

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

วัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมมี 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ เซรามิก (ceramic) โลหะผสม (metal alloys) โพลีเมอร์ (polymer) และเรซินคอมโพสิต (resin composite) ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีการพัฒนากันมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อให้ได้วัสดุบูรณะที่มีคุณสมบัติตามในอุดมคติ (ideal restorative materials) คือ มีการเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย (biocompatible) สามารถยึดติดกับโครงสร้างของฟันและกระดูกได้อย่างถาวร มีสีและลักษณะรูปร่างเหมือนกับโครงสร้างของฟันตามธรรมชาติ มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเคลือบฟัน เนื้อฟันและเนื้อเยื่ออื่น และสามารถกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อหรือการเกิดใหม่ (regeneration) ของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายไปได้ แต่จนถึงปัจจุบันนี้ก็ยังไม่มีวัสดุตัวใดที่มีคุณสมบัติครบตามที่ต้องการ (Anusavice, 2003: 4) โดยวัสดุตัวแรกที่ถูกนำมาใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมแบบทางอ้อมคือ เซรามิก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ประเภทที่ไม่ใช่โลหะและขึ้นรูปโดยการเผาที่อุณหภูมิสูง พอร์ซเลน (porcelain) เป็นเซรามิกชนิดหนึ่งที่เป็นส่วนประกอบของดินขาว (kaolin) ควอทซ์ (quartz) และเฟลสปาร์ (feldspar) ที่ถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูง (Powers and Sakaguchi, 2006: 444) โดยเซรามิกที่นำมาใช้ทางทันตกรรมมีการเติมผลึกเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับเซรามิก เช่น ลิวไซต์ (leucite) อลูมินา (alumina) หรือไมก้า (mica) (van Dijken, 1999) ซึ่งในทางทันตกรรมได้นำพอร์ซเลนมาใช้หลักๆ อยู่ 3 ประเภทคือ 1. การทำครอบฟันหรือสะพานฟันชนิดติดแน่นที่มีแกนเป็นโลหะร่วมกับเซรามิก (ceramic-metal crown and fixed partial denture) 2. เคลือบฟันเทียม (laminare veneer) ชิ้นงานอุดฝัง (inlay) ชิ้นงานอุดครอบ (onlay) และครอบฟันที่ทำขึ้นจากเซรามิกล้วน (all ceramic restorations) 3. ซีฟันปลอมที่เป็นเซรามิก (Powers and Sakaguchi, 2006: 444-445) การนำพอร์ซเลนมาใช้ในทางทันตกรรมเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1884 โดยทำเป็นซีฟันปลอมพอร์ซเลน ต่อจากนั้นในปี ค.ศ. 1903 Dr. Charles Land เป็นบุคคลแรกที่นำเซรามิกมาใช้ทำเป็นครอบฟันโดยใช้แผ่นโลหะแพททินัมเป็นโครง (platinum foil matrix) ร่วมกับพอร์ซเลนชนิดเฟลสปาร์ที่หลอมรวมตัวเมื่อใช้อุณหภูมิสูง (high fusing feldspathic porcelains) แต่พอร์ซเลนชนิดนี้มีความแข็งแรงต่ำและแตกหักง่าย เนื่องจากโดยธรรมชาติของเซรามิกจะมีรอยร้าวขนาดเล็ก (microcrack) อยู่ภายในและบริเวณพื้นผิวของวัสดุทำให้เป็นจุดอ่อนแอของเซรามิก (Anusavice, 2003: 660-661) ดังนั้นในปี ค.ศ. 1959 จึงมีการใช้พอร์ซเลนร่วมกับโลหะ

(porcelain fused to metal) (Anusavice, 2003: 566; Rosenblum and Schulman, 1997) โดยใช้โลหะเป็นแกนด้านในเพราะมีค่าการดูดซับพลังงานก่อนแตกหัก (fracture toughness) สูงแล้วพอกด้านนอกด้วยเซรามิกให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ (van Noort, 2002: 247) โดยเซรามิกที่ใช้เป็นเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเผา (sintering) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยเป็นขบวนการที่ทำให้เซรามิกอัดรวมตัวกันแน่นขึ้นโดยใช้ความร้อน ซึ่งวิธีนี้จะนำเฟลสปาร์ติกพอร์ซเลนมาเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดวัฏภาคขึ้น 2 วัฏภาคคือ วัฏภาคที่เป็นแก้ว (glassy phase) ซึ่งมีความเปราะและมีความแข็งแรงดึง (tensile strength) ต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอและการเกิดการขยายของรอยร้าวเล็กๆที่มีอยู่ในวัฏภาคที่เป็นแก้วนี้ และวัฏภาคที่เป็นผลึก (crystalline phase) ที่เป็นลิวไซต์ ซึ่งประกอบด้วยโปแทสเซียม อลูมิโนซิลิเกต (potassium aluminosilicate, KAlSi_2O_6 หรือ $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) ที่มีรูปร่างของผลึกที่มี 4 มุม (tetragonal) ซึ่งวัฏภาคผลึกนี้มีบทบาทในการควบคุมสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน (coefficient of thermal expansion) ของพอร์ซเลน การทำให้เซรามิกมีความแข็งแรงมากขึ้น (Powers and Sakaguchi, 2006: 444-448) และมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านแสง (optical properties) (Rosenblum and Schulman, 1997) ของเซรามิก แต่ครอบฟันที่ทำจากพอร์ซเลนร่วมกับโลหะก็มีปัญหาเรื่องความสวยงามไม่เหมือนธรรมชาติและการแพ้โลหะโดยเฉพาะนิกเกิล (nickel) (van Dijken and Odont, 1999) ในปี ค.ศ. 1965 จึงมีการพัฒนามาใช้แกนพอร์ซเลนที่เสริมความแข็งแรงโดยใช้อลูมินา (alumina-reinforced porcelain core) เพื่อเพิ่มความต้านทานการแตกหัก แต่ก็ยังมีค่าความแข็งแรงดัดขวาง (flexural strength) ต่ำอยู่ ทำให้เกิดการแตกหักได้เมื่อนำไปใช้ในฟันหลังและมีความโปร่งแสงไม่เพียงพอทำให้ดูทึบและไม่สวยงามตามธรรมชาติ (Anusavice, 2003: 661)

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซรามิกทั้งในด้านส่วนประกอบและวิธีการขึ้นรูปของแกนของครอบฟันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานบูรณะให้มากขึ้น ทำให้สามารถบูรณะโดยใช้เซรามิกล้วน (all ceramic restorations) ที่มีความแข็งแรงและมีความสวยงามได้ (Powers and Sakaguchi, 2006: 444) โดยในปี ค.ศ. 1973 David Grossman ได้พัฒนาระบบไดคอร์ (Dicor) (Giodano, 1996) ขึ้นเป็นระบบแรกซึ่งเป็นเซรามิกชนิดเหวียง (castable ceramic) โดยใช้แท่งเซรามิก (ceramic ingots) ชนิดฟลูออไรไมก้า (fluoromica) (van Noort, 2002: 245) ประกอบด้วยซิลิกอนออกไซด์ โปแทสเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมฟลูออไรด์ อลูมินาออกไซด์ และเซอร์โคเนียออกไซด์เล็กน้อยเพื่อความทนทาน (Giodano, 1996) วิธีการผลิตจะใช้แม่แบบที่ผ่านการหลอมขี้ผึ้งไว้ก่อนแล้ว (lost wax technique) โดยจะแต่งขี้ผึ้งตามปกตินำไปลง

อินเวสเมนต์และทำการเหวี่ยงให้ได้ครอบฟันที่มีความโปร่งแสง (full contour transparent crown) ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส แล้วนำไปบ่มด้วยความร้อน(heat-treatment) ที่ 1,075 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งเรียกว่าการซีแรมมิ่ง (ceraming) เพื่อให้ได้โคคอร์ที่มีองค์ประกอบเป็นวัฏภาคที่เป็นผลึกร้อยละ 45 เพื่อให้วัสดุใสขึ้น เพิ่มความต้านทานการแตกหักและความแข็งแรงของเซรามิคแล้วจึงนำไปขัดแต่งเพิ่มเติมต่อไป (Rosenblum and Schulman, 1997) โดยโคคอร์นี้มีค่าความแข็งแรงดัดขวาง 120-150 เมกะปาสคาล ซึ่งสามารถใช้ทำเป็นครอบฟันในฟันหลังได้แต่ไม่แข็งแรงพอที่จะใช้ทำเป็นสะพานฟันได้ (van Noort, 2002: 245) เซรามิคชนิดเหวี่ยงนี้มีขบวนการผลิตที่ยุ่งยากและมีอุปสรรคการแตกหักสูงจึงลดความนิยมลง (Powers and Sakaguchi, 2006: 444) ต่อมาจึงมีการพัฒนาระบบเซรามิคล้นที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน (heat-pressed all ceramic materials) ขึ้น

เซรามิคล้นที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน วิธีนี้ทำให้ได้ชิ้นงานเซรามิคที่ไม่มีรูพรุน และมีการกระจายของวัฏภาคที่เป็นผลึกอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ที่เป็นแก้ว (glass matrix) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี มีความหนาแน่นสูงและมีผลึกขนาดเล็ก โดยเริ่มแรกใช้เซรามิคที่มีลิวไซต์ (leucite-based ceramic) โดยมีลิวไซต์อยู่ร้อยละ 35 ถึง 55 นำมากดอัดด้วยความดัน 0.3 ถึง 0.4 เมกะปาสคาลที่อุณหภูมิ 1,150 และ 1,180 องศาเซลเซียส เข้าในแม่แบบที่ผ่านการหลอมซีลิ่งไว้ก่อนแล้ว (Powers and Sakaguchi, 2006: 452) ทำให้ได้ชิ้นงานเซรามิคที่มีค่าความแข็งแรงดัดขวางมากกว่าเฟลสปาร์ติคพอร์ซเลนแบบดั้งเดิม (conventional feldspartic porcelain) 2 เท่าคือ 120 เมกะปาสคาล (Powers and Sakaguchi, 2006: 452) และหลังจากทำการบ่มด้วยความร้อนแล้วจะมีค่าความแข็งแรงดัดขวางเป็น 160 ถึง 182 เมกะปาสคาล (Giodano, 1996; Leinfelder, Isenberg and Essig, 1989) ตัวอย่างเซรามิคชนิดนี้คือ ไอพีเอสเอ็มเพรส (IPS Empress, Ivoclar-Vivadent, Schann, Liechtenstein) ซึ่งมีความโปร่งแสงที่ดีมากให้ความสวยงามตามธรรมชาติได้ สามารถใช้ในงานอุดฝัง อุดครอบ เคลือบฟันเทียม และครอบฟันได้ (Ahnad, 1998) แต่เนื่องจากความแข็งแรงไม่มากนัก จึงไม่สามารถนำมาทำเป็นสะพานฟันได้ ในปี ค.ศ.1998 จึงพัฒนาไอพีเอสเอ็มเพรสทู (IPS Empress 2, Ivoclar-Vivadent, Schann, Liechtenstein) (van Dijken and Odont, 1999) ขึ้นซึ่งเป็นเซรามิคที่มีลิเทียมไดซิลิเกตเป็นสารหลัก (lithium disilicate-based materials) มีผลึกส่วนใหญ่เป็นลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ร้อยละ 60 ถึง 80 (van Dijken and Odont, 1999) มากดอัดด้วยความร้อนอุณหภูมิ 890 ถึง 920 องศาเซลเซียส ในแม่แบบที่ผ่านการหลอมซีลิ่งไว้ก่อนแล้ว หลังจากนั้นทำการพอกเซรามิคให้เป็นรูปร่างที่สมบูรณ์โดยใช้วีเนียร์ริงเซรามิค (veneering ceramic) โครงสร้างที่ได้จะมี

ผลิตภัณฑ์เอนิเมคัลเคลือบรอยละ 60 กระจายอยู่ในเมทริกซ์ที่เป็นแก้ว ทำให้เซรามิกชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงถึง 350 เมกะปาสคาล และมีค่าการดูดซับพลังงานก่อนแตกหัก (fracture toughness) 3.2 เมกะปาสคาลต่อตารางเมตร ทำให้แข็งแรงพอที่จะใช้ทำเป็นสะพานฟันชนิดติดแน่นได้ (Powers and Sakaguchi, 2006: 453-454) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนใกล้เคียงกับเซรามิกชนิดอะพาไทต์ (apatite glass ceramic) ที่ใช้ในชั้นตอนการทำเป็นชั้นๆ (layer) มีความต้านทานต่อสารเคมีและทำให้ฟันคู่สบสึกน้อย (Rumik et al., 2000) คือมีการสึกใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติจึงใช้ได้ดีกับคู่สบที่เป็นฟันธรรมชาติ (Schweiger et al., 1999; Sorensen, 1999) นอกจากนี้ยังมีความโปร่งแสงที่ดีให้ความสวยงามตามธรรมชาติได้ (Anusavice, 2000: 685) สามารถใช้ในงานอุดฝัง อุดครอบ เคลือบฟันเทียม ครอบฟันทั้งฟันหน้าและฟันหลัง และสะพานฟันบริเวณฟันหน้าถึงฟันกรามน้อยได้ (Schweiger et al., 1999; Sorensen, 1999) แต่ไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะใช้เป็นสะพานฟันในฟันหลังได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซรามิกให้มีความแข็งแรง และการต้านทานการแตกหักสูงขึ้น เพื่อให้ใช้เป็นสะพานฟันในฟันหลังได้ จึงเกิดเซรามิกชนิดแทรกกระจาย (infiltrated ceramics) และ โพรเซราอลซีแรม (Procera AllCeram) ขึ้น (Anusavice, 2003: 662)

เซรามิกชนิดแทรกกระจาย (infiltrated ceramics) (Rosenblum and Schulman, 1997) หรือเซรามิกล้วนที่สร้างขึ้นจากวิธี สลิป-แคส (slip cast all-ceramic materials) (Powers and Sakaguchi, 2006: 454) เซรามิกชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผงอลูมินัมออกไซด์ (aluminum oxide) หรือสปิเนล (spinel) โดยผสมผงอลูมินากับน้ำให้ผงแขวนลอยอยู่ในน้ำเรียก "สลิป" (slip) ทาบบนแม่แบบ (die) นำไปเผาแล้วนำแก้วมาทาแล้วเผาให้เกิดการแทรกตัวของแก้ว (glass infiltrated) เข้าไปในแกนที่มีรูพรุน (Powers and Sakaguchi, 2006: 454; Rosenblum and Schulman, 1997) ทำให้ลดการเกิดรูพรุนและจุดบกพร่อง (defect) ของแกนที่ได้ และมีความเหนียว (toughness) สูงกว่าเฟลสปาร์ติกพอร์ซเลนแบบดั้งเดิม (Powers and Sakaguchi, 2006: 454) เมื่อขัดแต่งเสร็จแล้วจึงนำมาพอกทับด้วยเฟลสปาร์ติกพอร์ซเลนต่อไป ตัวอย่างของระบบนี้คือ อินซีแรม (In-Ceram, Vident) (Rosenblum and Schulman, 1997) เซรามิกอินซีแรมมี 3 ประเภทขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแกนที่แตกต่างกัน คือ

1. อินซีแรมอลูมินา (In-ceram Alumina) สลิปที่ใช้มีอลูมินาอยู่มากกว่าร้อยละ 90 (Powers and Sakaguchi, 2006: 454) ดังนั้นส่วนแกนจะเป็นอลูมินา (Al_2O_3) ทำให้มีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงขึ้นอยู่กับประมาณ 430 เมกะปาสคาล ทำให้มีความแข็งแรงแต่มีข้อเสียคือสีจะ

ขาวขุ่น (opaque) สามารถใช้กับครอบฟันหน้าและหลังและสะพานฟันหน้า 3 ยูนิต (unit) (Mclaren, 1998)

2. อินซีแรมสปิเนล (In-ceram Spinell) ตัวแกนจะมีผลึกที่ประกอบด้วยส่วนผสมระหว่างอลูมินาและแมกนีเซียม จึงทำให้มีความโปร่งแสงมากกว่าอินซีแรมอลูมินา แต่มีค่าความแข็งแรงดัดขวางต่ำที่สุดดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ในงานอุดฟัน อุดครอบ เคลือบฟันเทียม และ ครอบฟันหน้า (anterior crown) ได้เท่านั้น (Anusavice, 2003: 686; Mclaren, 1998)

3. อินซีแรมเซอร์โคเนีย (In-ceram Zirconia) ส่วนแกนจะเป็นอลูมินา (Al_2O_3) ผสมกับเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมาก มีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงถึง 600 เมกะปาสคาล วัสดุชนิดนี้มีความขาวขุ่นและทึบแสงมากที่สุดแต่มีความแข็งแรงสูง จึงนิยมใช้ทำครอบฟันหลังและสะพานฟันในฟันหลัง 3 ยูนิตได้ (Anusavice, 2003: 691-692; Mclaren, 1998)

ปัญหาของอินซีแรม คือ ความโปร่งแสงน้อย (Mclaren, 1998) ต่อมาจึงมีการพัฒนานำอลูมินาบริสุทธิ์ (pure alumina) มาใช้ทำเป็นแกนคือ โพรเซราอลซีแรม (Procera AllCeram, Nobel BioCare AB, Gotinburg, Sweden) ซึ่งมีความแข็งแรงและความโปร่งแสงมากกว่าเซรามิคชนิดแทรกกระจาย (van Noort, 2002: 240)

เซรามิคชนิดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องควบคุม (machinable ceramics) จะมีการใช้แท่งเซรามิคกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (computer-aided-design-computer-aided-manufacturing, CAD-CAM) ในการผลิตเช่น ซีเรค (Cerec CAD-CAM unit, Siemens Aktiengesellschaft, Bensheim, Germany) (Anusavice, 2003: 692-693) นอกจากนี้ยังมีระบบอื่นที่ใช้เครื่องกลึงแบบลอกเลียนแบบชิ้นงาน (copy milling) ในการสร้างชิ้นงานอุดฟัน อุดครอบ และเคลือบฟันเทียมจากก้อนเซรามิค (ceramic block) เช่น ซีเรย์ (Celay, Mikrona Technologies, Spreitenbach, Switzerland) (Anusavice, 2003: 606-607) ตัวอย่างของเซรามิคที่ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมนี้คือ โพรเซราอลซีแรม ซึ่งใช้ก้อนเซรามิคที่ประกอบด้วยอลูมินัมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (มีอลูมินาร้อยละ 99.9) ที่ผ่านการเผาให้อัดตัวมีความหนาแน่นสูง (densely sintered, high-purity aluminum oxide ceramic) นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานอุดฟัน อุดครอบ เคลือบฟันเทียม และแกนของครอบฟันและสะพานฟันชนิดติดแน่นทำให้ได้แกนที่มีความแข็งแรงสูงและมีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงถึง 600 เมกะปาสคาล (Giodano, 1996) และระบบเซอร์คอนเซอร์โคเนีย (Cercon Zirconia, Dentsply Ceramco, Burlington, NJ) (Anusavice, 2003: 693) ซึ่งใช้เซรามิคที่มีเซอร์โคเนียเป็นสารหลัก (zirconia-based machinable ceramic) ซึ่งประกอบด้วยผลึกของเซอร์โคเนียที่มีมุม 4 มุม และถูกทำให้มีความเสถียรภาพโดยยิเทียม

(yttrium) ที่มีอยู่ร้อยละ 3 โมล (tetragonal zirconia polycrystals stabilized by 3 mole percent yttrium, 3Y-TZP) แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องแคด-แคม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงที่สุดคือ 900 เมกะปาสคาล และค่าการดูดซับพลังงานก่อนแตกหักสูงที่สุดคือมากกว่า 5 เมกะปาสคาลต่อตารางเมตร (Powers and Sakaguchi, 2006: 455) ข้อดีของเซรามิกที่ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์นี้คือ ลดขั้นตอนการพิมพ์ปาก สามารถทำการบูรณะให้ผู้ป่วยได้เสร็จภายในครั้งเดียว (single patient appointment) แกนชิ้นงานที่ได้ไม่มีรูพรุนจึงมีความแข็งแรงสูงแต่เซรามิกชนิดนี้จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีราคาสูง และใช้เทคนิคพิเศษที่มีความไว (sensitive) มากขึ้น (Anusavice, 2003: 693)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเซรามิกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ได้รับการพัฒนาในเรื่องของความแข็งแรงและความต้านทานการแตกหักให้ดีขึ้นแล้ว แต่ปัญหาที่สำคัญที่พบได้บ่อยจากการใช้วัสดุเซรามิกในการบูรณะทางทันตกรรมคือ การทำให้เกิดการสึกของเคลือบฟันในฟันคู่สบ เนื่องจากเมื่อเซรามิกผ่านการใช้งานไปแล้วจะเกิดรอยแตกขนาดเล็กในระดับจุลภาค (microfracture) ทำให้พื้นผิวของเซรามิกแตกออกไปบางส่วนทำให้เกิดความหยาบของพื้นผิวและมีส่วนยื่นแหลมคล้ายสิ่วไปทำให้เกิดความเครียดจากการสัมผัส (contact stress) บนพื้นผิวของเคลือบฟันทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กในระดับจุลภาคในเคลือบฟัน ทำให้พื้นผิวของเคลือบฟันแตกและสึกออกไป นอกจากนี้การที่มีความแตกต่างกันมากของความแข็งผิวของเซรามิกกับเคลือบฟันทำให้เซรามิกเกิดลักษณะของสิ่วที่ไปกระทบบนเคลือบฟันทำให้เคลือบฟันสึกออกไปด้วย เช่นครอบฟันที่ทำจากเซรามิกชนิดที่มีแกนทำจากอลูมินาและทำครอบฟันด้วยเทคนิคอินซีแรม (Vita In-Ceram[®] alumina core) มีความแข็งผิวแบบคนูปลูกสูงที่สุดคือ 10.79 จิกะปาสคาล (Gpa) มากกว่าครอบฟันที่ทำจากพอร์ซเลนชนิดที่มีอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก (Hi-Ceram[®] core) ครอบฟันที่มีแกนที่ทำจากพอร์ซเลนชนิดที่มีอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก (Vitadur[®] core) ครอบฟันที่ทำจากแก้วเซรามิกที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคอินซีแรม (Vita In-Ceram[®] Matrix Glass) ครอบฟันที่ทำจากแก้วเซรามิกชนิดเหวียง (Dicor[®] castable mica glass-ceramic crown) ครอบฟันที่มีแกนเป็นเซรามิกที่ใช้เป็นชั้นเนื้อฟัน (Vitadur N[®] dentin) ครอบฟันที่มีแกนเป็นเซรามิกที่ใช้เป็นชั้นเคลือบฟัน (Vitadur N[®] enamel) และครอบฟันที่ขึ้นรูปจากการกลึงแก้วเซรามิก (Dicor[®] machinable glass ceramic crown) ตามลำดับ โดยโคคอร์ครอบฟันที่ขึ้นรูปจากการกลึงแก้วเซรามิกนี้มีความแข็งผิวแบบคนูปลูกต่ำสุดคือ 3.38 จิกะปาสคาล (Rizkalla and Jones, 2003)

การศึกษาของ Sakar-Deliormanli และ Guden (2005) พบว่าค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ของเซรามิกชนิดที่มีอลูมินา (alumina ceramic) ที่เผามาจากส่วนผสมของผงอลูมินา

ชนิดอัลฟาบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และมีธาตุโลหะอื่นที่จำเป็น (trace elements) ผสมอยู่ด้วยเล็กน้อย โดยใช้แรงกดที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้แรงกดลดลง ค่าความแข็งผิววิคเคอร์ที่ได้ก็จะลดลงคือ เมื่อใช้แรงกด 9.8 นิวตันนาน 15 วินาที ได้ค่าความแข็งผิววิคเคอร์ 14.92 จิกะปาสคาลและเมื่อใช้แรงกด 0.98 นิวตัน กदनาน 15 วินาที ได้ค่าความแข็งผิววิคเคอร์ 10.26 จิกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งผิววิคเคอร์ที่ได้จากการศึกษานี้้น้อยกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาอื่นๆ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนาแน่นต่ำ แต่ก็ยังมีค่าความแข็งผิวแบบวิคเคอร์สูงกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาของ Denry และ Holloway (2003) ที่พบว่าค่าความแข็งผิวแบบวิคเคอร์ของเซรามิกชนิดที่มีแก้วเป็นสารพื้นและมีผลึกของลิเทียมไดซิลิเกตเป็นส่วนประกอบ (lithium disilicate glass ceramic) ที่ทดสอบโดยใช้แรงกด 0.98 นิวตันมีค่า 5.77 จิกะปาสคาล เมื่อใช้เซรามิกชนิดที่มีผลึกที่มีความหยาบเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก เช่น อลูมินา และ เซอร์โคเนียที่ทำให้มีเสถียรภาพโดยใช้แมกนีเซียม (magnesium-stabilized zirconia) และเซอร์โคเนียที่ทำให้มีเสถียรภาพโดยใช้ยทรีียม (yttrium-stabilized zirconia) จะทำให้เซรามิกมีค่าการดูดซับพลังงานก่อนแตกหักได้สูงแต่ก็ทำให้เคลือบฟันในฟันคู่สบสึกได้มากเช่นกัน การลดการสึกของเคลือบฟันทำได้โดยใช้เซรามิกที่มีลักษณะรูปแบบการแตกของพื้นผิวเป็นแบบที่มีรูปแบบเดียวกัน (uniform) เช่น เซรามิกเอ็มเพรสทู จะทำให้เคลือบฟันในฟันคู่สบสึกได้น้อยกว่าเซรามิกเอ็มเพรสทูรุ่นแรก เนื่องจากเซรามิกเอ็มเพรสทูมีผลึกเป็นลิเทียมไดซิลิเกตขนาดเล็กที่มีการกระจายอยู่ในแก้วเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ (Anusavice, 2003: 704-709)

โลหะผสม (metal alloys)

การนำโลหะผสมมาใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1905 โดยนำโลหะผสมที่มีทองเป็นส่วนประกอบหลักมาใช้ทำเป็นชิ้นงานอุดฟัน ต่อมาในปี ค.ศ. 1933 เริ่มมีการใช้โลหะผสมชนิดพื้นฐานเข้ามาทดแทนโลหะผสมชนิดที่มีทองเป็นส่วนประกอบ โดยเริ่มใช้โลหะผสม โคบอลต์และโครเมียม (cobalt-chromium alloys) ก่อน ต่อมาจึงได้นำโลหะผสมที่มีนิกเกิล (nickel) เข้ามาช่วยในการนำมาทำเป็นโครงโลหะในงานฟันปลอมบางส่วนชนิดถอดได้ (removable partial denture frameworks) (Anusavice, 2003: 566) และในปี ค.ศ. 1959 ได้มีการนำโลหะผสมชนิดพื้นฐานมาใช้ในงานฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่น ทั้งในกรณีที่เป็นโลหะล้วน (all-metal restoration) และกรณีพอร์ซเลนร่วมกับโลหะ (porcelain-veneered fixed restoration) เนื่องจากโลหะผสมชนิดพื้นฐานมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าโลหะผสมที่มีทองเป็นส่วนประกอบหลักคือมีน้ำหนัก

เบา มีความแข็งตึงสูง (stiffness) และราคาถูก (Anusavice, 2003: 596) โลหะผสมชนิดพื้นฐานที่ใช้ในทางทันตกรรมแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม (nickel-chromium alloys) ประกอบด้วยนิกเกิลร้อยละ 62 ถึง 82 โครเมียมร้อยละ 11 ถึง 22 เบริลเลียม (beryllium) ร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยน้ำหนัก และยังมีธาตุอื่นๆ อีกเช่น โมลิบดีนัม (molybdenum) อลูมิเนียม (aluminum) แมงกานีส (manganese) ซิลิกอน (silicon) โคบอลต์ (cobalt) แกลเลียม (gallium) เหล็ก (iron) ไนโอเบียม (niobium) ไททาเนียม (titanium) และเซอร์โคเนียม (zirconium) โลหะผสมชนิดนี้สามารถทำการกัดพื้นผิวด้วยสารเคมีและกระแสไฟฟ้าได้ (electrochemical etching) ดังนั้นจึงนิยมนำโลหะชนิดนี้ใช้กับสะพานฟันชนิดที่ยึดอยู่ด้วยเรซินแบบแมรี่แลนด์ (Maryland bridges) นอกจากนี้โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมยังมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง (corrosion resistance) (O'Brien, 2003: 228) มีความแข็งผิวสูงกว่าโลหะผสมชนิดที่มีทองเป็นส่วนประกอบหลักคือ มีค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ 200-395 ราคาต่ำและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีอีกด้วย (Anusavice, 2003: 362)

2. โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (cobalt-chromium alloys) ประกอบด้วยโคบอลต์ร้อยละ 53 ถึง 65 โครเมียมร้อยละ 27 ถึง 32 และโมลิบดีนัม ร้อยละ 2 ถึง 6 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีทังสเตน (tungsten) เหล็ก ทองแดง (copper) ซิลิกอน ดีบุก (tin) แมงกานีส (manganese) และแพลทินัม (platinum)

อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมและโคบอลต์-โครเมียมคือ 1,232 ถึง 1,454 องศาเซลเซียส เมื่อทำการขัดพื้นผิวจะได้พื้นผิวสีเงินที่เป็นมันเงา โลหะผสมที่มีโครเมียมนี้มีความแข็งแรงและความแข็งผิวที่สูงกว่าโลหะชนิดมีตระกูล โดยมีค่าความแข็งผิวร็อคเวล (Rockwell hardness) 50 และค่าความแข็งผิววิกเคอร์ (Vickers hardness) 200 ถึง 300 มีค่าความแข็งแรงตึงสูงสุดก่อนแตกหัก (ultimate tensile strength) 80,000 ถึง 150,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (pounds per square inch, psi) มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ประมาณ 207 จิกะปาสคาล และมีความแข็งตึงสูง ดังนั้นจึงนำโลหะผสมที่มีโครเมียมนี้มาใช้ในกรณีสะพานฟันที่ฟันหายไปหลายซี่ได้ (long span fixed prostheses) และสะพานฟันชนิดติดแน่นที่ยึดอยู่ได้โดยเรซินที่ใช้โลหะบางๆได้ แต่การที่โลหะผสมชนิดพื้นฐานมีความแข็งผิวและความแข็งแรงสูง ก็ทำให้การปรับแต่งและขัดแต่งชิ้นงานทำได้ยาก ใช้เวลานาน และต้องมีเครื่องมือพิเศษเฉพาะสำหรับโลหะชนิดนี้ (O'Brien, 2003: 228-230) การที่ความแข็งผิวของโลหะผสมชนิดพื้นฐานกับเคลือบฟันมีความแตกต่างกันมากทำให้เกิดการสึกของเคลือบฟันของฟันคู่สบได้ (Anusavice, 2003: 704) ข้อเสียอีกประการของโลหะผสมชนิดพื้นฐานคือ การซ่อมแซมครอบ

พื้นหรือสะพานพื้นทีพอร์ซเลนแตกออกจากโครงโลหะ (metal substrate) ที่ใช้โลหะผสมชนิดพื้นฐานจะทำได้ยากกว่าการซ่อมแซมบนโลหะที่เป็นโลหะผสมชนิดโลหะมีตระกูล (Anusavice, 2003: 602)

การยึดติดของโลหะผสมชนิดพื้นฐานที่ไปใช้ร่วมกับพอร์ซเลนนั้นควรใช้โลหะผสมชนิดที่มีเบริลเลียมจึงจะมีการยึดติดกันที่ดี เนื่องจากการที่ไม่มีเบริลเลียมจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ (oxide) หนา ชัดขวางการยึดติดกันได้ นอกจากนี้การเหวี่ยงเป็นโลหะ (castability) ของโลหะผสมชนิดที่มีเบริลเลียม ยังสามารถทำให้ได้ดีกว่าการไม่มีเบริลเลียมอีกด้วย (O'Brien, 2003: 228-230) ในหลายๆการศึกษา เช่นการศึกษาของ Creugers(1986) พบว่าสะพานพื้นชนิดติดแน่นที่ยึดอยู่ได้ โดยเรซินที่ใช้โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม สามารถเกิดการยึดติดได้ดีกว่าการใช้โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม การศึกษาของ Zidan (1985) และการศึกษาของ Ferrari (1989) รายงานว่าลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม ภายหลังจากการปรับเปลี่ยนพื้นผิวโดยการกัดด้วยกรดนั้น มีรูปแบบความขรุขระในระดับจุลภาคที่ก่อให้เกิดการยึดติดที่ดีกว่าโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม

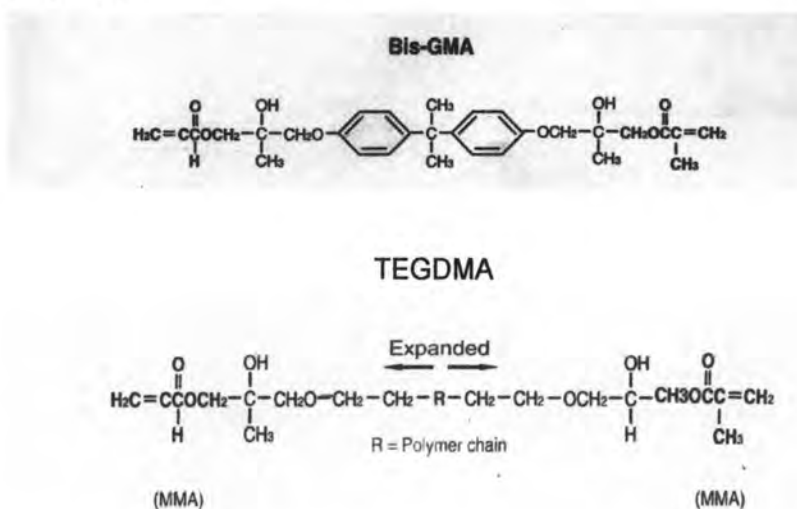
เรซินคอมโพสิต (resin composites)

เรซินคอมโพสิต เป็นวัสดุบูรณะสีเหมือนฟันอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกเริ่มนำมาใช้บูรณะฟันในปี 1960 โดยแรกเริ่มนิยมใช้บูรณะฟันหน้าที่เป็นการบูรณะประเภท 3, 4 และ 5 (Class III, IV และ V) ซึ่งเป็นการบูรณะที่ต้องการความสวยงามเป็นอย่างมาก ต่อมามีการพัฒนาเรซินคอมโพสิตเพื่อนำมาใช้บูรณะในฟันหลังด้วย โดยมีการพัฒนาให้มีการต้านการสึกที่ดีขึ้น, การยึดติดที่ดีกับเนื้อฟัน และการลดการเกิดการหดตัวของวัสดุอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ (polymerization shrinkage) (O'Brien, 2003: 113)

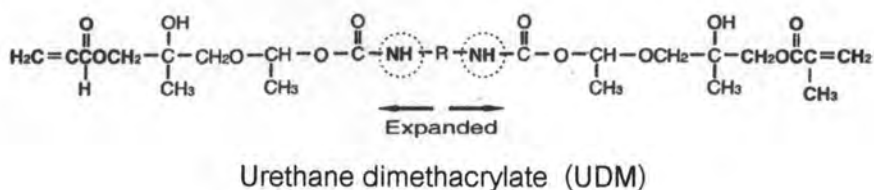
เรซินคอมโพสิตคือ วัสดุที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่แตกต่างกันคือ โพลิเมอร์ (polymer) และอนุภาคเติมเต็มที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic fillers) มารวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเรซินคอมโพสิตประกอบด้วยวัฏภาคใหญ่ๆ 2 ส่วนคือ วัฏภาคที่กระจายตัว (dispersed phase) ของอนุภาคเติมเต็มอยู่ในวัฏภาคที่มีความต่อเนื่อง (continuous phase) ของเมทริกซ์ (Roberson, Heymann, and Swift, 2002: 190)

1. เรซินเมทริกซ์ (resin matrix) ซึ่งเป็นโคโพลิเมอร์ชนิดไดเมทาอะคริเลตสายยาวที่ไม่ชอบน้ำ (long hydrophobic dimethacrylate copolymers) มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี มีความเสถียรภาพของสี การหดตัวจากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์น้อยเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์นั้นเกิดแบบเชื่อมขวาง (crosslink) สารที่นิยมใช้คือ 2, 2 - bis [4-(2-hydroxy-3-methacryloxy-

propoxy)-phenyl]-prepane ที่เรียกว่า บิสจีเอ็มเอ เนื่องจากบิสจีเอ็มเอนี้มีความหนืดมาก ดังนั้นเรซินคอมโพสิตบางบริษัทจึงมีการผสมเรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า เพื่อช่วยลดความหนืดและให้สามารถผสมอนุภาคเติมเต็มได้มากขึ้น เช่น ไตรเอทิลีนไกลคอล ไดเมทาอะคริเลต (triethylene glycol dimethacrylate, TEGDMA) โดยเรซินคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของบิสจีเอ็มเอและทีอีจีดีเอ็มเอ (TEGDMA) นี้จะมีการหดตัวจากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ร้อยละ 3 ถึง 5 (Albers, 2002: 81-82)



ในปีค.ศ. 1974 Foster และ Walker ได้เสนอการใช้โพลิเมอร์อื่นแทนบิสจีเอ็มเอ คือ ยูรีเทน ไดเมทาอะคริเลต (urethane dimethacrylate, UDM) เนื่องจากมีความหนืดน้อยกว่า แต่พบว่าเรซินชนิดนี้มีความเปราะ และมีการหดตัวจากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์มากกว่าคือ เกิดการหดตัวร้อยละ 5 ถึง 9 บริษัท ESPE ได้จัดสิทธิบัตรการใช้ไตรไซโคลไดเมทาอะคริเลตเรซิน (tricyclodimethacrylate resin) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group; -OH) น้อยลง เพื่อให้เรซินนี้ดูดซึมน้ำได้น้อยลง โดยเรซินชนิดนี้มีการหดตัวจากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ประมาณร้อยละ 7 แต่บริษัทส่วนใหญ่ก็ชอบบิสจีเอ็มเอมากกว่าเนื่องจากมันมีโครงสร้างเป็นวง (aromatic structure) ทำให้เรซินคอมโพสิตดูดซึมน้ำได้น้อย มีความแข็งตึง และความแข็งแรงด้านแรงกด (compressive strength) มาก (Albers, 2002: 82-83)



นอกจากนี้ในเรซินเมทริกซ์ยังประกอบด้วย

1) สารตั้งต้นปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ของวัสดุ (polymerization initiators) เพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ไปทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ต่อไป เช่น อนุพันธ์ลำดับที่3ของเอมีน (tertiary amine) ร่วมกับเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) ในเรซินคอมโพสิตชนิดที่แข็งตัวโดยอาศัยการกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมี (chemically activated system) และ แคมโฟโรควิโนน (camphoroquinone) ที่มีปริมาณร้อยละ 0.03 ถึง 0.09 ร่วมกับอนุพันธ์ลำดับที่3ของเอมีนชนิดที่เป็นสายยาว (aliphatic tertiary amine) ในเรซินชนิดที่เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์โดยใช้แสงกระตุ้น (light-cured system) ซึ่งต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 468 นาโนเมตรในการกระตุ้น แคมโฟโรควิโนน (Albers, 2002: 87)

2) สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ (polymerization inhibitors) เช่น โฟร์เมท็อกซีฟีนอล (4-methoxyphenol, MEHQ) หรือ บิลธิลเลท ไฮดรอกซีโทลูอิน (butylated hydroxytoluene, BHT) เพื่อช่วยยืดอายุวัสดุให้เก็บได้นานขึ้น และทำให้มีเวลาทำงาน (working time) ที่เพียงพอ (Anusavice, 2003: 408)

3) สารปรับแต่งสารสีต่าง ๆ (optical modifiers) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) หรือ อลูมินัมออกไซด์ (aluminum oxide) ร้อยละ0.001ถึง0.007 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความทึบแสงของเรซินคอมโพสิต (Anusavice, 2003: 409; Albers, 2002: 84)

2. อนุภาคเติมเต็ม (filler particles) เป็นส่วนที่ให้ความเสถียรภาพ (dimensional stability) แก่เรซินเมทริกซ์ อนุภาคจะมีขนาดตั้งแต่น้อยกว่า 0.04 ไมโครเมตรจนถึง 100 ไมโครเมตร

วัสดุทั้ง 2 วัสดุนี้ไม่ยึดเกาะกัน ดังนั้นจึงมีการปรับสภาพอนุภาคเติมเต็มก่อนโดยใช้สารคู่ควบ (coupling agent) ประเภทอีพอกซี (epoxy) ไวนิล (vinyl) และเมทิลซิลเลน (methyl silanes) ซึ่งตัวที่นิยมใช้ในเรซินคอมโพสิตมากที่สุดคือ 3-(methacryloyloxypropyl) trimethoxysilane โดยสารดังกล่าวนี้ปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างจะเป็นซิลอกเซน (siloxane) ซึ่งจะยึดกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคเติมเต็ม ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์กับโมโนเมอร์ในส่วนเรซินเมทริกซ์ ในเรซินคอมโพสิตจะมีสารคู่ควบอยู่ปริมาณร้อยละ 1 ถึง 6 โดยน้ำหนักของอนุภาคเติมเต็ม (Albers, 2002: 85-86; Anusavice, 2003: 406)

อนุภาคเติมเต็มที่ใช้คือ ควอทซ์ที่เป็นผลึก (crystalline quartz) ไพโรไลติกซิลิกา (pyrolytic silica) และแก้ว (glasses) เช่น ลิเทียมอลูมิเนียมซิลิเกต (lithium aluminum silicate) แบริยมอลูมิเนียมซิลิเกต (barium aluminum silicate) และ สตรอนเทียมอลูมิเนียมซิลิเกต (strontium

aluminum silicate) โดยอนุภาคเติมเต็มนี้ทำให้เรซินคอมโพสิตมีคุณสมบัติดีขึ้น แข็งแรงมากขึ้น เพิ่มความแข็งแรง ลดการสึก ช่วยลดการเกิดการหดตัวของเรซิน ลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน ลดการดูดซึมน้ำ และเป็นส่วนที่ทึบต่อแสงรังสีทำให้เมื่อมองจากภาพถ่ายรังสี (radiopaque) จะเห็นเรซินคอมโพสิตมีความทึบแตกต่างจากเนื้อฟันและ เคลือบฟัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอนุภาคเติมเต็มนี้เป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของเรซินคอมโพสิต โดยปัจจัยที่มีผลสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของเรซินคอมโพสิตคือ ปริมาณโดยปริมาตร (filler volume level) ขนาด การกระจายของขนาด (distribution of size) ดัชนีหักเหแสง (index of refraction) ความทึบแสงรังสี (radiopacity) และความแข็งของอนุภาคเติมเต็ม ถ้ายิ่งใส่อนุภาคเติมเต็ม (filler loading) ได้มากก็จะยิ่งทำให้เรซินคอมโพสิตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แต่การใส่อนุภาคเติมเต็มได้มากหรือน้อยนั้นมีข้อจำกัดโดยขึ้นกับพื้นที่ผิวโดยรวมของอนุภาคเติมเต็มและการกระจายของขนาดของอนุภาคเติมเต็มที่ใช้ ถ้าขนาดของอนุภาคเติมเต็มที่ใช้มีการกระจายอย่างต่อเนื่องจะทำให้สามารถใส่อนุภาคเติมเต็มได้ในปริมาณมาก แต่พื้นที่ผิวโดยรวมของอนุภาคเติมเต็มก็มากตามด้วย ทำให้เมื่อใส่ในเรซินเมทริกซ์แล้วทำให้มีความหนืด (viscosity) มาก จึงใส่อนุภาคเติมเต็มได้น้อยลง ดังนั้นจึงมีการพัฒนากรรมวิธีการผลิตอนุภาคเติมเต็มและวิธีต่างๆ ในการใส่อนุภาคเติมเต็มเข้าไปในส่วนของเรซินเมทริกซ์ เพื่อให้สามารถใส่อนุภาคเติมเต็มได้ในปริมาณมาก ในปัจจุบันจึงมีเรซินคอมโพสิตออกมาให้เลือกใช้หลายๆ ประเภท (Anusavice, 2003: 403-406) ซึ่งประเภทของเรซินคอมโพสิตนั้นสามารถแบ่งได้ตามขนาดและการกระจายของขนาดของอนุภาคเติมเต็ม โดย Bayne (1994) และ Sturdevant (1995) แบ่งเรซินคอมโพสิตเป็น 5 ประเภทคือ

1. เรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ (macrofillers) ขนาด 10-100 ไมครอน โดยส่วนมากนิยมใช้อนุภาคเติมเต็มชนิดที่เป็นควอทซ์ สตรอนเทียม และแก้วของโลหะหนักที่มีแบเรียม (barium) ซึ่งถ้าเป็นควอทซ์ และ เซอร์โคเนียมจะทำให้เรซินคอมโพสิตนั้นมีความแข็งแรงสูงและทำให้ผิวเคลือบฟันสึกไปมากกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคขนาดไมโครฟิลเลอร์ (microfillers) หรือ ชนิดที่มีอนุภาคเติมเต็มเป็นแก้วแบเรียม (Albers, 2002: 112)
2. เรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคขนาดมิดิฟิลเลอร์ (midfillers) ขนาด 1-10 ไมครอน
3. เรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคขนาดมินิฟิลเลอร์ (minifillers) ขนาด 0.1-1 ไมครอน
4. เรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคขนาดไมโครฟิลเลอร์ (microfillers) ขนาด 0.01-0.1 ไมครอน

5. เรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคขนาดนาโนฟิลเลอร์ (nanofillers) ขนาด 0.005-0.01 ไมครอน

เรซินคอมโพสิตที่มีอนุภาคเติมเต็มที่มีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับเรซินคอมโพสิตที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดใหญ่ พบว่าสามารถขัดแต่งให้เรียบได้ง่ายกว่าและให้ความสวยงามมากกว่า เนื่องจากอนุภาคเติมเต็มขนาดใหญ่จะสะท้อนและดูดกลืนแสงที่มาตกกระทบไม่ดีทำให้อนุภาคขนาดเล็กๆ ทำให้ดูทึบแสงไม่สวยงาม แต่เรซินคอมโพสิตที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็กมีความแข็งแรงและความต้านทานการสึกน้อยกว่า เนื่องจากไม่สามารถใส่อนุภาคเติมเต็มลงไปได้มาก เพราะเมื่อมีอนุภาคเติมเต็มมาก เรซินคอมโพสิตก็ยิ่งเหนียวขึ้นไปด้วย (Albers, 2002: 112) ดังนั้นเมื่อใส่อนุภาคเติมเต็มได้น้อย ทำให้ความแข็งแรงและการต้านทานการแตกหักของเรซินคอมโพสิตชนิดนี้ก็น้อยกว่าเรซินคอมโพสิตที่ใส่อนุภาคเติมเต็มได้มากกว่าด้วย (Anusavice, 2003: 403) ต่อมาจึงมีการพัฒนาเพื่อให้ได้เรซินคอมโพสิตที่มีทั้งความแข็งแรงและให้ความสวยงามได้ด้วยสามารถให้บูรณะได้ทั้งพื้นหน้าและพื้นหลัง คือ เรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริด (hybrid) โดยมีการปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตอนุภาคเติมเต็มให้มีขนาดเล็กลงเป็นขนาดมิติฟิลเลอร์และผสมซิลิกาแบบแขวนลอย (colloidal silica) ที่มีขนาด 0.04 ไมครอนเมตรเข้าไปด้วย เพื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของอนุภาคเติมเต็มโดยปริมาตร ดังนั้น Anusavice (2003) ได้แบ่งประเภทของเรซินคอมโพสิต ตามขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาคเติมเต็มดังนี้

1. เรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิม (traditional composites, conventional composites หรือ macrofilled composite) เป็นเรซินคอมโพสิตที่มีอนุภาคเติมเต็มชนิดซิลิกาและควอทซ์ขนาดใหญ่ คือ 1-50 ไมครอนเมตร ซึ่งมีการกระจายของขนาดอนุภาคเติมเต็มอย่างกว้าง แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเติมเต็มโดยเฉลี่ยคือ 8-12 ไมครอนเมตรในปริมาณร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนัก หรือ ร้อยละ 60-70 โดยปริมาตร การที่มีอนุภาคเติมเต็มในเรซินเมทริกซ์ทำให้เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่าอะคริลิก (acrylic material) ที่ไม่มีอนุภาคเติมเต็ม และมีความแข็งผิวแบบคูนูป (Knoop hardness number [KHN]) 55 ในขณะที่อะคริลิกมีความแข็งผิวแบบคูนูปเพียง 15 เท่านั้น เนื่องจากเรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีอนุภาคเติมเต็มเสริมความแข็งแรงและมีโครงสร้างของเรซินเป็นแบบเชื่อมขวางแต่เรซินคอมโพสิตชนิดนี้เมื่อมีการสึกของเรซินเมทริกซ์จะทำให้มีพื้นผิวขรุขระ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ง่ายและเมื่อใช้อุดฟันแบบประเภทที่ 2 (Class II) ยังพบมีปัญหาในเรื่องการสีกร่อน (Anusavice, 2003; 418-420)

2. เรซินคอมโพสิตชนิดที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็ก (small-particle-filled composites) เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีอนุภาคเติมเต็มเป็นสารอนินทรีย์ขนาด 0.5-3 ไมครอนเมตร ซึ่งมีการกระจายของ

ขนาดอนุภาคเติมเต็มค่อนข้างกว้าง ดังนั้นจึงสามารถใส่อนุภาคเติมเต็มได้ในปริมาณมากคิดเป็นร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก หรือ 65-77 โดยปริมาตร ทำให้เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิม และ เรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์ โดยมีความสามารถต้านทานการสึกกร่อนที่ดีและมีการหดตัวของกาเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์น้อยลง และยังมีพื้นผิวที่เรียกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิมด้วย ดังนั้นเรซินคอมโพสิตชนิดนี้สามารถใช้บูรณะในบริเวณที่มีความเครียด (stress) สูงได้ เช่น การอุดฟันแบบประเภทที่ 4 (Class IV) และสามารถบูรณะบริเวณฟันหลังได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถขัดพื้นผิวให้เรียบได้เท่ากับเรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์ อนุภาคเติมเต็มในเรซินคอมโพสิตชนิดนี้เป็นซิลิการ่วมกับแก้วของโลหะหนัก ทำให้เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีความทึบต่อรังสีเอ็กซ์ (radiopaque) แต่อนุภาคเติมเต็มที่เป็นแก้วโลหะหนักนี้มีความอ่อนนุ่มกว่าซิลิกาและควอทซ์ ทำให้สามารถถูกสลายด้วยน้ำ (hydrolyze) ง่ายกว่า ดังนั้นความคงทนในระยะยาวของเรซินคอมโพสิตชนิดนี้น้อยลง (Anusavice, 2003: 420-423)

3. เรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์ (microfilled composites) มีอนุภาคเติมเต็มเป็นซิลิกาแบบแขวนลอยขนาด 0.04 ไมโครเมตร ดังนั้นเรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีพื้นผิวที่เรียบ และมีความโปร่งแสงมากกว่า แต่มีความแข็งแรงที่น้อยกว่าและอัตราการสึกมากกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิม และชนิดที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็ก เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และชนิดที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ซึ่งในการผลิตเรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์แบบที่เป็นเนื้อเดียวกันนี้ ซิลิกาแขวนลอย ขนาด 0.04 ไมครอน จะถูกนำมาผสมกับส่วนเมทริกซ์โดยตรง แต่เนื่องจากขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กมากทำให้ไม่สามารถใส่ในปริมาณมากได้ เพราะซิลิกาแขวนลอยจะจับกันเป็นก้อนๆ เมทริกซ์ไม่สามารถครอบคลุมอนุภาคเติมเต็มทั้งหมดได้ ทำให้เรซินมีความหนืดสูง ดังนั้นเรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์จึงมีค่าสัดส่วนอนุภาคเติมเต็มต่อเมทริกซ์อยู่ในอัตราต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเรซินคอมโพสิตชนิดอื่นๆ ในเวลาต่อมาจึงมีวิธีการจัดการกับอนุภาคเติมเต็มก่อนนำมาใส่ในเมทริกซ์ เพื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยปริมาตรของอนุภาคเติมเต็มในเรซินคอมโพสิต วิธีการที่นำมาใช้เตรียมอนุภาคเติมเต็มให้มีร้อยละโดยปริมาตรสูงขึ้นทำได้โดยการเตรียมอนุภาคเติมเต็มให้เป็นอนุภาคเติมเต็มคอมโพสิต (composite particles) (Anusavice, 2003: 423-425) หรือ พรีโพลีเมอร์ไรซ์เรซิน (prepolymerized resin fillers) (Albers, 2002: 114) โดยการเตรียมอนุภาคเติมเต็มชนิดซิลิกาให้เป็นกลุ่มก้อนแข็งโดยขบวนการเผา (sintering) การอัดแน่น (condensation) หรือ การทำไซเลน (silanization) (Albers, 2002: 114) แล้วจึงนำมาผสมในเรซิน ก่อนนำไปบ่มให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ด้วยความร้อน แล้ว

ทำให้แข็งด้วยความเย็น (frozen) ก่อนทำการบดให้ละเอียดเป็นขนาดอนุภาค 5-50 ไมโครเมตร โดยมีปริมาณของอนุภาคเติมเต็มแบบสารอนินทรีย์ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (แต่ถ้าถือว่าอนุภาคคอมโพสิตเป็นอนุภาคเติมเต็มจะคิดว่ามีปริมาณอนุภาคเติมเต็มร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก หรือร้อยละ 60 โดยปริมาตร) ซึ่งทำให้เรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์มีอนุภาคเติมเต็มที่สูงขึ้น แต่ก็ยังน้อยกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิม และ ชนิดที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็ก แต่เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีการหดตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์น้อยกว่าเรซินคอมโพสิตทั้งสองชนิดนี้ เนื่องจากอนุภาคเติมเต็มในเรซินคอมโพสิตชนิดนี้เป็นอนุภาคคอมโพสิตที่มีเรซินที่แข็งตัวแล้วร่วมกับอนุภาคสารอนินทรีย์ ซึ่งทำให้เรซินคอมโพสิตชนิดนี้โดยรวมมีปริมาณเรซินอยู่ร้อยละ 40-80 โดยปริมาตรทำให้มีการดูดซึมน้ำได้มาก มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนสูงและมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่ำ (elastic modulus) แต่สามารถขัดแต่งให้มีพื้นผิวได้เรียบมากที่สุดให้ความสวยงามในการบูรณะในพื้นหน้าได้มาก (Anusavice, 2003: 424-425)

4. เรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริด (hybrid composites) มีอนุภาคเติมเต็มชนิดซิลิกาแขวนลอยร่วมกับอนุภาคของแก้วโลหะหนักโดยมีปริมาณร้อยละ 75-80 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคของแก้วโดยเฉลี่ยประมาณ 0.4-1 ไมโครเมตร ซึ่งจะมีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรอยู่ร้อยละ 75 และมีซิลิกาแขวนลอยอยู่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักของปริมาณอนุภาคเติมเต็มทั้งหมด ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของเรซินคอมโพสิตชนิดนี้อยู่ระหว่างเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิมและชนิดที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็ก แต่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์คือ มีพื้นผิวที่เรียบพอเหมาะในการบูรณะเพื่อความสวยงามได้ มีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อใช้บูรณะในพื้นหน้ารวมไปถึงการอุดฟันแบบประเภทที่ 4 ได้ และมีความแข็งแรงพอที่จะบูรณะในบริเวณที่รับแรงเครียดได้ (Anusavice, 2003: 426-427)

5. เรซินคอมโพสิตชนิดไหลได้ (flowable composites) เรซินคอมโพสิตชนิดนี้เป็นเรซินคอมโพสิตที่มีการเปลี่ยนแปลง (modification) ของเรซินคอมโพสิตชนิดดั้งเดิมและชนิดที่มีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็กโดยลดปริมาณของอนุภาคเติมเต็ม ทำให้เรซินคอมโพสิตไหลแผ่กระจายไปแนบชิดกับผนังของโพรงฟัน (cavity) ได้ดี จึงใช้เป็นสารรองพื้น (liner, base) ได้ดี (Anusavice, 2003: 428) แต่เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีความแข็งแรงต่ำและมีการสึกได้ง่ายจึงไม่ควรใช้ในบริเวณที่ต้องรับแรงมาก (Albers, 2002: 123)

6. เรซินคอมโพสิตชนิดอัดแน่นได้ (packable composites) เรซินคอมโพสิตชนิดนี้ใช้บูรณะพื้นหลังได้ เนื่องจากมีอนุภาคเติมเต็มแบบยาวและเป็นเส้นใย (elongated and fibrous filler particles) โดยมีความยาว 100 ไมโครเมตรอยู่ในลักษณะที่พันเกี่ยวกัน เพื่อต้านทานการไหล

(Anusavice, 2003: 429-430) และมีอนุภาคเติมเต็มในปริมาณสูงทำให้เรซินคอมโพสิตชนิดนี้มีความหนาแน่นมาก และต้านทานการแตกหักได้สูง (Albers, 2002: 123)

เนื่องจากเรซินคอมโพสิตมีความหลากหลาย ทั้งในเรื่ององค์ประกอบ ขนาดอนุภาคเติมเต็ม การกระจายของขนาดอนุภาคเติมเต็ม และปริมาณของอนุภาคเติมเต็มที่ใส่เข้าไป ดังนั้นค่าความแข็งผิวของเรซินคอมโพสิตจึงมีความหลากหลาย (Chung, 1990) โดย Leinfelder (1993) พบว่าถ้ามีอนุภาคเติมเต็มขนาดเล็กและมีปริมาณสูงจะทำให้เรซินคอมโพสิตมีค่าความแข็งผิวมากขึ้น การศึกษาของ Oberholzer และคณะ (2003) พบว่าการบ่มเรซินคอมโพสิตให้แข็งตัวด้วยการฉายแสงที่มีความเข้มแสง 400 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ฉายต่อเนื่องนาน 40 วินาที ไปบนชิ้นงานเรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริด (hybrid composite, Filtek Z250) และชนิดไหลได้ (flowable composite, Filtec-flow) ที่หนา 2 มิลลิเมตร เมื่อทำการวัดค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ โดยใช้แรงกด 5 กิโลกรัม กดนาน 20 วินาที พบว่าชิ้นงานไฮบริดคอมโพสิตมีความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ของพื้นผิวด้านบน 83.6 ซึ่งสูงกว่าค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ของเรซินคอมโพสิตชนิดไหลได้ซึ่งมีค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ 27.4 เนื่องจากมีอนุภาคเติมเต็มในปริมาณที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งผิวของพื้นผิวด้านบนมากกว่าพื้นผิวด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอีกด้วย เนื่องจากแสงด้านบนมีความเข้มแสงมากกว่าแสงที่ผ่านไปยังเรซินคอมโพสิตด้านล่าง

นอกจากนี้ค่าความแข็งผิวของเรซินคอมโพสิตยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆด้วย โดย Rueggeberg และคณะ (1994) พบว่าเมื่อใช้แสงที่มีความเข้มสูงจะทำให้เรซินคอมโพสิตมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีขึ้น การศึกษาของ Tsai, Meyer และ Walsh (2003) พบว่าแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแบบควอทซ์ทังสเตนเฮไลด์ที่ให้ความเข้มแสง 530 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้ฉายแสงไปบนเรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริด (Filtek Z250) นาน 40 วินาที เมื่อไปวัดความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ พบว่ามีค่า 95 ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ของเรซินคอมโพสิตที่ได้จากการฉายแสงโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแบบแสงจากไดโอด (light emitting diode, LED) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการศึกษาของ Poskus, Placido และ Capel Cardoso (2003) พบว่าเมื่อใช้เรซินคอมโพสิตอุดโพรงฟัน (cavity) ประเภทที่ 2 (Class II) ที่กว้าง 3 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร ลึก 1.2 มิลลิเมตร โดยใช้เรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริด (Filtek Z250) แล้วทำการฉายแสงโดยเครื่องฉายแสงที่มีความเข้มแสง 600 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ฉายนาน 40 วินาที แล้วทำการวัดค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ ซึ่งใช้แรงกด 100 กรัม นาน 15 วินาที พบว่ามีค่าความแข็งผิววิกเคอร์ 118 ซึ่งสูงกว่าค่าความแข็งผิวที่วัดได้จากวิธีการวัดแบบคนูป ซึ่งวัดได้ค่า 91 เนื่องจากการมีการคืนตัวแบบยืดหยุ่น (elastic recovery) ของรอยกด และการศึกษา

นี่ก็ยังพบว่าค่าความแข็งผิววิคเคอร์มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งผิวแบบคนูไปด้วย โดยมีสูตรคือ
 $VHN = 14.7 + 0.954 \times KHN$

เคลือบฟัน (enamel)

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เคลือบฟันเป็นเนื้อเยื่อที่มีการสะสมแร่ธาตุมากที่สุดและแข็งแรงมากที่สุดในร่างกาย ด้านทานการสึกกร่อน (abrasion resistance) ได้เป็นอย่างดี มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) สูง แต่มีความแข็งแรงดึง (tensile strength) ต่ำ และเปราะ พื้นผิวด้านนอกของเคลือบฟัน (surface enamel) มีความแข็งผิวและความหนาแน่นมากกว่า และ มีความพรุนน้อยกว่าเคลือบฟันชั้นที่อยู่ใต้พื้นผิวเคลือบฟัน (subsurface enamel) เคลือบฟันจะคลุมอยู่ชั้นนอกสุดของตัวฟันโดยจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ยอดปุ่มฟัน (cusp) คือ 2.5 mm ด้านข้างของตัวฟันมีเคลือบฟันหนาได้ถึง 1.3 mm แล้วความหนาจะค่อย ๆ ลดลงจนไปบางที่สุดที่บริเวณคอฟัน (Berkovitz, Holland, and Moxham, 2002: 102)

คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) เคลือบฟันประกอบด้วยสารอนินทรีย์ (inorganic substance) ร้อยละ 88-90 โดยปริมาตร สารอินทรีย์ (organic substance) ร้อยละ 2 โดยปริมาตร และน้ำร้อยละ 5-10 โดยปริมาตร โดยสารอินทรีย์หลักๆ คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาทาइट (calcium hydroxyapatite) ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ซึ่งจะอยู่ในรูปของผลึก (crystal) ที่มีความกว้าง 70 นาโนเมตร ความหนา 25 นาโนเมตร และมีความยาวโดยตลอดความหนาของตัวฟัน เมื่อตัดผลึกเคลือบฟันในแนวตามขวาง (cross section) จะเห็นผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยมโดยส่วนแกนกลางของผลึก (prism core) จะละลายได้ง่ายกว่าบริเวณขอบ (boundary) ของผลึกไฮดรอกซีอะปาทาइट (Berkovitz et al., 2002: 103; Nanci, 2003: 147)

สารอินทรีย์จะอยู่ในสารฟัน (organic matrix) ซึ่งประกอบด้วยโปรตีน (protein) ต่างๆ มากมาย ตั้งแต่กรดอะมิโนอิสระ (free amino acid) ซึ่งส่วนมากเป็นไกลซีน (glycine) และกรดกลูตามิก (glutamic acid) ไปจนถึงโปรตีนโครงสร้างใหญ่ที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) เป็นปริมาณมาก คือ มีน้ำตาลร้อยละ 80-90 และ กรดอะมิโนร้อยละ 5-20 โดยบริเวณรอยต่อเนื้อฟันกับเคลือบฟัน (dentine-enamel junction) จะมีโปรตีนสูงที่สุด (Berkovitz et al., 2002: 104) ซึ่งโปรตีนในเคลือบฟันร้อยละ 90 เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่เรียกว่าอะเมลโลเจนิน (amelogenins) และอีกร้อยละ 10 เป็นโปรตีนที่ไม่ใช่อะเมลโลเจนิน

(non-amelogenins) เช่น อีนาเมลลิน (enamelin) และอะเมลโลบลาสติน (ameloblastin) ซึ่งมีความสำคัญในการสร้างเคลือบฟัน (Nanci, 2003: 176-177)

แท่งเคลือบฟัน (enamel rod) หรือ ผลึกเคลือบฟัน (enamel prism) หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของเคลือบฟันคือ ผลึกเคลือบฟัน (enamel prism) หรือ แท่งเคลือบฟัน (enamel rod) โดยในพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตรของเคลือบฟันจะมีแท่งเคลือบฟัน 30,000 ถึง 40,000 แท่ง ซึ่งแต่ละแท่งประกอบด้วยผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์จำนวนมากเรียงอัดกันแน่น (Summitt, Robbins, and Schwartz, 2001: 5) เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope) พบว่าแต่ละแท่งจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 5.5 ไมโครเมตร โดยบริเวณใกล้ผิวเคลือบฟันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกว้างกว่าบริเวณใกล้เนื้อฟัน 1.3 เท่า และแท่งเคลือบฟันแต่ละแท่งแยกจากกันโดยแผ่นหุ้มรอบแท่งเคลือบฟัน (prism sheaths) ที่กว้าง 0.1-0.2 ไมโครเมตร (Moss-Salentijn and Hendricks-Klyvert, 1990: 235-241)

เมื่อดูภาพตัดแนวยาวของฟัน (longitudinal section) โดยตัดขนานกับแนวแกนฟัน พบว่าแท่งเคลือบฟันจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจากรอยต่อเนื้อฟันกับเคลือบฟันออกมาที่ผิวเคลือบฟันเป็นมุมต่างๆกัน โดยจุดที่เหนือรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบฟัน (cementoenamel junction) มา 1 มิลลิเมตรแท่งเคลือบฟันจะตั้งฉากกับผิวเคลือบฟันบริเวณที่เหนือจากจุดนี้ขึ้นไป แท่งเคลือบฟันจะค่อยๆ เป็นแนวชี้ขึ้นไปทางด้านสบฟันหรือปลายฟัน โดยไปสุดที่ผิวเคลือบฟันทำมุมเฉียง 60 องศากับผิวเคลือบฟันแล้วค่อยๆ ชันมากขึ้นจนถึงขอบสันฟัน (marginal ridge) และ ยอดปุ่มฟัน (cusp tip) แท่งเคลือบฟันบริเวณใต้ร่องฟัน (occlusal fissure) จะขนานกับแนวแกนฟัน แต่แท่งเคลือบฟันด้านข้างของร่องฟันจะทำมุม 20 องศากับแนวแกนฟัน (Berkovitz et al., 2002: 106)

ภาพตัดขวางของแท่งเคลือบฟัน (crosssection) จะมี 3 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 จะเห็นแท่งเคลือบฟันเป็นวงกลม (circular) รูปแบบที่ 2 จะเห็นแท่งเคลือบฟันเป็นแถวที่เรียงขนานกัน รูปแบบที่ 3 จะเห็นแท่งเคลือบฟันเป็นแบบรูกุญแจ (keyhole appearance) ซึ่งในเคลือบฟันของฟันแท้ของคนจะพบแบบรูกุญแจมากที่สุด โดยในแบบที่ 1 เคลือบฟันที่อยู่ระหว่างแท่งเคลือบฟัน (interprismatic enamel) เป็นบริเวณขอบของแท่งเคลือบฟันที่มีผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์มีการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวอย่างทันที โดยจะเรียงตัวเบี่ยงออกจากแกนกลางของผลึกเคลือบฟัน 40 ถึง 60 องศา ซึ่งทำให้บริเวณขอบแท่งเคลือบฟันนั้นมีความพรุน (microporosity) และสารอินทรีย์มากกว่าบริเวณแกนกลาง ส่วนในแบบรูกุญแจนั้นบริเวณที่อยู่ระหว่างแกนหรือหัวของแท่งเคลือบฟัน (rod head) ที่อยู่ติดกันคือส่วนของหางของแท่งเคลือบฟัน (rod tail) ที่อยู่แถวบนซึ่ง

บริเวณนี้เรียกว่า รอทชีต (rod sheath) เป็นบริเวณที่มีผลึกไฮดรอกซีอะพาทิตเรียงตัวเบนออก (divergence) ทันทีโดยทำมุม 65 ถึง 70 องศากับส่วนแกนของแท่งเคลือบฟัน ดังนั้นบริเวณนี้จึงมีช่องว่างระหว่างผลึกไฮดรอกซีอะพาทิต (intercrystalline space) มากกว่าบริเวณแกนของแท่งเคลือบฟัน (Berkovitz et al., 2002: 106)

บริเวณผิวบนของเคลือบฟันในฟันแท้ที่ขึ้นใหม่ 20 ถึง 70 ไมโครเมตรจะเป็นบริเวณที่เคลือบฟันไม่มีลักษณะของผลึกเคลือบฟันให้เห็น (aprismatic enamel) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ผลึกไฮดรอกซีอะพาทิตเรียงตัวตั้งฉากกับผิวเคลือบฟัน เพราะเป็นบริเวณที่ไม่มีขอบของแท่งเคลือบฟันซึ่งมีแร่ธาตุปริมาณมาก ดังนั้นจึงถูกกัดกร่อนด้วยกรดยากกว่าบริเวณเคลือบฟันที่อยู่ใต้บริเวณนี้ลงไป (subsurface enamel) (Berkovitz et al., 2002: 107-108)

การวัดค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันมีความหลากหลายมากขึ้นกับตำแหน่งของซี่ฟันในช่องปาก ตำแหน่งของเคลือบฟัน การเรียงตัวของแท่งเคลือบฟัน ความซับซ้อนทางโครงสร้างของฟันทั้งด้านกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี (Sakar-Deliormanli and Güden, 2005) และวิธีการวัดค่าความแข็งผิว การศึกษาของ Sakar-Deliormanli และ Güden (2005) วัดค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันของฟันกรามแท้ของมนุษย์ (molar human teeth) โดยใช้วิธีการวัดความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ พบว่าเมื่อใช้แรงกดลดลงค่าความแข็งผิวที่ได้ก็ลดลงคือ เมื่อใช้แรงกด 9.8 นิวตัน นาน 10 วินาที พบว่าเคลือบฟันมีค่าความแข็งผิววิกเคอร์ 311.8 เมื่อใช้แรงกด 4.9 นิวตัน กดนาน 10 วินาที มีค่าความแข็งผิววิกเคอร์ 290.2 และเมื่อใช้แรงกด 2.94 นิวตันเคลือบฟันมีค่าความแข็งผิววิกเคอร์ 283.1 การศึกษาของ Maupome และคณะ (1998) วัดค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันแท้ของมนุษย์ด้านกระพุ้งแก้มและด้านลิ้น โดยวิธีการวัดความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ที่ใช้แรงกด 100 กรัม นาน 15 วินาที พบว่ามีค่าความแข็งผิววิกเคอร์เฉลี่ย 339.9 และการศึกษาของ Wongkhantee และคณะ (2005) พบว่าค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ของเคลือบฟันในฟันกรามน้อยของมนุษย์ด้านกระพุ้งแก้มและด้านลิ้นที่ใช้แรงกด 100 กรัม นาน 15 วินาที พบว่ามีค่าเฉลี่ย 265.9 ซึ่งค่าที่ได้นี้น้อยกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาอื่น ๆ เนื่องจากวัดเคลือบฟันที่บริเวณคอฟัน

นอกจากนี้ยังมีหลายการศึกษาที่วัดค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันวีว เช่น การศึกษาของ Attin และคณะ (1996) ในเรื่องความสัมพันธ์ของค่าความแข็งผิวในระดับไมโครเมตรและการสึกของเคลือบฟันวีวที่ผ่านการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งผิวในระดับไมโครเมตรแบบวิกเคอร์มีความสัมพันธ์กับการเกิดการสึกกร่อนจากการแปรงฟันของเคลือบฟันที่ถูกกัดกร่อน โดยเมื่อค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันที่ถูกกัดกร่อนลดลง โอกาสเกิดการสึกกร่อนก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้ด้านริมฝีปาก (labial surface) ของฟันหน้าของวีว และวัดค่าความแข็งผิวของ

เคลือบฟันโดยวิธีการวัดแบบวิกเคอร์ที่ใช้แรงกด 1.961 นิวตัน กดนาน 30 วินาที พบว่ามีค่าความแข็งผิววิกเคอร์ 306.4 และการศึกษาของ Park และคณะ (2004) พบว่าค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันด้านริมฝีปากของฟันหน้าวีว โดยวิธีการวัดความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ ที่ใช้แรงกด 200 กรัม กดนาน 15 วินาทีที่มีค่าประมาณ 325 ดังนั้นพบว่าค่าความแข็งผิวของเคลือบฟันมีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าความแข็งผิวของเรซินคอมโพสิตซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้บูรณะกันมากในปัจจุบัน ดังเช่นการศึกษาของ Mandikos และคณะ (2001) ทำการทดลองดูการสึกกร่อนของเรซินคอมโพสิตจากการแปรงฟันและวัดค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ของเรซินคอมโพสิตเปรียบเทียบกับเคลือบฟันของฟันแท้ของมนุษย์ พบว่าค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ที่ใช้แรงกด 500 กรัม นาน 25 วินาทีของเคลือบฟันมีค่าสูงที่สุดคือ 331.7 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่เรซินคอมโพสิตชนิดที่ใช้ในการบูรณะทางอ้อมที่ทำขึ้นจากห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าความแข็งผิวต่ำกว่าเคลือบฟันทั้งหมด เช่น เบลกลาส (bellglass HP, belle de St. Claire, California, USA) มีค่าความแข็งผิววิกเคอร์เพียง 75 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตรเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์กับการสึกของเรซินคอมโพสิตด้วย ซึ่งผลการศึกษานี้ต่างจากผลการศึกษาของ Harrison และ Draughtin (1976) และ Lappalainen และคณะ (1989) ที่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์กับความต้านทานการสึกของเรซินคอมโพสิต เนื่องจากความซับซ้อนในกระบวนการสึกของเรซินคอมโพสิตจึงทำให้ผลการศึกษาของความสัมพันธ์ของ 2 ปัจจัยนี้ยังเป็นที่ได้แย้งกันอยู่ (Mandikos et al., 2001)

ความแข็งผิว (Hardness)

ความแข็งผิว เป็นคุณสมบัติทางกลอย่างหนึ่งของวัสดุที่เป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุในการบูรณะทางทันตกรรมให้เหมาะสมและค่าความแข็งผิวนี้ส่วนมากจะระบุอยู่ในข้อมูลเฉพาะของวัสดุตามที่สมาคมทางทันตกรรมของสหรัฐอเมริกา (American Dental Association specifications) กำหนดไว้ (Willems et al., 1993; Anusavice, 2003: 97) ซึ่งการทดสอบวัดค่าความแข็งผิวมีได้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยมคือ การใช้วิธีทำให้เกิดเป็นรอย (indentation) (Craig and Peyton, 1958; Willems et al., 1993) ดังนั้นจึงยอมรับกันโดยทั่วไปว่าความแข็งผิวคือ การต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยบนผิวของวัสดุ ซึ่งการทดสอบเพื่อวัดค่าความแข็งผิวของวัสดุทางทันตกรรมนั้นมีหลายวิธี เช่น วิธีของบริเนลล์ (Brinell) คนูป (Knoop) วิกเคอร์ (Vickers) บาร์คอลล (Barcol) ร็อคเวลล์ (Rockwell) และชอร์ (Shore) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นกับวัสดุที่จะนำมาทดสอบว่าสามารถต้านทานการเกิดเป็นรอยโดยห้กดแบบใด เนื่องจาก

การทดสอบแต่ละวิธีนั้นมีหัวกดแตกต่างกันทำจากวัสดุต่างกัน (Craig and Powers, 2002: 102; Anusavice, 2003: 96-97; van Noort, 2002: 47) วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ วิธีของคนูปและวิธีของวิกเคอร์ ซึ่ง 2 วิธีนี้จัดเป็นการวัดความแข็งผิวในระดับไมครอน (microhardness test) (Willems, 1993) หลักการทดสอบความแข็งผิวโดยทั่วไป ทำโดยการใส่แรงกดที่มาตรฐานไปยังหัวกดที่มีรูปร่างสมมาตรที่กดลงไปบนผิววัสดุ เพื่อทำให้เกิดเป็นรอยแล้วจะวัดความกว้าง ลึก หรือพื้นที่ของรอยกดมาคำนวณเป็นค่าความแข็งผิวของวัสดุ (Craig and Powers, 2002: 103)

วิธีการวัดความแข็งผิวแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันมานานในการวัดความแข็งผิวของโลหะและโลหะผสมที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมโดยมีหัวกดเป็นเหล็ก (steel) หรือ ทังสเทนคาร์ไบด์ (tungsten carbide) ทรงกลม (Anusavice, 2003:97; Craig and Powers, 2002: 103-104) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตรใช้แรงกด 123 นิวตัน กดค้างไว้ 30 วินาทีแล้ววัดพื้นที่รอยกดนำไปหารแรง ได้ค่าออกมาเรียกว่า ค่าความแข็งผิวของบริเนลล์ (Brinell hardness number, BHN) ซึ่งวัสดุที่มีความแข็งผิวมากจะมีค่าความแข็งผิวของบริเนลล์สูง การวัดความแข็งผิววิธีนี้ทำให้เกิดรอยกดขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเหมาะในการใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งผิวมากกว่าการใช้ในการหาค่าความแข็งผิวแบบเฉพาะตำแหน่ง (Craig and Powers, 2002: 104)

วิธีการวัดความแข็งผิวแบบคนูป (Knoop hardness test)

วิธีการวัดความแข็งผิววิธีนี้ใช้หัวกดเพชร (diamond) รูปปิรามิดที่เป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน แล้วจะวัดความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดมาคำนวณตามสูตรเพื่อให้ได้ค่าความแข็งผิวแบบคนูป (Knoop hardness number; KHN) ที่มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร (kg/mm^2)

$$\text{KHN} = \frac{L}{l^2 C_p}$$

L = แรงที่ใช้กด

l = ความยาวตามแนวยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกด

C_p = ค่าคงที่

วิธีการวัดความแข็งแบบคนูปีนใช้ได้ดีกับวัสดุที่มีช่วงค่าความแข็งผิวที่กว้างได้ โดยใช้แรงกดที่แตกต่างกันไป ดังนั้นวิธีนี้จึงใช้ได้ทั้งในการหาความแข็งผิวของเคลือบฟัน เนื้อฟัน โลหะ และโลหะผสมได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีวิภาคทั้งแบบแข็ง (hard phase) และแบบนิ่ม (soft phase) อยู่ร่วมกัน (Craig and Powers, 2002: 104-105)

วิธีวัดความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ (Vickers hardness test)

วิธีการวัดความแข็งแบบนี้ใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดที่มีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีมุมระหว่างพื้นผิวที่ตรงข้ามกันของปิรามิด 136 องศา (Craig and Powers, 2002:105-106; Sakar-Deliormanli and Güden, 2005) โดยใช้แรงกดตั้งแต่ 10 ถึง 500 กรัมทำให้เกิดรอยกดกว้างยาว 10 ถึง 100 ไมโครเมตรและลึก 1 ถึง 10 ไมโครเมตร (Willems et al, 1993) มาคำนวณตามสูตรเพื่อให้ได้ค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์ (Vickers hardness number; VHN)

$$VHN = \frac{2P \sin(\Theta/2)}{L^2} = 1.854 P/L^2$$

(Sakar-Deliormanli and Güden, 2005)

P = แรงที่ใช้กด (กิโลกรัม)

L = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (มิลลิเมตร)

Θ = มุมระหว่างพื้นผิวที่ตรงข้ามกันของหัวกดเพชร ซึ่งในวิธีนี้คือ 136 องศา

การวัดความแข็งผิวแบบวิกเคอร์เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งมาก พื้นที่ที่ใช้วัดขนาดเล็กๆ ได้ (Craig and Powers, 2002: 106) และเหมาะสำหรับวัสดุที่มีความเปราะ เคลือบฟัน และเนื้อฟัน นอกจากนี้การทดสอบวัดค่าความแข็งผิวแบบวิกเคอร์นี้ยังใช้ในการระบุในข้อมูลคุณสมบัติเฉพาะของโลหะทองผสมที่ใช้เหวี่ยงในทางทันตกรรมตามข้อกำหนดของสมาคมทันตกรรมแห่งสหรัฐอเมริกาด้วย (ADA specification) (Anusavice, 2003: 98)

อายุการใช้งาน (longevity) ของการบูรณะทางทันตกรรมแบบติดแน่นนั้น นอกจากจะขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานบูรณะแล้วยังขึ้นกับการยึดอยู่ (retention) และการแนบสนิทตามขอบของชิ้นงานบูรณะกับตัวฟัน (marginal fit) ด้วย ซึ่งสิ่งที่มีบทบาทสำคัญคือ ซีเมนต์ที่ใช้ โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ได้มีการคิดค้นซีเมนต์ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งซีเมนต์ที่ได้รับความนิยมมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและใช้กันอย่างแพร่หลายในการบูรณะทางทันตกรรม คือ เรซินซีเมนต์ เนื่องจากเรซิน

ซีเมนต์มีข้อดีกว่าซีเมนต์ชนิดที่อาศัยปฏิกิริยากรดเบสในการแข็งตัว คือ การละลายต่ำ ลดการเกิดรูรั่วในระดับไมครอน (microleakage) ไม่ทำอันตรายต่อประสาทฟัน (O'Brien, 2002:132,146; White and Yu, 1993) เพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างชิ้นงานเซรามิกกับฟันได้มากเป็น 3 เท่า ของค่าความแข็งแรงดึงยึดที่ได้จากการใช้ซีเมนต์ชนิดที่อาศัยปฏิกิริยากรดเบสในการแข็งตัว เช่น ซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ (Zinc phosphate cement) หรือ กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (glass ionomer cement) ที่ยึดชิ้นงานที่ทำจากทอง (Michelini, Scherrer, and De Rijk, 1995) และเมื่อมายึดติดกับฟันด้วยเรซินซีเมนต์แล้วจะเพิ่มความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานได้เป็นอย่างดี (Burke and Watts, 1994; Dietschi et al., 1990; Scherrer et al., 1994) ซึ่ง O'Brien (2002) ได้แบ่งเรซินซีเมนต์เป็น 2 ชนิดคือ

1. องค์ประกอบพื้นฐานของซีเมนต์เป็นเมทิลเมทาอะคริเลต (methylmethacrylate, MMA)
2. องค์ประกอบพื้นฐานของซีเมนต์เป็นไดเมทาอะคริเลตชนิดที่มีโครงสร้างเป็นวง (aromatic dimethacrylates) ของบิสจีเอ็มเอ (Bis-GMA)

เรซินซีเมนต์ชนิดที่มีเมทิลเมทาอะคริเลตเป็นองค์ประกอบหลัก

อะคริลิกเรซินซีเมนต์ (acrylic resin cements) ส่วนประกอบมี 2 ส่วนคือ ส่วนผง ซึ่งประกอบด้วยโพลิเมอร์ของโคโพลิเมอร์ (copolymer) ชนิดเมทิลเมทาอะคริเลตที่มีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) เป็นสารตั้งต้นการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ นอกจากนี้บางบริษัทยังมีอนุภาคเติมเต็ม (mineral filler particles) และสารแต่งสีต่าง ๆ (pigments) อีกด้วย ส่วนเหลวคือ โมโนเมอร์ของเมทิลเมทาอะคริเลตที่มีเอมีน (amine) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) รวมอยู่ด้วย เมื่อผสมส่วนผงเข้ากับส่วนเหลวแล้วโมโนเมอร์จะละลายเข้าไปในส่วนโพลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ (polymerization) ขึ้น โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างเปอร์ออกไซด์ และเอมีน ซึ่งซีเมนต์ชนิดนี้มีความแข็งต่ำแต่มีข้อดีคือ มีค่าความเหนียวสูง (toughness) และสามารถยึดได้ดีกับเรซินคอมโพสิตที่เป็นเรซินด้านหน้า (resin facing) และ ครอบฟันที่ทำจากโพลีคาร์บอเนต (polycarbonate crown) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอะคริลิกเรซินซีเมนต์ โดยการใส่สารเพิ่มการยึดติด (adhesion promoter) เรียกว่า เรซินซีเมนต์ที่มีสารช่วยเพิ่มการยึดติด (adhesive resin cements) โดยอะคริลิกเรซินซีเมนต์ชนิดนี้มีสารช่วยเพิ่มการยึดติดอยู่ในส่วนเหลว เช่น โฟร์เมตตา (4-META, 4-methoxyethyl trimellitic anhydride) โดยจะมีสารตั้งต้นปฏิกิริยา คือ ทีบีบี (TBB, tri- η -butylborane) เช่น ซุปเปอร์บอนด์ซีแอนด์บี (Super-Bond C&B, Sun Medical, Shiga, Japan) หรือ ซีแอนด์บีเมตตาบอนด์ (C&B Metabond, Parkell, New York, USA.)

และอะมัลกัมบอนด์ (Amalgambond, Parkell, New York, USA.) จากการศึกษาทางห้องปฏิบัติการ พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงยึดที่ดี (tensile bond strength) กับพื้นผิวโลหะผสมที่ผ่านการถูกออกซิไดซ์ (oxidized) หรือการกัดด้วยสารเคมี (etched) หรือเคลือบพื้นผิวด้วยซิลิกา (silica-coated) และมีค่าความแข็งแรงยึดเฉือน (shear bond strength) กับเนื้อฟันสูงกว่าการยึดกับอะมัลกัม (amalgam) และเมื่อเรซินซีเมนต์ชนิดนี้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์แล้วจะเกิดเป็นโพลีเมอร์แบบเส้นตรง (linear polymers) ของเมทิลเมทาอะคริเลต โดยปราศจากอนุภาคเติมเต็ม การมีโครงสร้างดังกล่าวทำให้ซุเปอร์บอนด์ซีเมนต์มีค่าคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งผิว (microhardness) และ โมดูลัสของการงอ (flexural modulus) ต่ำกว่าพวกเรซินซีเมนต์ชนิดที่เป็นเรซินคอมโพสิต (composite resin cement) ดังนั้นเมื่อได้รับแรงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกได้มาก (plastic deformation) และจะเปลี่ยนรูปร่างได้ง่าย ต่างจากเรซินซีเมนต์ชนิดที่มีไดเมทาอะคริเลตเป็นพื้นฐาน เช่น บิสจีเอ็มเอ และมีอนุภาคเติมเต็มของสารอินทรีย์ ซึ่งหลังแข็งตัวจะกลายเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (three-dimensional networks) ซึ่งทำให้ซีเมนต์ชนิดนี้มีค่าคุณสมบัติเชิงกลสูง คือ เกิดเป็นโครงสร้างแข็ง (rigid structure) มีค่าความแข็งผิว ความแข็งแรงกด ความแข็งแรงดึง และ สัมประสิทธิ์ยึดหยุ่นสูง (White and Yu, 1993; Knobloch, 2000)

เรซินซีเมนต์ชนิดที่มีไดเมทาอะคริเลตเป็นองค์ประกอบหลัก (dimethacrylate cements)

เรซินซีเมนต์ชนิดนี้มีส่วนประกอบพื้นฐานเหมือนกับเรซินคอมโพสิตที่ใช้เป็นวัสดุบูรณะทั่วไป คือประกอบด้วย บิสจีเอ็มเอ และ มีอนุภาคเติมเต็มที่เป็นเซรามิค (ceramic filler) ร้อยละ 20 ถึง 80 ในกรณีอยู่ในรูปของผงและส่วนเหลวนั้น ส่วนผงประกอบด้วย โพลีเมอร์ โบโรซิลิเกต (borosilicate) หรือแก้วซิลิกา และ สารตั้งต้นปฏิกิริยาที่เป็นเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์ (organic peroxide) ส่วนเหลวจะเป็นส่วนผสมของบิสจีเอ็มเอและ/หรือ โมโนเมอร์ไดเมทาอะคริเลตอื่นๆ กับตัวเร่งปฏิกิริยาเอมีน (amine promoter) เมื่อจะทำการยึดวัสดุบูรณะกับผิวฟันด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดนี้ต้องใช้ร่วมกับสารยึดเรซินที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่มีกลุ่มเมทาอะคริเลต และกลุ่มที่มีขั้ว (polar pendent-reactive group) เช่น ฮีมา (HEMA, 2-hydroxyethyl methacrylate) ซึ่งกลุ่มที่มีขั้วนี้จะไปเกิดแรงดึงดูดกับขั้วของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ของผลึกอะพาไทต์ (apatite) และขั้วของหมู่อะมิโน (amino groups) ของคอลลาเจนในเนื้อฟันและเคลือบฟัน ส่วนกลุ่มเมทาอะคริเลตจะไปยึดกับบิสจีเอ็มเอหรือยูรีเทนไดเมทิลเมทาอะคริเลตชนิดที่ไม่มีอนุภาคเติมเต็มในสารยึดเรซินนั้น นอกจากนี้บางบริษัทมีการเติมสารที่มีหมู่ช่วยเพิ่มการยึดติด (functional group) คือหมู่ฟอสเฟต (phosphate group) หรือหมู่คาร์บอกซิล

(carboxyl group) เช่น เอ็มดีพี(MDP, 10-methacryloyloxydecamethylene phosphoric acid) เรซินซีเมนต์ชนิดนี้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์แล้วจะเกิดโครงสร้างโพลีเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางอย่างมาก (cross-linked resin composite structure) ดังนั้นเรซินซีเมนต์ชนิดนี้จึงมีข้อดีกว่าซีเมนต์ชนิดที่เกิดปฏิกิริยากรด-เบส(acid-base cement) คือ มีค่าความแข็งแรงด้านแรงกด (compressive strength) ที่สูงคือ 100 ถึง 200 เมกะปาสคาล การละลายต่ำ และมีการยึดติดกับเคลือบฟัน เนื้อฟัน โลหะผสมและเซรามิกได้ดี จึงนิยมใช้ในการยึดติดครอบฟันโดยเฉพาะที่ทำจากเซรามิก สะพานฟัน วัสดุอุดฟัน เคลือบฟันเทียม และการบูรณะทางอ้อมด้วยเรซิน ตัวอย่างเช่น แวริโอลิงค์ทู (VariolinkII[®]) (Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ซิงเกิลบอนด์ทู (Single-Bond[®] 2) (3M Dental Products, St.Paul, Minnesota) ร่วมกับ รีไลเอกซ์ (Rely X[®]) (3M Dental Products, St.Paul, Minnesota) และ ออลบอนด์ทู (All-Bond[®] 2 (Bisco Inc., IL., USA.) ร่วมกับ ดูโอลิงค์เรซินซีเมนต์ (DUO-LINK[™] Composite Luting Cement) (Bisco Inc., IL., USA.) (O'Brien, 2002: 143-146)

ชนิดของเรซินซีเมนต์จำแนกตาม ISO 4049 มี 3 ชนิด (Craig and Powers, 2002: 619)

ชนิดที่ 1 (class 1) เรซินซีเมนต์ที่แข็งตัวด้วยปฏิกิริยาเคมี (chemical-cured resin cement) เรซินซีเมนต์ชนิดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เบส (base) และคะตะลิสต์ (catalyst) ซึ่งอาจอยู่ในรูปเฟส 2 หลอด (two-paste system) ซึ่งประกอบด้วยไดอะคริเลตโอลิโกเมอร์ (diacrylate oligomer) ร่วมกับโมโนเมอร์ที่เป็นไดเมทาอะคริเลตและมีอนุภาคเติมเต็มเป็นซิลิกาหรือแก้ว เรซินซีเมนต์ชนิดนี้อาศัยอนุพันธ์ของเอมีนลำดับที่ 3 (tertiary amine) เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ ให้แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) เพื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ต่อไป เช่น ฟอสโฟเนตซีเมนต์ (phosphonate cement) ที่มีสารช่วยเพิ่มการยึดติด ระบบผงและของเหลว (powder-liquid system) ในเรซินซีเมนต์ซูเปอร์บอนด์ซีแอนด์บี ที่มีสารช่วยเพิ่มการยึดติดเป็นโพรมีตตา (Craig and Powers, 2002: 619) โดยเรซินซีเมนต์ชนิดนี้มักใช้ในการยึดชิ้นงานที่มีความหนาเกิน 2.5 มิลลิเมตร (Anusavice, 2003: 487) วัสดุแกนฟันโลหะหรือเซรามิกทึบแสง (metal, opaque ceramic core) ซึ่งแสงไม่สามารถส่องผ่านถึงชั้นซีเมนต์ได้ เช่น เซรามิกโพเซรา (Procera[®]) และอินซีแรม (Inceram) ตัวอย่างของเรซินซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ พานาเวียร์เอ็กซ์ (Panavia Ex, Kuraray, Okayama, Japan) (Frazier and Sarrett, 1995)

ชนิดที่ 2 (class 2) เรซินซีเมนต์ที่แข็งตัวด้วยแสง (light-cured resin cement) เรซินซีเมนต์ชนิดนี้สามารถแข็งตัวด้วยการฉายแสงเท่านั้น โดยจะใช้ยึดชิ้นงานที่ไม่มีโลหะเป็น

องค์ประกอบ เช่น ชีงงานเซรามิก ชีงงานที่เป็นเรซิน (resin-based prostheses) และ แบริคเก็ต ในทันตกรรมจัดฟันที่เป็นเซรามิกหรือพลาสติก (plastic orthodontic brackets) ซึ่งชีงงานนั้น ต้องมีความหนาไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์อย่างสมบูรณ์ (composite polymerization) ทั้งนี้หากชีงงานหนาเกิน 1.5 มิลลิเมตร แสงจากเครื่องฉายแสง จะไม่สามารถส่องผ่านถึงชั้นของซีเมนต์ได้ ส่งผลให้ซีเมนต์ไม่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์ และควรฉายแสง เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 40 วินาที เรซินซีเมนต์ชนิดนี้มักบรรจุมาในรูปแบบที่เป็นหลอดเดียว (single-component system) เรซินซีเมนต์ระบบนี้จะแข็งตัวโดยอาศัยแคมโฟโรควิโนน (camphoroquinone) เป็นตัวดูดซับแสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร (nanometer) แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แบบอาศัยอนุมูลอิสระ (free radical polymerization) ต่อไป (Anusavice, 2003: 487)

ชนิดที่ 3 (class 3) เรซินซีเมนต์ที่แข็งตัวด้วยแสงร่วมกับปฏิกิริยาเคมี (dual-cured resin cement) เรซินซีเมนต์ชนิดนี้เริ่มบ่มตัวด้วยแสง แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่อไป โดยส่วน ที่แข็งตัวด้วยแสงอาศัยแคมโฟโรควิโนนเป็นตัวดูดซับแสงสีฟ้า (ความยาวคลื่น 400-500 นาโน เมตร) และส่วนที่แข็งตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีอาศัยอนุพันธ์ของเอมีนลำดับที่3 เป็นตัวกระตุ้นเบนโซอิล เปรอร์ออกไซด์ให้แตกตัวเกิดอนุมูลอิสระเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ต่อไป ซึ่งเป็นข้อได้ เปรียบกว่าเรซินซีเมนต์ชนิดแข็งตัวด้วยแสง ทำให้สามารถใช้เรซินซีเมนต์ชนิดนี้กับชีงงานเซรามิก ที่หนากว่าปกติได้ รวมทั้งใช้ได้ในกรณีที่ชีงงานมีความหนา สีเข้ม หรือค่อนข้างทึบแสง แต่ อย่างไรก็ตามชีงงานก็ไม่ควรหนาเกิน 2.5 มิลลิเมตร (Anusavice, 2003: 487) โดยพบว่าแม้มี ตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว ก็ยังต้องการการฉายแสงเนื่องจากพบว่าจะช่วยเพิ่มความ แข็ง และช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการบ่มตัวที่สมบูรณ์ขึ้นด้วย (Frazier and Sarrett, 1995)

จากการศึกษาของ Hasegawa, Chan และ Boyer (1991) ซึ่งได้ทำการศึกษาซีเมนต์ชนิด บ่มตัวด้วยแสงร่วมกับปฏิกิริยาทางเคมี 3 ชนิด คือ ดูบอลซีเมนต์ (Dual cement) (Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ไดคอรซีเมนต์ (Dicor[®] light-activated cement, Caulk Dentsply, Milford, Del.) และดูโอซีเมนต์ (Duo cement, Coltene, Altstätten, Switzerland) พบว่าค่า ความแข็งสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก (ultimate hardness) ของซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ผ่าน ไปถึงชั้นของซีเมนต์ และระยะเวลาการฉายแสง (exposure time) ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด เรซิน ซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยแสงร่วมกับปฏิกิริยาทางเคมีแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในอัตราส่วนของ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่กระตุ้นด้วยแสงกับชนิดที่กระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมี (light และ chemical-activated catalyst) ทำให้พฤติกรรมการแข็งตัวแตกต่างกันคือ ซีเมนต์ 2 ชนิดแรกคือ ดูบอล

ซีเมนต์และไดคอรซีเมนต์ มีพฤติกรรมเด่นไปในทางที่คล้ายซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยแสง ซึ่งมีการแข็งตัวระยะเริ่มแรก (initial hardening) เร็วและไวต่อแสงมาก ส่วนชนิดหลังคือ ไดโอสซีเมนต์ พบว่ามีพฤติกรรมเด่นไปในทางที่คล้ายซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีมากกว่า ซึ่งจะมีการแข็งตัวระยะเริ่มแรก (initial hardening) ช้าและไวต่อแสงน้อยกว่า

การยึดติดระหว่างโลหะและเรซิน (resin - metal bonding)

การยึดติดระหว่างโลหะกับเรซินต้องอาศัยกลไกการยึดติดหลายๆ กลไกร่วมกันคือ การยึดติดเชิงกลระดับมหภาค (macromechanical bonding) เช่น การมีรู ห่วงเหล็ก(loop) หรือตุ่ม (bead) บนโครงโลหะ (van Noort, 2002: 271) Rochette (1973) ได้นำเสนอชิ้นงานสะพานฟันโครงโลหะที่มีลักษณะเป็นรูเพื่อยึดกับเรซินชนิดบ่มตัวได้เองกับผิวเคลือบฟัน ซึ่งเป็นความริเริ่มแรกของการใส่ฟันทดแทนฟันที่สูญเสียไปโดยมีการทำลายฟันธรรมชาติข้างเคียงน้อย (minimal tooth preparation) แต่มีปัญหาคือเมื่อใช้งานไปเรซินเหล่านี้จะสึกออกไป ทำให้การยึดติดกับโครงโลหะมีพื้นที่น้อยลง ต่อมาปัญหานี้ได้รับการแก้ไขโดยมีการพัฒนาให้เกิดการยึดติดเชิงกลระดับจุลภาคหรือการยึดเชิงกลระดับไมโครเมตร (micromechanical bonding) (van Noort, 2002: 271) โดย Lavaditis และ Thompson (1982) ได้มีการพัฒนาการปรับสภาพผิวของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมได้โดยการใช้กรดหรือกระแสไฟฟ้ามากัดผิว (electrolytic etching) ให้มีความขรุขระในระดับจุลภาค ทำให้เกิดการยึดติดกับเรซินซีเมนต์ได้ดี โดยไม่มีส่วนของเรซินที่ล้นผิดแผกออกมานอกโครงโลหะเลย ซึ่งสะพานฟันที่ใช้โครงโลหะที่มีลักษณะแบบนี้ เรียกว่า แมรี่แลนด์บริดจ์ (Maryland bridge) แต่การใช้วิธีนี้ต้องอาศัยเครื่องมือทางห้องปฏิบัติการอย่างเฉพาะ มีความยุ่งยากและมีความเสี่ยงจากอันตรายของกรดที่ใช้ด้วย ดังนั้นจึงมีวิธีอื่นในการปรับเปลี่ยนลักษณะผิวโครงโลหะคือ การเป่าทราย(sandblast)ด้วยผงอลูมินาขนาด 50 ไมโครเมตรด้วยแรงดันระดับหนึ่งไปทำให้ผิวโครงโลหะมีลักษณะขรุขระ เพื่อเพิ่มการยึดติดกับเรซิน โดยพบว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะผสมชนิดพื้นฐานที่ผ่านการเป่าทรายมาแล้วกับเรซินชนิดบิสฟีนีเอที่มีเอ็มดีพีอยู่ด้วย มีค่า 38.4 เมกะปาสคาลและเมื่อเกิดความล้มเหลวของการยึดติดพบว่าเป็นความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินเอง แต่ถ้าใช้เรซินซีเมนต์ที่ไม่มีโมโนเมอร์ที่ช่วยเพิ่มการยึดติด ก็ต้องทำการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของโลหะเพิ่มเติมนอกเหนือจากการเป่าทรายด้วยผงอลูมินา โดยทำการปรับสภาพพื้นผิวตามวิธีของ Livaditis ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดที่สูง แต่ความล้มเหลวของการยึดติดที่พบก็ยังเป็นแบบผสม (mixed failure) ของความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินและความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างโลหะกับเรซิน (cohesive-adhesive failure) (Kohli et al., 1990) แต่วิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพิ่มการยึดติดของโลหะมีตระกูลกับเรซิน ดังการศึกษาของ

Gates และคณะ (1992) ที่รายงานว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะมีตระกูลที่ผ่านการเป่าทรายด้วยผงอลูมินามาแล้วกับเรซินชนิดที่มีบิสซิเอ็มเอและเอ็มดีพี พบว่ามีค่า 26 เมกะปาสคาล ขณะที่การศึกษาของ Imbery และ Davis (1993) รายงานว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะผสมทองประเภทที่ 3 ที่ผ่านการเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 50 ไมโครเมตรที่แรงดัน 50 ถึง 60 พีเอสไอนาน 15 วินาทีกับเรซินชนิดที่มีบิสซิเอ็มเอและเอ็มดีพีนั้นมีค่าเพียง 6.9 เมกะปาสคาล เท่านั้น และทั้งหมดเกิดความล้มเหลวเป็นแบบความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินเอง ซึ่งสะพานฟันลักษณะแบบนี้มีชื่อเรียกในปัจจุบันว่าสะพานฟันชนิดติดแน่นที่อาศัยการยึดอยู่โดยเรซินหรือ สะพานฟันที่กรอพื้นธรรมชาติข้างเคียงน้อย (minimal preparation bridges) ซึ่งการใช้สะพานฟันในลักษณะนี้ก็ยังคงพบว่าการหลุดออกของชิ้นงาน และไม่สามารถใช้วิธีการปรับเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวแบบนี้กับโครงโลหะชนิดโลหะมีตระกูลได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีอื่นๆ ในการเพิ่มการยึดติดให้มากขึ้น โดยอาศัยการยึดติดเชิงเคมีของเรซินซีเมนต์เข้ามาาร่วมด้วย เช่น การใช้เรซินซีเมนต์ที่มีโมโนเมอร์ที่ช่วยเพิ่มการยึดติดร่วมด้วย เช่น โฟร์เมตตาในเรซินชนิดเอ็มเอ็มเอที่บีบีเรซิน และ โมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟอสเฟต เช่น เอ็มดีพี (MDP, methacryloxy ethylphenyl phosphate) ในเรซินชนิดที่เป็นบิสซิเอ็มเอ โดยจะเกิดการยึดติดเชิงพันธะเคมี (chemical retention) ระหว่างออกไซด์ของโลหะบนผิวของโลหะผสมชนิดพื้นฐานกับเรซินซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid derivative) หรือ กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid derivative) ซึ่งพบว่าการยึดติดกับโลหะชนิดที่ใช้โลหะผสมชนิดพื้นฐานได้ดีมาก ดังการศึกษาของ Tanaka และคณะ(1981) พบว่าเรซินซีเมนต์ชนิดที่มีโฟร์เมตตาเป็นองค์ประกอบจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการยึดติดที่ติดกับโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม และ Tanaka และคณะ(1986) ยังพบว่าโฟร์เมตตานั้นสามารถเพิ่มการยึดติดของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมได้ด้วย แต่จากการศึกษาของ Tanaka ทั้ง 2 การศึกษานี้ พบว่าโลหะผสมชนิดพื้นฐานนิกเกิล-โครเมียมนั้น ต้องมีการปรับพื้นผิวโลหะเพิ่มเติมนอกเหนือจากการเป่าทรายด้วยผงอลูมินา โดยการนำไปทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) เพื่อให้เกิดพื้นผิวที่เป็นออกไซด์ (oxide layer) ซึ่งโมโนเมอร์ที่ช่วยเพิ่มการยึดติดจะสามารถยึดติดได้ดีกว่าการยึดติดบนพื้นผิวของโลหะเอง จึงทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดที่สูงขึ้น และทำให้การยึดติดทนทานมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย ดังการศึกษาของ Tanaka (1981) ที่พบว่า การปรับสภาพพื้นผิวโลหะโดยการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก และนำไปทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วนำไปยึดด้วยเรซินซีเมนต์ที่มีโฟร์เมตตาเอ็มเอ็มเออีพ็อกซีอะคริเลตที่ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้นการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดเป็น 25.8 เมกะปาสคาล ซึ่งมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพผิว(25.5 เมกะปาสคาล) เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อไปผ่าน

ขบวนการเทอร์โมไซเคิล (thermocycling) จำนวน 1,000 รอบ ค่าความแข็งแรงดึงยึดมีค่า 17.7 เมกะปาสคาล และหลังจากผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 อาทิตย์พบว่า มีค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงสุดที่สุดคือ 27.7 เมกะปาสคาล ในขณะที่กลุ่มที่ไม่มีกรปรับสภาพพื้นผิว โลหะเมื่อไปทำการผ่านขบวนการเทอร์โมไซเคิลหรือการแช่น้ำเป็นเวลา 15 อาทิตย์ พบว่าชิ้น ตัวอย่างทุกชิ้นหลุดออกจากกันที่บริเวณรอยต่อของผิวโลหะกับเรซินซีเมนต์ ซึ่งการศึกษาของ Matsumura และคณะ(1996) พบว่าเมื่อใช้ไพรเมอร์ที่ประกอบด้วย โมโนเมอร์ที่เป็นอนุพันธ์ของ กรดคาร์บอกซิลิก หรือกรดฟอสฟอริก ช่วยเพิ่มการยึดติดของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมกับ เรซินซีเมนต์ชนิดไฟร์เมตตาเอ็มเอ็มเอทีบีพีเรซิน โดยพบว่าการใช้ไพรเมอร์ที่ประกอบด้วย เอ็มดีพี (MDP, 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate) ร่วมกับเรซินชนิดเอ็มเอ็มเอทีบีพีเรซินนั้นให้ค่าความแข็งแรงยึดเฉือน (shear bond strength) สูงที่สุดคือ 51 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าค่าความแข็งแรงยึดเฉือนที่ได้จากการใช้ไพรเมอร์ที่ประกอบด้วยไฟร์เมตตา ร่วมกับเรซินชนิด เอ็มเอ็มเอทีบีพีเรซิน ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาอื่นๆ เช่น การศึกษาของ Taira และคณะ (1995) ที่ทำการศึกษาโลหะชนิดพื้นฐานไทเทเนียมที่เพิ่มการยึดติดกับเรซินได้โดย การใช้เมทาอะคริเลตฟอสเฟตไพรเมอร์ (methacrylate phosphate primer) และการศึกษาของ Yoshida และคณะ (1996) พบว่าค่าความแข็งแรงยึดเฉือนระหว่างโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมกับเรซินซีเมนต์ที่ประกอบด้วยเอ็มดีพีนั้นมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงยึดเฉือนกับเรซินชนิดไฟร์เมตตาเอ็มเอ็มเอทีบีพี นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแรงยึดเฉือนที่ได้จากการยึดกันของโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมกับเรซินซีเมนต์ที่ประกอบด้วยเอ็มดีพี ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้สารไพรเมอร์ เอ็มดีพีร่วมด้วยนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันคือประมาณ 60 เมกะปาสคาล ดังนั้นการเตรียมพื้นผิวโลหะผสมชนิดพื้นฐานให้มีการยึดติดที่ดีทำได้โดยใช้ไพรเมอร์ที่ประกอบด้วยเอ็มดีพี แต่อย่างไรก็ตามแม้จะใช้โมโนเมอร์เพิ่มการยึดติดแล้วทำให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงขึ้นก็ยังพบว่า ความล้มเหลวของการยึดติดส่วนใหญ่เกิดที่พื้นผิวรอยต่อระหว่างโลหะกับเรซินซีเมนต์ (Yoshida, 1993) และพบว่าการยึดติดระหว่างโลหะมีตระกูลกับเรซินซีเมนต์ที่มีสารเพิ่มการยึดติดนั้นยังไม่ได้ ดังนั้นจึงมีวิธีการปรับเปลี่ยนพื้นผิวโครงโลหะชนิดอื่นเพิ่มเติม เช่นการเคลือบพื้นผิวด้วยซิลิกา ร่วมกับการใช้สารคู่ควบไฮเลนเป็นองค์ประกอบทาที่พื้นผิวโครงโลหะก่อนใช้เรซินซีเมนต์ การปรับเปลี่ยนพื้นผิวโครงโลหะให้มีดีบุก (tin plating) ทำให้เกิดพื้นผิวที่ขรุขระเกิดการยึดติดกับเรซิน โดยอาศัยการยึดติดเชิงกลในระดับจุลภาค และการเกิดออกไซด์ของดีบุก (tin oxide) บนผิวโครงโลหะเพื่อเกิดการยึดติดเชิงเคมีกับ เรซินซีเมนต์ และอีกวิธีที่ใช้เพิ่มการยึดติด ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกกว่าวิธีอื่นๆคือ การใช้สารเคมีที่เรียกว่า เมทอลไพรเมอร์ (metal primer) ซึ่งเป็นสารคู่ควบ

ที่เป็นโมโนเมอร์ที่มีหมู่ทำหน้าที่หลัก 2 หมู่(bifunctional monomers) โดยปลายหนึ่งจะไปยึดกับโลหะมีตระกูล ดังนั้นจึงเกิดการยึดติดทางเคมีระหว่างเรซินซีเมนต์กับโลหะมีตระกูล ซึ่งการศึกษาของ Kojima, Kadoma และ Imai (1987) ได้รายงานถึงการใช้อย่างมีประสิทธิภาพของ 6-(4-vinylbenzylpropyl) amino-1, 3, 5-triazine-2, 4-dithione (VBATDT) เป็นไพรเมอร์สำหรับการเพิ่มการยึดติดกับโลหะมีตระกูล ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ วี-ไพรเมอร์ (V-primer, Sun Medical Co., Shiga, Japan) การศึกษาของ Ikushima และ Sakuma (1993) ได้รายงานถึงการใช้อย่างมีประสิทธิภาพของไทโอฟอสฟอริก (thiophosphoric acid motiety, MEB) ที่ทำให้เกิดการยึดติดที่ทนทานของโลหะผสมกับเรซินซีเมนต์ได้ดี ซึ่งเป็นที่รู้จักกันทางการค้าคือ จีซีเมทัลไพรเมอร์ (GC Metal Primer, GC co., Tokyo, Japan) การศึกษาของ Taira และ Imai (1995) ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มการยึดติดของโลหะมีตระกูลกับเรซินที่ได้ผลค่าความแข็งแรงดึงยึดมากที่สุดพอๆกับค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะผสมชนิดพื้นฐานกับเรซินคือวิธีที่ใช้ไทโอฟอสฟอริกเมทาอะคริเลต (thiophosphoric methacrylate) ร่วมกับฟอสเฟตโมโนเมอร์ (phosphate monomer) ซึ่งสามารถพัฒนาให้เกิดการยึดติดที่ทนทานมากขึ้นได้โดยการใช้ร่วมกับเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที ซึ่งพบว่าภายหลังการผ่านเทอร์โมไซคลิ่งระหว่างอุณหภูมิ 4 และ 60 องศาเซลเซียส จำนวน 2,000 รอบ ค่าความแข็งแรงดึงยึดโดยเฉลี่ยคือ 23.9 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าพอกับค่าความแข็งแรงดึงยึดที่ได้จากการยึดติดกันของเรซินซีเมนต์กับโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมที่ใช้สารเพิ่มการยึดติดที่ประกอบด้วยเอ็มดีพี และความล้มเหลวของการยึดติดส่วนมากเป็นความล้มเหลวของการยึดติดกันของเรซินเอง (cohesive failure) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Antoniadou, Kern และ Strub (2000) พบว่าการใช้ไพรเมอร์ที่ประกอบด้วยเอ็มดีพีและวีบีเอทีดีทีในการเตรียมพื้นผิวโลหะมีตระกูลจะช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะมีตระกูล(Au-Pt-Pd-Ag-In)กับเรซินซีเมนต์ชนิดที่ประกอบด้วยเอ็มดีพีโดยมีค่าความแข็งแรงดึงยึดประมาณ 35 เมกะปาสคาล และเมื่อเกิดความล้มเหลวของการยึดติดส่วนมากจะเกิดความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินเอง (cohesive failure) ซึ่งต่างจากกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารไพรเมอร์ แต่ปรับเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวให้มีความขรุขระโดยการเป่าทรายด้วยผงลูมินาขนาด 50 ไมโครเมตรใช้แรงดัน 0.25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าความล้มเหลวการยึดติดส่วนมากเกิดที่บริเวณรอยต่อระหว่างเรซินกับพื้นผิวโลหะ (adhesive failure) และมีค่าความแข็งแรงดึงยึดเพียง 23 เมกะปาสคาลเท่านั้น แต่ในทางกลับกันพบว่าการใช้โมโนเมอร์ วีบีเอทีดีทีในกลุ่มโลหะผสมชนิดพื้นฐานนั้นไม่ได้มีผลเพิ่มการยึดติดระหว่างเรซินชนิดเอ็มเอ็มเอทีบีกับโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม หรือ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Kojima et al., 1987; Ohno,

Araki, and Endo, 1992; Yoshida et al., 1993) การเพิ่มการยึดติดของโลหะมีตระกูลยังสามารถทำได้โดยวิธีการใช้ดีบุกเคลือบผิวโลหะได้ด้วย ดังการศึกษาของ Imbery และ Davis (1993) ที่รายงานว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะผสมทองประเภทที่ 3 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยดีบุกด้วยระบบของ Kura Ace Mini (J Morita USA) กับเรซินชนิดที่มีบิสฟีนเอและเอ็มดีพีมากกว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดของกลุ่มที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวโลหะด้วยดีบุก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ มีค่า 12 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังมีอีกหลายการศึกษาที่แสดงถึงการเปรียบเทียบการยึดติดของโลหะผสมชนิดต่างๆที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรม กับเรซินซีเมนต์ต่าง ๆ เช่น การศึกษาของ Sen , Nayir และ Pamuk (2000) ซึ่งศึกษาค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างโลหะมีตระกูลสูง(high noble metal) คือ มีทองผสมอยู่มากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โลหะมีตระกูล (noble metal) คือ มีธาตุโลหะมีตระกูลผสมอยู่มากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และโลหะผสมชนิดพื้นฐาน ซึ่งทั้งหมดผ่านการเตรียมสภาพผิวด้วยการเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 250 ไมโครเมตร แล้วนำไปยึดกับเคลือบฟัน โดยใช้เรซินซีเมนต์ 2 ชนิดคือ ชนิดไฟร์เมตตาเอ็มเอ็มเอทีบีวีเรซิน (SuperBond C&B) และชนิดบิสฟีนเอ (Panavia-Ex) แล้วนำไปผ่านกระบวนการเทอร์โมไซเคิลที่อุณหภูมิ 5 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 500 รอบ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดของแต่ละเรซินที่ใช้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ในแต่ละกลุ่มเรซินที่ใช้พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดของโลหะชนิดพื้นฐานสูงที่สุด รองลงมาคือ กลุ่มโลหะมีตระกูลและค่าต่ำสุดคือ กลุ่มโลหะมีตระกูลสูง โดยในกลุ่มที่ใช้เรซินซูเปอร์บอนด์ มีค่า 11.8, 8, และ 4.9 เมกะปาสคาลตามลำดับ และในกลุ่มที่ใช้เรซินพานาเวียมีค่า 12, 7.4, และ 5.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อดูความล้มเหลวของการยึดติดพบว่า กลุ่มโลหะพื้นฐานส่วนมากเกิดความล้มเหลวของการยึดกันของเรซิน (cohesive failure) แต่กลุ่มโลหะมีตระกูลและกลุ่มโลหะมีตระกูลสูงจะเกิดความล้มเหลวแบบผสม คือ ทั้งแบบที่เกิดความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินและความล้มเหลวบริเวณรอยต่อระหว่างเรซินกับพื้นผิวโลหะ

การศึกษาของ Petrie และคณะ (2001) เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงยึดของโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-เบริลเลียมที่ผ่านการปรับลักษณะผิวโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 12 และกรดไนตริกร้อยละ 4 โลหะผสมทอง-พัลลาเดียม (Au-Pd alloy) ที่ปรับสภาพผิวโดยการเป่าทรายและเคลือบผิวด้วยดีบุก และโลหะผสมทอง-พัลลาเดียมที่ปรับสภาพผิวโดยการเป่าทรายและทาด้วยไฟร์เมอร์ (Alloy Primer, Kuraray Co. Ltd, Osaka, Japan) ซึ่งยึดกับเคลือบฟันด้วยเรซินชนิดบิสฟีนเอที่มีเอ็มดีพีเป็นโมโนเมอร์ช่วยเพิ่มการยึดติด พบว่ากลุ่มโลหะผสมทอง-พัลลาเดียมที่ใช้ไฟร์เมอร์ มีค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงสุดคือ 13.4 เมกะปาสคาล รองลงมาคือ กลุ่ม

โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-เบริลเลียม คือ 10.6 เมกะปาสคาลและต่ำสุดคือ กลุ่มโลหะผสมทอง-พัลลาเดียมที่เคลือบผิวด้วยดีบุกคือ 0.9 เมกะปาสคาล ซึ่งผลการศึกษานี้ตรงข้ามกับผลที่ได้จากการศึกษาของ Parsa และคณะ(2003) ที่พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดของกลุ่มโลหะผสมชนิดพื้นฐานนิกเกิล-โครเมียม-เบริลเลียมที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการเป่าทรายมีค่าสูงสุดคือ 10.6 เมกะปาสคาล รองลงมาคือ กลุ่มโลหะมีตระกูลทอง-พัลลาเดียมที่ปรับสภาพผิวโดยการเคลือบผิวด้วยดีบุกคือ 9.33 เมกะปาสคาล กลุ่มที่มีค่าต่ำสุดคือ กลุ่มโลหะมีตระกูลทอง-พัลลาเดียมที่ปรับสภาพผิวโดยใช้อัลลอยด์ไฟรเมอร์ คือ มีค่า 6.11 เมกะปาสคาลเท่านั้น แต่ที่เหมือนกันของ 2 การศึกษานี้คือความล้มเหลวที่เกิดขึ้นส่วนมากเป็นแบบผสมคือ มีทั้งที่เกิดความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินและความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างโลหะกับเรซิน

การยึดติดระหว่างเซรามิกกับเรซินซีเมนต์ (resin-ceramic bonding)

การยึดติดของเรซินซีเมนต์กับเซรามิกจะเกิดขึ้นได้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวที่จะนำมายึดติดกันทั้งในด้านลักษณะเชิงกลในระดับจุลภาค และ คุณสมบัติทางเคมี การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวเซรามิกเชิงกลในระดับจุลภาคทำได้โดยการทำพื้นผิวขรุขระโดยใช้เข็มกรอพื้นผิวเพชรอย่างหยาบ (coarse diamond bur) การเป่าทราย(sandblast) หรือ การใช้กรดชนิดต่างๆมากัดพื้นผิวเซรามิก (Thurmond, Barkmeier, and Wilwerding, 1994) ซึ่งส่วนมากนิยมใช้กรดกัดแก้ว (hydrofluoric acid) (Calamia, 1985; Horn, 1983) และกรดฟอสฟอริก (Hayakawa et al., 1992; Kamada, Yoshida and Atsuta, 1998) ดังการศึกษาของ El Zohairy และ คณะ (2003) รายงานว่าการทำให้พื้นผิวของเซรามิกชนิดที่มีอนุภาคของเฟลสปาร์ชนิดละเอียด (fine-particle feldspar ceramic block) ขรุขระโดยใช้กรดกัดแก้วทำให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดระดับจุลภาค (microtensile bond strength, μ TBS) สูงกว่ากรดฟอสฟอริก โดยกลุ่มที่ใช้กรดกัดแก้วร่วมกับการใช้สารคู่ควบไซเลนได้ค่ากำลังแรงยึดระดับจุลภาค 28.7 เมกะปาสคาล แต่กลุ่มที่ใช้กรดฟอสฟอริกร่วมกับการใช้สารคู่ควบไซเลนได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดระดับจุลภาคเพียง 11 เมกะปาสคาลเท่านั้น และผลการทดสอบการแตกหักพบว่าเกิดความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างเรซินซีเมนต์กับเซรามิคร้อยละ 60 แต่ถ้าผ่านการเก็บในน้ำ 28 วัน พบว่ามีความล้มเหลวที่รอยต่อนี้ร้อยละ 94.2 การศึกษาของ Oh และ Shen (2005) พบว่าลักษณะความขรุขระของพื้นผิวเซรามิกมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงยึดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งลักษณะของความขรุขระของพื้นผิวขึ้นกับสัดส่วนปริมาณสารพื้น (matrix) กับผลึก (crystal) และการกระจายของขนาดผลึกที่ใช้ โดยฟลูออโรอะปาไทต์ ฟิเนียร์ริงเซรามิก (fluoroapatite veneering ceramic) มีลักษณะพื้นผิวขรุขระที่หยาบที่สุด รองลงมาคือ เซรามิกที่มีลิวไซต์เป็นสารหลัก (leucite-based

core ceramic) และสุดท้ายคือเซรามิกที่มีลิเทียมไดซิลิเกตเป็นสารหลัก (lithiadiasilicate-based core ceramic) ซึ่งมีการกระจายของผลึกชนิดละเอียดเป็นรูปแบบที่แน่นอน พบว่าเมื่อปรับลักษณะพื้นผิวเซรามิกเหล่านี้ โดยการเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 50 ไมครอน แล้วตามด้วยการกัดแก้วที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 นาน 20 นาที ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดระหว่างคอมโพสิตกับเซรามิกมีค่าสูงที่สุด โดยกลุ่มเซรามิกที่มีลิเทียมไดซิลิเกตเป็นสารหลักได้ค่าสูงที่สุดคือ 23.1 เมกะปาสคาล รองลงมาคือเซรามิกที่มีลิวิไซท์เป็นสารหลัก 13.5 เมกะปาสคาล ส่วนกลุ่มที่ค่าน้อยที่สุด คือ ฟลูออโรอะปาไทต์วีเนียร์ริงเซรามิก ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงยึดเพียง 9.3 เมกะปาสคาลเท่านั้น นอกจากนี้ในเซรามิกทุกกลุ่มนี้เมื่อทำการปรับลักษณะพื้นผิวโดยใช้การเป่าทรายเพียงอย่างเดียว พบว่าชิ้นตัวอย่างหลุดออกจากกันขณะตัดทุกชิ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทำได้โดยใช้สารเคลือบไซเลนในการทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโพลีเมอร์ในเรซินซีเมนต์และสารอนินทรีย์ในเซรามิก (Aida, Hayagawa and Mizukawa, 1995; Barghi, Berry and Chung, 2000) หรือการใช้วิธีเป่าทรายด้วยผงอลูมินา หรือ อนุภาคซิลิกาแขวนลอย (colloidal silica) ที่เรียกว่า ไตรโบเคมีคอลโคตติ้ง (tribochemical coating) ในการเปลี่ยนให้พื้นผิวของเซรามิกมีซิลิกามากขึ้นแล้วจึงไปใช้ร่วมกับสารเคลือบไซเลนต่อไป โดยเซรามิกชนิดที่สามารถใช้กัดแก้วได้คือ ชนิดที่มีเมทริกซ์ที่เป็นแก้วมาก ได้แก่ เซรามิกดั้งเดิมที่มีเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบหลัก และ ไอพีเอส เอ็มเพรส 1 และ 2 (IPS Empress 1 และ 2) เซรามิกชนิดที่ใช้กัดแก้วไม่ได้หรือได้เล็กน้อย คือพวกอลูมินาที่ถูกแทรกซึมด้วยแก้ว (glass infiltrated alumina) อลูมินัมออกไซด์ (aluminum oxide) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (zirconium oxide ceramic) (Derand and Derand, 2000) ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะ (metal oxide base) ได้แก่ อินซีแรม (In-Ceram) และ โพรเซรา (Procera) ดังนั้นเซรามิกแบบดั้งเดิมที่มีเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไอพีเอสเอ็มเพรส (IPS Empress) จึงควรมีการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว โดยการใช้อกัดแก้วแล้วตามด้วยการทาด้วยสารเคลือบไซเลน (Ozcan and Vallittu, 2003; Janda et al., 2003, Spohr et al., 2003) ซึ่ง Spohr และคณะ (2003) รายงานว่าเซรามิกไอพีเอส เอ็มเพรส ทู (IPS Empress 2) เมื่อผ่านการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวโดยใช้อกัดแก้วเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 20 วินาที ร่วมกับการใช้สารเคลือบไซเลนแล้วจะได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงที่สุดคือ 25.6 เมกะปาสคาลแต่ส่วนมากเป็นความล้มเหลวแบบผสมคือมีทั้งที่เกิดความล้มเหลวของการยึดกันของ เรซินและความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างเซรามิกกับเรซิน

ส่วนเซรามิกชนิดที่ไม่ได้มีสารพื้นที่เป็นแก้วเป็นองค์ประกอบนั้นต้องผ่านกระบวนการไตรโบเคมีคอลโคตติ้ง (Rocatec) เพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยึดกับเรซินซีเมนต์ให้มากขึ้น (Sun et

al., 2000; Ozcan and Vallittu, 2003) Janda และคณะ (2003) รายงานว่าการใช้เปลวไฟบนบนพื้นผิวเซรามิก (flame treatment) ชนิดอินซีแรมอลูมินาร่วมกับการเคลือบผิวด้วยซิลิกาโดยใช้เปลวไฟ (flame silanization) จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงเพียงพอ คือ 23 เมกะปาสคาล ขณะที่เมื่อใช้วิธีดังกล่าวนี้กับกลุ่มของอินซีแรมเซอร์โคเนียออกไซด์จะมีค่าความแข็งแรงดึงยึดต่ำกว่า คือ 13 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังมีรายงานอื่นที่พบว่าวิธีไตรโบเคมีคอลโคตติง สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยึดของอินซีแรม (Ozcan, Alkumru and Gemalmaz, 2001) และสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยึดของโพรเซราได้อย่างมีนัยสำคัญ (Blixt et al., 2000; Blatz, Sadan, and Blatz, 2003) แต่วิธีนี้ก็ได้เพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยึดของเซรามิกชนิดเซอร์โคเนียที่ถูกทำให้มีความเสถียรภาพโดยยิเทียมออกไซด์ (yttrium-oxide-partially-stabilized zirconium oxide) (Kern and Wegmer, 1998) การศึกษาของ Kim และคณะ (2005) รายงานไว้ว่าเซรามิกอินซีแรมอลูมินาและเซรามิกเซอร์โคเนียควรเปลี่ยนแปลงพื้นผิวโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยซิลิกา (Rocatec Soft) แล้วใช้ร่วมกับสารคู่ควบไฮเลน ส่วนเซรามิกเอ็มเพรสทูควรเปลี่ยนแปลงพื้นผิวโดยวิธีการเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 50 ไมครอนแล้วตามด้วยการใช้กรดกัดแก้วเข้มข้นร้อยละ 4 นาน 5 นาที กัดพื้นผิวและใช้สารคู่ควบไฮเลนจะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดที่สูงที่สุดคือ 18.6, 17.3 และ 17.7 เมกะปาสคาลตามลำดับ ซึ่งผลของการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Filho และคณะ (2005) ที่รายงานไว้ว่า การยึดติดของเซรามิกเอ็มเพรส 2 กับเรซินคอมโพสิตที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงที่สุดทำได้โดยการปรับสภาพผิวของเซรามิกด้วยกรดกัดแก้ว แล้วตามด้วยการทาสารคู่ควบไฮเลน นอกจากนี้ยังพบว่ากลุ่มที่ใช้เฉพาะสารคู่ควบไฮเลนเพียงอย่างเดียวในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวเซรามิก จะมีค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เฉพาะกรดกัดแก้วเท่านั้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนพื้นผิวเซรามิกทางด้านเคมีโดยใช้สารคู่ควบไฮเลนนั้น จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยึดติดของเรซินกับเซรามิกแต่อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะปรับเปลี่ยนพื้นผิวเซรามิกเอ็มเพรสทูด้วยวิธีใดก็ตาม แล้วทำให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงขึ้นแต่ความล้มเหลวที่พบก็ยังเป็นแบบผสมคือ ความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินและความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างเซรามิกกับเรซิน (Filho et al., 2005; Spohr et al., 2003)

Hummel และ Kern (2003) รายงานว่าเซรามิกโพรเซราเมื่อเตรียมพื้นผิวของแผ่นเซรามิกโดยเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 50 ไมครอนที่แรงดัน 2.5 บาร์ ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการเป่าทราย และเมื่อนำกลุ่มที่ไม่ได้เป่าทรายไปผ่านกระบวนการเทอร์โมไซคลิง พบว่าแผ่นเซรามิกหลุดออกจากเรซินคอมโพสิตได้เองทุกชิ้น ดังนั้นแสดงว่าเซรามิกโพรเซราที่ไม่ทำการเป่าทรายไม่สามารถเกิดการยึดติดทางเคมีที่มีความเสถียรภาพได้เลยไม่ว่าจะ

ใช้ระบบการยึดติด (bonding system) ระบบใดๆ ทั้งแบบที่ใช้ เรซินซีเมนต์ที่มีโมโนเมอร์ช่วยเพิ่ม การยึดติด หรือ ใช้ไพรเมอร์เสริมการยึดติด หรือ การใช้สารคู่ควบไซเลนก็ตาม แต่เมื่อปรับเปลี่ยน พื้นผิวเซรามิกโพรเซราโดยการเป่าทรายแล้วใช้ร่วมกับเรซินซีเมนต์ที่มีโมโนเมอร์ช่วยเพิ่มการยึดติด เช่น พานาเวียร์ 21 ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงขึ้นและเป็นการยึดติดที่มีความเสถียรภาพ เนื่องจากพบว่าหลังจากผ่านขบวนการเทอร์โมไซคลิง 37,000 รอบแล้วค่าความแข็งแรงดึงยึดก็ไม่ได้ต่างจากกลุ่มที่ยังไม่ผ่านขบวนการเทอร์โมไซคลิง (45.1 เมกะปาสคาล) คือ 37.1 เมกะปาสคาล และความล้มเหลวของการยึดติดที่พบส่วนมากเป็นแบบความล้มเหลวของการยึดกันของเรซินเอง ค่าความแข็งแรงดึงยึดของเซรามิกกับเรซินซีเมนต์และความคงทนของแรงยึดนอกจากจะขึ้นกับ พื้นผิวของเซรามิกแล้วสิ่งสำคัญอีกประการคือ ชนิดของสารยึดเรซินที่ใช้อีกด้วย เช่น การศึกษา ของ Hummel และ Kern (2003) พบว่าเมื่อใช้เรซินซีเมนต์ที่มีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟอสเฟต เช่น พานา เวียร์ 21 กับเซรามิกชนิดอคริลิเนียมออกไซด์โพรเซรา ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงสุด และ ค่าความแข็งแรงดึงยึดนี้ก็ลดลงไม่มากแม้จะผ่านกระบวนการเทอร์โมไซคลิง 37,500 รอบแล้วก็ ตาม แต่ถ้าใช้เรซินซีเมนต์ชนิดที่มีบิสฟีนอลอีเอเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น แวริโอลิงค์ จะพบว่าแม้จะ ทำการเป่าทรายบนพื้นผิวเซรามิกแล้วก็ควรหาสารคู่ควบไซเลนร่วมด้วยเพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรง ดึงยึดให้สูงขึ้น เรซินซีเมนต์ชนิดไฟร์เมตตาเอ็มเอ็มเอทีบีบี เช่น ซุปเปอร์บอนด์ซีแอนด์บี แม้จะไม่ ใช้สารคู่ควบไซเลนให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดสูงพอๆ กับแวริโอลิงค์ที่ใช้สารคู่ควบไซเลนแต่เมื่อผ่าน การเทอร์โมไซคลิงแล้ว พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยึดในกลุ่มซุปเปอร์บอนด์ซีแอนด์บี ลดลงอย่างมี นัยสำคัญขณะที่กลุ่มแวริโอลิงค์ ลดลงเล็กน้อย ดังนั้นเซรามิกโพรเซราเมื่อใช้เรซินซีเมนต์ที่มีโมโน เมอร์ที่ช่วยเพิ่มการยึดติด (adhesive phosphate monomer, MDP) เช่น พานาเวียร์เอฟ อย่าง เดียวหรือจะใช้ร่วมกับการใช้สารคู่ควบไซเลนหรือใช้หลังจากที่เซรามิกโพรเซราผ่านกระบวนการ ไบเคมีคอลโคตติง หรือวิธีการเคลือบผิวด้วยไซเลน พบว่าจะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดเป็นเวลา ยาวนาน (Kern and Wegner, 1998; Wegner and Kern, 2000; Blatz et al., 2003) การศึกษา ของ Ernst และคณะ (2005) พบว่าเรซินซีเมนต์ชนิดไฟร์เมตตาเอ็มเอ็มเอทีบีบี (ซุปเปอร์บอนด์ซี แอนด์บี) เมื่อใช้ยึดกับเซรามิกชนิดเซอรโคเนียมออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนพื้นผิวโดยวิธีไตรโบเคมีคอล โคตติง (Rocatec) หรือการใช้สารคู่ควบไซเลน (Porcelain liner M) หรือไม่มีการปรับเปลี่ยนพื้นผิว เซรามิกเลยก็ให้ค่าความแข็งแรงดึงยึดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโมโนเมอร์ไฟร์ เมตตา สามารถเกิดพันธะยึดติดเชิงเคมีกับออกไซด์ของโลหะได้และการศึกษานี้พบว่าค่าความ แข็งแรงดึงยึดที่ได้จากซุปเปอร์บอนด์ ซีแอนด์บี สูงกว่าเรซินซีเมนต์พานาเวียร์ ซึ่งตรงข้ามจากผลที่ ได้จากการศึกษาของ Hummel และ Kern (2003) ที่ค่าความแข็งแรงดึงยึดที่ได้จากเรซินซีเมนต์พา

นาเวียร์สูงกว่าซูปเปอร์บอนดีซีแอนด์บี เนื่องจากชนิดของเรซินซีเมนต์ที่ใช้และวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันด้วย (Ernst et al., 2005)

การยึดติดระหว่างเรซินคอมโพสิตที่บ่มตัวแล้วและเรซิน (resin – cured resin composite bonding)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเรซินคอมโพสิตให้มีคุณสมบัติดีขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานทางอ้อมได้ เช่น เคลือบฟันเทียม ชีงงานอุดฟัน และครอบฟัน โดยการขึ้นรูปชิ้นงานและทำการบ่มให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ที่สมบูรณ์ภายนอกของปากด้วยแสง ความร้อน หรือความดัน (Shortall, Baylis and Wilson, 1996) แล้วจึงนำชิ้นงานไปยึดบนตัวฟันด้วยเรซินซีเมนต์ ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถสร้างรูปร่าง(contour)ของชิ้นงานบูรณะได้ดีมีการแนบสนิทตามขอบ เป็นการลดการเกิดรูรั่วตรงขอบวัสดุบูรณะอันเนื่องมาจากแรงหดตัวของเรซินคอมโพสิตขณะเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ (Robinson et al., 1987) และเนื่องจากสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ที่สมบูรณ์มากขึ้นกว่าการอุดโดยตรง(direct restoration) ทำให้มีโมโนเมอร์เหลือน้อย เรซินคอมโพสิตจึงมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นเช่นเพิ่มความแข็งแรงคัดขวาง และ ค่าความแข็งผิวในระดับไมโครเมตร (Powers et al., 1993; Razak and Harrison, 1997) ลดการดูดซึมของน้ำ ทำให้การผุพัง(degradation)ของเรซินคอมโพสิตลดลง(Anseth et al., 1996) ความสำเร็จในการบูรณะชนิดนี้ขึ้นกับการยึดระหว่างเรซินซีเมนต์กับเรซินคอมโพสิตที่บ่มตัวแล้ว ซึ่งเรซินคอมโพสิตที่บ่มตัวแล้วนี้มีโมโนเมอร์เหลือน้อย จึงเกิดการยึดติดเชิงพันธะเคมี(chemical bond)กับเรซินซีเมนต์ได้น้อยกว่าการอุดโดยตรง ทำให้ค่าความแข็งแรงยึด(bond strength)ที่รอยต่อระหว่างเรซินคอมโพสิตกับเรซินซีเมนต์มีค่าร้อยละ 25-74 ของความแข็งแรงของเรซินคอมโพสิต(cohesive strength) ดังนั้นการยึดในลักษณะนี้(delayed resin-resin bonding) จึงขึ้นกับการยึดเชิงกลระหว่างสารยึดเรซินกับผิวที่ขรุขระของเรซินคอมโพสิตที่บ่มตัวแล้ว(Vankerckhoven, Lambrechts and van Beylen et al., 1982) ซึ่งการทำให้พื้นผิวของเรซินคอมโพสิตขรุขระทำได้หลายวิธี เช่น การเป่าทราย(sandblast) หรือการใช้กรดกัด(Shortall et al., 1996) นอกจากนี้การใช้สารยึดเรซินชนิดที่ไม่มีอนุภาคเติมเต็มจะเพิ่มการยึดติดให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากไปเพิ่มความสามารถในการแผ่คลุม(wetting) และการแทรกซึมของเรซินซีเมนต์ได้(Vankerckhoven et al., 1982) การศึกษาของ Nilsson และคณะ(2000) พบว่าพื้นผิวเรซินคอมโพสิตที่ปรับสภาพด้วยการเป่าทรายและใช้สารคู่ควบไซเลน(gamma-methacryl-oxypropyl-3 methyl-silane) มีค่าความแข็งแรงยึดเฉือนสูงกว่ากลุ่มที่ขัดพื้นผิว(ground)เพียงอย่างเดียวและส่วนมากการแตกหักเป็นแบบระหว่างรอยต่อของผิวเรซินคอมโพสิตกับเรซินซีเมนต์ การศึกษาของ Tate, Deschepper and Powers(1993) พบว่าการปรับ

สภาพผิวด้วยกรดฟอสฟอริกทำให้เกิดความแข็งแรงดั่งยึดสูงกว่าการกัดด้วยกรดกัดแก้ว เนื่องจากกรดกัดแก้วทำให้เกิดการทำลายพื้นผิวของเรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริดได้มาก จึงเกิดการแตกหักที่รอยต่อระหว่างผิวเรซินคอมโพสิตกับเรซินซีเมนต์เป็นส่วนมาก และการศึกษาที่ยังพบว่าการใช้สารควบไซเลนไม่ได้มีผลต่อค่าความแข็งแรงดั่งยึด การศึกษาของ Shortall และคณะ(1996) พบว่าการเป่าทรายทำให้ค่าความแข็งแรงดั่งยึดมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและการใช้กรดฟอสฟอริก(acidulated phosphoric acid)ไม่ได้มีผลต่อค่าความแข็งแรงดั่งยึดและการใช้สารยึดเรซินก่อนทำการยึดกับเรซินซีเมนต์จะเพิ่มค่าความแข็งแรงดั่งยึดได้มากกว่ากลุ่มควบคุม(solid composite inlay material)ร้อยละ 66

ไฮบริดไดซ์อีนาเมล (hybridized enamel)

ไฮบริดไดซ์อีนาเมล คือ ชั้นที่เกิดขึ้นจากการผสมผสานระหว่างเคลือบฟันและเรซิน ซึ่งเกิดขึ้นโดยการละลายแร่ธาตุ (demineralization) ของพื้นผิว (surface) และ ชั้นใต้พื้นผิวเคลือบฟันด้วยกรด แล้วตามด้วยการแทรกซึมของโมโนเมอร์เข้าไปและเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แข็งตัวอยู่ในนั้น (Nakabayashi, 1982, cited in Nakabayashi and Pashley, 1998: 6-7) ซึ่งชั้นไฮบริด (hybrid layer) นี้ สามารถต้านทานต่อกรดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเรซินที่แทรกซึมเข้าไปนี้จะไปห่อหุ้มผลึกอะพาไทต์ในเคลือบฟันเอาไว้ โดยเรซินที่อยู่บนชั้นนี้จะอยู่ในลักษณะแท่งเล็กๆ (microtag) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 ไมโครเมตรอยู่เป็นจำนวนมาก (Gwinnett and Matsui, 1967; Bayne and Taylor, 1995, cited in Nakabayashi and Pashley, 1998: 9) และจากการศึกษาโครงสร้างและรูปแบบของการเชื่อมยึดของสารยึดเรซินกับเคลือบฟันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง (optical microscopy) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) พบว่าการเชื่อมยึดของสารยึดเรซินกลุ่มที่ใช้กรดกัดแล้วล้างออก (etch & rinse approach) จะทำให้เกิดเรซินแทรกขนาดกว้างระดับไมโครเมตร (micrometer-wide resin tag) ในช่องว่างระหว่างผลึกเคลือบฟันและพบการเกิดขึ้นไฮบริดไดซ์อีนาเมล (hybridized enamel) ขึ้น ซึ่งจะพบมีเรซินแทรกขนาดระดับนาโนเมตร (nanometer sized resin tag) อยู่ภายในช่องว่างระหว่างผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ การศึกษาของ Hannig และคณะ (2002) พบว่ากลุ่มที่ใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 37 กัดเคลือบฟันก่อนทาสารยึดเรซินที่ประกอบด้วยบิสฟีเอ็มเอ และทีอีจีเอ็มเอ พบว่าเกิดเรซินแทรกเล็ก 10 ไมโครเมตร และเกิดขึ้นไฮบริดไดซ์อีนาเมลคือ มีสารยึดเรซินไปแทรกอยู่ในช่องว่างภายในผลึกและระหว่างผลึกไฮดรอกซีอะพา

ไทต์ (intra-and inter-crystallite hybridization of enamel) หน้า 6.98 ไมโครเมตร ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดไฮบริดไดซ์อินามาเมลและการยึดติดที่ดี ขึ้นกับความสามารถในการถูกแทรกซึมของสารตั้งต้นที่ได้จากการใช้กรดในการเตรียมผิวเคลือบฟันและความสามารถในการแทรกซึมของเรซิน (Nakabayashi, 1992, cited in Nakabayashi and Pashley, 1998: 13) ซึ่งในเรื่องการใช้กรดเตรียมผิวเคลือบฟันเพื่อไปยึดกับเรซินนั้นประสบความสำเร็จตั้งแต่ยุคของ Buonocore ในปี ค.ศ. 1955 แล้ว โดยจุดประสงค์ของการกัดเคลือบฟันเพื่อทำความสะอาด กำจัดชั้นเสมียร์ (smear layer) เพิ่มความหยาบในระดับจุลภาค (microscopic roughness) (Retief et al, 1986) โดยไปกำจัดผลึกอะปาไทต์ในปริซึมเคลือบฟัน (prismatic mineral crystals) และผลึกอะปาไทต์ที่อยู่ระหว่างปริซึมของเคลือบฟัน (interprismatic mineral crystals) เพิ่มพลังงานพื้นผิว (surface free energy) เคลือบฟัน เพื่อให้โมโนเมอร์แทรกซึมได้ดี (Nakabayashi and Pashley, 1998: 37-38) และส่วนในเรื่องของเรซินก็มีการพัฒนากันมาเรื่อย ๆ โดย Masuhara และคณะ (1963) เริ่มนำทีบีบี (tri-n-butylborane, TBB) มาใช้เป็นตัวตั้งต้นการเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ของเมทิลเมทาอะคริเลต (methyl methacrylate, MMA) และพบว่าเอ็มเอ็มเอทีบีบีเรซินนี้สามารถใช้ได้ดีกับผิวเคลือบฟันที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวโดยใช้กรดกัดได้ด้วย (Masuhara et al., 1963, cited in Nakabayashi and Pashley, 1998: 11) แต่การเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ใช้เวลานาน (Miura et al, 1971, cited in Nakabayashi and Pashley, 1998: 11) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเพื่อหาโมโนเมอร์ที่ช่วยส่งเสริมการแทรกซึมของเรซิน โดย Nakabayashi และ Masuhara (1980) พบว่าโมโนเมอร์ที่ส่งเสริมให้เกิดการยึดติดของเรซินในเคลือบฟันได้ดี คือ 2-hydroxy-3-phenoxy-propyl methacrylate (HPPM) และเฮกเซนทีเอ็ม 2-hydroxy-3-2-naphthoxypropyl methacrylate (HNPM) โดยเฮกเซนทีเอ็มนี้ส่งเสริมการแทรกซึมของไตรเอทิลีนกลีคอลไดเมทาอะคริเลต (triethyleneglycol dimethacrylate, TEGDMA) เข้าไปในเคลือบฟันที่ผ่านการกัดด้วยกรดมาแล้ว (Gunadi and Nakabayashi, 1997) และพบว่าโฟร์เมตตา (4-methacryloyloxyethyl trimellitate anhydride, 4-META) นั้นเป็นโมโนเมอร์ที่ช่วยส่งเสริมการยึดติดของเรซิน (adhesion-promoting monomer) ได้ดีทำให้เพิ่มอัตราการแทรกซึมของโมโนเมอร์เอ็มเอ็มเอได้ (Ashizawa et al., 1992, cited in Nakabayashi and Pashley, 1998: 11)

นอกจากนี้ พบว่าถ้าใช้เวลาในการให้โมโนเมอร์แทรกซึมนานขึ้นยิ่งทำให้เกิดการแทรกซึมเข้าไปในสารตั้งต้นได้ลึกขึ้น (Gunadi and Nakabayashi, 1997) ปัจจัยที่มีผลต่อการแทรกซึมของโมโนเมอร์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ น้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์ที่ใช้เพราะอัตราการแทรกซึม (diffusion rate) มีค่าเท่ากับรากที่สอง (square root) ของน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งเมทิลเมทา

อะคริลิตมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 100 แต่โมโนเมอร์ตัวอื่นมีขนาดใหญ่กว่าเมทิลเมทาอะคริลิต
ดังนั้นเมทิลเมทาอะคริลิตจึงมีอัตราการแทรกซึมมากกว่าโมโนเมอร์ตัวอื่น (Nakabayashi and
Pashley, 1998: 28)