

DENTIN REMINERALIZATION OF FLUORIDE TOOTHPASTE AND NANO-HYDROXYAPATITE TOOTHPASTE: A PILOT STUDY

Ratdanaya YODSUWAN¹, Thidarat ANGWARAWONG² and Onauma ANGWARAVONG^{3*}

1 Master of Science in Pediatric Dentistry, Faculty of Dentistry, Khon Kaen University, Thailand; ratdanayayodsuwan.y@kkumail.com

2 Department of Prosthodontics Dentistry, Khon Kaen University, Thailand; thidarat_ang@hotmail.com

3 Division of Pediatric Dentistry, Department of Preventive Dentistry, Khon Kaen University, Thailand; onaang@kku.ac.th (O.A.) (Corresponding Author)

ARTICLE HISTORY

Received: 3 February 2025

Revised: 24 February 2025

Published: 4 March 2025

ABSTRACT

This study compares the remineralization of dentin by dividing subjects into three groups: a control group, a toothpaste containing 1,000 ppm fluoride, and a toothpaste containing 10% nano-hydroxyapatite. Surface microhardness was measured using a Vickers microhardness tester before and after simulating an oral pH cycling process for 14 days. The study found that the microhardness of the fluoride toothpaste showed the best results, followed by the nano-hydroxyapatite toothpaste, and the control group, respectively. When comparing the percentage changes in surface microhardness between the three groups using One-way ANOVA, significant differences were observed in all group ($p < 0.001$). Pairwise comparisons using Turkey's test revealed statistically significant differences across all three pairs ($p < 0.05$). Therefore, it can be concluded that the fluoride toothpaste is more dentin remineralization than nano-hydroxyapatite toothpaste.

Keywords: Dentin, Fluoride, Nano-Hydroxyapatite, Remineralization, Toothpaste

CITATION INFORMATION: Yodsuwan, R., Angwarawong, T., & Angwaravong, O. (2025). Dentin Remineralization of Fluoride Toothpaste and Nano-Hydroxyapatite Toothpaste: A Pilot Study. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 3(3), 36

การคืนแร่ธาตุในเนื้อพืชมของยาสีพันที่มีส่วนผสมฟลูออไรด์ และนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์: การศึกษานำร่องในห้องปฏิบัติการ

รัตน์ดนยา ยอดสุวรรณ¹, ธิดารัตน์ อังวรารงค์² และ อรุมา อังวรารงค์³

1 นักศึกษาระดับวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิชาเอกทันตกรรมสำหรับเด็ก คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; ratdanayayodsuvan.y@kku.ac.th

2 แขนงวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; thidarat_ang@hotmail.com

3 แขนงวิชาทันตกรรมสำหรับเด็ก สาขาวิชาทันตกรรมป้องกัน คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; onaang@kku.ac.th (ผู้ประพันธ์บรรณกิจ)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เปรียบเทียบการคืนแร่ธาตุในเนื้อฟัน สุ่มแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มควบคุม กลุ่มยาสีฟันผสมฟลูออไรด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน และกลุ่มยาสีฟันผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ร้อยละ 10 วัดค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคด้วยเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเตอร์ก่อนและหลังจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก (pH cycling) เป็นเวลา 14 วัน ผลการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคของยาสีฟันผสมฟลูออไรด์ให้ผลดีที่สุด ตามด้วยยาสีฟันผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และกลุ่มควบคุม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงความแข็งผิวระดับจุลภาคระหว่าง 3 กลุ่มด้วยสถิติ One-way ANOVA พบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 1 คู่ ($p < 0.001$) เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปหลังสัมผัสสารทดลองทีละคู่ด้วยสถิติ Turkey's test พบว่าทั้ง 3 คู่ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จึงสรุปว่า ยาสีฟันฟลูออไรด์ให้ผลการคืนแร่ธาตุบนเนื้อฟันดีกว่ายาสีฟันนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

คำสำคัญ: การคืนแร่ธาตุ, การสูญเสียแร่ธาตุ, นาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์, เนื้อฟัน, ฟลูออไรด์

ข้อมูลการอ้างอิง: รัตน์ดนยา ยอดสุวรรณ, ธิดารัตน์ อังวรารงค์ และ อรุมา อังวรารงค์. (2568). การคืนแร่ธาตุในเนื้อฟันของยาสีฟันที่มีส่วนผสมฟลูออไรด์และนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์: การศึกษานำร่องในห้องปฏิบัติการ. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 3(3), 36

บทนำ

การสูญเสียแร่ธาตุ (demineralization) ที่มากกว่าการคืนแร่ธาตุ (remineralization) ทำให้แร่ธาตุละลายและสูญเสียโครงสร้างฟัน นำไปสู่ฟันสึกและฟันผุ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตและกิจกรรมในชีวิตประจำวัน (Boiko et al., 2010) การป้องกันสามารถทำได้โดยใช้สารช่วยคืนแร่ธาตุ เช่น ยาสีฟันที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ ในปัจจุบันมีหลายการศึกษาที่ยอมรับว่ายาสีฟันที่ผสมฟลูออไรด์มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย แต่ยังมีข้อถกเถียงเรื่องความเป็นพิษและฟันตกกระ (Ullah et al., 2017) ดังนั้น ยาสีฟันที่ผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์จึงเป็นตัวเลือกหนึ่ง จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การเปรียบเทียบผลของการคืนแร่ธาตุยังมีความขัดแย้งกัน (Leal et al., 2020; Tschoppe et al., 2011) แม้ว่าจะมีหลายการศึกษาที่ยอมรับว่านาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ช่วยคืนแร่ธาตุได้ (Bordea et al., 2020; Meyer et al., 2022; Souza et al., 2015) และยังไม่มีการศึกษาในระยะยาวสำหรับการใช้ยาสีฟันนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ในเนื้อฟัน จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้เพื่อเปรียบเทียบการคืนแร่ธาตุระหว่างฟลูออไรด์และนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ในรูปแบบยาสีฟันที่ชั้นเนื้อฟัน ในห้องปฏิบัติการ

การทบทวนวรรณกรรม

โดยทั่วไปในช่องปากของมนุษย์จะเกิดการสูญเสียแร่ธาตุ สลับกับการคืนแร่ธาตุ ซึ่งเป็นวัฏจักรที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสูญเสียแร่ธาตุ เป็นกระบวนการเอาไอออนแร่ธาตุต่างๆ ของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ออกมา โดยเมื่อค่าพีเอชในช่องปากลดลง มีความเป็นกรดจนต่ำกว่าระดับวิกฤต (critical pH) ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) เป็นโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) ที่มีประจุลบลดลง 1 ประจุ การยึดจับกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จึงไม่เสถียร ทำให้ผลึกสูญเสียแคลเซียมและละลายแร่ธาตุจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ เมื่อน้ำลายมีแคลเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออนเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการปรับสมดุลความเป็นกรดให้เป็นกลาง จนกระทั่งค่าพีเอชสูงกว่าค่าวิกฤต แคลเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออนที่อยู่ในคราบจุลินทรีย์และในน้ำลายจะถูกดูดซึมเข้าไปในผลึกโครงสร้างของฟันที่สูญเสียแร่ธาตุ ทำให้กลับมามีแร่ธาตุพอกขึ้นอีกครั้ง อย่างต่อเนื่องและสมดุลกัน เรียกกระบวนการนี้ว่าการคืนแร่ธาตุ (Buzalaf et al., 2011) หากความสมดุลนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของฟันในช่องปาก เช่น ความแข็ง (hardness) และความแข็งแรง (strength) (Usha & Sathyanarayanan, 2009)

ฟลูออไรด์ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของแร่ธาตุในฟัน โดยมีกลไกการทำงาน ดังนี้ 1) การยับยั้งการสูญเสียแร่ธาตุ หากมีฟลูออไรด์อยู่รอบๆ ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ฟลูออไรด์ไอออนจะเข้าไปแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิล (OH^-) ก่อเป็นผลึกฟลูอออะพาไทต์ (fluorapatite) ที่สามารถต้านการทำลายจากกรด และยับยั้งการสูญเสียแร่ธาตุ 2) การส่งเสริมการคืนแร่ธาตุ ฟลูออไรด์จะถูกดูดซับที่ผิวผลึกที่ถูกทำลาย และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน เกิดโครงสร้างคล้ายฟลูอออะพาไทต์ (fluorapatite-like) ได้แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ซึ่งเป็นแหล่งเก็บฟลูออไรด์ที่ผิวเคลือบฟัน ช่วยทำให้เกิดผลึกฟลูอออะพาไทต์ต่อไป 3) การยับยั้งแบคทีเรีย ฟลูออไรด์ไอออนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดฟันผุ (Buzalaf et al., 2011; Featherstone, 2000)

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีส่วนประกอบแร่ธาตุแคลเซียมฟอสเฟต มีความเสถียรมากและละลายตัวได้น้อย มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) (Bordea et al., 2020) ไม่เป็นพิษ และไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการอักเสบในเซลล์และเนื้อเยื่อ กลไกการทำงานของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ประกอบด้วย 1) การก่อตัวเป็นชั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีความสามารถในการจับกับคอลลาเจน เนื้อฟัน และเคลือบฟัน ทำหน้าที่ยึดติดกับผลึกของเนื้อเยื่อฟัน ช่วยปกป้องการทำลายจากกรดจากสารอาหาร 2) การปลดปล่อยแคลเซียมและการบัฟเฟอร์ค่าพีเอชของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ความเข้มข้นของแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเปลี่ยนสมดุลทางเคมีระหว่างฟันกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ช่วยให้เสถียรมากขึ้น 3) การยับยั้งการยึดเกาะของคราบแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียจะไปยึดเกาะกับอนุภาคของไฮดรอกซีอะพาไทต์ในน้ำลายแทน 4) การคืนแร่ธาตุ อนุภาคของไฮดรอกซีอะพาไทต์จะแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของฟันที่ผุและก่อตัวเป็นผลึกขึ้นมา

อีกทั้งยังมีช่วยดึงดูดแคลเซียมและฟอสเฟตไอออนจำนวนมากอย่างต่อเนื่องเข้าไปในเนื้อเยื่อฟัน ช่วยส่งเสริมให้ผลึกสมบูรณและมีการเติบโต ดังนั้น จึงมีการนำไฮดรอกซีอะพาไทต์มาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์และทางทันตกรรม เนื่องจากมีอนุภาคนาขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพในการคืนแร่ธาตุ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อด้อย คือ โครงสร้างมีรูพรุน และคุณสมบัติทางกลไม่ดี (Bordea et al., 2020) ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง เรียกว่า นาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (nanohydroxyapatite) เป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ สามารถเข้าสู่เนื้อฟันและเปลี่ยนเป็นผลึกอะพาไทต์ อุดบดเนื้อฟัน ทนต่อการกระทำทั้งทางกลและทางเคมีได้ดีและมีประสิทธิภาพนานมากขึ้น (Bordea et al., 2020; Kasemkhun & Rirattanapong, 2021; Souza et al., 2015) จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่ากลไกการคืนแร่ธาตุของฟลูออไรด์ คือ สร้างผลึกฟลูออโรอะพาไทต์เพื่อยับยั้งการสูญเสียแร่ธาตุ และกระตุ้นการคืนแร่ธาตุ ส่วนไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเติมเต็มช่องว่าง ก่อตัวเป็นชั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมฟันที่ถูกทำลายในระยะเริ่มต้น (Bordea et al., 2020; Martínez-Mier, 2012; Ullah et al., 2017)

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับผลการคืนแร่ธาตุระหว่างยาสีฟันที่มีฟลูออไรด์ และนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ยังคงให้ผลที่มีความขัดแย้งในเรื่องความสามารถในการคืนแร่ธาตุ โดยมีการศึกษาพบว่าการเพิ่มนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์เข้าไปในยาสีฟันจะไม่ได้ลดการสูญเสียแร่ธาตุในเนื้อฟันมากกว่าการใช้ฟลูออไรด์เพียงอย่างเดียว (Leal et al., 2020) อีกทั้งยังมีบางการศึกษาที่พบว่า นาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้ผลในการคืนแร่ธาตุดีกว่ายาสีฟันเอมีนฟลูออไรด์ในชั้นเนื้อฟัน (Tschoppe et al., 2011) จึงเป็นที่มาของการศึกษารั้งนี้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้สำหรับอ้างอิงการศึกษาอื่น ๆ และเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเลือกผลิตภัณฑ์ยาสีฟันที่มีส่วนผสมของแคลเซียมและฟอสเฟตสำหรับผู้ป่วยที่มีฟันสึกหรือฟันผุ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการคืนแร่ธาตุในเนื้อฟันด้วยวิธีการวัดความแข็งผิวระดับจุลภาค ระหว่างยาสีฟันที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์กับยาสีฟันที่มีส่วนผสมของนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในห้องปฏิบัติการ

สมมติฐานการวิจัย

ความแข็งผิวระดับจุลภาคในเนื้อฟันระหว่างกลุ่มควบคุม กลุ่มยาสีฟันที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน กลุ่มยาสีฟันที่มีส่วนผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทด์ร้อยละ 10 มีความแตกต่างกัน

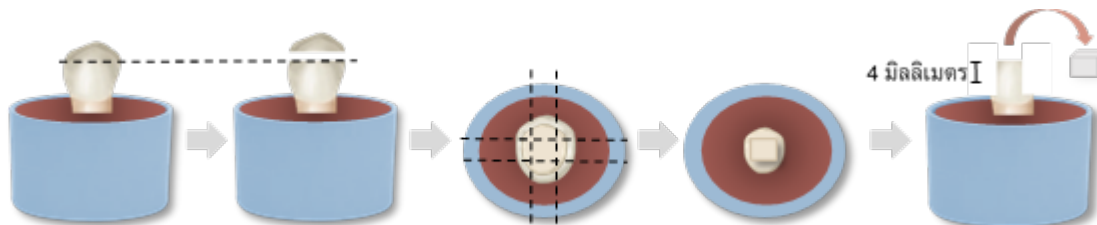
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษารั้งนี้เป็นการวิจัยทางห้องปฏิบัติการ (laboratory experimental study) ได้รับการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เลขที่ HE671455 ก่อนเริ่มการวิจัย ใช้ฟันกรามน้อยบนซี่ที่หนึ่งหรือซี่ที่สองของมนุษย์ โดยมีเกณฑ์คัดเข้า คือ มีเนื้อฟันปกติ ซึ่งเป็นฟันที่ถอนจากการทันตกรรมจัดฟัน เกณฑ์คัดออกคือ ฟันผุที่เป็นโพรงและไม่เป็นโพรง ฟันตกรักระ ฟันเปลี่ยนสี ฟันมีรอยแตกกร้าว ฟันมีภาวะเนื้อฟันบดพร่อง ฟันที่ได้รับการบูรณะ หรือรักษาดคลองรากฟัน กำหนดจำนวนฟันทั้งหมด 30 ซี่ โดยมีการสุ่มแบบง่าย แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ซี่งาน โดยกลุ่มที่ 1 กลุ่มควบคุม จะไม่ใช้สารทดลองใดๆ แขน้ำปราศจากไอออน กลุ่มที่ 2 ใช้ยาสีฟันที่ผสมฟลูออไรด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน (Colgate Kid Mild Mint gel®, Colgate-Palmolive, Thailand) และกลุ่มที่ 3 ใช้ยาสีฟันที่ผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทด์ร้อยละ 10 (Dr. Jen. St. Paul 10% Premium Nano Hydroxyapatite®, MN 55118 USA)

การเตรียมชิ้นงาน

ทำความสะอาดฟันกรามน้อยบนซี่ที่ผ่านเกณฑ์การคัดเข้า โดยล้างคราบเลือดและน้ำลาย ขัดฟันด้วยห้วยางและใช้ คิวเรตต์กำจัดหินน้ำลายและเนื้อเยื่ออ่อนที่เกาะติดกับผิวรากฟัน จากนั้นนำฟันฝังในดินน้ำมัน ปิดทับข้างบนด้วยอะคริลิกเรซิน ให้ตำแหน่งรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน (Cemento-enamel junction: CEJ) ห่างจากขอบท่อนพีวีซีประมาณ 2 มิลลิเมตร ใช้เครื่องตัดฟันความเร็วต่ำ (Mecatome T180, Brié-et-Angonnes, France) ตัดฟัน 3 ครั้ง โดย

ครั้งแรกตัดในแนวตั้งฉากกับแนวแกนฟัน ห่างจากยอดฟันลงมา 4 มิลลิเมตร ตัดครั้งที่ 2 ในแนวด้านลิ้น-ด้านแก้ม และด้านไกลกลาง-ด้านไกลกลาง อย่างละ 2 ตำแหน่ง ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 4x4 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเนื้อฟัน ตัดครั้งสุดท้ายในแนวตั้งฉากกับแนวแกนฟันเช่นเดียวกับการตัดครั้งแรก ห่างจากขอบฟันลงมา 4 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาด 4x4x4 ตารางมิลลิเมตร (ภาพที่ 1) เมื่อได้ชิ้นงานดังกล่าว นำไปฝังบนท่อพีวีซีด้วยอะคริลิกเรซินอีกครั้ง แล้วนำมาขัดผิวด้วยเครื่องขัดชนิดจานหมุน (Ecomet, Buehler, USA) ใช้กระดาษทรายน้ำเรียงเบอร์ 800 1,000 1,500 และ 2,000 ตามลำดับ หมุนที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ขัดเบอร์ละ 1 นาที โดยเตรียมชิ้นงานทั้งหมดจำนวน 30 ชิ้นงาน



ภาพที่ 1 แสดงแนวการตัดชิ้นงานขนาด 4x4x4 ตารางมิลลิเมตร

การจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก

ก่อนเริ่มขั้นตอนการจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก เตรียมสารละลายสูญเสียแร่ธาตุ สารละลายคืนแร่ธาตุ และน้ำลายเทียม สำหรับจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก โดยแต่ละสารมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1) สารสำหรับทำสารละลายสูญเสียแร่ธาตุ ได้แก่ โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 2.2 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.2 มิลลิโมลาร์ กรดอะซิติกความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 5 (ten Cate & Duijsters, 1982; Zuluaga-Morales et al., 2022)

2) สารสำหรับทำสารละลายคืนแร่ธาตุ ได้แก่ โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.9 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 7 (Erhardt et al., 2008; Rocha et al., 2014; ten Cate & Duijsters, 1982; Zuluaga-Morales et al., 2022)

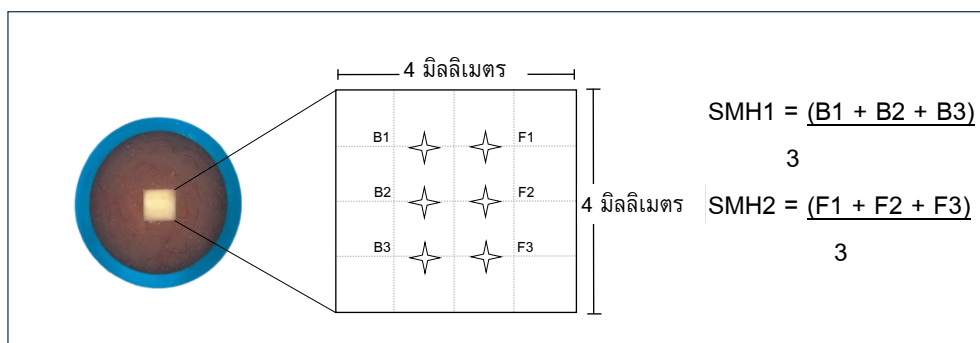
3) สารสำหรับทำน้ำลายเทียม ได้แก่ โพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.7 มิลลิโมลาร์ แมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมลาร์ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ โซเดียมเบนโซเอตความเข้มข้น 2.0 กรัมต่อลิตร โซเดียมคาร์บอเนตเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 7.8 กรัมต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 7 (Panich & Poolthong, 2009; Zuluaga-Morales et al., 2022)

ขั้นตอนการจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก นำชิ้นงานแต่ละกลุ่ม แช่ในสารทดลอง 2 นาที โดยกลุ่มควบคุม แช่น้ำปราศจากไอออน กลุ่มยาสีฟันที่ผสมฟลูออไรด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน และกลุ่มยาสีฟันที่ผสมนาโนไฮดรอกซี อะพาไทต์ ร้อยละ 10 แช่สารทดลองในรูปแบบสารละลายยาสีฟัน อัตราส่วน 1:3 (ยาสีฟันต่อน้ำปราศจากไอออน) เมื่อครบ 2 นาที นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำมาแช่ในสารละลายสูญเสียแร่ธาตุเป็นเวลา 30 นาที ล้างน้ำปราศจากไอออน แช่สารละลายคืนแร่ธาตุเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง แช่ในสารทดลอง 2 นาที แล้วแช่ในน้ำลายเทียมข้ามคืน คิดเป็นหนึ่งรอบต่อวัน ดังนั้น ใน 14 วัน จะใช้เวลาทั้งหมด 14 รอบ

การทดสอบการคืนแร่ธาตุ

ก่อนเข้ากระบวนการจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก นำชิ้นงานมาวัดค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคด้วยเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเตอร์ (Vickers microhardness tester FM-800, Kawasaki, Japan) วัดครั้งที่ 1 เป็นพื้นฐาน (Surface microhardness1; SMH1) ด้วยแรง 100 กรัม นาน 15 วินาที สามตำแหน่งเรียงเป็นแถวแนวนิ่ง

ทุกตำแหน่งห่างในแนวตั้ง 1 มิลลิเมตร จากนั้นเข้ากระบวนการจำลองความเป็นกรดต่างในช่องปาก เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำมาวัดครั้งที่ 2 (Surface microhardness2; SMH2) ผังด้านขวาถัดจากแนวเดิม 1 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งการวัดค่าความแข็งผิวระดับจุลภาคครั้งที่ 1 (SMH1) และครั้งที่ 2 (SMH2)

การวิเคราะห์ความแข็งผิวระดับจุลภาค

ประเมินผลความแข็งผิวระดับจุลภาคบนเนื้อฟัน ดังนี้

- 1) วัดค่าเฉลี่ยความแข็งผิวระดับจุลภาคและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานก่อนและหลังสัมผัสสารทดลองของแต่ละกลุ่มทดลองทั้ง 3 กลุ่ม โดยผ่านกระบวนการจำลองสภาวะความเป็นกรดต่างในช่องปากเป็นเวลา 14 วัน
- 2) เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงความแข็งผิวระดับจุลภาคบนเนื้อฟันก่อนและหลังสัมผัสสารทดลองระหว่างกลุ่มทดลองทั้ง 3 กลุ่ม โดยผ่านกระบวนการจำลองสภาวะความเป็นกรดต่างในช่องปากเป็นเวลา 14 วัน ดังสูตร

$$\%SMH = \frac{(SMH2 - SMH1)}{SMH1} \times 100$$

โดย SMH1 คือ ค่าเฉลี่ยของความแข็งผิวระดับจุลภาคก่อนสัมผัสสารทดลอง

SMH2 คือ ค่าเฉลี่ยของความแข็งผิวระดับจุลภาคหลังสัมผัสสารทดลอง

%SMH คือ ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของความแข็งผิวระดับจุลภาค

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเอสพีเอสเอส เวอร์ชัน 28 (SPSS version 28, SPSS Inc., USA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 และทดสอบแบบสองทาง (two-side) เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงความแข็งผิวระดับจุลภาคระหว่างกลุ่มทดลองทั้ง 3 กลุ่ม เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และมีความแปรปรวนของข้อมูลแบบปกติ ใช้สถิติ One-way ANOVA หากผลการวิเคราะห์ของกลุ่มทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 1 คู่ ใช้สถิติ Tukey's test แต่หากข้อมูลมีการกระจายแบบไม่ปกติ ใช้สถิติ Kruskal-Wallis test และ Mann-Whitney U test

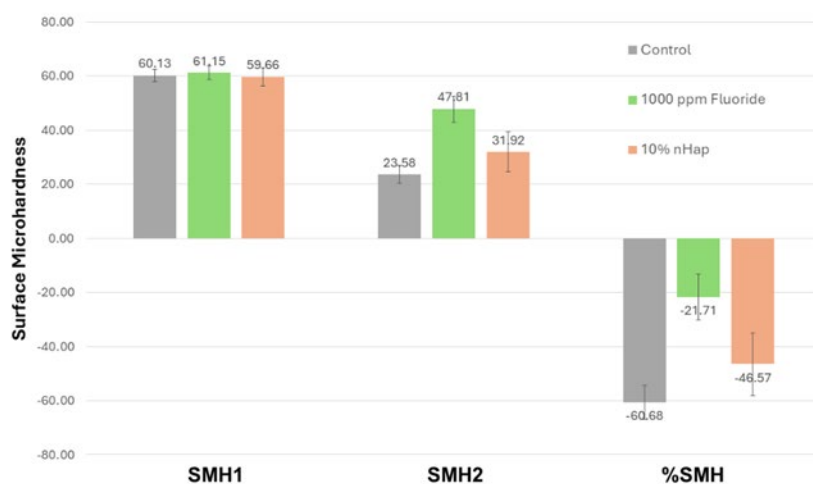
ผลการวิจัย

ข้อมูลเชิงพรรณนาแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิวระดับจุลภาคของเนื้อฟันก่อนและหลังสัมผัสสารทดลอง และร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของความแข็งผิวระดับจุลภาค (ตารางที่ 1 และภาพที่ 3) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยสถิติ One-way ANOVA พบค่าเฉลี่ยของความแข็งผิวระดับจุลภาคก่อนสัมผัสสารทดลอง ทั้ง 3 กลุ่ม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.490$) ภายหลังได้รับสารทดลองและผ่านกระบวนการจำลองสภาวะความเป็นกรดต่างในช่องปากเป็นเวลา 14 วัน พบร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของความแข็งผิวระดับจุลภาค ระหว่าง 3 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแข็งระดับจุลภาคผิวที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังสัมผัสสารทดลองทีละคู่ ด้วยสถิติ Turkey's test พบว่า กลุ่มควบคุมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มยาสีฟันที่ผสมฟลูออไรด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ($p < 0.001$) กลุ่มควบคุมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่ม

ยาสีฟันที่ผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ร้อยละ 10 ($p = 0.005$) กลุ่มยาสีฟันที่ผสมฟลูออไรด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มยาสีฟันที่ผสมนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ร้อยละ 10 ($p < 0.001$)

ตารางที่ 1 ข้อมูลเชิงพรรณนาแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิวระดับจุลภาคของเนื้อฟันก่อนและหลังสัมผัสสารทดลอง และร้อยละการเปลี่ยนแปลงความแข็งผิวระดับจุลภาคระหว่างกลุ่มทดลองทั้ง 3 กลุ่ม

กลุ่มทดลอง (groups)	ค่าสถิติ	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว ระดับจุลภาคก่อน สัมผัสสารทดลอง (SMH1)	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว ระดับจุลภาคหลัง สัมผัสสารทดลอง (SMH2)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ความแข็งผิวระดับ จุลภาค (%SMH)
กลุ่มควบคุม แช่ในน้ำปราศจากไอออน (control)	ค่าเฉลี่ย	60.13	23.58	-60.68
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.33	3.33	6.29
	ค่าน้อยที่สุด	54.65	18.55	-69.14
	ค่ามากที่สุด	62.77	28.92	-47.52
กลุ่มยาสีฟัน ผสมฟลูออไรด์ (1000 ppm fluoride)	ค่าเฉลี่ย	61.15	47.81	-21.71
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.55	4.84	8.47
	ค่าน้อยที่สุด	56.22	40.85	-35.54
	ค่ามากที่สุด	65.54	56.93	-5.49
กลุ่มยาสีฟันผสม นาโนไฮดรอกซี อะพาไทต์ (10% nHap)	ค่าเฉลี่ย	59.66	31.92	-46.57
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.42	7.38	11.64
	ค่าน้อยที่สุด	50.39	22.48	-58.69
	ค่ามากที่สุด	62.48	43.40	-28.04



ภาพที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งผิวระดับจุลภาคระหว่าง 3 กลุ่มที่แตกต่างกัน ($p < 0.001$)

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาในห้องปฏิบัติการนี้พบว่า ยาสีฟันที่มีส่วนผสมฟลูออไรด์ 1000 ส่วนในล้านส่วน มีการคืนแร่ธาตุในเนื้อฟันมากกว่ายาสีฟันที่มีส่วนผสมของนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ร้อยละ 10 และกลุ่มควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Leal และคณะ ที่แสดงผลการคืนแร่ธาตุในเนื้อฟันระหว่างยาสีฟันที่มีฟลูออไรด์ความเข้มข้นต่างๆ และยาสีฟันที่มีและไม่มีส่วนผสมของนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่ายาสีฟันที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง 5,000 ส่วนในล้านส่วน ให้ผลการคืนแร่ธาตุในเนื้อฟันดีกว่ายาสีฟันที่มีและไม่มีส่วนผสมของนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Leal et al.,

2020) ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงคิดว่า การเพิ่มนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์เข้าไปในยาสีฟันที่มีฟลูออไรด์สูง อาจไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุในเนื้อฟัน มากกว่าการใช้ฟลูออไรด์เพียงอย่างเดียว ฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถทำหน้าที่ปกป้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาผลร่วมจากนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยเหตุผลว่าฟลูออไรด์ไอออนก่อให้เกิดเป็นฟลูอออะพาไทต์ที่มีความต้านทานต่อการละลายกรดได้ดีกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ ยิ่งฟลูออไรด์มีความเข้มข้นมาก ปริมาณฟลูออไรด์ไอออนยิ่งถูกปลดปล่อยออกมาอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่นาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์จะให้แคลเซียมไอออน และฟอสเฟตไอออนเข้าไปแทนที่ผลึกในไฮดรอกซีอะพาไทต์ เนื่องจากนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์มีอนุภาคนาขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก มีความหนืดสูง ส่งผลให้การแผ่กระจายตัวสัมผัสกับเนื้อฟันได้ยาก ทำให้แลกเปลี่ยนไอออนไม่ดีเท่าฟลูออไรด์ (Leal et al., 2020)

ในขณะที่บางการศึกษาให้ผลขัดแย้ง โดยยาสีฟันนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้ผลคืนแร่ธาตุมากกว่ายาสีฟันเอมีนฟลูออไรด์ในเนื้อฟันของฟันวัว เนื่องจากนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์มีโครงสร้างคล้ายกับอะพาไทต์ธรรมชาติในเนื้อฟัน จึงมีประสิทธิภาพสูงในการคืนแร่ธาตุ ช่วยซ่อมแซมสร้างโครงสร้างเนื้อฟัน ส่วนผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ที่เกิดบนผิวชั้นนอกของเนื้อฟันจากยาสีฟันที่มีฟลูออไรด์จะไปกั้นการถ่ายทอดไอออนกับเนื้อฟัน ทำให้เกิดการขัดขวางการคืนแร่ธาตุของเนื้อฟัน (Tschoppe et al., 2011)

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สรุปว่า ยาสีฟันที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ให้ผลการคืนแร่ธาตุในเนื้อฟัน ดีกว่ายาสีฟันที่มีส่วนผสมของนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ในห้องปฏิบัติการ (in vitro) ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ พบว่าไม่สามารถจำลองสภาพแวดล้อมในช่องปากได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการคืนแร่ธาตุ เช่น ชนิดของยาสีฟัน ความเข้มข้นของสารละลายในการแช่ และอื่นๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกมากขึ้น อีกทั้งนำไปศึกษาในทางคลินิก (in vivo) ยืนยันผลการศึกษาในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุในทางคลินิกได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับผู้ป่วยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Boiko, O., Baker, S., Gibson, B., Locker, D., Sufi, F., Barlow, A., & Robinson, P. (2010). Construction and validation of the quality of life measure for dentine hypersensitivity (DHEQ). *Journal of Clinical Periodontology*, 37, 973-980.
- Bordea, I., Candrea, S., Alexescu, G., Bran, S., Băciut, M., Băciut, G., Lucaciu, O., Dinu, C. M., & Todea, D. A. (2020). Nano-hydroxyapatite use in dentistry: a systematic review. *International Journal of Drug Metabolism Reviews*, 52(2), 319-332.
- Buzalaf, M., Pessan, J., Honório, H., & ten Cate, J. (2011). Mechanisms of Action of Fluoride for Caries Control. *Journal of Monographs in Oral Science*, 22, 97-114.
- Erhardt, M. C. G., Rodrigues, J. A., Valentino, T. A., Ritter, A. V., & Pimenta, L. A. F. (2008). In vitro μ TBS of one-bottle adhesive systems: Sound versus artificially-created caries-affected dentin. *Journal of Biomedical Materials Research-Part B Applied Biomaterials*, 86(1), 181-187.
- Featherstone, J. D. B. (2000). The science and practice of caries prevention. *Journal of the American Dental Association*, 131, 887-899.
- Kasemkhun, P., & Rirattanapong, P. (2021). The efficacy of non-fluoridated toothpastes on artificial enamel caries in primary teeth: An in vitro study. *Journal of International Society of Preventive and Community Dentistry*, 11(4), 397-401.

- Leal, A. M. C., Dos Santos, M. V. B., da Silva Filho, E. C., de Carvalho, A. L. M., Tabchoury, C. P. M., & Vale, G. C. (2020). Development of an experimental dentifrice with hydroxyapatite nanoparticles and high fluoride concentration to manage root dentin demineralization. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 7469-7479.
- Martínez-Mier, E. (2012). Fluoride: Its metabolism, toxicity, and role in dental health. *Journal of Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 17(1), 28-32.
- Meyer, F., Enax, J., Amaechi, B., Limeback, H., Fabritius, H., Ganss, B., & Ganss, B. (2022). Hydroxyapatite as remineralization agent for children's dental care. *Journal of Frontiers in Dental Medicine*, 3, 1-10.
- Panich, M., & Poolthong, S. (2009). The effect of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate and a cola soft drink on in vitro enamel hardness. *Journal of the American Dental Association*, 140(4), 455-460.
- Rocha, C. T., Faria-E-Silva, A. L., & Peixoto, A. C. (2014). Bond strength of adhesive luting agents to caries-affected dentin. *Journal of Operative Dentistry*, 39(4), 383-388.
- Souza, B. M., Comar, L. P., Vertuan, M., Fernandes Neto, C., Buzalaf, M. A. R., & Magalhães, A. C. (2015). Effect of an experimental paste with hydroxyapatite nanoparticles and fluoride on dental demineralisation and remineralisation in situ. *Journal of Caries Research*, 49(5), 499-507.
- ten Cate, J., & Duijsters, P. (1982). Alternating demineralization and remineralization of artificial enamel lesions. *Journal of Caries Research*, 16, 201-210.
- Tschoppe, P., Zandim, D. L., Martus, P., & Kielbassa, A. M. (2011). Enamel and dentine remineralization by nano-hydroxyapatite toothpastes. *Journal of Dentistry*, 39(6), 430-437.
- Ullah, R., Zafar, M. S., & Shahani, N. (2017). Potential fluoride toxicity from oral medicaments: A review. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 20(8), 841-848.
- Usha, C., & Sathyanarayanan, R. (2009). Dental caries-A complete changeover (Part I). *Journal of Conservative Dentistry*, 12(2), 46-54.
- Zuluaga-Morales, J., Bolaños Carmona, M., & Álvarez-Lloret, P. (2022). pH-cycling, dynamic chemical model in dentine caries creation. A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Medical Dentistry*, 26(4), 585-608.

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: © 2025 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).