

การวิเคราะห์รูปร่างของลวดจัดฟันแบบลูปตัวที่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Shape Analysis of T-Loops Orthodontic Wires by Finite Element Method

ภาณุพงศ์ หวังสุข^{†1}, เอกุ ธรรมกรบุญญิต^{‡2}

[†]หลักสูตรปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

¹ wa.panupong_st@tni.ac.th

[‡]ห้องปฏิบัติการวิจัยคณิตศาสตร์ประยุกต์และกลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

² ek-u@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของลวดจัดฟันแบบลูปตัวที่ต่อแรงดึง และอัตราส่วนของแรงต่อระยะเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการจัดฟันโดยใช้ลูป ทำการวิเคราะห์โดยปรับเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ ของลูปตัวที่ แล้วใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ของลูปกับแรงที่เกิดขึ้นในแนวระดับ พบว่า ระยะห่างระหว่างลูปไม่มีผลต่อแรงในแนวระดับและอัตราส่วนของแรงต่อระยะเคลื่อนที่ ความยาวในแนวระดับของลวดที่เป็นส่วนบนของลูปตัวที่ยังมีค่ามาก ยิ่งทำให้ได้แรงในแนวระดับมีค่าน้อย นอกจากนี้ความสูงของลูปซึ่งประกอบด้วยความสูงของขาารวมกับความสูงของส่วนที่ดัดโค้งเป็นตัวที่มีผลต่อแรงในแนวระดับอย่างมีนัยสำคัญ ลูปที่มีความสูงมากจะทำให้ได้แรงในแนวระดับมีค่าน้อย ข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของลูปตัวที่ที่เหมาะสม และยังใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ขนาดของลูปแบบอื่น ๆ ได้

คำสำคัญ: ลูปตัวที่, ลูปปิด, แรงต่อระยะเคลื่อนที่, ลวดจัดฟัน, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research studies the effects of T-loop's size to the traction force and the load/deflection which will be considered in orthodontic loop design. The dimensions of T-loops are varied and the relations between deflection of loop legs and horizontal forces are analyzed using the finite element method. The results show that the distance between loop legs does not affect to the horizontal force and load/deflection. More horizontal length of T-loop will decrease the horizontal force. Furthermore, the total loop height significantly affect to the horizontal force. A loop with more height leads to a smaller horizontal force. The result of this research can then be used in an optimum T-loop design and also be acted as a guideline for an analysis of other closing loops.

Keywords: T-loops, closing loop, load/deflection, orthodontic wire, finite element method

1. บทนำ

โดยทั่วไปผู้ที่มีปัญหาฟันเรียงตัวไม่สวยงามในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างฟันมักจะเข้ารับการจัดฟัน ซึ่งนอกจากจะแก้ปัญหาฟันดังกล่าวแล้วยังช่วยป้องกันปัญหาฟันล้ม และเพื่อให้มีความมั่นใจในการเข้าสังคมมากขึ้นอีกด้วย การจัดฟันในลักษณะนี้ทันตแพทย์จะต้องใส่แรงกระทำผ่านแบร็กเก็ต (Bracket) ที่ติดอยู่บนซี่ฟันที่ต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่เพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว การเลื่อนฟันในลักษณะดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธีขึ้นกับลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ คือ วิธีกลศาสตร์การเลื่อน (Sliding mechanics) และวิธีกลศาสตร์ลูปปิด (Closing loop mechanics) กล่าวโดยสังเขปได้ว่า วิธีแรกจะมองลวดจัดฟันเป็นรางที่แบร็กเก็ตจะเลื่อนไปตามราง และทำให้ฟันเลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ทันตแพทย์มักใช้ยางเส้นขนาดเล็กคล้องระหว่างแบร็กเก็ตของฟันสองซี่เพื่อดึงฟันให้เลื่อนไปบนลวดในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่วิธีที่สองจะดัดลวดจัดฟันให้เป็นลูปรูปร่างต่าง ๆ เช่น ตัวยู ตัวที ตัวแอล หยดน้ำ และสามเหลี่ยม เป็นต้น ทันตแพทย์จะวางตำแหน่งของลูปให้อยู่ตรงช่องว่างระหว่างฟัน อาศัยการดึงลูปให้แยกออกทำให้เกิดแรงในลักษณะของสปริงที่พยายามคืนตัวดึงแบร็กเก็ตเพื่อให้ฟันเลื่อนเข้าหากัน

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่วิธีจัดฟันโดยใช้ลูปปิดซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและวิจัยทางด้านนี้มากมาย โดยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์รูปร่างของลูปปิดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลวด ได้แก่ อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง (Moment-to-force ratio, M/F) อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ (Load/deflection) และแรงในแนวตั้ง (Vertical force) ในตัวแปรทั้งสามอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมีความสำคัญที่สุดต่อการเคลื่อนที่ของฟัน บทความส่วนใหญ่จะวิเคราะห์เน้นหนักไปที่ตัวแปรนี้โดยใช้วิธีของคาสติเกลียโน [1-2] วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1-5] และวิธีทดลอง [3-4, 6] โดยสองตัวแปรที่เหลือมักจะถูกรวบรวมไปในงานวิจัยดังกล่าว ในประเทศไทยมีการวิเคราะห์อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ของลวดสี่รูปแบบโดยการทดลองแล้วเปรียบเทียบ โดยมีเกณฑ์ว่ารูปร่างของลวดที่ดีที่สุดจะใช้แรงดึงให้ยี่ดน้อยที่สุด [7]

จากการค้นคว้าของผู้เขียน งานวิจัยดังกล่าวข้างต้นทำการวิเคราะห์รูปร่างของลวดโดยกำหนดขนาดของรูปร่างไปที่ค่าใดค่าหนึ่งโดยเฉพาะเป็นการวิเคราะห์ว่ารูปร่างแบบใดมีพฤติกรรมทางกลเท่าไรและต่างกัน

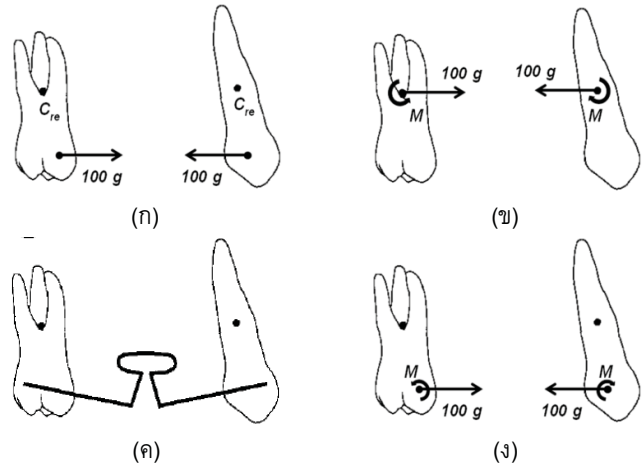
อย่างไร โดยไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดความยาว ความสูง และรัศมี ความโค้งของรูปร่างนั้น ๆ อย่างครบถ้วนเพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้ใช้งานว่า ตัวแปรหรือสัดส่วนใดของรูปปิดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของรูปนั้น บ้าง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของขนาดของลวดจัดฟันรูปตัวที่ต่อ พฤติกรรมทางกลของฟันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกพิจารณา อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่เป็นหลัก และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

2. ทฤษฎี

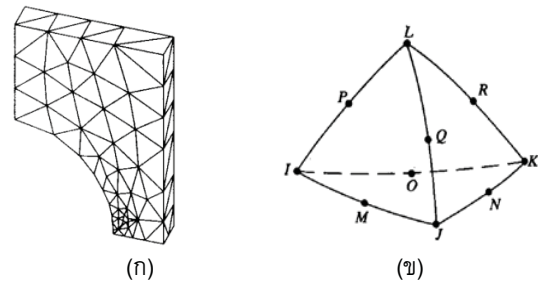
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบของแรงที่ทำให้ฟันเคลื่อนที่ และหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะบรรยายให้ผู้อ่านเข้าใจในระดับพื้นฐานเท่านั้น

2.1 กลศาสตร์ของทันตกรรมจัดฟัน

เมื่อพิจารณาแรงทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยแรงกระทำที่แบร็คเก็ตและแรงต้านของเนื้อเยื่อบริเวณรากฟันที่กระทำกับฟัน จะพบว่า มีจุดอยู่จุดหนึ่งวางตัวอยู่ในแกนแนวตั้งของฟัน ซึ่งถ้าใส่แรงกระทำในแนวนอนกับฟันโดยให้ผ่านจุดนี้ ฟันจะเลื่อนไปตามแนวแรงโดยไม่เกิดการหมุน จุดดังกล่าวนี้เรียกว่า จุดศูนย์กลางการต้านทาน (Center of resistance, C_{re}) [8] แต่ในทางปฏิบัติการเลื่อนฟันไม่ว่าจะใช้วิธีการกลศาสตร์การเลื่อนหรือกลศาสตร์รูปปิดต้องใส่แรงกระทำที่แบร็คเก็ตเกิดดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยสมมุติให้ทราบว่ามีแรงที่ต้องใช้มีขนาด 100 กรัม จากความรู้ทางกลศาสตร์ในส่วนของสถิตศาสตร์ จะมีระบบของแรงและโมเมนต์ (หรือแรงคู่ควบ) กระทำที่จุด C_{re} ดังรูปที่ 1 (ข) โมเมนต์ดังกล่าวเกิดจากแรง 100 กรัมคูณกับระยะทางระหว่างแบร็คเก็ตถึงจุด C_{re} ซึ่งโมเมนต์หรือแรงคู่ควบนี้จะทำให้รากฟันหมุนไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศที่ฟันจะเคลื่อนที่ไป สำหรับวิธีการกลศาสตร์รูปปิด ทันตแพทย์จะออกแบบรูปปิดที่ทำให้เกิดระบบของแรงและโมเมนต์ขึ้นที่แบร็คเก็ตเกิดในลักษณะดังรูปที่ 1 (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยโมเมนต์ที่เกิดจากรูปปิดจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับโมเมนต์ของแรง 100 กรัมที่เกิดขึ้นที่จุด C_{re} จากหลักการดังกล่าวมา การออกแบบรูปปิดจึงให้ความสำคัญกับ (1) ขนาดของแรงที่จะใช้ในการเลื่อนฟันให้พอดีที่จะสามารถเลื่อนฟันได้โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อหรือส่วนอื่น ๆ รอบฟัน และ (2) ขนาดของโมเมนต์ที่สามารถหักล้างกับแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นที่จุด C_{re} ได้ โดยจะพิจารณาขนาดของโมเมนต์นี้ในรูปของตัวแปร M/F หนึ่งเนื่องจากแบร็คเก็ตติดอยู่ที่ผิวนอกสุดของฟัน ดังนั้นนอกจากจะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบขึ้นตามรูปที่ 1 (ข) แล้ว ยังเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบรอบแกนในแนวตั้งของฟันด้วย ซึ่งโมเมนต์นี้จะพยายามหมุนฟันรอบแกนในแนวตั้ง แต่ขนาดของโมเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ในกรณีแรก บทความนี้จะไม่พิจารณาผลกระทบใด ๆ จากโมเมนต์นี้ และจะไม่นำไปเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของรูปปิด



รูปที่ 1 จุดศูนย์กลางความต้านทานและระบบของแรงเนื่องจากรูป (ปรับปรุงรูปจากบทความของ Lindauer [8])



รูปที่ 2 การแบ่งโดเมนของปัญหาในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) โดยใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า และ (ข) ตัวอย่างเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ [9]

2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง การหาคำตอบโดยใช้วิธีทางทฤษฎีอาจมีความยุ่งยากเนื่องจากความซับซ้อนของรูปร่างของวัตถุ หรือคุณสมบัติของวัสดุ การใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ในการประมาณค่าคำตอบที่มีความถูกต้องเพียงพอจึงเป็นทางเลือกที่วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์นิยมใช้กันมากขึ้น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และมีโปรแกรมให้ใช้งานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นที่ยอมรับถึงความถูกต้องของผลลัพธ์ที่คำนวณได้ รวมไปถึงความสะดวกและความรวดเร็วในการใช้งาน

หลักการพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) โดยเอลิเมนต์ย่อยนี้อาจมีรูปร่างเป็นสองมิติ เช่น สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม หรือสามมิติ เช่น รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) รูปอิฐบล็อก (Brick element หรือ hexahedral element) และรูปลิ้ม ก็ได้ เอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ซึ่งแต่ละจุดต่อจะใช้อ้างอิงถึงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้วิธีเชิงตัวเลขเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่ควบคุมพฤติกรรมและคุณสมบัติของเอลิเมนต์ย่อยให้กลายเป็นสมการพีชคณิตเชิงเส้น จากนั้นทำการประกอบสมการ

ย่อยของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบสมการรวมของปัญหา ซึ่งเมื่อจัดรูปแล้ว สมการสุดท้ายจะอยู่ในรูปของสมการยัดหยุ่นเชิงเส้น

$$[K]\{q\} = \{F\} \quad (1)$$

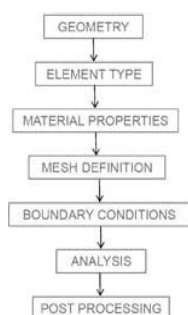
โดย $[K]$ เป็นเมทริกซ์ของความแข็งแกร่ง $\{q\}$ เป็นเวกเตอร์ของระยะกระจัดที่จุดต่อ และ $\{F\}$ เป็นเวกเตอร์ของแรงที่จุดต่อ หนึ่งในแต่ละเอลิเมนต์จะอาศัยฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์เพื่อคำนวณระยะกระจัดภายในเอลิเมนต์โดยประมาณ เช่น ประมาณเป็นสมการเส้นตรง เป็นต้น

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม ANSYS มีขั้นตอนพอสรุปเป็นหลักการได้ดังแสดงในรูปที่ 3 คือ การสร้างแบบจำลองของปัญหา การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ การสร้างเมช (Mesh generation) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตซึ่งรวมไปถึงการกำหนดภาระที่กระทำ การคำนวณตัวแปรเบื้องต้น และสุดท้ายคือการนำตัวแปรเบื้องต้นที่คำนวณได้ไปคำนวณตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องต่อไป

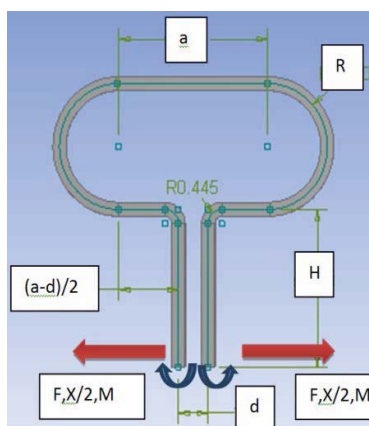
3. การวิเคราะห์รูปตัวที่ด้วยโปรแกรม ANSYS

3.1 ขนาดของรูปตัวที่ และตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปตัวที่ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะรูปร่างและการกำหนดตัวแปรของขนาดดังแสดงในรูปที่ 4 โดยจะจำกัดขนาดสูงสุดในแนวนอน และในแนวตั้งให้ไม่เกินด้านละ 10 มม. เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในช่องปาก [2] หน้าตัดของลวดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5×5 ตร.มม.



รูปที่ 3 ขั้นตอนการจำลองปัญหาในโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 4 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่ารูปจะมีการตัดโค้งคล้ายพยัญชนะตัว T ในภาษาอังกฤษ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ ความยาวของรูปในแนวนอน a รัศมีความโค้ง r ความสูงของขา h และระยะห่างระหว่างขา d งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรเหล่านี้โดยนำมาเทียบกับเพื่อให้ทราบว่า ตัวแปรใดมีผลต่อพฤติกรรมทางกลของรูปเท่าใด ดังกรณีต่อไปนี้

3.1.1 วิเคราะห์ d เทียบ a โดยกำหนดให้ $r = 1$ มม. $h = 8$ มม. และ $a = 8$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า d จาก 1 ถึง 5 มม.

3.1.2 วิเคราะห์ r เทียบ a โดยกำหนดให้

- $h = 4$ มม. $d = 1$ มม. และ $a = 3$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า r จาก 0.5 ถึง 3 มม.
- $h = 8$ มม. $d = 1$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า a จาก 2 ถึง 8 มม.

3.1.3 วิเคราะห์ r เทียบ h โดยกำหนดให้ $a = 8$ มม. $d = 1$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า h จาก 2 ถึง 8 มม.

3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS

ข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม ANSYS อาจเรียงลำดับตามรูปที่ 3 โดยประมาณ แต่ด้วยความยืดหยุ่นของโปรแกรม ผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูลสลับขั้นตอนก่อนหลังได้ในระดับหนึ่ง ส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ รูปร่างของรูปตัวที่ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 4 และการปรับเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ สามารถทำได้โดยแก้ไขตัวเลขบอกขนาดในส่วนของ CAD ซึ่งโปรแกรมจะปรับขนาดให้โดยอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เอลิเมนต์ SOLID95 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสามมิติ 20 จุดต่อในการคำนวณ และให้โปรแกรมกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมให้โดยอัตโนมัติ โดยจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อที่ใช้ในการคำนวณจะอยู่ระหว่าง 40 000 - 80 000 เอลิเมนต์ และ 20 000 - 35 000 จุดต่อตามลำดับ ส่วนการให้ภาระกับโครงสร้างรูป สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดระยะยึดที่ขาทั้งสองข้างให้เคลื่อนออกไปเป็นระยะ $x/2$ แล้วให้โปรแกรมคำนวณหาแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น โดยจะปรับเปลี่ยนระยะยึดตั้งแต่ 0.25 ถึง 3 มม. หมายเหตุว่า งานวิจัยนี้จะมุ่งพิจารณาที่อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่เป็นหลัก

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

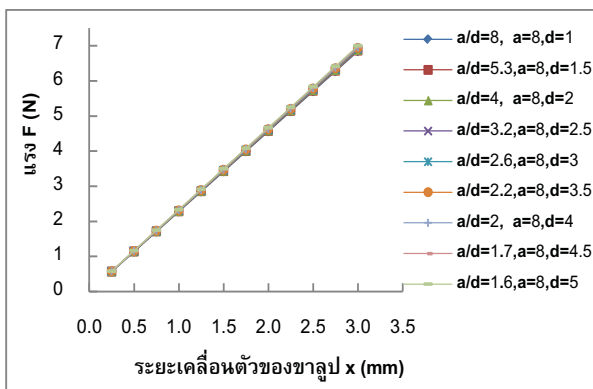
กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ d เทียบ a ได้ผลดังรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นว่าระยะระหว่างขาทั้งสองไม่มีผลต่อแรงดึงของลวด ทันตแพทย์สามารถเลือกกำหนดระยะระหว่างขาได้ตามความเหมาะสมกับลักษณะในช่องปากของคนไข้โดยจะไม่กระทบต่อแรงที่ขาของรูป หรือแรงที่จะกระทำที่แบร็คเก็ท

กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ r เทียบ a ซึ่งมีการกำหนดความสูงของขาทั้งสองค่า คือ 4 และ 8 มม. จะแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปคือ รูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดของแรง F ที่คำนวณได้ของทั้งสองรูปมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก จากผลการคำนวณทั้งสองรูปจะ

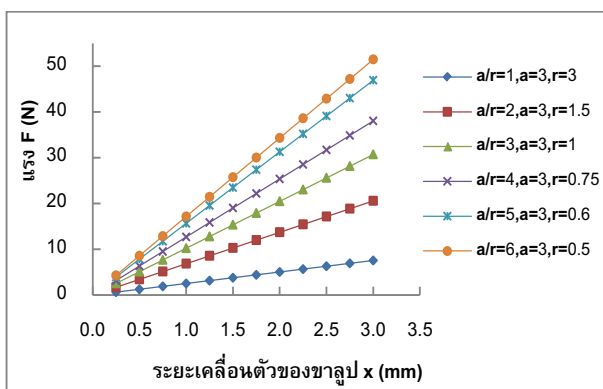
สามารถประเมินได้ว่า เมื่อความสูงของขาหลุมมีค่าไม่มากพอ แรง F ที่ขาหลุม จะมีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่แรงที่ใช้ในการเลื่อนฟันอาจมีค่าไม่ถึง 5 นิวตัน โดยในรูปที่ 6 เมื่อความสูงของขาหลุมมีขนาดปานกลางพบว่า เมื่อให้ a มีค่าที่ค่า r ที่มีค่ามากจะใช้แรง F ที่มีขนาดน้อยกว่าน่าจะเหมาะกับการใช้งานจริงมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Koson-ittikul และคณะ [7] ที่แนะนำให้ใช้แรง F น้อย ๆ จะดีกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าค่า h น้อย ควรจะเลือกใช้ค่า r ที่มากขึ้นเพื่อให้ได้แรง F ที่เหมาะสม และจากรูปที่ 7 จะได้ว่า เมื่อค่า h มากเพียงพอ และค่า r น้อย ค่า a ที่มากกว่าจะให้แรง F ที่มีขนาดน้อยกว่า

กรณีที่ 3 การวิเคราะห์ r เทียบ h จะได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า h ที่มากกว่าจะให้แรง F ที่มีขนาดน้อยกว่า

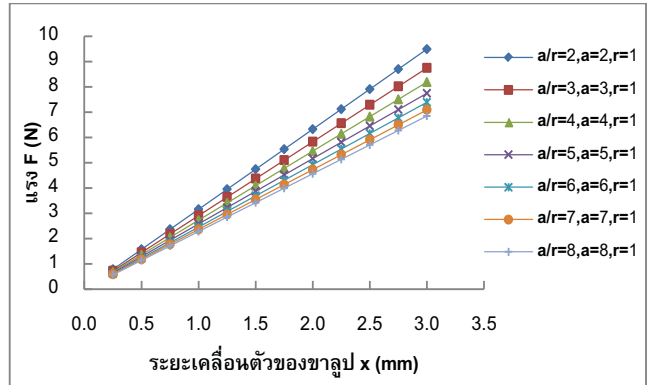
จากทั้ง 3 กรณี แม้ว่าจะยังมีบางแง่มุมที่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์ เช่น ความสูงของขาหลุมโดยรวม ($h + r$) แต่พอจะสังเกตได้คร่าว ๆ ว่า ความสูงโดยรวมของขาหลุมมีผลอย่างมากต่อขนาดของแรง F โดยควรจะให้ขาหลุมมีความสูงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ไม่ว่าจะกำหนดให้ h มีค่ามาก หรือ r มีค่ามากก็ตาม



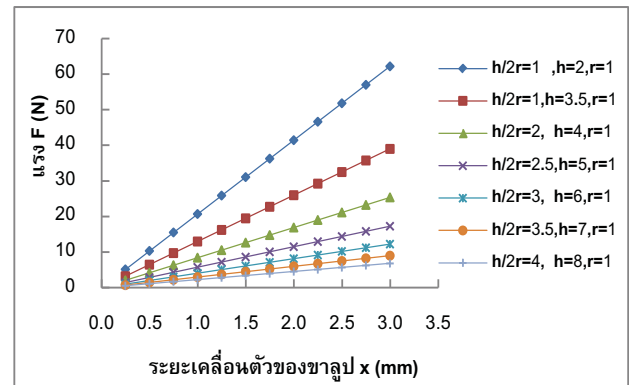
รูปที่ 5 ผลการคำนวณระยะ d เทียบ a



รูปที่ 6 ผลการคำนวณระยะ r เทียบ a เมื่อ $h = 4$ มม.



รูปที่ 7 ผลการคำนวณระยะ r เทียบ a เมื่อ $h = 8$ มม.



รูปที่ 8 ผลการคำนวณระยะ r เทียบ h

5. สรุป

งานวิจัยนี้อธิบายความรู้พื้นฐานเบื้องต้นในการจัดฟันโดยวิธีกลศาสตร์ของขาหลุม และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS วิเคราะห์ขนาดของขาหลุมตัวที่มีผลอย่างไรต่อแรงที่ขาหลุมในแนวนอน ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่จะกระทำที่แบร็คเก็ตและทำให้ฟันเลื่อนไปในทิศทางที่ต้องการ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ระยะระหว่างขาหลุมทั้งสองไม่มีผลต่อแรงดังกล่าว ความยาวในแนวระดับและความสูงโดยรวมของขาหลุมควรมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้แรงที่ใช้เลื่อนฟันมีค่าน้อย และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทันตแพทย์หญิงรัชฎา ลิ้มวัฒนพรชัยที่กรุณาให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. E. Siatkowski, "Continuous arch wire closing loop design, optimization, and verification. Part I," Am J Orthod Dentofac Orthop, vol.112, pp. 393-402, 1997.
- [2] V. Ungbhakorn, V. Ungbhakorn, and P. Techalermpaisarn, "Assessment of Castiglione's theorem on the analysis of closing loop for canine retraction by experiment and finite element method. Part I," Thammasat Int J Sc Tech, vol.10, no.2, pp. 28-37, 2005.

- [3] V. Ungbhakorn, V. Ungbhakorn, and P. Techalertpaisarn, "Assessment of Castigliano's theorem on the analysis of closing loop for canine retraction by experiment and finite element method. Part II," *Thammasat Int J Sc Tech*, vol.10, no.2, pp. 38-44, 2005.
- [4] R. Setiawan, M. Idris, and T. D. Prakasa, "Mechanical behavior of various orthodontic retraction springs," *ITB J Eng Sci*, vol.43, no.3, pp. 227-243, 2011.
- [5] P. Techalertpaisarn and A. Versluis, "Mechanical properties of Opus closing loops, L-loops, and T-loops investigated with finite element analysis," *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, vol.143, pp. 675-683, 2013.
- [6] R. E. Siatkowski, "Continuous arch wire closing loop design, optimization, and verification. Part II," *Am J Orthod Dentofac Orthop*, vol.112, pp. 487-495, 1997.
- [7] P. Koson-ittikul, M. Manosudpravit, K. Godfrey, S. Chartchaiwiwatana, and S. Piyasin, "The analysis of load/deflection of four simple closing loop designs by using universal testing machine," *KKU Res J (GS)*, vol.8, no.2, pp. 56-64, 2008.
- [8] S. J. Lindauer, "The basics of orthodontic mechanics," *Semin Orthod*, vol.7, no.1, pp. 2-15, 2001.
- [9] S. Moaveni, "Finite element analysis Theory and application with ANSYS," Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1999.