

การวิเคราะห์รูป่างของลวดจัดฟันแบบลูปตัวทีด้วยวิธีไฟน์เติลเมเนต์

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

ภาณุพงศ์ หวังสุข[†], เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ[‡]

[†] หลักสูตรบัญญาโภ สาขาเทคโนโลยีวิกรรม 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

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของลวดจัดฟันแบบลูปตัวทีต่อแรงดึง และอัตราส่วนของแรงต่อระยะเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการจัดฟันโดยใช้ลูป ทำการวิเคราะห์โดยปรับเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ ของลูปตัวที แล้วใช้วิธีไฟน์เติลเมเนต์หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ของขาลูปกับแรงที่เกิดขึ้นในแนวระดับ พบว่า ระยะห่างระหว่างขาลูปไม่มีผลต่อแรงในแนวระดับและอัตราส่วนของแรงต่อระยะเคลื่อนที่ ความยาวในแนวระดับของลวดที่เป็นส่วนหนึ่งของลูปตัวทียิ่งมีค่ามาก ยิ่งทำให้ได้แรงในแนวระดับมีค่าน้อย นอกจากนี้ความสูงของลูป ซึ่งประกอบด้วยความสูงของหวานกับความสูงของส่วนที่ตัดโคง เป็นตัวที่มีผลต่อแรงในแนวระดับอย่างมีนัยสำคัญ ลูปที่มีความสูงมากจะทำให้ได้แรงในแนวระดับมีค่าน้อย ข้อมูลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของลูปตัวทีที่เหมาะสม และยังใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ขนาดของลูปแบบอื่น ๆ ได้

คำสำคัญ: ลูปตัวที, ลูปปิด, แรงต่อระยะเคลื่อนที่, ลวดจัดฟัน, วิธีไฟน์เติลเมเนต์

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

โดยทั่วไปผู้ที่มีบัญชาพันเรียงตัวไม่สวยงามในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างฟันมักจะเข้ารับการจัดฟัน ซึ่งนอกจากจะแก้บัญชาดังกล่าวแล้ว ยังช่วยป้องกันบัญชาพันล้ม และเพื่อให้มีความมั่นใจในการเข้าสังคมมากขึ้นอีกด้วย การจัดฟันในลักษณะนี้ทันตแพทย์จะต้องใส่แรงกระทำผ่านแบร็คเก็ต (Bracket) ที่ดัดอยู่บนซี่ฟันที่ต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่เพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว การเลื่อนฟันในลักษณะดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธีขึ้นกับลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ คือ วิธีกลศาสตร์การเลื่อน (Sliding mechanics) และวิธีกลศาสตร์ลูปปิด (Closing loop mechanics) กล่าวโดยสังเขปได้ว่า วิธีแรกจะมองลวดจัดฟันเป็นร่างที่แบร็คเก็ตจะเลื่อนไปตามร่าง และทำให้ฟันเลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ทันตแพทย์มักใช้ยางเส้นขนาดเล็กคล้องระหว่างแบร็คเก็ตของฟันสองซี่เพื่อดึงฟันให้เลื่อนไปบนลวดในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่วิธีที่สองจะดัดลวดจัดฟันให้เป็นรูปปูร่างต่าง ๆ เช่น ตัวยู ตัวที ตัวแอล หยดน้ำ และสามเหลี่ยม เป็นต้น ทันตแพทย์จะวางตำแหน่งของลูปให้อยู่ตรงช่องว่างระหว่างฟัน อาศัยการดึงขาลูปให้แยกออกจากทำให้เกิดแรงในลักษณะของสปริงที่พยายามคืนตัวเดิมแบร็คเก็ตเพื่อให้ฟันเลื่อนเข้าหากัน

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่วิธีจัดฟันโดยใช้ลูปปิดซึ่งที่ผ่านมา มีการศึกษาและวิจัยทางด้านนี้มากมาย โดยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์รูป่างของลูปปิดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลวด ได้แก่ อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง (Moment-to-force ratio, M/F) อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ (Load/deflection) และแรงในแนวตั้ง (Vertical force) ในตัวแปรทั้งสาม อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมีความสำคัญที่สุดต่อการเคลื่อนที่ของฟัน บทความนี้จะวิเคราะห์นัยน์หนักไปที่ตัวแปรนี้โดยใช้วิธีของคณิตศาสตร์เกลี่ยโน [1-2] วิธีไฟน์เติลเมเนต์ [1-5] และวิธีทัดลง [3-4, 6] โดยสองตัวแปรที่เหลือมักจะถูกวิเคราะห์ร่วมไปในงานวิจัยดังกล่าว ในประเทศไทยมีการวิเคราะห์อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ของลวดสูงแบบโดยการทดลองแล้วเบรย์เบรย์ที่ญี่ปุ่น โดยมีเกณฑ์ว่ารูป่างของลวดที่ดีที่สุดจะใช้แรงดึงให้ยืดน้อยที่สุด [7]

จากการค้นคว้าของผู้เขียน งานวิจัยดังกล่าวข้างต้นทำการวิเคราะห์รูป่างของลวดโดยกำหนดขนาดของรูปร่างไปที่ค่าใดค่าหนึ่งโดยเฉพาะ เป็นการวิเคราะห์รูป่างแบบใหม่พุตติกรรมทางกลเท่าไหร่และต่างกัน

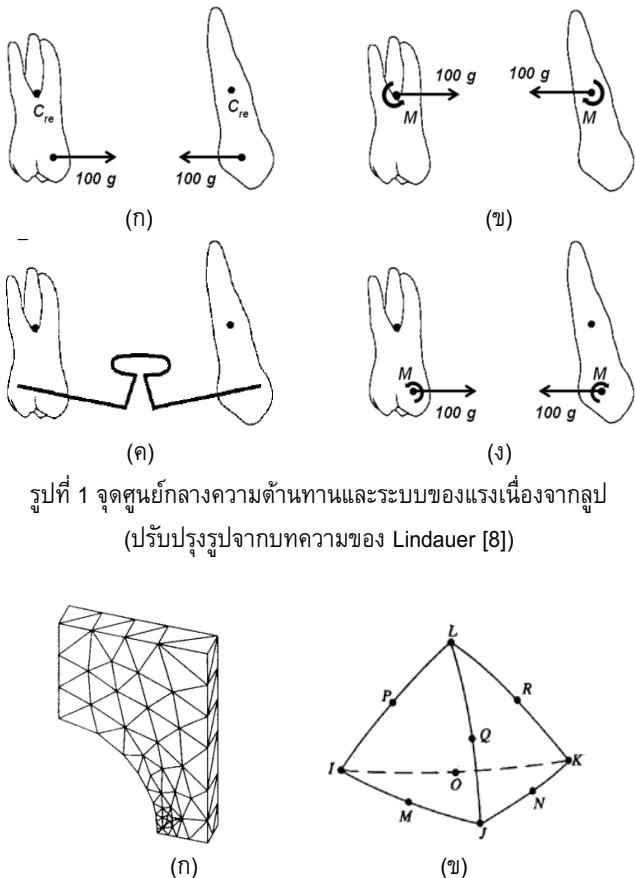
อย่างไร โดยไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดความยาว ความสูง และรัศมีความโค้งของรูปร่างนั้น ๆ อย่างครบถ้วนเพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้ใช้งานว่า ด้าวแปรหรือสัดส่วนใดของลูปปิดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลูปนั้น บ้าง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลผลกระทบของขนาดของลวดจัดฟันลูปปิดที่ต่อ พฤติกรรมทางกลของมันด้วยวิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์ โดยเลือกพิจารณา อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่เป็นหลัก และใช้โปรแกรมไฟโน๊ตอลิ เมนต์ ANSYS เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

2. ทฤษฎี

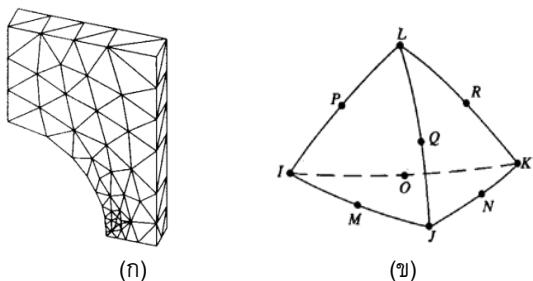
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบของแรงที่ทำให้ฟันเคลื่อนที่ และหลักการ ของวิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์ โดยจะบรรยายให้ผู้อ่านเข้าใจในระดับพื้นฐาน เท่านั้น

2.1 กลศาสตร์ของทันตกรรมจัดฟัน

เมื่อพิจารณาแรงทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยแรงกระทำที่เบรคเก็ตและ แรงด้านของเนื้อเยื่อบริเวณรากฟันที่กระทำกับฟัน จะพบว่า มีจุดอยู่จุด หนึ่งว่างด้วยในแกนแนวตั้งของฟัน ซึ่งถ้าใส่แรงกระทำในแนวอนกับ ฟันโดยให้ผ่านจุดนี้ ฟันจะเลื่อนไปตามแนวแรงโดยไม่เกิดการหมุน จุด ดังกล่าวนี้เรียกว่า จุดศูนย์กลางการด้านทาน (Center of resistance, C_{re}) [8] แต่ในทางปฏิบัติการเลื่อนฟันไม่ว่าจะใช้วิธีกลศาสตร์การเลื่อน หรือกลศาสตร์ลูปปิดจะต้องใส่แรงกระทำที่เบรคเก็ตดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยสมมุติให้ทราบว่าแรงที่ต้องใช้มีขนาด 100 กรัม จากความรู้ทาง กลศาสตร์ในส่วนของสถิติศาสตร์ จะมีระบบของแรงและโมเมนต์ (หรือ แรงคู่ควบ) กระทำที่จุด C_{re} ดังรูปที่ 1 (ข) โดยโมเมนต์ดังกล่าวเกิดจากแรง 100 กรัมคุณกับระยะทางระหว่างเบรคเก็ตถึงจุด C_{re} ซึ่งโมเมนต์หรือ แรงคู่ควบนี้จะทำให้รากฟันหมุนไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศที่ฟันจะ เคลื่อนที่ไป สำหรับวิธีกลศาสตร์ลูปปิด ทันตแพทย์จะออกแบบลูปปิดที่ ทำให้เกิดระบบของแรงและโมเมนต์ขึ้นที่เบรคเก็ตในลักษณะดังรูปที่ 1 (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยโมเมนต์ที่เกิดจากลูปปิดจะมีทิศทางตรงกัน ข้ามกับโมเมนต์ของแรง 100 กรัมที่เกิดขึ้นที่จุด C_{re} จากหลักการดังที่ กล่าวมา การออกแบบลูปปิดจึงให้ความสำคัญกับ (1) ขนาดของแรงที่จะ ใช้ในการเลื่อนฟันให้พอดีที่จะสามารถเลื่อนฟันได้โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อ หรือส่วนอื่น ๆ รอบฟัน และ (2) ขนาดของโมเมนต์ที่จะสามารถหักล้าง กับแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นที่จุด C_{re} ได้ โดยจะพิจารณาขนาดของโมเมนต์นี้ ในรูปของด้าวแปร M/F อนึ่งเนื่องจากเบรคเก็ตติดอยู่ที่ผิวนอกสุดของฟัน ดังนั้นนอกจากจะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบขึ้นตามรูปที่ 1 (ข) และ ยัง เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบรอบแกนในแนวตั้งของฟันด้วย ซึ่งโมเมนต์นี้ จะพยายามหมุนฟันรอบแกนในแนวตั้ง แต่ขนาดของโมเมนต์จะมีค่าน้อย กว่าโมเมนต์ในกรณีแรก บทความนี้จะไม่พิจารณาผลผลกระทบใด ๆ จาก โมเมนต์นี้ และจะไม่นำไปเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกล ของลูปปิด



รูปที่ 1 จุดศูนย์กลางความด้านทานและระบบของแรงเนื่องจากลูป (ปรับปรุงรูปจากบทความของ Lindauer [8])



รูปที่ 2 การแบ่งโดเมนของปัญหาในวิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์ (g) โดยใช้อลิ เมนต์ทรงสี่เหลี่ยม และ (h) ด้วยวิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยม 10 จุดต่อ [9]

2.2 วิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง การหา คำตอบโดยใช้วิธีทางทฤษฎีอาจมีความยุ่งยากเนื่องจากความซับซ้อน ของรูปร่างของวัสดุ หรือคุณสมบัติของวัสดุ การใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ในกระบวนการค่าหาคำตอบที่มีความถูกต้อง เพียงพอจึงเป็นทางเลือกที่วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์นิยมใช้กันมากขึ้น วิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์ก็เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่มีการใช้งานกันอย่าง แพร่หลาย และมีโปรแกรมให้ใช้งานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นที่ ยอมรับถึงความถูกต้องของผลลัพธ์ที่คำนวณได้ รวมไปถึงความสะดวก และความรวดเร็วในการใช้งาน

หลักการพื้นฐานของวิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์คือการแบ่งรูปร่างของปัญหา ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) โดยเอลิเมนต์ย่อยนี้อาจ มีรูปร่างเป็นสองมิติ เช่น สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม หรือสามมิติ เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยม (Tetrahedral element) รูปอิฐล็อก (Brick element หรือ hexahedral element) และรูปลิม ก็ได้ เอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ซึ่งที่แต่ละจุดต่อจะใช้อ้างอิงถึงด้าวแปรที่ใช้ในการคำนวณ วิธีไฟโน๊ตอลิเมนต์จะใช้วิธีเชิงตัวเลขเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่ควบคุมพุ่ติกรรมและคุณสมบัติของเอลิเมนต์ ย่อยให้กลายเป็นสมการพีชคณิตเชิงเส้น จากนั้นทำการประมาณการ

ย่อของแต่ละอิเลมเม้นต์เข้าด้วยกันเป็นระบบสมการรวมของปัญหา ซึ่ง เมื่อจัดรูปแล้ว สมการสุดท้ายจะอยู่ในรูปของสมการยึดหยุ่นเชิงเส้น

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

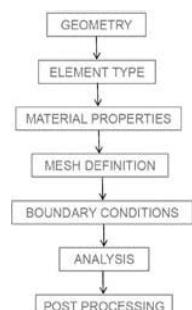
โดย $[K]$ เป็นเมตริกซ์ของความแข็งเกริง $\{q\}$ เป็นเวกเตอร์ของระบบกระจัคที่จุดต่อ และ $\{F\}$ เป็นเวกเตอร์ของแรงที่จุดต่อ อนึ่งในแต่ละอิเลมเม้นต์จะอาศัยฟังก์ชันการประมาณภายในอิเลมเม้นต์เพื่อคำนวณระบบกระจัคภายในอิเลมเม้นต์โดยประมาณ เช่น ประมาณเป็นสมการเส้นตรง เป็นต้น

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม ANSYS มีขั้นตอนพื้นฐานเป็นหลักการได้ดังแสดงในรูปที่ 3 คือ การสร้างแบบจำลองของปัญหา การเลือกชนิดของอิเลมเม้นต์ การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ การสร้างเมช (Mesh generation) การกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตซึ่งรวมไปถึงการกำหนดภาระที่กระทำ การคำนวณด้วยแบบเบื้องต้น และสุดท้ายคือการนำตัวแปรเบื้องต้นที่คำนวณได้ไปคำนวณด้วยแบบเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องต่อไป

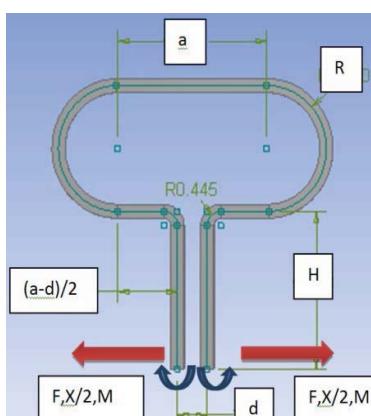
3. การวิเคราะห์ลูปตัวที่ด้วยโปรแกรม ANSYS

3.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์

ลูปตัวที่ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะรูปวงรีและทำการกำหนดตัวแปรของขนาดดังแสดงในรูปที่ 4 โดยจะจำกัดขนาดสูงสุดในแนวอนุและในแนวตั้งให้ไม่เกินด้านละ 10 มม. เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในช่องปาก [2] หน้าตัดของลวดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5×5 ตร.มม.



รูปที่ 3 ขั้นตอนการจำลองปัญหาในโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 4 ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าลูปจะมีการตัดโฉนดคล้ายพยัญชนะตัว T ในภาษาอังกฤษ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ ความยาวของขาลูปในแนวอนุ a รัศมีความโค้ง r ความสูงของขาลูป h และระยะห่างระหว่างขาลูป d งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรเหล่านี้โดยนำมาเทียบกันเพื่อให้ทราบว่า ตัวแปรใดมีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลูปเท่าใด 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

ข้อมูลที่ต้องบันทึกกับโปรแกรม ANSYS อาจเรียงลำดับตามรูปที่ 3 โดยประมาณ แต่ด้วยความยืดหยุ่นของโปรแกรม ผู้ใช้งานสามารถบันทึกข้อมูลสับขั้นตอนก่อนหลังได้ในระดับหนึ่ง ส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ รูปร่างของลูปตัวที่ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 4 และการปรับเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ สามารถทำได้โดยแก้ไขตัวเลขของขนาดในส่วนของ CAD ซึ่งเป็นอิเลมเม้นต์สี่เหลี่ยมสามมิติ 20 จุดต่อในการคำนวณ และให้โปรแกรมกำหนดจำนวนอิเลมเม้นต์ที่เหมาะสมให้โดยอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อิเลมเม้นต์ SOLID95 ซึ่งเป็นอิเลมเม้นต์สี่เหลี่ยมสามมิติ 20 จุดต่อในการคำนวณ และให้โปรแกรมกำหนดจำนวนอิเลมเม้นต์ที่เหมาะสมให้โดยอัตโนมัติ โดยจำนวนอิเลมเม้นต์และจำนวนจุดต่อที่ใช้ในการคำนวณจะอยู่ระหว่าง 40 000 - 80 000 อิเลมเม้นต์ และ 20 000 - 35 000 จุดต่อตามลำดับ ส่วนการให้การกับโครงสร้างลูป สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดระยะยึดที่ขาลูปทั้งสองข้างให้เคลื่อนออกไปเป็นระยะ $x/2$ และให้โปรแกรมคำนวณหาแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น โดยจะปรับเปลี่ยนระยะยึดตั้งแต่ 0.25 ถึง 3 มม. หมายเหตุว่า งานวิจัยนี้จะมุ่งพิจารณาที่อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่เป็นหลัก

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

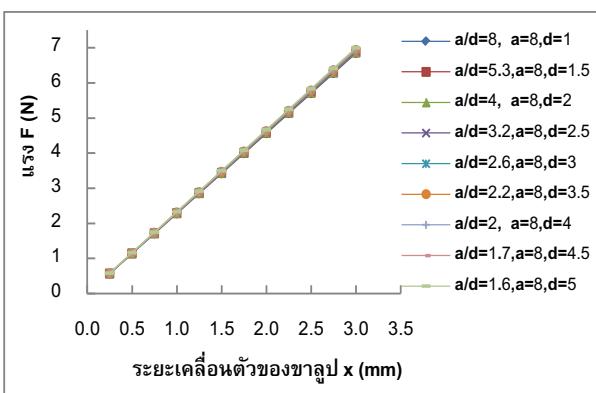
กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ d เทียบ a ได้ผลดังรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระยะระหว่างขาลูปทั้งสองไม่มีผลต่อแรงดึงของลวด ทันทเดพที่สามารถเลือกกำหนดระยะระหว่างขาลูปได้ตามความเหมาะสมกับลักษณะในช่องปากของคนไข้โดยจะไม่กระทบต่อแรงที่ขาของลูป หรือแรงที่จะกระทำที่เบรคเก็ต

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

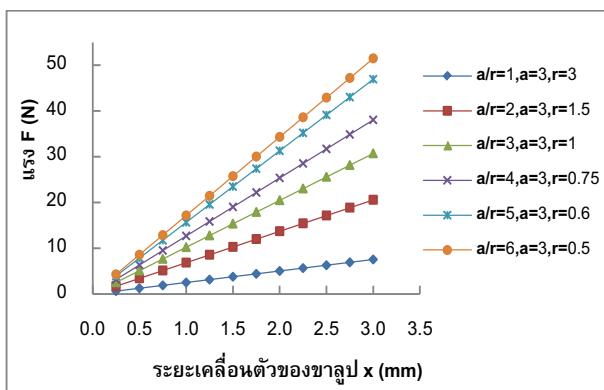
สามารถประเมินได้ว่า เมื่อความสูงของขาลูปมีค่าไม่นอกพอดัง F ที่ขากลุ่ม จะมีค่าต่ำกว่ามากสูง ในขณะที่แรงที่ใช้ในการเลื่อนฟันอาจมีค่าไม่ถึง 5 นิวตัน โดยในรูปที่ 6 เมื่อความสูงของขาลูปมีขนาดปานกลางพบร้า เมื่อให้ a มีค่าคงที่ ค่า r ที่มีค่ามากจะใช้แรง F ที่มีขนาดน้อยกว่าจะหมายกับการใช้งานจริงมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kosonittikul และคณะ [7] ที่แนะนำให้ใช้แรง F น้อย ๆ จะดีกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าค่า h น้อย ควรจะเลือกใช้ค่า r ที่มากขึ้นเพื่อให้ได้แรง F ที่เหมาะสม และจากรูปที่ 7 จะได้ว่า เมื่อค่า h มากเพียงพอ และค่า r น้อยค่า a ที่มากกว่าจะให้แรง F ที่มีขนาดน้อยกว่า

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

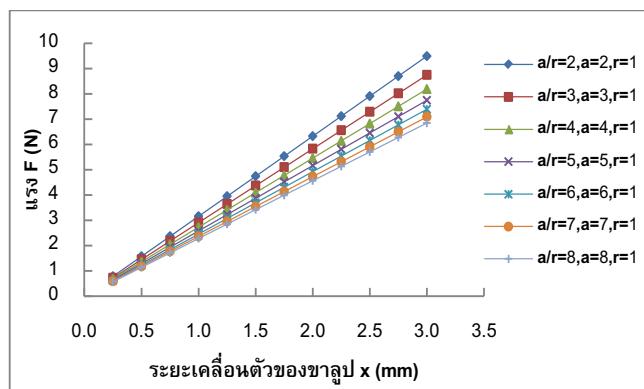
จากทั้ง 3 กรณี แม้ว่าจะยังมีบางแห่งมุ่งที่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์ เช่น ความสูงของลูปโดยรวม ($h + r$) แต่พอจะสังเกตได้คร่าว ๆ ว่า ความสูงโดยรวมของลูปมีผลอย่างมากต่อขนาดของแรง F โดยควรจะให้ลูปมีความสูงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ไม่ว่าจะกำหนดให้ h มีค่ามาก หรือ r มีค่ามากก็ตาม



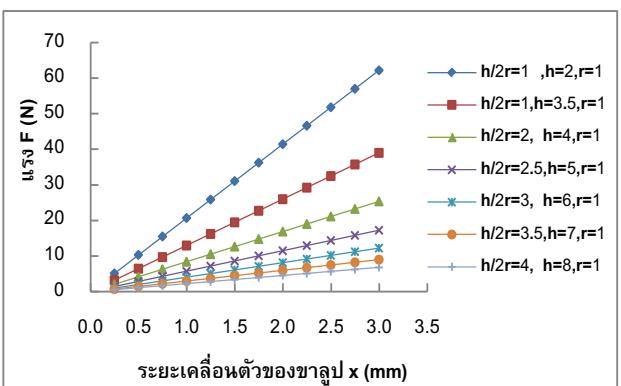
รูปที่ 5 ผลการคำนวนระยะ d เทียบ a



รูปที่ 6 ผลการคำนวนระยะ r เทียบ a เมื่อ $h = 4$ ม.ม.



รูปที่ 7 ผลการคำนวนระยะ r เทียบ a เมื่อ $h = 8$ ม.ม.



รูปที่ 8 ผลการคำนวนระยะ r เทียบ h

5. สรุป

งานวิจัยนี้อธิบายความรู้พื้นฐานเบื้องต้นในการจัดฟันโดยวิธีกลศาสตร์ของลูป และใช้โปรแกรมไฟไฟน์เดอร์อลิเมเนต์ ANSYS วิเคราะห์ขนาดของลูปตัวที่ว่ามีผลอย่างไรต่อแรงที่ขากลุ่มในแนวอน ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่จะกระทำที่แบร์คเก็ตและทำให้ฟันเลื่อนไปในทิศทางที่ต้องการ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ระยะระหว่างขากลุ่ปั้งสองไม่มีผลต่อแรงดึงกล้าว ความยาวในแนวระดับและความสูงโดยรวมของลูปค่ามีค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้แรงที่ใช้เลื่อนฟันมีค่าน้อย และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสมดุลต่อการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทันตแพทย์หญิงรัชฎา ลิมวัฒนพรชัยที่กรุณาให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

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. Techalerpaisarn, "Assessment of Castigliano'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-itkul, M. Manosudprasit, 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.