

## บทที่ 2

### บททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### วัสดุสร้างฐานพื้นเทียม

ในช่วงปี ค.ศ. 1840 หลังจาก ชาลส์กู๊ดเยียร์ (Charles Goodyear) ค้นพบวิธีการทำยางนึ่ง (vulcanised rubber) พื้นเทียมที่สร้างขึ้นจะมีองค์ประกอบหลัก คือ ยี่พื้นเทียมที่สร้างจากกระเบื้องเคลือบและฐานพื้นเทียมที่สร้างจากยางนึ่ง แต่ด้วยข้อด้อยในเรื่องของความสวยงาม สี รสชาติและกลิ่นของยางนึ่ง จึงมีความพยายามพัฒนาวัสดุชนิดอื่นมาใช้ทดแทน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1937 ดอกเตอร์ วอลเตอร์ ไรท์ (Dr. Walter Wright) และ เวอร์นอน บีโอเตอร์ (Vernon Beother) ได้พัฒนาพอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethylmethacrylate) ขึ้นมา หลังจากนั้นวัสดุชนิดนี้ก็ได้รับความนิยมในการใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างฐานพื้นเทียมจนถึงปัจจุบัน

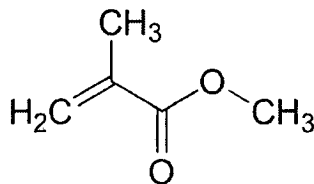
พอลิเมทิลเมทาคริเลตในทางทันตกรรม ถูกเตรียมแยกเป็นสองส่วน คือ ผงพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ เมทิลเมทาคริเลตซึ่งอยู่ในรูปของเหลว ข้อดีของวัสดุชนิดนี้ คือ การขึ้นรูปและขัดแต่งทำได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และราคาไม่แพง<sup>(15)</sup> ข้อด้อยของวัสดุชนิดนี้ คือ เปราะ แตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก รวมทั้งมีความต้านทานต่อความล้าในเนื้อวัสดุต่ำ ทำให้วัสดุแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทกหรือได้รับแรงปริมาณน้อยๆ กระทำซ้ำๆ ติดต่อกัน<sup>(4, 9)</sup> ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามนำพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น โพลีเอไมด์ (polyamides) อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) โพลีสไตรีน (polystyrene) ไวนิลอะคริลิก (vinyl acrylic) หรือไนลอน (nylon) มาใช้แทนพอลิเมทิลเมทาคริเลต แต่จากการศึกษาพบว่าวัสดุเหล่านี้มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงมากกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลต เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะช่องปากวัสดุจึงเกิดการบวม น้ำและเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว<sup>(5, 7)</sup> นักวิจัยบางกลุ่มพยายามปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยการเติมวัสดุของยางบิวทาไดอีนสไตรีน (butadiene styrene rubber) เข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เพื่อให้วัสดุมีความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมหรือเสริมวัสดุชนิดอื่นเข้าไปในเนื้อเรซินอะคริลิก เช่น แผ่นตะแกรงโลหะ<sup>(16)</sup> เส้นใยอะรามิด<sup>(17)</sup> เส้นใยพอลิเอทิลีน<sup>(18)</sup> หรือเส้นใยแก้ว<sup>(19)</sup> ทำให้วัสดุมีความทนทานเพิ่มขึ้น

การเติมเส้นใยแก้วในพอลิเมอร์เป็นกระบวนการเสริมความแข็งแรงที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีราคาถูก ในทางทันตกรรมมีการนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงแก่เรซินอะคริลิกที่ใช้สร้างฐานพื้นเทียมแต่ยังไม่เป็นที่นิยมใช้อย่าง

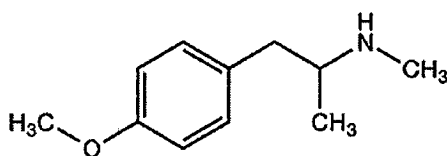
แพร่หลาย เนื่องจากเส้นใยสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายในท้องตลาดยังคงมีราคาแพงและขั้นตอนในห้องแลป  
ทันตกรรมยังคงมีความซับซ้อน<sup>(15)</sup> จากการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เสริม  
ความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้ว ได้แก่ จำนวนเส้นใย<sup>(20)</sup> การจัดเรียงตัวของเส้นใย<sup>(21)</sup> การทำให้เส้นใย  
อิมมัลด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์<sup>(22)</sup> และบทบาทของสารก่อกวนไขเลนต่อการยึดติดทางเคมีระหว่างเส้นใย  
แก้วกับพอลิเมอร์<sup>(23)</sup> การยึดติดที่แข็งแรงและมีคุณภาพระหว่างเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริม  
ความแข็งแรงและพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการพัฒนารอยร้าว  
บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมความแข็งแรงและเมทริกซ์รวมทั้งส่งผลต่อความต้านทานการแตกหัก  
ของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในช่องปากจากอุณหภูมิของ  
อาหารหรือเครื่องดื่ม ยังเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดความเค้นสะสมภายในเนื้อวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  
บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินเมทริกซ์ซึ่งมีปริมาณการขยายและหดตัวที่แตกต่างกัน  
เนื่องจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุทั้งสองชนิด ลักษณะ  
ดังกล่าวเหนี่ยวนำให้เกิดรอยร้าวบริเวณผิวรอยต่อและชักนำให้เกิดการพัฒนาของรอยร้าวในเนื้อวัสดุ  
ซึ่งสัมพันธ์กับกระบวนการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์<sup>(24)</sup> นอกจากนี้ รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุยัง  
ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมิติของช่องว่างภายในเนื้อวัสดุ ทำให้มีการไหลเข้าออกของน้ำผ่าน  
ช่องว่างดังกล่าว เกิดการทำลายพันธะพอลิเมอร์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิส<sup>(25)</sup> โดยโมเลกุลของน้ำที่  
ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุจะถ่างสายโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้ห่างจากกันหรือขาดออกจากกันส่งผลให้  
พอลิเมอร์อ่อนแอลง<sup>(26)</sup>

#### พอลิเมทิลเมทาคริเลต

เป็นอนุพันธ์ของเอทิลีน ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ ) ซึ่งภายในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ไวนิล ( $-\text{CH}=\text{CH}_2$ )  
อย่างน้อย 2 อนุกรม คือ อนุกรมที่ได้จากกรดอะคริลิก ( $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) และ อนุกรมจากกรดเมทาคริ  
ลิก ( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOH}$ ) (27) สูตรโครงสร้างโมเลกุล แสดงในรูปที่ 1



Methylmethacrylate (MMA)



Poly (methylmethacrylate): PMMA

### รูปที่ 1 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลต และพอลิเมทิลเมทาคริเลต

พอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นเรซินที่มีลักษณะโปร่งแสงคล้ายกระจก มีน้ำหนักโมเลกุลหนักตั้งแต่ 500 หน่วย ถึง 10,000 หน่วยขึ้นไป มีค่าความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร วัสดุจะอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส และสลายตัว (depolymerization) ในช่วงอุณหภูมิ 125-200 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์จะแยกตัวออกเป็น โมโนเมอร์ พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีความแข็งแรง (KHN) ค่อนข้างต่ำจึงเกิดการสึกกร่อนได้ง่าย โดยในสภาวะแห้งวัสดุมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 18-20 กิโลกรัมต่อกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นสารละลายอินทรีย์ เช่น โมโนเมอร์อะซีโตน และคลอโรฟอร์ม รวมทั้งสามารถละลายได้ในน้ำ (0.0028 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ภายใน 24 ชั่วโมง) สมบัติการดูดซับน้ำของพอลิเมทิลเมทาคริเลตขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อม โดยที่อุณหภูมิสูงวัสดุจะดูดซับน้ำได้เร็วและมากขึ้น แต่ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลมากการดูดซับน้ำของวัสดุจะเกิดน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า โดยทั่วไปพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถดูดซับน้ำได้ร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 0-60 องศาเซลเซียสภายใน 1 สัปดาห์<sup>17</sup>

## เส้นใยแก้วกับการเสริมความแข็งแรงฐานฟันเทียมเรซินอะคริลิก

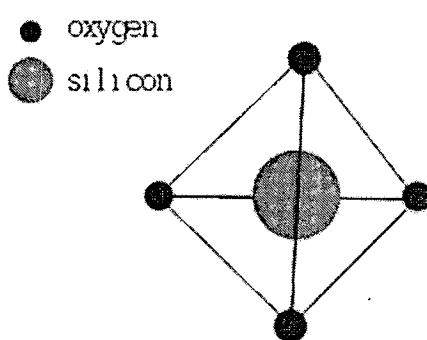
การแตกหักของฟันเทียมที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้งานในช่องปากเป็นผลมาจากแรงกระทำที่แตกต่างกันสองชนิด ได้แก่ แรงดัดโค้ง (tension force) และแรงอัด (compression force) โดยในระยะแรกเมื่อขึ้นฟันเทียมได้รับแรงเครียด (stress) ในปริมาณที่มากเพียงพอ จะก่อให้เกิดรอยร้าวในเนื้อวัสดุ ต่อมาเมื่อมีความเค้น (strain) กระทำซ้ำๆ ต่อฟันเทียม รอยแตกในเนื้อวัสดุจะขยายขนาดขึ้นเรื่อยๆ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลงจนกระทั่งสัดส่วนระหว่างแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ เนื้อวัสดุจึงหักจากกัน<sup>(29)</sup> จากลักษณะที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดความพยายามที่จะยับยั้งการขยายขนาดของรอยร้าวในเนื้อวัสดุเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและความคงทนของวัสดุโดยการเติมวัสดุอื่นๆ เข้าไปในเนื้อของพอลิเมทิลเมทาคริเลต เช่น เส้นลวดหรือโครงโลหะผสม<sup>(30)</sup> รวมทั้งวัสดุอัดแทรก (filler) เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยอารามิด (aramid fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fibers) พอลิเอทิลีนที่มีค่ามอดุลัสสูง (ultra high modulus polyethylene) เส้นใยไนลอน หรือพอลิเมอร์รูปโคน (rigid rod polymer filler)<sup>(31, 32)</sup>

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า การเสริมฐานฟันเทียมด้วยเส้นใยแก้วทำให้ฐานฟันเทียมสามารถทนต่อแรงดัดโค้งและแรงกระแทก<sup>(30, 33)</sup> ได้เพิ่มขึ้น และการเสริมความแข็งแรงแก่ฐานฟันเทียมด้วยเส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว หรือ เส้นใยพอลิเอทิลีนล้วนสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงให้แก่ฐานฟันเทียมได้ เพียงแต่ฐานฟันเทียมที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนจะพบการเปลี่ยนสีเนื่องจากการสะท้อนสีดำของเส้นใยคาร์บอน ส่วนฐานฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์จะมีความทนต่อการดัดโค้งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้ว นอกจากนี้สีของเส้นใยเคฟลาร์ยังส่งผลต่อความสวยงามของขึ้นฟันเทียมอีกด้วย จึงไม่นิยมนำมาใช้ในทางคลินิก<sup>(27)</sup> จากข้อจำกัดที่กล่าวมา เส้นใยแก้วจึงเป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้มากกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ

เส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรม ประกอบขึ้นจากเส้นใยแก้วขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งถูกถัก ทอ หรือร้อยเข้าด้วยกันเพื่อให้มีลักษณะเป็นผืน เส้นใยแก้วที่ผลิตขึ้นอาจมีรูปแบบการเรียงตัวในทิศทางเดียว (unidirectional) สองทิศทาง (bidirectional) หรืออาจเรียงตัวแบบสุ่ม (random oriented fibers) ก็ได้ ขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปเส้นใยแก้วจะถูกนำมาใช้เป็นฉนวนในงานอุตสาหกรรม หรือนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงแก่วัสดุประเภทพลาสติกหรือคอมโพสิต<sup>(34)</sup> องค์ประกอบพื้นฐานของเส้นใยแก้ว ได้แก่ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในรูปของสารประกอบพอลิเมอร์  $(\text{SiO}_2)_n$  ที่มีโครงสร้างเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (tetrahedron) กล่าวคือ มีอะตอมของซิลิกอน (silicon atom) อยู่

บริเวณศูนย์กลาง และล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน (oxygen atom) ที่มุมแต่ละด้าน โดยอะตอมของออกซิเจนนี้ สามารถสร้างการยึดติดกับ โมเลกุลอื่นได้

แก้วชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้น คือ แก้วโซดาไลม์ (soda lime) หรือแก้วเอ-กลาส (A-glass fiber) ซึ่งไม่ทนต่อสภาวะที่เป็นด่าง ต่อมาจึงมีการพัฒนาแก้วอี-กลาส (E-glass) ซึ่งสามารถทนต่อสภาวะความเป็นด่าง ขึ้นมาทดแทน อี-กลาสเป็นแก้วที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้การต่อกันของเส้นใย (continuous filament) และเป็นแก้วชนิดที่มีการผลิตขึ้นมากที่สุดในโลก<sup>(35)</sup> จากการศึกษาพบว่า อี-กลาส สามารถทนต่อการดัดโค้งได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแก้วชนิดอื่นๆ และสามารถทนต่อแรงเครียดได้ดีโดยไม่เกิดการบิดงอ และอี-กลาส ยังสามารถทนต่อการแตกหักได้ดีกว่า เอส-กลาส อีกด้วย<sup>(36)</sup>



## / รูปที่ 2 โครงสร้างของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในรูปของสารประกอบพอลิเมอร์ภายในเส้นใยแก้ว

เมื่อเปรียบเทียบการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้ว และพอลิเอทิลีนที่มีค่ามอดุลัสสูง พบว่า ฐานพื้นเทียบที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วมีค่าความแข็งแรงในแนวขวาง (transverse strength) มากกว่า แต่ค่าความทนต่อการอัดกระแทก พบว่า ฐานพื้นเทียบที่เสริมด้วยพอลิเอทิลีนที่มีค่ามอดุลัสสูง ให้ค่าที่มากกว่า<sup>(36)</sup>

จากการศึกษาเกี่ยวกับผลของการจัดเรียงตัวของเส้นใยต่อความแข็งแรงของวัสดุที่ถูกเสริมความแข็งแรง พบว่า ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยสามารถส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ โดยเส้นใยที่มีการเรียงตัวแบบทิศทางเดียวจะให้ความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่เรียงตัวหลายทิศทาง และเป็นที่

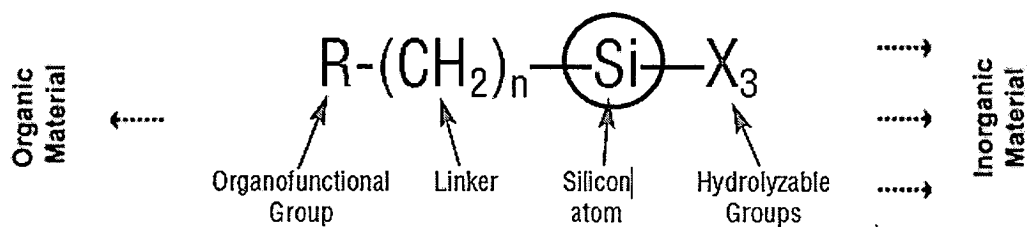
ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าการวางเส้นใยตามแนวแกนยาวของเส้นใยตั้งฉากกับแรงที่มากระทำ สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุได้ ในขณะที่หากวางแนวของเส้นใยขนานกับทิศของแรงที่มากระทำจะสามารถเสริมความแข็งแรงได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น<sup>(37, 38)</sup> นอกจากนั้นการวางตำแหน่งเส้นใย ถือเป็นปัจจัยประการหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ พบว่า การที่วางเส้นใยไว้บริเวณด้านที่มีความตึง (tension side) จะทำให้วัสดุสามารถทนต่อการดัดโค้งได้สูงกว่าการวางเส้นใยไว้บริเวณด้านที่ถูกแรงกระทำในลักษณะอัด (compression force)<sup>(36)</sup>

นอกจากนั้นยังพบว่า คุณภาพและความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นใยเสริมความแข็งแรงกับวัสดุที่ใช้สร้างฐานพื้นเทียมเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของฐานพื้นเทียมด้วย จากการศึกษา พบว่า ฐานพื้นเทียมเรซินอะคริลิกที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วอี-กลาส ที่ผ่านกระบวนการอุดรูปด้วยเรซิน (preimpregnated fiber) ซึ่งมีค่าการยึดติดกับพอลิเมอร์ของฐานพื้นเทียมสูง สามารถต้านทานต่อการแตกหักได้ดีกว่าฐานพื้นเทียมเรซินอะคริลิกที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีมอดุลัสสูง ที่เส้นใยมีค่าการยึดติดกับพอลิเมอร์ต่ำกว่า<sup>(36)</sup>

นอกจากการเตรียมผิวของเส้นใยแก้วโดยกระบวนการอุดรูปด้วยเรซินเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินเมทริกซ์ของฐานพื้นเทียมแล้วการทาสารก่อกวบไซเลนเพื่อปรับสภาพผิวของเส้นใยแก้วยังเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถเพิ่มค่าการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วและเรซินเมทริกซ์ และเพิ่มค่าพลังงานผิวให้แก่เส้นใยแก้ว<sup>(33, 39)</sup>

## สารก่อกวบไซเลน

Organofunctional trialkoxysilane coupling agent หรือสารก่อกวบไซเลน เป็นสารประกอบอินทรีย์ (organic compound) ที่มีอะตอมของซิลิคอน (Si) อยู่ภายในโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของสารก่อกวบไซเลน (รูปที่ 3) ประกอบด้วยปลายสองด้านซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยปลายด้านหนึ่งเป็นหมู่ทำหน้าที่ (functional group) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (แทนด้วยสัญลักษณ์ R) หมู่ทำหน้าที่ดังกล่าวอาจเป็น หมู่ไวนิล ( $-\text{CH}=\text{CH}_2$ ), หมู่อัลลิล ( $-\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$ ), หมู่อะมิโน ( $-\text{NH}_2$ ) หรือไอโซไซยานาโต ( $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะมีหมู่อัลคอกซี (แทนด้วยสัญลักษณ์ X) ซึ่งอาจเป็น เมทอกซี ( $-\text{O}-\text{CH}_3$ ) หรือ เอทอกซี ( $-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) ปลายด้านนี้จะทำหน้าที่สร้างพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างสารก่อกวบไซเลนกับเมทริกซ์ของสารอินทรีย์<sup>(40)</sup>



**รูปที่ 3** ภาพจำลองลักษณะการเชื่อมยึดระหว่างโมเลกุลสารคู่ควบไซเลนกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

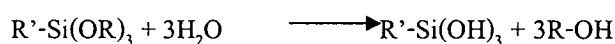
โครงสร้างที่แตกต่างกันภายในโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลนทำให้เรียกชื่อแตกต่างกันออกไป เช่น กรณีที่มีซิลิคอน (Si) หนึ่งอะตอมร่วมกับหมู่อัลคอกซีสามกลุ่ม จะเรียกว่า มอนอฟังก์ชันนอล กรณีที่มีซิลิคอน 2 อะตอมและแต่ละอะตอมมีหมู่อัลคอกซี 3 กลุ่ม เรียกว่า ไบฟังก์ชันนอล ส่วนกรณีที่มีซิลิคอนอะตอม 3 ตัว และแต่ละตัวมีหมู่อัลคอกซี 3 กลุ่ม เรียกว่า ไตรฟังก์ชันนอล

สารคู่ควบไซเลนจะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Mediator) และตัวส่งเสริม (promoter) การยึดติดระหว่างเมทริกซ์ที่เป็นสารอินทรีย์และเมทริกซ์ที่เป็นสารอนินทรีย์<sup>(41)</sup> จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการประยุกต์ใช้สารคู่ควบไซเลนอย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรมเพื่อส่งเสริมการเชื่อมต่อระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์

### ปฏิกิริยาเคมีของสารคู่ควบไซเลน

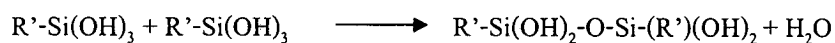
สารคู่ควบไซเลนจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางและตัวส่งเสริมการยึดติดระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ก็ต่อเมื่อหมู่อัลคอกซีบริเวณปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลถูกแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolyzed) และเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) โดยเมื่อสารคู่ควบไซเลนอยู่ในสารละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ (aqueous solution) หมู่อัลคอกซีจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-Si-OH) ซึ่งมีความเป็นกรด

และแอลกอฮอล์ โดยค่าความเป็นกรดของหมู่ไฮดรอกซิลจะขึ้นกับหมู่ฟังก์ชันนอล (organofunctional) ภายในโมเลกุลของสารควบไชนเลน สามารถเขียนเป็นสมการปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้



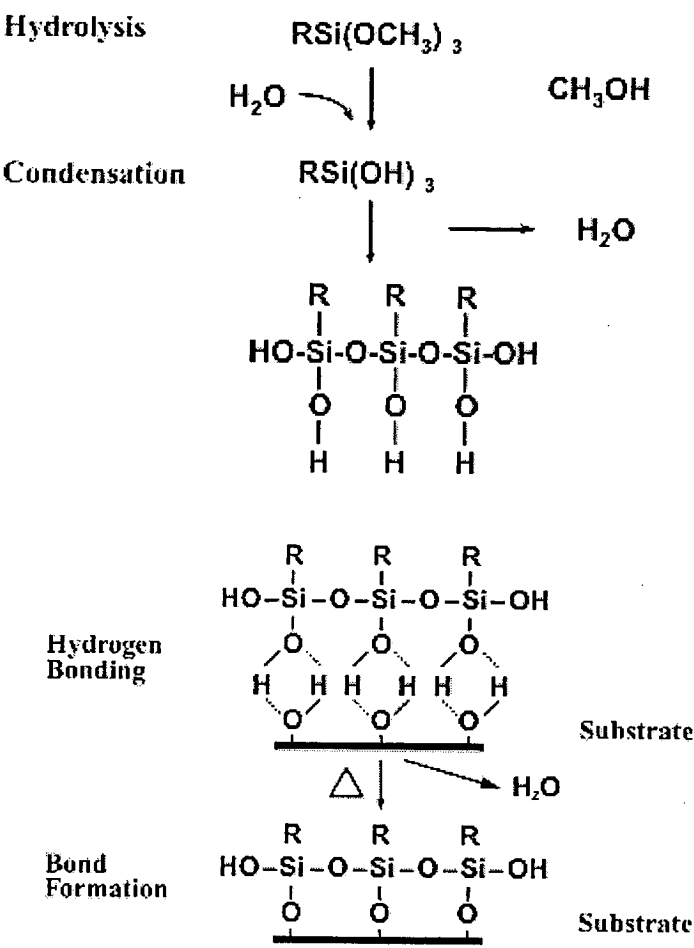
ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำของสารควบไชนเลนมีคุณสมบัติ Oxonium ion ( $\text{O}_3\text{H}^+$ ) catalyzed โดยที่สถานะค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลเพื่อเปลี่ยนสารควบไชนเลนโมเลกุลเดี่ยว (monomeric silane molecule) เป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่กว่าจะมีค่าต่ำสุด และที่ระดับความเป็นกรดต่างดังกล่าวยังสารละลายสารควบไชนเลนจะมีความคงตัวมากที่สุด ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตจึงนิยมเติมกรดอะซิติก (acetic acid) ลงไปในสารละลายสารควบไชนเลนเพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเก็บสารควบไชนเลนโดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของสารควบไชนเลนโมเลกุลเดี่ยว พบว่าระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำของสารควบไชนเลนมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความเข้มข้นของสารควบไชนเลน ชนิดของตัวทำละลาย และอุณหภูมิ<sup>(41)</sup>

ในลำดับต่อมา โมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการแยกสลายสารควบไชนเลนด้วยน้ำจะเกิดการควบแน่นระหว่างโมเลกุล กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า ไดเมอร์ ดังสมการ



ไดเมอร์โมเลกุลที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างกัน เกิดเป็นไซลอกเซนโอลิโกเมอร์ (siloxane oligomer) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้ภายในสารละลายของสารควบไชนเลนจึงประกอบด้วยโมเลกุลของไซลอกเซนมอนอเมอร์ (siloxane monomer), ไซลอกเซนไดเมอร์ (siloxane dimer) และ ไซลอกเซนโอลิโกเมอร์ (siloxane oligomer) ล่องลอยปะปนกัน ซึ่งโมเลกุลดังกล่าวจะเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นโอลิโกเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น นอกจากนั้นแต่ละโมเลกุลของไซลอกเซนโอลิโกเมอร์จะเชื่อมต่อกันเองและเชื่อมกับเมทริกซ์ของสารอินทรีย์ เช่น ซิลิกา

หรือ ออกไซด์ของโลหะ (metal oxide) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH group) ด้วย -Si-O-M bonds (M = metal)



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวควบแน่น

ในกรณีใช้สารคู่ควบไซเลนเพื่อปรับสภาพผิวโลหะซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ปรากฏอยู่ในชั้นออกไซด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อโลหะสัมผัสอากาศ หมู่ไซลานอลในสารคู่ควบไซเลนจะสร้างพันธะซิลอกเซน (siloxane bond) ทั้งชนิด  $-\text{Si}-\text{O}-\text{M}$  และพันธะ  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  ดังนั้นบริเวณผิวของโลหะที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนจึงปรากฏชั้นฟิล์มบางๆ ของ Hydrophobic and branched polysiloxane layer ซึ่งมีพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลออลิโกเมอร์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา (free hydrogen bonded oligomer) เคลือบอยู่ และมักพบโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ในชั้นฟิล์มดังกล่าวด้วย ส่วนกรณีผิวสัมผัสที่เป็นซิลิกา (Quartz หรือ  $\text{SiO}_2$ ) หรือซิลิเกต จะพบเพียงชั้นของ  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  เคลือบผิวอยู่ ความหนาของชั้น branched siloxane จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายสารคู่ควบไซเลน ในทางทฤษฎีชั้นดังกล่าวควรมีเพียงชั้นเดียว (monolayer) แต่ในความเป็นจริงพบว่าชั้นดังกล่าวมีความหนาประมาณ 50 ถึง 100 นาโนเมตร และมีการเรียงตัวของโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลนที่ไม่เป็นระเบียบ<sup>(40)</sup>

มีทฤษฎีที่พยายามอธิบายเกี่ยวกับกลไกของสารคู่ควบไซเลนในการเพิ่มการยึดติดทันตวัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบกับเรซินคอมพอสิต 2 ทฤษฎี<sup>(41)</sup> คือ

- ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี (the chemical bond theory)
- ทฤษฎีกลไกการสลายพันธะแบบผันกลับได้ (reversible hydrolytic bond mechanism theory)

### ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี (The chemical bond theory)

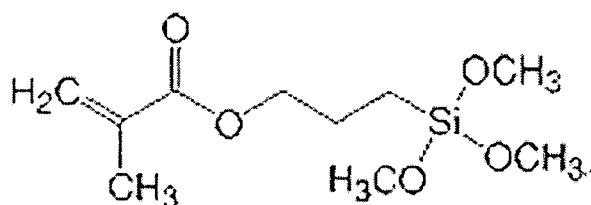
อธิบายว่า สารคู่ควบไซเลน หรือ Bifunctional trialkoxy silane  $[\text{R}'\text{Si}(\text{RO})_3]$  เป็นโมเลกุลที่มีหมู่อัลคอกซี (RO) ซึ่งเป็นหมู่ทำหน้าที่ที่สามารถถูกสลายได้ด้วยน้ำ (hydrolyzable functional group) อยู่ 3 กลุ่ม และมีหมู่อัลคิล (R') ซึ่งเป็นหมู่ทำหน้าที่ที่ไม่สามารถสลายได้ด้วยน้ำ (nonhydrolyzable functional group) อยู่ 1 กลุ่ม บริเวณปลายแต่ละด้านของโมเลกุล โดยหมู่อัลคอกซี (RO) ทั้ง 3 กลุ่มสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับสารอนินทรีย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซีละลายในโมเลกุล เช่น แก้ว หรือ ซิลิกา ส่วนหมู่อัลคิลสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน ( $\text{C}=\text{C}$  double bond) เช่น เมทาคริเลตในวัสดุอุดเรซินคอมพอสิต

### ทฤษฎีกลไกการสลายพันธะแบบผันกลับได้ (Reversible hydrolytic bond mechanism theory)

เป็นทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะสามารถอธิบายการเกิดความคงตัวของสารละลายด้วยน้ำ (Hydrolytic stability) ของการยึดติดที่เกิดจากสารคู่ควบไซเลนได้ ทฤษฎีนี้จะเป็นการอธิบายต่อจากทฤษฎีแรก โดยกล่าวว่า พันธะเคมีระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับสารอินทรีย์มีคุณสมบัติพิเศษ คือสามารถแยกจากกันและกลับมาต่อกันใหม่ (reversibly broken and remade) ในสถานะที่มีน้ำ ดังนั้นบริเวณผิวรอยต่อจึงมีคุณสมบัติในการลดความเค้น (stress relaxation) ทำให้สามารถคงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสได้ กลไกการยึดติดรูปแบบดังกล่าวจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีภาวะสมดุลพลวัต (dynamic equilibrium) ระหว่างน้ำและหมู่ไซลานอล

### สารคู่ควบไซเลนกับงานทางทันตกรรม<sup>(40-43)</sup>

ทันตแพทย์นิยมใช้สารคู่ควบไซเลนเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์กับสารที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยภายในโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในทางทันตกรรมจะมีเมทาคริเลตทำหน้าที่เป็นหมู่อัลคิล (R') ซึ่งเข้ากันได้กับไดเมทาคริเลตภายในโมเลกุลของเรซินคอมพอสิตทางทันตกรรม สารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในทางทันตกรรม แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารคู่ควบไซเลนแบบขดเดี่ยวที่ไฮโดรไลซ์แล้ว (prehydrolyzed single liquid silane) และสารคู่ควบไซเลนระบบแยกขด (2 or 3 liquid silane primer) บริษัทผู้ผลิตมักเลือกใช้สารคู่ควบไซเลนที่อยู่ในรูปของ  $\gamma$ -methacryloxypropyl-trimethoxysilane ( $\gamma$ -MPS) ซึ่งถูกละลายอยู่ในเอทานอล/น้ำ ที่ค่าความเป็นกรดช่วง 4-5 โดยมีค่าความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นสารคู่ควบไซเลนยังถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างวัสดุต่างชนิดกัน เป็นต้นว่า โลหะกับวัสดุคอมพอสิต เซรามิกกับคอมพอสิต และคอมพอสิตกับคอมพอสิต โดยเรซินคอมพอสิตที่มีหมู่เมทาคริเลตเป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุลสามารถใช้สารคู่ควบไซเลนสำหรับส่งเสริมและเพิ่มการยึดติดได้



**รูปที่ 5** แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ  $\gamma$ -methacryloxypropyl-trimethoxysilane

Bayne ในปี 2005 <sup>(44)</sup> พบว่า การใช้สารคู่ควบไซเลนปริมาณเล็กน้อยสามารถเพิ่มสมบัติการดัดขวางและช่วยด้านการละลายน้ำของเรซินอะคริลิกได้ การปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุอุดแทรกด้วยสารคู่ควบไซเลนช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างวัสดุอุดแทรกกับเรซินอะคริลิก ทำให้การถ่ายทอดแรงระหว่างเรซินอะคริลิกกับวัสดุอุดแทรกเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จึงช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแตกหรือสึกของวัสดุเรซินอะคริลิกได้ สิทธิเดช นิลเจริญ และคณะ ในปี 2013 <sup>(45)</sup> ศึกษาบทบาทของสารคู่ควบไซเลนในการช่วยการยึดติดระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับอะลูมินา พบว่า ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยว (shear bond strength) ของอะลูมินาที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าสูงกว่าอะลูมินาที่ไม่ได้เตรียมผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิดแกมมา-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีในสารละลายเอทานอล <sup>(42)</sup>