



ปริทัศน์วรรณกรรม

เรซินซีเมนต์เป็นสารยึดประเภทเรซินที่นำมาใช้ในการบูรณะงานทันตกรรม เมื่อเทียบกับซีเมนต์ทั่วไปพบว่า มีคุณสมบัติในการยึดที่ติดกับผิวฟัน และชิ้นงานวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ เซรามิกหรือโลหะ นิยมใช้กับชิ้นงานประเภท ครอบฟัน (crown) อุดฝัง (inlay) อุดครอบ (onlay) เดือยฟัน (post) แกนฟัน (core build-up) สะพานฟันติดแน่น (bridge, fixed partial denture) เคลือบฟันเทียม (laminare veneers) และเป็นวัสดุรองพื้นสำหรับอมัลกัม (liner for amalgam) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าเรซินซีเมนต์มีกำลังแรงยึดสูง ละลายน้ำได้น้อย ลดการรั่วซึมได้ดีทั้งการศึกษาในคลินิกและในห้องปฏิบัติการ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการบูรณะฟัน[12]

การเชื่อมยึดของสารยึดเรซิน

การเชื่อมยึดของสารยึดเรซินกับเคลือบฟัน

ในปี 1955 Buonocore[13] ได้ทดลองปรับสภาพเคลือบฟันก่อนบูรณะด้วยอะคริลิกเรซินด้วยการใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 โดยสังเกตมาจากวิธีทำความสะอาดผิวโลหะก่อนเคลือบด้วยเรซินในทางอุตสาหกรรม ปรากฏว่าให้ผลการยึดอยู่ที่ดี Retief[14] รายงานว่าการใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 10-50 ให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นจะให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดที่ต่ำลง กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 10-45 กัดเคลือบฟันเกิดเป็นผิวขรุขระที่มีความลึกสม่ำเสมอ ส่วนกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะละลายผลึกอะปาไทต์ได้น้อยลง กัดเคลือบฟันตื้นและทำให้เกิดผิวขรุขระที่มีความลึกไม่สม่ำเสมอ การยึดติดบนเคลือบฟันเกิดจากสารปรับสภาพฟันกัดเคลือบฟันให้ขรุขระและง่ายต่อการแทรกซึมของเรซิน ดังนั้นความขรุขระของเคลือบฟันจึงเป็นส่วนสำคัญมากกว่าความลึกของเคลือบฟันที่โดนกรดกัด[15] Nakabayashi และ Pashley[16] รายงานว่าชนิดของสารช่วยแทรกซึม (adhesion-promoting monomers) ที่ใช้ร่วมกับมอนอเมอร์ชนิดเอมเอมเอทีบีพีจะส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของมอนอเมอร์ลงไปในเคลือบฟัน จึงมีผลต่อความหนาของการเกิดขึ้นไฮบริดในเคลือบฟัน เช่น การใช้สารช่วยแทรกซึมชนิดโฟร์เมตา (4-methacryloyloxyethyl trimellitate anhydride: 4-META) ร้อยละ 5 ทำให้เกิดไฮบริดไดซ์แตกยาวกว่า Phenyl-P (2-methacryloyloxyethyl phenyl phosphoric acid) ร้อยละ 5 เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่าความ

แข็งแรงของการยึดขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดโดยรวม (cumulative cross sectional area) ของเรซินที่แทรกซึมเข้าสู่เคลือบฟันมากกว่าความยาวของเรซินแท่งที่เกิดขึ้น

วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพผิวเคลือบฟันด้วยกรดนั้นเพื่อทำความสะอาดเคลือบฟันเพื่อกำจัดชั้นสเมียร์ เพื่อทำให้เกิดพื้นผิวที่ขรุขระโดยการละลายปริซึมและผลึกแร่ธาตุระหว่างปริซึม และ ช่วยเพิ่มพลังงานพื้นผิว (surface energy) ทำให้สารยึดเรซินสามารถแทรกซึมเข้าไปง่าย เมื่อสารยึดเรซินเข้าทดแทนไฮดรอกซีอะปาไทต์ซึ่งถูกละลายด้วยกรดและห่อหุ้มไฮดรอกซีอะปาไทต์ส่วนที่เหลือ แล้วเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชันได้เป็นชั้นไฮบริดซึ่งประกอบด้วยเคลือบฟันที่ถูกแทรกซึมด้วยเรซิน เรซินที่แทรกซึมลงไปนี้ประกอบด้วยไมโครแท่งขนาดเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลางราว 0.05 ไมครอน[16] เรซินที่ยื่นไปในเคลือบฟันนี้อาจแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือไมโครแท่งซึ่งเกิดรอบๆ ผลึกเคลือบฟัน และไมโครแท่งซึ่งเกิดตรงกลางของผลึกเคลือบฟันซึ่งเรซินแผ่ลงไปในรูเล็กๆ จำนวนมากของผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ถูกละลาย[17]

การเชื่อมยึดของสารยึดเรซินกับเนื้อฟัน

ในปี 1979 Fusayama และคณะ[7] ได้แนะนำการใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 40 ปรับสภาพเนื้อฟัน 60 วินาที ร่วมกับสารยึดเรซิน Clearfil Bond System – F (Kuraray, Osaka, Japan.) ในขณะนั้นเชื่อว่าสารยึดเรซินนี้ยึดด้วยพันธะเคมีกับฟัน Fusayama แนะนำวิธีการเตรียมหลุมช่องฟันว่าทำโดยการกำจัดเฉพาะเนื้อฟันผุชั้นนอกที่ย้อมติดสี ไม่ขยายไปสู่เนื้อฟันปกติซึ่งเนื้อฟันที่เหลืออยู่ในหลุมช่องฟัน (caries-affected tubular dentin) โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบสเคอโรติก (sclerotic dentin) ซึ่งยอมให้สารผ่านเข้าออกยาก ดังนั้นเมื่อใช้กรดปรับสภาพแบบกรดกัดรวม (total etching) เพื่อกำจัดชั้นสเมียร์ จึงไม่เพิ่มความสามารถในการยอมให้สารซึมผ่านของเนื้อฟันอย่างมีนัยสำคัญ และจากการที่ขอบโดยรอบของหลุมช่องฟันเป็นเคลือบฟัน จึงทำให้การบูรณะฟันด้วยวิธีนี้ได้ผลดี แม้ว่าสารยึดในช่วงแรก เช่น Clearfil Bond System-F จะมีความแข็งแรงยึดกับเนื้อฟันเพียง 5 เมกกะปาสคาลก็ตาม แสดงให้เห็นว่า ผลสำเร็จทางคลินิกเกิดจากการยึดอยู่ที่ติเยียมกับผิวเคลือบฟัน และความสามารถในการยอมให้สารซึมผ่านของเนื้อฟันแบบสเคอโรติก อย่างไรก็ตาม พบว่าในความเป็นจริงมีการขยายขอบเขตของหลุมช่องฟันไปยังเนื้อฟันปกติที่ยอมให้สารซึมผ่านได้ง่ายกว่าเนื้อฟันแบบสเคอโรติก เมื่อทาสารปรับสภาพฟันนี้แบบ total etching ร่วมกับการเป่าแห้งซึ่งในขณะนั้นขาดองค์ความรู้ว่าเมื่อทำการเป่าแห้งจะทำให้ดีมิเนอรอลไรซ์เดนทีน (demineralized dentin) ยุบตัวลง จึงทำให้เกิดการรูก้ำของแบคทีเรียตามขอบของหลุมช่องฟัน และทำให้เกิดการระคายเคืองต่อโพรงประสาท

ในปี 1982 Nakabayashi และคณะ[18] รายงานถึงการยึดที่ดีระหว่างเรซินและเนื้อฟัน โดยเกิดขึ้นไฮบริดไดซ์เดนติน (hybridized dentin) ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยปรับสภาพฟันด้วย สารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 10 และกรดเฟอริกร้อยละ 3 เพื่อกำจัดชั้น smear ที่ปกคลุมอยู่บนเนื้อฟันและบางส่วนของกรดได้แทรกซึมลงไปละลายแร่ธาตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณภายในท่อเนื้อฟัน และระหว่างท่อเนื้อฟัน จากนั้นให้มอนอเมอร์ของเรซินแทรกซึมผ่านเข้าสู่เนื้อฟัน เมื่อเกิดปฏิกิริยา การเกิดพอลิเมอร์จะแข็งตัวเกิดชั้นไฮบริดมีค่าความแข็งแรงยึดกับเนื้อฟันประมาณ 18 เมกะ- ปาสคาล กลไกการยึดติดที่ดีของเรซินกับเนื้อฟันจึงเกิดจากชั้นไฮบริดไม่ใช่การยึดของเรซินแทกกับ ท่อเนื้อฟัน Van Meerbeek และคณะ[17] กล่าวว่าชั้นไฮบริดประกอบด้วยลักษณะสามอย่างคือ 1) พรมที่ยุ่งเหยิง(shag-carpet appearance) อันเกิดจากเส้นใยคอลลาเจนที่วางตัวอย่างหลวมๆ ที่ขึ้นสู่สารยึดเรซินและมักจะคลายตัวออกเห็นปลายที่เป็นไมโครไฟบริล 2) การเกิดไฮบริดกับผนัง ของท่อเนื้อฟัน (tubule-wall hybridization) เชื่อว่าเป็นผลดีในการฉีกระบบท่อเนื้อฟัน ป้องกัน การเกิดการรั่วซึมและแม้ว่าจะเกิดความล้มเหลวจันชั้นเรซินแยกออกจากชั้นไฮบริดก็ยังคงเหลือ เรซินแทกปกป้องทางเข้าสู่โพรงประสาทฟัน 3) การเกิดไฮบริดกับท่อเนื้อฟันย่อยด้านข้าง (lateral tubule hybridization) เกิดชั้นไฮบริดเล็กๆกับผนังของท่อเนื้อฟันย่อยด้านข้างล้อมรอบเรซินซึ่งอยู่ ตรงกลางซึ่งเรียกว่าไมโครเรซินแทก (micro-resin tag)

การสร้างชั้นไฮบริดเดนตินขึ้นกับสองปัจจัยสำคัญ[16] หนึ่งคือความสามารถของเนื้อฟัน ในการยอมให้สารยึดเรซินผ่านลงไป (permeability of a dentin substrate) และสองคือ ความสามารถในการซึมผ่าน (diffusion) ของมอนอเมอร์โดยปัจจัยแรกขึ้นกับลักษณะของเนื้อฟันที่ ถูกเตรียมขึ้นมา ส่วนปัจจัยที่สองขึ้นกับลักษณะและคุณสมบัติของสารยึดเรซินชนิดนั้นๆ[19]

ในขั้นตอนของการละลายแร่ธาตุของเนื้อฟันนั้น เมื่อทำให้ดีมีเนอรอลไรซ์เดนตินแห้ง จะ ทำให้คอลลาเจนเกิดการยุบตัวได้[20] และเมื่อคอลลาเจนมีการยุบตัวจะสูญเสียช่องว่างระหว่าง เส้นใยทำให้ไพรเมอร์หรือมอนอเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปจึงเกิดชั้นไฮบริดที่ไม่สมบูรณ์ ความ แข็งแรงของการยึดติดกับเนื้อฟันจะลดลงตามไปด้วย ในช่วงต้นทศวรรษที่เก้าสิบด้วยองค์ความรู้ ในขณะนั้นทำให้ไม่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดเมื่อทำการเตรียมเนื้อฟันด้วยการทากรดและเป่า แห้งแล้วส่งผลทำให้เนื้อฟันอยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้ไพรเมอร์และสารยึด ทำให้การยึด อยู่ไม่ดีเท่าที่ควรแต่ระบบการยึดของเรซินซีเมนต์ชนิดโฟร์เมตาเอมเอเอ็มเอทีบีบีหรือในชื่อซูเปอร์- บอนด์ซีแอนด์บี (Super-Bond C&B) ในขณะนั้นเป็นระบบเดียวที่มีการยึดอยู่ที่ดีแม้ไม่ใช่ไพรเมอร์ก็ ตาม[18] Nakabayashi รายงานว่าเมื่อใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 3 ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 10 (10-3) เป็นสารปรับสภาพผิว (conditioning agent) จะยังคงทำให้เนื้อฟันมีความสามารถในการยอมให้สารซึมผ่านสูงไม่ว่าจะเตรียมเนื้อฟันในห้องทดลองทั้งแบบแห้ง[18,21] แบบชื้น[19]

หรือการเตรียมในช่องปากซึ่งมีความดันในโพรงประสาทฟัน (pulpal pressure)[22] โดยเฟอริค-คลอไรด์จะป้องกันการยุบตัวของดีมีเนอรอลไรซ์เดนติน เมื่อร่วมกับการใช้สารโพรมีเตตาในมอนอ-เมอร์ จะเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของมอนอเมอร์ไปยังเนื้อฟันที่ผ่านการปรับสภาพแล้วได้ดีขึ้นเนื่องจากสารโพรมีเตตามีทั้งกลุ่มที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) และกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) อยู่ในโมเลกุล[18] ในทางตรงกันข้าม เมื่อไม่มีเฟอริคคลอไรด์ในสารปรับสภาพโดยมีเพียงสารละลายกรดซิตริกร้อยละ 10 (10-0) จะไม่สามารถเกิดขึ้นไฮบริดไดซ์เดนตินที่ดีได้ มีค่าความแข็งแรงดัดยัดต่ำ ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมเนื้อฟันแบบแห้ง[21] หรือแบบชื้น[19]

การที่เฟอริคคลอไรด์สามารถป้องกันการยุบตัวของคอลลาเจนได้นั้น อธิบายได้ว่าเนื้อฟันส่วนใหญ่ประกอบด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และเส้นใยคอลลาเจนซึ่งถูกปกคลุมด้วยโปรตีนหลายชนิดเช่น โปรตีนโอไกลแคน ไกลโคอะมิโนไกลแคน และฟอสโฟโปรตีนซึ่งเป็นสารพอลิอิเลกโตรไลต์ในเนื้อฟันที่มีคุณสมบัติละลายน้ำและมีประจุลบเนื่องจากมีกลุ่มคาร์บอกซิลและกลุ่มซัลเฟตอยู่ในโมเลกุล ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ดีมีเนอรอลไรซ์เดนตินมีลักษณะชอบน้ำแม้ว่าเส้นใยคอลลาเจนจะเป็นสายโปรตีนที่ไม่ชอบน้ำ เฟอริคคลอไรด์มีเฟอริกไอออนที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ และมีประจุบวกดังนั้นจึงสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิอิเลกโตรไลต์ซึ่งมีประจุลบได้ง่าย และทำให้พอลิอิเลกโตรไลต์ไม่ถูกละลาย ช่วยรักษาช่องว่างของร่างแหเส้นใยคอลลาเจนแม้จะเป่าแห้ง เฟอริคคลอไรด์ในสารปรับสภาพเนื้อฟันทำให้ดีมีเนอรอลไรซ์เดนตินมีความสามารถในการยอมให้สารซึมผ่านมากขึ้น กรดซิตริกจึงแทรกซึมลงไปได้เร็วและเพิ่มอัตราการละลายแร่ธาตุในเนื้อฟันได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราการขจัดน้ำ (dehydration) ออกจากเนื้อฟันที่ละลายแร่ธาตุออกแล้ว และมอนอเมอร์สามารถซึมผ่านลงไปได้เกิดขึ้นไฮบริดไดซ์เดนตินที่มีคุณภาพได้[6]

เมื่อใช้กรดฟอสฟอริกปรับสภาพฟันแบบแห้ง หลังจากเป่าแห้งพบว่าเส้นใยคอลลาเจนยุบตัวลง Nakabayashi และ Pashley[16] ให้สมมติฐานไว้ 2 ประการ คือประการแรกเชื่อว่าเส้นใยคอลลาเจนลอยอยู่ในน้ำซึ่งแทนที่ช่องที่เคยเป็นที่อยู่ของผลึกแร่ธาตุ เมื่อเป่าแห้งทำให้น้ำระเหยไปกลายเป็นช่องว่าง เส้นใยคอลลาเจนจึงยุบตัวลง สมมติฐานอีกประการคือ เมื่อเส้นใยคอลลาเจนสูญเสียน้ำระหว่างไมโครไฟบริลทำให้เส้นใยหดสั้นลง และดึงให้ทั้งเครือข่ายคอลลาเจนยุบตามกันไปด้วย โมเลกุลคอลลาเจนที่เข้ามาใกล้กันอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันหรือเกิดแรงดึงดูดทางประจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตามหากเส้นใยคอลลาเจนที่ยุบตัวได้รับน้ำหรือโพรมีเตที่ที่เหมาะสม คอลลาเจนจะสามารถคืนตัวได้ [21,23] โดยน้ำสร้างพันธะไฮโดรเจนกับคอลลาเจนเปปไทด์ (collagen peptide) จะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลคอลลาเจนได้ Nakabayashi และ Takarada[21] รายงานว่าการทาสารละลาย HEMA ร้อยละ 30 (2-hydroxyethyl methacrylate) บนเนื้อฟันที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซิตริกร้อยละ 10 สามารถทำให้

ดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่แห้งเพิ่มความสามารถในการยอมให้สารซึมผ่านได้เช่นกัน แต่ต้องใช้เวลาานถึง 1 ชั่วโมงจึงจะมีค่ากำลังแรงดึงยึดเท่ากับเนื้อฟันที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 3 ในกรดซิตริกร้อยละ 10

นอกจากการใช้เฟอริกคลอไรด์แล้ว มีวิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการป้องกันการยุบตัวของเส้นใยคอลลาเจนคือ การทำให้เนื้อฟันมีสภาพชื้นขณะทำการยึดติดเพื่อคงช่องว่างของคอลลาเจนไว้ Gwinnett[9,24] แนะนำว่าภายหลังจากการใช้กรดกำจัดชั้นสเมียร์และละลายแร่ธาตุในเนื้อฟัน ควรให้เนื้อฟันอยู่ในสภาพชื้น แล้วตามด้วยการใช้ไพรเมอร์ชนิดอะซิโตน โดยอะซิโตนจะแทนที่น้ำในดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินและระเหยออกไปเหลือเรซินไว้ พบว่าการเตรียมเนื้อฟันแบบชื้นทำให้มีค่ากำลังแรงดึงยึดเฉือนสูงชันกว่าการเตรียมเนื้อฟันแบบแห้ง DéJou, Sindres และ Camps[25] ศึกษาการรั่วซึมในสารยึดเรซินหลายยี่ห้อ พบว่าในสารยึดเรซินที่ใช้ได้ทั้งกับเนื้อฟันแบบชื้นและแบบแห้งเช่น Scotchbond Multi-purpose และ All-Bond 2 มีการรั่วซึมเมื่อยึดกับเนื้อฟันในสภาพแห้งมากกว่าการรั่วซึมเมื่อยึดกับเนื้อฟันในสภาพชื้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการยึดกับเนื้อฟันในสภาพชื้นจะส่งผลดีต่อการคงช่องว่างของคอลลาเจนไว้ แต่น้ำที่อยู่ระหว่างเส้นใยคอลลาเจนจะต้องถูกกำจัดออกหมดเพื่อให้เรซินมอนอเมอร์สามารถเข้าห่อหุ้มได้สมบูรณ์และเกิดเป็นชั้นไฮบริดที่คุณภาพดี Tay, Gwinnett และ Wei[26] รายงานถึงปรากฏการณ์น้ำตกค้างอยู่มากเกินไป (overwet phenomenon) เมื่อใช้สารยึดเรซินยี่ห้อ All-Bond 2 ยึดกับเนื้อฟันในสภาพชื้น โดยพบว่ายังมีน้ำมากขึ้นเท่าใดยังพบช่องว่างที่รอยต่อของเนื้อฟันกับไพรเมอร์ ภายใต้ช่องว่างนี้พบว่าเรซินในห่อเนื้อฟันไม่สมบูรณ์พบเรซินกลอบูล (resin globule) ภายในห่อเนื้อฟันและบนเนื้อฟัน แสดงว่าปริมาณน้ำที่ตกค้างขัดขวางการทำงานของไพรเมอร์และส่งผลต่อความแข็งแรงการยึดของสารยึดเรซินกับเนื้อฟันด้วย Kato และ Nakabayashi[27,28] ศึกษาการเตรียมเนื้อฟันแบบชื้นด้วยกรดฟอสฟอริกตามด้วยไพรเมอร์ชนิดไฟร์เมตาในอะซิโตน พบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกร้อยละ 10 และร้อยละ 65 เตรียมผิวฟันแบบชื้นให้ค่ากำลังแรงดึงยึดสูงชันกว่าการเตรียมผิวฟันแบบแห้ง อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณเรซินในชั้นไฮบริดมีน้อยกว่าที่ควร มีเส้นใยคอลลาเจนที่ไม่ถูกห่อหุ้มจึงสลายตัวจากน้ำ (hydrolysis) ได้ในระยะยาว ทำให้ได้ชั้นไฮบริดที่คุณภาพต่ำไม่ทนทานโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นไฮบริดที่เตรียมจากสารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 3 ในกรดซิตริกร้อยละ 10 ร่วมกับเรซินชนิดไฟร์เมตาเอมเอมเอทีบีบี และจากการทดลองเมื่อใช้เรซินชนิดไฟร์เมตาเอมเอมเอทีบีบีเปรียบเทียบระหว่างการเตรียมผิวฟันแบบแห้งและแบบชื้นด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 3 ในกรดซิตริกร้อยละ 10 (10-3) ร่วมกับสารไฟร์เมตาในไพรเมอร์ชนิดอะซิโตน พบว่าการเตรียมผิวฟันทั้งสองแบบต่างให้การยึดอยู่ที่ดี แต่การเตรียมผิวฟันแบบชื้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า

ซึ่งแสดงว่าเทคนิคการเตรียมผิวพื้นแบบชั้นควบคุมได้ยากกว่า[19] ดังนั้นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นและการยึดกับเนื้อพื้นในสภาพชื้นจึงเป็นเทคนิคที่ไวต่อความผิดพลาด Van Meerbeek และคณะ [29] กล่าวว่าขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการใช้สารยึดเรซินกลุ่มที่ใช้กรดกัดแล้วล้างออกคือการไพรม์ เมื่อใช้สารยึดชนิดอะซิโตนจำเป็นต้องควบคุมเทคนิคการยึดกับเนื้อพื้นในสภาพชื้นให้ดี ในขณะที่เมื่อใช้สารยึดชนิดเอธานอลและน้ำร่วมกับเทคนิคการยึดกับเนื้อพื้นในสภาพแห้งจะให้การยึดที่มั่นใจได้มากกว่า

Van Meerbeek และคณะ[30] รายงานการพบดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่หลงเหลือซึ่งไม่ถูกหุ้มด้วยเรซิน Nakabayashi และคณะ[16] เปรียบเทียบค่ากำลังแรงยึดดึงระหว่างเรซินกับเนื้อฟันมนุษย์ โดยใช้สารละลาย 10-3 หรือเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 3 ในกรดซิตริก ร้อยละ 10 ร่วมกับสารยึดเรซินเรซินชนิดโฟร์เมตาเอมเอเอ็มเอทีบีบี พบว่าเมื่อใช้กรดกัดเป็นเวลา 10 วินาที ฟันมนุษย์และฟันวัวให้ค่ากำลังแรงยึดดึงสูงกว่าเมื่อใช้กรดกัด 30 วินาที และ 60 วินาที และหากใช้เวลา 10 วินาที ฟันมนุษย์พบการแตกในชั้นเรซินเท่านั้นและยังใช้กรดกัดฟันนานขึ้นจะพบการแตกหักในชั้นของเรซินและดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่เหลือร่วมด้วย จากการศึกษาชั้นไฮบริดภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด โดยนำฟันที่ยึดด้วยสารยึดเรซินแซในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตร เพื่อละลายผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ในเนื้อฟันได้ชั้นไฮบริดที่ไม่ถูกหุ้มด้วยเรซินออก ทำให้เห็นชั้นไฮบริดชัดเจนขึ้น และแซต่อในสารละลายไฮโปคลอไรต์ร้อยละ 1 เพื่อกำจัดคอลลาเจนที่ไม่ถูกหุ้มด้วยเรซิน จะเห็นความแตกต่างระหว่างเนื้อฟันส่วนที่ถูกหุ้มและไม่ถูกหุ้มชัดเจนขึ้น แสดงว่าการใช้กรดที่มีความเข้มข้นมากหรือใช้เวลานานในการกัดผิวเนื้อฟันนาน ทำให้เกิดความหนาของชั้นดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินมาก ความลึกในการแทรกซึมของกรดเข้าไปในเนื้อฟันไม่ได้ช่วยให้กำลังแรงยึดสูงขึ้น แต่จะมีผลเสียต่อการยึดเนื่องจากเรซินไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปหุ้มดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินได้หมด ทำให้มีดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่หลงเหลือซึ่งเป็นบริเวณที่อ่อนแอ

จากองค์ความรู้ข้างต้น มีข้อเสนอแนะให้ทำการปรับสภาพเนื้อฟันด้วยกรดอ่อนร่วมกับการปรับสภาพแบบชื้นเพื่อป้องกันการเกิดชั้นดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่มีความหนามากเกินไปและเพื่อให้เกิดการยึดอยู่ที่ดีขึ้น และจากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับสภาพผิวเนื้อฟันวัวแบบชื้นด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 1 ในกรดซิตริกร้อยละ 1 (1-1) เป็นเวลา 10 ถึง 60 วินาที ค่าความแข็งแรงดึงยึดของเรซินไม่ต่างจากเมื่อปรับสภาพแบบชื้นด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 1 ถึง 5 ในกรดซิตริกร้อยละ 10 เป็นเวลา 10 วินาที ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่หลงเหลือ การใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 1 ในกรดซิตริกร้อยละ 1 (1-1) จึงมีความปลอดภัยกว่าแม้จะทากรดนานถึง 60 วินาที และพบว่าความหนาของชั้นไฮบริดเพิ่มขึ้นตาม

เวลาที่สัมผัสกรดโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1-3 ไมโครเมตรเมื่อทากรดนาน 10-60 วินาทีแต่ค่าความแข็งแรงยึดติดไม่ขึ้นกับความหนาของชั้นไฮบริด ลักษณะของชั้นไฮบริดที่เกิดขึ้นสามารถต้านทานต่อการกัดแ่และสารละลายไฮเดียมไฮโปคลอไรต์ได้ดีต่างจากชั้นไฮบริดที่เกิดจากการปรับสภาพด้วยสารละลายเพอริกคลอไรด์ร้อยละ 10 ในกรดซิตริกร้อยละ 10 (10-10) เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งเมื่อสัมผัสกรดแ่และสารละลายไฮเดียมไฮโปคลอไรต์ได้เปลี่ยนสภาพโดยมีความหนาลดลงจากมากกว่า 5 ไมโครเมตรเหลือประมาณ 4 ไมโครเมตรและแรงดึงมีค่าต่ำลง เกิดการแตกหักในชั้นเรซินและดีมีเนอรอลไรซ์เดนทีนที่หลงเหลืออยู่ ความเข้มข้นของเพอริกคลอไรต์ที่เหมาะสมในการปรับสภาพเนื้อฟันคือ ร้อยละ 1-5[4] นอกจากนี้ยังพบอีกว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความแข็งแรงยึดถึงแม้จะใช้หรือไม่ใช้ไพรเมอร์ชนิดอะซิโตน[5] เนื่องจากชั้นดีมีเนอรอลไรซ์เดนทีนที่เกิดขึ้นจากการปรับสภาพแบบขึ้นด้วยสารละลายเพอริกคลอไรด์ร้อยละ 1 ในกรดซิตริกร้อยละ 1 (1-1) มีความหนาประมาณเพียง 1 ไมโครเมตรทำให้มอนอเมอร์เข้าแทนที่น้ำได้ง่ายและให้ผลดี ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้ไพรเมอร์และช่วยลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นลงอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลการวิจัยที่ทำนั้นใช้กับฟันวัวซึ่งมีความแตกต่างจากฟันมนุษย์ ดังเห็นได้จากการ ศึกษาของ Retief[31] และคณะ พบว่า ฟันหน้าของวัวนั้นมีการรั่วซึมมากกว่าและมีค่าความแข็งแรงยึดต่ำกว่าเนื้อฟันมนุษย์ Nakabayashi และ คณะ[16] รายงานว่าเนื้อฟันของมนุษย์ทนต่อการต้านทานของกรดได้ดีกว่าฟันวัว ดังนั้นแม้ว่าฟันวัวจะเหมาะสมสำหรับการทดลองเบื้องต้น (screening material) แต่ถ้าสามารถใช้ฟันมนุษย์ในการทดสอบจะให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่า

เคลือบฟันมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากเนื้อฟัน มีอนินทรีย์สาร (inorganic substance) มากกว่า ยอมให้สารผ่านได้ยาก ดังนั้นถึงแม้ว่าการปรับสภาพแบบขึ้นด้วยสารละลายเพอริกคลอไรด์ร้อยละ 1 ในกรดซิตริกร้อยละ 1 (1-1) จะเหมาะสมกับเนื้อฟัน แต่อาจมีความเข้มข้นไม่มากพอที่ทำให้เกิดการยึดอยู่ที่แข็งแรงระหว่างชั้นเรซินกับเคลือบฟัน และอาจส่งผลให้เกิดการรั่วซึมในชั้นเคลือบฟันได้

การยึดโดยเตรียมผิวฟันแบบใช้ไพรเมอร์ชนิดเป็นกรดกัดผ่านชั้นสเมียร์ (self-etching primer) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหที่เกิดการยุบตัวของคอลลาเจนจากการเป่าแห้ง การตกค้างของกรดแ่บนผิวฟันจากการล้างออกไม่หมด การตกค้างของน้ำที่มีมากเกินไป และป้องกันการเกิดดีมีเนอรอลไรซ์เดนทีนหลงเหลือ และยังช่วยลดความยุ่งยากในการทำงานอีกด้วย[16,32] โดยใช้สารปรับสภาพที่ประกอบด้วยกรดอ่อนและไพรเมอร์ซึ่งอยู่ในขวดเดียวกันปรับสภาพเนื้อฟันและชั้นสเมียร์พร้อมกัน ไม่ต้องล้างออกแต่เป่าลมเบาๆ การทำทิ้งไว้ไม่นานเพียงพอจะทำให้สารปรับสภาพมีเวลาในการละลายและแทรกซึมผ่านชั้นสเมียร์ไปยังเนื้อฟันด้านล่าง Watanabe และ Nakabayashi[33] รายงานการใช้เอทิลฟีนิลไฮโดรเจนฟอสเฟต (phenyl-P) และเอ็นฟีนิลไกลซีน

(NPG) ในไตรเอทิลีนไกลคอลไดเมธาคริเลต (TEGDMA) เป็นไพรเมอร์ชนิดเป็นกรดกัดผ่านชั้นสเมียร์ พบว่าค่ากำลังแรงยึดดึงหลังยึด 1 วันมีค่า 6.7 เมกะ-ปาสคาล และลดลงเหลือ 2.8 เมกะ-ปาสคาลภายใน 1 ปี ซึ่งการยึดระหว่างเรซินและเนื้อฟันที่มีชั้นสเมียร์อ่อนแอเนื่องจากสารยึดเรซินแทรกซึมลงไปเนื้อฟันข้างใต้ไม่เพียงพอ ซึ่งต่อมาเมื่อแช่น้ำชั้นสเมียร์และเนื้อฟันจึงสลายตัวไป Nakabayashi และ Pashley[16] ให้แนวคิดเกี่ยวกับการยึดผ่านชั้นสเมียร์ว่า หากชั้นนี้มีความหนาถึง 2 ไมโครเมตรและอัดตัวกันแน่นจะต้านการแทรกผ่านของสารปรับสภาพ ทำให้เกิดชั้นไฮบริดที่บางมากเกินไปก่อให้เกิดการรั่วซึมได้ง่าย นอกจากนี้ชั้น สเมียร์สามารถปรับสภาพบัพเฟอร์ได้ (buffer capacity) อาจจะปรับเปลี่ยนสภาพกรดอ่อนให้เจือจางลง ประสิทธิภาพของสารยึดเรซินจะลดลงทำให้กำลังแรงยึดต่ำลงด้วย หากมีแรงกระทำอาจจะเกิดแตกหักในชั้นสเมียร์ได้ ดังนั้นสารปรับสภาพชนิดนี้ต้องสามารถแทรกผ่านชั้นสเมียร์ลงไปยังเนื้อฟันด้านล่างอย่างน้อย 1 ไมโครเมตร เพื่อให้เกิดชั้นไฮบริดที่ให้ความแนบสนิทและความแข็งแรง

ระบบสารยึดเรซิน

ปี 1998 Nakabayashi และ Pashley[16] ได้แบ่งระบบสารยึดเรซิน ตามเทคนิคการเตรียมเนื้อฟันออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่ทาสารยึดเรซินลงบนดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินซึ่งไม่ยวบตัว
 - 1.1 ปรับสภาพฟันด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ร้อยละ 3 ในกรดซิตริกร้อยละ 10 (10-3) ทาสารยึดเรซินชนิดโฟร์เมตาเอมเอทีบีบี ได้แก่ Super-Bond C&B (Sun Medical) หรือ C&B Meta-Bond (Parkell)
 - 1.2 ใช้กรดปรับสภาพฟันแล้วจึงทาสารยึดเรซินลงบนดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่อยู่ในสภาพขึ้นโดยไม่ทาไพรเมอร์ได้แก่ One-Step (Bisco) Tenure Quick-F (Den-Mat) Syntac Single-Component (Vivadent) OptiBond Solo (Kerr) Prime&Bond 2.1 (Caulk-Dentsply) Bond 1 (Jeneric/Pentron) และ Single Bond (3M)
2. กลุ่มที่ทาไพรเมอร์ลงบนดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่ยวบตัวเพื่อทำให้กลับคืนตัวขึ้น แล้วจึงทาสารยึดเรซิน ได้แก่ Clearfil New Bond (Kuraray) Clearfil Liner Bond System (Kuraray) Scotchbond Multi-Purpose (3M) OptiBond (Kerr) Tenure (Den-Mat) และ Prisma UniversalBond 3 (Caulk-Dentsply)
3. กลุ่มที่ทาไพรเมอร์ลงบนดีมีเนอรอลไรซ์เดนทินที่อยู่ในสภาพขึ้นเพื่อป้องกันการยวบตัว แล้วจึงทาสารยึดเรซิน ได้แก่ All-Bond 2 (Bisco) และ Tenure (Den-Mat)

4. กลุ่มไพรเมอร์ชนิดเป็นกรดกัดผ่านชั้นสเมียร์ (self-etching primer) ทาลงบนเนื้อฟันที่ปกคลุมด้วยชั้นสเมียร์ แล้วจึงทาสารยัดเรซิน

ปี 2003 Van Meerbeek และคณะ[29] แบ่งสารยัดเรซินตามชนิดและขั้นตอนการทำงาน ออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. กลุ่มที่ใช้กรดกัดแล้วล้างออก (etch & rinse approach)

สารยัดเรซินในกลุ่มนี้ยึดกับเคลือบฟันได้มีประสิทธิภาพที่สุด สำหรับเนื้อฟันพบว่ากรดละลายไฮดรอกซีอะปาไทต์ออกเกือบทั้งหมด ทำให้เส้นใยคอลลาเจนเผยผิ้ออกมา กลไกการยึดกับเนื้อฟันจึงขึ้นกับการแทรกซึมของเรซินลงไป在线ใยคอลลาเจน สารยัดเรซินในกลุ่มนี้แบ่งตามขั้นตอนการทำงานออกได้อีกเป็น 2 ขั้นตอนและ 3 ขั้นตอน

2. กลุ่มไพรเมอร์ชนิดเป็นกรดกัดผ่านชั้นสเมียร์ (self-etching approach)

สารยัดเรซินกลุ่มนี้มีข้อดีที่การแทรกซึมของเรซินเกิดขึ้นต่อเนื่องไปกับการที่กรดกัดฟัน จึงช่วยลดความผิดพลาดจากเทคนิคการทำงานและลดขั้นตอน แต่ยังไม่ทราบผลกระทบในระยะยาวของการที่มีผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์ซึ่งละลายออกมาแล้วหรือมีชั้นสเมียร์รวมอยู่ในรอยต่อของเรซินกับฟัน รวมถึงตัวทำละลายส่วนเกินของไพรเมอร์หรือสารยัดเรซินซึ่งรวมอยู่ในรอยต่ออาจทำให้การยึดอ่อนแอได้ สารยัดเรซินในกลุ่มนี้นอกจากแบ่งตามขั้นตอนการทำงานออกเป็น 1 ขั้นตอนและ 2 ขั้นตอนแล้ว ยังอาจแบ่งตามความรุนแรงของกรดออกได้อีกเป็น 3 กลุ่มคือ

2.1 สารยัดเรซินชนิดกรดแก่กัดผ่านชั้นสเมียร์ มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 1 หรือต่ำกว่า 1 จึงมีฤทธิ์ละลายแร่ธาตุได้ลึก หลังจากปรับสภาพพบว่าเคลือบฟันมีลักษณะเหมือนกับในกลุ่มใช้กรดกัดแล้วล้างออก สำหรับเนื้อฟันพบว่ากรดละลายไฮดรอกซีอะปาไทต์ออกเกือบทั้งหมด ทำให้เส้นใยคอลลาเจนเผยผิ้ออกมา กลไกการยึดกับเนื้อฟันจึงขึ้นกับการแทรกซึมของเรซินลงไป在线ใยคอลลาเจนเช่นเดียวกับกลุ่มที่ใช้กรดกัดแล้วล้างออก จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังแรงยึดดึงของสารยัดเรซินกลุ่มนี้ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะกับเนื้อฟัน อาจเนื่องจากความเป็นกรดสูงหรือมีตัวทำละลายส่วนเกินของไพรเมอร์หรือสารยัดเรซินซึ่งรวมอยู่ในรอยต่อ

2.2 สารยัดเรซินชนิดกรดอ่อนกัดผ่านชั้นสเมียร์ ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 2 จึงมีฤทธิ์ละลายแร่ธาตุในเนื้อฟันได้ลึกเพียง 1 ไมครอน และละลายแร่ธาตุออกเพียงบางส่วน ทำให้มีไฮดรอกซีอะปาไทต์เหลืออยู่รอบๆเส้นใยคอลลาเจน ซึ่งอาจจะใช้เป็นตำแหน่งที่เกิดพันธะเคมีได้ พบว่าชั้นไฮบริดบางกว่าของกลุ่ม

สารยึดเรซินชนิดกรดแก่กัดผ่านชั้นสเมียร์และกลุ่มที่ใช้กรดกัดแล้วล้างออกมาก
จุดด้อยของสารยึดเรซินในกลุ่มนี้คือการยึดกับเคลือบฟันไม่ดี

2.3 สารยึดเรซินชนิดกรดแก่ปานกลางกัดผ่านชั้นสเมียร์ เช่น AdheSE (Vivadent)
และ OptiBond Solo Plus Self-etch (Kerr) มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ
1.5 จึงมีฤทธิ์ละลายแร่ธาตุได้ปานกลาง หลังจากปรับสภาพพบว่า
ดีมิเนอรอลไรต์เดนทีนชั้นบนถูกละลายไฮดรอกซีอะปาไทต์ออกเกือบทั้งหมดแต่
ในชั้นลึกสุดประมาณ 1 ไมครอนถูกละลายออกเพียงบางส่วน และพบว่าการ
เปลี่ยนสภาพจากชั้นไฮบริดไปเป็นเนื้อฟันปกติข้างใต้มีลักษณะค่อยเป็นค่อยไป
ต่างจากกลุ่มสารยึดเรซินชนิดกรดแก่กัดผ่านชั้นสเมียร์และกลุ่มที่ใช้กรดกัดแล้ว
ล้างออกซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนอย่างทันทีทันใด

3. กลุ่มที่เป็นแก้วไอโอโนเมอร์ (glass ionomer approach)

วัสดุกลุ่มนี้สามารถยึดกับฟันได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องปรับสภาพผิว แต่การปรับสภาพ
ผิวด้วยกรดอ่อนพอลิลิค์ในอีกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดได้ เนื่องจากกรดช่วยกำจัด
ชั้นสเมียร์ออกและช่วยละลายแร่ธาตุออกบางส่วนจึงเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดการยึดกับ
เนื้อฟันทางกลและทางเคมี ดังนั้นจึงอาจแบ่งตามขั้นตอนการทำงานออกได้อีกเป็น 1
ขั้นตอนและ 2 ขั้นตอน สารกลุ่มนี้มีกลไกการยึดกับฟัน 2 อย่างคือการยึดทางเคมีด้วย
พันธะไอออนิก ระหว่างกลุ่มคาร์บอกซิลของกรดพอลิลิค์ในอีกกับแคลเซียมในไฮดรอก-
ซีอะปาไทต์ที่เหลืออยู่รอบๆเส้นใยคอลลาเจนที่เผยผิ้ออกมา และการยึดทางกลด้วย
ชั้นไฮบริดตื้นๆของเส้นใยคอลลาเจนซึ่งมีไฮดรอกซีอะปาไทต์เหลืออยู่ เมื่อพิจารณาในแง่
นี้จึงอาจถือว่าแก้วไอโอโนเมอร์เป็นสารยึดเรซินชนิดเป็นกรดอ่อนกัดผ่านชั้นสเมียร์ได้
ต่างกันแต่เพียงว่าแก้วไอโอโนเมอร์กัดฟันด้วยพอลิเมอร์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่สาร
ยึดเรซินชนิดเป็นกรดกัดผ่านชั้นสเมียร์ใช้มอนอเมอร์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

เคลือบฟันและเนื้อฟัน

เคลือบฟัน[34] เป็นเนื้อเยื่อที่มีการสะสมแร่ธาตุมากที่สุดและแข็งแรงที่สุดในร่างกาย
ประกอบด้วยสารอนินทรีย์ (inorganic substance) ร้อยละ 87 สารอินทรีย์ (organic substance)
ร้อยละ 2 และของเหลวร้อยละ 11 โดยปริมาตร เคลือบฟันถูกสร้างจากเซลล์อะมีโลบลาสต์ ซึ่งทำ
หน้าที่สร้างเมทริกซ์ของเคลือบฟัน (enamel matrix) และควบคุมการสะสมแร่ธาตุ มีอนินทรีย์สาร
คือ แคลเซียม (calcium salt) มีไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นส่วนประกอบหลัก ในขณะที่มี
สารประกอบโปรตีน น้ำ และเมทริกซ์ (matrix) เป็นส่วนน้อย โครงสร้างจะมีรูพรุนบางส่วนทำให้

สารเคมีหรือโมเลกุลบางชนิดซึมผ่านได้ เคลือบฟันจะมีความหนาบริเวณยอดปุ่มฟัน (cusp tip) และสันริมฟัน (marginal ridges) แต่จะบางบริเวณคอฟัน การโปร่งใสขึ้นกับการเกิดผลึก เคลือบฟันซึ่งประกอบด้วยผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีขนาดและรูปร่างที่ต่างกันเป็นจำนวนมาก เรียงตัวเป็นแท่งเรียกว่าแท่งเคลือบฟัน แท่งเคลือบฟันเรียงตัวกันแน่นและตั้งฉากจากรอยต่อเคลือบฟันกับเนื้อฟันออกมาที่ผิวเคลือบฟัน เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscopy) พบว่าแต่ละแท่งจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 5 ไมโครเมตร (micrometer) โดยบริเวณใกล้เนื้อฟันมีขนาด 4 ไมโครเมตร และใกล้ผิวเคลือบฟันมีขนาด 8 ไมโครเมตร แท่งเคลือบฟันถูกหุ้มด้วยรอกชีท (rod sheath) การเรียงตัวของแท่งเคลือบฟันจะโค้งเป็นคลื่น ส่วนด้านบดเคี้ยว 1/3 (occlusal 1/3) มีทิศทางเฉียงเข้าหาร่อง (groove) และหลุม (pits) ของฟัน ส่วนกลาง 1/3 (middle 1/3) จะทอดในแนวนอน สำหรับส่วนคอฟัน 1/3 (cervical 1/3) ในฟันแท้จะทอดแนวนอนและเฉียงลงไปทางรากฟัน เมื่ออายุมากขึ้นปริมาณของเหลวระหว่างแท่งเคลือบฟันจะลดลงทำให้การซึมผ่านของสารต่าง ๆ ลดลง

เนื้อฟัน[34,35] ประกอบด้วยสารอนินทรีย์ (inorganic substance) ร้อยละ 47 สารอินทรีย์ (organic substance) ร้อยละ 33 และของเหลวร้อยละ 20 โดยปริมาตร เป็นเนื้อเยื่อแข็งที่มีชีวิตประกอบด้วยเซลล์ที่ทำหน้าที่เฉพาะ (specialized cells) คือ เซลล์สร้างเนื้อฟัน นอกจากนี้ยังมีสารระหว่างเซลล์ (intercellular substance) ได้แก่ โปรทีโอไกลแคน คอลลาเจน เป็นต้น ซึ่งเซลล์สร้างเนื้อฟันจะพบบริเวณรอยต่อเนื้อฟันกับโพรงฟันโดยยื่นแขนงเข้าไปในท่อเนื้อฟัน และมีการสะสมแร่ธาตุ (calcification) รอบๆ แขนงเซลล์สร้างเนื้อฟันและท่อเนื้อฟันขึ้นเป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งเป็นส่วนอนินทรีย์สาร มีผลทำให้เนื้อฟันมีความแข็งแรงมากกว่ากระดูก แต่น้อยกว่าเคลือบฟัน ท่อเนื้อฟันจะทอดจากด้านใกล้โพรงฟันไปตั้งฉากกับบริเวณรอยต่อเคลือบฟันกับเนื้อฟันซึ่งจะโค้งเป็นรูปตัวเอส บริเวณตัวฟันและยึดเป็นเส้นตรงบริเวณรากฟัน แต่ละท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 2.5 ไมโครเมตร มีขนาดใหญ่บริเวณใกล้โพรงฟันประมาณ 3 ไมโครเมตร และค่อย ๆ เล็กลงขนาดประมาณ 0.9-1 ไมโครเมตร บริเวณรอยต่อเคลือบฟันกับเนื้อฟัน เนื้อฟันชั้นที่สอง (secondary dentin) มีส่วนของแร่ธาตุสะสมอยู่มากกว่าชั้นแรก (primary dentin) ส่วนอินทรีย์สาร ในเนื้อฟันส่วนใหญ่ได้แก่ เส้นใยคอลลาเจน แต่ละเส้นมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.05-0.2 ไมโครเมตร มีแถบขวาง (cross band) ห่างกันประมาณ 640 อังสตรอมรวมตัวกันเป็นมัด การเรียงตัวของเส้นใยคอลลาเจนจะทอดตัวไม่เป็นระเบียบรอบๆ ท่อเนื้อฟัน เมื่อเกิดการสะสมแร่ธาตุคอลลาเจนจะถูกหุ้มด้วยผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าแท่งไฮดรอกซีอะพาไทต์มีลักษณะแบนยาวประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ลักษณะเหมือนในเคลือบฟันแต่มีขนาดเล็กกว่า ผลึกของอะพาไทต์จะทอดตามความยาวของเส้นคอลลาเจน ซึ่งเรียงตัวไม่เป็นระเบียบและพันกันเป็นตาข่าย (network) ทำให้การเรียง

ตัวของผลึกมีลักษณะไม่แน่นอน การสะสมแร่ธาตุซึ่งเป็นผลจากการตกผลึกเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยคอลลาเจน เริ่มจากบริเวณกลอบูลา (globular area) เล็ก ๆ แล้วรวมกันเป็นขนาดใหญ่ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการรวมตัวกันของผลึก มีการสะสมแร่ธาตุน้อยเรียก ไฮโปมิเนอไรเซชัน (hypomineralization) พบบริเวณอินเตอร์กลอบูลาเดนทีน (interglobular dentin) พบมากบริเวณแนวเดียวกับเส้นอินคริเมนทอล (incremental line) และใกล้กับรอยต่อเคลือบฟันกับเนื้อฟัน นอกจากนี้เนื้อฟันที่อยู่รอบ ๆ ท่อเนื้อฟัน (peritubular dentin) จะมีการสะสมแร่ธาตุมากกว่าบริเวณที่อยู่ระหว่างท่อเนื้อฟัน (intertubular dentin)

การออกแบบวิธีการวิจัย

ฟันที่ใช้ทดสอบ

Retief และคณะ[31] รายงานว่าค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารยึดเรซินยี่ห้อ Scotchbond 2 กับเนื้อฟันมนุษย์มีค่ามากกว่าฟันวัวและมีการรั่วซึมน้อยกว่าฟันวัว Nakabayashi Ashizawa และ Nakamura [36] ศึกษาการยึดระหว่างเนื้อฟันกับสารยึดเรซินชนิดไฟร์เมตาเอมเอทีบีปีรายงานว่าเนื้อฟันของมนุษย์ในช่องปาก (vital human dentin) ต้านทานต่อการละลายแร่ธาตุจากกรดได้ดีกว่าฟันวัวที่ถอนแล้ว และเนื้อฟันของมนุษย์ที่ไม่มีรอยโรคฟันผุต้านทานต่อการละลายแร่ธาตุจากกรดได้ดีกว่าเนื้อฟันของมนุษย์ที่มีรอยโรคฟันผุ โดยพบว่าฟันวัวที่ถอนแล้วมีชั้นไฮบริดหนา 5 ไมครอน เนื้อฟันของมนุษย์ที่มีรอยโรคฟันผุมีชั้นไฮบริดหนา 3-4 ไมครอนและเนื้อฟันของมนุษย์ที่ไม่มีรอยโรคฟันผุมีชั้นไฮบริดหนา 2 ไมครอน จากการทบทวนวรรณกรรมของ Hilton[37] รายงานว่าฟันมนุษย์และฟันวัวมีความแข็งแรงในการยึดเหมือนกันเมื่อใช้เนื้อฟันวัวที่อยู่ด้านใกล้ผิว ดังนั้นแม้ว่าฟันวัวจะเหมาะสมสำหรับการทดลองเบื้องต้น (screening material) แต่ถ้าสามารถใช้ฟันมนุษย์ในการทดสอบจะให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่า แม้ว่าจะเป็นฟันมนุษย์ที่ถอนแล้วก็พบว่าลักษณะการยึดของเนื้อฟันกับสารยึดเรซินไม่แตกต่างจากการยึดกับฟันมนุษย์ในช่องปาก แสดงถึงการทดลองในห้องทดลองสามารถใช้เปรียบกับการทำงานในคลินิกได้ [38]

The International Organization for Standardization/Technical Specification 11405 [ISO/TS 11405:2003] [10] แนะนำว่าตามอุดมคติควรใช้ฟันหลังจากถอนทันทีเพื่อวัดค่ากำลังแรงยึด แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้สะดวก จึงควรใช้ฟันที่ถอนมาแล้วอย่างน้อย 1 เดือนและไม่เกิน 6 เดือน เพราะฟันที่ถอนในช่วงอาทิตย์แรกๆมีการเปลี่ยนแปลงมากและฟันที่ถอนนานกว่า 6 เดือนโปรตีนในเนื้อฟันจะเริ่มเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมของ Hilton[37] รายงานว่าระยะเวลาที่เก็บฟันภายหลังการถอนฟันดูจะไม่ส่งผลต่อการยึดมากนัก เช่นเดียวกับสารที่ใช้แช่ฟันหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บฟันก่อนทำการทดลอง

การวัดค่าความแข็งแรงดึงยึด (Tensile bond strength) ของสารยึดเรซินกับผิวฟัน

ในปัจจุบันการวัดค่าความแข็งแรงของการยึดติดกับฟัน โดยทั่วไปมักใช้การทดสอบค่ากำลังแรงยึดดึง (tensile bond strength) หรือการทดสอบค่ากำลังแรงยึดเฉือน (shear bond strength) การทดสอบค่ากำลังแรงยึดเฉือนสามารถเตรียมขึ้นตัวอย่างและทดสอบได้ง่ายแต่ค่าที่ได้ อาจไม่เป็นค่าที่แท้จริง (pure shear) และค่าความแข็งแรงเฉือนยึดจากต่างห้องทดลองมีความแปรปรวนเกิดขึ้นมากแม้จะใช้วัสดุ วิธีการ และเครื่องมือแบบเดียวกัน รวมถึงการทดสอบความแข็งแรงเฉือนยึดใช้แรงแบบตอก (punch test) ซึ่งไม่ใช่แรงที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับลักษณะทางคลินิก จากการทบทวนวรรณกรรมของ Hilton[37] พบว่ามีหลายการศึกษารายงานว่าค่ากำลังแรงยึดเฉือนไม่มีความสัมพันธ์กับการรั่วซึม Nakabayashi และ Pashley[16] กล่าวว่า การทดสอบค่ากำลังแรงยึดเฉือนหรือการทดสอบค่ากำลังแรงยึดดึงตามวิธีของ ISO ไม่สามารถตรวจพบบริเวณติมีเนอรอลไรท์เดนทีนที่หลงเหลือ ดังจะเห็นได้จากการที่มักพบว่าการแตกหักจากการทดสอบค่ากำลังแรงยึดเฉือนมักเกิดในชั้นเรซิน[18] เนื่องจากห้วงดลักษณะแบบปลายมีดทำให้เกิดการกระจายความเครียดอย่างไม่สม่ำเสมอ (non-uniform stress distribution) ไปยังเรซินทำให้เกิดรอยร้าวไปในเรซินหรือเนื้อฟันมากกว่าจะเกิดผ่านไปตามรอยต่อของเรซินกับเนื้อฟัน

Nakabayashi และ Pashley[16] ได้เสนอการทดสอบค่ากำลังแรงยึดดึงโดยเตรียมฟันเป็นรูปดัมเบลล์มีพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อของเรซินกับเนื้อฟัน 7x2 ตารางมิลลิเมตร (miniaturized dumbbell specimen) การทำให้รอยต่อของเรซินกับเนื้อฟันซึ่งเป็นบริเวณที่แคบที่สุดได้รับแรงดึงโดยตรง จึงทำให้เกิดการแตกหักในชั้นที่อ่อนแอที่สุดจึงเหมาะสมกว่าในการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดกับฟัน ต่อมา Nakabayashi[34] รายงานว่าการหาฟันมนุษย์ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอในการเตรียมชิ้นงานขนาดดังกล่าวทำได้ยาก จึงได้เสนอการเตรียมฟันเป็นรูปดัมเบลล์ขนาดเล็กมีพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อของเรซินกับเนื้อฟัน 3x2 ตารางมิลลิเมตร (mini-dumbbell specimen) แทน ซึ่งให้ผลการทดสอบไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้การทดสอบค่ากำลังแรงยึดดึงแบบมินิ ดัมเบลล์ยังให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบการรั่วซึมอีกด้วย[2,3]

การทดสอบการรั่วซึม

การรั่วซึมคือ ทางผ่านเข้าออกของแบคทีเรีย ของเหลว โมเลกุลหรือไอออน ระหว่างผนังฟันและวัสดุบูรณะซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ทางคลินิก[39] วิธีที่นิยมที่สุดในการศึกษาการฉีกแน่นของวัสดุบูรณะฟันคือการทดสอบการรั่วซึม ซึ่งมีหลายวิธีได้แก่[37,39,40,41]

1. การใช้สีย้อม (dye) โดยการแช่ฟันที่บูรณะลงในสีย้อมตามเวลาที่กำหนด เมื่อเอาขึ้นแล้วล้างสีย้อมออกแล้วผ่าฟันออกแล้วตรวจดูการแทรกซึมของสีย้อมเข้าไปรอบๆวัสดุ สีย้อมที่ใช้มีหลายชนิดเช่น สารละลายเบสิกฟลูออรีน สารละลายเมทิลีนบลู สารละลายโทลูอิดีน

อะนาลินบลู ฟลูออเรสซิน เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีประสิทธิภาพดี เตรียมง่าย ไม่ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีหรือรังสี ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย ข้อด้อยคือ ได้ผลการตรวจเป็นระดับคะแนน เมื่อใช้ผู้ตรวจหลายคนผลการตรวจจึงขึ้นกับความรู้สึกรู้สึก(subjective) และต้องทำลายชิ้นงานจึงไม่สามารถศึกษาชิ้นงานเดิมในหลายระยะเวลาได้ นอกจากนี้ยังควรคำนึงถึงว่าผลการรั่วซึมที่วัดมาจากการตัดพื้นในระนาบเดียวซึ่งไม่รู้ว่าป็นจุดที่ดีที่สุดหรือไม่ และควรหลีกเลี่ยงการใช้สีย้อมที่ไม่เสถียรเช่นอะนาลินบลูจะไม่มีสีเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง

2. การใช้สารเคมี (chemical tracers) สารที่นิยมใช้ คือซิลเวอร์ไนเตรต สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตร้อยละ 50 มักใช้ในการแช่พื้นแล้วนำมาทำปฏิกิริยากับน้ำยาล้างภาพ (photographic developing solution) ข้อดีของวิธีนี้คือการวัดผลเป็นสิ่งที่เที่ยงตรงขึ้น (objective) ได้ข้อมูลในเชิงปริมาณ (quantitative data) จึงสามารถใช้สถิติแบบพาราเมตริกได้ ข้อด้อยของวิธีนี้เช่นเดียวกับการใช้สีย้อม เนื่องจากซิลเวอร์ไอออนมีขนาดเล็กมากจึงมีความสามารถในการแทรกซึมสูง จึงอนุมานว่าระบบใดที่สามารถป้องกันการรั่วซึมของซิลเวอร์ไอออนได้จะป้องกันการแทรกซึมของแบคทีเรียได้ด้วย[40]
3. การใช้สารรังสี (radioactive tracers) การใช้สารรังสีไอโซโทปช่วยให้ตรวจพบการรั่วซึมแม้เพียงเล็กน้อยได้เนื่องจากมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสีย้อม สารรังสีที่นิยมใช้ได้แก่ Ca^{45} , C^{14} , I^{131} , S^{35} และ Na^{22} ข้อด้อยของวิธีนี้เช่นเดียวกับการใช้สีย้อม คือการตรวจผลเป็นความรู้สึกรู้สึก (subjective) ต้องทำลายชิ้นงาน และผลการรั่วซึมที่วัดมาจากการตัดพื้นในระนาบเดียว นอกจากนี้การใช้สารรังสีต้องระมัดระวังความปลอดภัยในทุกขั้นตอน ค่าใช้จ่ายสูง และการแปลผลยุ่งยากเนื่องจากสารรังสีอาจแทรกซึมมาจากทางอื่นเช่นรอยร้าวในเคลือบพื้น และต้องคำนึงถึงปัจจัยรบกวนเช่นไอโซโทปที่มีพลังงานสูงจะเกิดการกระเจิงแสงมาก ระยะจากวัตถุยังใกล้ยิ่งทำให้ภาพขยายมาก ยิ่งฟิล์มโดนรังสีนานภาพยิ่งเกิดมาก และภาพที่ปรากฏขึ้นอยู่กับทิศทางของรังสีที่ทำมุมกับฟิล์มด้วย
4. การใช้แบคทีเรีย เป็นการทดสอบว่าแบคทีเรียสามารถรั่วซึมเข้าไปในตัววัสดุบูรณะหรือไม่ โดยดูจากผลการเพาะเชื้อ ข้อดีของวิธีนี้คือเชื่อว่าเป็นวิธีที่มีความสัมพันธ์กับทางคลินิก และสัมพันธ์กับกระบวนการเกิดฟันผุ ข้อด้อยคือผลการทดลองเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ (qualitative data) ซึ่งบอกได้เพียงว่ามีหรือไม่มีการรั่วซึมของแบคทีเรียเท่านั้น และการรั่วซึมของแบคทีเรียอาจเป็นการวัดที่หายากเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดของไฮโดรเจนไอออนหรือสารพิษจากแบคทีเรีย
5. การใช้แรงดันอากาศ ใช้อากาศอัดผ่านคลองรากฟันและวัดว่าแรงดันอากาศลดลงหรือไม่ หรือตรวจดูว่ามีฟองอากาศออกจากขอบวัสดุบูรณะหรือไม่ ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้อง

ทำลายชิ้นงานจึงสามารถตรวจการรั่วซึมได้หลายครั้งตามเวลาที่ผ่านไป ข้อด้อยคือใช้ตรวจสอบการรั่วซึมที่ผ่านโดยตลอดจากพื้นผนังฟันจนถึงขอบนอกได้เท่านั้น และอากาศที่ออกมานี้อาจรั่วออกจากตัววัสดุบูรณะหรือเนื้อฟันเองก็ได้

6. การสร้างฟันผุจำลอง (Artificial caries) ทำได้ทั้งการสร้างด้วยเชื้อแบคทีเรียหรือสร้างด้วยสารเคมี แต่การสร้างฟันผุด้วยสารเคมีมีข้อดีกว่าการสร้างด้วยเชื้อแบคทีเรียเนื่องจากการใช้สารเคมีตัดตัวแปรภายนอกออกไปได้เช่นการให้อาหารแก่เชื้อและการเจริญของเชื้อ นอกจากนี้การใช้สารเคมีสามารถสร้างฟันผุได้ในระยะเวลาอันสั้นและประหยัดค่าใช้จ่าย รอยโรคฟันผุที่สร้างขึ้นนี้ตรวจวัดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (polarized light microscope) และภาพถ่ายรังสีไมโคร (microradiograph) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถเห็นการเกิดและการกระจายของฟันผุซ้ำ สามารถวัดข้อมูลในเชิงปริมาณได้จากความลึกของรอยโรคและปริมาณการละลายของแร่ธาตุ ระบบจำลองการเกิดฟันผุในเคลือบฟันด้วยสารเคมีได้แก่[42]

6.1 acid-gel system พัฒนาขึ้นโดย Silverstone ใช้ เจลาตินเจลร้อยละ 17 ทำให้เป็นกรดด้วยกรดแลคติก มีค่าความเป็นกรดต่าง 4.5 แซ่ฟันเป็นเวลา 9-12 สัปดาห์

6.2 diphosphonate inhibitor system พัฒนาขึ้นโดย Francis และ Featherstone ประกอบด้วยสารละลายกรดแลคติก 0.1 โมลและ Ethane 1,1-diphosphonate (EHDP) และปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้เป็น 4.5 แซ่ฟันเป็นเวลา 5-7 วัน

6.3 partially saturated buffers system พัฒนาขึ้นโดย Moreno และ Zahradnik ประกอบด้วยสารละลายกรดแลคติก 0.1 โมลซึ่งถูกทำให้อิ่มตัวบางส่วนด้วยไฮดรอกซีอะปาไทต์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรและปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้เป็น 4.5 แซ่ฟันเป็นเวลา 1-3 วันโดยไมคอน

Wefel และ Harles[42] ศึกษากระบวนการเกิดฟันผุที่เคลือบฟันทั้ง 3 ระบบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์และภาพถ่ายรังสีไมโคร พบว่า acid-gel system เป็นระบบที่ให้ผลใกล้เคียงกับลักษณะเคลือบฟันผุในธรรมชาติ เนื่องจากความหนืดของเจลจำกัดการเคลื่อนย้ายของไอออนที่เข้าออกเคลือบฟัน และอาจเนื่องจากประจุของสารโมเลกุลใหญ่ (macromolecule) จึงทำให้ระบบนี้จำลองสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติของแผ่นคราบจุลินทรีย์กับผิวฟันเหมือนในธรรมชาติ

ในปี 1995 Wefel Heilman และ Jordan[43] ศึกษาเปรียบเทียบระบบจำลองการเกิดฟันผุที่รากฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์และภาพถ่ายรังสีไมโคร 2 ระบบคือ partially saturated buffers system แซ่ฟันนาน 7 วัน และ gelatin-gel system

แช่พื้นนาน 6 สัปดาห์ พบว่าทั้ง 2 ระบบทำให้เกิดรอยโรครากพินสุเหมือนกับในธรรมชาติ ทั้งคู่ แต่ระบบบัพเฟอร์มีข้อดีกว่าเนื่องจากใช้เวลาแช่พื้นสั้นกว่าและเตรียมสารง่ายกว่า

7. การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope) เป็นการตรวจดูโดยตรงว่าวัสดุบูรณะแนบกับพื้นหรือไม่ด้วยกำลังขยายสูง วิธีนี้มีจุดด้อยคือจำกัดบริเวณที่ดูแต่ภายนอกพื้นเท่านั้นไม่เห็นถึงการแทรกซึมเช่นในวิธีอื่น ผลการตรวจเป็นสิ่งที่วัดได้ยาก นอกจากนี้การเตรียมชิ้นงานอาจทำให้เกิดการบิดเบี้ยว การแตกความแห้งหรือความผิดพลาดจากการตัด อย่างไรก็ตามข้อด้อยนี้อาจแก้ไขได้โดยการใช้แบบจำลอง (replica) ซึ่งแบบจำลองยังสามารถทำให้ตรวจซ้ำได้หลายครั้งในหลายเวลาอีกด้วย
8. การกระตุ้นนิวตรอน (neutron activation analysis) เป็นการนำพินแช่ในเกลือแมงกานีสที่ไม่ปล่อยรังสี จากนั้นเอาพินขึ้นแล้วเอาสารที่ติดอยู่ด้านนอกพินออกหมด ทำการกระตุ้นให้แมงกานีสกลายเป็นสารที่ปล่อยรังสี แล้ววัดรังสีที่ออกมา วิธีนี้มีข้อดีที่สามารถวัดข้อมูลเชิงปริมาณได้แต่วิธีทำยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายสูง ไม่สามารถชี้ได้ว่าการรั่วซึมจากจุดไหนหรืออาจมาจากจุดอื่นซึ่งไม่ใช่รอยต่อวัสดุกับพินก็ได้ และต้องระวังอันตรายจากรังสี นอกจากนี้ผลอาจคลาดเคลื่อนจากแมงกานีสซึ่งมีในวัสดุบูรณะหรือในพินเอง
9. การนำไฟฟ้า (electrical conductivity) เป็นการวัดกระแสไฟฟ้าที่ครบวงจรผ่านในช่องระหว่างวัสดุบูรณะกับแก้ว วิธีนี้มีข้อดีที่สามารถวัดข้อมูลเชิงปริมาณได้ ไม่ต้องทำลายชิ้นงานจึงวัดการเปลี่ยนแปลงมิติของวัสดุบูรณะได้หลายครั้งในหลายเวลา อย่างไรก็ตามวัสดุเช่นแก้วไอโอโนเมอร์ก็มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และการใช้แก้วแทนพินซึ่งมีคุณสมบัติต่างกัน จึงขาดความเหมือนจริงทางคลินิก

จากการทบทวนวรรณกรรมของ Alani และ Toh[40] กล่าวถึงการวิจัยเปรียบเทียบสารที่ใช้ทดสอบการรั่วซึม พบว่าสารละลายเบสิกฟลูออเรสเซนต์ 0.5 ให้การรั่วซึมมากที่สุด ตามด้วย 1.5% reactive orange 14, Ca^{45} และ 2% fluorescent dye ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมของ Hilton[37] เปรียบเทียบการรั่วซึมของสารย้อมเรซินจากงานวิจัยหลายอันซึ่งใช้สีย้อมต่างกันพบว่าได้ผลการศึกษาใกล้เคียงกันและไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าชนิดของสีย้อมส่งผลต่อการรั่วซึมแตกต่างกัน และได้สรุปว่าการรั่วซึมน่าจะเกิดจากวัสดุมากกว่าชนิดของสีย้อม

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในการใช้สารแทรกซึม (tracer) หรือสีย้อมเพื่อทดสอบการรั่วซึมคือ ผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กับทางคลินิกหรือไม่ เนื่องจากขนาดของโมเลกุลของสารแทรกซึมที่ใช้เล็กกว่าขนาดของแบคทีเรียมาก (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบคทีเรียอาจมีขนาดใหญ่เกินกว่าจะรั่วซึมเข้าไปตามรอยต่อของพินกับวัสดุบูรณะแต่โมเลกุลของกลูโคสก็ยังมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของสารแทรกซึม ซึ่งอาจทำให้แบคทีเรียที่มีอยู่เดิมก่อนจะใส่วัสดุบูรณะเช่นในชั้นเคลือบ

หรือในท่อเนื้อฟันได้รับอาหารและมีชีวิตอยู่ได้ นอกจากนี้พบว่าแม้แต่โมเลกุลของน้ำยังสามารถทำให้เส้นใยคอลลาเจนในชั้นไฮบริดที่ไม่สมบูรณ์เกิดการสลายตัวจากน้ำได้[33] ดังนั้นการทดสอบการรั่วซึมในห้องทดลองจึงเป็นการทดสอบที่เข้มงวดแต่สามารถเทียบได้กับสิ่งที่พบจริงทางคลินิก [37]

วิธีการทดสอบการรั่วซึมทุกวิธีต่างมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน วิธีที่น่าจะใช้การได้เหมาะสมในระดับที่เชื่อถือและยอมรับได้คือการใช้สารแทรกซึม (tracer) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเปรียบเทียบการรั่วซึมระหว่างวัสดุบูรณะในห้องทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ[40]

ตารางที่ 1 แสดงน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลสารต่างๆ ไวรัสและแบคทีเรียเทียบกับขนาดของรูพรุนในชั้นไฮบริดและช่องว่างระหว่างวัสดุบูรณะกับฟัน[37]

Substance	Molecular weight	Molecular Radius	
		Å units *	nm
Water	18	2.6	0.26
Silver (AgNO ₂)	108	4.8	0.50
Glucose	180	5.6	0.56
Methylene Blue	319	6.8	0.68
Hydroquinone	388	7.3	0.73
Fuchsin	585	8.4	0.84
Trypan Blue	961	9.9	0.99
Myoglobin	17,000	26.0	2.60
Albumin	69,000	41.0	4.10
Bacterial endotoxin	1,000,000	100.0	10.00
	4,000,000	158.0	15.80
Viruses			
Small (Parvoviridae)	2,000,000	130.0	13.00
Large (Adenoviridae)	25,000,000	450.0	45.00
Bacteria			
Cocci (0.2 - 1.0 µm diameter)			100-500
Rods (0.5 x 7 µm)			250x3500
Microporosities within hybrid layer			20x1000
Gap sizes (0.05-20 µm)			
Between restorative materials and tooth structure			

*Values above were calculated as the cube root of the molecular weight: Values for viruses and bacteria are from transmission electron microscopic reports.

การทำเทอร์โมไซคลิก (thermocycling)

เทอร์โมไซคลิกเป็นการทดสอบความต้านทานต่อการแผ่ผ่านน้ำ (water penetration) และความต้านทานต่อความเค้นของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (thermal stress) โดยอาศัยความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัว (coefficient of thermal expansion) ของวัสดุสองชนิด ด้วยการผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงเย็น-ร้อนแบบเป็นจังหวะ เพื่อประเมินความแข็งแรงของการยึดติดของวัสดุ และเป็นแนวทางการนำไปใช้ทางคลินิก

มีนักวิจัยหลายกลุ่มให้ความคิดเห็นที่ต่างกันเกี่ยวกับการทดสอบเทอร์โมไซคลิก Nakabayashi และ Pashley[16] พบว่าการทดสอบเทอร์โมไซคลิกกับการยึดระหว่างเรซินกับเนื้อฟันนั้นอาจจะไม่เหมาะสมเพราะความร้อนที่สูงถึง 60 องศาเซลเซียสอาจทำลายคอลลาเจนเมทริกซ์ (collagen matrix) มีผลทำให้กำลังแรงยึดลดลง และทำให้แปรผลคลาดเคลื่อนได้ Prati และคณะ[44] พบว่าแรงจากการบดเคี้ยวและการทำเทอร์โมไซคลิกไม่มีผลต่อการรั่วซึมในระดับไมโครเมตรเมื่อทำการบูรณะฟันโดยการอุดคลาสทู (class II) ด้วยเรซินคอมโพสิตเมื่อใช้สารยึดที่ต่างกัน Crim และคณะ[45] พบว่าการทดสอบเทอร์โมไซคลิกทำให้การรั่วซึมระดับไมโครเมตรมากกว่าการไม่ทดสอบเทอร์โมไซคลิกเมื่อทำการบูรณะฟันด้วยเรซินคอมโพสิต