

CLINICAL ACCURACY OF PETG CLEAR ALIGNER MATERIAL

Thamolwan JIRAKAJORNJARITKUL¹, Chidchanok LEETHANAKUL¹, Hataichanok CHAROENPONG²
and Apichart VEERAWATTANATIGUL²

1 Orthodontic section, Department of Preventive Dentistry, Faculty of Dentistry, Prince of Songkla
University, Thailand

2 Department of Orthodontics, College of Dental Medicine, Rangsit University, Thailand

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the clinical accuracy of clear aligners fabricated from Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) material by assessing changes in dental arch dimensions using Geomagic Control X software. A total of 24 dental arches were included in the study. All participants were treated with PETG-based Smartee® clear aligners in cases involving arch expansion. Arch dimensions were measured: Anterior Arch Width (AAW), Posterior Arch Width (PAW) and Arch Height (AH). Statistical comparisons were performed using a paired-sample t-test to evaluate the differences between the planned tooth movement (TP-T0) and the actual treatment outcome (T1-T0). The results showed that the clinical accuracy of Anterior Arch Width (AAW) was the lowest among the measured variables, with an accuracy of 62.80%. Arch Height (AH) demonstrated the highest accuracy, reaching 69.89%. Overall, the clinical accuracy based on dental arch dimension measurements ranged from 62.80% to 69.89%.

Keywords: Multilayer Thermoplastic Clear Aligners, Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG), Clinical Accuracy

CITATION INFORMATION: Jirakajornjaritkul, T., Leethanakul, C., Charoenpong, H., & Veerawattanatigul, A. (2026). Clinical Accuracy of PETG Clear Aligner Material. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 4(7), 40.

ความแม่นยำทางคลินิกของเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่ผลิตจากวัสดุชนิด PETG

ธมลวรรณ จิรขจรจิตกุล¹, ชิตชนก ลีระกุล¹, หทัยชนก เจริญพงศ์² และ อภิชาติ วีรวัฒนาธิกุล²

1 อนุสาขาทันตกรรมจัดฟัน สาขาวิชาทันตกรรมป้องกัน คณะทันตแพทยศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2 สาขาวิชาทันตกรรมจัดฟัน วิทยาลัยทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแม่นยำทางคลินิกของเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่ผลิตจากวัสดุชนิด โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate Glycol: PETG) โดยทำการวัดมิติส่วนโค้งฟันด้วย Geomagic Control X software จำนวนขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ 24 ส่วนโค้งฟัน (Dental arches) ผู้ป่วยที่เข้าร่วมการศึกษาก็ได้รับการรักษาทางทันตกรรมจัดฟันด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใส (Clear aligner treatment) ซึ่งผลิตจากวัสดุ PETG ยี่ห้อ Smartee® ในเคสที่มีการรักษาด้วยการขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง ทำการวัดมิติส่วนโค้งฟัน 1) ความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรในส่วนฟันหน้า (Anterior Arch Width: AAW) 2) ความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรในส่วนฟันหลัง (Posterior Arch Width: PAW) 3) ความสูงของแนวโค้งฟัน (Arch Height: AH) การเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้การทดสอบค่าทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่สัมพันธ์กัน (Paired-sample t-test) จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา (TP-T0) และการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง (T1-T0) ผลลัพธ์ความแม่นยำทางคลินิก พบว่าความแม่นยำของ AAW น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ PAW และ AH อยู่ที่ 62.80% ส่วน AH มีความแม่นยำมากที่สุด 69.89% เทียบกับ PAW และ AAW โดยรวมการวัดมิติส่วนโค้งฟันทุกค่ามีความแม่นยำ อยู่ระหว่าง 62.80-69.89%

คำสำคัญ: เครื่องมือจัดฟันแบบใสชนิดเทอร์โมพลาสติกหลายชั้น, โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตไกลคอล (PETG), ความแม่นยำทางคลินิก

ข้อมูลการอ้างอิง: ธมลวรรณ จิรขจรจิตกุล, ชิตชนก ลีระกุล, หทัยชนก เจริญพงศ์ และ อภิชาติ วีรวัฒนาธิกุล. (2569). ความแม่นยำทางคลินิกของเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่ผลิตจากวัสดุชนิด PETG. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 4(7), 40.

บทนำ

การรักษาทางทันตกรรมจัดฟันด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใส (Clear aligner treatment) มีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางคลินิกที่ดี มีความสวยงาม และให้ความสะดวกแก่ผู้ป่วย ปัจจุบันมีเครื่องมือจัดฟันแบบใสหลายยี่ห้อ ซึ่งผลิตจากวัสดุที่แตกต่างกัน วัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate Glycol: PETG) เป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใส ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใสเป็นอีกหนึ่งปัจจัยมีผลต่อความแม่นยำของการเคลื่อนฟันได้ (Bichu และคณะ, 2023)

อย่างไรก็ตาม การศึกษาก่อนหน้านี้ยังไม่ได้แสดงถึงความแม่นยำของการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงหลังการรักษา ของการรักษาทางทันตกรรมจัดฟันด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่ใช้วัสดุ PETG อีกทั้งยังไม่ได้ประเมินผลการรักษาที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับผลลัพธ์ที่คาดการณ์ไว้จากการวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟัน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความแม่นยำของการเคลื่อนฟันเปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา และการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง ว่าเป็นไปตามแผนการรักษาแบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟันที่วางไว้มากน้อยเพียงใด

การทบทวนวรรณกรรม

เครื่องมือจัดฟันแบบใส ถูกคิดค้นโดย Harold D. Kesling ในปี ค.ศ. 1945 และได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีการออกแบบและการผลิตด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing: CAD/CAM) ร่วมกับกระบวนการทำงานแบบดิจิทัล (Digital workflow protocol) ใช้เพื่อวางแผนและผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่สามารถรักษาเฉพาะรายบุคคลได้ ซึ่งทำให้การรักษามีประสิทธิภาพมากขึ้น กระบวนการผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใสถูกขึ้นรูปด้วยความร้อนและสุญญากาศ (Vacuum thermoforming) ของวัสดุเทอร์โมพลาสติกบนแบบจำลองฟัน วัสดุที่นิยมใช้ในการผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใส ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (Polyester), โพลียูรีเทน (Polyurethane), โคพอลิเอสเตอร์ (Copolyester), โพลีโพรพิลีน (Polypropylene), โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate), เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate; EVA) และ โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride; PVC) (Bichu และคณะ, 2023) การผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใสมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากเดิมที่เป็น วัสดุชั้นเดียว (Single-layer materials) พัฒนาไปสู่โพลียูรีเทนรุ่นที่สอง (Polyurethane) และในปัจจุบันเป็นวัสดุหลายชั้น (Multilayer materials) ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยทั้งชั้นวัสดุแข็งและชั้นวัสดุอ่อน ชั้นวัสดุอ่อน (Soft layer) ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้สามารถใส่และถอดเครื่องมือได้ง่าย ชั้นวัสดุแข็ง (Hard layer) ช่วยเพิ่มความทนทาน ความคงรูป และประสิทธิภาพในการใช้งานระยะยาว การผสมคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองชั้นช่วยให้เครื่องมือจัดฟันแบบใสมีความสบายในการใช้งาน พร้อมทั้งสามารถส่งแรงเพื่อเคลื่อนฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพและคงเสถียรภาพตลอดระยะเวลาการรักษา (Kundal และคณะ, 2020) วัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (PETG) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใส เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ความคงทนสูง ความทนทานต่อแรงกระแทก ความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีความสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้ดี และคุณสมบัติทางแสงที่โดดเด่น (Ganta และคณะ, 2021) การคลายความเค้น (stress relaxation) เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้แรงที่เครื่องมือจัดฟันแบบใสส่งผ่านไปยังฟันลดลงภายหลังการสวมใส่ แม้ว่าวัสดุจะยังคงมีการโก่งตัวในระดับเดิมก่อนที่จะเริ่มเคลื่อนที่ โดยระดับของการคลายความเค้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใสและขนาดของแรงที่กระทำต่อวัสดุ (Bichu และคณะ, 2023)

ความแม่นยำของการรักษาด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใส ขึ้นกับหลายปัจจัย ซึ่งสามารถส่งผลต่อความแม่นยำของผลการรักษาได้ ปัจจัยด้านผู้ป่วย ได้แก่ อายุ เพศ ความร่วมมือในการรักษา การใส่ใจ และโรคทางระบบต่างๆ ปัจจัยด้านโครงสร้างฟันและกระดูกขากรรไกร, ปัจจัยด้านเครื่องมือจัดฟันแบบใส ได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิต

เครื่องมือ ความเหมาะสมของเครื่องมือกับฟัน และ ประสิทธิภาพและความเชี่ยวชาญของทันตแพทย์จัดฟัน (Chisari และคณะ, 2014; Bowman และคณะ, 2017)

การศึกษาของ Sachdev และคณะ (2021) ได้ประเมินความแม่นยำของการเคลื่อนฟันในผู้ป่วยที่รักษาด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใสโดยไม่ถอนฟัน ซึ่งเน้นการเคลื่อนฟันบริเวณฟันหน้า โดยใช้เครื่องมือที่ผลิตจากแผ่นเทอร์โมพลาสติกชนิด PETG ความหนา 0.5 มิลลิเมตร (DURAN; Scheu Dental, Iserlohn, Germany) ความแม่นยำโดยรวมอยู่ที่ 56.18% และจากการศึกษาก่อนหน้า โดยทั่วไปค่าความแม่นยำเฉลี่ยของการขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง ด้วย Invisalign® ซึ่งเป็นวัสดุประเภทโพลียูรีเทน (Polyurethane) อยู่ที่ประมาณ 72.8-87.7% อย่างไรก็ตาม พบการเอียงของฟัน (Tipping) มากกว่าที่วางแผนไว้ในแบบจำลองดิจิทัลการรักษา (Digital treatment plan) (Houle และคณะ, 2017) การศึกษาของ Zhou และคณะ (2020) การขยายฟันกรามบนซึ่งหนึ่งแบบเคลื่อนทั้งซี่ไปทางด้านแก้ม (Bodily buccal expansion) มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ คิดเป็นความแม่นยำเฉลี่ยเพียง 36.35%

วิธีดำเนินการวิจัย

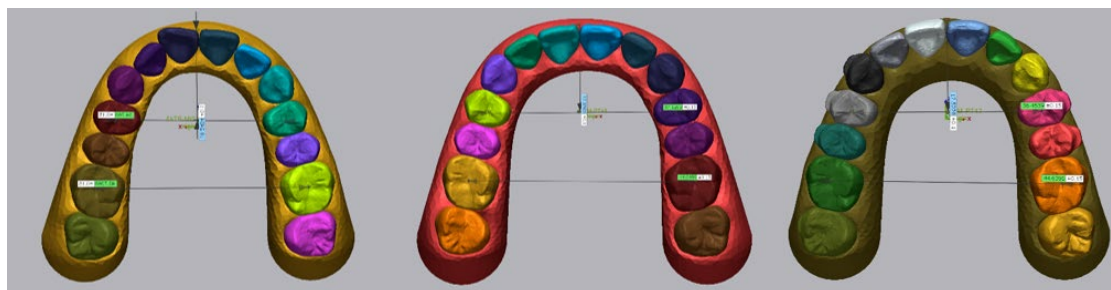
การศึกษานี้ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมในมนุษย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (EC6809-041) ขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดเป็นไปตามระเบียบข้อบังคับทางจริยธรรมของสถาบันและประเทศ และสอดคล้องกับหลักการของปฏิญญาเฮลซิงกิ (2013)

ขนาดกลุ่มตัวอย่างถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรม G* power version 3.1 กำหนดให้ค่า $P < 0.05$ บ่งชี้ว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลมีนัยสำคัญทางสถิติ ขนาดของผล (Effect Size) เท่ากับ 0.6 จำนวนขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ 24 ส่วนโค้งฟัน (Dental arches) ผู้ป่วยที่เข้าร่วมการศึกษาจะได้รับการรักษาด้วยทันตกรรมจัดฟันรูปแบบจัดฟันแบบใสชนิดวัสดุหลายชั้น (Multilayer thermoplastic) ยี่ห้อ Smartee® (Smartee Denti-Technology Co., Ltd., นครเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน) ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (PETG) ที่กำลังได้รับการรักษาอยู่หรือรักษาเสร็จแล้วที่คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คนไข้ที่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือก (Inclusion criteria) จะต้องไม่มีชุดฟันแท้ อายุ 18-35 ปี มีฟันซ้อนเกระดับน้อยถึงปานกลาง โดยมีแผนการจัดฟันแบบไม่ถอนฟันและมีแผนการรักษาที่ต้องขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง (Arch Expansion) 1.5-5 มิลลิเมตรในแผนการรักษา ส่วนคนไข้ที่อยู่ในเกณฑ์คัดออก (Exclusion criteria) คือ ผู้ป่วยที่ขาดความร่วมมือในการรักษา ฟันที่ไม่ขยับหรือขยับน้อยจากแผน ที่วางไว้ มีรากเทียม (Dental implants) หรือ ฟันยึดติดกระดูก (Ankylosed teeth) ผู้ป่วยที่มีโรคทางระบบ หรือในแผนการเคลื่อนฟันมีการใช้อุปกรณ์อื่นเสริมเพื่อช่วยขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง เช่น หมุดจัดฟัน (TADs: Temporary Anchorage Devices) การศึกษานี้ประกอบด้วยส่วนโค้งฟันจำนวน 24 ส่วนโค้งจากผู้ป่วย 18 ราย โดยกำหนดให้ส่วนโค้งฟัน (Dental arch) เป็นหน่วยวิเคราะห์ ส่วนโค้งฟันบนหรือส่วนโค้งฟันล่างที่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือกสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ ไม่ว่าจะมาจากผู้ป่วยคนละรายหรือผู้ป่วยรายเดียวกัน ซึ่งจะถูกพิจารณาเป็นหน่วยตัวอย่างแยกจากกัน อย่างไรก็ตาม ส่วนโค้งฟันที่มาจากผู้ป่วยรายเดียวกันอาจไม่เป็นอิสระต่อกันอย่างสมบูรณ์ ถือเป็นข้อจำกัดของการศึกษา

ทันตแพทย์จัดฟันจะทำการวางแผนการรักษาแบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟัน (3D Virtual treatment Plan) โดยไม่จำกัดถึง การวางตำแหน่งปุ่มเคลื่อนฟัน (Attachment placement), การกรอแต่งผิวเคลือบฟันด้านประชิด (Interproximal reduction), การใช้อุปกรณ์เสริม (Auxiliary treatments) ต่างๆ ยกเว้นอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง คนไข้ต้องใส่เครื่องมือจัดฟันแบบใสมากกว่า 22 ชั่วโมง/วัน และใส่เครื่องมือจัดฟันแบบใสให้ครบในชุดนั้นๆ และได้รับการสแกนช่องปากอีกครั้งหลังจากใส่เครื่องจัดฟันแบบใสครบชุด คนไข้ที่ถูกคัดเลือกให้เข้าร่วมการศึกษาจะต้องมีไฟล์ในรูปแบบ Stereolithography ทั้งไฟล์สแกนช่องปากก่อนรักษา (T0), ไฟล์แผนการรักษา (TP) แบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟัน และ ไฟล์สแกนช่องปากเคลื่อนที่จริง (T1) ในชุดนั้นๆ นำไฟล์ในรูปแบบ Stereolithography

มาวัดใน Geomagic Control X software โดยกำหนดจุดและเส้นของการวัดมิติส่วนโค้งฟัน ดังนี้ (Krieger และคณะ, 2012; Fiori และคณะ, 2022)

- ความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรในส่วนฟันหน้า (Anterior Arch Width: AAW)
- ขากรรไกรบน: ใช้เส้นขวางที่เชื่อมร่องกลาง (Central groove) ของฟันกรามน้อยซี่ที่หนึ่งทั้งสองข้าง
- ขากรรไกรล่าง: ใช้เส้นขวางที่เชื่อมจุดสัมผัสประชิด (Contact points) ของฟันกรามน้อยทั้งสองข้าง
- ความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรในส่วนฟันหลัง (Posterior Arch Width: PAW)
- ขากรรไกรบน: วัดจากตำแหน่งหลุมกลางฟัน (Central pit) ของฟันกรามซี่ที่หนึ่งทั้งสองข้าง
- ขากรรไกรล่าง: วัดระยะระหว่างยอดปุ่มฟันด้านไกลกลางด้านแก้ม (Disto-buccal cusp tip) ของฟันกรามซี่ที่หนึ่งทั้งสองข้าง
- ความสูงของแนวโค้งฟัน (Arch Height: AH) วัดโดยลากเส้นจากผิวด้านริมฝีปาก (Labial surface) ของฟันตัดกลางที่ตั้งฉากกับแนวระนาบ ไปยังเส้นที่เชื่อมของความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรในส่วนฟันหน้า (Anterior Arch Width: AAW)



A. B. C.

ภาพที่ 1 การวัดมิติส่วนโค้งฟันในขากรรไกรบน A. ไฟล์สแกนช่องปากก่อนรักษา (T0) B. ไฟล์แผนการรักษา (TP) แบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟัน C. ไฟล์สแกนช่องปากเคลื่อนที่จริง (T1)



A. B. C.

ภาพที่ 2 การวัดมิติส่วนโค้งฟันในขากรรไกรล่าง A. ไฟล์สแกนช่องปากก่อนรักษา (T0) B. ไฟล์แผนการรักษา (TP) แบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟัน C. ไฟล์สแกนช่องปากเคลื่อนที่จริง (T1)

ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษาและการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง ในแต่ละแนวจะถูกคำนวณรายกายผลเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำโดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ} = 100 - \left[\frac{(\text{การเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา} - \text{การเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง})}{\text{การเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา}} \times 100 \right]$$

การวิเคราะห์ทางสถิติจะดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, เวอร์ชัน 29.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient; ICC) จะถูกใช้เพื่อประเมินความเที่ยงตรงของผู้ประเมินคนเดียว (Intra-rater reliability) การทดสอบ Shapiro-Wilk จะถูกใช้เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) การทดสอบ Paired-sample t-test จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา (TP-T0) และ การเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง (T1-T0)

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบ Intraclass Correlation Coefficient (ICC) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของการประเมินโดยผู้ประเมินคนเดิมในเวลาต่างกัน (Intra-rater reliability) อยู่ในระดับดีเยี่ยมโดยมีค่าเท่ากับ 0.98

จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ถูกคัดเข้าเกณฑ์จากผู้ป่วย 18 ราย จำนวน 24 ส่วนโค้งฟัน แบ่งเป็นส่วนโค้งฟันของผู้ป่วยเพศชาย 7 ราย และเพศหญิง 17 ราย โดยมีอายุเฉลี่ย 28 ± 7.5 ปี

ตารางที่ 1 ค่าการวัดการวัดมิติส่วนโค้งฟัน ที่ประเมินในระยะก่อนการรักษา(T0) แผนการรักษา(TP) และ เคลื่อนที่จริง (T1)

การวัดมิติส่วนโค้งฟัน	ก่อนรักษา(T0)	แผนการรักษา(TP)	เคลื่อนที่จริง(T1)
	Mean $\pm$ SD (mm.)	Mean $\pm$ SD (mm.)	Mean $\pm$ SD (mm.)
AAW	36.20 $\pm$ 2.50	38.89 $\pm$ 2.08	37.95 $\pm$ 2.17
PAW	45.98 $\pm$ 2.69	48.28 $\pm$ 2.73	47.45 $\pm$ 2.66
AH	18.15 $\pm$ 2.27	16.48 $\pm$ 1.67	16.97 $\pm$ 1.69

ตารางที่ 2 ปริมาณการวัดมิติส่วนโค้งฟัน การเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา(TP—T0), การเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงหลังการรักษา (T1—T0), ผลต่างเทียบการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงกับแผนการรักษา (T1-TP) และ ค่าความแม่นยำทางคลินิก (%)

การวัดมิติส่วนโค้งฟัน	การเคลื่อนฟันตามแผนการรักษา (TP-T0)	การเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง (T1-T0)	ผลต่างเทียบการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงกับแผนการรักษา (T1-TP)	ค่าความแม่นยำทางคลินิก (%)
	Mean $\pm$ SD (mm.)	Mean $\pm$ SD (mm.)	Mean $\pm$ SD (mm.) 95%CI p-Value	(%)
AAW	2.65 $\pm$ 1.87	1.83 $\pm$ 1.47	-0.82 $\pm$ 0.85 -1.17 to -0.46 <0.01*	62.80%
PAW	2.33 $\pm$ 1.50	1.50 $\pm$ 1.27	-0.74 $\pm$ 0.82 -1.09 to -0.40 <0.01*	67.71%
AH	1.68 $\pm$ 0.98	1.23 $\pm$ 0.85	-0.45 $\pm$ 0.48 -0.66 to -0.25 <0.01*	69.89%

* = Sig. p < .05

ตารางที่ 1 แสดงค่าการวัดมิติส่วนโค้งฟัน ทั้งหมดที่ทำการประเมินในระยะก่อนการรักษา (T0) แผนการรักษา (TP) และ เคลื่อนที่จริง (T1)

ตารางที่ 2 แสดงความแตกต่างระหว่างปริมาณการวัดมิติส่วนโค้งฟัน ตามแผนการรักษาที่วางแผนไว้ (TP—T0) กับปริมาณที่เกิดขึ้นจริงหลังการรักษา (T1—T0) ผลต่างเทียบการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงกับแผนการรักษา (T1-TP) และ

ค่าความแม่นยำทางคลินิก (Clinical accuracy; %) จากการศึกษาพบว่า การวัดมิติส่วนโค้งฟันในขากรรไกรทุกค่าทั้ง AAW, PAW และ AH มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษาและการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง และในทุกการวัดเปลี่ยนแปลงการวัดมิติส่วนโค้งฟันผลต่างเทียบการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริง กับแผนการรักษา (T1-TP) มีค่าน้อยกว่า 1 มม. แสดงถึงการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงจะน้อยกว่าการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษาในทุกการวัดมิติส่วนโค้งฟัน

บริเวณที่มีความแม่นยำน้อยที่สุดคือ ความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรในส่วนฟันหน้า (Anterior Arch Width: AAW) โดยมีความแม่นยำ 62.80% และมีความแตกต่างระหว่างค่าที่วางแผนไว้กับค่าที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ -0.82 ± 0.85 มม. ในทางตรงกันข้าม บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงในการวัดมิติส่วนโค้งฟันในขากรรไกรแม่นยำสูงที่สุดคือ ความสูงของแนวโค้งฟัน (Arch height: AH) 69.89% และมีความแตกต่างระหว่างค่าที่วางแผนไว้กับค่าที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ -0.45 ± 0.48 มม. เมื่อเทียบกับ AAW และ PAW สรุปโดยรวมการวัดมิติส่วนโค้งฟันทุกค่ามีความแม่นยำ อยู่ระหว่าง 62.80%-69.89%

หากมองการเคลื่อนที่ฟันเปรียบเทียบแนวมิติขวาง (Transverse tooth movement) คือ AAW และ PAW พบว่า PAW (67.71%) มีปริมาณความแม่นยำทางคลินิกมากกว่า AAW (62.80%) ผลต่างเทียบการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงกับแผนการรักษา -0.74 ± 0.82 มม. และ -0.82 ± 0.85 มม. ตามลำดับ

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ทุกมิติของส่วนโค้งฟันมีการเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริงน้อยกว่าที่วางแผนไว้ จากผลต่างเทียบการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงกับแผนการรักษา (T1-TP) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแสดงให้เห็นแนวโน้มว่าการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงแตกต่างจากการเคลื่อนฟันที่คาดการณ์ไว้ตามแผนการรักษา ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเครื่องมือจัดฟันแบบใสอาจไม่สามารถแสดงผลการเคลื่อนฟันได้ครบตามปริมาณที่วางแผนไว้ ดังนั้นจึงควรพิจารณาการวางแผนออกแบบให้ฟันเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่มากกว่าหรือเลยจุดที่สมบูรณ์ไปเล็กน้อยในขั้นตอนการวางแผนการรักษา (Overcorrection) เพื่อชดเชยการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงจะต่ำกว่าการเคลื่อนฟันที่คาดการณ์ไว้ตามแผนการรักษา แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Tuncay และคณะ (2006) ที่แนะนำให้พิจารณาการทำ overcorrection และ refinement เพื่อให้ได้ผลการรักษาที่ดีที่สุด

ในการศึกษานี้ พบว่าเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่ผลิตจากวัสดุ PETG ในเคสที่มีการรักษาด้วยการขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง มีความแม่นยำจากการวัดมิติส่วนโค้งฟันอยู่ระหว่าง 62.80%-69.89% ความแม่นยำน้อยที่สุดพบในการวัดความกว้างของแนวโค้งขากรรไกรส่วนฟันหน้า (Anterior Arch Width; AAW) เท่ากับ 62.80% ขณะที่ความสูงของแนวโค้งฟัน (Arch Height; AH) มีความแม่นยำมากที่สุดเท่ากับ 69.89% เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Sachdev และคณะ (2021) ซึ่งทำการศึกษาค่าความแม่นยำของการเคลื่อนฟันด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใสที่ผลิตจากวัสดุ PETG เช่นกัน พบว่าค่าความแม่นยำโดยรวมของการเคลื่อนฟันเท่ากับ 56.18% โดยการเคลื่อนฟันในแนวใกล้-ไกล (Mesiodistal movement) มีความแม่นยำสูงที่สุดที่ 72.33% ขณะที่การกดฟัน (Intrusion) มีความแม่นยำน้อยที่สุดที่ 43.28%

จากการศึกษาของ Galluccio และคณะ (2023) ทำการวัดความแม่นยำของการขยายส่วนโค้งฟันบนในแนวขวาง (Maxillary arch transverse expansion) โดยใช้เครื่องมือจัดฟันแบบใส Invisalign® ที่ตำแหน่งปุ่มฟัน (Cusp) และระดับเหงือก พบว่าการวัดที่ระดับเหงือกของซี่ฟันกรามซี่ที่หนึ่งมีความแม่นยำ 55.85% ในขณะที่ การวัดที่ระดับปุ่มฟันของซี่ฟันกรามซี่ที่หนึ่งมีความแม่นยำ 70.88% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟันเคลื่อนการขยายส่วนโค้งฟันบนในแนวขวางเป็นแบบการเอียงของฟันหลังไปทางด้านแก้ม (Buccal tipping) ซึ่งสอดคล้องกับงานการศึกษาของ Zhou และคณะ (2020) รายงานว่าการเพิ่มความกว้างของส่วนโค้งฟันที่ขากรรไกรบนด้วยเครื่องมือจัดฟันแบบใสเกิดขึ้นเป็นหลักจากการเอียงของฟันหลังไปทางด้านแก้ม (Buccal tipping) ขณะที่การขยายฟันแบบเคลื่อนทั้งซี่ (Bodily expansion) มีความแม่นยำ

เพียง 36.35% จากการศึกษาพบว่าความแม่นยำของ AAW (62.80%) และ PAW (67.71%) เป็นการวัดบนส่วนตำแหน่งปุ่มฟัน (Cusp) และหลุมกลางฟัน (Central pit) ไม่ได้วัดจากตำแหน่งขอบเหงือกจึงทำให้มีค่าความแม่นยำมาก ซึ่งอาจเป็นผลจากการเอียงของฟันไปทางด้านแก้มมากกว่าการเคลื่อนฟันทั้งซี่แบบขนาน อย่างไรก็ตามในการศึกษาหน้าอาจจะแนะนำการศึกษาโดยการวัดที่ระดับเหงือกด้วย

ในเคสที่มีการรักษาด้วยการขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง มักพบการดึงฟันหน้าถอยหลังร่วมด้วย เนื่องจากการเคลื่อนฟันที่ส่งเสริมกัน (Synergistic movements) (Martínez-Lozano และคณะ, 2024) ซึ่งทันตแพทย์จัดฟันมักวางแผนการเคลื่อนฟันทั้งสองรูปแบบร่วมกันในแบบจำลองการรักษา 3 มิติ นอกจากนี้การขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวางมักสัมพันธ์กับการลดลงของ Arch Height เนื่องจากผู้ป่วยที่เข้าร่วมการศึกษานี้เป็นเคสที่ได้รับการรักษาด้วยการขยายส่วนโค้งฟันในแนวขวาง จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้การวัดค่า AH ในการศึกษานี้มีค่าความแม่นยำมากที่สุด (69.89%) นอกจากนี้ Kravitz และคณะ (2009) รายงานว่าการเอียงของฟันไปทางด้านลิ้น (Lingual crown tip) มีความแม่นยำ 53.1% ซึ่งสูงกว่าการเอียงของฟันไปทางด้านริมฝีปาก (Labial crown tip) 37.6% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะในฟันตัดของขากรรไกรบน โดย AH ถูกวัดจากระยะตั้งฉากระหว่างผิวด้านริมฝีปากของฟันตัดกลางกับเส้นที่เชื่อมความกว้าง AAW จึงได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งฟันหน้าโดยตรง ค่าความแม่นยำของ AH ที่สูงในการศึกษานี้อาจบ่งชี้ว่าการวางแผนแบบ 3 มิติจำลองการเคลื่อนที่ของฟันสามารถคาดการณ์การเคลื่อนที่ของฟันหน้าเป็นไปตามแผนได้ค่อนข้างดี อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าความแม่นยำของ AH จะอยู่ในระดับสูง แต่การเปลี่ยนแปลงของ AH อาจแตกต่างกันไปทั้งในลักษณะที่ลดลงหรือคงที่ตามรูปทรงของส่วนโค้งฟันบน (Maxillary arch form) ในผู้ป่วยแต่ละราย (Taner และคณะ, 2004) ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่ได้หลังการรักษา

PETG เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน และมีความโปร่งใสสูง วัสดุชนิดนี้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาและการสึกหรอ อีกทั้งมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่เอื้อต่อการเคลื่อนฟันอย่างค่อยเป็นค่อยไป และต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามการคลายความเค้น (Stress relaxation) มีความสำคัญต่อแรงที่เครื่องมือส่งไปยังฟันจะลดลงตามระยะเวลา ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเคลื่อนฟันลดลงได้ (Albertini และคณะ, 2020) การศึกษาของ Lombardo และคณะ (2017) ศึกษาคุณสมบัติการคลายความเค้น (Stress relaxation properties) ของวัสดุเทอร์โมพลาสติก 4 ชนิดที่ใช้ในการผลิตเครื่องมือจัดฟันแบบใส ภายใต้การโก่งตัว (Deflection) อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประกอบด้วยวัสดุแบบชั้นเดียว (Single-layer) และวัสดุแบบหลายชั้น (Double-layer) วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยทั้งกลุ่ม PETG และ โพลียูรีเทน ผลการศึกษาพบว่าวัสดุทุกชนิดที่ทำการทดสอบมีการคลายความเค้นอย่างมีนัยสำคัญภายใน 24 ชั่วโมง โดยความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 8 ชั่วโมงแรกภายหลังการให้แรง ก่อนที่จะค่อย ๆ ลดลงและเข้าสู่ระดับคงที่ (Plateau) และพบว่าจำนวนชั้นของวัสดุมีผลต่อการคลายความเค้น และแรงที่ส่งไปที่ฟัน พบวัสดุแบบชั้นเดียวระดับแรงลดลงอย่างรวดเร็ว ต่างจากวัสดุแบบหลายชั้น ยังสามารถคงแรงไว้ใน เมื่อเวลาผ่านไปนานกว่า คุณสมบัติการคลายความเค้นของวัสดุนี้อาจส่งผลให้ระยะการเคลื่อนฟันที่เกิดขึ้นจริงต่างจากการเคลื่อนฟันตามแผนการรักษาได้

สรุป ผลการศึกษาพบว่าการการจัดฟันแบบใสด้วยวัสดุ PETG สามารถใช้ขยายส่วนโค้งฟันได้อย่างมีประสิทธิภาพในเคสที่มีความซับซ้อนไม่มาก เกิดเคลื่อนที่ของฟันเกิดขึ้นจริงน้อยกว่าที่วางแผนไว้ในทุกมิติของส่วนโค้งฟัน ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการรักษา การวางแผนการรักษาควรทำร่วมกับการทำ Overcorrection จะช่วยลดความจำเป็นในการปรับแก้ในระหว่างการรักษาและ Refinement ได้

เอกสารอ้างอิง

- Albertini, P., Mazzanti, V., Mollica, F., Pellitteri, F., Palone, M., & Lombardo, L. (2022). Stress relaxation properties of five orthodontic aligner materials: A 14-day in-vitro study. *Bioengineering*, 9(8), 349. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080349>

- Bichu, Y. M., Alwafi, A., Liu, X., Andrews, J., Ludwig, B., Bichu, A. Y., & Zou, B. (2023). Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioactive Materials*, 22, 384-403.
- Bowman, S. J. (2017). Improving the predictability of clear aligners. *Seminars in Orthodontics*, 23(1), 65-75.
- Chisari, J. R., McGorray, S. P., Nair, M., & Wheeler, T. T. (2014). Variables affecting orthodontic tooth movement with clear aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 145(4Suppl.), S82-S91.
- Fiori, A., Minervini, G., Nucci, L., d'Apuzzo, F., Perillo, L., & Grassia, V. (2022). Predictability of crowding resolution in clear aligner treatment. *Progress in Orthodontics*, 23(1), 43.
- Galluccio, G., De Stefano, A. A., Horodyski, M., Impellizzeri, A., Guarnieri, R., Barbato, E., Di Carlo, S., & DeAngelis, F. (2023). Efficacy and accuracy of maxillary arch expansion with clear aligner treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4634. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054634>
- Ganta, G. K., Cheruvu, K., Ravi, R. K., & Reddy, R. P. (2021). Clear aligners, the aesthetic solution: A review. *International Journal of Dental Materials*, 3(3), 90-95.
- Houle, J. P., Piedade, L., Todescan, R., Jr., & Pinheiro, F. H. (2017). The predictability of transverse changes with Invisalign. *The Angle Orthodontist*, 87(1), 19-24.
- Kravitz, N. D., Kusnoto, B., BeGole, E., Obrez, A., & Agran, B. (2009). How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(1), 27-35.
- Krieger, E., Seiferth, J., Marinello, I., Jung, B. A., Wriedt, S., Jacobs, C., & Wehrbein, H. (2012). Invisalign® treatment in the anterior region: Were the predicted tooth movements achieved? *Journal of Orofacial Orthopedics*, 73(5), 365-376.
- Kundal, S. (2020). Aligners: The science of clear orthodontics. *International Journal of Dental and Medical Specialty*, 7.
- Lombardo, L., Martines, E., Mazzanti, V., Arreghini, A., Mollica, F., & Siciliani, G. (2017). Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study. *The Angle Orthodontist*, 87(1), 11-18.
- Martínez-Lozano, D., Castellanos-Andrés, D., & López-Jiménez, A.-J. (2024). Staging of orthodontic tooth movement in clear aligner treatment: Macro-staging and micro-staging—A narrative review. *Applied Sciences*, 14, 6690.
- Sachdev, S., Tantidhnazet, S., & Saengfai, N. N. (2021). Accuracy of tooth movement with in-house clear aligners. *Journal of the World Federation of Orthodontists*, 10(4), 177-182.
- Taner, T. U., Ciger, S., El, H., Germeç, D., & Es, A. (2004). Evaluation of dental arch width and form changes after orthodontic treatment and retention with a new computerized method. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 126(4), 464-475.
- Tuncay, O. C. (2006). *The Invisalign system*. Quintessence Publishing Co.
- Zhou, N., & Guo, J. (2020). Efficiency of upper arch expansion with the Invisalign system. *The Angle Orthodontist*, 90(1), 23-30.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Conflicts of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.



Copyright: © 2026 by the authors. This is a fully open-access article distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).