่เข้าของผลลัพธ์จะเริ่มจากการ

กำหนดบริเวณที่เราต้องการวิเคราะห์ ซึ่งอาจเป็นทั้งหมดหรือแค่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของแบบจำลอง ต่อมาจึงวิเคราะห์หาผลลัพธ์ (เช่น ความเค้น) ที่ได้จากเอลิเมนต์ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ จากนั้นลองเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์ โดยไม่ต้องเปลี่ยนประเภทเอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ จากรูปที่ 5.9 จะพบว่าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ไม่ขึ้นกับจำนวนเอลิเมนต์ (mesh independence) และคือผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้เลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 43000 เอลิเมนต์ หรือมีขนาดของเอลิเมนต์ 0.1 มม. ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือและไม่ขึ้นต่อจำนวนเอลิเมนต์ เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในปัญหาลักษณะนี้



รูปที่ 5.9 การวิเคราะห์การลู่เข้าของผลลัพธ์

## 5.6 กำหนดเงื่อนไขภาระ และเงื่อนไขขอบเขต

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษานี้ คือโปรแกรมแอนซิส (ANSYS Workbench 2022 R2) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรมหดงกล่าวสามารถใช้ได้กับงานหลาย ๆ ประเภท ได้แก่ การวิเคราะห์พฤติกรรมของไหล (fluid mechanic, CFD) การวิเคราะห์พฤติกรรมของแข็ง (structural mechanics) และการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้สนใจด้านการวิเคราะห์พฤติกรรมของแข็ง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การตอบสนองของชิ้นงานเมื่อได้รับ

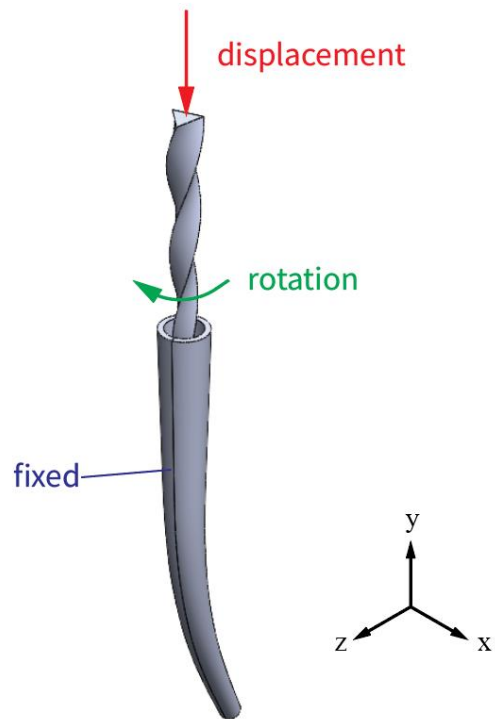
ภาระต่าง ๆ เช่น การเสียรูปที่เกิดขึ้น ความเค้นที่ชิ้นงานได้รับ การสั่นสะเทือนเมื่อได้รับแรงกระตุ้น เป็นต้น

การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นในตะไบแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการสอดตะไบเข้าไปในคลองรากฟัน และขั้นตอนการหมุนตะไบเพื่อจำลองการทำงานของตะไบภายในคลองรากฟัน โดยเริ่มจากกำหนดคุณสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลองตะไบและคลองรากฟัน ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดวัสดุของตะไบเป็นนิกเกิลไทเทเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลตามตารางที่ 4.1 และกำหนดวัสดุของคลองรากฟันเป็นเหล็ก โดยให้ผนังด้านในยึดติดอยู่กับที่ (fixed) ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จึงเปรียบเสมือนว่าคลองรากฟันเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body)

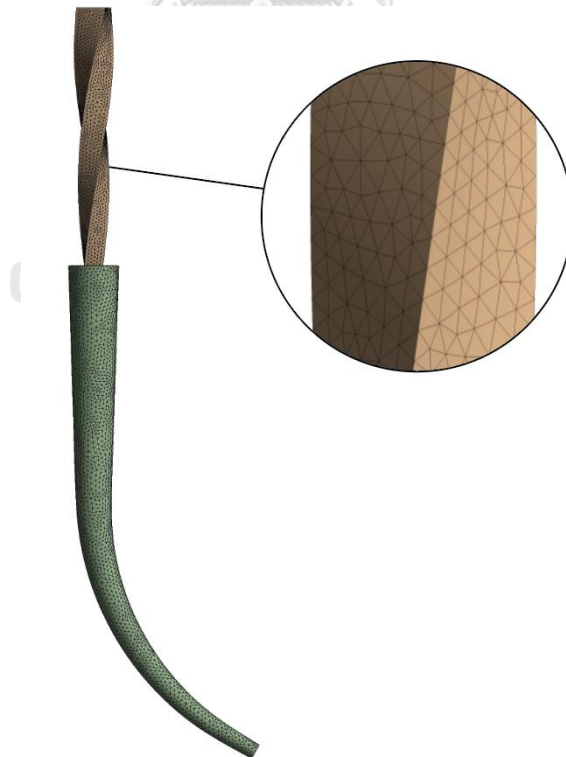
การสัมผัสกันระหว่างตะไบกับผนังคลองรากฟันจะถูกกำหนดให้ไม่มีแรงเสียดทาน ซึ่งเป็นการสมมติให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ตะไบสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยใช้วิธี Normal Lagrange ในการคำนวณ เนื่องจากวิธีนี้เหมาะสำหรับปัญหาที่สมบัติวัสดุไม่เป็นเชิงเส้น และมีการสัมผัสที่มุมหรือขอบ นอกจากนี้ผลลัพธ์ยังมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ได้เปิดฟังก์ชันการเสียรูปมาก เพื่อให้ซอฟต์แวร์สามารถวิเคราะห์การโก่งตัวมากที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อตะไบสอดเข้าไปในคลองรากฟันที่มีลักษณะโค้งได้แม่นยำมากขึ้น และได้ใช้เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (SOLID187) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งเหมาะสำหรับแบบจำลองที่มีรูปร่างซับซ้อนอย่างตะไบแบบหมุน

ในขั้นตอนแรกซึ่งเป็นการสอดตะไบเข้าไปในคลองรากฟัน จะให้การเคลื่อนที่แก่ตัวตะไบบริเวณโคนของตะไบดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ก) โดยกำหนดให้ตะไบเคลื่อนที่ลงไปภายในคลองรากฟันตามแกน  $y$  (แนวตั้ง) และจำกัดการเคลื่อนที่ในแกน  $x$ ,  $z$  และการหมุนในทุกทิศทาง จากนั้นตะไบจะค่อย ๆ เคลื่อนที่ลงไปชนกับผนังคลองรากฟันแล้วงอไปตามความโค้ง จนทำให้ตะไบได้รับความเค้นและความเครียด ซึ่งขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดเมื่อปลายตะไบเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งปลายของคลองรากฟันแล้ว จากนั้นในขั้นตอนการหมุน ตะไบจะถูกหมุนไป 360 องศารอบแกน  $y$  ดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ข) ส่วนการเคลื่อนที่อื่น ๆ จะถูกจำกัดไว้ (การหมุนรอบแกน  $x$ ,  $z$  และการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง) เพื่อหาความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะตะไบหมุนภายในคลองรากฟัน โดยสามารถศึกษาวิธีการตั้งค่าแบบละเอียดที่ภาคผนวก ค.

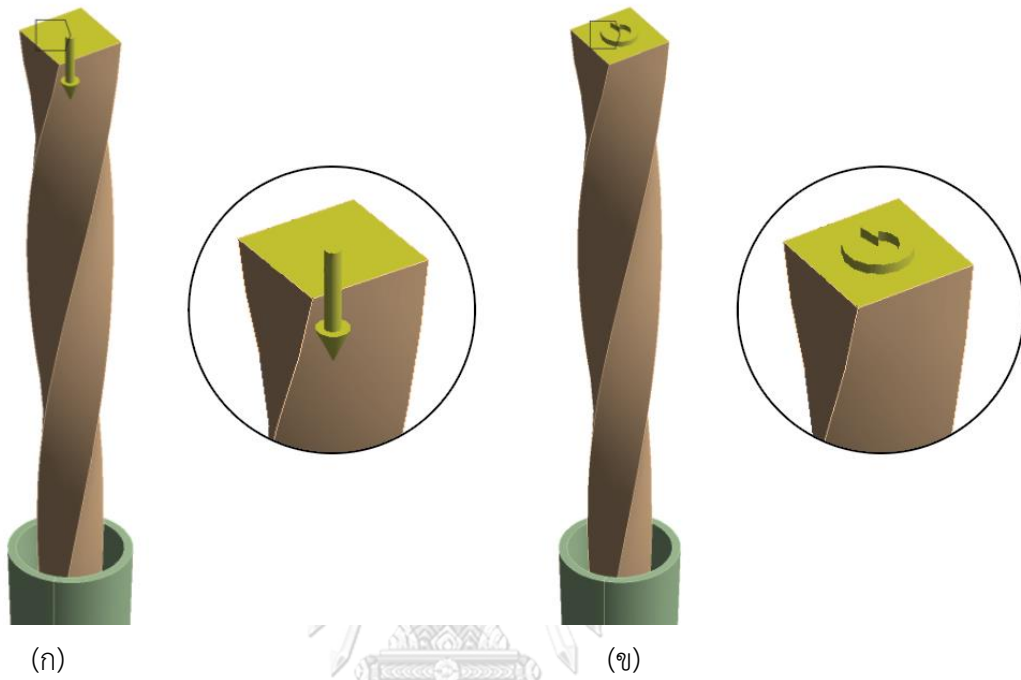




รูปที่ 5.10 การกำหนดเงื่อนไขการกระและเงื่อนไขขอบเขตของการศึกษา



รูปที่ 5.11 การแบ่งเอลิเมนต์



รูปที่ 5.12 การกำหนดเงื่อนไขภาระ (ก) ระบุการเคลื่อนที่ลงในทิศ  $y$   
 (ข) ระบุการหมุนรอบแกน  $y$

## บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของตะไบแบบหมุน

การวิเคราะห์วัฏจักรความล้า (cyclic fatigue) ของตะไบแบบหมุนเป็นการศึกษาที่สำคัญ เนื่องจากตะไบแบบหมุนรับภาระความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ตลอดระยะเวลาการใช้งาน ทำให้ความเสียหายประเภทหนึ่งของตะไบมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่ การวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ช่วยในการคำนวณ (CAE) จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมทางกลของตะไบที่ทำจากวัสดุเหล็กไทเทเนียม และมีหน้าตัดที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขภาระต่าง ๆ ได้ อีกทั้งตะไบยังมีความซับซ้อนของรูปร่างและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ ทำให้เกิดความเค้นและความเครียดที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งสามารถนำไปสู่ความเสียหายล้าที่อาจเกิดขึ้นได้แม้ตะไบจะรับภาระไม่มากก็ตาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีศึกษาวัฏจักรความล้าของตะไบแบบหมุนเกี่ยวกับองค์ประกอบความเค้นและความเครียดที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกลของตะไบ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงอิทธิพลของรูปร่างหน้าตัดและลักษณะคลองรากฟันที่ส่งผลต่อวัฏจักรความล้าของตะไบ ความเข้าใจนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงการออกแบบตะไบให้มีความแข็งแรงและความน่าเชื่อถือมากขึ้น

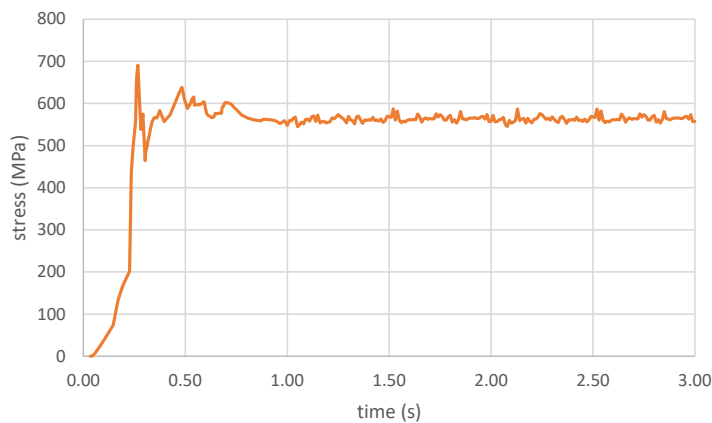
### 6.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบความเค้นและความเครียด

ในส่วนแรกของการวิเคราะห์นี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ความเค้น von Mises ซึ่งเป็นความเค้นที่แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการทำงานของตะไบแบบหมุนภายในคลองรากฟัน ดังแสดงในสมการ

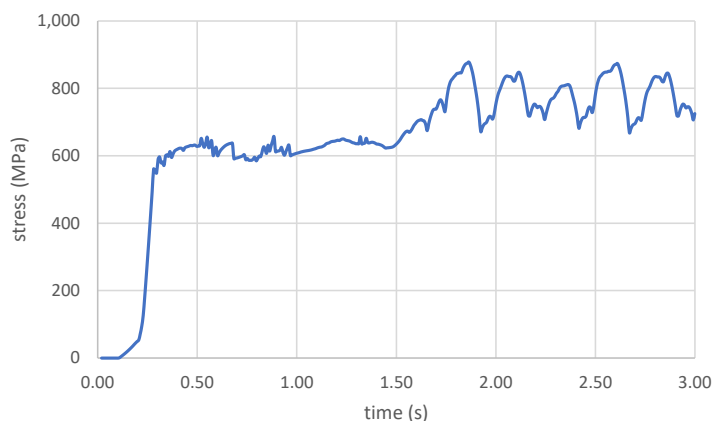
$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (6.1)$$

ซึ่งพบว่าพฤติกรรมความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ ความเค้นค่อนข้างคงที่ และความเค้นไม่คงที่ ตัวอย่างพฤติกรรมของความเค้นที่มีค่าค่อนข้างคงที่แสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความเค้น von Mises สูงสุดที่เวลาต่าง ๆ ของตะไบแบบหมุนหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ทำงานในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 8 มม. และมุมโค้ง 60 องศา จะสังเกตเห็นว่าในช่วงแรก (วินาทีที่ 0 ถึง 1) ซึ่งเป็นช่วงที่ตะไบสอดเข้าไปในคลองรากฟัน เมื่อตะไบเริ่มเคลื่อนที่ลงไปจนสัมผัสกับผนังคลองรากฟันจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น และเมื่อสอดตะไบเข้าไปลึกขึ้น ความเค้นจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งปลายตะไบเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งปลายของคลองรากฟัน จากนั้นในช่วงการหมุน (วินาทีที่ 1 ถึง 3) ความเค้นที่เกิดขึ้นตลอดช่วงนี้จะค่อนข้างคงที่ ซึ่งความเค้นจะขึ้นอยู่กับทิศการวางตัวของ

หน้าตัดนั้น ๆ เนื่องจากการวางตัวที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ระยะตั้งฉากจากแกนสะเทิน ( $y$ ) และ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนสะเทิน ( $I$ ) เปลี่ยนแปลงไป แต่จากกราฟในช่วงการ หมุนจะเห็นว่าความเค้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 8%) เนื่องจากคุณสมบัติวัสดุของ นิกเกิลไทเทเนียมตามแสดงในรูปที่ 4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่อยู่ในช่วง 490 MPa ถึง 630 MPa หรือช่วงการเปลี่ยนแปลงเฟสจะมีค่าไม่สูง ในขณะที่รูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความ เค้น von mises สูงสุดของตะไบแบบหมุนหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ทำงานในคลองรากฟันที่มีรัศมี โค้ง 2 มม. และมุมโค้ง 60 องศา แสดงลักษณะพฤติกรรมของความเค้นไม่คงที่ในช่วงตะไบหมุนจะมี ความเค้นเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด (ประมาณ 45%) เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่ อยู่ในช่วงเกิน 630 MPa จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แม้ความเครียดจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 6.1 ผลความเค้น von mises สูงสุด ณ เวลาใด ๆ ของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้งขนาด 8 มม. และมุมโค้ง 60 องศา



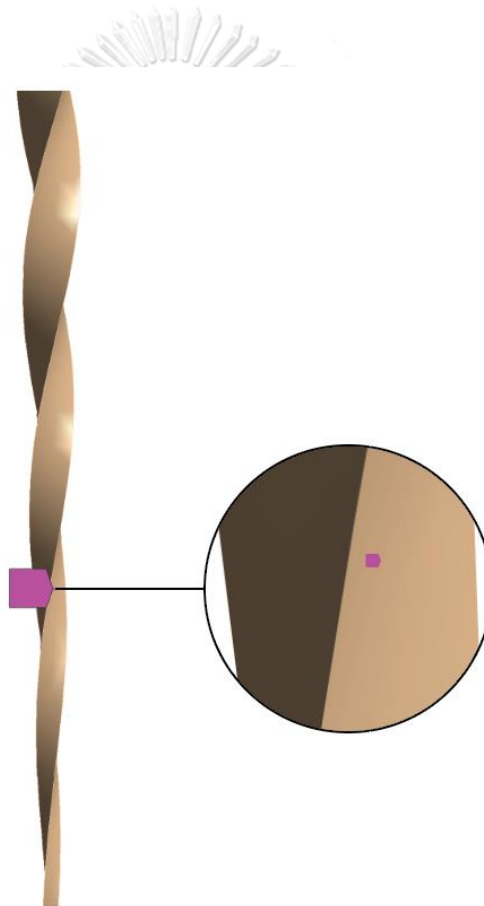
รูปที่ 6.2 ผลความเค้น von mises สูงสุด ณ เวลาใด ๆ ของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้งขนาด 2 มม. และมุมโค้ง 60 องศา

อีกหนึ่งประเด็นสำคัญของการศึกษานี้คือการวิเคราะห์องค์ประกอบความเค้นและความเครียดของตะไบที่เกิดขึ้นขณะสอดเข้าไปในคลองรากฟันแล้วหมุน ซึ่งทำให้ทราบถึงประเภทภาระที่เกิดขึ้นภายในตะไบ หากสังเกตพบว่ามียังองค์ประกอบเพียงองค์ประกอบเดียวที่โดดเด่น ในขณะที่ยังองค์ประกอบอื่น ๆ มีค่าที่น้อยกว่าอย่างมาก จะสามารถสมมติว่าปัญหานี้เป็นปัญหาความเค้นแกนเดียว (uniaxial stress) แต่หากความเค้นหรือความเครียดที่เกิดขึ้นมีหลายองค์ประกอบที่โดดเด่น จะถือว่าปัญหานี้เป็นปัญหาความเค้นหลายแกน (multiaxial stress) ดังนั้น การที่ปัญหามีความเค้นแกนเดียวทำให้การวิเคราะห์วัฏจักรความล้าง่ายขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ความล้าส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับความเค้นทิศทางเดียว

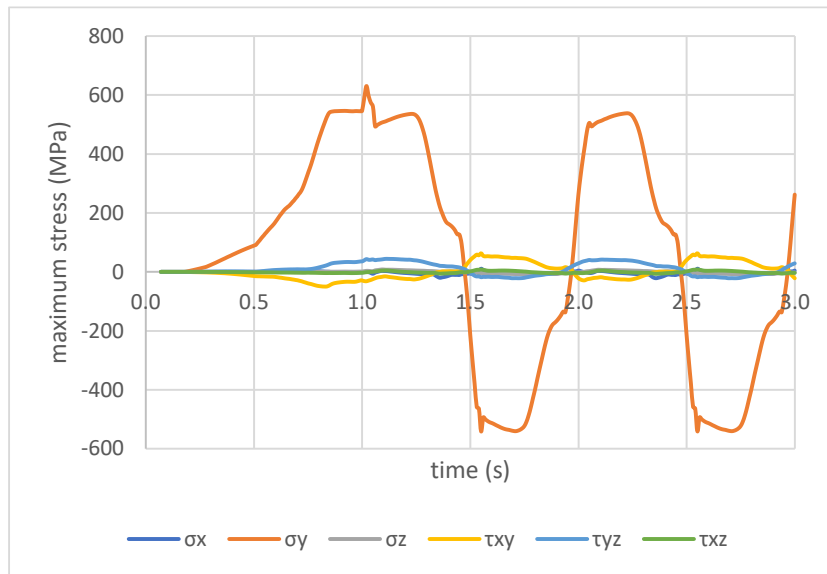
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอองค์ประกอบความเค้นและความเครียดทั้ง 6 องค์ประกอบของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่าที่สอดเข้าไปในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศาแล้วหมุน เพื่อหาความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทิศทางการวางตัวของหน้าตัดเปลี่ยนไปขณะตะไบหมุนภายในคลองรากฟัน เมื่อพิจารณาจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.3 ผลการศึกษาพบว่าในช่วงแรก (วินาทีที่ 0 ถึง 1) ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีเพียงองค์ประกอบเดียวที่มีค่าโดดเด่น คือความเค้นตั้งฉากในทิศ  $y$  ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากตะไบค่อย ๆ เกิดการเสีรูปไปตามความโค้งของคลองรากฟัน และในช่วงที่ตะไบหมุน (วินาทีที่ 1 ถึง 3) ความเค้นตั้งฉากในทิศ  $y$  จะมีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์มีค่าตั้งแต่ 630 ถึง -541 MPa ในขณะที่ความเค้นองค์ประกอบอื่น ๆ (ความเค้นตั้งฉากในทิศ  $x$  และทิศ  $z$  และความเค้นเฉือนในระนาบ  $x-y$ ,  $x-z$  และ  $y-z$ ) มีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับความเค้นตั้งฉากในทิศ  $y$  ดังแสดงในรูปที่ 6.4

ในทำนองเดียวกันความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นก็มีเพียงองค์ประกอบเดียวที่มีค่าโดดเด่น คือความเครียดตั้งฉากในทิศ  $y$  ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์มีค่าตั้งแต่ 4% ถึง -3.9% ในขณะที่ความเครียดที่เหลือ (ความเครียดตั้งฉากในทิศ  $x$  และทิศ  $z$  และความเครียดเฉือนในระนาบ  $x-y$ ,  $x-z$  และ  $y-z$ ) มีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับความเครียดตั้งฉากในทิศ  $y$  ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ดังนั้นจึงสามารถสมมติให้ปัญหาตะไบสอดเข้าไปในคลองรากฟันแล้วหมุนเป็นปัญหาภาระแกนเดียว การจำลองให้ตะไบมีการหมุนในลักษณะนี้ต่างจากการจำลองโดยการสอดตะไบเข้าไปในคลองรากฟันอย่างเดียวโดยไม่หมุน และการให้แรงที่ปลายตะไบให้ตะไบเกิดการเสีรูปไป กล่าวคือการจำลองทั้ง 2 ลักษณะไม่ทำให้เห็นวัฏจักรล้าของตะไบ ต่างจากการจำลองให้ตะไบสอดเข้าไปแล้วหมุนซึ่งสามารถเห็นวัฏจักรความล้าเป็นคาบได้ และสามารถนำแอมพลิจูดความล้าไปประเมินอายุความล้าต่อไปได้

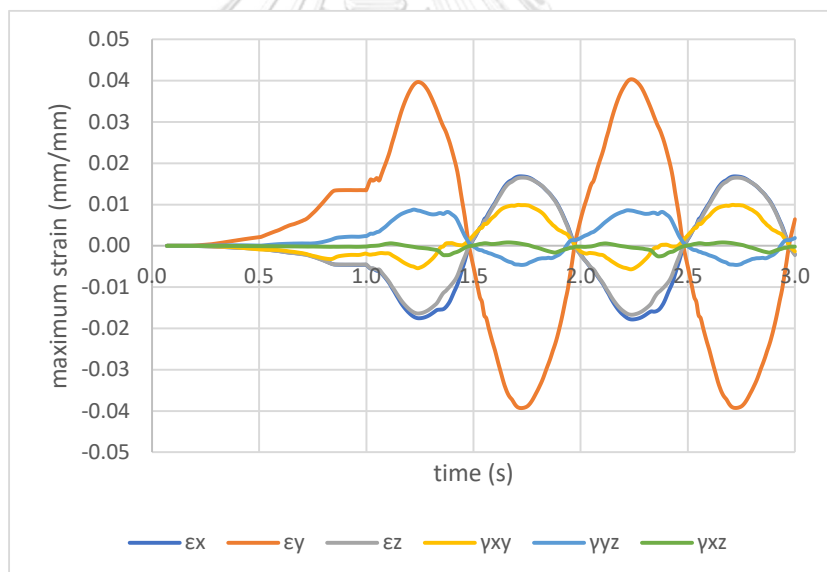
การทำความเข้าใจวัฏจักรความล้าในปัญหาลักษณะนี้เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งในการวิเคราะห์และประเมินอายุล้าของตะใบ โดยทั่วไปในการประเมินอายุล้าจะใช้ S-N curve หรือ  $\epsilon$ -N curve ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับใช้ในปัญหาภาระแกนเดียว อย่างไรก็ตาม หากภาระที่เกิดขึ้นเป็นแบบหลายแกนข้อมูล S-N curve หรือ  $\epsilon$ -N curve ของการทดสอบวัสดุโดยให้ภาระแกนเดียวจะไม่เพียงพอต่อการประเมินอายุล้า และอาจจำเป็นต้องใช้วิธีการประเมินที่ซับซ้อนขึ้น ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้ไม่เพียงแต่เพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมความเค้นและความเครียดเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของตะใบในการใช้งานจริง



รูปที่ 6.3 จุดบนตะใบแบบหมุนที่เกิดความเค้นสูงสุดตลอดการจำลอง



รูปที่ 6.4 องค์ประกอบความเค้นสูงสุด



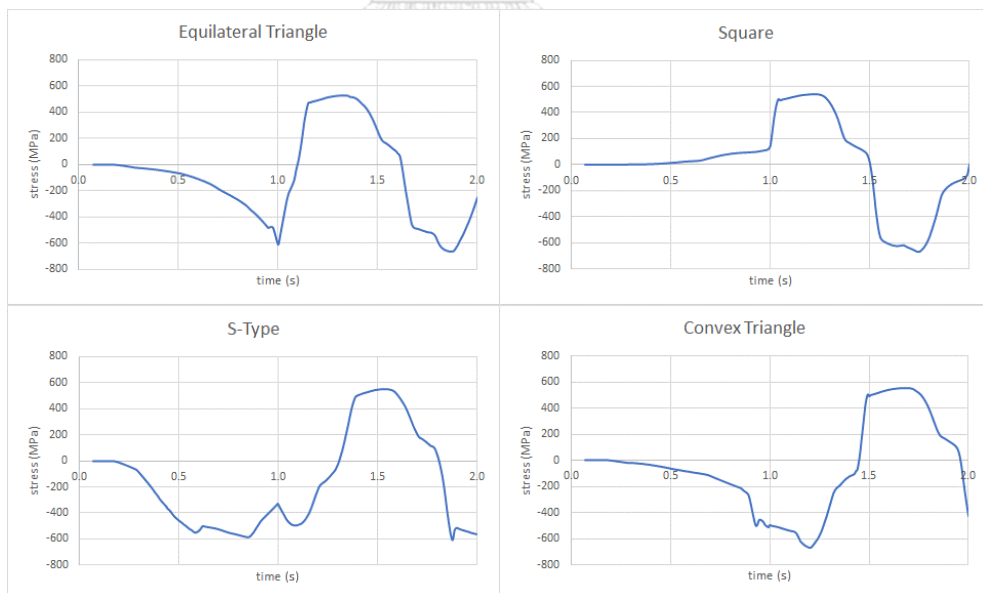
รูปที่ 6.5 องค์ประกอบความเครียดสูงสุด

## 6.2 ผลการวิเคราะห์แอมพลิจูดความเค้นและความเครียด

ในส่วนนี้วิเคราะห์ความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะสอดตะไบเข้าไปในคลองรากฟันแล้วหมุนของตะไบทั้ง 4 หน้าตัดในแบบจำลองคลองรากฟันที่แตกต่างกันทั้งหมด 9 แบบ โดยการพิจารณาค่าความเค้นและความเครียดของจุดต่อ เพื่อใช้ในการคำนวณหาแอมพลิจูดของวัฏจักรความ

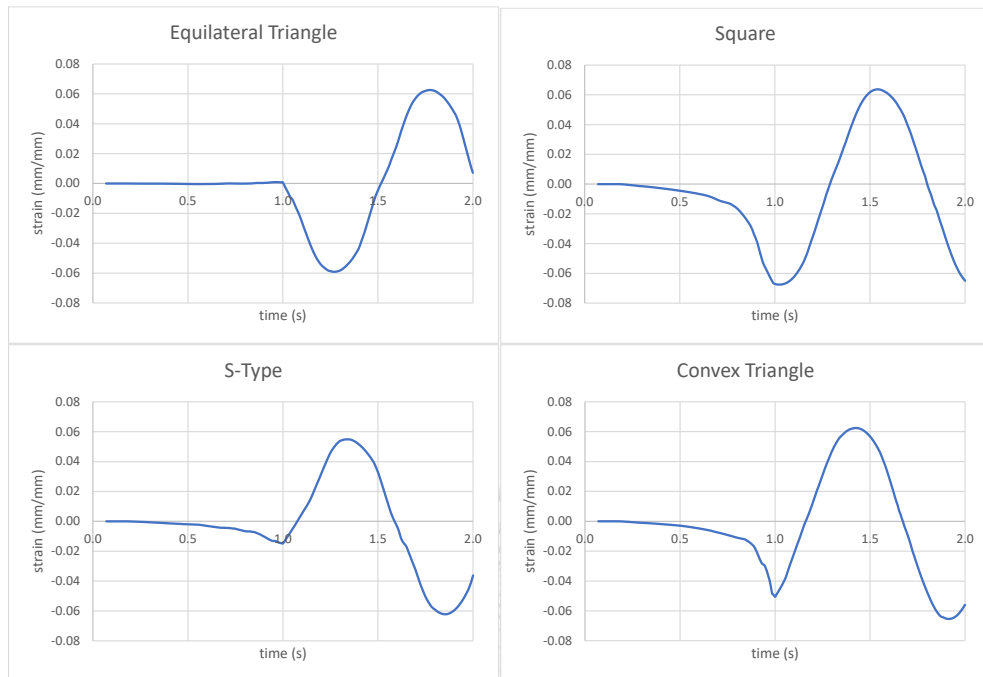
ถ้า จากรูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าวัฏจักรความล้าที่เกิดขึ้นเมื่อตะไบหมุนจะมีลักษณะเป็นรูปไซน์ (วินาทีที่ 1 ถึง 2) เหมือนกันทั้ง 4 หน้าตัด จะเห็นว่าพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดในช่วงแรก (วินาทีที่ 0 ถึง 1) จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดต่อที่พิจารณา หากจุดต่อดังกล่าวอยู่บริเวณแกนสะเทินของตะไบพอดีก้จะทำให้ความเค้นและความเครียดในช่วงสอดตะไบมีค่าใกล้ศูนย์ และเมื่อตะไบหมุนไป จึงทำให้จุดต่อดังกล่าวรับแรงดึงและแรงกดสลับกันไปมาจนเป็นวัฏจักร

กระบวนการวิเคราะห์แอมพลิจูดความเค้นเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์หาจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{\max}$ ) และความเค้นต่ำสุด ( $\sigma_{\min}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.8 แล้วนำมาหาแอมพลิจูดของทั้งสองจุดดังกล่าว เพื่อดูว่าแอมพลิจูดของจุดใดมีค่ามากกว่า แล้วเลือกแอมพลิจูดของจุดต่อที่มีค่ามากกว่ามาเป็นแอมพลิจูดของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนตะไบมาใช้ โดยเรียกแอมพลิจูดนี้ว่าแอมพลิจูดความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{\text{amp}}^{\text{node}}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 6.1 ในขณะที่การวิเคราะห์ความเครียดทำในลักษณะเดียวกันคือหาแอมพลิจูดที่มีค่ามากที่สุดระหว่างแอมพลิจูดของจุดต่อที่มีความเครียดสูงสุด ( $\varepsilon_{\max}$ ) และความเครียดต่ำสุด ( $\varepsilon_{\min}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.9 และเรียกแอมพลิจูดนี้ว่าแอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\varepsilon_{\text{amp}}^{\text{node}}$ ) ดังแสดงตารางที่ 6.2

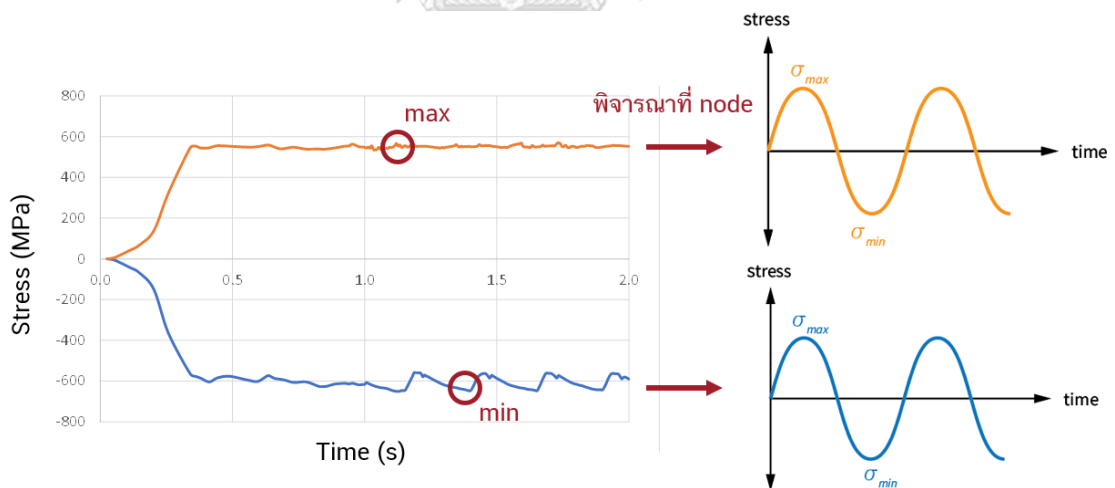


รูปที่ 6.6 วัฏจักรความล้าของจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุดในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุนภายในคลองรอกฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา

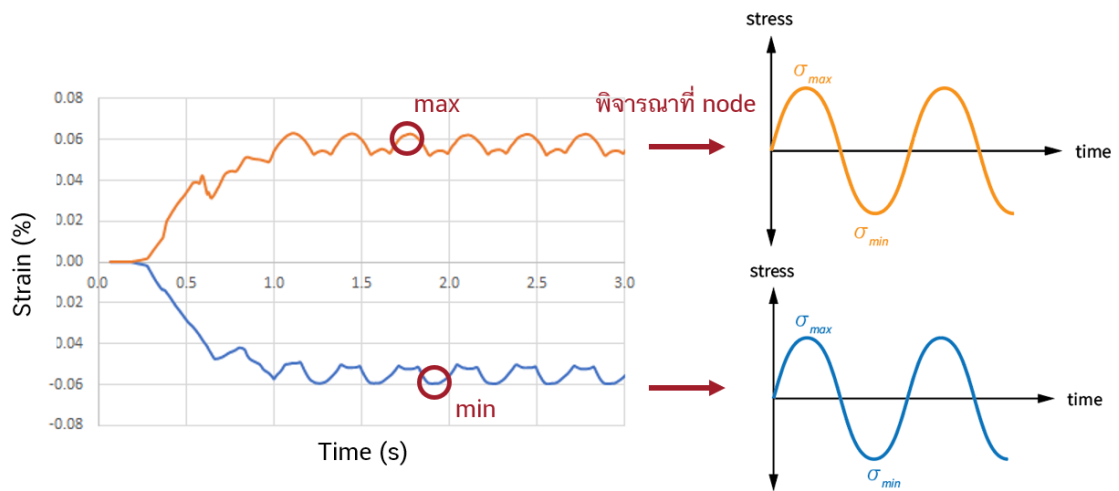




รูปที่ 6.7 วัฏจักรความล้าของจุดต่อที่มีความเครียดสูงสุดในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุนภายในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา



รูปที่ 6.8 กระบวนการหาแอมพลิจูดความเค้นสูงสุดจากจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุดและต่ำสุด ตลอดการจำลอง โดยให้ตะไบทำงานในคลองรากฟัน



รูปที่ 6.9 กระบวนการหาแอมพลิจูดความเครียดสูงสุดจากจุดต่อที่มีความเค้นสูงสุดและต่ำสุดตลอดการจำลอง โดยให้ตะไบทำงานในคลองรากฟัน

ตารางที่ 6.1 แอมพลิจูดความเค้นตั้งฉากสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ )

| พารามิเตอร์ของคลองรากฟัน |                | แอมพลิจูดความเค้นสูงสุด (MPa) |                   |          |               |
|--------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|----------|---------------|
| รัศมีโค้ง (มม.)          | มุมโค้ง (องศา) | สามเหลี่ยมด้านเท่า            | สี่เหลี่ยมจัตุรัส | รูปตัว S | สามเหลี่ยมมุม |
| 2                        | 30             | 645.9                         | 687.44            | 648.69   | 616.67        |
|                          | 45             | 750.07                        | 917.69            | 660.86   | 823.17        |
|                          | 60             | 766.93                        | 863.8             | 742.93   | 779.77        |
| 5                        | 30             | 592.9                         | 579.4             | 586.1    | 597.0         |
|                          | 45             | 570.7                         | 601.5             | 590.8    | 593.2         |
|                          | 60             | 601.2                         | 607.6             | 578.1    | 611.6         |
| 8                        | 30             | 595.9                         | 565.7             | 585.8    | 593.5         |
|                          | 45             | 589.2                         | 607.8             | 593.7    | 584.6         |
|                          | 60             | 570.8                         | 617.9             | 603.3    | 589.1         |

ตารางที่ 6.2 แอมพลิจูดความเครียดตั้งฉากสูงสุด ( $\epsilon_{amp}^{node}$ )

| พารามิเตอร์ของ<br>คลองรากฟัน |                    | แอมพลิจูดความเครียดสูงสุด (%) |                       |          |               |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|----------|---------------|
| รัศมีโค้ง<br>( มม.)          | มุมโค้ง<br>( องศา) | สามเหลี่ยม<br>ด้านเท่า        | สี่เหลี่ยม<br>จัตุรัส | รูปตัว S | สามเหลี่ยมมุม |
| 2                            | 30                 | 8.75                          | 10.78                 | 7.53     | 9.85          |
|                              | 45                 | 9.92                          | 11.92                 | 10.51    | 11.76         |
|                              | 60                 | 11.42                         | 12.68                 | 11.59    | 11.82         |
| 5                            | 30                 | 5.47                          | 5.93                  | 4.91     | 5.54          |
|                              | 45                 | 5.51                          | 5.96                  | 5.03     | 5.83          |
|                              | 60                 | 6.08                          | 6.56                  | 5.85     | 6.34          |
| 8                            | 30                 | 3.36                          | 3.57                  | 3.65     | 3.67          |
|                              | 45                 | 3.62                          | 3.94                  | 4.00     | 3.86          |
|                              | 60                 | 3.81                          | 4.42                  | 4.41     | 4.06          |

### 6.3 อิทธิพลของรูปร่างคลองรากฟัน

รูปร่างของคลองรากฟันในแต่ละบุคคลมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งส่งผลต่อการทำงานระหว่างตะไบและผนังคลองรากฟัน การจำลองลักษณะที่แตกต่างกันของคลองรากฟันสามารถพิจารณาจากพารามิเตอร์ 2 ตัวคือรัศมีโค้งและมุมโค้ง ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้เป็นตัวกำหนดเส้นทางการทำงานของตะไบ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะไบขณะทำงานภายในคลองรากฟัน

การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในการห้วข้อนี้ได้กำหนดรูปร่างของคลองรากฟันที่แตกต่างกันทั้งหมด 9 แบบดังแสดงในรูปที่ 5.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ทั้งสองของคลองรากฟันที่มีต่อความเค้นและความเครียดที่ตะไบจะได้รับ ในส่วนแรกจะวิเคราะห์อิทธิพลของรูปร่างคลองรากฟันที่มีต่อแอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\epsilon_{amp}^{node}$ ) ของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดแตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม ในส่วนที่สองที่ต้องการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของรูปร่างคลองรากฟันที่มีต่อแอมพลิจูดความเค้นสูงสุด

( $\sigma_{amp}^{node}$ ) ของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน และในส่วนสุดท้ายจะใช้วิธีการทางสถิติเพื่ออภิปรายว่ารูปร่างคลองรากฟันส่งผลต่อภาระทางกลที่เกิดขึ้นในตะไบแบบหมุนอย่างไร

รูปที่ 6.10 แสดงแอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\varepsilon_{amp}^{node}$ ) ของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าในคลองรากฟันที่มีมุมโค้งเท่ากัน แต่มีรัศมีโค้งแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อรัศมีโค้งเพิ่มขึ้น ความเครียดสูงสุดจะมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน สำหรับความเครียดสูงสุดที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุมฉากแสดงใน รูปที่ 6.11 - รูปที่ 6.13 ซึ่งสามารถสรุปไปในทางเดียวกันว่าความเครียดสูงสุดจะแปรผกผันกับรัศมีโค้งอย่างชัดเจนทั้ง 4 หน้าตัด

รูปที่ 6.14 แสดงแอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\varepsilon_{amp}^{node}$ ) ของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้งเท่ากัน แต่มีมุมโค้งแตกต่าง จะเห็นว่าเมื่อมุมโค้งของคลองรากฟันเพิ่มขึ้น ความเครียดสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ความเครียดสูงสุดของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุมฉากแสดงในรูปที่ 6.15 - รูปที่ 6.17 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความเครียดสูงสุดแปรผันกับมุมโค้งทั้ง 4 หน้าตัด

รูปที่ 6.18 แสดงผลการวิเคราะห์อิทธิพลของรูปร่างคลองรากฟันที่มีต่อแอมพลิจูดความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ) ของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า จะเห็นว่าความเค้นสูงสุดไม่เปลี่ยนแปลงตามมุมโค้งและรัศมีโค้งอย่างเช่นกรณีของความเครียด เช่นเดียวกับหน้าตัดอื่น ๆ อีก 3 แบบดังแสดงใน รูปที่ 6.19 - รูปที่ 6.21 เนื่องจากความเค้นสูงสุดส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งในช่วงการเปลี่ยนแปลงเฟส อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นจะมีค่าไม่สูง แต่เมื่อเลยช่วงนี้ไปความเค้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แม้ความเครียดจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยจึงอาจส่งผลให้ความเค้นสูงสุดไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ในขณะที่ความเครียดเกิดจากการที่ตะไบเสียดรูปไปตามความโค้งของรูปร่างคลองรากฟันต่าง ๆ แนวโน้มของความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นจึงสมเหตุสมผล

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเครียด รัศมีโค้ง และมุมโค้ง สามารถใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์คลองรากฟันทั้งสองนี้ส่งผลกระทบต่อความเครียดอย่างไร ซึ่งสมการการถดถอยเชิงเส้นในรูปทั่วไปแสดงในสมการที่ 4.44 ดังนั้นสมการการถดถอยเชิงเส้นของความเครียดจึงมีอยู่ในรูป

$$\varepsilon = \beta_1 r + \beta_2 \theta \quad (6.2)$$

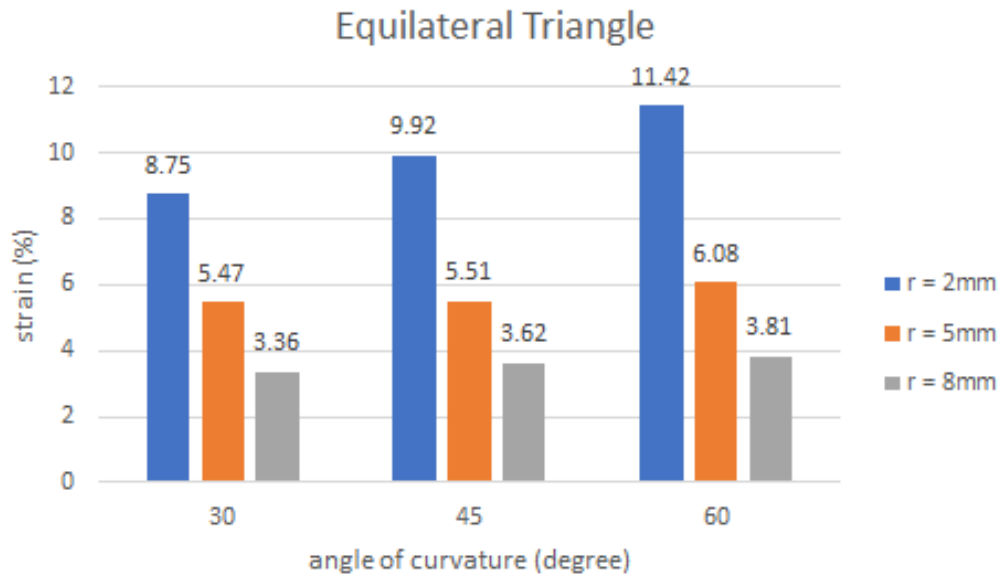
โดยตัวแปรต้นและตัวแปรตามถูกทำ standardized จนได้คะแนนมาตรฐาน (Z-score) จากนั้นจึงหาสัมประสิทธิ์การถดถอย  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  ซึ่งสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านี้ไม่ขึ้นกับหน่วย และสามารถเปรียบเทียบผลกระทบของรัศมีโค้งและมุมโค้งที่มีต่อความเครียดได้โดยตรง โดยสัมประสิทธิ์ในสมการการถดถอยเชิงเส้นของความเครียดแสดงใน

ตารางที่ 6.3 ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานของรัศมีโค้ง ( $\beta_1$ ) และสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานของมุมโค้ง ( $\beta_2$ )

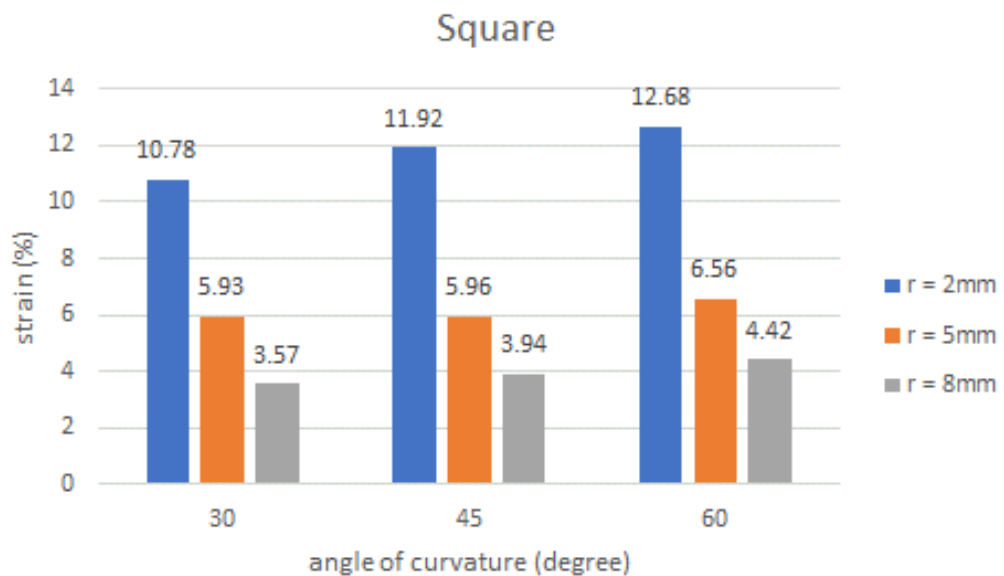
ผลการวิเคราะห์พบว่าขนาดของสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานของรัศมีโค้ง  $\beta_1$  มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานของมุมโค้ง  $\beta_2$  ในทุกหน้าตัด จึงสามารถบอกได้ว่ารัศมีโค้งมีอิทธิพลต่อความเครียดมากกว่ามุมโค้ง นอกจากนี้การที่สัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานของรัศมีโค้ง  $\beta_1$  มีค่าติดลบ แสดงว่าความสัมพันธ์ของความเครียดแปรผกผันกับรัศมีโค้ง และเป็นการยืนยันความสัมพันธ์ที่กล่าวมาในการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้

นอกจากนี้ ผลการศึกษาของ Roda-Casanova และคณะ [26] ยังมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ โดยระบุว่าคลองรากฟันที่มีความโค้งมากกว่า (รัศมีความโค้งที่เล็กลงและ/หรือมีมุมโค้งที่มากกว่า) ทำให้เกิดความเครียดในตะไบที่สูงขึ้น อีกทั้งยังระบุว่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อายุความล้าของตะไบลดลง แต่ในทางกลับกัน คลองรากฟันที่มีรัศมีโค้งมากจะเกิดความเครียดต่ำ ซึ่งแสดงถึงความทนทานต่อการแตกหักของตะไบที่สูงขึ้น

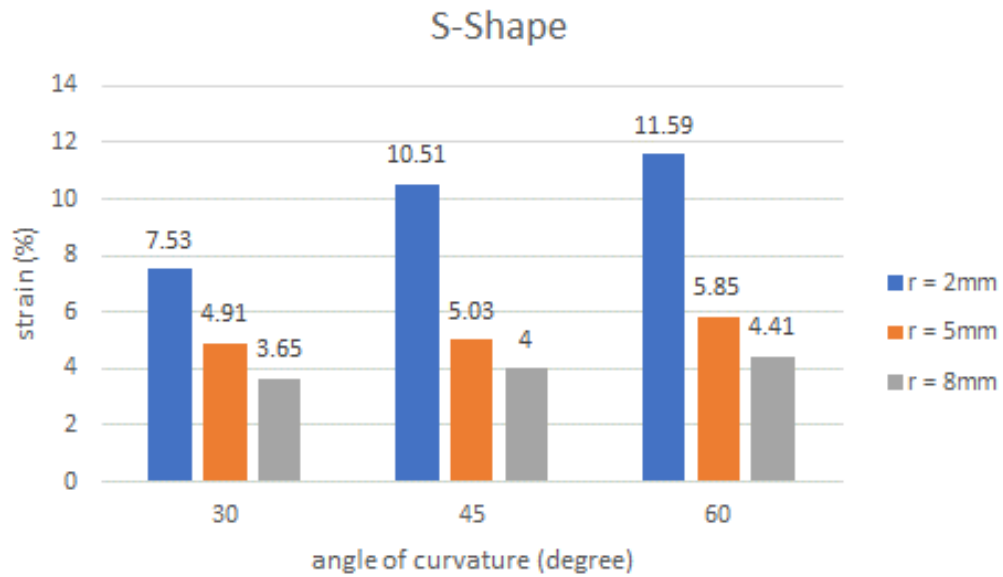
โดยสรุป ผลการศึกษานี้ทำให้เข้าใจอิทธิพลของรัศมีโค้งและมุมโค้งที่มีต่อความเค้นและความเครียดระหว่างการทำงานภายในคลองรากฟันที่มีรูปร่างแตกต่างกัน การวิเคราะห์โดยพิจารณาความเค้นสูงสุดอาจยังไม่สามารถแสดงแนวโน้มที่ชัดเจนในสภาวะการทำงานภายในคลองรากฟันที่มีรูปร่างแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การใช้ความเครียดสูงสุดในการวิเคราะห์นั้นสามารถช่วยให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้น ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการที่คลองรากฟันมีรัศมีโค้งที่น้อยลงจะทำให้ความเครียดที่ตะไบได้รับมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงในการแตกหักมากขึ้นเช่นกัน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงมุมโค้งก็ส่งผลให้ความเครียดเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน แต่ไม่มากเท่าการเปลี่ยนแปลงรัศมีโค้ง



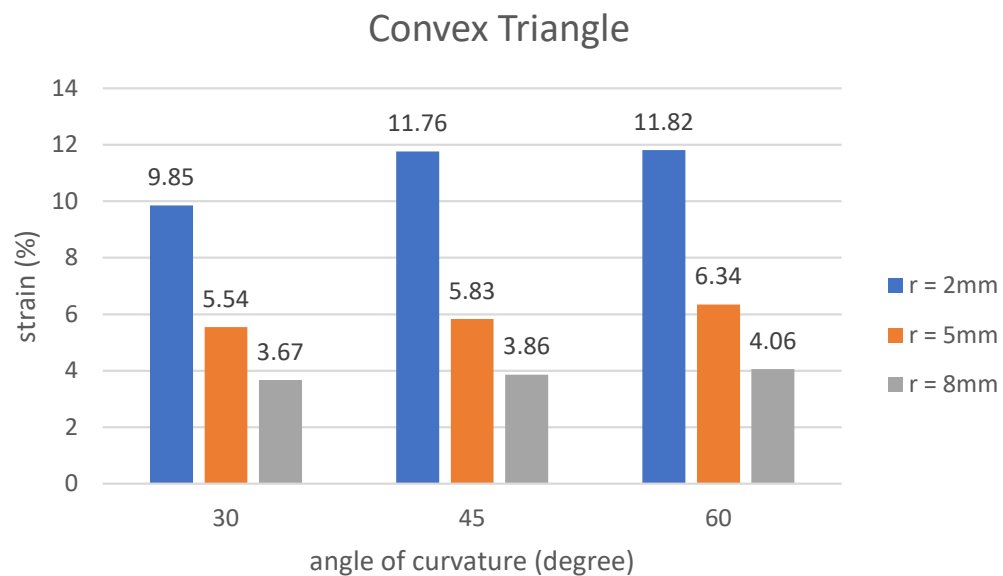
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน



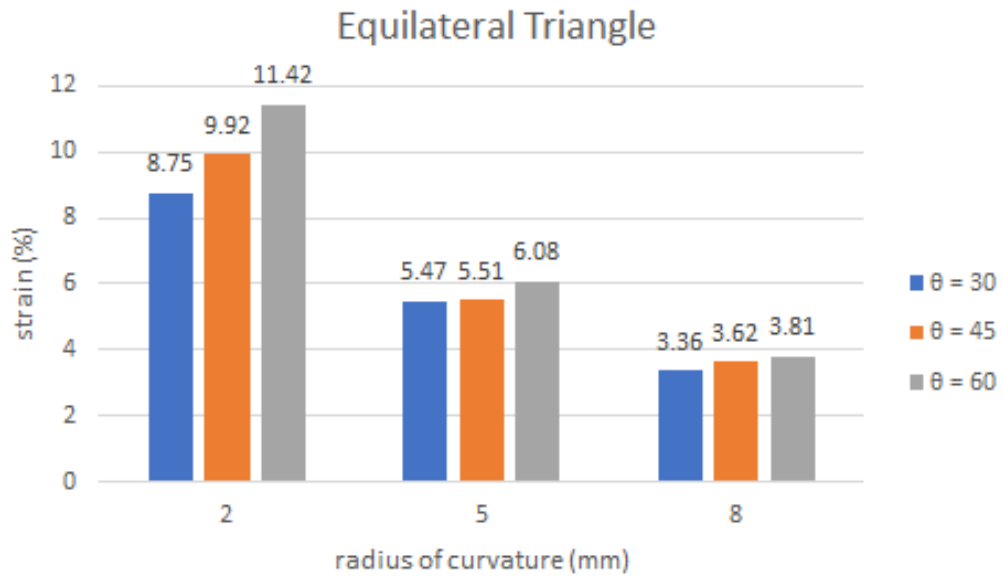
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน



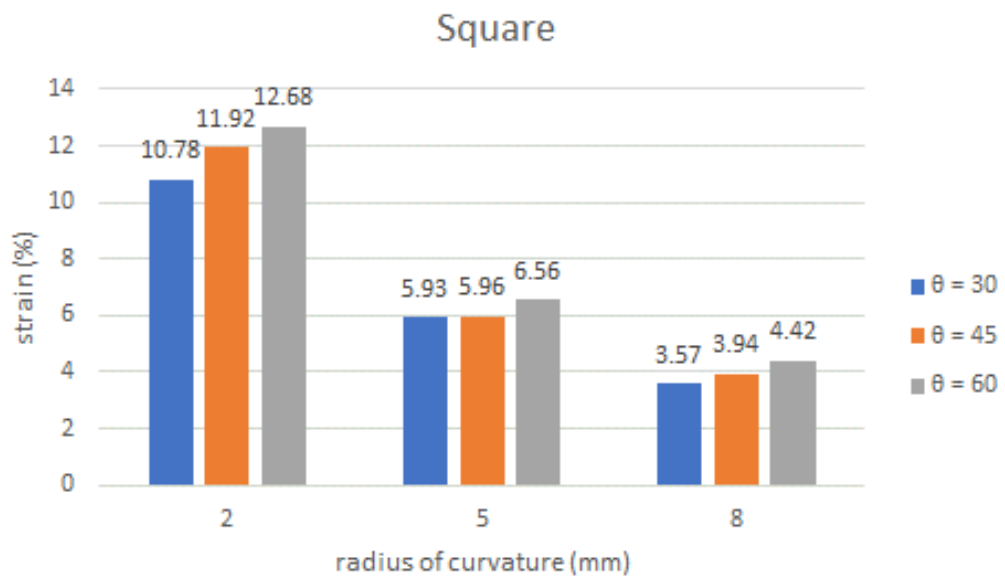
รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน

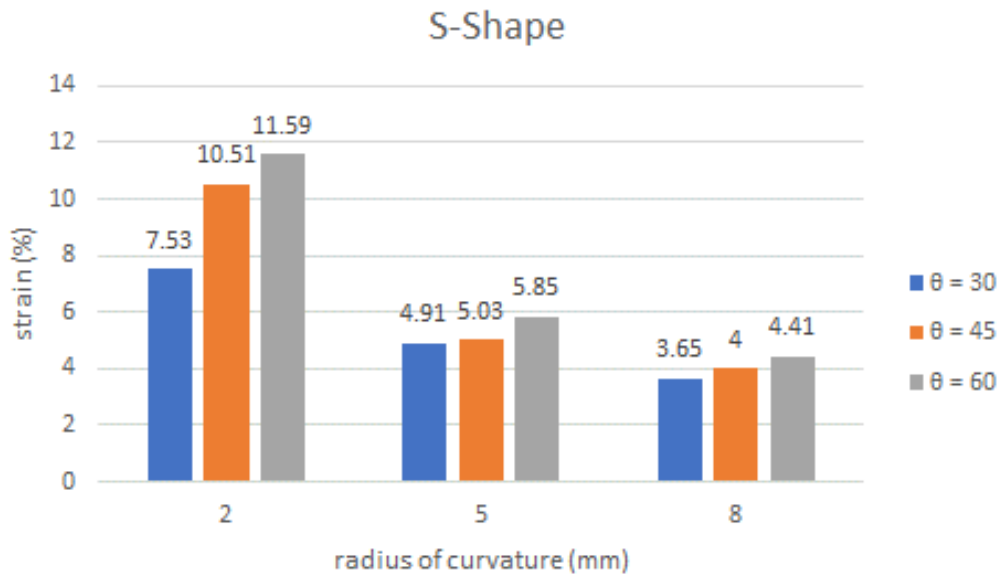


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน

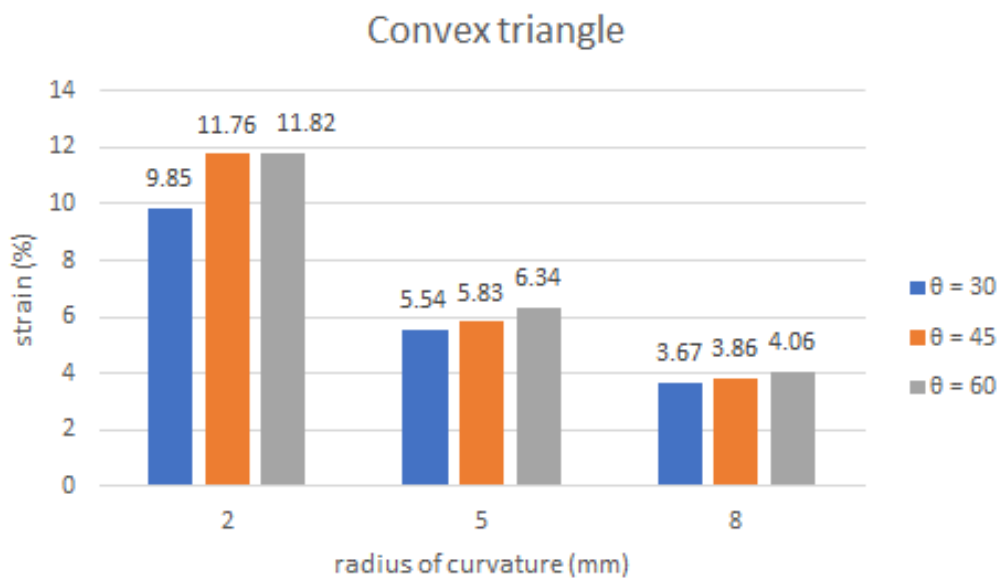


รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน

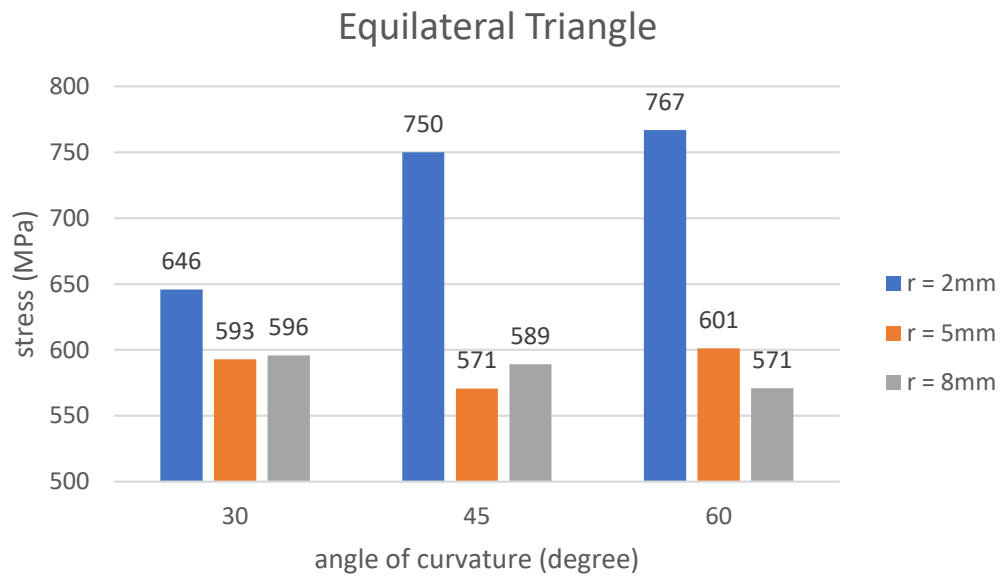




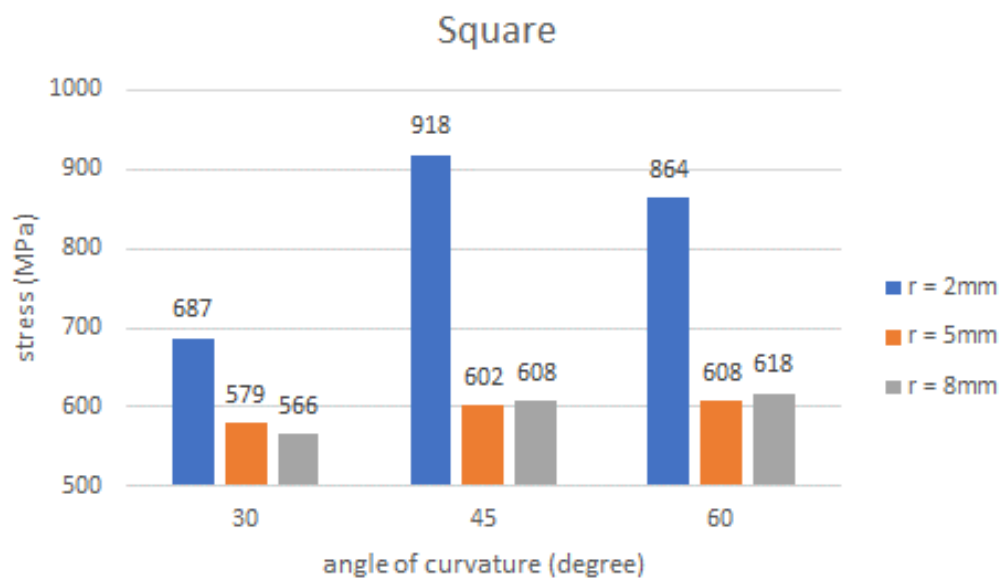
รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S เมื่อพิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน



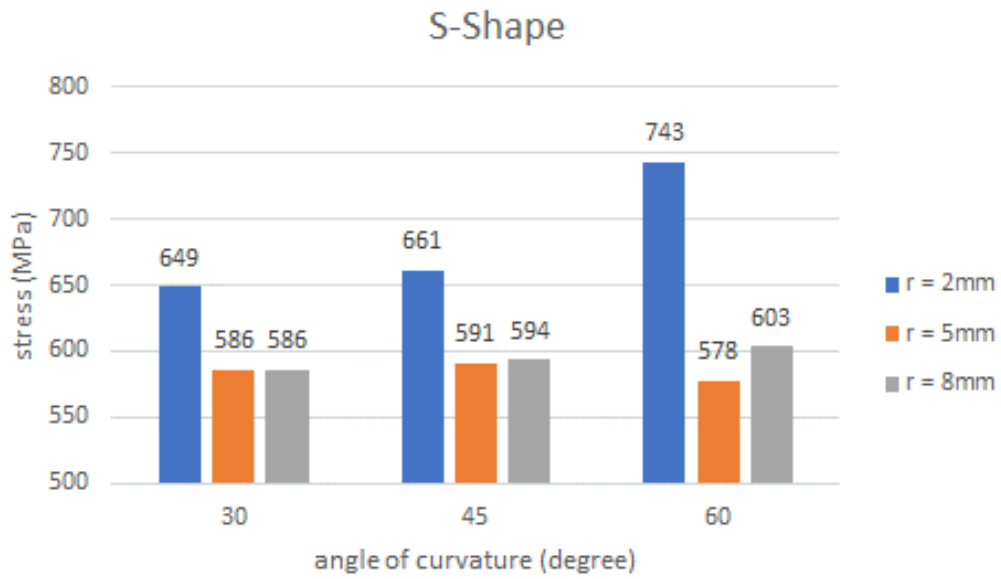
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม เมื่อพิจารณาที่รัศมีโค้งเดียวกัน



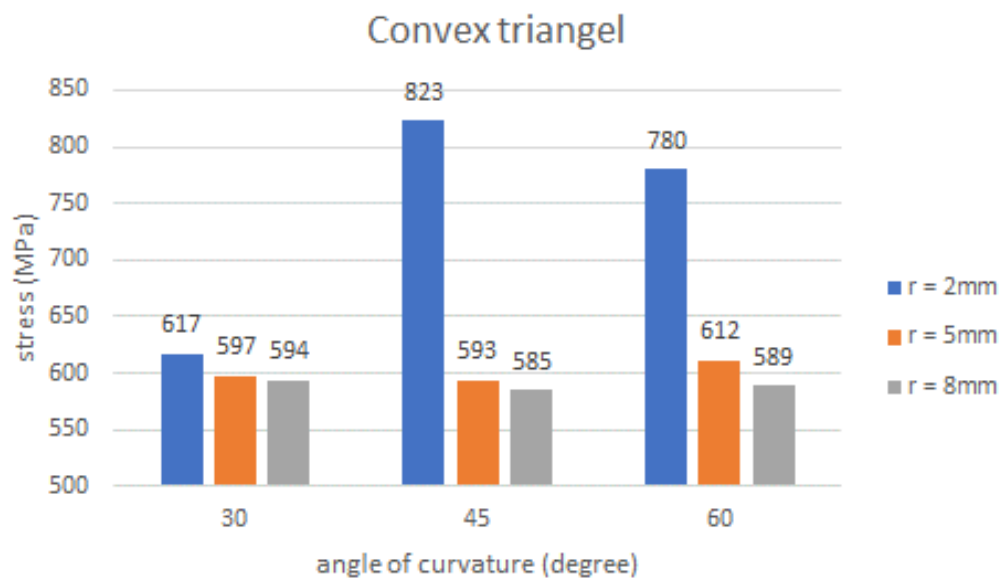
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน



รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมุม เมื่อพิจารณาที่มุมโค้งเดียวกัน

ตารางที่ 6.3 สัมประสิทธิ์ถดถอยของความเครียดในตะไบแต่ละประเภท

|                    | $\beta_1$ | $\beta_2$ |
|--------------------|-----------|-----------|
| สามเหลี่ยมด้านเท่า | -0.95     | 0.18      |
| สี่เหลี่ยมจัตุรัส  | -0.95     | 0.13      |
| รูปตัว S           | -0.88     | 0.29      |
| สามเหลี่ยมมุม      | -0.95     | 0.14      |

#### 6.4 อิทธิพลของรูปร่างหน้าตัด

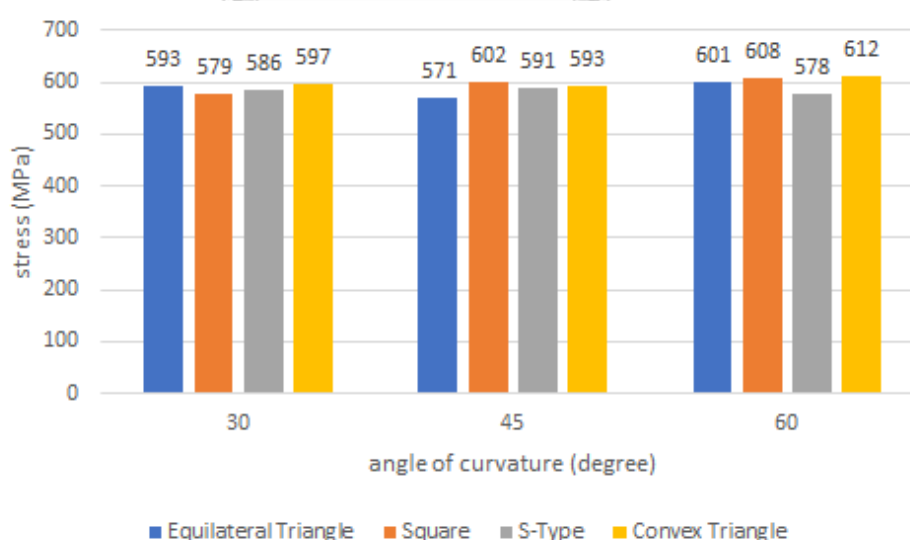
การออกแบบรูปร่างหน้าตัดของตะไบแบบหมุนมีความสำคัญต่อการกระจายความเค้นและความเครียด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการคำนวณวัฏจักรความล้าและอายุล้าของตะไบ ในหัวข้อนี้ได้ศึกษารูปร่างหน้าตัดของตะไบที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะไบแบบหมุนทั้ง 4 หน้าตัดที่กล่าวมา

รูปที่ 6.22 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แอมพลิจูดความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ) ของตะไบแบบหมุนหน้าตัด สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม ในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งต่าง ๆ เมื่อพิจารณาที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา จะเห็นว่าความเค้นสูงสุดมีค่า 601.2 MPa, 607.6 MPa, 578.1 MPa และ 611.6 MPa ตามลำดับ และในรูปที่ 6.23 ได้แสดงแอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\epsilon_{amp}^{node}$ ) ในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งต่าง ๆ เมื่อพิจารณาที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา จะเห็นว่าความเครียดสูงสุดมีค่า 6.08 %, 6.56 %, 5.85 % และ 6.34 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแอมพลิจูดของความเค้นและความเครียดสูงสุดเมื่อรูปร่างหน้าตัดเปลี่ยนแปลงไปที่มุมโค้งต่าง ๆ จะเห็นว่าความเค้นมีค่าแตกต่างกันไม่มาก กล่าวคือประมาณ 6 % ในขณะที่ความเครียดมีความแตกต่างกันมากกว่าความเค้น คือมีความแตกต่างประมาณ 12 %

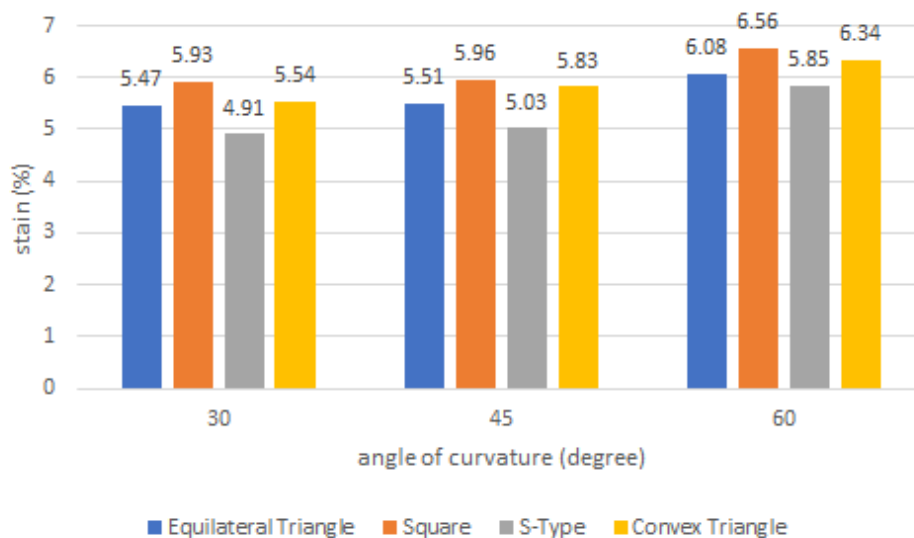
เมื่อนำตะไบทั้ง 4 มาเปรียบเทียบกับกันโดยการพิจารณาความเค้นและความเครียดในคลองรากฟันที่มีความโค้งต่าง ๆ พบว่าในแต่ละรูปร่างคลองรากฟัน ความเค้นที่เกิดขึ้นไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ในขณะที่ความเครียดมีแนวโน้มที่ชัดเจนคือ ตะไบหน้าตัดรูปตัว S จะมีความเครียดต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับหน้าตัดอื่น ๆ ซึ่งแสดงว่ารูปร่างหน้าตัดลักษณะนี้มีความต้านทานต่อความเสียหายภายใต้เงื่อนไขการให้ภาระลักษณะนี้ที่สูงกว่าตะไบหน้าตัดแบบอื่น แต่ในทางกลับกันตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเกิดความเครียดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับหน้าตัดอื่น ๆ ซึ่งบอกรถึงความเสี่ยงที่จะเสียหายได้ง่ายกว่าหน้าตัดอื่น

ๆ อีก 3 แบบ ดังนั้น การวิเคราะห์อิทธิพลของรูปร่างหน้าตัดควรที่จะพิจารณาจากความเครียดสูงสุด เนื่องจากสามารถสะท้อนพฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้นจริงได้ดีกว่าการพิจารณาความเค้น และผลการวิเคราะห์ความเครียดสูงสุดในตารางที่ 6.2 ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Roda-Casanova และคณะ [35] ที่ได้ระบุว่าตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมีความเค้นและความเครียดต่ำกว่าตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ดังนั้น การออกแบบตะไบที่มีหน้าตัดแบบสามเหลี่ยมสามารถต้านทานต่อความล้าได้ดีกว่า ทำให้สามารถลดความเสี่ยงของการแตกหักลงได้

การศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจว่ารูปร่างหน้าตัดแต่ละแบบมีอิทธิพลต่อความเค้นและความเครียดภายในตะไบแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งความรู้นี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปร่างหน้าตัดที่เหมาะสมกับการใช้งานในสถานการณ์ต่าง ๆ และสามารถช่วยในการปรับปรุงการออกแบบตะไบแบบหมุนเพื่อให้สามารถทำงานในคลองรากฟันที่มีลักษณะซับซ้อนได้ ทำให้การรักษาคลองรากฟันมีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากขึ้น และยังเพิ่มความมั่นใจของผู้ป่วยในการรับการรักษาด้วย ทั้งนี้การพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเค้นและความเครียดไม่ได้มีเพียงแค่รูปร่างของหน้าตัด แต่ลักษณะความโค้งของคลองรากฟันยังมีผลต่อความเค้นและความเครียดเช่นเดียวกัน โดยจะกล่าวถึงปัจจัยดังกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรูปร่างหน้าตัดในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม.



รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับรูปร่างหน้าตัดในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม.

## 6.5 การกระจายตัวของความเค้นและความเครียด

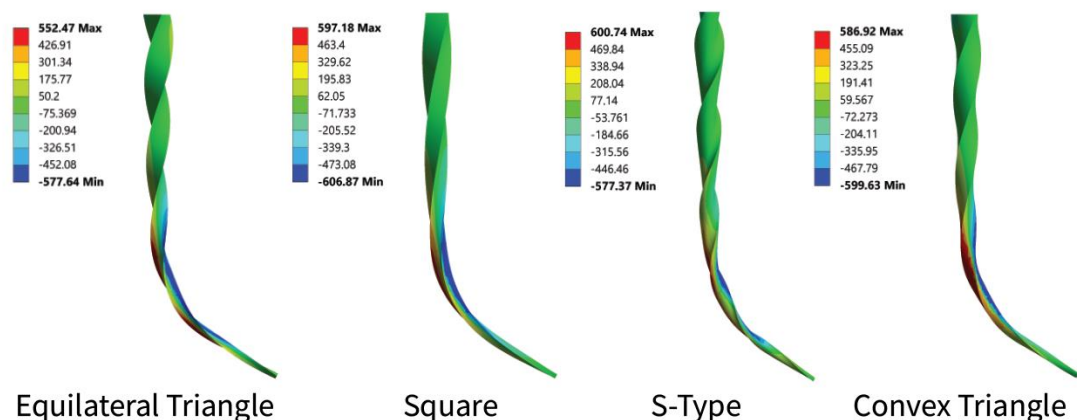
การวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดตลอดความยาวของตะไบมีความสำคัญในการทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมทางกลของตะไบขณะทำงาน เพื่อศึกษาบริเวณที่เกิดความเค้นและความเครียดสูงสุด ผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งความเค้นและความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณด้านนอกของส่วนโค้งตะไบดังแสดงในรูปที่ 6.24 และรูปที่ 6.25 เนื่องจากบริเวณด้านนอกนี้ (สีแดง) รับภาระดึงจึงทำให้ความเค้นและความเครียดที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงถึงการยืดตัวของวัสดุ ในขณะที่บริเวณด้านในของส่วนโค้งของตะไบ (สีน้ำเงิน) แสดงถึงความเค้นและความเครียดที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งบ่งบอกถึงการหดตัวของวัสดุเนื่องจากการงอของตะไบไปตามรูปร่างคลองรากฟัน โดยตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดและต่ำสุดอาจแตกต่างกันไปเล็กน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างของหน้าตัดแต่ละประเภท เนื่องจากความเค้นดัดสามารถประเมินได้โดยคร่าว ๆ จากค่าโมเมนต์ ( $M$ ) ระยะตั้งฉากจากแกนสะเทิน ( $y$ ) และโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนสะเทิน ( $I$ ) ดังแสดงในสมการที่ 27 และการจำลองการสอดตะไบเข้าไปในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งต่าง ๆ กันเป็นทดสอบแบบควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement controlled) จึงทำให้ตะไบเสียรูปไปตามความโค้งของคลองรากฟัน ดังนั้น แรงที่เกิดขึ้น (reaction force) ในแต่ละตำแหน่งของตะไบจึงไม่เท่ากันทำให้โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจึงอาจจะมีค่าแปรปรวน ประกอบกับรูปร่างของตะไบแบบหมุนที่มีความซับซ้อน ได้แก่ การมีหน้าตัดไม่เป็นวงกลมและมีลักษณะเป็นเกลียวทำให้การ

วางตัวของหน้าตัดแต่ละตำแหน่งหมุนเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ จึงทำให้ค่า  $y$  จากสมการที่ 27 แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัด ซึ่งค่า  $y$  ที่ปลายตะไบจะมีค่าน้อย เนื่องจากหน้าตัดมีขนาดเล็ก นอกจากนี้การที่ตะไบมีความผายทำให้ขนาดหน้าตัดแต่ละตำแหน่งของตะไบไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่า  $I$  จากสมการที่ 27 ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของหน้าตัด โดยที่ปลายตะไบ  $I$  จะมีค่าน้อย เนื่องจากหน้าตัดมีขนาดเล็ก ซึ่งต่างจากการทดสอบแบบควบคุมภาระ (force controlled) ที่กำหนดแรงที่ใช้กับตะไบให้มีค่าคงที่ และโมเมนต์ตัดสามารถหาได้จากสมการ

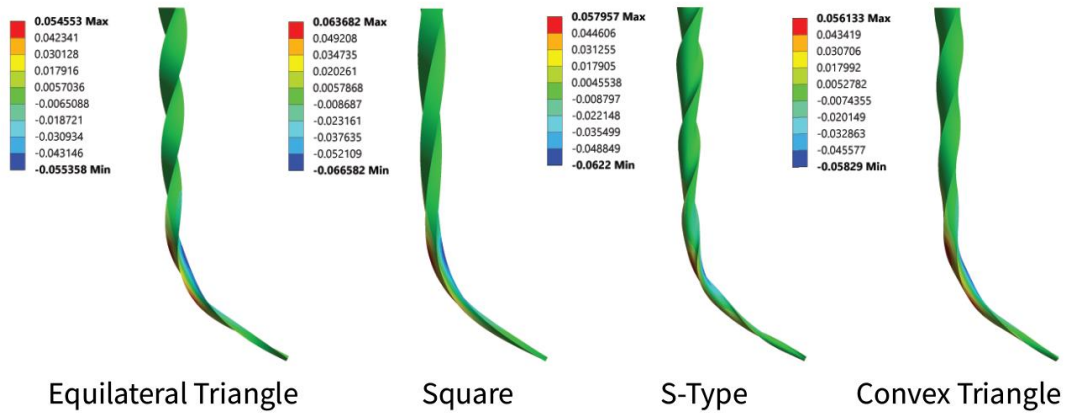
$$M = F \cdot d \quad (6.3)$$

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับระยะตั้งฉากถึงจุดหมุน ( $d$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น ดังนั้น ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดหรือความเครียดสูงสุดอาจไม่ได้เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของส่วนโค้งคลองรากฟันเสมอไป แต่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดในบริเวณที่สูงหรือต่ำกว่าจุดกึ่งกลางส่วนโค้งนั้น

ความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดต่อรูปร่างหน้าตัดของตะไบแบบหมุน และรูปร่างของคลองรากฟัน เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและความสำเร็จในการรักษาทางทันตกรรม การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นที่ใช้ในการศึกษานี้ยังช่วยให้เข้าใจถึงอิทธิพลของลักษณะความโค้งของคลองรากฟัน และรูปร่างหน้าตัดของตะไบแบบหมุนที่มีต่อความเค้นและความเครียด ความรู้ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนในอนาคตได้ต่อไป



รูปที่ 6.24 ความเค้นที่เกิดขึ้น ณ เวลาสุดท้าย ของการจำลอง ในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน ขณะหมุนภายในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา



รูปที่ 6.25 ความเครียดที่เกิดขึ้น ณ เวลาสุดท้าย ของการจำลอง ในตะไบหน้าตัดแตกต่างกัน  
ขณะหมุนภายในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมุมโค้ง 60 องศา





## บทที่ 7 การวิเคราะห์อายุความล้าของตะไบแบบหมุน

บทนี้นำเสนอการวิเคราะห์อายุความล้าของตะไบแบบหมุนทางพันธุกรรม ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในบทที่แล้ว โดยมีจุดมุ่งหมายสำคัญคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหรือความเครียดกับอายุความล้าของตะไบ และนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ความล้าทั้งวิธี stress-life และ strain-life ซึ่งทั้งสองแนวทางนี้จะแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของพฤติกรรมความล้าที่ครอบคลุมมากขึ้น และสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับความแข็งแรงของตะไบแบบหมุนแต่ละประเภทภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน

### 7.1 การประเมินอายุความล้าด้วยวิธี strain-life

การทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการล้าของวัสดุเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมที่นิยมนำมาใช้ผลิตตะไบแบบหมุนทางพันธุกรรม แม้ว่าวัสดุชนิดนี้จะมีสมบัติความยืดหยุ่นสูงแต่ก็ยังสามารถเกิดความเสียหายได้เช่นกันกับโลหะอื่น ๆ เนื่องจากการได้รับวัฏจักรความล้าจนวัสดุเกิดการล้าและเสียหายในที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์ความล้าของวัสดุสามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธี stress-life และ strain-life การเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะการใช้งาน พฤติกรรมทางกลของวัสดุ และข้อจำกัดในการทดสอบ เป็นต้น

การวิเคราะห์ความล้าของวัสดุด้วยวิธี strain-life คือการพิจารณาการเสียรูปของวัสดุภายใต้การทดสอบแบบควบคุมการเคลื่อนที่ โดยความเครียดที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และใช้เป็นพื้นฐานของการประเมินอายุความล้าของวัสดุ ซึ่งมักเป็นกรณีของโลหะเหนียวที่มีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น การนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความเครียดกับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย ( $\epsilon$ -N curve) จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินอายุความล้า

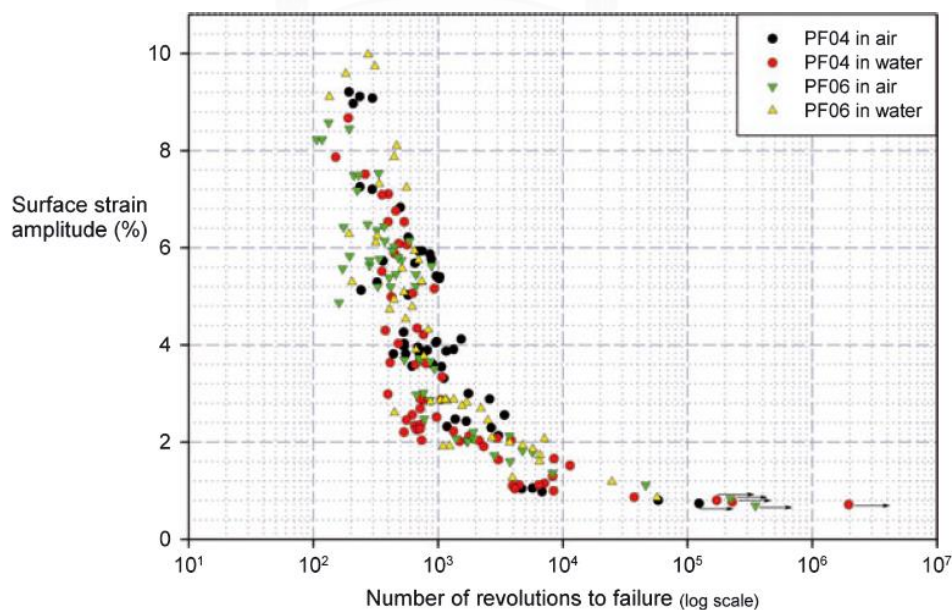
ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทดสอบโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมภายใต้การทดสอบแบบควบคุมการเคลื่อนที่ และนำเสนอผลลัพธ์ด้วย  $\epsilon$ -N curve ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ผลการทดสอบอายุความล้าของตะไบแบบหมุนที่ได้จากงานวิจัยของ Cheung และคณะ [45] ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ซึ่งเป็นการนำตะไบรุ่น ProFile 0.04 และ 0.06 มาทดสอบความล้าจากการดัด (rotating bending fatigue test) ทั้งในน้ำและอากาศเพื่อหาอายุความล้าของตะไบ จากนั้นนำผลการทดลองมาหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด (curve fitting) ในรูปของฟังก์ชันกำลัง

$$\varepsilon = 0.467 N_f^{-0.373} \quad (7.1)$$

แอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\varepsilon_{\text{amp}}^{\text{node}}$ ) ถูกนำมาใช้วิเคราะห์อายุความล้าของตะไบหมุนทางทันตกรรม แต่ละประเภทที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน และพิจารณาที่คลองรากฟันแต่ละรูปร่าง โดยการใช้อ  $\varepsilon$ -N curve ที่ได้จากงานวิจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้แสดงในตารางที่ 7.1

รูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบอายุความล้าของตะไบแบบหมุนทั้ง 4 หน้าตัด โดยทำงานในคลองรากฟันที่มีรัศมีโค้ง 5 มม. และมีมุมโค้งที่ต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าตะไบหน้าตัดรูปตัว S มีอายุที่ยาวที่สุดเมื่อเทียบกับตะไบหน้าตัดอื่น ๆ ที่ศึกษา เนื่องจากตะไบหน้าตัดรูปตัว S มีความเครียดต่ำที่สุด ซึ่งความเครียดที่เกิดขึ้นนี้มีผลโดยตรงต่ออายุความล้าของวัสดุ เมื่อวัสดุมีความเครียดที่มากขึ้นจะส่งผลให้มีอายุความล้าสั้นลง ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้าและความเครียดจึงแปรผกผันกัน

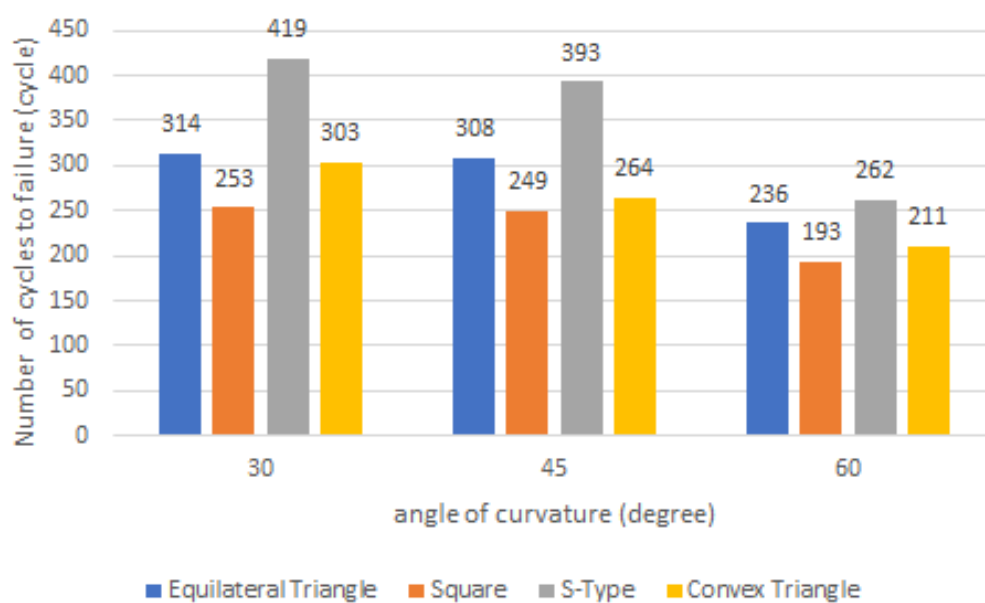
นอกจากนี้จากรูปที่ 7.3 - รูปที่ 7.8 ที่แสดงถึงอายุความล้าของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมน ซึ่งทำงานในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งแตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่ารัศมีโค้งและมุมโค้งส่งผลต่ออายุความล้า โดยมุมโค้งมีอิทธิพลต่ออายุความล้าไม่มากเท่าอิทธิพลของรัศมีโค้ง สอดคล้องกับพฤติกรรมของความเครียดที่มีแนวโน้มตามมุมโค้งและรัศมีโค้งที่ได้กล่าวมาในบทที่ 6 อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญในการเลือกตะไบที่เหมาะสมที่สุดคือต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ นอกจากอายุความล้าด้วย เช่น ประสิทธิภาพการตัดของตะไบ ความเหมาะสมในการใช้งานทางทันตกรรม และความเสี่ยอื่น ๆ ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อคลองรากฟัน



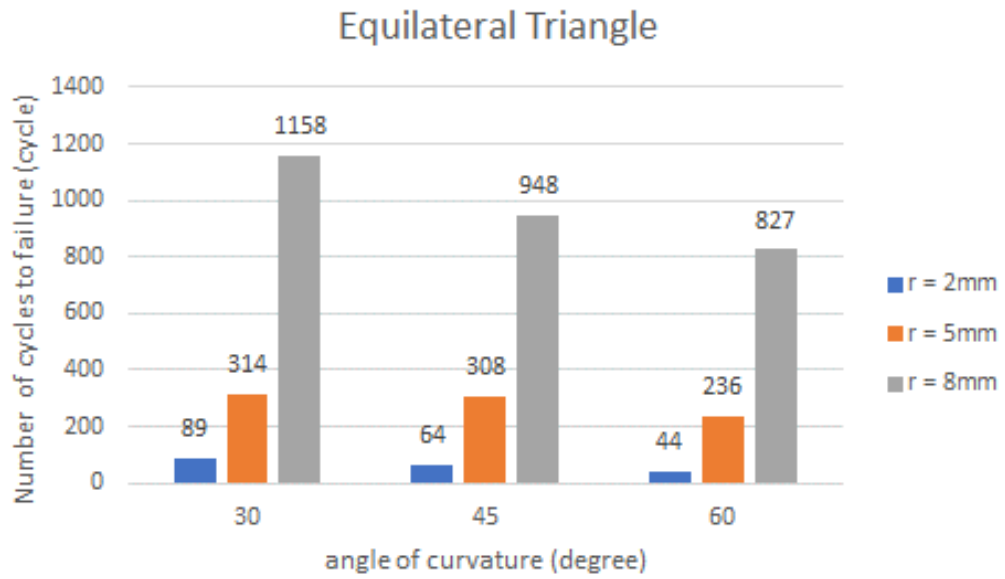
รูปที่ 7.1  $\varepsilon$ -N curve จากงานวิจัยของ Cheung [45]

ตารางที่ 7.1 อายุความล้าของตะไบจาก  $\epsilon$ -N curve

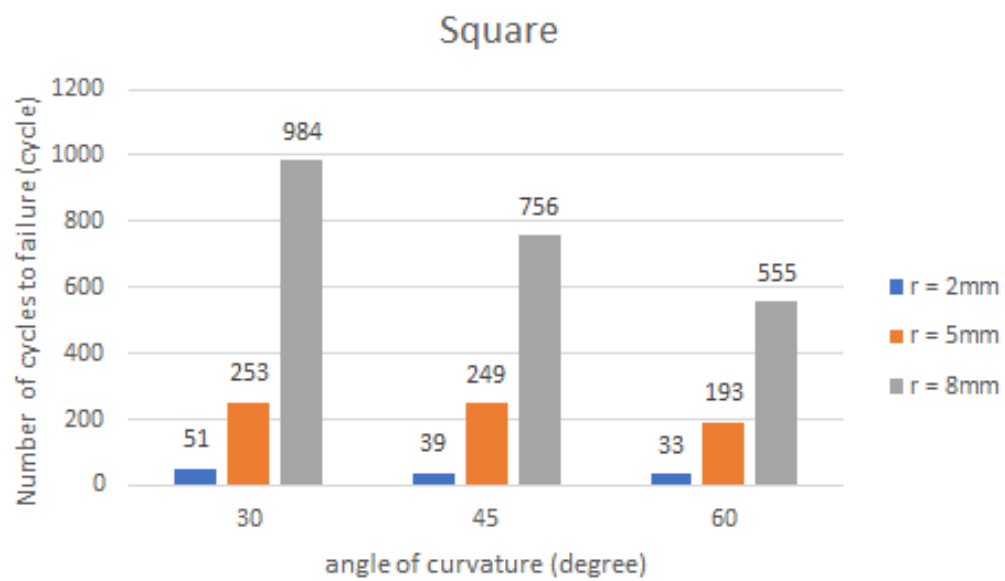
| พารามิเตอร์<br>คลองรากฟัน |                    | จำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย ( $N_f$ ) |                       |          |               |
|---------------------------|--------------------|--|-----------------------|----------|---------------|
| รัศมีโค้ง<br>( มม.)       | มุมโค้ง<br>( องศา) | สามเหลี่ยม<br>ด้านเท่า                 | สี่เหลี่ยม<br>จัตุรัส | รูปตัว S | สามเหลี่ยมมุม |
| 2                         | 30                 | 89                                     | 51                    | 133      | 65            |
|                           | 45                 | 64                                     | 31                    | 54       | 40            |
|                           | 60                 | 44                                     | 33                    | 42       | 40            |
| 5                         | 30                 | 314                                    | 253                   | 419      | 303           |
|                           | 45                 | 308                                    | 249                   | 393      | 264           |
|                           | 60                 | 236                                    | 193                   | 262      | 211           |
| 8                         | 30                 | 1158                                   | 984                   | 928      | 914           |
|                           | 45                 | 948                                    | 756                   | 726      | 798           |
|                           | 60                 | 827                                    | 555                   | 559      | 697           |



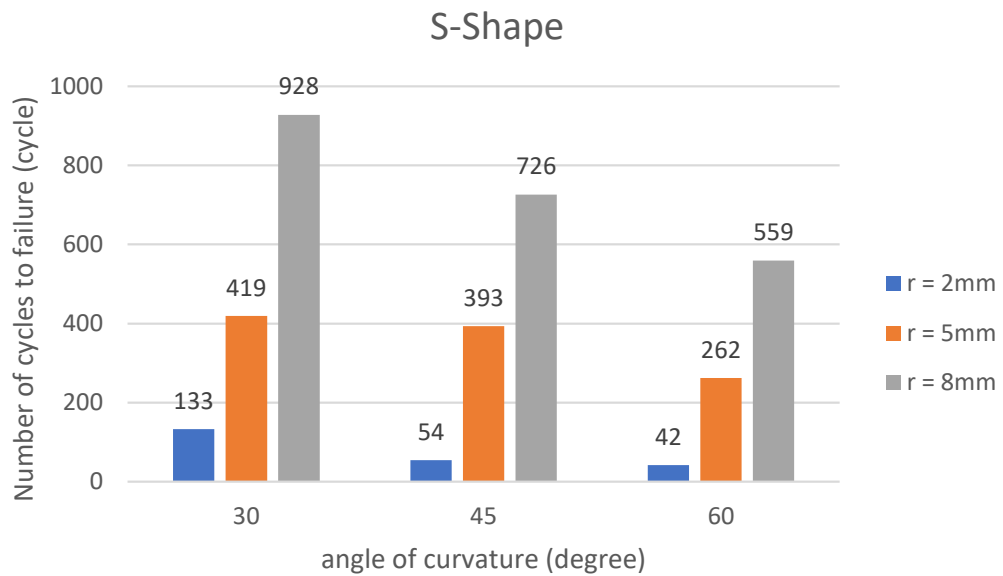
รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างหน้าตัดที่มุมโค้งต่าง ๆ



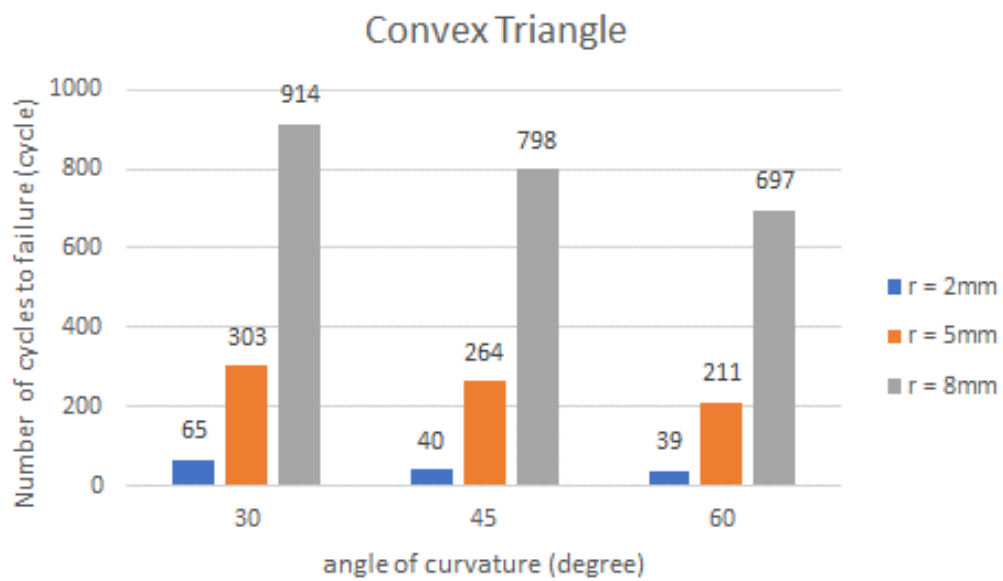
รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม



รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมน

## 7.2 การประเมินอายุความล้าด้วยวิธี stress-life

การประเมินอายุความล้าด้วยวิธี stress-life นิยมใช้ในการทดสอบแบบควบคุมภาระ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ประเมินอายุความล้าของวัสดุทึงเกลไทเทเนียมได้ อายุความล้าของตะไบแบบหมุนจะสามารถทำได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเค้นกับจำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย (S-N curve) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบวัสดุทึงเกลไทเทเนียมเพื่อหา S-N curve ในปัจจุบันมีจำนวนไม่มากนัก อีกทั้ง S-N curve ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อัตราส่วนความเค้น อุณหภูมิ และองค์ประกอบของวัสดุ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ หากต้องการประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนด้วยวิธี stress-life จึงจำเป็นต้องสร้าง S-N curve เฉพาะชิ้นงานสำหรับตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม (component S-N curve) โดยการรวบรวมข้อมูลการทดลองความล้าของตะไบแบบหมุนจากงานวิจัยที่มีอยู่และข้อมูลความเค้นที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกัน

รูปที่ 7.7 นำเสนอ S-N curve เฉพาะชิ้นงานที่ได้จากการนำข้อมูลอายุความล้าของตะไบหมุนรุ่น RECIPROC blue ซึ่งทดสอบในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งแตกต่างกัน 5 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7.8 จากงานวิจัยของ Sobotkiewicz และคณะ [46] มาประกอบกับความเค้นสูงสุดที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองตะไบ RECIPROC blue มาจำลองการทำงานในคลองรากฟัน 5 แบบลักษณะเดียวกับการทดลองและได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 7.2 และหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด โดยแสดงเป็นสมการฟังก์ชันกำลัง

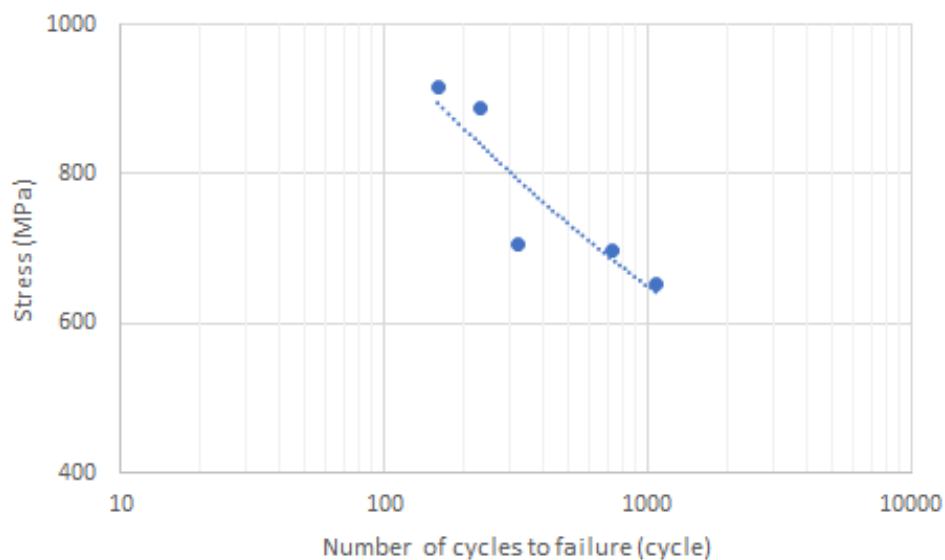
$$\sigma_y = 2170.6N_f^{-0.175} \quad (7.2)$$

การประเมินอายุความล้าโดยประมาณของตะไบแบบหมุนที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม ซึ่งสอดเข้าไปในคลองรากฟันลักษณะต่าง ๆ โดยมีรัศมีโค้ง และมุมโค้งแตกต่างกันไป ทำโดยการแทนค่าแอมพลิจูดความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ) ลงในสมการ 7.1 ของ S-N curve ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 7.3

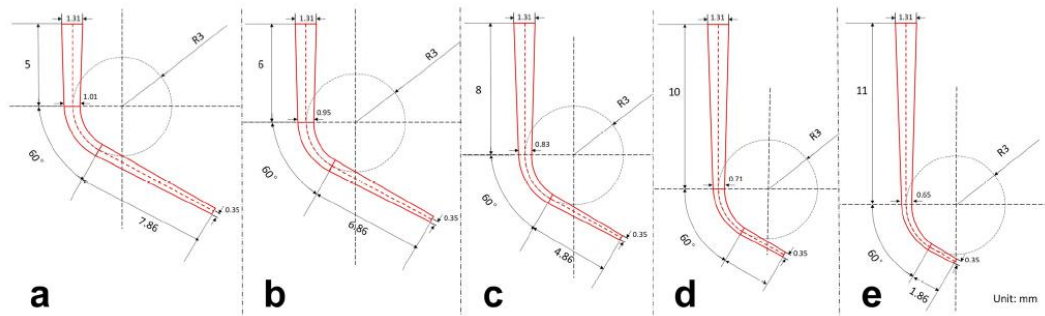
รูปที่ 7.9 - รูปที่ 7.12 แสดงผลการวิเคราะห์อายุความล้าของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม ซึ่งทำงานในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งแตกต่างกัน โดยการพิจารณาแอมพลิจูดความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ) ร่วมกับ component S-N curve พบว่าอายุความล้าไม่มีแนวโน้มตามมุมโค้งและรัศมีโค้งที่ชัดเจน เนื่องจากความเค้นสูงสุดที่นำมาพิจารณาไม่ได้สะท้อนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของตะไบขณะทำงานภายในคลองรากฟัน และอายุความ

ล้าที่ได้จากวิธี stress-life อาจมีความแตกต่างจากอายุความล้าที่ได้จากวิธี strain-life เนื่องจากวัสดุที่ใช้มีคุณสมบัติทางกลที่ต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้น การเลือกความเค้นสูงสุดมาพิจารณาอายุความล้าอาจยังไม่เหมาะสมนักเมื่อเทียบกับการใช้ความเครียดสูงสุดในการพิจารณา ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและจำนวนรอบมีการแปรผกผันกันอย่างชัดเจน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์อายุความล้าแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ) ความเครียดสูงสุด ( $\epsilon_{amp}^{node}$ ) และอายุความล้า ( $N_f$ ) ของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาอายุความล้าจากความเค้นสูงสุดจะไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ดังนั้น การใช้ความเครียดสูงสุดในการพิจารณาจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดกับอายุความล้าจะแปรผกผันกัน เมื่อความเครียดมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อายุความล้าสั้นลง เนื่องจากความเครียดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเสียรูปของวัสดุที่มากขึ้น และนำไปสู่การเกิดรอยร้าวเริ่มต้นและขยายตัวไปเรื่อย ๆ จนทำให้ตะไบมีความสามารถในการต้านทานต่อความล้าลดลง และนำไปสู่การแตกหักในที่สุด นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ กระบวนการผลิต และกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) อาจส่งผลต่ออายุความล้าได้เช่นกัน



รูปที่ 7.7 component S-N curve



รูปที่ 7.8 ลักษณะคลองรากฟันที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยของ Sobotkiewicz [46]

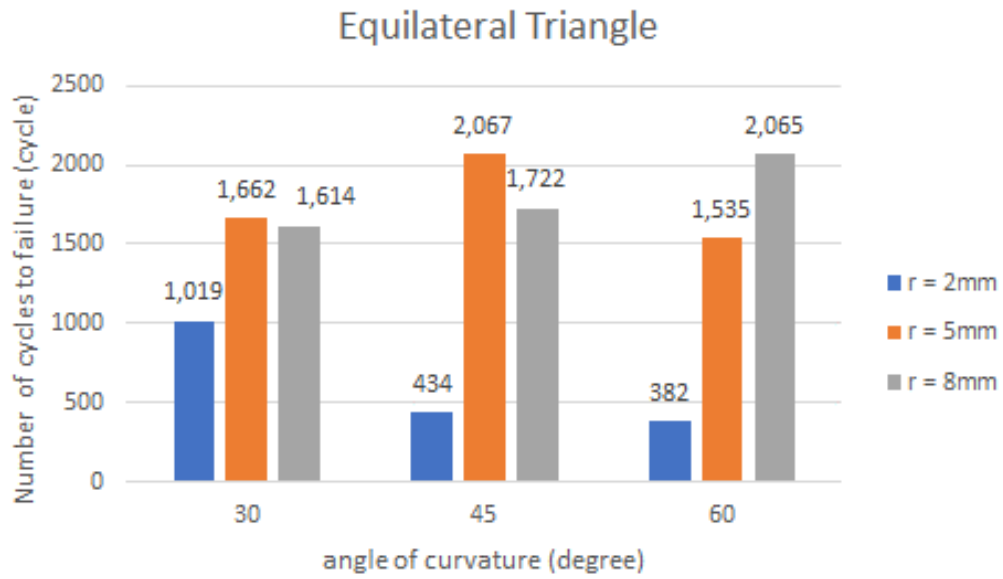
ตารางที่ 7.2 อายุความล้าของตะไบจากงานวิจัยและความเค้นสูงสุดจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

| ลักษณะความโค้ง | $N_f$ จากการทดลอง (รอบ) [46] | $\sigma_{y,max}$ จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (MPa) |
|----------------|------------------------------|---|
| แบบ a          | 160                          | 915.7                                     |
| แบบ b          | 230                          | 888.6                                     |
| แบบ c          | 320                          | 705.1                                     |
| แบบ d          | 730                          | 697.3                                     |
| แบบ e          | 1080                         | 651.8                                     |

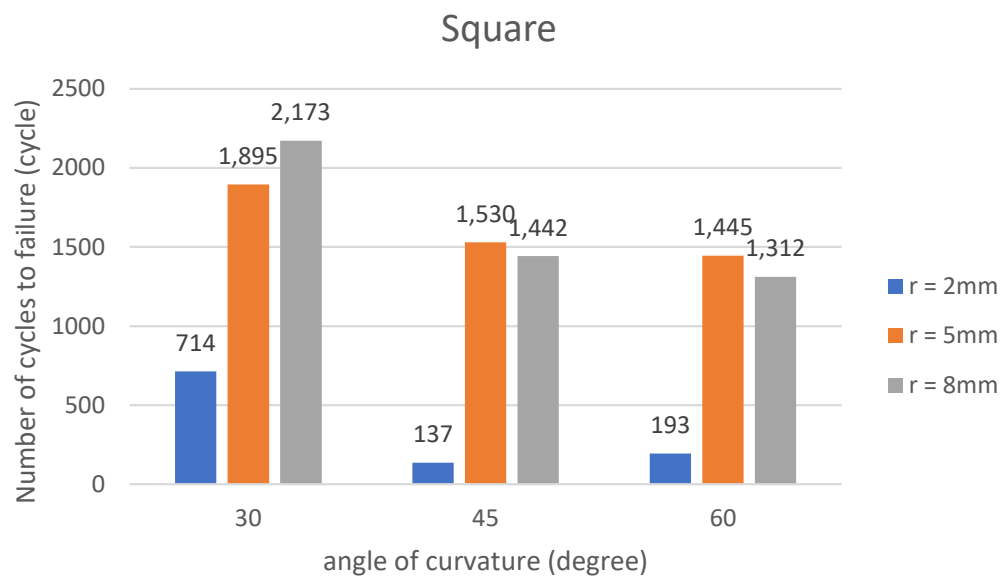
ตารางที่ 7.3 อายุความล้าของตะไบจาก S-N curve

| พารามิเตอร์คลองรากฟัน |                | จำนวนรอบภาระจนกระทั่งเสียหาย ( $N_f$ ) |                   |          |                |
|-----------------------|----------------|--|-------------------|----------|----------------|
| รัศมีโค้ง (มม.)       | มุมโค้ง (องศา) | สามเหลี่ยมด้านเท่า                     | สี่เหลี่ยมจัตุรัส | รูปตัว S | สามเหลี่ยมขนุน |
| 2                     | 30             | 1019                                   | 714               | 994      | 1327           |
|                       | 45             | 434                                    | 137               | 894      | 255            |
|                       | 60             | 382                                    | 193               | 458      | 347            |
| 5                     | 30             | 1662                                   | 1895              | 1775     | 1598           |
|                       | 45             | 2067                                   | 1530              | 1696     | 1657           |
|                       | 60             | 1535                                   | 1445              | 1920     | 1392           |
| 8                     | 30             | 1614                                   | 2173              | 1780     | 1652           |
|                       | 45             | 1722                                   | 1442              | 1649     | 1801           |
|                       | 60             | 2065                                   | 1312              | 1505     | 1724           |

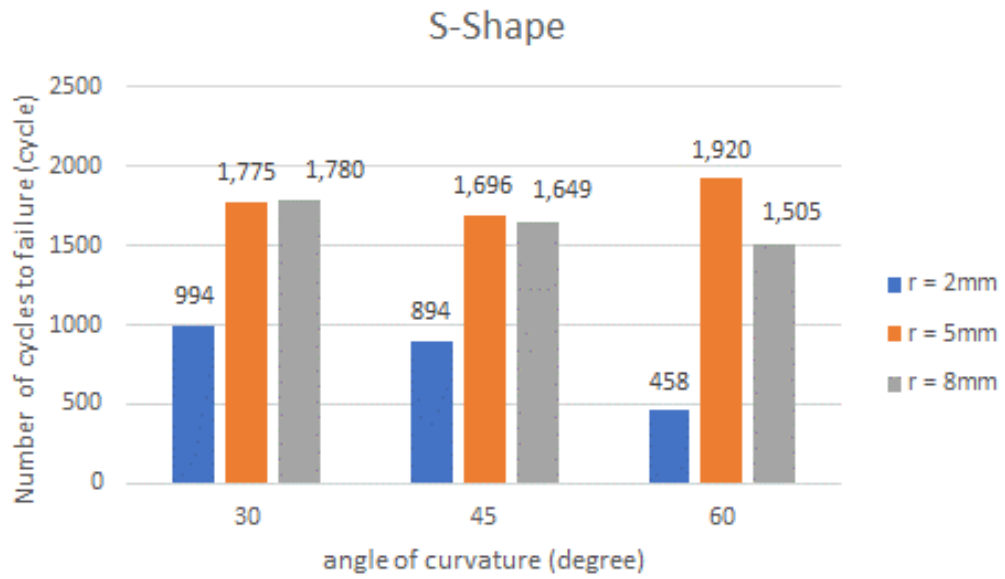




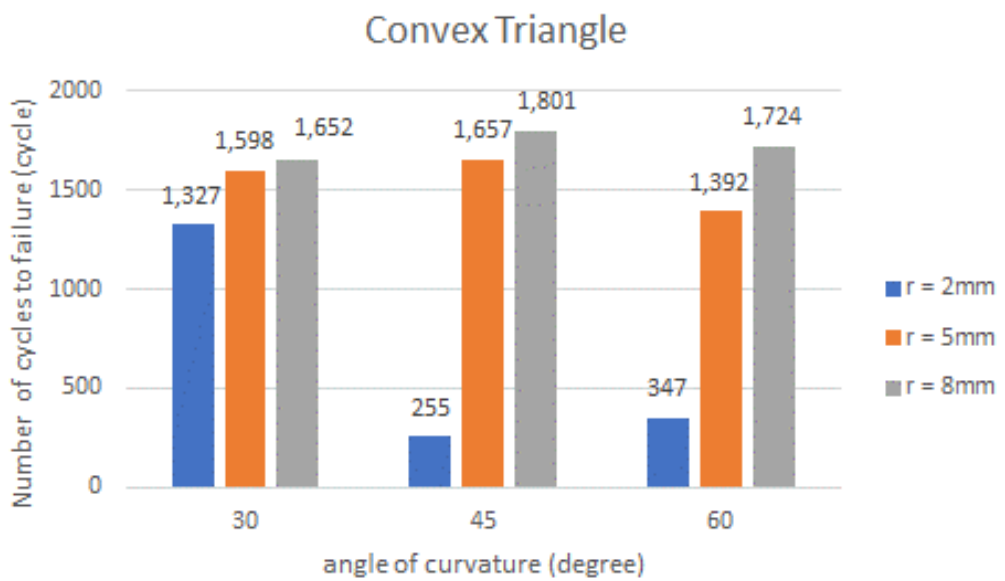
รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยม



รูปที่ 7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดรูปตัว S



รูปที่ 7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้ากับรูปร่างคลองรากฟันของตะไบหน้าตัดสามเหลี่ยมมน

### 7.3 อภิปรายผล

ในบทนี้ได้วิเคราะห์ความล้าของตะไบหมุนทางทันตกรรม โดยอิงข้อมูลความเค้นและความเครียดที่ได้จากบทที่ 6 มาใช้ประเมินอายุความล้าโดยประมาณของตะไบหมุนภายใต้เงื่อนไขภาระต่าง ๆ โดยการประยุกต์ใช้  $\epsilon$ -N curve และ S-N curve เฉพาะของตะไบแบบหมุน ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลการวิจัยที่มีอยู่เกี่ยวกับการทดลองความล้าของตะไบแบบหมุนมาประกอบกับความเค้นที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาสร้าง S-N curve เฉพาะของชิ้นงานนี้

ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบอายุความล้าของตะไบแบบหมุนที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน 4 แบบ ซึ่งทำงานในคลองรากฟันลักษณะต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่าตะไบที่มีหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเมื่อเทียบกับตะไบที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังที่สังเกตได้จากการศึกษาโดย Roda-Casanova และคณะ นอกจากนี้การศึกษาของ Lee และคณะที่ได้ทดสอบหาอายุความล้าของตะไบแบบหมุนหลากหลายรุ่น โดยการทดลองหมุนภายในคลองรากฟันเทียมที่ถูกสร้างขึ้นมาให้มีความโค้งต่าง ๆ ผลลัพธ์จากการทดสอบได้ยืนยันว่าตะไบที่มีหน้าตัดรูปตัว S มีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ของวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้ การทำการทดลองหาอายุความล้าของตะไบแล้วนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์จะช่วยให้มั่นใจในความถูกต้องและความเหมาะสมของวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา

โดยสรุป การวิเคราะห์ความล้าในการศึกษานี้เลือกใช้ทั้งวิธี strain-life ผ่าน  $\epsilon$ -N curve และ stress-life ผ่าน S-N curve เพื่อประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การศึกษานี้มีความครอบคลุมและนำเสนอถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ในทั้งสองมุมมอง ซึ่งการวิเคราะห์ในทั้งสองมุมมองนี้จะทำให้สามารถประเมินและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ และช่วยให้ทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และอายุความล้าอย่างละเอียด ดังนั้น ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปรับปรุงการออกแบบและการเลือกตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมให้เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละสถานการณ์ การลดความเค้นหรือความเครียดให้น้อยลงด้วยการออกแบบตะไบ การเลือกวัสดุ และเทคนิคขั้นตอนที่เหมาะสม จะทำให้ตะไบมีความต้านทานต่อความล้าและยืดอายุการใช้งานของตะไบ

## บทที่ 8 สรุปผลการศึกษา

### 8.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้วิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมที่มีรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกันในคลองรากฟันลักษณะต่าง ๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการทำงานของตะไบเหล่านี้ให้เหมือนกับการรักษาคคลองรากฟันจริง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และนำข้อมูลความเค้นและความเครียดที่ได้ไปวิเคราะห์อายุความล้าของตะไบ เพื่อนำไปปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือทางทันตกรรมให้มีความแข็งแรงทนทานและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อทันตแพทย์ในการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสม ทำให้โอกาสความสำเร็จในการรักษาคคลองรากฟันเพิ่มมากขึ้น

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาตะไบแบบหมุนนิกเกิลไทเทเนียมที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปตัว S และสามเหลี่ยมมุม โดยมีส่วนผ่านศูนย์กลางภายนอกที่ปลายตะไบขนาด 0.25 มม. ความผาย 6% และระยะพิชย์ขนาด 3.2 มม. ตลอดความยาว 16 มม. ซึ่งตะไบแต่ละแบบถูกนำไปจำลองในคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งที่แตกต่างกัน 9 แบบ ในการศึกษาได้กำหนดรูปร่างของคลองรากฟันด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ รัศมีโค้งที่มีขนาด 2 มม. 5 มม. และ 8 มม. และมีมุมโค้งที่ 30 องศา 45 องศา และ 60 องศา เพื่อวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานภายในคลองรากฟัน ผลการวิเคราะห์พบว่าการจำลองลักษณะนี้เป็นปัญหาแบบภาระแกนเดียวเนื่องจากมีความเค้นและความเครียดเพียงองค์ประกอบเดียวที่โดดเด่นคือ องค์ประกอบในทิศ  $y$  หรือในแนวแกนของตะไบ ได้แก่ ความเค้นตั้งฉาก  $y$  ( $\sigma_y$ ) และความเครียดตั้งฉาก  $y$  ( $\varepsilon_y$ ) และเมื่อพิจารณาแอมพลิจูดความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{amp}^{node}$ ) และแอมพลิจูดความเครียดสูงสุด ( $\varepsilon_{amp}^{node}$ ) ในวัฏจักรความล้าที่เกิดขึ้นขณะตะไบหมุนภายในคลองรากฟัน พบว่าแอมพลิจูดของความเครียดจะแปรผกผันกับรัศมีโค้ง และแปรผันตามมุมโค้งของคลองรากฟัน โดยรัศมีโค้งมีอิทธิพลต่อแอมพลิจูดของความเครียดมากกว่ามุมโค้งและรูปร่างหน้าตัดของตะไบ ในขณะที่แอมพลิจูดของความเค้นไม่ได้แปรผันตามพารามิเตอร์ของรูปร่างคลองรากฟันดังเช่นกรณีของความเครียดเนื่องจากวัสดุ นิกเกิลไทเทเนียมมีสมบัติความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดไม่ได้แปรผันตรงต่อกันเหมือนวัสดุประเภทอื่น ๆ

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดยังมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมความล้า เนื่องจากการประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุนต้องอาศัยแอมพลิจูดของวัฏ

จักรความล้าไปคำนวณ และเปรียบเทียบความแข็งแรงของตะไบแต่ละแบบในเงื่อนไขภาระที่แตกต่างกัน โดยใช้ทั้งวิธี stress-life และ strain-life ในการประเมิน ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าวิธี strain-life มีผลการประเมินอายุความล้าที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าวิธี stress-life ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกันระหว่างความเครียดและอายุความล้า และจากการเปรียบเทียบพบว่า ตะไบที่มีหน้าตัดรูปตัว S มีอายุการใช้งานสูงกว่าตะไบที่มีหน้าตัดแบบอื่น ๆ อีก 3 แบบ ที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

โดยสรุป การศึกษานี้ได้นำเสนอแนวทางในการประเมินอายุความล้าของตะไบแบบหมุน โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการทำงานของตะไบแบบหมุนในเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อหาแอมพลิจูดความเค้นและความเครียดของวัสดุจักรความล้า ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับอายุความล้าของตะไบแบบหมุน และแสดงให้เห็นว่าทั้งรูปร่างหน้าตัดและรูปร่างคลองรากฟันมีผลต่อความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในตะไบแบบหมุน นอกจากนี้ ผลการศึกษายังนำไปสู่การพัฒนาแนวทางการออกแบบตะไบแบบหมุนที่มีความต้านทานต่อความล้าและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ลดโอกาสที่ตะไบจะแตกหักภายในคลองรากฟันระหว่างทำการรักษา ซึ่งจะประโยชน์ต่อการเลือกใช้เครื่องมือในการรักษาคลองรากฟันของทันตแพทย์

## 8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

การศึกษานี้ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และพฤติกรรมความล้าของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรม ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาการออกแบบตะไบแบบหมุนให้ดียิ่งขึ้นเรื่อย ๆ ไม่ว่าจะเป็นในด้านความต้านทานต่อความล้า ความแข็งแรงต่อแรงบิด และประสิทธิภาพโดยรวมในการตัด จึงมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องพิจารณาและปรับปรุงให้ดีขึ้นในการจำลองการทำงานของตะไบแบบหมุนขณะทำงานภายในคลองรากฟัน เพื่อให้ผลการจำลองที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ในการออกแบบตะไบแบบหมุน พารามิเตอร์ที่สนใจนอกจากรูปร่างหน้าตัดที่ส่งผลต่อความเค้นและความเครียดแล้ว ก็ยังมีพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น ความผาย ระยะพิทช์ และความเยื้องศูนย์กลางของหน้าตัด เป็นต้น และในปัจจุบันมีการออกแบบความผายและระยะพิทช์แบบไม่คงที่เพื่อให้เหมาะกับรูปร่างของคลองรากฟันที่มีความหลากหลายได้ใกล้เคียงมากขึ้น สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพตะไบและอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ การออกแบบรูปร่างหน้าตัดแบบใหม่

ที่ไม่มีอยู่ในตลาดปัจจุบันโดยใช้วิธีวิเคราะห์หารูปแบบตามเงื่อนไข (topology optimization) อาจเพิ่มความทนทานและประสิทธิภาพการรักษาคลวงรากฟันได้เช่นกัน และการพัฒนาแบบจำลองคลวงรากฟันให้มีรูปร่างหลากหลายและซับซ้อนยิ่งขึ้นก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากขึ้น

นอกเหนือจากการพิจารณาปัจจัยเกี่ยวกับการออกแบบตะไบแบบหมุนและคลวงรากฟันแล้ว ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิก็มีอิทธิพลเช่นกัน เนื่องจากโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมที่ใช้ในตะไบแบบ หมุนมีคุณสมบัติจำรูปที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิระหว่างการ จำลอง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขอบเขตการจำลองอยู่ในอุณหภูมิห้อง ในขณะที่การความเป็น จริงตะไบจะทำงานอยู่ภายในคลวงรากฟันที่อาจมีอุณหภูมิสูงถึง 37 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้จึงส่งผล อย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งรวมถึงกระบวนการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทน ไซต์ในนิกเกิลไทเทเนียม ดังนั้น การคำนึงถึงอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญในการจำลองสภาพการทำงานที่ ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่ออายุความล้าของตะไบอย่างกระบวนการอบชุบ ซึ่ง ปัจจุบันมีกรรมวิธีทางความร้อนหลากหลายรูปแบบในการผลิตตะไบแบบหมุน เพื่อปรับเปลี่ยน คุณสมบัติทางกลของโลหะให้มีความต้านทานต่อความล้าได้มากขึ้น ประกอบกับการคำนึงถึงแรงเสียด ทานที่เกิดระหว่างตะไบและผนังคลวงรากฟันในระหว่างการรักษาพร้อมด้วยจะช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ ครอบคลุมมากขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรมทางกลของตะไบแบบหมุน และผลกระทบต่อการกระจายความ เค้นและความเครียด ทั้งนี้ การทำการทดลองเพื่อหาอายุความล้าของตะไบแบบหมุนเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มี ความสำคัญ เนื่องจากสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการ วิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องและความเหมาะสมของวิธีการ วิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาได้

## บรรณานุกรม

1. Scheid, R.C. and J.B. Woelfel, *Woelfel's dental anatomy : its relevance to dentistry*. 7th ed. 2007, Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
2. Rzhанov, E.A. and T.S. Belyaeva. *Design features of rotary root canal instruments*. 2012.
3. Ruddle, C.J., P. Machtou, and J.D. West, *The shaping movement: fifth-generation technology*. Dent Today, 2013. **32**(4): p. 94, 96-9.
4. วัชรภักย์, ล., คลองรากฟัน :วิธีการรักษาและการแก้ปัญหา. 3rd ed. 2561: ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. Tabassum, S., K. Zafar, and F. Umer, *Nickel-Titanium Rotary File Systems: What's New?* Eur Endod J, 2019. **4**(3): p. 111-117.
6. Parashos, P. and H.H. Messer, *Rotary NiTi instrument fracture and its consequences*. J Endod, 2006. **32**(11): p. 1031-43.
7. Peters, O.A., Peters, C.I., Schönenberger, K. and Barbakow, F., *ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT*. International Endodontic Journal, 2003. **36**(2): p. 86-92.
8. Larsen, C.M., et al., *Cyclic Fatigue Analysis of a New Generation of Nickel Titanium Rotary Instruments*. Journal of Endodontics, 2009. **35**(3): p. 401-403.
9. Pedullà, E., et al., *Influence of cyclic torsional preloading on cyclic fatigue resistance of nickel - titanium instruments*. Int Endod J, 2015. **48**(11): p. 1043-50.
10. Zanza, A., et al., *A Paradigm Shift for Torsional Stiffness of Nickel-Titanium Rotary Instruments: A Finite Element Analysis*. Journal of Endodontics, 2021. **47**(7): p. 1149-1156.
11. Galal, M. and T.M. Hamdy, *Evaluation of stress distribution in nickel-titanium rotary instruments with different geometrical designs subjected to bending and torsional load: a finite element study*. Bulletin of the National Research Centre, 2020. **44**(1): p. 121.
12. Zhang, E.W., G.S. Cheung, and Y.F. Zheng, *A mathematical model for describing the mechanical behaviour of root canal instruments*. Int Endod J, 2011. **44**(1):

- p. 72-6.
13. Wei, X., et al., *Modes of failure of ProTaper nickel-titanium rotary instruments after clinical use*. J Endod, 2007. **33**(3): p. 276-9.
  14. Peng, B., et al., *Defects in ProTaper S1 instruments after clinical use: longitudinal examination*. Int Endod J, 2005. **38**(8): p. 550-7.
  15. Niño-Barrera, J.L., M.C. Aguilera-Cañón, and C.J. Cortes-Rodríguez, *Theoretical evaluation of Nickel-Titanium Mtwo series rotary files*. Acta Odontol Latinoam, 2013. **26**(2): p. 90-6.
  16. Zhang, E.W., G.S. Cheung, and Y.F. Zheng, *Influence of cross-sectional design and dimension on mechanical behavior of nickel-titanium instruments under torsion and bending: a numerical analysis*. J Endod, 2010. **36**(8): p. 1394-8.
  17. Hartmann, R.C., et al., *Methods for measurement of root canal curvature: a systematic and critical review*. Int Endod J, 2019. **52**(2): p. 169-180.
  18. Schneider, S.W., *A comparison of canal preparations in straight and curved root canals*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1971. **32**(2): p. 271-5.
  19. Pruett, J.P., D.J. Clement, and D.L. Carnes, Jr., *Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments*. J Endod, 1997. **23**(2): p. 77-85.
  20. Thompson, S.A., M.A.O. Al-Omari\*, and P.M.H. Dummer, *Assessing the shape of root canals: an in vitro method using microradiography*. International Endodontic Journal, 1995. **28**(2): p. 61-67.
  21. Willershausen, B., et al., *Roentgenographic in vitro investigation of frequency and location of curvatures in human maxillary premolars*. J Endod, 2006. **32**(4): p. 307-11.
  22. Zhang, R. and T. Hu, *Root canal curvature*. International Endodontic Journal, 2010. **43**(7): p. 616-618.
  23. Fuentes, R., et al., *Distal root curvatures in mandibular molars: analysis using digital panoramic X-rays*. Folia Morphol (Warsz), 2018. **77**(1): p. 131-137.
  24. Cheung, G.S., E.W. Zhang, and Y.F. Zheng, *A numerical method for predicting the bending fatigue life of NiTi and stainless steel root canal instruments*. Int Endod J, 2011. **44**(4): p. 357-61.
  25. Lee, M.H., et al., *Correlation between experimental cyclic fatigue resistance*



- and numerical stress analysis for nickel-titanium rotary files. *J Endod*, 2011. **37**(8): p. 1152-7.
26. Roda-Casanova, V., et al., *Fatigue Analysis of NiTi Rotary Endodontic Files through Finite Element Simulation: Effect of Root Canal Geometry on Fatigue Life*. *J Clin Med*, 2021. **10**(23).
  27. Pawar, A.M., et al. *Cyclic Fatigue, Torsional Resistance, and Angular Deflection of Two Heat-Treated Files: M-Wire Versus New F-Wire Technology*. *Metals*, 2020. **10**, DOI: 10.3390/met10101359.
  28. Mecholsky, J.J., et al., *Fractographic analysis of separated endodontic file designs*. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2020. **31**(11): p. 104.
  29. Ahn, S., et al. *Advancement of Mechanical Properties of Nickel-Titanium Rotary Endodontic Instruments by Spring Machining on the File Shaft*. *Materials*, 2020. **13**, DOI: 10.3390/ma13225246.
  30. Gavini, G., et al., *Optimum glide path motion is safer than continuous rotation of files in glide path preparation*. *Australian Endodontic Journal*, 2021. **47**(3): p. 544-549.
  31. Silva, E., et al., *Cyclic and Torsional Fatigue Resistance of XP-endo Shaper and TRUShape Instruments*. *J Endod*, 2018. **44**(1): p. 168-172.
  32. Hibbeler, R.C. and K.B. Yap, *Mechanics of materials*. Tenth edition in SI units. Global edition ed. 2018, Harlow, England: Pearson Education.
  33. Tsuchiya, K., *1 - Mechanisms and properties of shape memory effect and superelasticity in alloys and other materials: a practical guide*, in *Shape Memory and Superelastic Alloys*, K. Yamauchi, et al., Editors. 2011, Woodhead Publishing. p. 3-14.
  34. ANSYS, I. *SMA Model for Superelasticity*. [cited 2021 Nov. 13]; Available from: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/ans\\_mat/smas.html%23matsmasuperelas](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/ans_mat/smas.html%23matsmasuperelas).
  35. Roda-Casanova, V., et al., *Influence of Cross-Section and Pitch on the Mechanical Response of NiTi Endodontic Files under Bending and Torsional Conditions-A Finite Element Analysis*. *J Clin Med*, 2022. **11**(9).
  36. Gibson, R.F., *Principles of composite material mechanics*. 2016, CRC Press.

37. Lee, H.-H., *Finite element simulations with ANSYS Workbench 2021*. 2021, Mission: SDC Publications.
38. เดชะอำไพ, ป., การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโต๊ะช่างแอนซิส. 2017: บริษัท แคด ไอที คอนซัลแทนส์ (เอเชีย) พีทีอี ลิมิเต็ด.
39. Wassef Syed, P.E., *All Models are Wrong - Structural analysis with ANSYS Workbench*. 2022.
40. ANSYS, I., *ANSYS Contact Technology Guide*. 2004.
41. Sunar, Ö. *Ansyc Contact Types and Explanations*. 2021; Available from: <https://www.mechhead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/>.
42. Kim, H.C., et al., *Mechanical response of nickel-titanium instruments with different cross-sectional designs during shaping of simulated curved canals*. Int Endod J, 2009. **42**(7): p. 593-602.
43. Kim, T.O., et al., *Stress distribution of three NiTi rotary files under bending and torsional conditions using a mathematic analysis*. Int Endod J, 2009. **42**(1): p. 14-21.
44. Xu, X., et al., *Comparative study of torsional and bending properties for six models of nickel-titanium root canal instruments with different cross-sections*. J Endod, 2006. **32**(4): p. 372-5.
45. Cheung, G.S. and B.W. Darvell, *Fatigue testing of a NiTi rotary instrument. Part 1: Strain-life relationship*. Int Endod J, 2007. **40**(8): p. 612-8.
46. Sobotkiewicz, T., et al., *Effect of canal curvature location on the cyclic fatigue resistance of reciprocating files*. Clin Oral Investig, 2021. **25**(1): p. 169-177.



ภาคผนวก

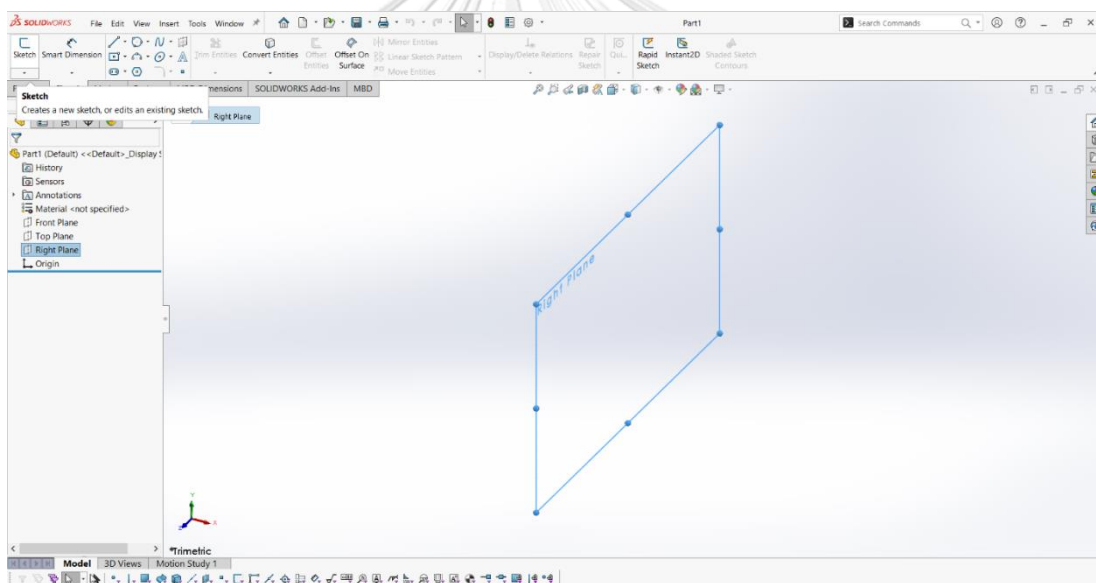
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

### ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองตะไบแบบหมุน

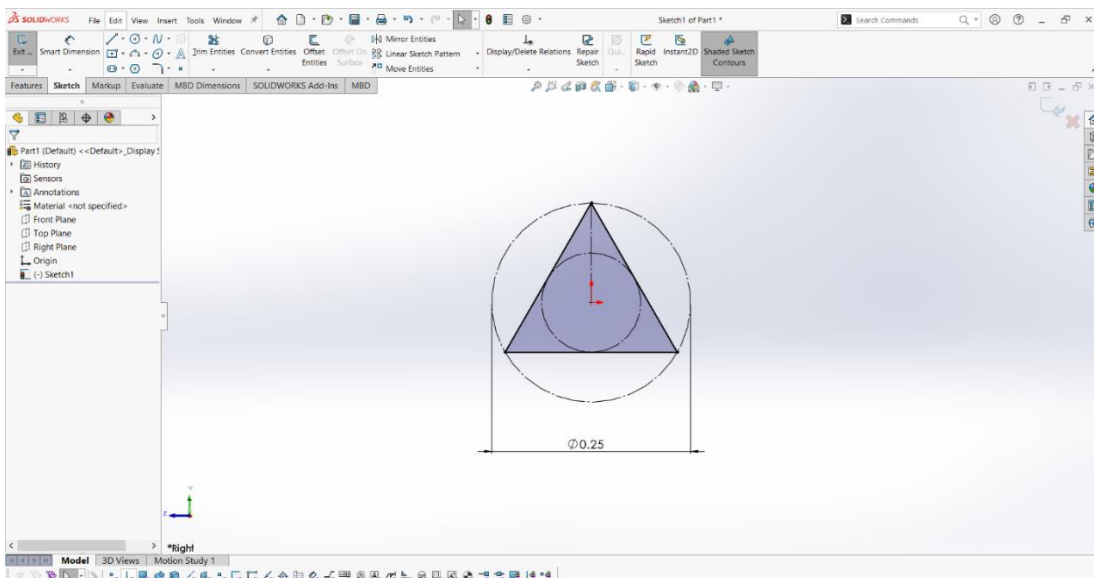
ซอฟต์แวร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design) สามารถออกแบบชิ้นงาน 3 มิติได้ครอบคลุมทุกกลุ่มอุตสาหกรรม และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ช่วยให้วิศวกรลดระยะเวลาในการออกแบบ และลดข้อผิดพลาดจากการสื่อสารระหว่างการออกแบบ สำหรับการสร้างแบบจำลองของตะไบแบบหมุนทางทันตกรรมที่มีรูปร่างเรียวยาว และมีคมตัดเป็นเกลียวมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองตะไบแบบหมุนเริ่มต้นด้วยการสร้างหน้าตัดที่ปลายตะไบ (ตำแหน่ง  $D_0$ ) โดยการเลือกระนาบ (Plane) ที่ต้องการจะวาดหน้าตัดที่เมนูด้านซ้ายมือ แล้วคลิก Sketch ในเมนู Sketch ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ A-1



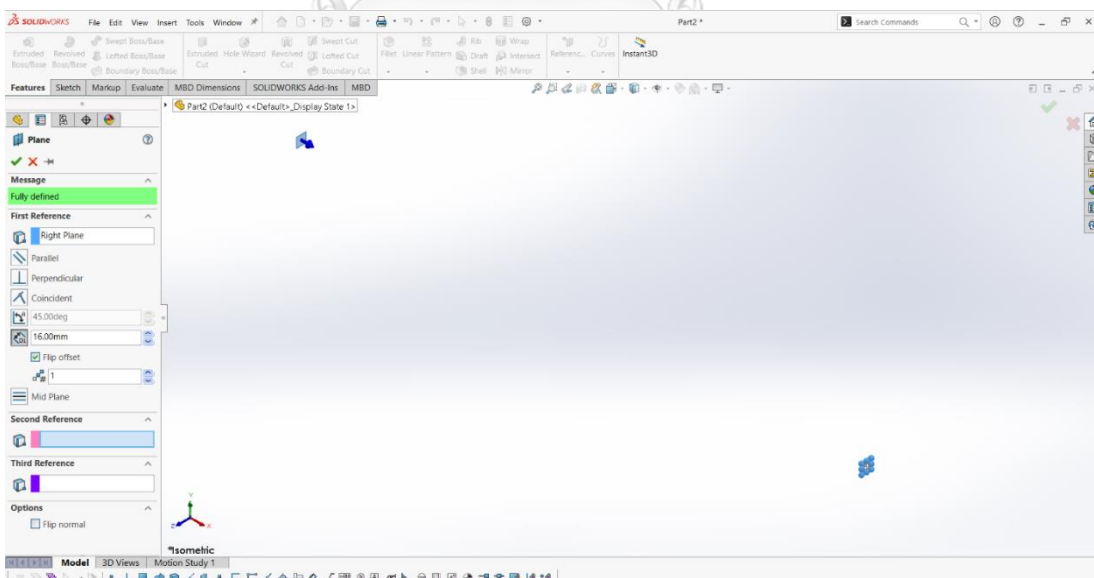
รูปที่ A-1 การกำหนดระนาบที่ต้องการ sketch

2) วาดหน้าตัดที่ต้องการศึกษาลงในระนาบดังกล่าว ซึ่งในการศึกษานี้ได้กำหนดรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ Equilateral Triangle, Square, S-Type, Convex Triangle และกำหนดขนาดต่าง ๆ ของรูปร่างหน้าตัด โดยคลิกที่ Smart Dimensions ดังแสดงในรูปที่ A-2 สำหรับขนาดหน้าตัดที่ปลายตะไบในการศึกษานี้ได้กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงกลมมีขนาด 0.25 มม.



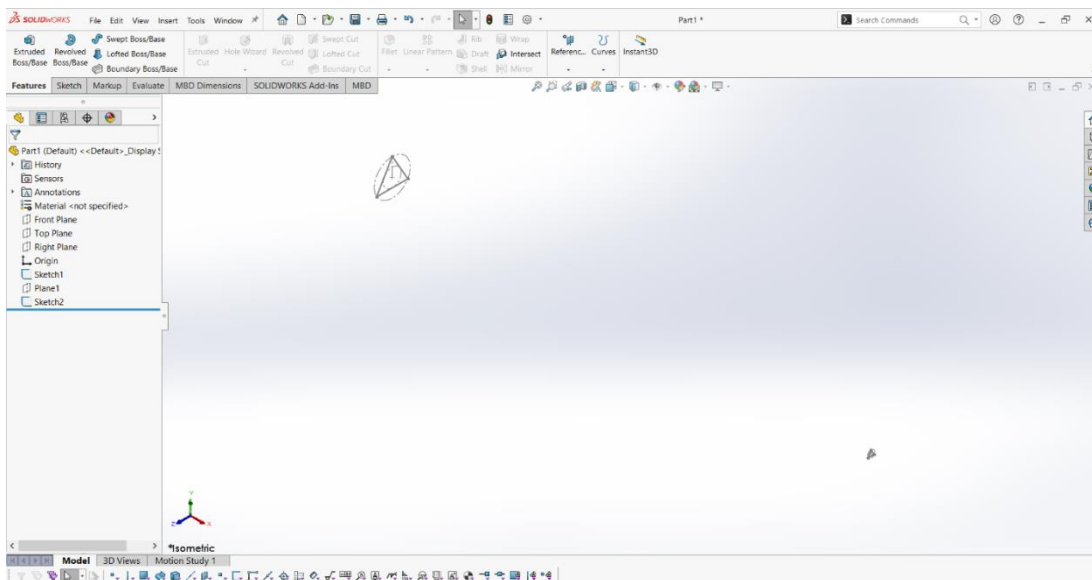
รูปที่ A-2 การวาดหน้าตัดที่ตำแหน่งปลายตะไบ

3) หลังจากที่ได้หน้าตัดที่ปลายตะไบเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างหน้าตัดที่โคนตะไบในส่วนมีคม ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระยะห่างจากปลายตะไบ 16 มม. (ตำแหน่ง  $D_{16}$ ) โดยคลิกที่ Reference ได้เมนู Features แล้วเลือก Plane เพื่อสร้างระนาบที่ระยะ 16 มม. ดังแสดงในรูปที่ A-3



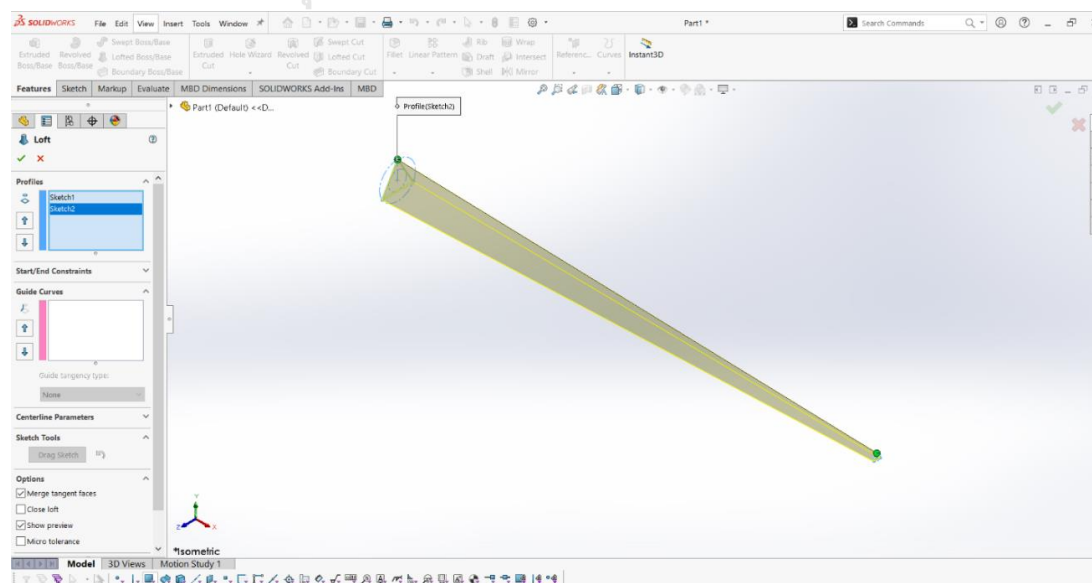
รูปที่ A-3 การสร้างระนาบที่ต้องการวาดหน้าตัดที่ตำแหน่งโคนตะไบ

4) คลิก Sketch ในเมนู Sketch เพื่อวาดหน้าตัดที่ตำแหน่ง  $D_{16}$  ซึ่งเป็นหน้าตัดลักษณะเดียวกับที่ตำแหน่ง  $D_0$  แต่มีขนาดใหญ่กว่าดังแสดงในรูปที่ A-4 ขนาดของหน้าตัดที่ตำแหน่งนี้ขึ้นอยู่กับความผายที่ต้องการศึกษา ซึ่งในการศึกษานี้ได้กำหนดความผายที่ 6% ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงกลมจึงมีขนาด 1.21 มม.



รูปที่ A-4 การวาดหน้าตัดที่ตำแหน่งโคนตะใบ

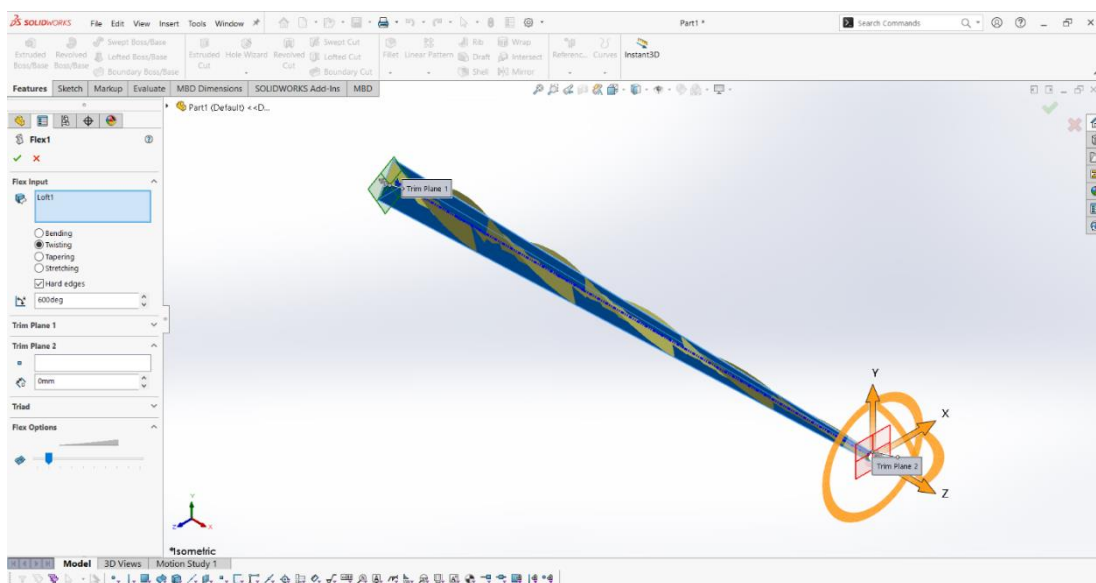
5) เมื่อได้หน้าตัดทั้ง 2 ตำแหน่งแล้วจึงเริ่มสร้างวัตถุ (body) ขึ้นมา โดยการคลิกที่ Lofted Boss/Base ในเมนู Features เมื่อหน้าต่างด้านซ้ายมือปรากฏขึ้นมาให้เลือก profiles sketch ของหน้าตัดทั้งสองตำแหน่งของตะใบ เพื่อสร้างตะใบให้มีลักษณะเรียวยาวดังแสดงในรูปที่ A-5



รูปที่ A-5 การสร้างรูปร่างของปัญหา

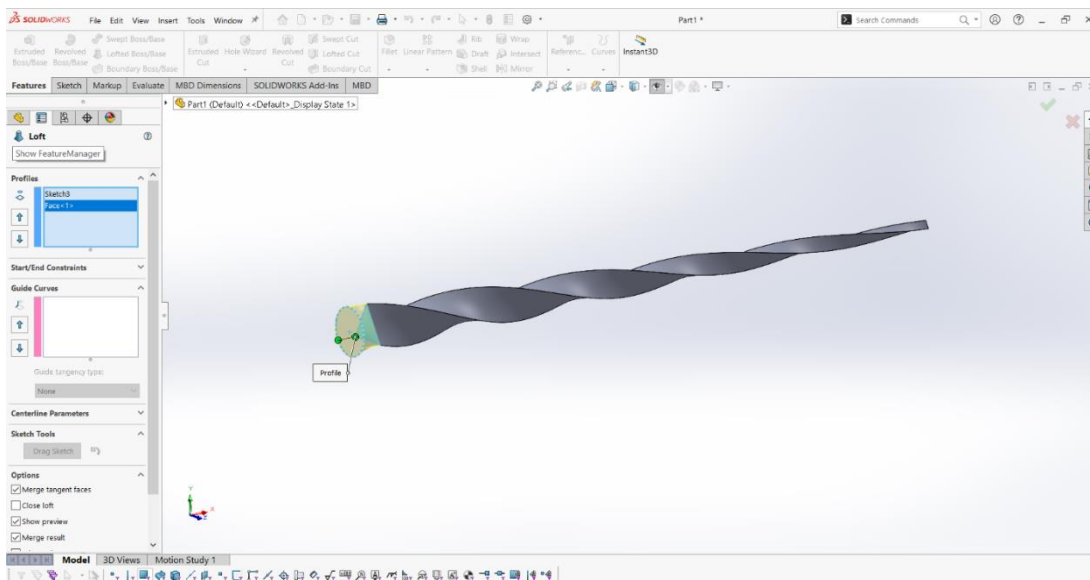
6) เมื่อได้วัตถุที่มีรูปร่างเรียวยาวเรียบร้อยแล้ว ในขั้นต่อไปจึงสร้างเกลียวให้กับวัตถุด้วยการคลิกที่เมนู Insert ด้านบนสุด เลือก Features ตามด้วยคำสั่ง Flex เมื่อปรากฏหน้าต่างด้านซ้ายมือขึ้นมา ให้เลือกวัตถุที่ต้องการทำเป็นเกลียว แล้วเลือกเป็น twisting ใส่ค่ามุม twist ที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ A-6 โดยการศึกษาที่กำหนดระยะพิชียให้มีขนาด 3.2 มม. หรือมีเกลียวจำนวน 5 เกลียวตลอดความยาวของตะไบ สำหรับมุม twist ที่ใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$360 \times \frac{\text{จำนวนเกลียวที่ต้องการสร้าง}}{\text{จำนวนมุมของหน้าตัดนั้น}} \quad (\text{A-1})$$

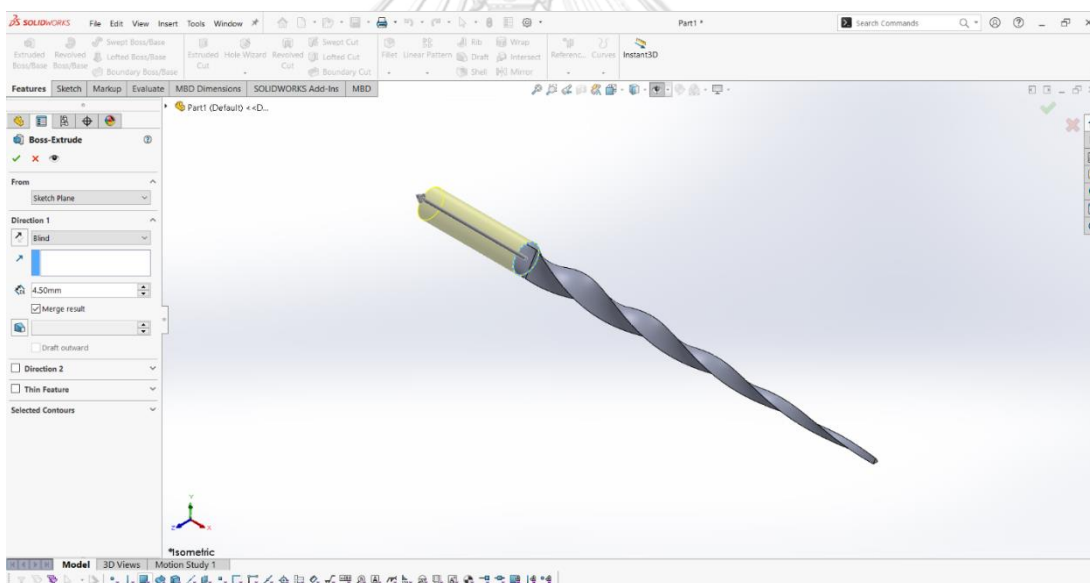


รูปที่ A-6 การสร้างเกลียวให้กับวัตถุ

7) หลังจากได้แบบจำลองของตะไบในส่วนมีคมแล้ว ในขั้นต่อไปจะสร้างส่วนไม่มีคมของตะไบ ซึ่งมีหน้าตัดเป็นวงกลม โดยเริ่มจากสร้างหน้าตัดที่ระยะห่างจากโคนตะไบ (ตำแหน่ง  $D_{16}$ ) ประมาณ 0.5 - 1 มม. และ sketch วงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหน้าตัดที่ตำแหน่ง  $D_{16}$  แล้วคลิกที่ Lofted Boss/Base ในเมนู Features เลือก Profiles sketch ของหน้าตัดทั้ง 2 ดังแสดงในรูปที่ A-7 จากนั้นคลิกที่ Extruded Boss/Base ในเมนู Features แล้วดึงส่วนท้ายของส่วนไม่มีคมให้ยื่นออกมาจนมีระยะ 5 มม. ดังแสดงในรูปที่ A-8



รูปที่ A-7 การสร้างส่วนไม่มีคมของตะไบ

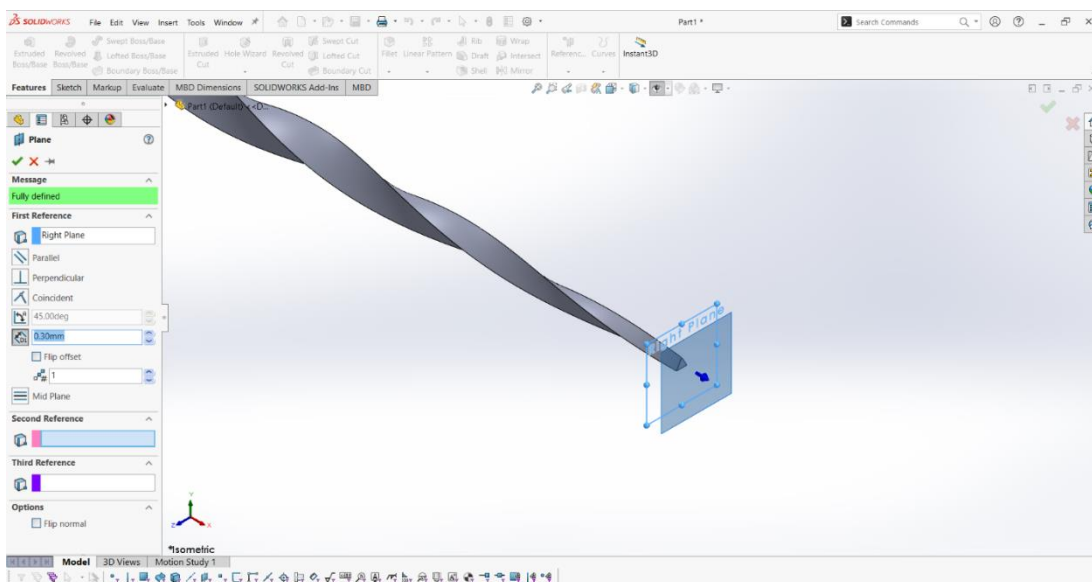


รูปที่ A-8 การสร้างส่วนไม่มีคมของตะไบ

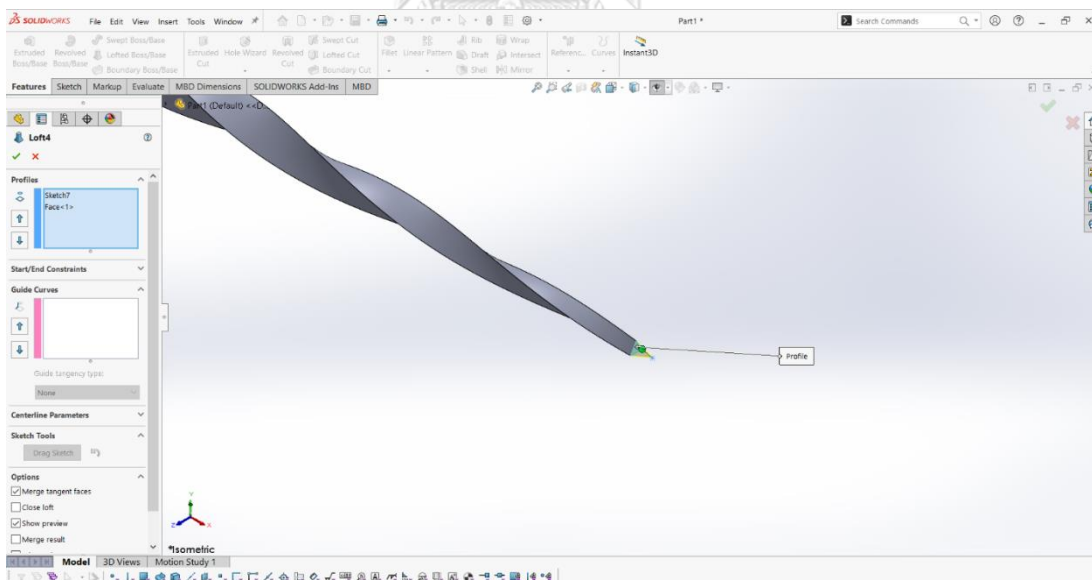
9) หลังจากที่สร้างตะไบทั้งส่วนมีคมและไม่มีคมเรียบร้อยแล้ว ในขั้นสุดท้ายของการสร้างแบบจำลองคือการสร้าง tip ของตะไบ โดยเริ่มจากการสร้างระนาบที่ระยะห่างจากปลายตะไบ (ตำแหน่ง  $D_0$ ) ประมาณ 0.3 มม. แล้วกด Sketch เลือกวาดเป็น Point ดังแสดงในรูปที่ A-9 จากนั้นคลิกที่ Lofted Boss/Base ในเมนู Features แล้วเลือก Profiles sketch ของหน้าตัดทั้ง 2 เพื่อ



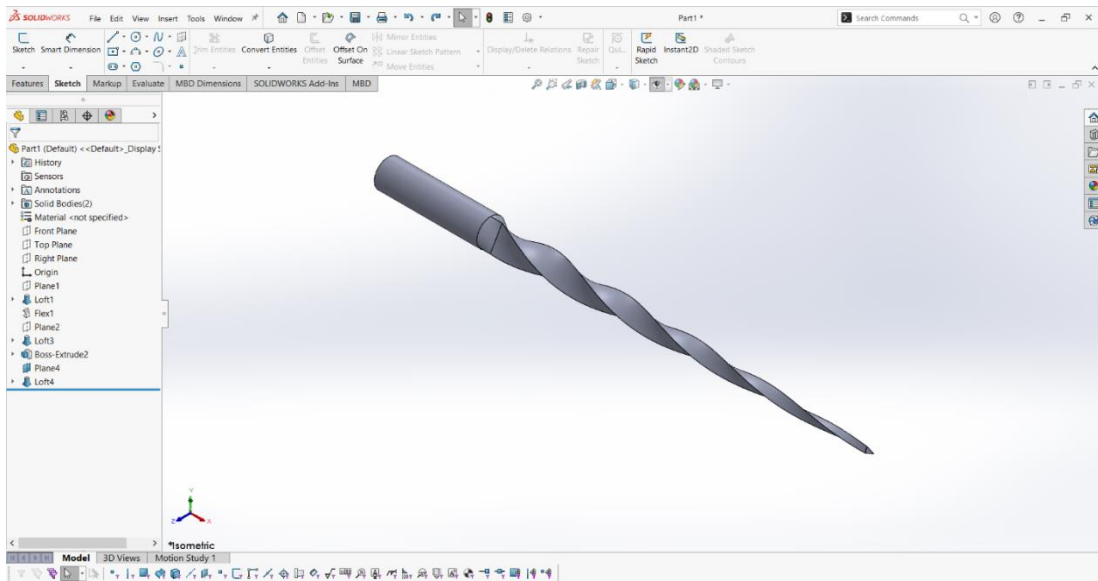
สร้าง tip ดังแสดงในรูปที่ A-10 เมื่อเสร็จสิ้นในขั้นตอนนี้ก็จะได้แบบจำลองของตะไบแบบหมุนเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไปดังแสดงรูปที่ A-11



รูปที่ A-9 การกำหนดระนาบ เพื่อเตรียมสร้าง tip ของตะไบ



รูปที่ A-10 การสร้าง tip ของตะไบ



รูปที่ A-11 แบบจำลองตะไบแบบหมุน

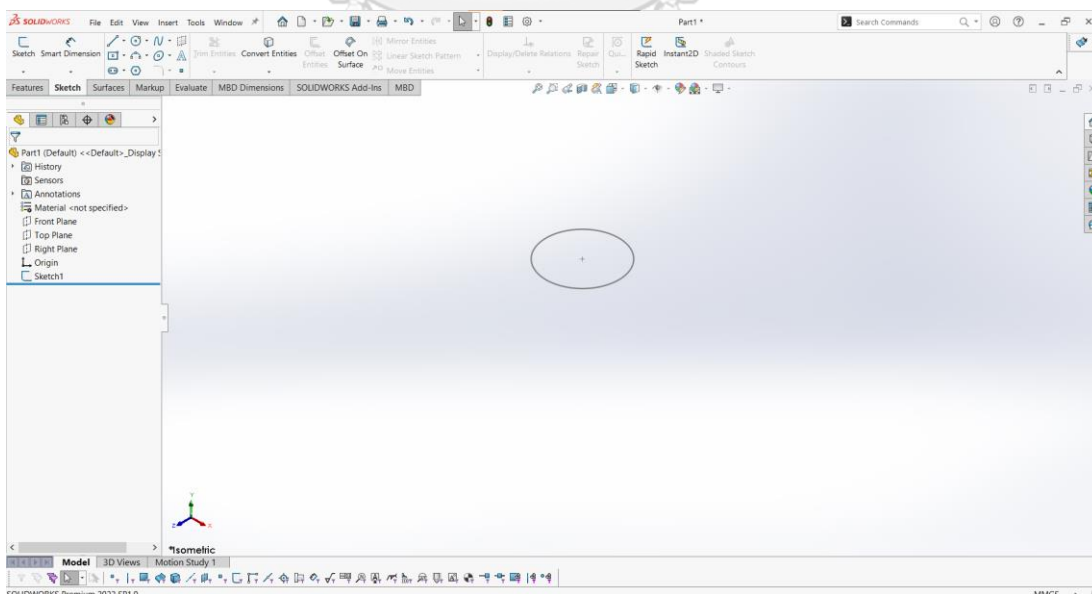


## ภาคผนวก ข

### ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคลองรากฟัน

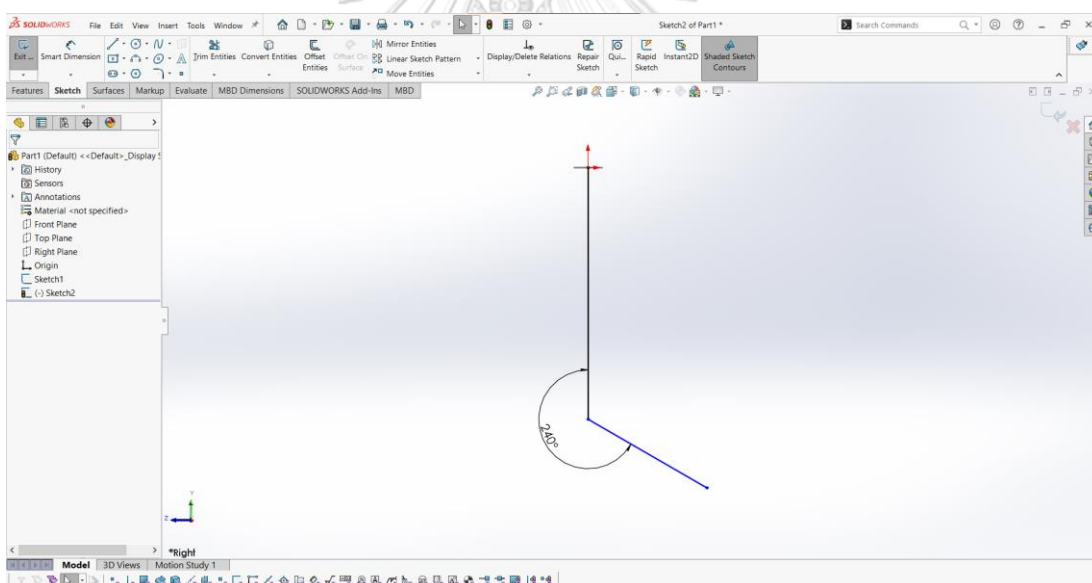
การสร้างแบบจำลองคลองรากฟันเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญในวิชานี้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะและพฤติกรรมทางกลของตะไบแบบหมุนที่ทำงานภายในคลองรากฟันที่มีรูปร่างแตกต่างกันได้ ซึ่งคลองรากฟันของมนุษย์มีลักษณะที่ซับซ้อนและแตกต่างกันไปแต่ละบุคคล ดังนั้น การสร้างแบบจำลองคลองรากฟันจึงต้องกำหนดพารามิเตอร์ของคลองรากฟันที่ชัดเจนเพื่อบ่งบอกถึงลักษณะความโค้งงอของคลองรากฟันได้ ในการศึกษาที่รูปร่างของคลองรากฟันถูกกำหนดด้วยรัศมีโค้งและมุมโค้ง และมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองคลองรากฟัน เริ่มจากกำหนดขนาดต่าง ๆ ของแบบจำลองคลองรากฟันให้เรียบร้อย ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางเข้าและทางออกของคลองรากฟัน ความหนาของผนังคลองรากฟัน ขนาดของรัศมีโค้งและมุมโค้งที่ต้องการศึกษา เมื่อกำหนดขนาดต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วจึงเริ่มวาดปากทางเข้าคลองรากฟัน โดยกำหนดระนาบที่ต้องการจะวาดที่เมนูด้านซ้ายมือ แล้วคลิก Sketch ในเมนู Sketch ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ A-12

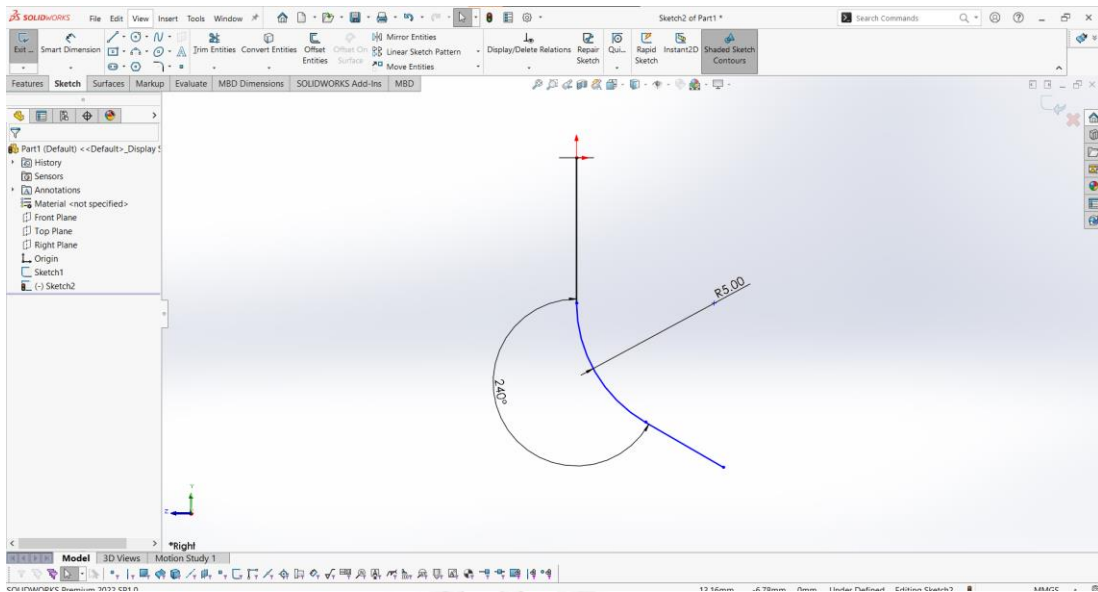


รูปที่ A-12 แบบร่างของปากทางเข้าคลองรากฟัน

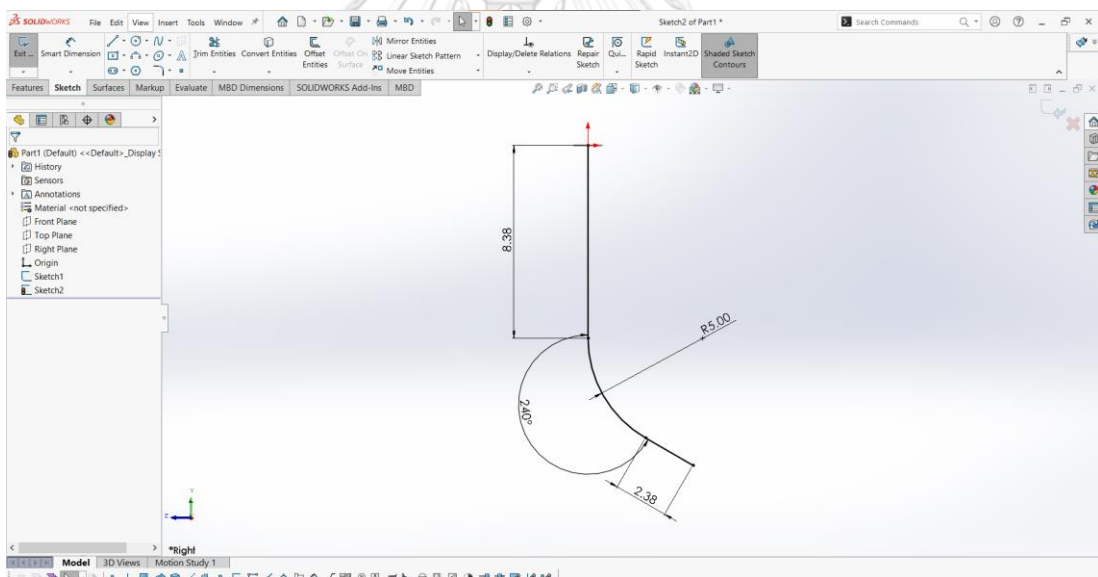
2) ในขั้นต่อไปจะวาดเส้นทาง (path) เพื่อกำหนดลักษณะความโค้งของคลองรากฟัน โดยเริ่มจากการวาดส่วนของเส้นตรง AB ให้ตั้งฉากกับระนาบที่วาดปากทางเข้าคลองรากฟัน จากนั้นวาดส่วนของเส้นตรง BC ให้ทำมุม  $\theta$  กับเส้นตรง AB ดังแสดงในรูปที่ A-13 และสร้างฟิเลต (fillet) โดยการวาดวงกลมรัศมี  $r$  สัมผัสกับส่วนของเส้นตรง AB และส่วนของเส้นตรง BC ที่จุด D และ E ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ A-14 ซึ่งรัศมีของวงกลมจะตั้งฉากกับเส้นตรงนั้น ๆ สำหรับการสร้างแบบจำลองในการศึกษาที่ต้องการให้จุดกึ่งกลางของส่วนโค้ง DE ของแบบจำลองทุกแบบที่ใช้ศึกษาอยู่ตำแหน่งเดียวกัน คือที่ระยะห่างจากปลายตะไบ 5 มม. (ตำแหน่ง  $D_5$ ) ดังนั้นเส้นตรง EC จึงมีขนาด  $5 - \frac{s}{2}$  เมื่อ  $s$  คือความยาวส่วนโค้ง ( $s = \theta r$ ) และต้องการให้ความยาวรวม ( $L$ ) มีขนาด 16 มม. จึงทำให้เส้นตรง AD มีขนาด  $11 - \frac{s}{2}$  ดังแสดงในรูปที่ A-15



รูปที่ A-13 กำหนดมุมโค้งของคลองรากฟัน

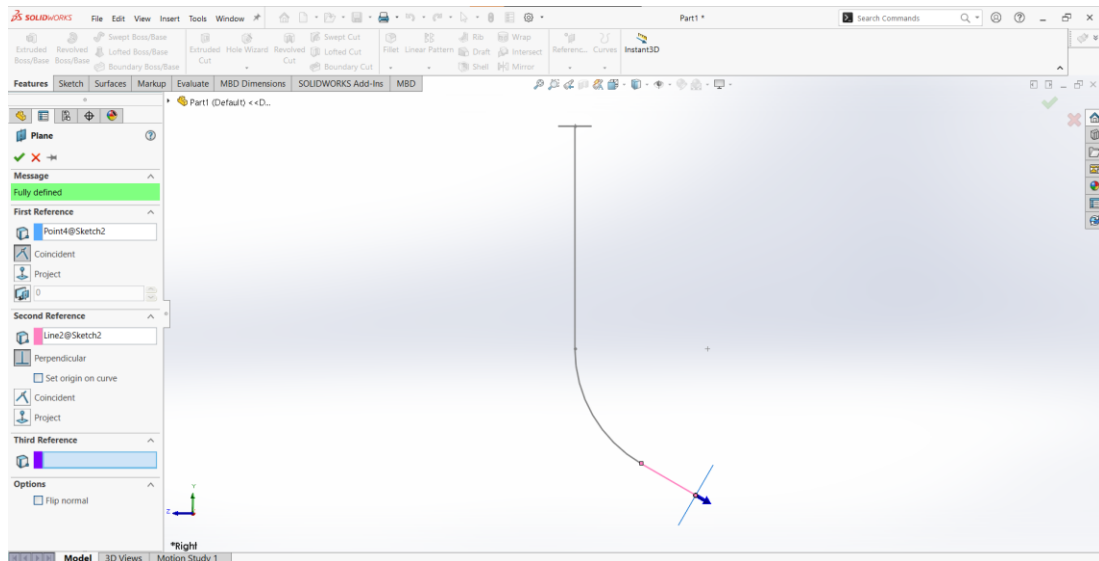


รูปที่ A-14 กำหนดรัศมีโค้งของคลองรากฟัน

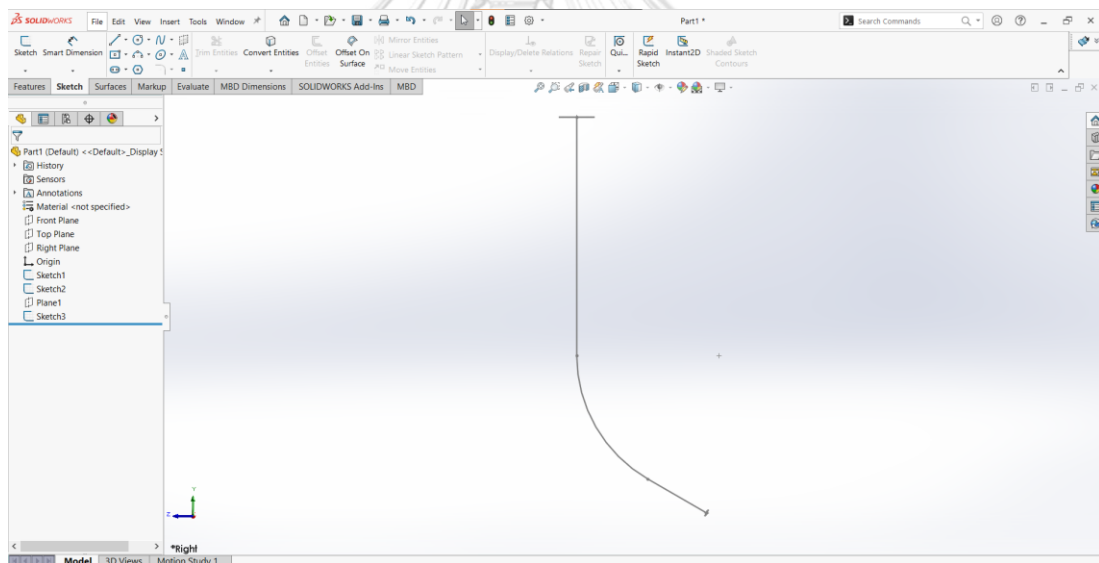


รูปที่ A-15 กำหนดขนาดต่าง ๆ ของคลองรากฟัน เพื่อให้มีความยาวรวม 16 มม.

3) ในขั้นต่อไปจะวาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกคลองรากฟัน โดยการคลิกที่ Reference geometry ภายใต้เมนู Features แล้วเลือก Plane เพื่อสร้างระนาบให้ตั้งฉากกับเส้นตรง EC ดังแสดงในรูปที่ A-16 จากนั้นกด sketch เพื่อวาดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ A-17

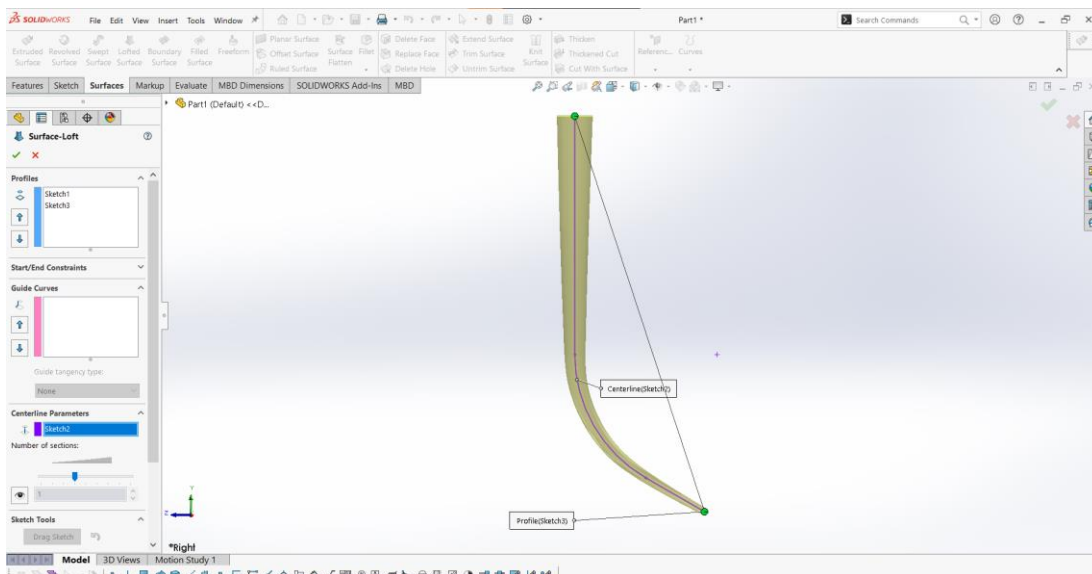


รูปที่ A-16 กำหนดระนาบเพื่อวาดปากทางออกคลองรากฟัน



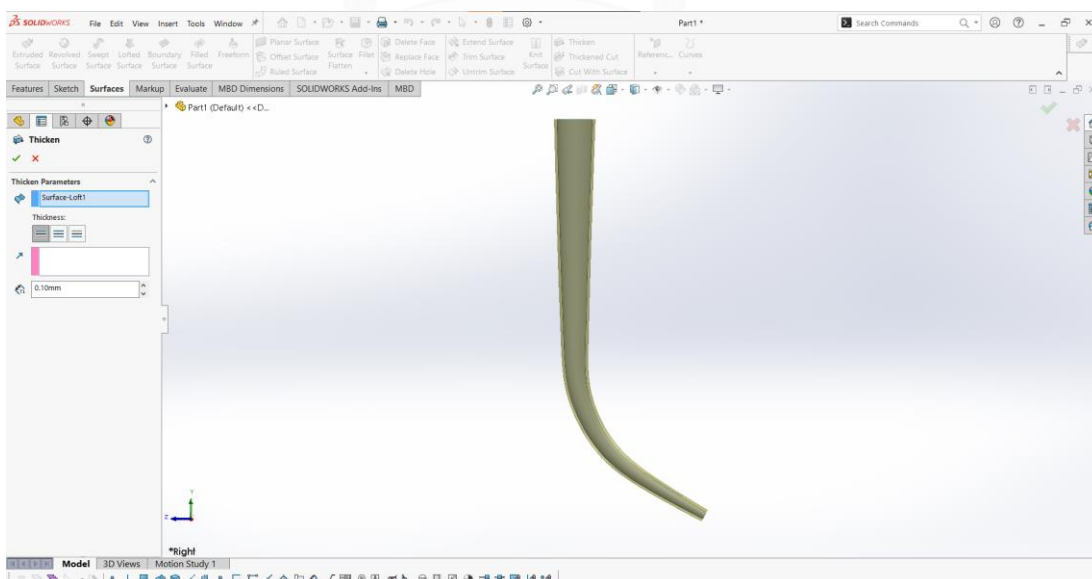
รูปที่ A-17 แบบร่างของปากทางออกคลองรากฟัน

4) เมื่อได้แบบร่างทุกอย่างครบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างพื้นผิวจากแบบร่าง โดยเลือกที่เมนู Surfaces แล้วเลือก Lofted Surface จะปรากฏหน้าต่างด้านซ้ายมือดังแสดงในรูปที่ A-18 ภายใต้เมนู Profiles ให้เลือกแบบร่างของปากทางเข้าและทางออกของคลองรากฟัน เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของพื้นผิว และภายใต้เมนู Centerline Parameter ให้เลือกแบบร่างที่ได้กำหนดความโค้งของคลองรากฟันไว้ ก็จะได้พื้นผิวของแบบจำลองคลองรากฟันที่มีลักษณะความโค้งตามต้องการ

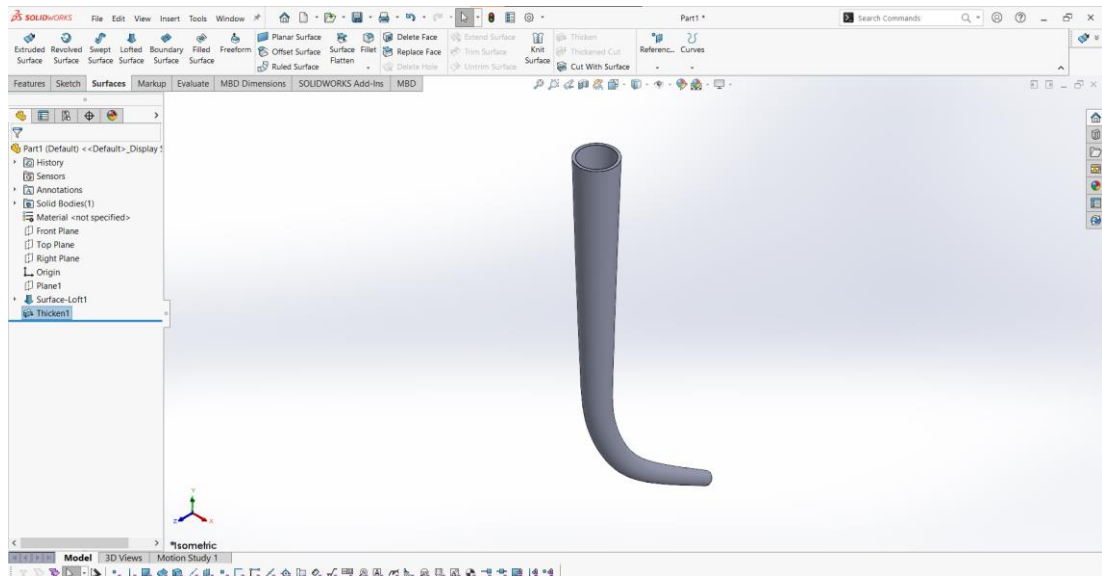


รูปที่ A-18 สร้างพื้นผิวแบบจำลองคลองรากฟัน

5) ในขั้นต่อไปหลังจากที่ได้พื้นผิวคลองรากฟันแล้วคือการสร้างความหนาให้กับพื้นผิวนี้ โดยการคลิกที่คำสั่ง Thicken ภายใต้เมนู Surface ดังแสดงในรูปที่ A-19 และกำหนดความหนาตามต้องการที่หน้าต่างด้านซ้ายมือ ซึ่งในการศึกษานี้ได้กำหนดความหนาของคลองรากฟันอยู่ที่ 0.1 มม. เมื่อเสร็จสิ้นในขั้นตอนนี้ก็จะได้แบบจำลองของคลองรากฟันเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไปดังแสดงในรูปที่ A-20



รูปที่ A-19 การกำหนดความหนาของคลองรากฟัน



รูปที่ A-20 แบบจำลองคลองรากฟัน





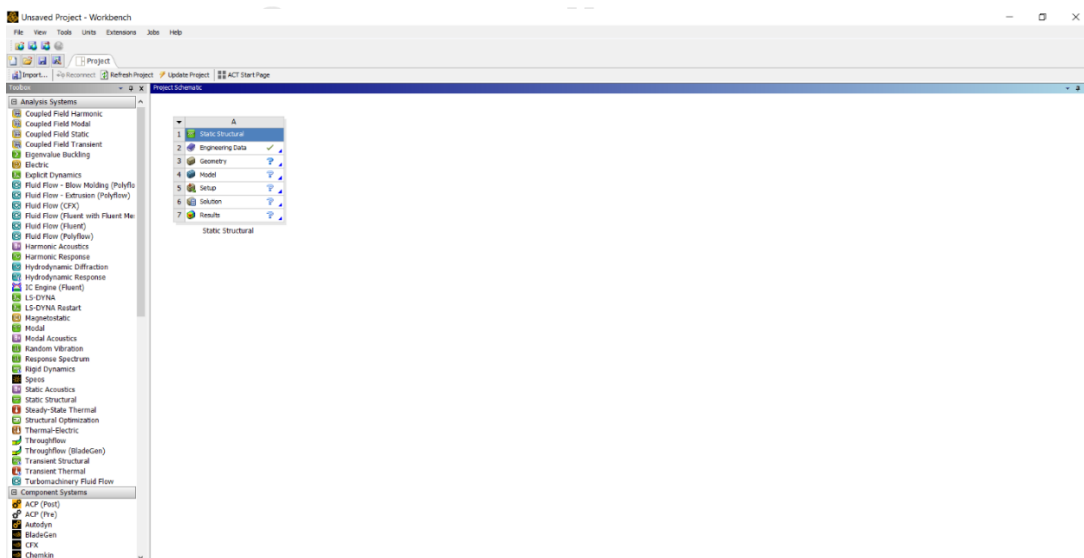
## ภาคผนวก ค

### ขั้นตอนการตั้งค่าซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

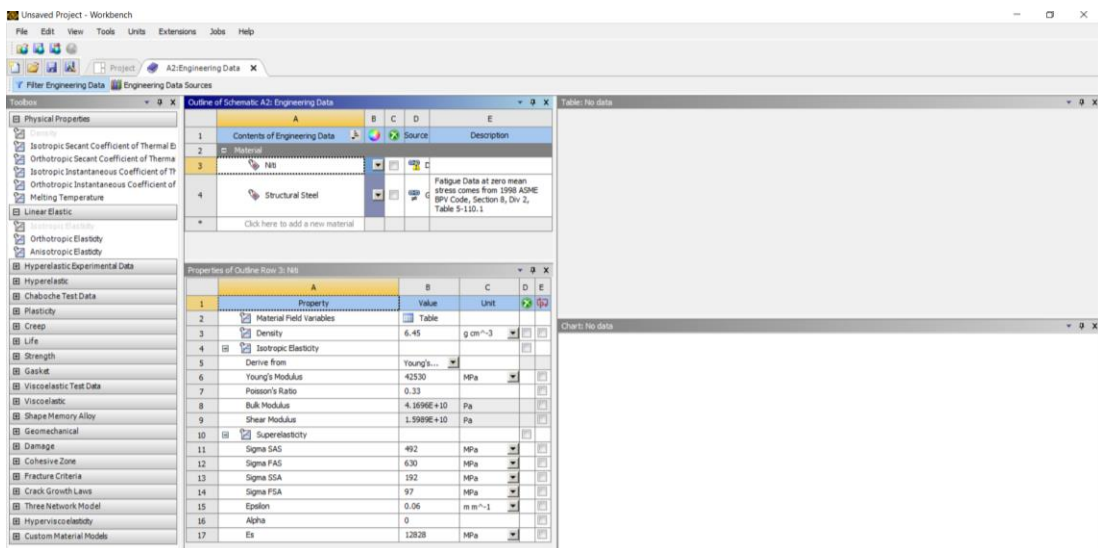
การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมในปัจจุบันนิยมใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ เนื่องจากปัญหาทางวิศวกรรมในโลกความเป็นจริงมีความซับซ้อนและยากต่อการวิเคราะห์ ทำให้การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์จะช่วยให้สามารถแก้ปัญหาได้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น ในภาคผนวกนี้จะอธิบายถึงวิธีการตั้งค่าซอฟต์แวร์เพื่อกำหนดเงื่อนไขการให้ภาระและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา โดยการใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Workbench 2022 R1 ในการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นขณะการทำงานของตะใบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการตั้งค่าเบื้องต้น โดยเปิดโปรแกรม ANSYS Workbench แล้วเลือก Static Structural ในหน้าต่าง Analysis Systems โดยจะปรากฏกล่องเล็ก ๆ ในหน้าต่าง Project Schematic ดังแสดงในรูปที่ A-21

2) จากนั้นจะกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ โดยการคลิกขวาที่ Engineering Data แล้วเลือก Edit หน้าต่าง Engineering Data จะปรากฏขึ้นมา กดที่ Click here to add a new material แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ โดยเลือกคุณสมบัติต่าง ๆ จากหน้าต่าง Toolbox ขวามือ ดังแสดงในรูปที่ A-22 หลังจากกำหนดสมบัติวัสดุเสร็จเรียบร้อยแล้วให้กดปิดหน้าต่าง Engineering Data ไป

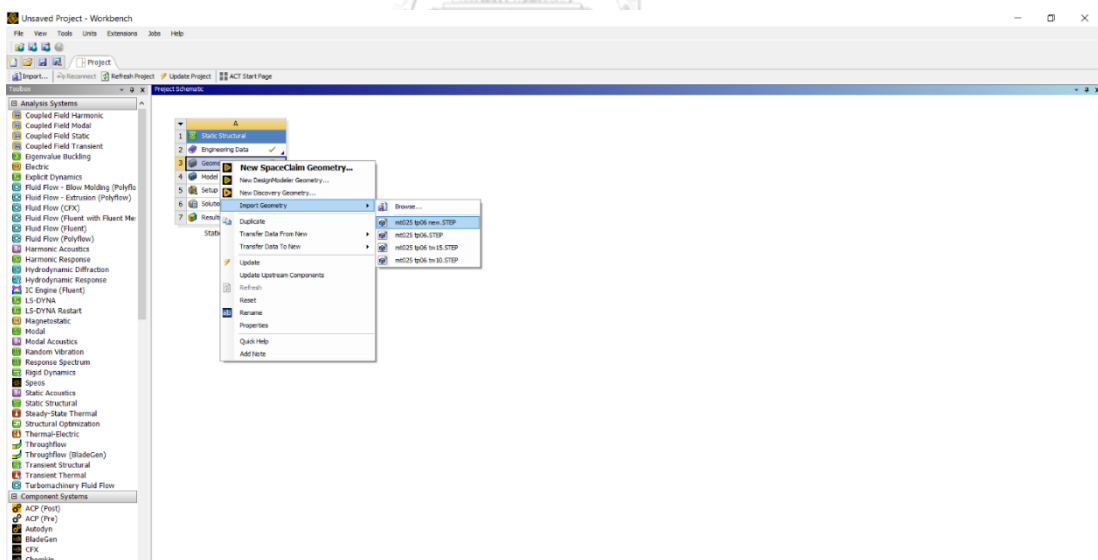


รูปที่ A-21 การกำหนด Analysis Systems



รูปที่ A-22 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

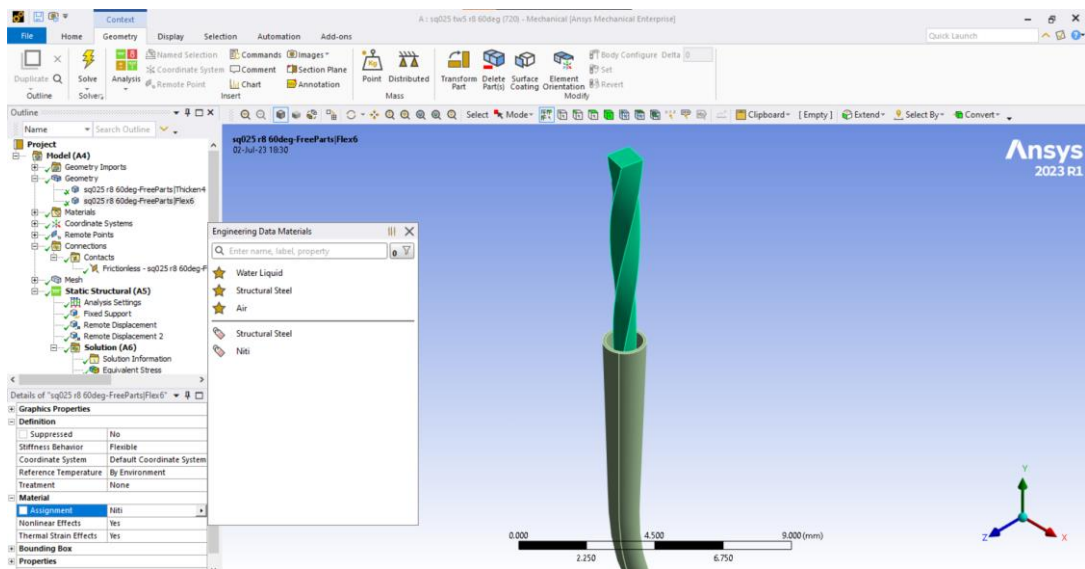
3) ในขั้นต่อไปจะสร้างรูปร่างของปัญหา โดยคลิกขวาที่ Geometry แล้วเลือก Import Geometry ทำการเลือกไฟล์ที่ได้สร้างไว้เพื่อ import เข้ามาในโปรแกรม หรือสามารถกดที่ New SpaceClaim Geometry เพื่อออกแบบรูปร่างใหม่ ดังแสดงในรูปที่ A-23



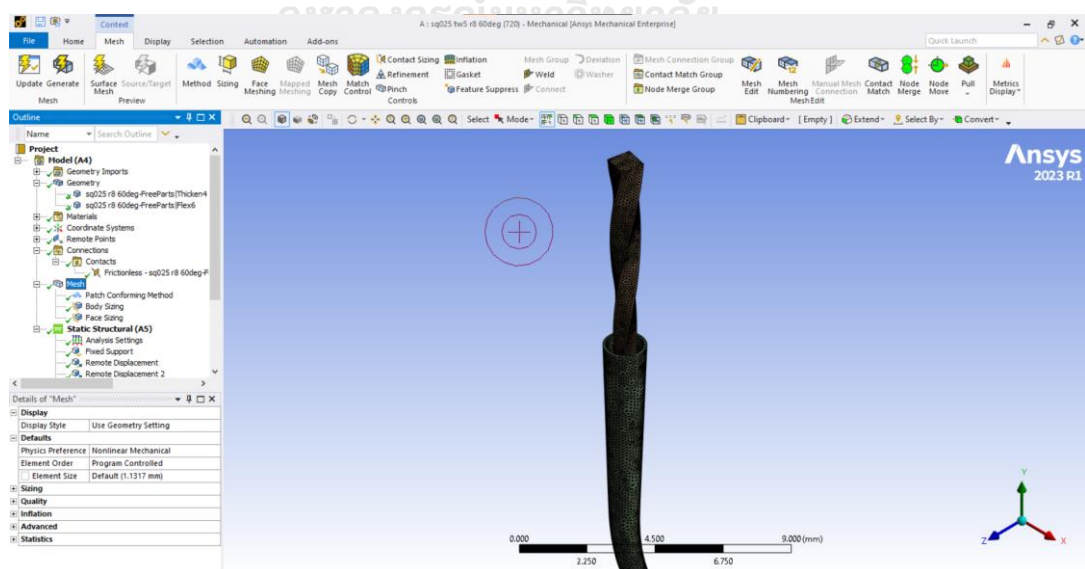
รูปที่ A-23 การสร้างรูปร่างของปัญหา

4) ดับเบิลคลิกที่ Model ในกล่อง Static structural เพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากกำหนดคุณสมบัติวัสดุให้ model โดยการดับเบิลคลิกที่ Geometry ในหน้าต่าง Outline คลิกที่ชื่อไฟล์ที่เมนูด้านซ้ายมือ สังเกตที่แถบ Assignment เปลี่ยนจาก Structural Steel

เป็นวัสดุที่ได้ตั้งค่าไว้ก่อนหน้านี้ ดังแสดงในรูปที่ A-24 จากนั้นกำหนดขนาดและรูปร่างเอลิเมนต์ของแบบจำลอง ซึ่งในการศึกษานี้ได้กำหนดให้รูปร่างของเอลิเมนต์เป็นทรงสี่หน้า (SOLID187) และให้แต่ละเอลิเมนต์มีขนาด 0.1 มม. โดยคลิกขวาที่ Mesh เลือก Insert และ Method หน้าต่าง Detail of “Automatic Method” จะปรากฏขึ้นทางด้านซ้ายล่าง เลือกชิ้นส่วนที่ต้องการ แล้วสังเกตที่เมนู Method ให้เปลี่ยนจาก Automatic เป็น Tetrahedral จากนั้นกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ โดยการกดที่ Sizing เลือกชิ้นส่วนที่ต้องการแล้วกำหนดขนาดเอลิเมนต์ให้เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ A-25

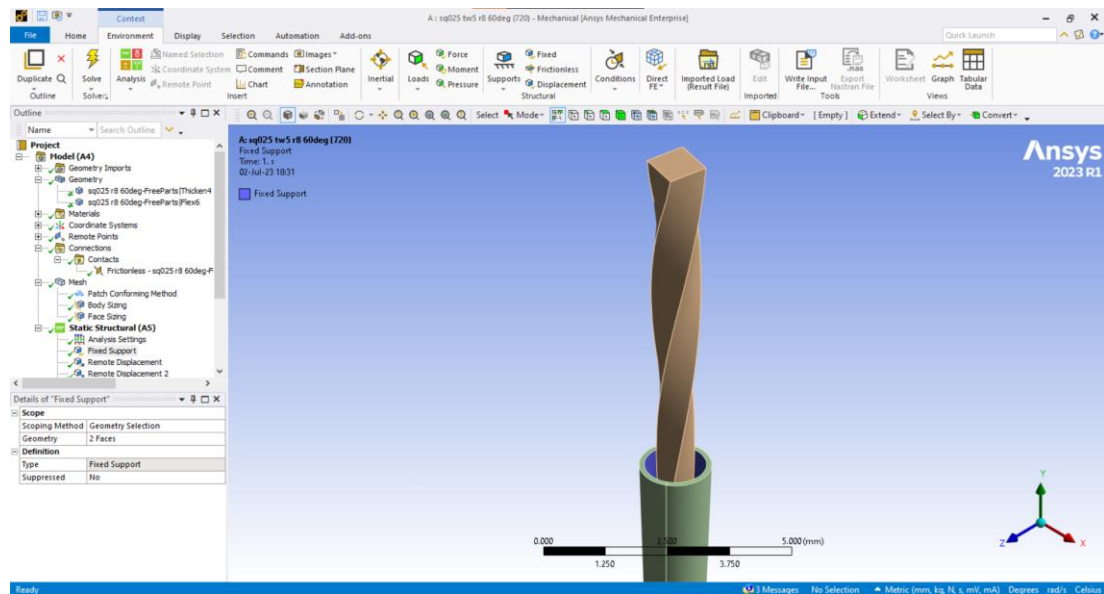


รูปที่ A-24 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลอง



รูปที่ A-25 การสร้างเมช

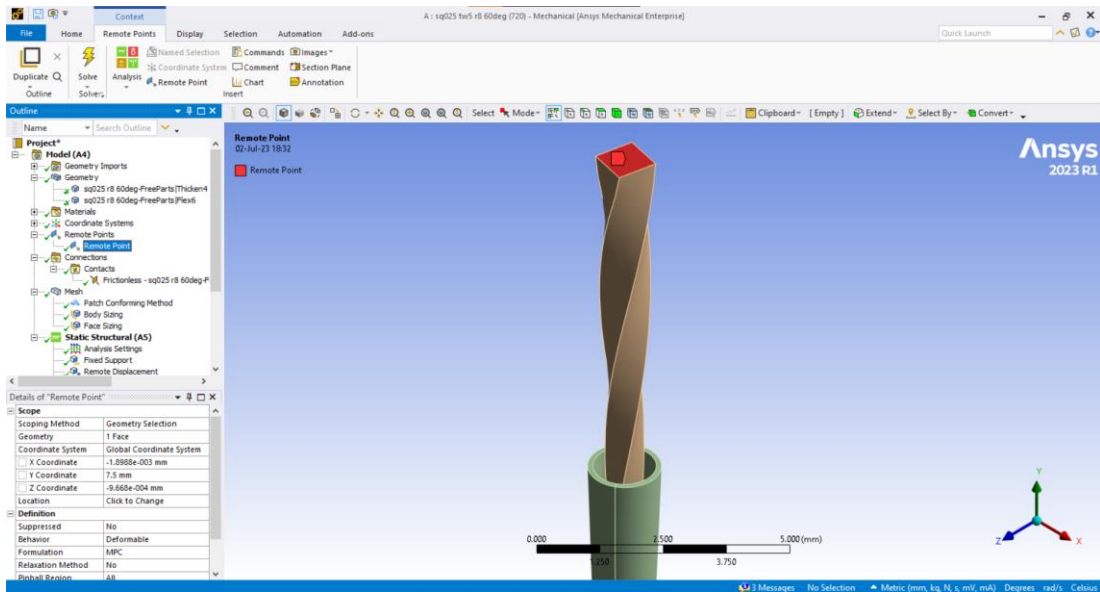
6) ในขั้นต่อไปจะกำหนดให้ผนังด้านในของคลองรากฟันยึดติดอยู่กับที่ โดยการคลิกที่ Analysis Setting ภายใต้ Static Structural ด้านซ้ายมือ เลือก Fixed Support ที่อยู่บนเมนู ด้านบน แล้วกำหนดพื้นผิวที่ต้องการจะยึด ดังแสดงในรูปที่ A-26



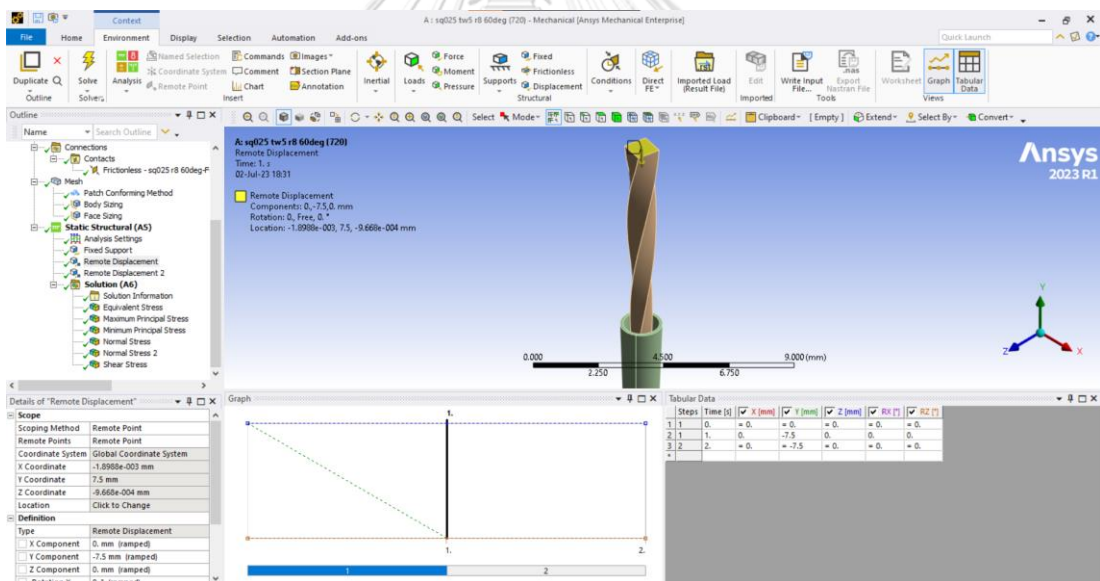
รูปที่ A-26 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

7) ขั้นตอนสำหรับการกำหนดเงื่อนไขภาระในการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของ ตะไบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการสอดตะไบเข้าไปในคลองรากฟัน และขั้นตอน การหมุนตะไบเพื่อจำลองกระบวนการทำงานภายในคลองรากฟัน ในการศึกษาที่โคนตะไบจะถูก กำหนดเป็นจุด Remote point ซึ่งใช้ในการให้ภาระดังแสดงในรูปที่ A-27

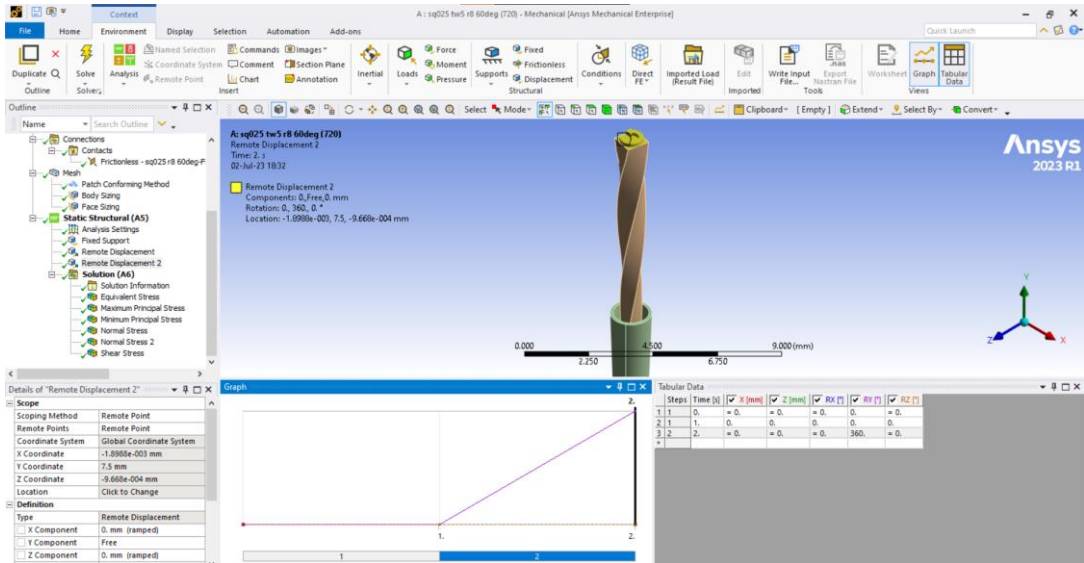
ในขั้นตอนแรกของการจำลองจะทำการสอดตะไบลงไปแนวตั้งจนกระทั่งปลายตะไบอยู่ที่ ตำแหน่งปลายคลองรากฟัน โดยการคลิกที่ Static Structural ที่อยู่หน้าทางด้านซ้ายมือ จากนั้นเลือก Supports ในเมนู Environment ที่อยู่ด้านบน แล้วเลือก Remote Displacement ขั้นตอนนี้จะ สามารถกำหนดภาระที่ประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่และการหมุนได้ เนื่องจากมี 6 องศาอิสระ โดยการกำหนด displacement ในแกน  $y$  และจำกัดการเคลื่อนที่ในแกน  $x$ ,  $z$  และการหมุนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ A-28 ในขั้นต่อไปหลังจากสอดตะไบเรียบร้อยแล้ว ตะไบจะถูกหมุนไป 360 องศา รอบแกน  $y$  ซึ่งสามารถตั้งค่าคล้ายกับขั้นตอนการสอดตะไบแต่เปลี่ยนไปให้ rotation displacement รอบแกน  $y$  แทน ส่วนการเคลื่อนที่อื่น ๆ จะถูกจำกัดไว้ (การหมุนรอบแกน  $x$ ,  $z$  และการเคลื่อนที่ทั้งหมด) ดังแสดงในรูปที่ A-29



รูปที่ A-27 การกำหนด remote point

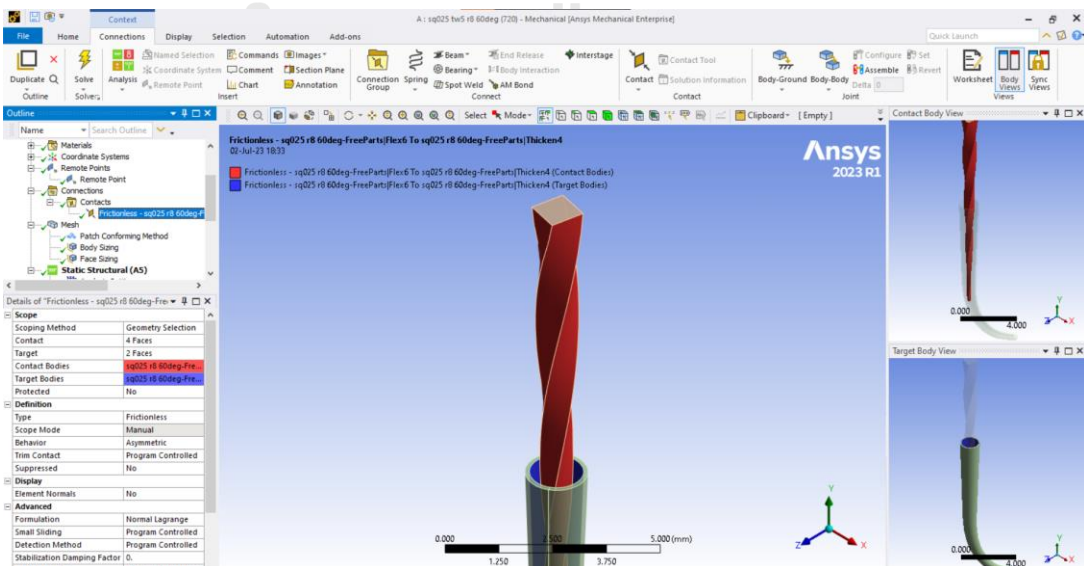


รูปที่ A-28 การกำหนดเงื่อนไขภาระ เพื่อสอดตะไต้



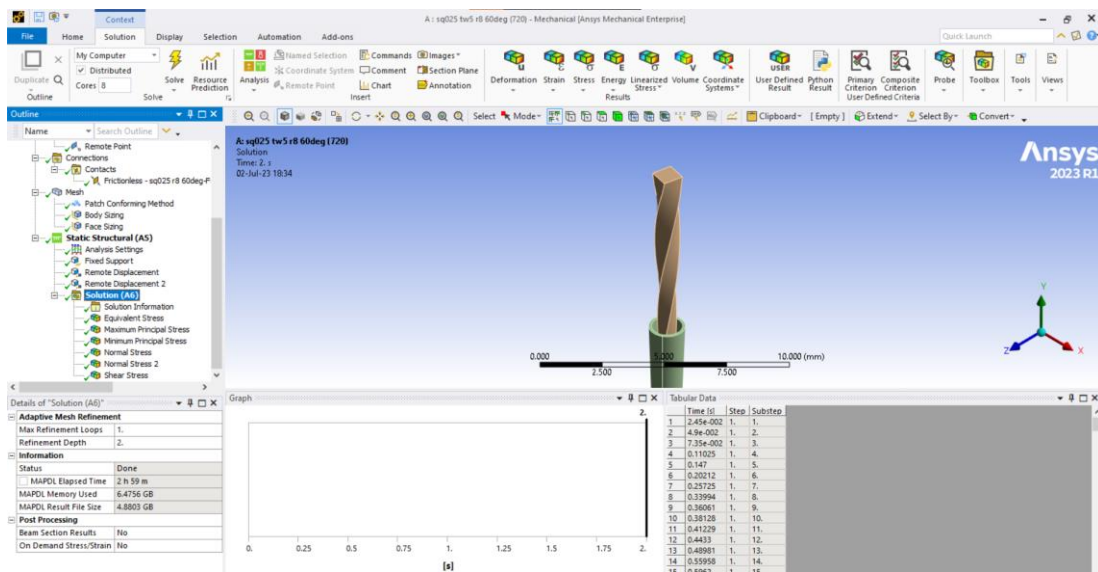
รูปที่ A-29 การกำหนดเงื่อนไขภาระ เพื่อหมุนตะไบ

8) การจำลองลักษณะนี้มีการสัมผัสกันระหว่างตะไบแบบหมุนและคลองรากฟัน จึงจำเป็นต้องตั้งค่าการสัมผัสเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยกำหนดให้พื้นผิวของตะไบเป็น contact surface (สีแดง) และพื้นผิวของคลองรากฟันเป็น target surface (สีน้ำเงิน) ดังแสดงในรูปที่ A-30 ในการศึกษานี้กำหนดให้ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างตะไบและคลองรากฟัน ซึ่งเป็นการสมมติให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเป็นศูนย์ และใช้วิธี normal lagrange ในการคำนวณ เนื่องจากวิธีนี้เหมาะสมสำหรับปัญหาที่สมบัตวิสต์ไม่เป็นเชิงเส้น และมีการสัมผัสที่มุมหรือขอบ



รูปที่ A-30 การกำหนดรูปแบบการสัมผัส

9) ในการแสดงผลให้คลิก Solution ที่หน้าต่างซ้ายมือ แล้วจะมีเมนู Solution ปรากฏขึ้นที่แถบเมนูด้านบน จากนั้นคลิกที่ปุ่มด้านบนในกลุ่ม Results แล้วเลือกผลลัพธ์ที่ต้องการหาคำตอบ ผลลัพธ์ที่ต้องการจะปรากฏที่หน้าต่าง Outline ด้านซ้ายมือได้ Solution แล้วกด Solve ที่เมนูด้านบน เพื่อให้ซอฟต์แวร์คำนวณหาคำตอบดังแสดงในรูปที่ A-31



รูปที่ A-31 การแสดงผลลัพธ์

## ประวัติผู้เขียน

|                   |   |
|-------------------|---|
| ชื่อ-สกุล         | ณัชพล นันทประทีป  |
| วัน เดือน ปี เกิด | 15 กรกฎาคม 2542   |
| สถานที่เกิด       | ระยอง   |
| วุฒิการศึกษา      | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย   |
| ที่อยู่ปัจจุบัน   | CU iHouse ห้อง 0930 เลขที่ 268 ถนนจรัสเมือง แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน<br>กรุงเทพมหานคร 10330 |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY