

ผลของสารเชื่อมยึดต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว

นางสาว ประภาพร หอมจันทร์จิรัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF COUPLING AGENT ON TRANSVERSE STRENGTH OF ACRYLIC RESIN
WITH GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE

Miss Prapaporn Homjunjeerung



ศูนย์วิทยุทันตกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

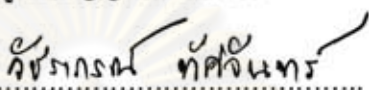
Chulalongkorn University

Academic Year 2008


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารเชื่อมยึดต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิก
เสริมเส้นใยแก้ว
โดย นางสาวประภาพร หอมจันทร์จรัส
สาขาวิชา ทันตกรรมประดิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง อิศราวัลย์ บุญศิริ

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง วิชราภรณ์ ทัดจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สรรพชัย นามะโน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง อิศราวัลย์ บุญศิริ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ทันตแพทย์ ดร.วรรณธนะ ลัดตบรรณคุช)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.นิยม ธำรงค์อนันต์สกุล)

ศูนย์วิจัยทันตกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประภาพร หอมจันทร์จรัส : ผลของสารเชื่อมยึดต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว. (EFFECT OF COUPLING AGENT ON TRANSVERSE STRENGTH OF ACRYLIC RESIN WITH GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ทพญ. อิศราวัลย์ บุญศิริ, 95 หน้า.

เส้นใยเสริมแรงนำมาใช้ในทางทันตกรรมอย่างแพร่หลายเช่น ซ่อมฐานฟันปลอมที่แตกหัก ใช้เป็นแกนโครงสร้างภายในของสะพานฟันชั่วคราว การใช้สารเชื่อมยึดเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มีผลทำให้เพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาผลของสารเชื่อมยึดและระยะเวลาการแช่น้ำต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว รวมทั้งเปรียบเทียบความแข็งแรงดัดขวางและมอดูลัสดัดขวางของการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วในเรซินอะคริลิกและเรซินคอมโพสิตที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด ชิ้นทดสอบขนาด $2 \times 2 \times 25$ มิลลิเมตร สร้างขึ้นจากวัสดุเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองและเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว โดยปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนหรือสารเชื่อมยึดโททานนต์ กลุ่มทดสอบเรซินอะคริลิกประกอบด้วย (ก) กลุ่มที่ไม่ได้เสริมเส้นใย (ข) กลุ่มเสริมเส้นใยแก้ว (ค) กลุ่มเสริมเส้นใยแก้วที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน และ (ง) กลุ่มเสริมเส้นใยแก้วที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดโททานนต์ ในกลุ่มทดสอบเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยถูกปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนเส้นใยที่ใช้เสริมความแข็งแรงถูกจัดวางให้ขนานกับแนวตามยาวและอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ กลุ่มทดลองทั้งหมดถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อยกลุ่มละ 10 ชิ้นเพื่อแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วันที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด ความเร็วในการเคลื่อนหัวกด 1 มม. ต่อนาที น้ำกลั่นจลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจสอบพื้นผิวที่แตกของชิ้นทดสอบ จากการทดสอบค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว และการเปรียบเทียบพหุคูณแบบเชฟเฟ พบว่ากลุ่มทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) จากการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน พบว่าเวลาในการแช่น้ำมีผลต่อความแข็งแรงดัดขวางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และพบว่าเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางและมอดูลัสดัดขวางไม่แตกต่างกับเรซินอะคริลิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า สารเชื่อมยึดโททานนต์สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วได้ แต่มีค่าต่ำกว่าสารเชื่อมยึดไซเลน อย่างไรก็ตามการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดโททานนต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิผลในการเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมเส้นใย

ภาควิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2551...

ประภาพร หอมจันทร์จรัส

อ. อิศราวัลย์ บุญศิริ

4976112132 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEY WORD: GLASS FIBER-REINFORCED COMPOSITE / SILANE COUPLING AGENT / TITANATE COUPLING AGENT / TRANSVERSE STRENGTH

PRAPAPORN HOMJUNJEERUNG : EFFECT OF COUPLING AGENT ON TRANSVERSE STRENGTH OF ACRYLIC RESIN WITH GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE. THESIS
PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC.PROF. ISSARAWAN BOONSIRI, 95 pp.

Fiber reinforcements have been employed to strengthen both during repair dentures and in the frameworks of fixed partial dentures. The presence of coupling agents at the polymer-fiber interface can improve the mechanical properties of the fiber-reinforced composites. The aim of this study was to determine the effect of two different coupling agents and immersion times on transverse strength of acrylic resin with glass fiber reinforced composite and to compare the transverse strength and modulus of fiber reinforcements in acrylic resin and composite resin. Test specimens (2x2x25mm) made of chemically activated acrylic resin or composite resin were reinforced with glass fibers. Fibers were treated with silane coupling agent (Monobond S) or titanate coupling agent (NDZ-201). The acrylic resin groups were : (A) no fibers; (B) non-impregnated glass fibers; (C) silane impregnated glass fibers and (D) titanate impregnated glass fibers. The composite resin group reinforced with silane impregnated glass fibers. The fibers were oriented parallel to the long axis and positioned in the center of the specimen. Specimens (n=20) were divided to store in distilled water for 7 and 30 days at 37 °C before testing. They were subjected to a three-point loading test set up at a crosshead speed of 1 mm/min. Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the microstructure of the cracked surface. Data were analyzed by means of ANOVA and Scheffe tests. Test results revealed that among the acrylic resin groups, treatment with Monobond S resulted in the most significant increase in transverse strength values ($p < 0.001$). T-test showed that the immersion time of each group significantly influenced the transverse strength ($p < 0.05$). The transverse strengths and modulus of fiber reinforcements were not significantly different between acrylic resin group and composite resin group ($p < 0.05$). NDZ-201 can increase the transverse strength of fiber-reinforced composites but lower than Monobond S. However surface treatment with NDZ-201 was an effective method to improve the fiber reinforcements

Department : ...Prosthodontics...

Student's signature.....

Prapaporn Homjunjeerung

Field of study : ..Prosthodontics..

Principal Advisor's signature.....

Issarawan Boonsiri

Academic year ...2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.ทพญ.อิสราวัลย์ บุญศิริ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้การดูแลเป็นอย่างดี และได้ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย และทำให้ขั้นตอนต่าง ๆ ในการ ดำเนินงานมีความราบรื่นและมีประสิทธิภาพ ขอขอบคุณศูนย์วิจัย คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่ได้ให้ความรู้ และคำปรึกษา ทางด้านสถิติในการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ และ แก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา และ มารดา ที่เป็นกำลังใจเสมอมา ทำให้ ผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. คำถามการวิจัย	4
1.3. วัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.4. สมมุติฐานการวิจัย	5
1.5. สมมุติฐานทางสถิติ	6
1.6. ขอบเขตวิจัย	6
1.7. ข้อตกลงเบื้องต้น.....	6
1.8. คำสำคัญ.....	7
1.9. คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.10. รูปแบบการวิจัย	7
1.11. การบริหารงานวิจัยและตารางการปฏิบัติงาน.....	8
1.12. ประโยชน์ของการวิจัย.....	9
1.13. ข้อจำกัดของการวิจัย.....	9
1.14. รายละเอียดงบประมาณการวิจัย	10
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1. เรซินอะคริลิกชนิดป้อนได้เอง (Chemically Activated Acrylic Resins)	11
2.2. คอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Composites).....	12
2.3. เส้นใยที่ใช้เสริมความแข็งแรง	16
2.4. ปัจจัยสำคัญต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย	22
2.5. สารเชื่อมยึด (Coupling agent).....	26

2.6. การทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง (Flexure test)	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
3.1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	36
3.2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.3. การดำเนินการวิจัย	39
บทที่ 4 ผลการวิจัย	52
4.1. ผลการวิเคราะห์	52
4.2. ผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัจจัย	55
4.3. ผลการวิเคราะห์ชั้นทดสอบที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	60
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	65
5.1. อภิปรายวิธีการทดลอง	65
5.2. อภิปรายผลการวิจัย	67
5.3. สรุปผลการวิจัย	72
5.4. ข้อเสนอแนะในงานวิจัย	73
รายการอ้างอิง	74
ภาคผนวก	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงชนิดต่าง ๆ	15
ตารางที่ 2 ผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยคาร์บอน	17
ตารางที่ 3 ผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยอะรามิด.....	18
ตารางที่ 4 ผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดมีน้ำหนัก โมเลกุลสูง	19
ตารางที่ 5 ผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยแก้ว	22
ตารางที่ 6 สารเชื่อมยึดไซเลนที่มีขายในทางพันธุกรรม.....	31
ตารางที่ 7 สารเชื่อมยึดไททานเตนในทางการค้า.....	33
ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่ขึ้นทดสอบแตกหักและความ แข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบแต่ละกลุ่ม	52
ตารางที่ 9 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบเรซินอะคริลิก.....	53
ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว	54
ตารางที่ 11 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่ม การยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน	54
ตารางที่ 12 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่ม การยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเตน.....	55
ตารางที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ยและระดับนัยสำคัญของผลต่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวาง ระหว่างกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วันและ 30 วัน.....	58
ตารางที่ 14 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน	59
ตารางที่ 15 แสดงการวิเคราะห์การแจกแจง (การกระจาย) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัด ขวาง.....	83
ตารางที่ 16 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของความ แข็งแรงดัดขวาง	83
ตารางที่ 17 แสดงการทดสอบผลกระทบร่วมของปัจจัยสารเชื่อมยึดและเวลาในการแช่น้ำด้วย การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA).....	84

ตารางที่ 18 แสดงการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ด้วยการทำการทดสอบแบบเลอวีเน (Levene's Test) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน	84
ตารางที่ 19 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA).....	85
ตารางที่ 20 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน ด้วยการเปรียบเทียบพหุคูณแบบเชฟเฟ (Scheffe multiple comparison)	85
ตารางที่ 21 แสดงการสรุปความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางในกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน โดยจัดกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มเดียวกัน.....	86
ตารางที่ 22 แสดงการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ด้วยการทำการทดสอบแบบเลอวีเน (Levene's Test) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน	86
ตารางที่ 23 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA).....	86
ตารางที่ 24 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน ด้วยการเปรียบเทียบพหุคูณแบบเชฟเฟ (Scheffe multiple comparison) ..	87
ตารางที่ 25 แสดงสรุปความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางในกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน โดยจัดกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มเดียวกัน.....	87
ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่ไม่ได้เสริมเส้นใยแก้ว.....	88
ตารางที่ 27 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่ไม่ได้เสริมเส้นใยแก้วด้วยการทดสอบทีกรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)	88
ตารางที่ 28 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้ว	88
ตารางที่ 29 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้ว ด้วยการทดสอบทีกรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)).....	89
ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน	89

ตารางที่ 31 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test).....	90
ตารางที่ 32 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานิต.....	90
ตารางที่ 33 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานิต ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test).....	91
ตารางที่ 34 แสดงการวิเคราะห์การแจกแจง (การกระจาย) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางกลุ่มคอมโพสิตเรซิน	91
ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน	92
ตารางที่ 36 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)	92
ตารางที่ 37 แสดงการวิเคราะห์การแจกแจง (การกระจาย) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยมอดูลัสดัดขวางในกลุ่มคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วใช้ร่วมกับสารเชื่อมยึดไซเลน.....	93
ตารางที่ 38 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมอดูลัสดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน.....	93
ตารางที่ 39 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยมอดูลัสดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test).....	94

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีเส้นใยเรียงตัวในแนวเดียวกัน.....	14
ภาพที่ 2 การเรียงตัวของเส้นใยแบบถักเป็นเปียด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	14
ภาพที่ 3 แนวการเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	25
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมยึดโซเลนแบ่งตามจำนวนอะตอมของซิลิกอน.....	28
ภาพที่ 5 การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด.....	35
ภาพที่ 6 การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 4 จุด.....	35
ภาพที่ 7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมยึดโซเลนยี่ห้อมอนอบอนด์เอส	38
ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมยึดโททานेट NDZ-201.....	38
ภาพที่ 9 แสดงชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบหล่อโลหะ	39
ภาพที่ 10 แสดงส่วนประกอบด้านบนและด้านข้างของแบบหล่อโลหะในขั้นที่ 1	39
ภาพที่ 11 แสดงส่วนประกอบด้านบนและด้านข้างของแบบหล่อโลหะในขั้นที่ 2.....	40
ภาพที่ 12 แสดงการซึงเส้นใยแก้วด้วยเครื่องซึงอิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล.....	40
ภาพที่ 13 แสดงการเตรียมแบบหล่อโลหะเพื่อเตรียมขึ้นทดสอบ.....	41
ภาพที่ 14 แสดงขึ้นทดสอบขณะก่อตัวในแบบหล่อโลหะ.....	41
ภาพที่ 15 แสดงการเตรียมแบบหล่อโลหะเพื่อเตรียมขึ้นทดสอบที่เสริมเส้นใย.....	42
ภาพที่ 16 แสดงการเตรียมขึ้นทดสอบขั้นที่ 1	42
ภาพที่ 17 แสดงการวางเส้นใยแก้วตามแนวยาวของขึ้นทดสอบ	43
ภาพที่ 18 แสดงการวางแบบหล่อโลหะขั้นที่ 2	43
ภาพที่ 19 แสดงขึ้นทดสอบเสริมเส้นใยขณะก่อตัวในแบบหล่อโลหะ	43
ภาพที่ 20 แผนภูมิแสดงกลุ่มทดสอบทั้งหมดของการวิจัย	45
ภาพที่ 21 แสดงการวัดขนาดขึ้นทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดแบบดิจิทัล.....	46
ภาพที่ 22 แสดงแบบหล่อโลหะที่ใช้จับขึ้นทดสอบเพื่อการขัดแต่ง	46
ภาพที่ 23 แสดงการขัดแต่งขึ้นทดสอบบนแท่นขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ.....	47
ภาพที่ 24 แสดงการแช่ขึ้นทดสอบในน้ำกลั่นภายใต้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....	47
ภาพที่ 25 แสดงขึ้นทดสอบใน 1 กลุ่ม (10 ชิ้น)	48
ภาพที่ 26 แสดงการวางขึ้นทดสอบเพื่อเตรียมทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง	48

ภาพที่ 27 แสดงการตัดชิ้นทดสอบภายหลังการแตกหักเพื่อเตรียมส่งกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดด้วยเครื่องตัดพื้น	49
ภาพที่ 28 แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบภายหลังการแตกหักเพื่อส่งกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด.....	50
ภาพที่ 29 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	50
ภาพที่ 30 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงตัดขวางของชิ้นทดสอบกลุ่มควบคุม	55
ภาพที่ 31 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงตัดขวางของชิ้นทดสอบกลุ่มแช่น้ำ 7 วัน.	56
ภาพที่ 32 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงตัดขวางของชิ้นทดสอบกลุ่มแช่น้ำ 30 วัน.	57
ภาพที่ 33 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิก และเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน	60
ภาพที่ 34 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบมอดูลัสตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกและ เรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน	60
ภาพที่ 35 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด .	61
ภาพที่ 36 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน จากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	61
ภาพที่ 37 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน จากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	62
ภาพที่ 38 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติด ด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน จากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด....	62
ภาพที่ 39 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติด ด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน จากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด..	63
ภาพที่ 40 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติด ด้วยสารเชื่อมยึดไททานิตที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วันจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	64
ภาพที่ 41 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติด ด้วยสารเชื่อมยึดไททานิตที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน จากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	64
ภาพที่ 42 แสดงชิ้นส่วนที่เกิดการแตกหักภายหลังการทดสอบของชิ้นทดสอบที่ไม่เสริมเส้นใย....	68
ภาพที่ 43 แสดงชิ้นส่วนที่เกิดรอยแตกหักภายหลังการทดสอบของชิ้นทดสอบที่เสริมเส้นใย	68
ภาพที่ 44 แสดงชิ้นส่วนที่เกิดรอยร้าวภายในชิ้นทดสอบที่เสริมเส้นใย	68
ภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบสีของชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึด ติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนกับสารเชื่อมยึดไททานิต.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเพิ่มขึ้นมาก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า วัสดุเสริมเส้นใยสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยอาศัยคุณสมบัติความแข็งแรงของเส้นใย จึงนำเทคโนโลยีนี้มาผลิตวัสดุทางทันตกรรมประดิษฐ์ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรงให้แก่เรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เอง (chemically activated acrylic resin)

วัสดุเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองนี้ นำมาใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์หลายด้านได้แก่

1. ฐานฟันปลอม (denture base) เรซินอะคริลิก

ปี ค.ศ. 1940 Schreiber(Schreiber, 1971) นำเรซินอะคริลิกมาสร้างฐานฟันปลอมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเรซินอะคริลิกเป็นวัสดุที่สามารถสร้างฐานฟันปลอมได้สวยงาม มีขบวนการขึ้นรูปที่ไม่ยุ่งยาก และสามารถซ่อมแซมได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามมักพบปัญหาการแตกหักของฐานฟันปลอมได้บ่อยครั้ง(Beyli และ von Fraunhofer, 1981) ซึ่งมีสาเหตุจากหลายปัจจัยด้วยกันเช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ของฐานฟันปลอมขณะบดเคี้ยว ความเครียด (stress) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุทำฐานฟันปลอม เป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกหักขึ้นบริเวณแนวกึ่งกลางของฐานฟันปลอม วิธีการซ่อมฟันปลอมภายหลังการแตกหักอาจใช้เรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองเพียงอย่างเดียว หรือใช้เส้นใยเสริมความแข็งแรงที่บริเวณรอยต่อก่อนการซ่อมแซมด้วยเรซินอะคริลิก(Vallittu, Lassila และ Lappalainen, 1994b) การเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยวิสเกอร์ของสารไคโตซาน (whisker fiber) ในเรซินอะคริลิกเริ่มพัฒนาขึ้นโดย Grant และ Greener (Schreiber, 1971) เชื่อว่าสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของเรซินอะคริลิกได้ ดังเช่นการเสริมความแข็งแรงด้วยแซฟไฟร์ (sapphire) สามารถเพิ่มคุณสมบัติการยืดหยุ่น (flexure) ของเรซินอะคริลิก

2. สะพานฟันชั่วคราว (provisional fixed partial denture) ชนิดเรซินอะคริลิก

การบูรณะฟันปลอมชนิดติดแน่นจำเป็นต้องรอเวลาขณะสร้างชิ้นงานสะพานฟันถาวร อาจใช้เวลาเป็นวันหรือสัปดาห์ ช่วงเวลาดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สะพานฟันชั่วคราว เพื่อทำหน้าที่ป้องกันโพรงประสาทฟัน คงตำแหน่งของฟันหลักให้อยู่ในตำแหน่งเดิม ทำหน้าที่ในการบดเคี้ยว มีความแข็งแรงพอเพียง ให้การยึดติดกับฟันหลักที่ดี มีความสวยงาม และสามารถทำความสะอาดได้ดี(Rosenstiel, Land และ Fujimoto, 2006) วัสดุที่ใช้ทำสะพานฟันชั่วคราวมักเป็นวัสดุประเภทเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองซึ่งมีคุณสมบัติทั้งข้อดีและข้อด้อยคือ

ข้อดี(Larson และคณะ, 1991; Solnit, 1991)

1. ให้ความแข็งแรง ทนต่อแรงบดเคี้ยว
2. สามารถขัดแต่งให้เรียบและขึ้นมันเงาได้
3. การใช้งานง่ายไม่ยุ่งยาก
4. มีสีสวยงามใกล้เคียงกับสีฟันธรรมชาติ
5. สามารถซ่อมแซมส่วนที่แตกหักได้ เนื่องจากวัสดุยึดติดกันด้วยพันธะเคมี

ข้อด้อย(Beyli และ von Fraunhofer, 1981; Miller, 1983)

1. เมื่อก่อตัวสมบูรณ์หรือแข็งตัวเต็มที่ เกิดรูพรุนภายในวัสดุ เป็นที่กักเก็บของคราบอาหาร ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น
2. มีการดูดซึมน้ำและของเหลวในช่องปากได้ทำให้เกิดการติดสีและกลิ่นในเนื้อวัสดุ
3. ความแข็งแรงไม่เพียงพอในกรณีต้องรับแรงมาก ๆ เช่น สะพานฟันที่มีความยาวมาก ๆ

วัสดุในอุดมคติที่นำมาทำสะพานฟันชั่วคราวควรมีความแข็งแรง ทั้งในตำแหน่งที่มีการสบฟันมากที่สุด (maximum intercuspation) และในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ขากรรไกรเคลื่อนที่ไปในช่วงบดเคี้ยว ถ้าวัสดุมีความแข็งแรงไม่เพียงพอขณะบดเคี้ยว อาจก่อให้เกิดการแตกหักของสะพานฟันชั่วคราวได้ ซึ่งเป็นผลให้เกิดความล้มเหลวของการใส่ฟันตามมา(Gegauff และ Pryor, 1987) ความแข็งแรงของวัสดุเกิดจากคุณสมบัติภายในเนื้อวัสดุ โดยทั่วไประหว่างการผสมเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองมักมีรูพรุนเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ การเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสามารถลดรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ เป็นการเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางและส่งผลให้วัสดุสามารถขัดให้เรียบมันเงาได้มากขึ้น Chee และคณะ(Chee และคณะ, 1988) ศึกษาค่าความแข็งแรงดัดขวางและการเกิดรูพรุนในเนื้อเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เอง ที่เกิดเป็นพอลิเมอร์ภายใต้สุญญากาศและภายใต้อุณหภูมิหนึ่ง พบว่าทั้งสองกลุ่มมีค่าความแข็งแรงดัดขวางมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เรซินอะคริลิกที่เกิดเป็นพอลิเมอร์ภายใต้ความดันนี้ยังพบการแตกหักได้บ่อย โดยเฉพาะกรณีสะพานฟันชั่วคราวที่มีความยาวมาก หรือสะพานฟันชั่วคราวที่รับแรงบดเคี้ยวสูง การเติมเส้นใยในเรซินอะคริลิกเพื่อหวังผลให้เพิ่มความแข็งแรงของเรซินอะคริลิก ในการศึกษาของ Larson และคณะ(Larson และคณะ, 1991) พบว่าเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองเมื่อเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุสามารถทนทานต่อแรงบดเคี้ยวได้มากขึ้น และการศึกษาผลของการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าสามารถลดการแตกหักลงได้(Vallittu, Lassila และ Lappalainen, 1994a) นอกจากนี้ สะพานฟันชั่วคราวอาจทำขึ้นด้วยวัสดุเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใย เพื่อใช้ในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงมากขึ้น เช่น ผู้ป่วยนอนกัดฟันหรือใช้สำหรับวางแผนการรักษาในผู้ป่วยปริทันต์ สะพานฟัน

ชั่วคราวนี้ประกอบด้วยเส้นใยเสริมความแข็งแรงเป็นแกนภายใน ทำหน้าที่คล้ายโครงโลหะของสะพานพื้นถาวร และส่วนเรซินคอมโพสิตที่ล้อมรอบเส้นใยซึ่งทำหน้าที่แทนเซรามิก ดังนั้นสะพานพื้นชั่วคราวชนิดเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยนี้จึงมีคุณสมบัติทั้งความแข็งแรงและแข็งตั้งภายในชั้นเรซินคอมโพสิต ส่วนของเรซินคอมโพสิตภายนอกสามารถต้านทานต่อการสึกได้ดีและมีความสวยงาม(Freilich, 2000) Garoushi และคณะ ซึ่งให้เห็นว่าเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติความแข็งแรงและทนทานต่อการแตกหักมากพอสำหรับการนำมาใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์และปริทันตวิทยา ปัจจุบันมีความสนใจในการพัฒนาคุณสมบัติของคอมโพสิตเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้น เพื่อการบูรณะฟันให้ประสบความสำเร็จในระยะยาว และพบว่าการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วสามารถเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางแก่เรซินคอมโพสิตได้ถึง 211 เมกะปาสคาล ดังนั้นการใช้เส้นใยแก้วเสริมความแข็งแรงให้กับเรซินคอมโพสิตจึงสามารถรับแรงบดเคี้ยวที่มากได้(Garoushi, Vallittu และ Lassila, 2007) จากรายงานผู้ป่วยของ Meiers พบว่าสามารถสร้างชิ้นงานได้สวยงามและแข็งแรงทนทาน โดยติดตามผลในผู้ป่วย 20 รายประสบความสำเร็จดี มีเพียง 1 รายเท่านั้นที่ล้มเหลว และสามารถใช้งานได้นานถึง 3 ปี(Meiers และ Kazemi, 2005) และจากการศึกษาของทันตแพทย์พิสัยศิษฐ์ ในปี 2549 ได้นำเส้นใยแก้วจากประเทศไทยมาเสริมความแข็งแรงแก่วัสดุเรซินคอมโพสิต โดยเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่ใช้ในทางทันตกรรม ได้แก่ ริบบอนด์ (ribbon) และจีอินเทอริก (G-interig) พบว่าให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางไม่แตกต่างกัน (ชัยจรีนนท์, 2549) จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งในการนำเส้นใยแก้วชนิดนี้มาเสริมความแข็งแรงในเรซินอะคริลิก

แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงนี้ ได้แก่ การยึดติดที่ติระหว่างเรซินอะคริลิกกับเส้นใยแก้ว ในทางทันตกรรมมีการนำสารเชื่อมยึดไซเลนที่เรียกว่า สารไซเลนคอปปลิง (Silane coupling agent) มาใช้ เนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มการยึดติดที่ดี (Solnit, 1991) โดยสารเชื่อมยึดนี้มีความสามารถเป็นตัวเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ดี ในที่นี้คือเรซินอะคริลิกและเส้นใยแก้ว โดยองค์ประกอบทางเคมีของสารเชื่อมยึดนี้แบ่งได้เป็นหลายกลุ่มขึ้นกับหมู่ทำหน้าที่ (functional group) ของสารนั้น ในทางทันตกรรมสารเชื่อมยึดที่มีขายในท้องตลาดรู้จักกันในชื่อทางเคมีว่า มอนอฟังก์ชันนัลแกมมาเมทาคริลอกซีพรอพิลไตรเมทอกซีไซเลน [monofunctional γ methacryloxypropyl trimethoxysilane (γ -MPTS)] หรือไตรเมทอกซีไซลิลพรอพิลเมทาคริเลต [3-trimethoxy silylpropylmethacrylate (3-MPS)] ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาสารเชื่อมยึดกลุ่มอื่น เช่นมอนออัลคอกซีไพโรฟอสเฟตไททานเต (mono-alkoxy pyrophosphate titanate) สารกลุ่มนี้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ จากองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติอาจให้ผลการเชื่อมยึดในทางทันตกรรมเช่นเดียวกัน จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งหากนำสารเชื่อมยึดกลุ่มนี้มาทดแทนกลุ่มเดิม เนื่องจากมีราคาที่ถูกลงกว่าและสามารถผลิตขึ้นปลอม

เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและสะพานฟันชั่วคราวชนิดเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วมาใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ได้อย่างเหมาะสม

วัสดุเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองนี้ เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทำฟันปลอมมักมีปัญหาเรื่องการแตกหักดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การแตกหักของเรซินอะคริลิกมีสาเหตุจากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ อันได้แก่ความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุที่สามารถต้านทานต่อการแตกหักขณะบดเคี้ยว (Yazdanie และ Mahood, 1985) การประเมินคุณสมบัติความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิก มักใช้วิธีการทดสอบแรงดัดขวางแบบ 3 จุด (three point bending) หาค่าแรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุแตกหัก เพื่อนำไปเป็นข้อมูลแสดงถึงความแข็งแรงทนทานของวัสดุ (Stafford และ Handley, 1975)

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว โดยทำการทดสอบให้แรงลงบนชิ้นทดสอบแบบ 3 จุด เพื่อหาค่าแรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุแตกหัก ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญแสดงถึงความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดระหว่างเรซินอะคริลิกและเส้นใยแก้วด้วยสารเชื่อมยึด โดยการเปรียบเทียบผลของสารเชื่อมยึดไซเลนที่มีขายในท้องตลาดกับสารเชื่อมยึดในกลุ่มที่ใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ ถ้าผลของสารเชื่อมยึดทั้งสองชนิดนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ งานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ในการผลิตชิ้นงานเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่มีความแข็งแรง ราคาที่เหมาะสมสามารถใช้งานในทางคลินิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2. คำถามการวิจัย

- 1) สารเชื่อมยึดระหว่างเรซินอะคริลิกและเส้นใยแก้วที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วหรือไม่
- 2) เวลาในการแช่น้ำกลั่นที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วหรือไม่
- 3) เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดชนิดเดียวกัน มีความแข็งแรงดัดขวางแตกต่างกันหรือไม่

1.3. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดระหว่างเรซินอะคริลิกและเส้นใยแก้วด้วยสารเชื่อมยึดที่แตกต่างกัน
- 2) เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำกลั่น 7 วัน และ 30 วัน

- 3) เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว และเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดชนิดเดียวกัน

1.4. สมมติฐานการวิจัย

- 1) **สมมติฐานว่าง(Ho)** : การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วโดยใช้สารเชื่อมยึดที่ต่างกัน ให้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำมากที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก ไม่แตกต่างกัน

สมมติฐานแย้ง(Ha) : การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วโดยใช้สารเชื่อมยึดที่ต่างกัน ให้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำมากที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก แตกต่างกัน

- 2) **สมมติฐานว่าง(Ho)** : การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่แช่ในน้ำกลั่น 7 วัน ให้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำมากที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่แช่น้ำ 30 วัน

สมมติฐานแย้ง(Ha) : การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่แช่ในน้ำกลั่น 7 วัน ให้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำมากที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก แตกต่างกับกลุ่มที่แช่น้ำ 30 วัน

- 3) **สมมติฐานว่าง(Ho)** : การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว และวัสดุเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว โดยใช้สารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส (Monobond S) ให้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำมากที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก ไม่แตกต่างกัน

สมมติฐานแย้ง(Ha) : การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว และวัสดุเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว โดยใช้สารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส (Monobond S) ให้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำมากที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก แตกต่างกัน

1.5. สมมุติฐานทางสถิติ

$$1) H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_A: \text{มี } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ต่างกัน ; } i \neq j$$

โดยที่ $\mu_{i,j}$ = ความแข็งแรงดัดขวางเฉลี่ยของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้สารเชื่อมยึดที่แตกต่างกัน ; $i, j = 1, 2, 3$

กำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05

$$2) H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2$$

โดยที่ μ_1 = ความแข็งแรงดัดขวางเฉลี่ยของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำกลั่น 7 วัน

μ_2 = ความแข็งแรงดัดขวางเฉลี่ยของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำกลั่น 30 วัน

กำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05

$$3) H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2$$

โดยที่ μ_1 = ความแข็งแรงดัดขวางเฉลี่ยของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว

μ_2 = ความแข็งแรงดัดขวางเฉลี่ยของเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว

กำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05

1.6. ขอบเขตวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วในห้องปฏิบัติการ มีการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความชื้นของห้องปฏิบัติการ และทดสอบด้วยแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบจนกว่าชิ้นทดสอบแตกหัก

1.7. ข้อตกลงเบื้องต้น

เป็นงานวิจัยเชิงทดลองที่ทำในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบผลการเชื่อมยึดของสารเชื่อมยึดทั้งประเภทที่ผลิตมาเพื่องานทางทันตกรรม และประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใย โดยจำลองสถานการณ์จากการสร้างชิ้นงานจริงใน

คลินิก การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ และการทดสอบในทุกขั้นตอนกระทำโดยผู้วิจัยเพียงคนเดียว เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นทดสอบที่มีขนาดเท่า ๆ กันจากแบบหล่อชิ้นทดสอบ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 4049:2000 แต่อย่างไรก็ตามการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถควบคุมปัจจัยบางอย่างให้เหมือนกับสถานะในช่องปากได้ทุกประการ เช่น แรงที่ใช้ทดสอบเป็นเพียงแรงในทิศทางเดียว แต่แรงจากการบดเคี้ยวมีหลายทิศทาง และขั้นตอนการทดลองต่าง ๆ อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวิจัยได้ ดังนั้นการวิจัยนี้เป็นเพียงการทำนายแนวโน้ม ควรทำการศึกษาติดตามผลระยะยาวในคลินิกร่วมด้วย

1.8. คำสำคัญ

“glass fiber-reinforced composite”	วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว
“silane coupling agent”	สารเชื่อมยึดไฮเลน
“titanate coupling agent”	สารเชื่อมยึดไททานेट
“transverse strength”	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง

1.9. คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว หมายถึง วัสดุเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ผลิตในประเทศไทย
- 2) เรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว หมายถึง วัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิตที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ผลิตในประเทศไทย

1.10. รูปแบบการวิจัย

รูปแบบการวิจัยเป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research)

1.11. การบริหารงานวิจัยและตารางการปฏิบัติงาน

ขั้นตอนการวิจัย	ปี 2550											ปี 2551													
	ผ.ค.	ก.พ.	ส.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ผ.ค.	ก.พ.	ส.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูล																									
2. วางแผนออกแบบการวิจัย																									
3. ศึกษาวิจัยนำร่อง																									
4. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์																									
5. เสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์																									
6. ดำเนินการวิจัยและ เก็บรวบรวมข้อมูล																									
7. วิเคราะห์ข้อมูลและแปลผล																									
8. เตรียมรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์และ ผลงานวิจัยตีพิมพ์																									
9. นำเสนอผลงานวิจัย																									

1.12. ประโยชน์ของการวิจัย

- 1) ค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้ว
- 2) ค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้ร่วมกับสารเชื่อมยึด
- 3) เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกกับเรซินคอมโพสิตเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้ร่วมกับสารเชื่อมยึด
- 4) เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลาที่แตกต่างกัน
- 5) ใช้เป็นข้อมูลในการเลือกใช้สารเชื่อมยึดที่มาจากอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงาน
- 6) ใช้เป็นข้อมูลในการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยในการทำสะพานฟันชั่วคราว
- 7) นำวัสดุที่มีความแข็งแรงมากนี้มาใช้ในงานทันตกรรมได้อย่างแพร่หลาย
- 8) เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณสมบัติของเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วให้ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

1.13. ข้อจำกัดของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองทำในห้องปฏิบัติการ โดยกำจัดปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนกับขั้นตอนทดสอบในแต่ละกลุ่ม จึงไม่สามารถสร้างชิ้นงานจากวัสดุเรซินอะคริลิกและเรซินคอมโพสิตเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้ร่วมกับสารเชื่อมยึดได้ตามขั้นตอนจริงในคลินิก

1.14. รายละเอียดงบประมาณการวิจัย

1) หมวดค่าใช้สอย ค่าถ่ายเอกสารและจัดทำรูปเล่มรายงาน	
ก) ค่าถ่ายเอกสารและจัดหาเอกสารอ้างอิง	3,000 บาท
ข) รายงานการวิจัย ถ่ายเอกสารพร้อมปก	5,000 บาท
2) หมวดค่าวัสดุ	
ก) ค่าผลิตอุปกรณ์ที่ใช้สร้างชิ้นตัวอย่าง	3,600 บาท
ข) ค่าผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ตัดชิ้นตัวอย่าง	500 บาท
ค) ค่าเรซินอะคริลิก ชุดละ 1,680 บาท 2 ชุด	3,360 บาท
ง) ค่าเรซินคอมโพสิต ชุดละ 1,780 บาท 2 ชุด	3,560 บาท
จ) ค่าสารเชื่อมยึดไซเลน	1,400 บาท
ฉ) ค่าวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบ ได้แก่ ปีกเกอร์ ไชรินจ์ ฟูกัน ถ้วยยางและพายผสม วาสลีน เทปกาว ชุดไขควง และกระดาษทราย	2,000 บาท
ช) ค่าแผ่นดิสก์ และซีดี	500 บาท
3) หมวดครุภัณฑ์	
ก) ค่าใช้เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮดรอลิก	10,000 บาท
ข) ค่าใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	1,250 บาท
	รวมทั้งหมด 34,170 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองเป็นวัสดุที่นำมาใช้สร้างฟันปลอมชั่วคราวชนิดติดแน่น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่นมีความแข็งแรง มีสีที่คงทนถาวร ใช้งานง่าย และสามารถขัดแต่งได้ (Ruyter และ Svendsen, 1980; Stafford และ Handley, 1975) การใช้เครื่องอัดความดันขณะการเกิดพอลิเมอร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานเรซินอะคริลิกได้ โดยการลดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการผสมเรซินอะคริลิก (Chee และคณะ, 1988) แต่อย่างไรก็ตามแม้การใช้ความดันอัดระหว่างการเกิดพอลิเมอร์ยังพบการแตกหักของชิ้นงานได้ ในกรณีที่สะพานฟันมีความยาวมาก โดยพบได้บ่อยที่บริเวณจุดต่อ (connector) ระหว่างฟันหลัก (abutment) และฟันแขวน (pontic) จึงนำเส้นใยสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ มาใช้เสริมความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานเรซินอะคริลิกที่เรียกว่า คอมโพสิตเสริมเส้นใย [fiber-reinforced composites (FRCs)]

2.1. เรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เอง (Chemically Activated Acrylic Resins)

ประกอบด้วยส่วนผง (powder) และส่วนเหลว (liquid) ซึ่งส่วนผงประกอบด้วยพอลิเมอร์ลักษณะเป็นเม็ดละเอียดของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ขนาด 50 - 250 ไมโครเมตร สีหรือมีสี ขนาดอนุภาคของส่วนผงมีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการอัด (doughing time) อาจมีปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ ตัวเริ่มต้น (initiator) ส่วนใหญ่มักเป็นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) ร้อยละ 0.2 - 0.5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการขาสีตามผิวของเม็ดพอลิเมอร์ ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

สำหรับส่วนเหลวประกอบด้วยมอนอเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต เป็นของเหลวใสไม่เสถียร (stable) ระเหยง่าย จึงใส่สารช่วยให้เสถียร เช่น ไฮโดรควิโนน (hydroquinone) ร้อยละ 0.006 โดยน้ำหนักและบรรจุในขวดสีชา เพื่อป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ขณะเก็บ นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเชื่อมไขร้อยละ 1 - 2 โดยปริมาณ และส่วนประกอบอื่น ๆ ได้แก่ เอทิลอะคริเลต (ethyl acrylate) ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นพอลิเมอร์ร่วม

การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) เป็นการเติมเทอร์เทียรีเอมีน (tertiary amine) เช่น ไดเมทิล-พารา-โทลูอิดีน (dimethyl-para-toluidine) ในส่วนเหลว เมื่อผสมส่วนผงและส่วนเหลวเข้าด้วยกัน เทอร์เทียรีเอมีนทำให้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์แตกตัวเกิดอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ (peroxide free radicals) ซึ่งเป็นตัวเริ่มต้นกลไกการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ ตัวกระตุ้นทางเคมีนี้ใช้ในการเหนี่ยวนำกลไกปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ ซึ่งการกระตุ้นทางเคมีไม่ใช้พลังงาน

ความร้อน จึงเกิดปฏิกิริยาสมบูรณได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองหมายถึงคุณเคียวริง (cold-curing) หรืออะคริลิกชนิดบ่มได้เอง

ระดับกลไกการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองไม่สมบูรณเท่าเรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยความร้อน ดังนั้นพินปลอมที่ถูกเตรียมโดยใช้เรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เอง ยังคงมีมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา (unreacted monomer) ปริมาณมากเหลืออยู่ในชั้นพินปลอม ซึ่งมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาทำให้มีปัญหาหลัก 2 ประการคือเป็นสารทำให้พอลิเมอร์นุ่ม (plasticizer) เป็นสาเหตุให้ลดความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุ และมอนอเมอร์ที่เหลือเป็นสารที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก

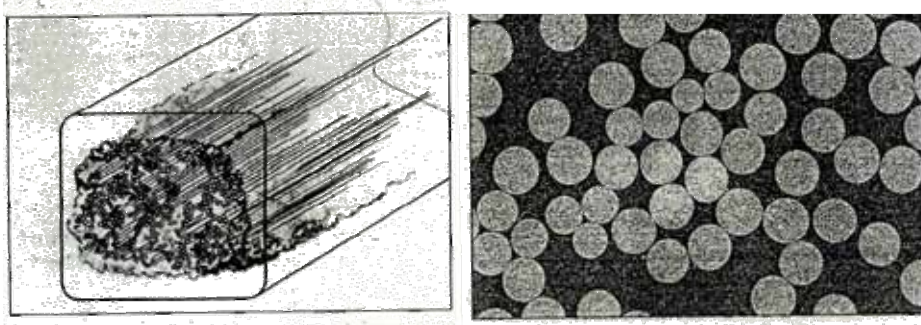
จากคุณสมบัติทางกายภาพเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองมีการหดตัวน้อยกว่าเรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยความร้อน ดังนั้นเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เองมีความเที่ยงตรงของมิติมากกว่าเรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยความร้อน(Anusavice, 2003)

เสถียรภาพของสีของเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เอง โดยทั่วไปต่ำกว่าเรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยความร้อน เนื่องจากความสัมพันธ์ของเทอร์ทีย์รีเอมีนภายในเรซินอะคริลิกชนิดบ่มได้เอง โดยเอมีนเสี่ยงต่อการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) และเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ซึ่งอาจทำให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดได้โดยการเพิ่มตัวคงเสถียรภาพ เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน(Anusavice, 2003; Powers, 2006)

2.2. คอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Composites)

คอมโพสิตเสริมเส้นใยเป็นโครงสร้างของวัสดุที่ประกอบกันอย่างน้อย 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ส่วนการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยให้ค่าความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) เพิ่มขึ้น เมทริกซ์ (matrix) เป็นส่วนโครงสร้างโดยรอบเส้นใยทำหน้าที่รองรับส่วนเสริมความแข็งแรง และทำให้วัสดุสามารถนำมาใช้งานได้ ส่วนเสริมความแข็งแรงอาจเป็นโลหะ เซรามิกหรือพอลิเมอร์ ในทางทันตกรรมมักใช้เรซินเมทริกซ์เสริมด้วยเส้นใยแก้ว (glass) พอลิเอทิลีน (polyethylene) หรือคาร์บอน (carbon) เส้นใยมีการเรียงตัวได้หลายรูปแบบได้แก่ แบบที่ 1 เรียงตัวทิศทางเดียวกัน (Unidirectional fiber) มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่องเรียงตัวขนานกันในเมทริกซ์เรียกว่า คอนทินิวอัลไฟเบอร์คอมโพสิต (continuous fiber composite) ซึ่งเป็นแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เรียกกลุ่มของเส้นใยนี้ว่า โรฟวิง (roving) ประกอบไปด้วยเส้นใยเดี่ยว ๆ 1,000 - 200,000 เส้นใยดังภาพที่ 1 และแบบที่ 2 มีลักษณะถักเป็นเปีย (braided and woven fiber) เป็นชนิดที่ประกอบด้วยเส้นใยชนิดสั้นเรียงตัวในเมทริกซ์ เช่นพวกพอลิเมอร์ที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยที่มีการเรียงตัวในสองทิศทางดังภาพที่ 2 นอกจากนี้เส้นใยทั้งสองประเภทยังถูกจัดเรียงตัวให้กระจายอยู่ในเมทริกซ์ได้โดยสุ่ม คอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีการเรียงตัวดังกล่าว ทำให้มีคุณสมบัติ

เชิงกลที่เหมือนกันโดยตลอด (isotropic) ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงของวัสดุไม่สัมพันธ์กันกับทิศทางของแรงที่มากระทำ ถ้าวัสดุเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยที่มากกว่าสองชนิดนี้ถูกเรียกว่าไฮบริดไฟเบอร์คอมโพสิต (hybrid fiber composites) โดยทั่วไปเส้นใยเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 – 10 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคในวัสดุบูรณะทางทันตกรรมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 – 5 ไมครอน สำหรับชนิดของเส้นใยที่นำมาเสริมในคอมโพสิตขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำมาใช้งาน และคุณสมบัติที่นำมาใช้ในทางทันตกรรม ในปี ค.ศ. 1960 นำเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนเสริมความแข็งแรงให้แก่ฐานฟันปลอมเรซินอะคริลิก (Freilich, 2000) จากนั้นนำมาสร้างเป็นแกนเพื่อเป็นโครงของฟันปลอมติดแน่นสำหรับงานทันตกรรมรากเทียม เครื่องมือในงานทันตกรรมจัดฟัน และการผูกพันที่ยอก วัสดุคอมโพสิตเริ่มพัฒนาคุณสมบัติเพื่อนำมาใช้ในงานทางคลินิกมากขึ้น ปัญหาส่วนมากเกี่ยวกับขบวนการในการใส่เส้นใยลงในเรซิน เนื่องจากการจัดการกับเส้นใยทำได้ยากต้องทำด้วยความระมัดระวังไม่ให้เกิดการทำลายหรือปนเปื้อนกับผิวเส้นใย การเพิ่มจำนวนเส้นใยเป็นการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้แก่วัสดุ สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคุณสมบัติที่ต่ำกว่าต้องการคือปริมาณเส้นใยที่เสริมในเรซินมีจำนวนไม่มากพอ โดยทั่วไปเสริมเส้นใยในวัสดุปริมาณไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และอีกหนึ่งสาเหตุจากการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับในทางทฤษฎี เนื่องจากเส้นใยเหล่านี้มีคุณสมบัติการเปียกต่ำ (poor wetting) ทำให้เกิดการเชื่อมยึดระหว่างเส้นใยและเรซินไม่ดีพอ จึงเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยและเรซิน ในปี ค.ศ. 1980 นักวิจัยเริ่มให้ความสำคัญกับสารเชื่อมยึดนำมาเคลือบลงบนเส้นใยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการเปียกของเส้นใยให้มากขึ้น (Freilich, 2000) นอกจากนี้คุณสมบัติและกลไกของคอมโพสิตเสริมเส้นใยนี้มีความซับซ้อนมากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุทางทันตกรรมอื่น ๆ เช่นโลหะผสมทางทันตกรรม (dental alloy) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปแบบเดียวกัน (uniform) และมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดทั้งวัสดุ (isotropic) โดยไม่ขึ้นกับทิศทางของแนวแรงที่นำมาทดสอบ แต่คอมโพสิตเสริมเส้นใยนี้มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) และมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันโดยตลอด (anisotropic) ซึ่งหมายถึงคุณสมบัติของวัสดุขึ้นกับทิศทางของแนวแรงที่ทดสอบต่อแนวของเส้นใยเป็นสำคัญ เช่นคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบขนานในทิศทางเดียวกัน ทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดัดขวางมากที่สุดในทิศทางที่แรงขนานกับแนวเส้นใยนั้น และมีค่าความแข็งแรงดัดขวางต่ำสุดเมื่อแรงมีทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นใย เป็นผลให้การออกแบบชิ้นงานบูรณะต้องคำนึงถึงแนวของเส้นใยให้ขนานกับแนวแรงมากที่สุดเท่าที่ทำได้ (Freilich, 2000)



1ก

1ข

ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีเส้นใยเรียงตัวในแนวเดียวกัน

1ก ภาพวาดของคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีเส้นใยเรียงตัวในแนวเดียวกัน

1ข ภาพตัดขวางพื้นปดอมที่ทำด้วยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีเส้นใยเรียงตัวในแนวเดียวกัน

(FibreKor, Jeneric/Pentron) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

(ที่มาจาก Fiber-reinforced composites : in clinical dentistry 2000)



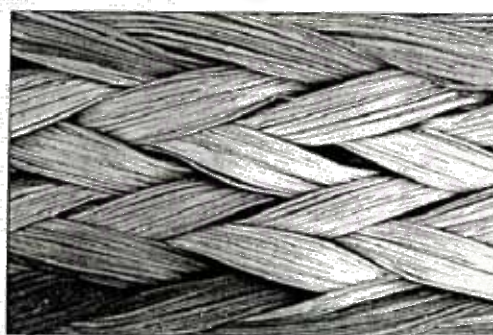
ก) Woven polyethylene fibers

(Ribbond,Ribbond)



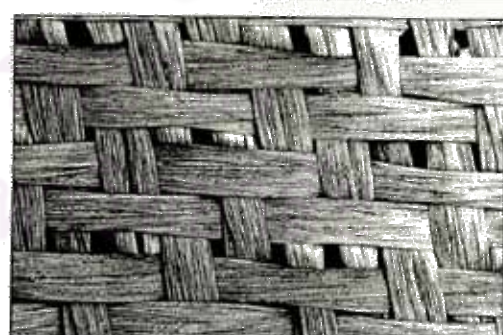
ข) Braided glass fibers

(Glaspan,Glaspan)



ค) Braided polyethylene fibers

(Connect,Kerr)



ง) Woven glass fibers

(Vectris Frame/Single Ivoclar)

ภาพที่ 2 แสดงการเรียงตัวของเส้นใยแบบถักเป็นเปียลักษณะต่าง ๆ กันด้วยภาพถ่ายจาก

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

(ที่มาจาก Fiber-reinforced composites : in clinical dentistry 2000)

เส้นใยที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงแบ่งเป็นประเภทตามความยาวของเส้นใยมากกว่า ลักษณะโครงสร้างหน้าตัดของเส้นใยที่ถูกฝังลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งรวมเอาเส้นใยเหล่านั้นเข้าไว้ด้วยกันและล้อมรอบเส้นใยเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงไปที่เส้นใยซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงมากกว่า นอกจากนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์ ยังทำหน้าที่ป้องกันเส้นใยจากผลของความชื้นอีกด้วย

ความแข็งแรงของเส้นใยจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ใช้เสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุที่มีความเปราะ เช่นฐานฟันปลอมเรซินอะคริลิก จากการศึกษาที่ผ่านมา(Braden และคณะ, 1988; Manley, Bowman และ Cook, 1979; Ruyter, Ekstrand และ Bjork, 1986; Schreiber, 1971; Sehajpal และ Sood, 1989) นำคาร์บอนหรือแกรไฟท์ พอลิเอทีลีนและเซฟไฟร์ในรูปของเส้นใย มาเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ โดยแบ่งชนิดของเส้นใยได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงชนิดต่าง ๆ

	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus of elasticity (GPa)	Elongation (%)	Density (g/cm ³)
E-glass	3,400	72	4.9	2.62
S-glass	4,500	85	5.7	2.50
C-glass	3,100	71	4.8	2.49
Carbon/graphite	2,400-3,300	230-390	0.6-1.4	1.70-1.90
Aramid (Kevlar)	3,600-4,100	62-130	2.8-4.0	1.44
Polyethylene (Spectra 900)	2,600	117	3.5	0.97

(ที่มาจาก Fiber-reinforced composites : in clinical dentistry 2000)

2.3. เส้นใยที่ใช้เสริมความแข็งแรง

2.3.1. เส้นใยคาร์บอนหรือแกรไฟท์

เส้นใยคาร์บอนผลิตขึ้นครั้งแรกโดย Edison ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 ด้วยขบวนการเกิดเป็นเส้นใยคาร์บอน (carbonization) จากแท่งไม้ไผ่ขนาดเล็ก ๆ และใยฝ้าย โดยการให้ความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปผ่านบรรยากาศที่เฉื่อย ณ อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ขบวนการนี้เป็นการกำจัดไฮโดรเจน (H_2), ไนโตรเจน (N_2) และ ออกซิเจน (O_2) ออกจากสายโซ่ของคาร์บอนอะตอม เพื่อให้ได้เส้นใยคาร์บอน (Yazdanie และ Mahood, 1985) มีรายงานการนำเส้นใยประเภทนี้มาใช้ในการเสริมความแข็งแรงแก่วัสดุทำฐานฟันปลอม ครั้งแรกเมื่อต้นปี ค.ศ. 1960 ผลของการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางให้แก่วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลตถึงร้อยละ 100 (Schreiber, 1971) ต่อมามีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนหรือแกรไฟท์ดังสรุปในตารางที่ 2 พบว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยและการใช้สารเชื่อมยึดไซเลนสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางให้แก่วัสดุได้เช่นเดียวกันกับการศึกษาต่าง ๆ ที่ผ่านมา (Bowman และ Manley, 1984; DeBoer, Vermilyea และ Brady, 1984; Kilfoil, Hesby และ Pelleu, 1983; Schreiber, 1971) พบว่าการนำเส้นใยคาร์บอนเสริมความแข็งแรงสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เรซินอะคริลิกได้ แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยคาร์บอนยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะต่อการนำมาใช้ในงานทันตกรรม เช่นสีดำของคาร์บอน ดังนั้นการใช้เส้นใยชนิดนี้จึงมีปัญหาด้านความสวยงาม (Schreiber, 1971) ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้เส้นใยแก้วและเส้นใยอะรามิดถูกนำมาใช้ เพื่อเสริมความแข็งแรงในกรณีที่ต้องการความสวยงามแทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 แสดงผลการศึกษาคือความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยคาร์บอน

Reference	Form of Fiber Treatment	Amount	Effect	
Vallittu et al(1992)	C,UT,U	?wt%	16%	
	C,ST,*U	?wt%	25%	
Setz et al(1989)	C,UT,U	0.1 wt%	13%	
		0.5 wt%	23%	
		1.0 wt%	18%	
		2.5 wt%	37%	
		5.0 wt%	38%	
Schreiber(1971)	C,UT,U	10.0 wt%	49%	
		?wt%	-22%	
		?wt%	100%	
Knoel et al (1975)	S,UT,R	?wt%	-33%	
		S,treatment = ?, R	1.0 wt%	-2%
		S,UT?,R	2.0 wt%	4%
		S,UT?,R	3.0 wt%	-2%
Yazdanie et al	S,UT?,R	10.0 wt%	0%	
		C,ST,^ U	1 roving = ?wt%	-22%
			2 rovings = ?wt%	30%
			3 rovings = ?wt%	10%
			4 rovings = ?wt%	30%
			5 rovings = ?wt%	90%
			C.ST,^ B	1 layer = ? wt%
Ekstrand et al(1987)	C,UT,U	2 layers = ?wt%	30%	
		3 layers = ?wt%	0%	
		4 layers = ?wt%	30%	
		5 layers = ?wt%	60%	
		4wt%	-9%@	
		10wt%	+58%@	
C,ET,U	20wt%	155%@		
	4wt%	+8%@		
	10wt%	+32%@		
	20wt%	+129%@		

Abbreviations: C, continuous fibers; U, unidirectional; B, bidirectional; R, randomly orientated; UT, untreated; ST, silane treated; ET, epoxy treated.*Silane AP133, Union Carbide Chemical, ^Silane A174, Union Carbide Chemical.@Silane compound not reported.

(ที่มาจาก Vallittu, P. K. 1996. A review of fiber-reinforced denture base resins.

J Prosthodont 5(4): 270-6.)

2.3.2. เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber)

มีชื่อทางเคมีที่เรียกว่าเส้นใยอะรามิดพอลิเอไมด์ (aromatic polyamide fibers) หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่าเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fibers) หลังจากที่มีการผลิตออกมาใช้เป็นครั้งแรกโดยบริษัทดูปองต์ (DuPont) เส้นใยประเภทนี้มีสีเหลืองอ่อนซึ่งมีสีใกล้เคียงกับสีฟันธรรมชาติมีคุณสมบัติการเปียก (wettability) สูงกว่าเส้นใยคาร์บอน และไม่จำเป็นต้องปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน นอกจากนี้พบว่าเส้นใยประเภทนี้ไม่มีความเป็นพิษ(Mullarky, 1985) และสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้ดังตารางที่ 3 และจากการศึกษาของ Vallittu(Vallittu, 1996a) พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยประเภทนี้สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางให้แก่วัสดุนี้ได้

ตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยอะรามิด

Reference	Form of Fiber Treatment	Amount	Effect
Vallittu et al(1992)	C,UT,U	?wt%	+31%
	C,ST,*U	?wt%	+31%
Wright et al(1979)	S,UT,R	1.0 wt%	+17%
		4.0 wt%	+24%
		7.0 wt%	+39%
Mullarky(1985)	C,ST,^ U	4.0 wt%	+2%
		16.0 wt%	+145%
Pourdehimi et al(1986)	S,UT,R	1.0 wt%	+1%
		7.0 wt%	-32%

Abbreviations: C, continuous fibers; U, unidirectional; B, bidirectional; R, randomly orientated;

UT, untreated; ST, silane treated.*Silane AP133, Union Carbide Chemical,

^Silane A174, Union Carbide Chemical. @Silane compound not reported.

(ที่มาจาก Vallittu, P. K. 1996. A review of fiber-reinforced denture base resins.

J Prosthodont 5(4): 270-6.)

2.3.3. เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูง [ultrahigh-modulus polyethylene (UHMP)]

เส้นใยประเภทนี้พัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยแห่งลีดส์ (University of Leeds) โดย Cappacio และ Ward ในปี 1973(Gutteridge, 1992) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่มีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา (plasma treatment) ให้ผลในการเพิ่มความแข็งแรงกระแทก (impact strength) และความแข็งแรงดัดขวางแก่ชิ้นทดสอบพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากกว่าชิ้นทดสอบที่

ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว(Braden และคณะ, 1988) โดยวิธีนี้เป็นการใช้พลาสติกมากัดพื้นผิวเส้นใย เพื่อให้เกิดลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูเล็ก ๆ (pitting) ทำให้พื้นผิวมีความหยาบมากขึ้นและเพิ่มพื้นที่ผิว ให้แก่เส้นใย จึงเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติการเปียกให้แก่เส้นใยและเพิ่มการยึดติดเชิงกลที่รอยต่อ ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งตรงข้ามกับการศึกษาของ D.J.Gutteridge พบว่าการ ปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสติกไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุผสมระหว่างเส้นใย พอลิเอทิลีนชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Gutteridge, 1992) ต่อมา มีการ นำเส้นใยประเภทนี้มาเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลตดังตารางที่ 4 และพบผล ของการเสริมเส้นใยนี้ต่อความแข็งแรงดัดขวาง ซึ่งขึ้นกับปริมาณเส้นใยที่ใส่เข้าไป โดยปริมาณเส้น ใยที่สูงถึงร้อยละ 40-47 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางได้อย่างชัดเจน(Vallittu, 1996b)

ตารางที่ 4 แสดงผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใย พอลิเอทิลีนชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูง

Reference	Form of Fiber Treatment	Amount	Effect
Ladizesky et al(1990)	C,UT,U	40-47 wt%	77%
	C,PT,U	40-47 wt%	72%
Ladizesky et al(1993)	S,UT,R	2.4 vol%	-1%
	S,UT,R	37.0 vol%	-24%
	S, PT,R	37.0 vol%	-5%
Williamson et al(1994)	C,UT,R	0.5 wt%	+11%*
		1.5 wt%	+6%*
		3.0 wt%	-5%*
	C,UT,R	0,5 wt%	-25% ^
		1.5wt%	-18% ^
Gutteridge(1992)	S,UT,R	1.0 wt%	-7%
	S,PT,R	2.0 wt%	2%
	S,PT,R	1.0 wt%	4%
		2.0 wt%	-4%
Dixon et al(1992)	C,UT,U	?wt%	-3%

Abbreviations: C, continuous fibers; S, short fibers; U, unidirectional; R, randomly orientated;

UT. untreated; FT, plasma treated. *Acrylic resin (Lucitone 199; Dentsply Int, York. PA).

^Acrylic resin (Acron MC; GC International Corp, Scottsdale, AZ).

(ที่มาจาก Vallittu, P. K. 1996. A review of fiber-reinforced denture base resins.

J Prosthodont 5(4): 270-6.)

2.3.4. เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วคือ วัสดุเสริมแรงชนิดหนึ่งเมื่อนำไปเติมในเรซินหรือพลาสติกที่ต้องการเสริมเส้นใย ทำให้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปมีความแข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา อายุการใช้งานยาวนานขึ้น และทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี เส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดและราคาถูกกว่าเส้นใยเสริมแรงประเภทอื่น ๆ ขบวนการขึ้นรูปเส้นใยแก้วเป็นการหลอมละลายวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วยทราย ดินเหนียว หินปูน กรดบอริก ฟลูออรีน และอื่น ๆ ให้เป็นน้ำแก้ว จากนั้นจึงทำการสังเคราะห์น้ำแก้วที่หลอมละลายออกมาให้เป็นเส้นใย ประวัติการใช้เส้นใยแก้วในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ยาวนานกว่า 50 ปี (เริ่มใช้เส้นใยแก้วประมาณ ค.ศ. 1950) เส้นใยที่ผลิตผ่านกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการยึดติดกับพลาสติก ทนต่อการขย่ายและสภาพการใช้งาน เส้นใยแก้วมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักร่วมกับสารประกอบออกไซด์อื่น ๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เส้นใยแก้วที่ใช้เสริมในวัสดุคอมโพสิตมีหลายประเภท ได้แก่ อีกลาส (E-glass) ซึ่งมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าดี ส่วนเอสกลาส (S-glass) มีสมบัติความแข็งแรงสูง และซีกลาส (C-glass) ที่มีสมบัติต้านทานสารเคมีดี ประโยชน์ของเส้นใยแก้วที่นำไปเสริมแรงในเรซินหรือพลาสติก ทำให้เพิ่มความทนทาน เหนียว และแข็งแรงมาก สามารถนำไปผลิตเป็นไซโล บรรจุอาหารสัตว์ ท่อสารเคมี หลังคาบ้าน ตัวถังรถยนต์ ป้ายโฆษณา โต๊ะ เก้าอี้ กระจาดต้นไม้ ประตู หน้าต่าง มุ้งลวด ผ้าม่านอาคารสูง ถังน้ำ ถังบรรจุสารเคมี เรือและแผ่นวงจรรีเลย์คทรอนิกส์ เป็นต้น

คุณสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยแก้ว

1. คุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยแก้ว โดยทั่วไปมีความทนทานต่อการผุกร่อน ไม่เปื่อย ไม่ดูดความชื้น ไม่บวมหรือแตกตัวและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เมื่อสัมผัสกับความชื้น
2. คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแก้ว มีความยืดหยุ่นได้ดีคือสามารถยืดตัวไปตามสัดส่วนกับแรงที่กระทำและหดตัวกลับสู่ขนาดเดิมหลังจากที่เอาแรงกระทำออกไป เส้นใยแก้วมีความสามารถในการยืดตัวก่อนขาดถึงร้อยละ 5 ทำให้ทนต่อแรงดึงได้สูง และมีรูปร่างที่แน่นอน
3. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยแก้ว มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric) ต่ำใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี
4. คุณสมบัติทางความร้อนของเส้นใยแก้ว สามารถต้านทานความร้อนได้เป็นเลิศ และไม่ไหม้ไฟ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ได้นำเส้นใยแก้วไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทนไฟต่าง ๆ เช่น อิฐทนไฟ ผนังกันความร้อน เป็นต้น

พลาสติกเสริมเส้นใยแก้วนั้นมียุทธประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง อย่างไรก็ตามเพื่อให้การเสริมแรงมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เส้นใยแก้วต้องผ่านกระบวนการทางเคมีที่ผิวแก้วก่อน เพื่อให้เส้นใยแก้วและเนื้อพลาสติกไม่แยกออกจากกันแต่ยึดติดกันแน่น ในทางอุตสาหกรรมพลาสติกนั้น คำว่า "พลาสติกเสริมแรง" โดยทั่วไปกล่าวถึงชิ้นงานที่เกิดจากการเสริมแรงในสารพอลิเมอร์ด้วยเส้นใย ซึ่งเส้นใยนี้มีทั้งที่อยู่ในรูปของเส้นใยสั้น ๆ เส้นใยที่เป็นเส้นสานกันและเส้นใยที่ทอเป็นผืนผ้า ซึ่งการค้นพบและการพัฒนาพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยเริ่มต้นจาก "พอลิเอสเตอร์" โดยริเริ่มช่วงระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 และทำให้เกิดคำว่าเฟออาร์พี (FRP: fiberglass reinforced plastic) หรือจีอาร์พี (GRP: glass reinforced plastic) ในปัจจุบันได้นำวัสดุเสริมแรงมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- อุตสาหกรรมรถยนต์ โดยใช้วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นชิ้นส่วนของรถยนต์แทนโลหะ นอกจากเป็นการยืดอายุการใช้งานแล้ว ยังช่วยลดน้ำหนักของรถยนต์เป็นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี
 - อุตสาหกรรมเครื่องบิน ในด้านการบินเส้นใยอะรามิดและเส้นใยคาร์บอน นำมาใช้เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทนต่อการสึกกร่อนและการเสียดสีจากใบพัดเครื่องยนต์ได้เป็นอย่างดี นำมาใช้ในห้องขนส่งสัมภาระของเครื่องบินลำเลียง เป็นส่วนประกอบของเฮลิคอปเตอร์และเครื่องบินขับไล่ เพื่อประโยชน์ในการลดน้ำหนักและยังลดการตรวจจับของเรดาร์ได้อีกด้วย
 - อุตสาหกรรมเรือ โดยการนำเส้นใยอะรามิดช่วยในด้านการสร้างเรือแบบต่างๆ เพิ่มความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาจึงทำให้เกิดความคล่องตัว และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเรือขณะแล่นบนผิวน้ำ
 - อุตสาหกรรมผ้าเบรกรถยนต์ ในปัจจุบันพบว่าหลายประเทศในยุโรป สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ได้ประกาศห้ามใช้ผ้าเบรกที่ทำมาจากเส้นใยเยื่อหินทนไฟ (asbestos) เนื่องจากเส้นใยชนิดนี้มีผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ ทำให้เกิดโรคมะเร็งและโรคระบบทางเดินหายใจ ผู้ที่อยู่ในอุตสาหกรรมนี้จึงนำเส้นใยอะรามิดมาใช้แทน
 - อุตสาหกรรมท่อไอเสีย ใช้เส้นใยแก้วที่เป็นฉนวนความร้อนช่วยในการเก็บเสียงจากท่อไอเสีย ได้แก่ เส้นใยแก้วประเภทอิกลาสที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย โดยนำเส้นใยแก้วมาบุในท่อไอเสียทำให้เก็บเสียงได้ดี และทนต่อความร้อนสูงได้ถึง 800 องศาเซลเซียส
- ในทางทันตกรรมทดลองนำเส้นใยแก้วมาเสริมความแข็งแรงในวัสดุทำฐานฟันปลอมประเภทที่มีองค์ประกอบของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ตั้งแต่ในปี 1960 (Vallittu, 1996b) ต่อมามีการศึกษาผลความแข็งแรงของวัสดุเส้นใยแก้วที่เสริมอยู่ในพอลิเมทิลเมทาคริเลต ดังตารางที่ 5

สามารถสรุปได้ว่าการนำเส้นใยเสริมในพอลิเมทิลเมทาคริลิตสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงตัดขวางของวัสดุได้ดี โดยเฉพาะเมื่อใส่เส้นใยแก้วในปริมาณความเข้มข้นที่สูงพอ

ตารางที่ 5 แสดงผลการศึกษาค่าความแข็งแรงของเรซินอะคริลิกที่เสริมเส้นใยแก้ว

Reference	Form of Fiber Treatment	Amount	Effect
Vallittu et al(1992)	C,UT,U	?wt%	17%
	C,ST,*U	?wt%	19%
	C,UT,B	?wt%	28%
	C,UT,B	?wt%	31%
Vallittu et al(1994)	C,ST,^U	58wt%	145%
Setz et al(1989)	C,UT,U	1.0wt%	25%
		2.5 wt%	28%
		5.0 wt%	20%
Solnit (1991)	C,UT,B	?wt%	7%
	C,UT,R	?wt%	-12%
	C,ST,@B	?wt%	-3%
	C,ST,@R	?wt%	4%

Abbreviations: C, continuous fibers; U, unidirectional; B, bidirectional; R, randomly orientated;

UT, untreated; ST, silane treated.*Silane AP133, Union Carbide Chemical,

^Silane A174, Union Carbide Chemical. @Silane compound not reported.

(ที่มาจาก Vallittu, P. K. 1996. A review of fiber-reinforced denture base resins.

J Prosthodont 5(4): 270-6.)

2.4. ปัจจัยสำคัญต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

2.4.1. คุณสมบัติการยึดติดที่ดีของเส้นใยในพอลิเมอร์เมทริกซ์

เป็นปัจจัยสำคัญต่อความแข็งแรงของวัสดุ(Beech และ Brown, 1972) การยึดกันด้วยพันธะเคมีระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์มักยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ การยึดติดกันที่ดีสามารถส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปสู่เส้นใยได้เป็นอย่างดี โดยการนำเอาสารเชื่อมยึดไซเลนมาใช้ เพื่อช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับเส้นใยแก้ว(Vallittu, 1996b) สารเชื่อมยึดไซเลนทำให้เกิดพันธะทางเคมีเป็นสะพานไซลอกเซน (siloxane bridge) ที่เกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation) ของหมู่ไฮดรอกซิล (silanol) กับพื้นผิวซิลิกาบนเส้นใยแก้ว(Soderholm และ Shang, 1993) การใช้สารเชื่อมยึดไซเลนเพื่อช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยชนิดต่าง ๆ อาศัยหลักการของทฤษฎีการเปียก (wettability) โดยสารเชื่อมยึดไซเลนที่จับอยู่บนพื้นผิวของเส้นใย

ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับพอลิเมอร์ไปที่พื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย จากการศึกษาพบว่า การยืดติดที่ดีมีผลต่อความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุ (Vallittu, 1993, 1997a) การใช้สารเชื่อมยึดไซเลนร่วมกับเส้นใยแก้ว พบว่าให้ผลการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วและพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ในขณะที่ Soderholm และ Shang ศึกษาพบว่า การใช้สารเชื่อมยึดไซเลนไม่สามารถเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Soderholm และ Shang, 1993) การปรับปรุงการยึดติดของเส้นใยประเภทนี้สามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยพลาสมา เช่นเดียวกับที่ใช้ในเส้นใยริบบอนด์ (ribbond) สามารถเกิดการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยได้ดีขึ้น (Braden และคณะ, 1988) แต่บางการศึกษารายงานถึงการปรับสภาพผิวด้วยวิธีนี้ว่าไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวเส้นใย (Yazdanie และ Mahood, 1985)

2.4.2. ความอึดตัวของเส้นใยด้วยเรซินอะคริลิก

ความอึดตัวของเส้นใยอย่างมีประสิทธิภาพช่วยให้เรซินเมทริกซ์ไหลแผ่มาอยู่รอบ ๆ พื้นผิวเส้นใยได้ดี (Vallittu, 1996b) การแช่เส้นใยในส่วนน้ำมอนอเมอร์ของเรซินอะคริลิกก่อน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เส้นใยเข้าไปทำปฏิกิริยาในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้เส้นใยนั้นยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น และเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ ดังที่ Eirich (Eirich, 1967) ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าเส้นใยที่ไม่ได้ฉาบผิวด้วยมอนอเมอร์ของเรซินอะคริลิกทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อวัสดุได้ (Hill, 1981) และจากขบวนการที่แช่เส้นใยในมอนอเมอร์ก่อน มีผลให้คอมโพสิตเสริมเส้นใยนี้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นโดยดูจากภาพตัดขวาง (Hill, 1981) ต่อมาการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสาเหตุของช่องว่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการหดตัวจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้จากภาพตัดขวาง (Solnit, 1991) และมีการศึกษาเพื่อต้องการลดการหดตัวนี้ โดยให้เส้นใยจมลงในส่วนผสมของผงและน้ำแทน ทำให้มีพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มากพอและเคลือบทับเส้นใยอย่างต่อเนื่องและเกิดพันธะเคมีระหว่างเส้นใยขึ้น ซึ่งให้ผลการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงดัดขวาง (Vallittu, 1994) อย่างไรก็ตามยังสามารถพบช่องว่างเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเรซินอะคริลิกและเส้นใย ซึ่งมีผลต่อการดูดซับน้ำ ทำให้วัสดุถูกกัดกร่อนและมีความแข็งแรงของวัสดุ สำหรับเส้นใยที่มีการถักทอมาแล้วสามารถนำมาแช่ในมอนอเมอร์ทำให้เส้นใยรวมกันอยู่ในเนื้อของเรซินอะคริลิกได้ดี ซึ่งมีรายงานในงานวิจัยทางทันตกรรมไว้เช่นกัน (Goldberg และ Burstone, 1992; Vallittu และ Lassila, 1992) นอกจากนี้การใช้ส่วนผสมของผงและน้ำมาแช่เส้นใยที่มีการถักทอแล้วเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ฐานฟันปลอมได้ แต่ยังไม่สามารถทำได้จริงในคลินิก เนื่องจากส่วนผสมของผงและน้ำเมื่อถึงขั้นอ่อนนุ่ม (dough stage) มีความหนืดที่ค่อนข้างสูง ทำให้การนำเส้นใยที่เสริมความแข็งแรงมาแช่ใน

ส่วนผสมของเรซินอะคริลิกก่อนค่อนข้างทำได้ยาก(Goldberg และ Burstone, 1992; Hill, 1981; Lehmann, Eickemeyer และ Rammelsberg, 2004; Vallittu, 1996a) นอกจากนี้การควบคุมไม่ให้เส้นใยแตกกระจายขณะกดลงในแบบหล่อทำได้ยาก การแช่เส้นใยที่ไม่อิมมัตวพอนี้ มักเกิดในพอลิเมอร์ที่ทำฐานฟันปลอมชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน ซึ่งมีความหนืดสูงและการเกาะติดกับน้ำได้ต่ำ(Tezvergil และคณะ, 2004) ส่วนพอลิเมอร์ที่ทำฐานฟันปลอมชนิดบ่มตัวเองสามารถแช่เส้นใยในส่วนผสมเรซินอะคริลิกขณะที่เหลวอยู่และเกิดการอิมมัตวได้ดี แต่อย่างไรก็ตามยังพบช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุทั้งความแข็งแรงดึง (tensile strength) และค่ายืดหยุ่นโมดูลัส (modulus of elasticity) (Lehmann และคณะ, 2004) นอกจากนี้ความหนืดของส่วนผสมกับน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการปรับอัตราส่วนผสมดังกล่าว โดยความหนืดของส่วนผสมที่ลดลงสามารถเพิ่มการอิมมัตวของเส้นใยด้วยเรซินอะคริลิกได้ แต่ส่วนน้ำที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีผลทำให้เกิดการหดตัวระหว่างปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินอะคริลิก เมื่อเปรียบเทียบกับเรซินอะคริลิกบริเวณรอบ ๆ ที่มีอัตราส่วนผสมปกติ และพบว่า การหดตัวของวัสดุที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์นี้ เป็นผลให้เกิดการแยกตัวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์รอบ ๆ เส้นใย(Goldberg และ Burstone, 1992) และอาจพบปัญหาอื่น ๆ ได้อีกคือการหดตัวของเรซินที่เกิดขึ้นภายในเส้นใย ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใย เมื่อเทียบกับการเสริมความแข็งแรงด้วยแท่งโลหะ(Vallittu และ Ekstrand, 1999)

ระดับการอิมมัตวด้วยเรซินของเส้นใยที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อการใช้เส้นใยในการเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุ โดยในบริเวณที่เรซินไม่อิมมัตวทำให้เกิดการดูดน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสลายตัวเป็นสารประกอบอื่น (hydrolytic effect) นำไปสู่การลดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ(Tezvergil และคณะ, 2004) นอกจากนี้ที่กล่าวมานี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุเสริมความแข็งแรง มีการแทรกซึมของเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปในช่องว่าง ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้มีออกซิเจนที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินอะคริลิก ทำให้มีมอนอเมอร์เหลือตกค้างอยู่สูงและเป็นการลดความแข็งแรงของวัสดุลงได้(Ruyter และคณะ, 1986)

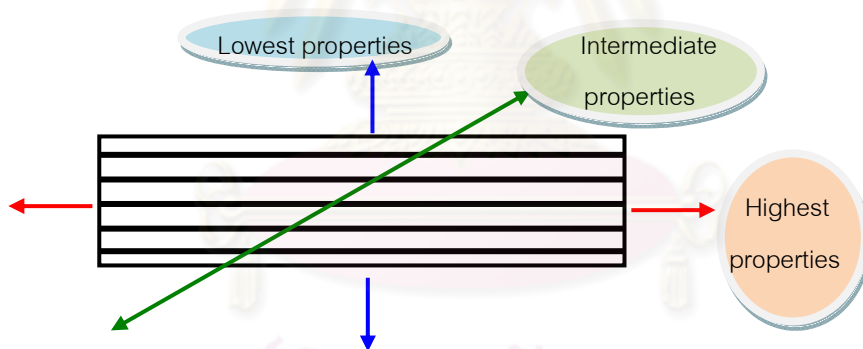
2.4.3. ปริมาณของเส้นใย

เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ โดยมากมักระบุหน่วยของความเข้มข้นของเส้นใยเป็นปริมาณโดยน้ำหนัก และสัดส่วนโดยน้ำหนักของเส้นใยถูกเปลี่ยนเป็นสัดส่วน โดยปริมาตรได้จากการคำนวณความหนาแน่นของพอลิเมอร์และเส้นใย(Vallittu, 1996b) แต่ผลจากการคำนวณนี้มีความถูกต้องเมื่อเส้นใยนั้นอิมมัตวด้วยเรซินอะคริลิกที่มากพอ และไม่มีช่องว่างเกิดขึ้นในส่วนโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตนี้

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณของเส้นใยเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยพอลิเมทิลเมทาคริลิตและเส้นใย(Goldberg และ Burstone, 1992; Tezvergil และคณะ, 2004; Vallittu, 1994; Williamson และคณะ, 1994; Yazdanie และ Mahood, 1985) โดยปริมาณที่สูงที่สุดสำหรับเส้นใยแก้วในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้รายงานไว้โดย Goldberg and Burstone(Elrich, 1967) เมื่อใช้เทคนิคการให้แรงกดแบบธรรมดาในการสร้างฐานฟันปลอม พบว่าการใช้ปริมาณของเส้นใยที่มากที่สุด คือร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก สามารถให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางแก่วัสดุถึง 265 เมกะปาสคาล (Vallittu และคณะ, 1994b)

2.4.4. ตำแหน่งและการเรียงตัวของเส้นใย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันโดยตลอด ซึ่งหมายถึงคุณสมบัติของวัสดุขึ้นกับทิศทางของแรงทดสอบที่กระทำต่อแนวของเส้นใยเป็นสำคัญ เช่น คอมโพสิตเสริมเส้นใยที่มีเส้นใยเรียงตัวแบบขนานในทิศทางเดียวกัน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงดัดขวางมากที่สุดในทิศทางที่แรงขนานกับแนวเส้นใยนั้น และมีค่าความแข็งแรงดัดขวางต่ำสุดเมื่อแรงที่มากกระทำมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงแนวการเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ
(ที่มาจาก Fiber-reinforced composites : in clinical dentistry 2000)

ส่วนตำแหน่งการวางเส้นใย เมื่อพิจารณาการวางเส้นใยในตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงาน ถ้าทิศทางของแรงที่กระทำบนชิ้นงานตั้งฉากกับแนวขนานของเส้นใยที่เสริมในชิ้นงาน พบว่าเส้นใยที่วางอยู่ในด้านที่เกิดแรงดึง (tension side) สามารถให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางมากกว่าเส้นใยที่วางอยู่ทางด้านที่เกิดแรงกด (compression side)(Tirapelli และคณะ, 2005)

2.5. สารเชื่อมยึด (Coupling Agent)

ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โดยการใส่ฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงนั้น คอมโพสิตที่ได้มีสมบัติดี ถ้าทำให้ฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงกระจายตัวหรือยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี วิธีการหนึ่งที่ยอมรับกันมานานแล้วคือ การเคลือบหรือปรับผิวของเส้นใยเสริมแรงด้วยสารที่สามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งพอลิเมอร์และเส้นใยเสริมแรง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก เมื่อนำไปผสมกับพอลิเมอร์ หมูกรดเข้ายึดเกาะกับอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่สายโซ่อะลิฟาติกเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ส่งผลให้แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี

การปรับปรุงการยึดระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์ นอกจากการใช้สารปรับพื้นผิวแล้ว ยังใช้สารเติมแต่งอีกประเภทหนึ่งคือสารเชื่อมยึด ซึ่งสารประเภทนี้ทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรง โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างเฟสทั้งสอง ทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น

กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์โดยการใช้สารเชื่อมยึด

สารเชื่อมยึดมีสูตรทั่วไปคือ $(R' O)_x - M - (R - X)_y$

โดย M คือ โลหะ ได้แก่ ซิลิกอน ไททาเนียม หรือเซอร์โคเนียม

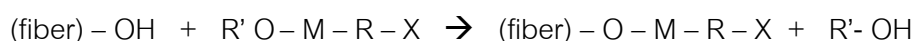
X เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ เช่น หมู่ไวนิล

หมู่อะมิโน เป็นต้น

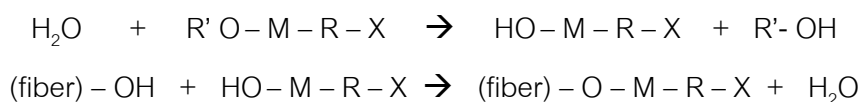
R เป็นหมู่อินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ M

R'O เป็นหมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับเส้นใยเสริมแรง

การยึดระหว่างสารเชื่อมยึดและเส้นใยเสริมแรงเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างหมู่ OR' ของสารเชื่อมยึดกับหมู่ OH ที่พื้นผิวเส้นใยดังนี้



หรือเกิดจากหมู่ OR' ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้นได้เป็นหมู่ OH เข้าทำปฏิกิริยาต่อไปกับเส้นใยดังนี้



การยึดระหว่างสารเชื่อมยึดและพอลิเมอร์เกิดจากหมู่ X ของสารเชื่อมยึดเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ โดยหมู่ X ที่แตกต่างกันหลายชนิดเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น สารเชื่อมยึดที่หมู่ X คือหมู่ไวนิลหรือหมู่อะคริลิล (acrylyl) ถูกนำไปใช้กับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวหรือพอลิโอเลฟินส์ชนิดเชื่อมขวาง (crosslinked polyolefins) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารเชื่อมยึดกับพอลิเมอร์เป็นแบบฟรีแรดิคัล หรือถ้าหมู่ X คือหมู่อะมิโน สารเชื่อมยึดชนิดนี้ใช้กับอีพอกซีเรซินหรือพอลิเอไมด์ เป็นต้น(สรวารี, 2546)

สารเชื่อมยึดสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

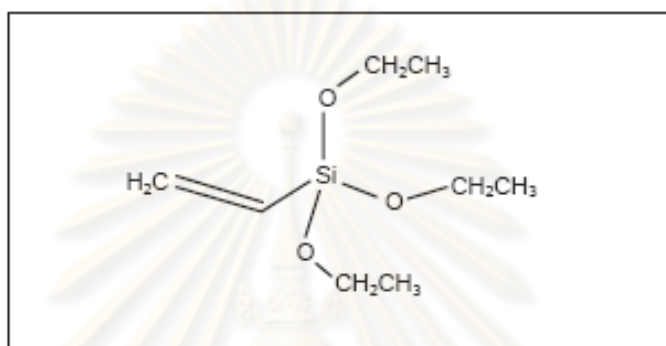
2.5.1. สารโครเมียมเชิงซ้อน (Chromium Complexes)

สารโครเมียมเชิงซ้อนเป็นสารเชื่อมยึดชนิดแรกที่เกิดขึ้นในทางการค้าโดยบริษัทดูปองต์ สารโครเมียมเชิงซ้อนนี้ช่วยให้เส้นใยแก้วยึดติดกับพอลิเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว โดยการสร้างพันธะ Cr-O-Si ระหว่างสารกับพื้นผิวเส้นใยแก้ว และยึดติดกับพอลิเอสเทอร์จากปฏิกิริยาระหว่างหมู่เมทาคริล (methacryl) กับพันธะคู่ในพอลิเอสเทอร์หรืออินสไตรนมอนอเมอร์ ปัจจุบันไม่มีการใช้สารโครเมียมเชิงซ้อน แต่ใช้ไซเลนหรือสารเชื่อมยึดชนิดอื่น ๆ แทน(สรวารี, 2546)

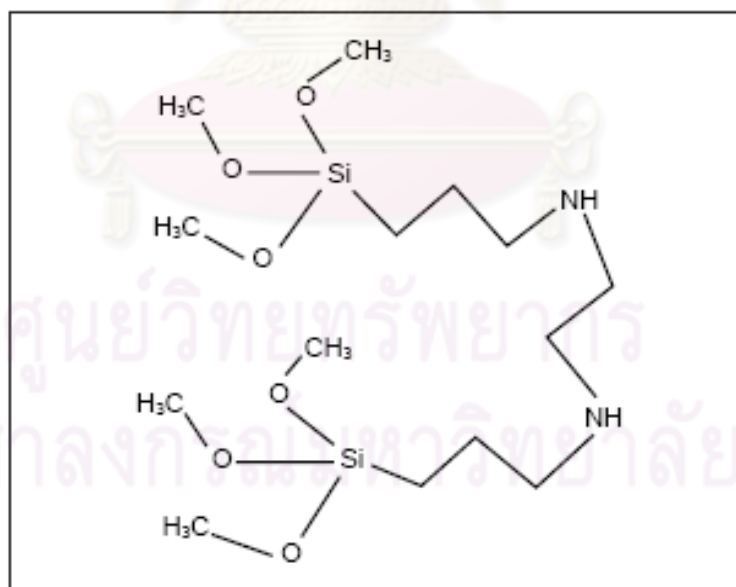
2.5.2. ไซเลน (Silanes)

ไซเลนเป็นสารเชื่อมยึดที่นิยมใช้มากที่สุดกับผลิตภัณฑ์พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว มีสูตรทั่วไปคือ $\text{Y-Si}(\text{OR})_3$ สารเชื่อมยึดไซเลนชื่อเต็มทางเคมีว่า สารเชื่อมยึดออกอานอฟังก์ชันนัลไตรอัลคอกซีไซเลน (organofunctional trialkoxysilane coupling agents)(Matinlinna และคณะ, 2004) เป็นสารประกอบทางเคมีกลุ่มใหญ่ที่ประกอบด้วยอะตอมซิลิกอน มีโครงสร้างคล้ายออร์โธเอสเตอร์ (orthoester) ที่มีหมู่ทำหน้าที่ 2 ข้าง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ 2 ตำแหน่งของโมเลกุล ส่วนแรกเป็นส่วนอินทรีย์ที่เกิดปฏิกิริยา (organic functional part) กับสารอินทรีย์ได้โดยมีหมู่ไวนิล (vinyl), อัลลิล (allyl), อะมิโน (amino) หรือไอโซไซยานาโต (isocyanato) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเป็นหมู่อัลคอกซี (alkoxy) ได้แก่เมทอกซี (methoxy) หรือเอทอกซี (ethoxy) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอนินทรีย์ โดยทั้งสองส่วนนี้เกิดพันธะโควาเลนต์ยึดระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์ สารเชื่อมยึดไซเลนอาจแบ่งได้เป็นหมู่ทำหน้าที่เดี่ยว (monofunctional) คือมีซิลิกอน

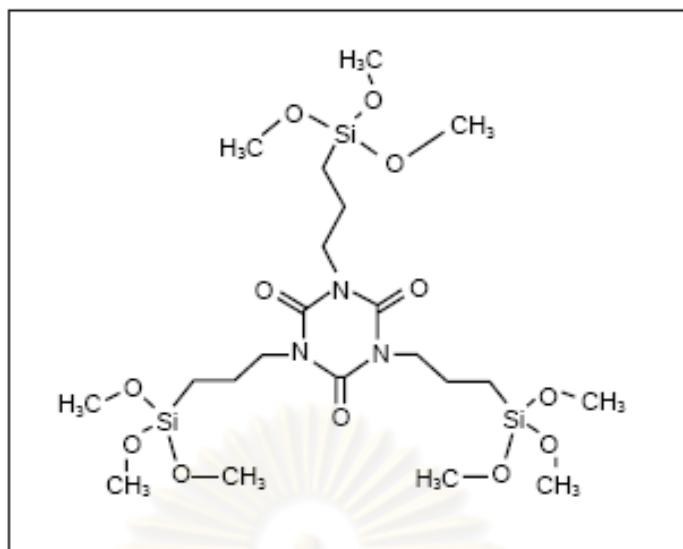
เพียง 1 อะตอมจับกับหมู่แอลคอกซี 3 หมู่ใน 1 โมเลกุล เช่น ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (vinyltriethoxy silanes) หรือหมู่ทำหน้าที่คู่ (bifunctional) ที่มีซิลิกอน 2 อะตอม แต่ละอะตอมจับกับหมู่แอลคอกซี 3 หมู่ เช่น บิส-ไตรเมทอกซีไซลิลโพรพิลเอทีลีนไดเอมีน [bis(3-trimethoxysilyl) propylethylene diamine] ส่วนไตรฟังก์ชันนัล (trifunctional) ประกอบด้วยซิลิกอน 3 อะตอม แต่ละอะตอมจับกับหมู่แอลคอกซีเช่นกัน ได้แก่ ตรีส-ไตรเมทอกซีไซลิลโพรพิลไอโซไซยานูเรต [tris(3-trimethoxysilyl)propyl]isocyanurate] ดังภาพที่ 4



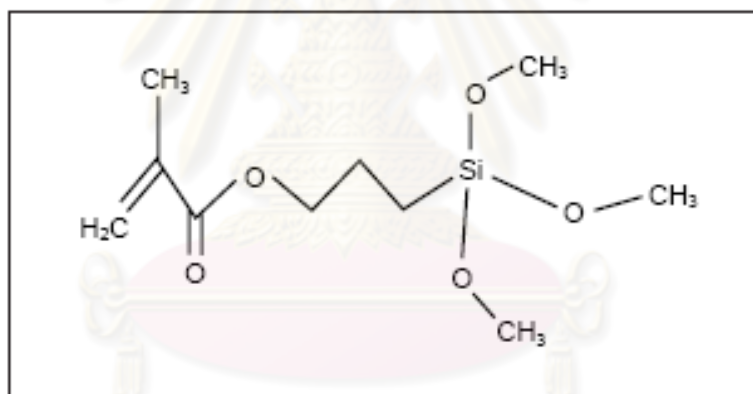
ก) ภาพโครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของ Monofunctional silane, vinyltriethoxysilane.



ข) ภาพโครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของ Bisfunctional silane, bis(3-trimethoxysilyl) propylethylenediamine.



ค) ภาพโครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของ Trifunctional silane, tris(3-trimethoxysilylpropyl)isocyanurate.



ง) ภาพโครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของ Monofunctional silane,

γ -methacryloxypropyltrimethoxysilane(or 3-trimethoxysilylpropyl methacrylate)

ภาพที่ 4 ก) – ง) แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมยึดไซเลนแบ่งตามจำนวนอะตอมของซิลิกอน (ที่มาจาก Matinlinna, J. P., Lassila, L. V., Ozcan, M., Yli-Urpo, A. and Vallittu, P. K. 2004.

An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. Int J Prosthodont

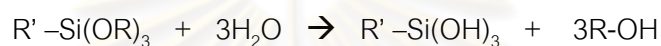
17(2) 155-64)

สารเชื่อมยึดไซเลนหรือที่เรียกว่า ไฮบริดออกอานิก-อินออกอานิกคอมพาวด์ (hybrid organic-inorganic compound) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการยึดติดระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยผ่านทางปฏิกิริยาทั้งสองข้าง นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมายเป็นเวลา

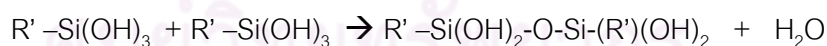
มานานกว่า 40 ปี เช่นการนำมาใช้เป็นสารปรับสภาพผิวของฟิลเลอร์ สารเชื่อมยึดไซเลนอาจเป็นทั้งสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) หรือสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ก็ได้ หรืออาจเป็นสารที่มีประจุบวกหรือลบก็ได้ (Going, 1979)

2.5.2.1. ปฏิกริยาของสารเชื่อมยึดไซเลน

สารเชื่อมยึดไซเลนเป็นสารที่ทำหน้าที่จับคู่สารระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยเริ่มจากการที่สารเชื่อมยึดไซเลนเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำ (hydrolysis) และการควบแน่น การทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไซเลนอลที่มีความเป็นกรดและชอบน้ำ และมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมาเป็นผลพลอยได้ ความเป็นกรดของไซเลนอลขึ้นกับส่วนอินทรีย์ที่ทำหน้าที่ของสารเชื่อมยึดไซเลน ปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นดังสมการ



ปฏิกิริยานี้มีออกซิเนียมไอออน (oxonium ion) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำขึ้นกับความเข้มข้นของสารเชื่อมยึดไซเลนและอุณหภูมิ ซึ่งปกติระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว ประมาณ 0.5 – 2 ชั่วโมง จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นตามมา อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างหมู่ไซเลนอลของสารเชื่อมยึดไซเลนโมเลกุลเดี่ยว (monomeric silanes) ไปเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นมีอัตราที่ต่ำสุดและได้สารละลายของสารเชื่อมยึดไซเลนที่มีความเสถียรสูงสุด ณ สภาวะความเป็นกรด-ต่าง (Ph) เท่ากับ 4 โดยใช้กรดอะซิติกเป็นตัวปรับค่า ความเป็นกรด-ต่าง ขณะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นโมเลกุลของสารเชื่อมยึดไซเลน สามารถเกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกันเกิดเป็นไดเมอร์ (dimers) ได้ดังสมการ



จากนั้นแต่ละไดเมอร์ทำปฏิกิริยาต่อเป็นสายที่ยาวขึ้นที่เรียกว่าไซเลนอลออลิโกเมอร์ (silane oligomers) และเกิดเป็นพันธะไซลอกเซนที่ไม่ชอบน้ำ (-Si-O-Si) และจับกับส่วนอนินทรีย์เช่นซิลิกาหรือออกไซด์ของโลหะซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เกิดเป็นพันธะระหว่างโลหะได้ (-Si-O-M-) และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารจำพวกแก้วซิลิกา (quartz, SiO₂) ทำให้เกิดเป็นชั้นของไซลอกเซน(-Si-O-Si)

ทางทันตกรรมบูรณะฟันระที่แข็งแรงระหว่างเฟสต่าง ๆ ซึ่งยึดติดกันมีความสำคัญมาก สารเชื่อมยึดไซเลนที่นำมาใช้กันมากในงานทันตกรรมคือ มอนอฟังก์ชันนัลแกมมาเมทาคริลอกซีพรอพิลไตรเมทอกซีไซเลน [monofunctional γ methacryloxypropyl trimethoxysilane (γ -

MPTS]) หรือไตรเมทอกซีไฮลิลพรอพิลเมทาคริเลต [3-trimethoxysilylpropylmethacrylate (3-MPS)] โดยปกติจะเจือจางอยู่ในสารละลายน้ำผสมแอลกอฮอล์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 4 - 5 และปรับค่าโดยกรดอะซิติก สารเชื่อมยึดไฮเลนชนิดนี้มักใช้ช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างสารต่างๆ เช่น โลหะกับคอมโพสิต เซรามิกกับคอมโพสิต คอมโพสิตกับคอมโพสิต หรือใช้กับวัสดุที่มีหมู่เมทอกซีเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล

สารเชื่อมยึดไฮเลนมักถูกเจือจางอยู่ในสารละลายประเภทที่มีขั้วเช่นแอลกอฮอล์หรือในเอทิลอะซิเตท (ethyl acetate) และนอกจากนี้สามารถเจือจางอยู่ในสารละลายที่ไม่มีขั้วได้เช่น เอนเพนเทน (n-pentane) หรือเฮกเซน (n-hexane)(Chen และ Brauer, 1982) สำหรับสารเชื่อมยึดไฮเลนที่ใช้ในทางทันตกรรมมักพบอยู่ในสารละลายร้อยละ 90 - 95 เอทานอล หรือไอโซโพรพานอล และยังสามารถพบในส่วนผสมของอะซิโตนและแอลกอฮอล์ได้เหมือนกัน ผลิตภัณฑ์ที่มีออกมาให้ใช้ในทางทันตกรรมมีมากมายดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงสารเชื่อมยึดไฮเลนที่มีขายในทางทันตกรรม

Trade name, manufacturer	Purpose, substrates	Effective silane	pH	Solution	Date of information
Monobond-S, Ivoclar Vivadent	Porcelain, composites	MPS 1.0%	4	Ethanol 52%, distilled water 47%	May 2001
Vectris Wetting Agent, Ivoclar Vivadent	Crowns, fixed partial dentures	MPS 1.0%	4	Ethanol 50%-52%	Jan 2001
ESPE Sil, 3M/ESPE	Metals, ceramics, composites	A silane (9%NA)	NA	Ethanol > 90%	Jan 2002
RelyX Ceramic Primer, 3M/ESPE	Ceramics	A silane < 1%	NA	Ethanol 70%-80%, water 20%-30%	Dec 2001
Porcelain Repair Primer, Kerr	Porcelain	A silane 15%-20%	NA	Ethanol 80%-85%	Dec 1998
Pulpdent Silane Bond Enhancer, Pulpdent	Porcelain, composites	A silane (9%NA)	NA	Ethanol 92.6%, acetone 7.4%	April 2001
Silicoup A and B (two-bottle system), Heraeus Kulzer	NA	MPS (9%NA) (Silicoup B)	NA	Ethanol 25%-50%, ethylacetate 25%-50%, acetic acid 5%-10%	Nov 2001
Ultradent, Ultradent	Resin coupling agent	MPS (9%NA)	NA	Isopropanol 92%	May 1998
Bisco Porcelain Primer, Bisco	Porcelain, composites	Silane with methacrylate (MPS?)	NA	Alcohol	July 1998
Clearfil Porcelain Bond Activator, Kuraray	Porcelain	MPS (9%NA)	NA	Bisphenol-a-polyethoxy-dimethacrylate	Nov 1998
Quadrant Porcelain Coupling Agent (Liquid A), Cavex	Porcelain, composites	Based on 4-methacryloxy-ethyltrimellitate anhydride 10% (4-META); no silane	NA	Methyl methacrylate (MMA)	Sept 2002
Quadrant Porcelain Coupling Agent (Liquid B), Cavex	Porcelain, composites	MPS 5%	NA	Methyl methacrylate (MMA), water	Sept 2002
Bifix DC, Voco	Porcelain, composites	MPS (9%NA)	NA	Alcohol, water	May 2003

*Information based on available material safety data sheets, technical data sheets, and instruction sheets issued by respective manufacturers. pH is set by acetic acid unless otherwise noted. Products are in arbitrary order; to the best of the authors' knowledge, all exist on the current market.

(ที่มาจาก Matinlinna, J. P., Lassila, L. V., Ozcan, M., Yli-Urpo, A. and Vallittu, P. K. 2004.

An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. Int J Prosthodont

17(2): 155-64)

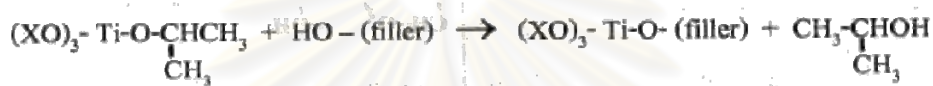
2.5.2.2. การศึกษาเกี่ยวกับสารเชื่อมยึดไซเลนในทางทันตกรรม

จากการพัฒนาวัสดุเรซินคอมโพสิตชนิดบิส-จีเอ็มเอ (bis-GMA) ทำเป็นเมทริกซ์และนำสารเชื่อมยึดไซเลนมาใช้ในทางทันตกรรมมากขึ้น ระยะเวลาที่พบการศึกษาที่เกี่ยวกับไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (Bowen, 1956, 1963) แสดงให้เห็นผลของการใช้สารเชื่อมยึดไซเลนมากมาย ดังเช่นการศึกษาเกี่ยวกับเรซินคอมโพสิตที่ใช้บูรณะฟันหลัง (Wilson, Mandradjeff และ Brindock, 1990) การศึกษาวิธีการปรับสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกัน (Ozcan, Pfeiffer และ Nergiz, 1998) การศึกษาวัสดุเรซินคอมโพสิตและกลาสไอโอโนเมอร์ ปฏิกริยาของสารเชื่อมยึดไซเลนกับโลหะผสม (Lawson, 1991) การใช้สารเชื่อมยึดไซเลนยึดระหว่างวัสดุพอร์ซเลนกับคอมโพสิต การใช้สารเชื่อมยึดไซเลนในงานพอร์ซเลนวีเนียร์ (Lim, 1995) และผลของฟลูออโรคาร์บอนไซเลน (fluorocarbon silanes) กับการเกิดคราบฟัน นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในงานทันตกรรมด้านอื่นด้วย เช่น ศึกษาผลการนำมาติดเครื่องมือจัดฟัน (Kocadereli, Canay และ Akca, 2001) การใช้เดือยเซรามิกร่วมกับสารเชื่อมยึดไซเลนในฟันที่รักษาจากฟันมาแล้ว การใช้สารเชื่อมยึดไซเลนร่วมกับเส้นใยแก้วในผู้ป่วยปริทันต์ และผลของการใช้สารเชื่อมยึดไซเลนในการซ่อมแซมครอบฟันเซรามิก (Ozcan, 2003; Ozcan และ Niedermeier, 2002)

ในขณะเดียวกันเริ่มมีความสนใจเทคโนโลยีของการนำเส้นใยแก้วมาใช้ในงานทันตกรรมมากขึ้นเมื่อมีการนำเอาสารเชื่อมยึดไซเลนมาใช้ในการปรับสภาพพื้นผิว โดยเส้นใยแก้วส่วนใหญ่ที่นำมาใช้เป็นประเภทอีกลาส ซึ่งมีความต้านทานต่อสารเคมีและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยแก้วด้วยการใช้ไตรเมทอกซีซิลิลพรีพอลิเมอร์เมทาคริเลต พบว่าสามารถเกิดพันธะทางเคมีได้ การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาไซเลไนเซชัน (silanization) ของเส้นใยแก้วและเส้นใยอะรามิด พบว่าให้ผลเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยกับวัสดุเรซินอะคริลิกที่ใช้ทำฐานฟันปลอม (Vallittu, 1993, 1997a) เช่นเดียวกันในการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารเชื่อมยึดไซเลนร่วมกับเส้นใยแก้ว พบว่าทำให้เกิดความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินได้ดี (McDonough, Antonucci และ Dunkers, 2001) ในการศึกษาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเรซินคอมโพสิตชนิดบิส-จีเอ็มเอเป็นเมทริกซ์ที่มีการเติมเส้นใยแก้วร่วมกับการใช้สารเชื่อมยึดไซเลน พบว่าให้ผลดีกว่าการไม่ใช้สารเชื่อมยึดไซเลน ดังนั้นสารเชื่อมยึดไซเลนทำหน้าที่เพิ่มการยึดติดของเส้นใยที่เสริมความแข็งแรงในเรซินเมทริกซ์เมื่อวัสดุอยู่นั้นอยู่ในสภาวะที่ชื้น สารเชื่อมยึดไซเลนช่วยต้านทานต่อความชื้น (moisture resistance) ของวัสดุเรซินที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วที่มีส่วนประกอบของหมู่ทำหน้าที่อีพอกซี เอมีน หรือเมทาคริเลตได้เป็นอย่างดี (Matinlinna และคณะ, 2004)

2.5.3. ไททาเนต (Titanates)

ไททาเนตเป็นสารเชื่อมยึดที่ผลิตขึ้นเพื่อนำไปใช้กับมินเนอรัลฟิลเลอร์ (mineral filler) เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมคาร์บอเนต มีสูตรทั่วไปคือ RO-Ti-(O-X)₃ โดยหมู่ OR ถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นหมู่ OH เข้าทำปฏิกิริยาต่อไปกับหมู่ OH ที่พื้นผิวฟิลเลอร์ เกิดเป็นพันธะ TiO เชื่อมระหว่างสารเชื่อมยึดกับฟิลเลอร์ ส่วน X ประกอบด้วยหมู่ทำหน้าที่ที่สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ เช่น หมู่เอสเทอร์ หมู่ฟอสเฟต หมู่ไพโรฟอสเฟต หมู่ซิลโฟเนต หรือหมู่อะมิโน เป็นต้น ไททาเนตช่วยให้ฟิลเลอร์ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยใช้หลักการเดียวกับการใช้ไซเลน เช่น การใช้ไอโซโพรพิลไตรไดออกทิลฟอสเฟตไททาเนต ช่วยเพิ่มแรงยึดระหว่างฟิลเลอร์และพอลิเมอร์ โดยการเชื่อมกับฟิลเลอร์ด้วยพันธะ TiO ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้



ตารางที่ 7 แสดงสารเชื่อมยึดไททาเนตในทางการค้า

Name	Chemical formula
Isopropyl trisostearoyl titanate	$\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{O}-\text{Ti}[(\text{O}-\text{C}-\text{C}_{17}\text{H}_{35})_3]$
Isopropyl tridodecylbenzenesulfonyl titanate	$\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{O}-\text{Ti}[(\text{O}-\text{S}(=\text{O})_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_{12}\text{H}_{25})_3]$
Isopropyl tri(diethylpyrophosphato) titanate	$\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{O}-\text{Ti}[(\text{O}-\text{P}(=\text{O})(\text{O}-\text{C}_2\text{H}_5)_2)_3]$
Tetraisopropyl di(diethylphosphato) titanate	$[\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{O}]_2-\text{Ti}[(\text{O}-\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}]_2$
Tetraoctyloxytitanium di(ditridecyl) phosphate	$[\text{C}_8\text{H}_{17}-\text{O}]_2-\text{Ti}[(\text{O}-\text{C}_{12}\text{H}_{25})_2\text{O}]_2$
Titanium di(diethylphosphato) oxyacrylate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{C}-\text{O} \\ \\ \text{CH}_2-\text{O} \end{array} \text{Ti}[(\text{O}-\text{P}(=\text{O})(\text{O}-\text{C}_2\text{H}_5)_2)_2]$
Di(diethylpyrophosphato) ethylene titanate	$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{O} \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{CH}_3-\text{O} \end{array} \text{Ti}[(\text{O}-\text{P}(=\text{O})(\text{O}-\text{C}_2\text{H}_5)_2)_2]$

(ที่มาจาก รศ. อรุณา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1)

2.5.3.1. การนำสารเชื่อมยึดไททาเนตมาใช้งาน

- เป็นสารเชื่อมยึดระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ทำให้เพิ่มคุณสมบัติการยึดติดและไดอิเล็กตริก
- เป็นสารเชื่อมขวางในพอลิเมอร์หรือเรซิน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลทำให้มีความทนทาน
- เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดเป็นพอลิเมอร์

ข้อดีของสารเชื่อมยึดไททาเนตที่ต่างจากสารเชื่อมยึดไฮเลนคือ มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้โดยไม่ต้องอาศัยหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว และข้อด้อยของไททาเนตคือ เมื่อนำไปใช้กับพอลิเมอร์ที่ใส่สารประกอบฟีนอลิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกันออกซิเดชันหรือสารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสีได้ (สรวารี, 2546)

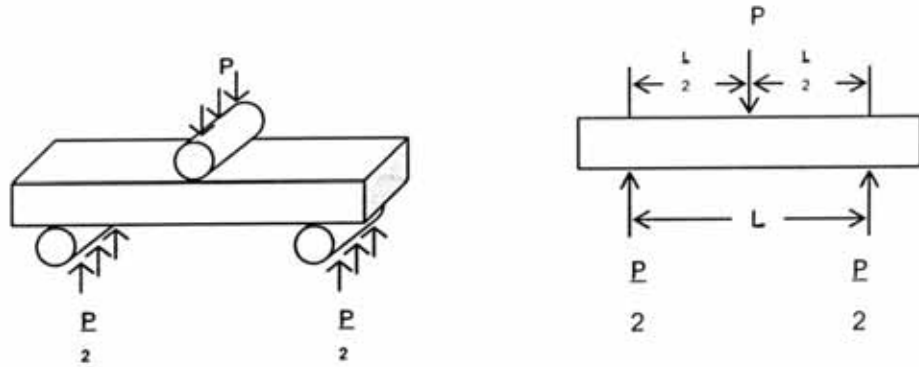
2.5.4. เซอร์โคเนียมอะลูมิเนต (Zirconium Aluminates)

เซอร์โคเนียมอะลูมิเนตหรือเซอร์โคเนต (zirconates) เป็นสารเชื่อมยึดที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้แทนไททาเนตในกรณีที่น่าไปใช้กับพอลิเมอร์ที่ต้องใส่สารประกอบฟีนอลิกด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ แต่สารเชื่อมยึดชนิดนี้มีราคาแพง (สรวารี, 2546)

2.6. การทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง (Flexure Test)

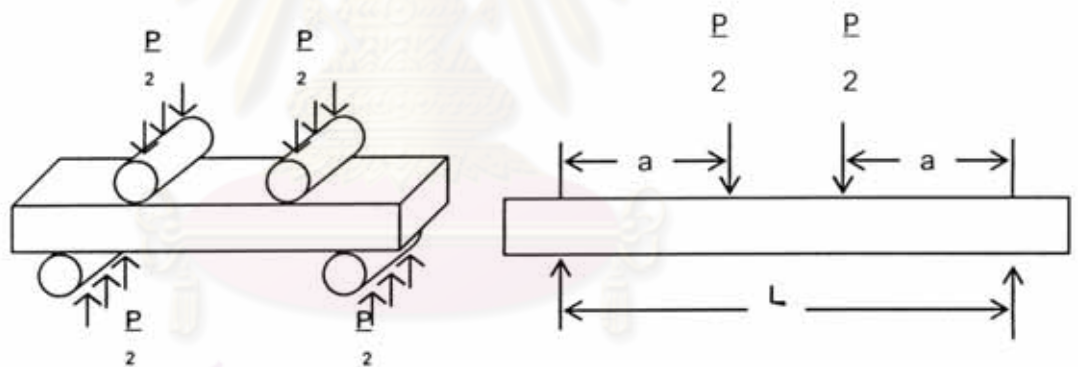
ความแข็งแรงดัดขวาง คือ ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบกดขึ้นทดสอบที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (indenter) ซึ่งกดตั้งฉากกับชั้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (supporting jig) สองจุดที่ผิวล่างของชั้นทดสอบเป็นตัวกำหนดระยะห่าง (span) การทดสอบแบบนี้เป็นการรวมการทดสอบการดึงและการอัดเอาไว้ด้วยกัน ซึ่งแรงอัดเกิดขึ้นบนชั้นทดสอบ ส่วนแรงดึงเกิดขึ้นที่ใต้ชั้นทดสอบ การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้เป็น 2 ลักษณะ คือการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด (three point bending test) และ การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 4 จุด (four point bending test)

การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด เป็นการทดสอบความเค้นโดยมีตัวกดสำหรับให้แรงกด 1 จุด ซึ่งอยู่ด้านบนของชั้นทดสอบ และมีตัวรองรับที่กำหนดระยะห่างอยู่ด้านล่างชั้นทดสอบ 2 จุด (อุดมกิจเดชา, 2543) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด
(ที่มาจาก รศ.ดร.วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ.2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์:
ทฤษฎีและหลักการการทำงานเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่1.)

การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 4 จุด ทำได้โดยการให้แรงกดบนชิ้นทดสอบ 2 จุด โดยมีช่วงระยะห่าง และมีตัวรองรับ 2 จุด ที่ด้านล่างชิ้นทดสอบเช่นกัน(อุดมกิจเดชา, 2543) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 4 จุด
เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์:ทฤษฎีและหลักการการทำงานเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่1.)
(ที่มาจาก รศ.ดร.วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ.2543.)

ในการวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก และสามารถเปรียบเทียบกับผลของการศึกษาอื่นๆ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล (Digital Balance) รุ่น SBA 51, Scaltec, Germany. Max Wt. 4100 g. ความละเอียด 0.01 กรัม และรุ่น SBA 31, Scaltec, Germany. Max Wt. 210 g. ความละเอียด 0.0001 กรัม.
- เครื่องฉายแสง (Light Curing Unit) รุ่น Elipar™ Freeligth™ 2, 3M ESPE, USA.
- เครื่องวัดขนาดระบบดิจิทัล (Digital caliper, Micrometer) Mitutoyo, Japan. ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
- เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮดรอลิก (Servo Hydraulic System) รุ่น 8872, INSTRON, USA. (Load cell 1000 N.)
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) รุ่น Contherm160M, Contherm Scientific Ltd., New Zealand.
- เครื่องตัดฟัน (Low Speed Cutting Machine) รุ่น Low Speed Saw, Buehler, USA.
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, JSM 5410LV, Tokyo, Japan)

3.2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- UNIFAST Trad (GC, Dental products Corporation, Japan) เป็นเรซินอะคริลิก ชนิดบ่มได้เองประกอบด้วยส่วนผสม และส่วนน้ำ เมื่อผสมเข้ากันแล้วสามารถเกิดพอลิเมอร์ได้ในอุณหภูมิห้อง
- Filtek™ Supreme XT Flowable Composite (3M ESPE, USA) เป็นเรซินคอมโพสิตแบบฉีดที่บ่มด้วยแสง
- Heliobond (Ivoclar-Vivadent, Schaan, Liechtenstein) เป็นสารยึดติด (bonding agent) ชนิดหนึ่งประกอบด้วยบิส-จีเอ็มเอ (Bis-GMAX ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และ ไตรเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (Triethylene glycol dimethacrylate) ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ใช้ยึดเส้นใยแก้วกับเรซินคอมโพสิตในชั้นทดสอบเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว

- เส้นใยแก้วในประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัย (ข้อมูลจากบริษัท เซ็น โโกเบน ประเทศไทย) เป็นเส้นใยแก้วชนิดอีกล้ำส คือ เส้นใยแก้วซึ่งมีปริมาณสารองค์ประกอบในเส้นใยที่มีคุณสมบัติเป็นต่างต่างๆ

องค์ประกอบ

SiO ₂	52 - 62 %
สารประกอบออกซิเจนที่เป็นต่าง (Na ₂ O, K ₂ O)	< 2%
สารประกอบออกซิเจนที่เป็นต่างรุนแรง	16 - 30%
B ₂ O ₃	0 - 10%
Al ₂ O ₃	11 - 16%
TiO ₂	0 - 3%
Fe ₂ O ₃	0 - 1%
F ₂	0 - 2%

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เสี่ยงอันตราย

เส้นใยแก้วที่เสริมกำลังมีความคงที่และไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เสี่ยงอันตราย

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเส้นใยแก้ว

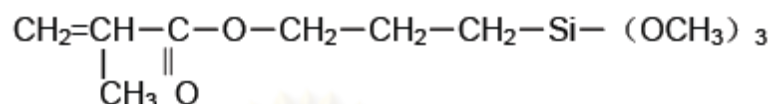
ลักษณะทางกายภาพ	:	เป็นของแข็ง
รูปร่าง	:	ต่อเนื่องกันหรือตัดขาดจากกัน หรือผืนเส้นใยที่สร้างขึ้นจากเส้นใยเล็กๆที่ขนานกันอย่างต่อเนื่อง ผูกติดแน่นเข้าด้วยกัน
สี	:	ขาวหรือขาวค่อนข้างเหลือง
กลิ่น	:	ไม่มีกลิ่น

อุณหภูมิที่กำหนดไว้ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเส้นใยแก้ว

จุดอ่อนตัว	:	ประมาณ 850 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	:	1200 ถึง 1250 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสลายตัว	:	สารเหนียวและสิ่งยึดเส้นใยเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิติดไฟที่ต่ำสุด	:	ไม่มี
คุณสมบัติซึ่งทำให้ระเบิด	:	ไม่มี
ความหนาแน่นแก้ว	:	2.6 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร

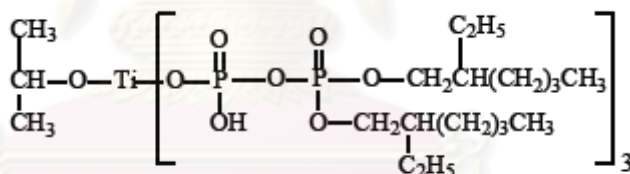
ความสามารถในการถูกละลายได้: มีความสามารถในการถูกละลายในน้ำได้ต่ำมาก กาวและตัวยึดเส้นใยสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้เป็นบางส่วนและอาจทั้งหมด

- มอนอบอนด์เอส [Monobond-S (Ivoclar-Vivadent, Schaan, Liechtenstein)] ประกอบด้วยเอทานอล (ethanol) ร้อยละ 50 - 52 และไตรเมทาคริลอ็อกซีพรอพิลไตรเมทอ็อกซีไฮเลน (3-Methacryloyloxypropyl-trimethoxysilane) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีสูตรโครงสร้าง ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมยึดไฮเลนยี่ห้อมอนอบอนด์เอส (Ivoclar-Vivadent, Schaan, Liechtenstein)

- สารเชื่อมยึดไททาเนต [NDZ-201 (Titanate Coupling agent NDZ-201)] ของบริษัทนานจิงชุกวงเคมีคอล (Nanjing Shuguang Chemical) ซึ่งเป็นสารเชื่อมยึดที่มีองค์ประกอบทางเคมี เป็นมอนออัลคอกซีไฟรอฟอสเฟตไททาเนต สามารถนำมาใช้เป็นสารเชื่อมยึดระหว่างฟิลเลอร์ที่เป็นอนินทรีย์สารกับเรซินได้ และใช้เป็นสารเชื่อมยึดระหว่างสารที่มีขั้วและไม่มีขั้วได้ มีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมยึดไททาเนต NDZ-201

คุณสมบัติทางกายภาพ

1. สถานะของเหลวหนืด สีน้ำตาลเหลือง และมีความโปร่งแสง
2. ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.095
3. อุณหภูมิติดไฟที่ต่ำสุดของของเหลวเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส
4. ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2
5. สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์แต่ไม่สามารถละลายน้ำได้ และถูกทำลายโดยปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำได้ค่อนข้างยาก
6. อุณหภูมิต่ำสุดที่ของเหลวสลายตัวเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส
7. ค่าดัชนีการหักเหเท่ากับ 1.465

3.3. การดำเนินการวิจัย

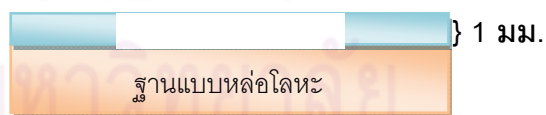
วิธีดำเนินการแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

3.3.1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

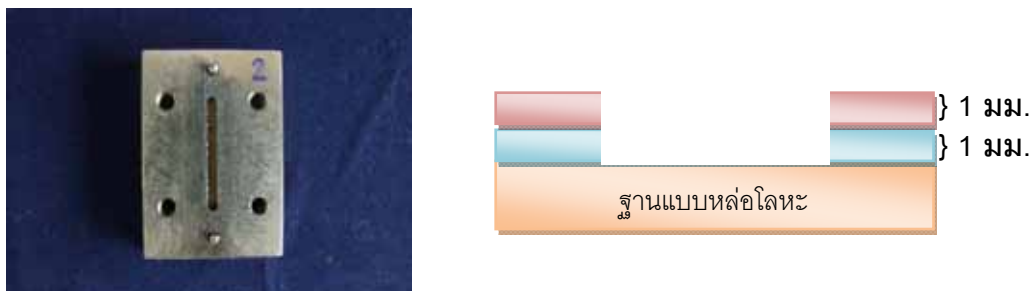
ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ สร้างขึ้นบนแบบหล่อโลหะไร้สนิม (stainless steel) ทำให้เกิดชิ้นทดสอบขนาด 2x2x25 มิลลิเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 4049:2000 ดังภาพที่ 9 10 และ 11



ภาพที่ 9 แสดงชิ้นส่วนของแบบหล่อโลหะ 3 ชิ้น



ภาพที่ 10 แสดงส่วนประกอบด้านบนและด้านข้างของแบบหล่อโลหะในขั้นที่ 1



ภาพที่ 11 แสดงส่วนประกอบด้านบนและด้านข้างของแบบหล่อโลหะในชั้นที่ 2

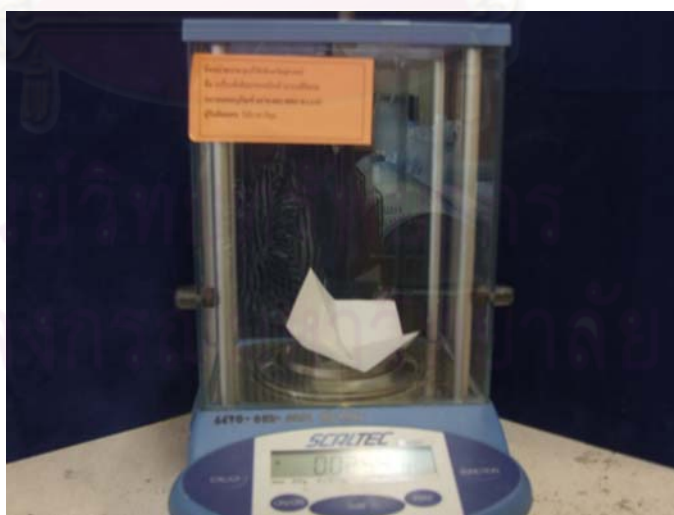
สำหรับเรซินอะคริลิกที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ใช้อัตราส่วนของผงซึ่งให้น้ำหนัก 0.4 กรัม ต่อของเหลว 0.4 มิลลิลิตร เพื่อให้มีความหนืดที่เพียงพอสำหรับการฉีดลงแบบหล่อโลหะในการ สร้างขึ้นทดสอบ 1 ชิ้น ในกลุ่มทดลองที่มีการเติมเส้นใยแก้ว ได้กำหนดปริมาณของเส้นใยแก้วไว้ที่ ร้อยละ 10 ของปริมาตรอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของทันตแพทย์พิสัยศิษฐ์ ชัยจรีนนท์ โดยทำการ คำนวณปริมาณของเส้นใยแก้วจากสูตร ความหนาแน่นเท่ากับ มวล/ปริมาตร

ความหนาแน่นของเส้นใยแก้วเท่ากับ 2.6 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร

ปริมาตรทั้งหมดของขึ้นทดสอบที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้วร้อยละ 100

มีปริมาตร 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร คิดเป็นน้ำหนัก 260 มิลลิกรัม

ดังนั้นปริมาณเส้นใยแก้วร้อยละ 10 ของขึ้นทดสอบคิดเป็นน้ำหนัก 0.026 กรัม



ภาพที่ 12 แสดงการชั่งเส้นใยแก้วเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล

ขั้นตอนการสร้างขึ้นทดสอบแต่ละกลุ่ม

กลุ่มเรซินอะคริลิกไม่เสริมเส้นใย

- 1) ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อทั้ง 3 ชั้น ทาวาสลีนในแบบหล่อโลหะให้ทั่วด้วยฟู่กัน จากนั้นใช้กระดาษซับวาสลีนส่วนเกินออก เพื่อควบคุมความหนาของวาสลีนให้หนาเท่ากัน ยึดชิ้นส่วนของแบบหล่อทั้ง 3 ชั้นด้วยสกรูให้แน่น ดังภาพที่

13



ภาพที่ 13 แสดงการเตรียมแบบหล่อโลหะเพื่อเตรียมขึ้นทดสอบ

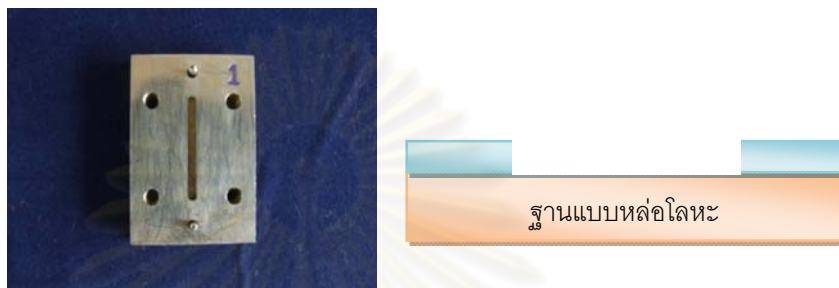
- 2) ผสมเรซินอะคริลิกด้วยอัตราส่วนตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เวลาในการผสม 5 - 7 วินาที ใส่ลงในแบบหล่อ นำแผ่นแก้วปิดทับวัสดุ รอให้วัสดุก่อตัว (ระยะเวลาเริ่มก่อตัวประมาณ 2 นาทีหลังผสมตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงขึ้นทดสอบขณะก่อตัวในแบบหล่อโลหะ

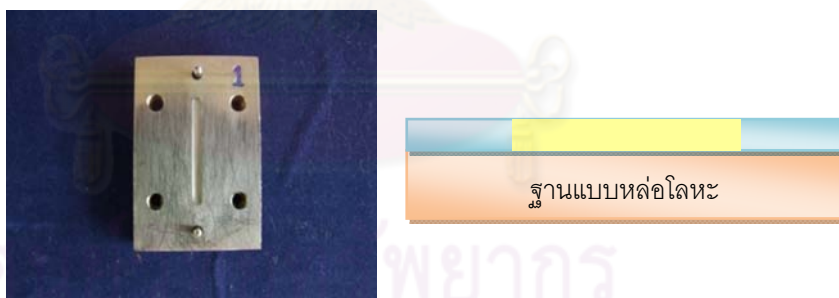
กลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว

- 1) ทาวาสลีนในแบบหล่อโลหะให้ทั่วด้วยฟู่กัน จากนั้นใช้กระดาษซับวาสลีนส่วนเกินออก เพื่อควบคุมความหนาของวาสลีนให้หนาเท่ากัน ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อชั้นที่ 1 เข้ากับฐานแบบหล่อ ดังภาพที่ 15



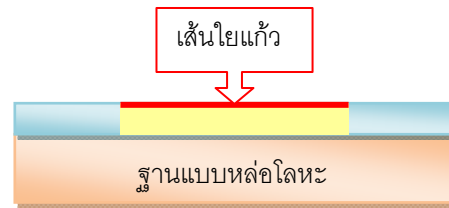
ภาพที่ 15 แสดงการเตรียมแบบหล่อโลหะเพื่อเตรียมขึ้นทดสอบที่เสริมเส้นใย

- 2) ผสมเรซินอะคริลิกด้วยอัตราส่วนตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เวลาในการผสม 5 - 7 วินาที ใส่ลงในแบบหล่อชั้นที่ 1 (ความหนา 1 มิลลิเมตร) ดังภาพที่ 16



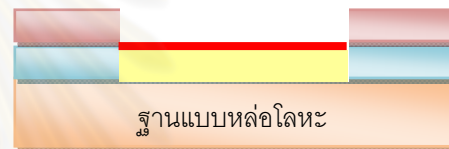
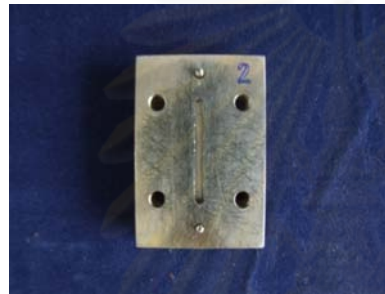
ภาพที่ 16 แสดงการเตรียมขึ้นทดสอบชั้นที่ 1

- 3) นำเส้นใยแก้วตามน้ำหนักที่ชั่งไว้วางตามแนวยาวของขึ้นทดสอบเรซินอะคริลิกในแบบหล่อโลหะขณะที่ขึ้นทดสอบอยู่ในชั้นอ่อนนุ่ม โดยระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์จนกระทั่งถึงระยะอ่อนนุ่มนี้ประมาณ 20 - 30 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเพื่อให้มีปริมาณของมอนอเมอร์เหลืออยู่ ดังภาพที่ 17



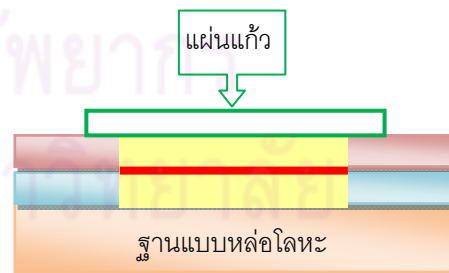
ภาพที่ 17 แสดงการวางเส้นใยแก้วตามแนวยาวของชั้นทดสอบ

- 4) ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อโลหะชั้นที่ 2 ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงการวางแบบหล่อโลหะชั้นที่ 2

- 5) ผสมเรซินอะคริลิก ใส่ลงบนแบบหล่อชั้นที่ 2 (ความหนา 1 มิลลิเมตร) ยึดชิ้นส่วนของแบบหล่อทั้ง 3 ชั้นด้วยสกรูให้แน่น นำแผ่นแก้วกดให้เรียบ รอให้วัสดุก่อตัว ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงขั้นตอนทดสอบเสริมเส้นใยขณะก่อตัวในแบบหล่อโลหะ

กลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส

(Monobond S)

- 1) ทาวาสลินในแบบหล่อโลหะให้ทั่วด้วยฟู่กัน จากนั้นใช้กระดาษซับวาสลินส่วนเกินออก เพื่อควบคุมความหนาของวาสลินให้หนาเท่ากัน ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อชั้นที่ 1 เข้ากับฐานแบบหล่อ
- 2) ผสมเรซินอะคริลิกด้วยอัตราส่วนตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เวลาในการผสม 5 - 7 วินาที ใส่ลงในแบบหล่อชั้นที่ 1 (ความหนา 1 มิลลิเมตร)
- 3) ใช้ฟู่กันทาสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส จำนวน 3 หยดลงบนเส้นใยแก้วที่มีน้ำหนักตามที่ขังไว้ ทิ้งไว้เป็นเวลา 60 วินาที เป่าลมให้แห้งเป็นเวลา 60 วินาที ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตและนำมาวางตามแนวยาวของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกในแบบหล่อโลหะขณะที่ชั้นทดสอบอยู่ในชั้นอ่อนนุ่ม
- 4) ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อโลหะชั้นที่ 2
- 5) ผสมเรซินอะคริลิก ใส่ลงบนแบบหล่อชั้นที่ 2 (ความหนา 1 มิลลิเมตร) ยึดชิ้นส่วนของแบบหล่อทั้ง 3 ชั้นด้วยสกรูให้แน่น นำแผ่นแก้วคดให้เรียบ รอให้วัสดุก่อตัว

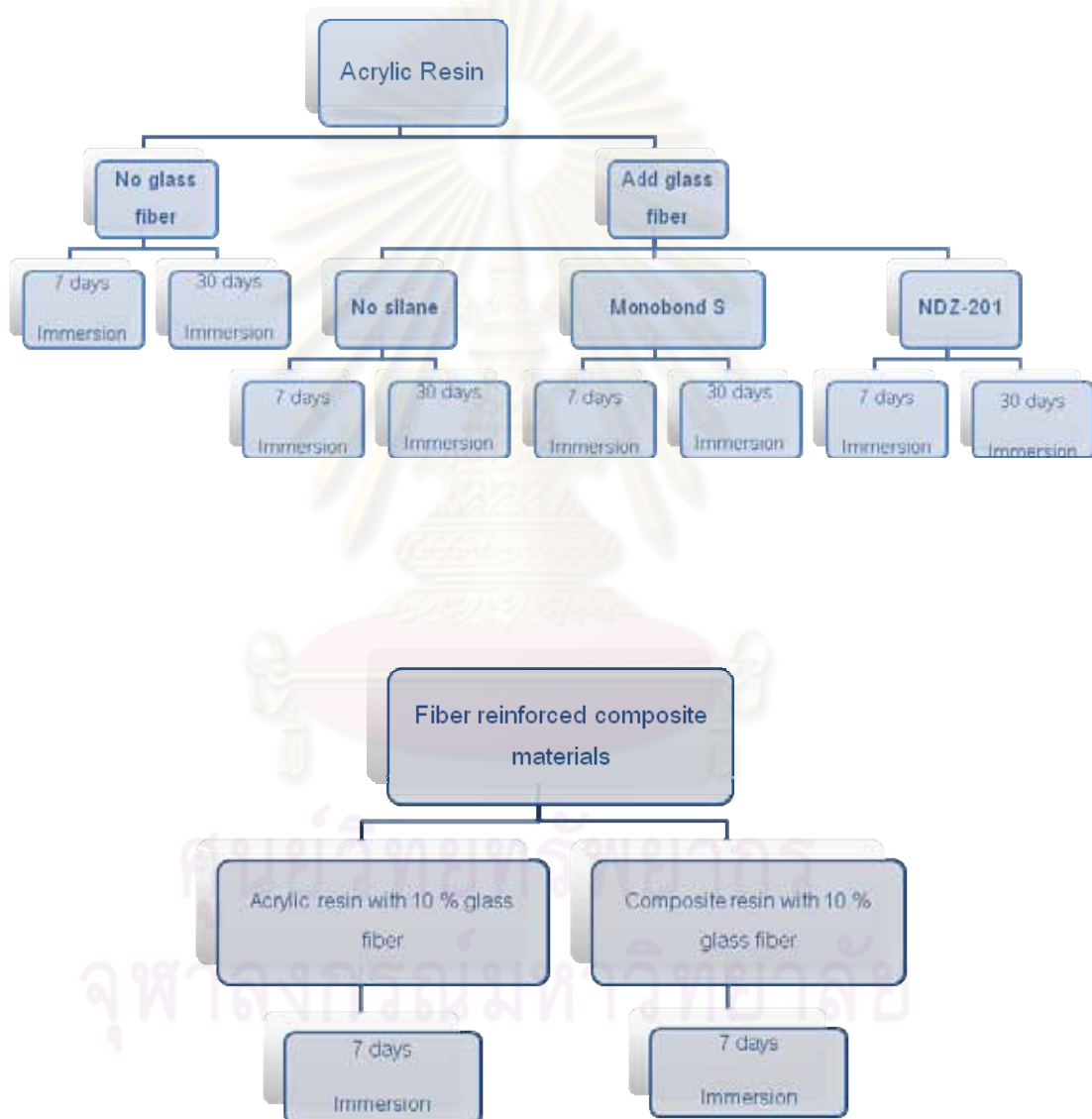
กลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททาเนต (Titanate Coupling agent NDZ-201)

ขั้นตอนเช่นเดียวกับกลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส โดยเปลี่ยนสารเชื่อมยึดไซเลนเป็นสารเชื่อมยึดไททาเนต NDZ-201 เจือจางในเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 อ้างอิงจากส่วนประกอบของเอทิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในสารเชื่อมยึดไซเลนในทางทันตกรรม ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 2 โดยนำหนักก่อนนำไปทาลงบนเส้นใยแก้ว

กลุ่มเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว

- 1) ทาวาสลินในแบบหล่อโลหะให้ทั่วด้วยฟู่กัน จากนั้นใช้กระดาษซับวาสลินส่วนเกินออก เพื่อควบคุมความหนาของวาสลินให้หนาเท่ากัน ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อชั้นที่ 1 เข้ากับฐานแบบหล่อ
- 2) ฉีดเรซินคอมโพสิตลงในแบบหล่อชั้นที่ 1 (ความหนา 1 มิลลิเมตร)
- 3) ใช้ฟู่กันทาสารยึดติด เฮลิโอบอนด์ (Heliobond) จำนวน 1 หยด ลงบนเส้นใยแก้วที่เตรียมพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนดังที่กล่าวไว้ข้างต้น และนำมาวางตามแนวยาวของชั้นทดสอบเรซินคอมโพสิตในแบบหล่อโลหะ

- 4) ประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อโลหะชั้นที่ 2
- 5) ฉีดเรซินคอมโพสิตลงในแบบหล่อชั้นที่ 2 (ความหนา 1 มิลลิเมตร) ยึดชิ้นส่วนของแบบหล่อทั้ง 3 ชั้นด้วยสกรูให้แน่น นำแผ่นแก้วกดให้เรียบ ฉายแสงเป็นเวลา 40 วินาที
- 6) แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 7 วัน



ภาพที่ 20 แสดงแผนภูมิแสดงกลุ่มทดสอบทั้งหมดของการวิจัยครั้งนี้

เมื่อวัสดุในแบบหล่อโลหะก่อตัวสมบูรณ์ และขึ้นทดสอบออกจากแบบหล่อโลหะทิ้งไว้ภายใน 24 ชั่วโมงเพื่อควบคุมเวลาให้มอดนอเมอร์ที่ตกค้างอยู่ระเหยออกหมด และวัดขนาดขึ้นทดสอบด้วยเครื่องวัด ขนาดแบบดิจิตอล (Digital Caliper, Micrometer) Mitutoya, Japan. ความ

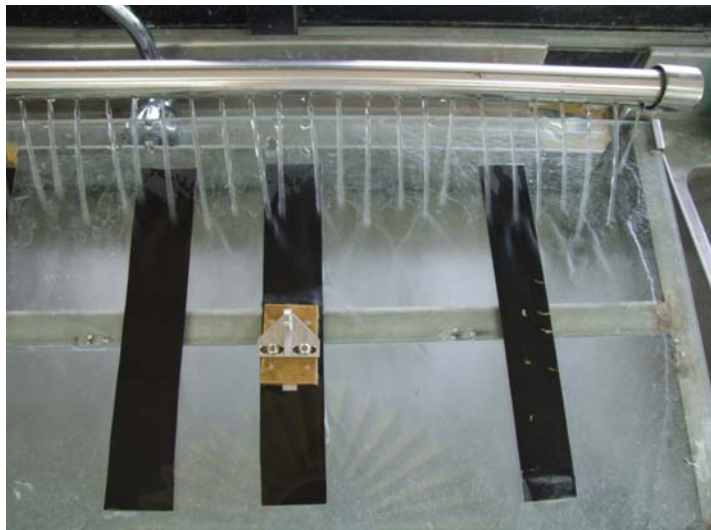
ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 21 เพื่อให้ชิ้นทดสอบมีขนาดเท่ากันทุก ๆ ชิ้น (2x2x25 มิลลิเมตร) ต่อมาขัดแต่งให้เรียบด้วยกระดาษทรายน้ำที่มีความละเอียดหมายเลข 1000 โดยมีแบบหล่อโลหะเป็นตัวจับเพื่อกำหนดขนาดของชิ้นทดสอบดังภาพที่ 22 และ 23 ในแต่ละกลุ่มประกอบด้วยชิ้นทดสอบทั้งหมด 20 ชิ้น ที่มีขนาดเท่ากันคือ 2x2x25 มิลลิเมตร และแบ่งชิ้นทดสอบในแต่ละกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่มย่อย เพื่อแยกชิ้นทดสอบไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) รุ่น Contherm160M, Contherm Scientific Ltd., New Zealand. ในช่วงเวลาที่ต่างกันคือ 7 วันและ 30 วัน เพื่อจำลองสถานการณ์ให้คล้ายคลึงกับในช่องปากก่อนนำไปทดสอบดังภาพที่ 24



ภาพที่ 21 แสดงการวัดขนาดชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดแบบดิจิตอล



ภาพที่ 22 แสดงแบบหล่อโลหะที่ใช้จับชิ้นทดสอบเพื่อการขัดแต่ง



ภาพที่ 23 แสดงการขัดแต่งชิ้นทดสอบบนแท่นขัดด้วยกระดาดทรายน้ำ



ภาพที่ 24 แสดงการแช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่นภายใต้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในตู้ควบคุม
อุณหภูมิ

3.3.2. ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง

เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นทดสอบในแต่ละกลุ่มย่อยดังภาพที่ 25 มาวัดค่าความแข็งแรงดัดขวางด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮดรอลิก (Servo Hydraulic System) รุ่น 8872, INSTRON, USA. (Load cell 1000 N.) โดยยึดชิ้นทดสอบบนที่จับบนฐานของเครื่องทดสอบ มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 20 มิลลิเมตร หัวกดกดลงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ เคลื่อนหัว

กดด้วยความเร็วในการกด (cross head speed) 1 มิลลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งเกิดการแตกร้าวของวัสดุซึ่งสังเกตได้จากการลดลงของแรงทันที ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 25 แสดงชิ้นทดสอบใน 1 กลุ่ม (10 ชิ้น)



ภาพที่ 26 แสดงการวางชิ้นทดสอบเพื่อเตรียมทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง

บันทึกแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักในหน่วยนิวตัน (N) และนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงดัดขวางซึ่งมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa) ดังสูตรคำนวณ

$$S = 3 WL / 2 bd^2$$

โดย S คือความแข็งแรงดัดขวาง

W คือค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตก

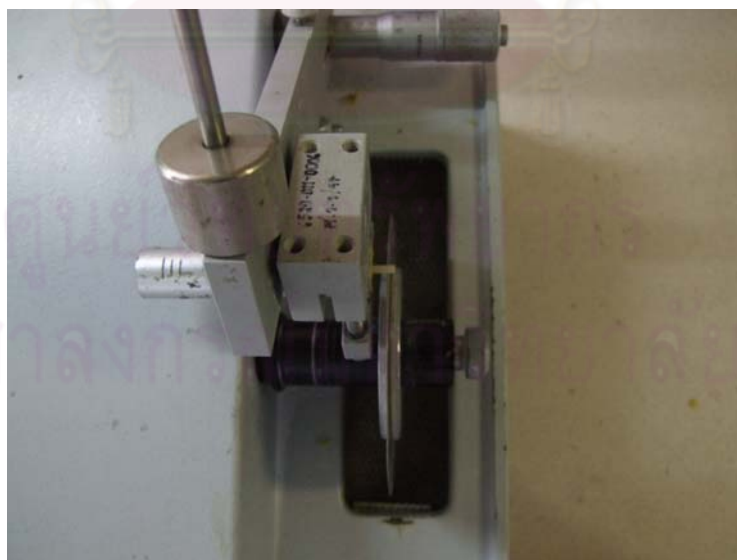
L คือระยะห่างของจุดที่รองรับชิ้นทดสอบ

b คือความกว้างของชิ้นทดสอบ

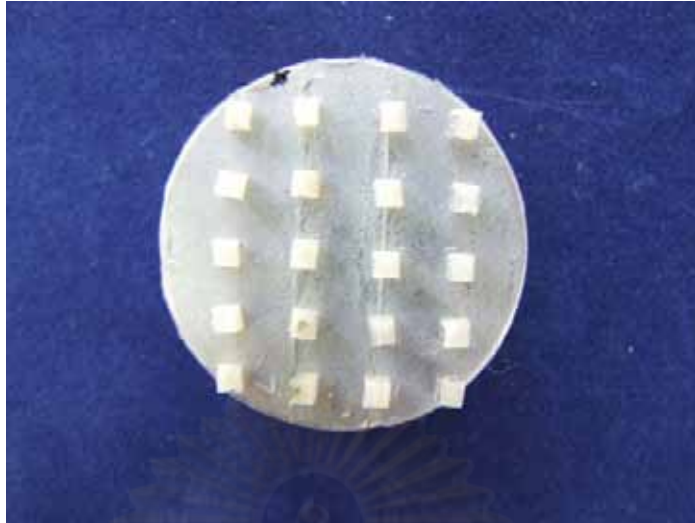
d คือความหนาของชิ้นทดสอบ

3.3.3. ขั้นตอนการนำชิ้นทดสอบมาส่องดูบริเวณแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์ (JEOL, JSM 5410LV, Tokyo, Japan)

ภายหลังการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นทดสอบที่แตกหักมาตัดตามแนวขวางด้วยเครื่องตัดฟัน (Low Speed Cutting Machine) รุ่น Low Speed Saw, Buehler, USA. ดังภาพที่ 27 เพื่อให้ได้หน้าตัดบริเวณที่แตกหักของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบที่ตัดแล้วมาเรียงลงบนแท่นยึดดังภาพที่ 28 เพื่อเตรียมส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ค่าความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ และถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 50 และ 500 เท่า



ภาพที่ 27 แสดงการตัดชิ้นทดสอบภายหลังการแตกหักเพื่อเตรียมส่องกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยเครื่องตัดฟัน



ภาพที่ 28 แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบภายหลังการแตกหักเพื่อส่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 29 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, JSM 5410LV, Tokyo, Japan)

3.4. การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

รวบรวมข้อมูลค่าความแข็งแรงดัดขวางที่วัดได้จากชิ้นทดสอบแต่ละกลุ่มลงในตารางและบันทึกข้อมูลเป็นค่าแรงที่มีหน่วยการวัดเป็นเมกะปาสคาล ข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (quantitative data) นำเสนอข้อมูล (data presentation) ในรูปของตารางและแผนภูมิแท่ง แสดงผลและเปรียบเทียบการทดลองระหว่างกลุ่ม โดยสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลเป็นพาราเมตริก (parametric) ในการทดสอบความแตกต่างค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดที่ทำการทดสอบ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มการทดลองด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดเชฟเฟ (Scheffe) ในการทดสอบผลของเวลาแช่น้ำต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุแต่ละกลุ่ม และการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินอะคริลิกและเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดชนิดเดียวกัน ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้สถิติ อินดิเพนเดนท์ แซมเปิล ที-เทส (Independent sample T-test) โดยทั้งหมดคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเอส พี เอส เอส เวอร์ชัน 13 SPSS 13.0 (Statistical Package for Social Science, SPSS version 13) กำหนดค่านัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($p\text{-value} < 0.05$)

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1. ผลการวิเคราะห์

หลังจากนำชิ้นทดสอบแต่ละกลุ่มทดสอบค่าความแข็งแรงดัดขวางด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮดรอลิก (Servo Hydraulic System) รุ่น 8872, INSTRON, USA. (Load cell 1000 N.) นำค่าแรงที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักมาคำนวณตามสูตรเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงดัดขวาง แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไว้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่ชิ้นทดสอบแตกหักและความแข็งแรงดัดขวางของชิ้นทดสอบแต่ละกลุ่ม

ชิ้นทดสอบ	แช่น้ำ 7 วัน		แช่น้ำ 30 วัน	
	แรงที่ทำให้แตกหัก (นิวตัน)	ความแข็งแรงดัดขวาง (เมกะปาสคาล)	แรงที่ทำให้แตกหัก (นิวตัน)	ความแข็งแรงดัดขวาง (เมกะปาสคาล)
เรซินอะคริลิก	21.05 (2.12)	78.93 (7.94)	17.97 (1.63)	67.40 (6.11)
เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใย	42.75 (3.61)	154.54 (9.40)	38.06 (4.23)	137.60 (11.83)
เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยเพิ่มการยึดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน	51.849 (3.63)	184.23 (9.67)	46.36 (4.80)	165.61 (11.87)
เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยเพิ่มการยึดด้วยสารเชื่อมยึดไททานิต	45.283 (2.68)	166.55 (7.99)	39.26 (3.35)	144.15 (9.73)

ในกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วได้ค่าความแข็งแรงดัดขวางดังตารางที่ 9 โดยมีค่าสูงสุด 87 และ 74.59 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ มีค่าต่ำสุด

63.49 และ 58.39 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 78.93 และ 67.40 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ

ตารางที่ 9 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิก

ชั้นทดสอบ เรซินอะคริลิก	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง(เมกะปาสคาล)	
	แช่น้ำ 7 วัน	แช่น้ำ 30 วัน
1	87.000	72.713
2	67.9875	73.425
3	77.138	74.588
4	63.488	71.250
5	84.563	61.500
6	85.1625	68.775
7	86.7375	65.175
8	76.575	69.600
9	80.363	58.613
10	80.325	58.388
ค่าเฉลี่ย	78.93	67.40
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.94	6.11

ในกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วได้ค่าความแข็งแรงดัดขวางดังตารางที่ 10 โดยมีค่าสูงสุด 172.58 และ 154.82 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ มีค่าต่ำสุด 143.22 และ 113.21 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 154.54 และ 137.60 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ สำหรับกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนได้ค่าความแข็งแรงดัดขวางดังตารางที่ 11 โดยมีค่าสูงสุด 196.26 และ 183.97 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ มีค่าต่ำสุด 168.57 และ 148.76 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 184.23 และ 165.61 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ ในกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานตได้ค่าความแข็งแรงดัดขวางดังตารางที่ 12 โดยมีค่าสูงสุด 179.86 และ 161.10 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ มีค่าต่ำสุด 157.61 และ 129.56 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 166.55 และ 144.15 เมกะปาสคาลเมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 7 และ 30 วันตามลำดับ

ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว

ชั้นทดสอบ เรซินอะคริลิก	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง(เมกะปาสคาล)	
	หน้า 7 วัน	หน้า 30 วัน
1	145.388	145.738
2	160.772	154.821
3	148.022	146.306
4	172.580	141.231
5	160.688	139.986
6	158.934	113.213
7	159.919	140.253
8	146.813	125.138
9	143.221	138.280
10	149.025	130.988
ค่าเฉลี่ย	154.54	137.60
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	9.40	11.83

ตารางที่ 11 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน

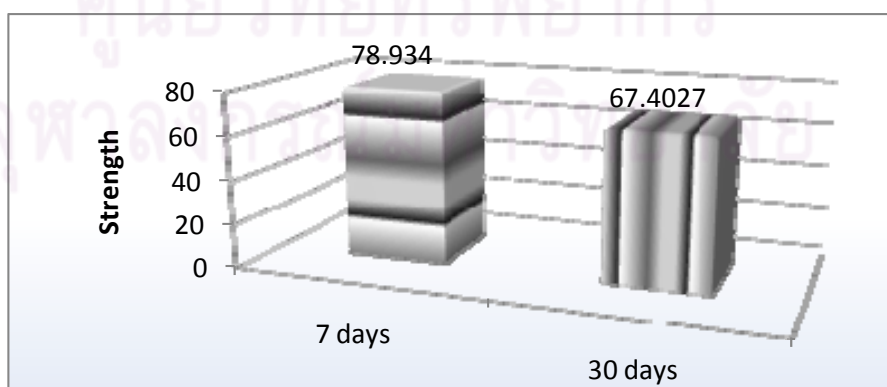
ชั้นทดสอบ เรซินอะคริลิก	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง(เมกะปาสคาล)	
	หน้า 7 วัน	หน้า 30 วัน
1	184.810	165.985
2	196.085	183.967
3	180.361	172.441
4	196.259	150.525
5	184.858	165.651
6	193.369	151.200
7	179.415	171.675
8	187.633	169.655
9	168.571	176.202
10	170.919	148.763
ค่าเฉลี่ย	184.23	165.61
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	9.67	11.87

ตารางที่ 12 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานต

ชั้นทดสอบ เรซินอะคริลิก	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง(เมกะปาสคาล)	
	แช่น้ำ 7 วัน	แช่น้ำ 30 วัน
1	157.61	129.563
2	172.83	142.201
3	179.86	148.882
4	158.93	133.575
5	162.88	149.680
6	178.40	132.525
7	161.47	161.103
8	164.06	146.925
9	160.99	147.554
10	168.45	149.532
ค่าเฉลี่ย	166.55	144.15
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.99	9.73

4.2. ผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัจจัย

เมื่อพิจารณาชั้นทดสอบในกลุ่มควบคุมซึ่งไม่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้ว ค่าความแข็งแรงของกลุ่มนี้จึงมีค่าต่ำที่สุด และหากพิจารณาระยะเวลาที่แช่น้ำในเวลา 7 วัน และ 30 วันดังภาพที่ 30 พบว่าค่าความแข็งแรงดัดขวางลดลงจาก 78.93 เป็น 67.40 เมกะปาสคาล



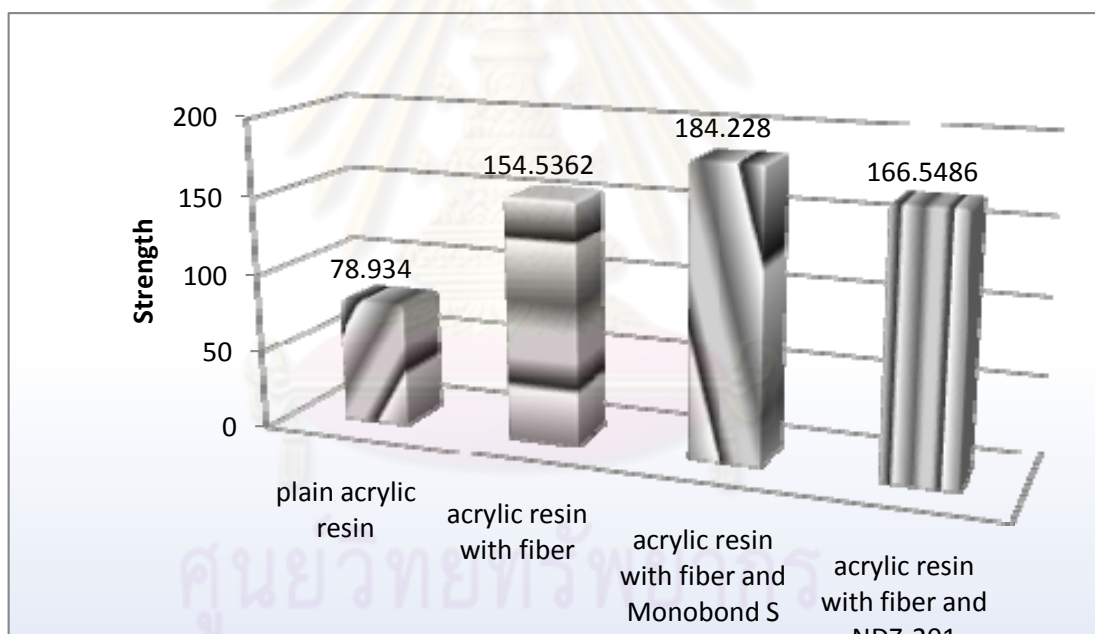
ภาพที่ 30 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบกลุ่มควบคุม

จากการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มความแข็งแรงยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดและระยะเวลาในการแช่น้ำ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) พบว่าไม่มีผลกระทบร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 17)

ในการเปรียบเทียบผลของสารเชื่อมยึดต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางได้พิจารณาแยกตามระยะเวลาที่ขึ้นทดสอบแช่น้ำโดยแบ่งเป็น 7 วัน และ 30 วันตามลำดับ

กลุ่มทดลองที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน

พบว่าขึ้นทดสอบในกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วในเรซินอะคริลิกเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงกว่ากลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดโททานेट และทั้งสองกลุ่มนี้ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงกว่ากลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด ดังภาพที่ 31



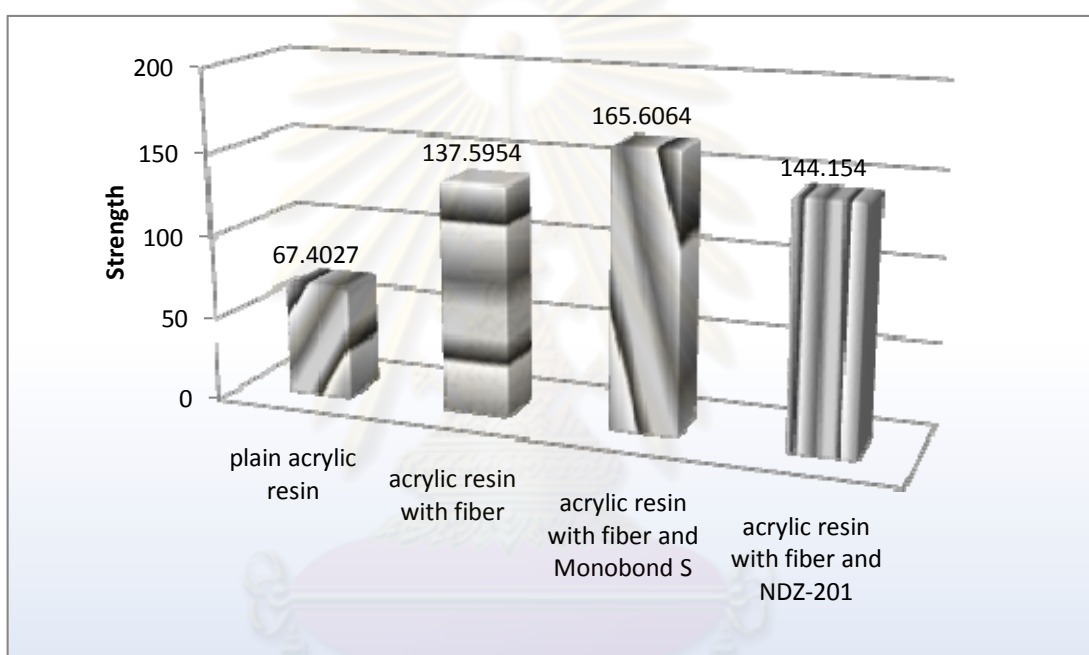
ภาพที่ 31 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบกลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมและไม่เสริมเส้นใย และทาสารเชื่อมยึดไซเลนและโททานेटที่แช่น้ำ 7 วัน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวพบว่า ทั้ง 4 กลุ่มมีความแตกต่างของค่าความแข็งแรงดัดขวางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 19) โดยกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วในเรซินอะคริลิกที่ไม่ได้เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดแตกต่างจากกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และแตกต่างจากกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดโททานेटอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.038$) นอกจากนี้กลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด

ไซเลนมอนอบอนด์เอสแตกต่างจากกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.001$) ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 20)

กลุ่มทดลองที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน

พบว่าขึ้นทดสอบในกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วในเรซินอะคริลิกเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอส ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงกว่ากลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเต และทั้งสองกลุ่มนี้ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงกว่ากลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วแต่ไม่ได้เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความแข็งแรงดัดขวางของขึ้นทดสอบกลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมและไม่เสริมเส้นใย และทาสารเชื่อมยึดไซเลนและไททานเตที่แช่น้ำ 30 วัน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวพบว่า ทั้ง 4 กลุ่มมีความแตกต่างของค่าความแข็งแรงดัดขวางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) เช่นเดียวกันดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 23) โดยกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดแตกต่างจากกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ไม่แตกต่างจากกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้กลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนมอนอบอนด์เอสแตกต่างจากกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.001$) เช่นกัน ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 24)

การเปรียบเทียบผลของการแช่น้ำ 7 วัน และ 30 วัน ในแต่ละกลุ่มทดลอง

กลุ่มทดลองทั้ง 4 กลุ่มได้แก่ กลุ่มเรซินอะคริลิกที่ไม่ได้เสริมเส้นใยแก้ว กลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วไม่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด กลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน และกลุ่มเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเนต พบว่าในการแช่น้ำขึ้นทดสอบ 30 วันให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางต่ำกว่าการแช่น้ำ 7 วัน โดยมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 27 , 29 , 31 , 33 ตามลำดับ)

ตารางที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ยและระดับนัยสำคัญของผลต่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางระหว่างกลุ่มทดลองเรซินอะคริลิกเสริมและไม่เสริมเส้นใย และทาสารเชื่อมยึดไซเลนและไททานเนตที่แช่น้ำ 7 วันและ 30 วัน

กลุ่มทดลอง	แช่น้ำ 7 วัน	แช่น้ำ 30 วัน	ระดับนัยสำคัญ
เรซินอะคริลิก	78.93	67.40	0.002
เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว	154.54	137.60	0.002
เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด ไซเลน	184.23	165.61	0.001
เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด ไททานเนต	166.55	144.15	< 0.001

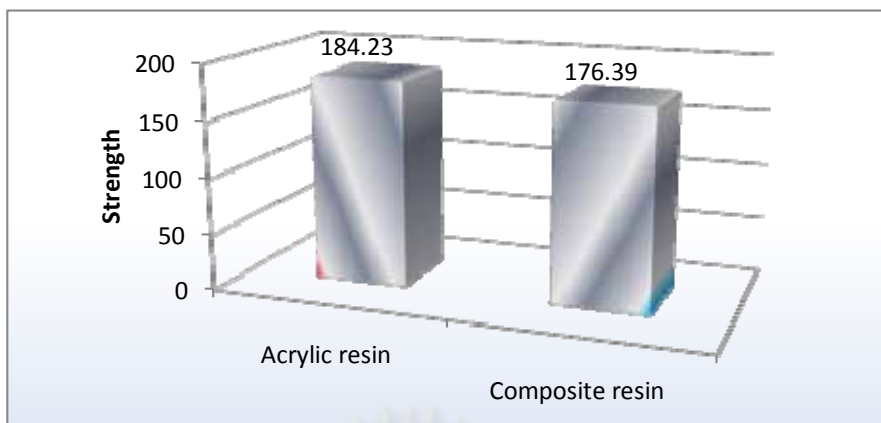
การเปรียบเทียบผลการเสริมเส้นใยในเรซินอะคริลิกและเรซินคอมโพสิตที่แช่น้ำ 7 วัน

จากค่าความแข็งแรงดัดขวางของเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน แสดงดังตารางที่ 14 โดยค่าสูงสุด 188.70 เมกะปาสคาล ค่าต่ำสุด 168.21 เมกะปาสคาล และมีค่าเฉลี่ย 176.39 เมกะปาสคาล

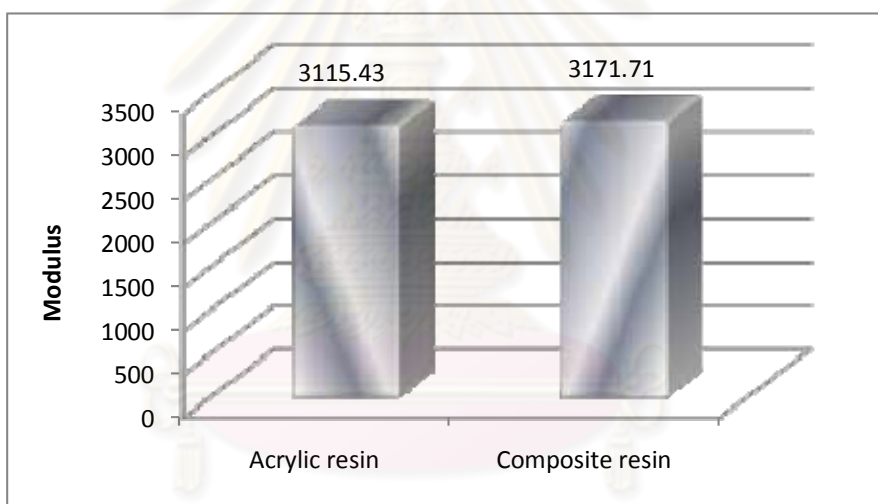
ตารางที่ 14 แสดงค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว
 เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน

ชั้นทดสอบเรซินคอมโพสิต	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง(เมกะปาสคาล)
1	173.013
2	177.378
3	168.209
4	186.199
5	183.740
6	170.288
7	188.703
8	171.493
9	175.755
10	169.158
ค่าเฉลี่ย	176.39
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.42

เมื่อนำชั้นทดสอบเรซินคอมโพสิตมาเปรียบเทียบกับเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดชนิดเดียวกัน พบว่าเรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยให้ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดัดขวางต่ำกว่าเรซิน อะคริลิกเสริมเส้นใย และมีค่าเฉลี่ยของมอดูลัสดัดขวางสูงกว่าเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใย ดังภาพที่ 33 และ 34 ตามลำดับ จากการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางและมอดูลัสดัดขวางระหว่าง 2 กลุ่ม ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ 36 และ 39)



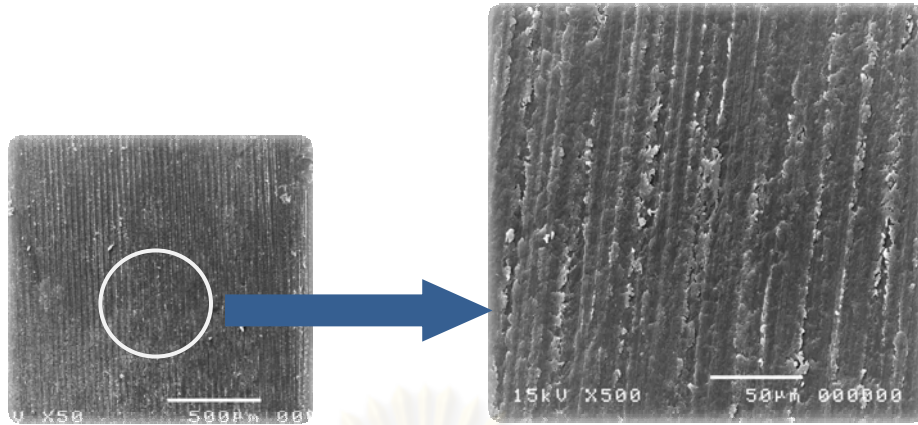
ภาพที่ 33 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิก และ เรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน



ภาพที่ 34 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่ามอดูลัสดัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกและ เรซินคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน

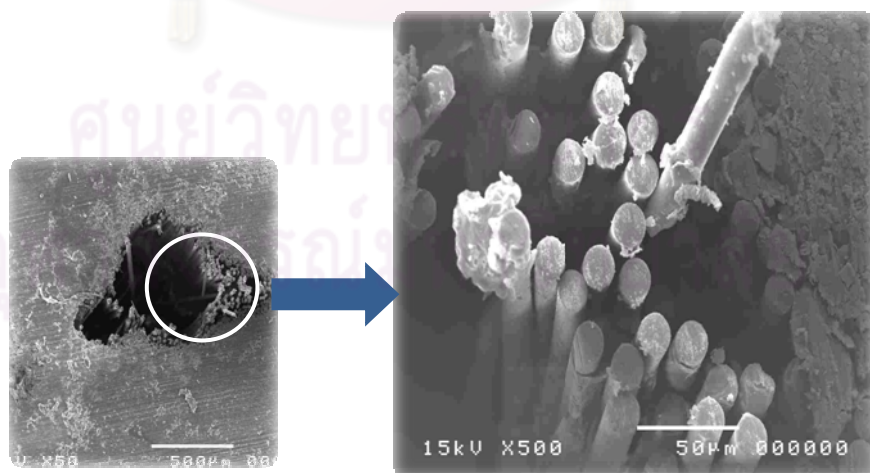
4.3. ผลการวิเคราะห์ชั้นทดสอบที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลของการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ แสดงชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกภายหลังการแตกหักดังภาพที่ 35

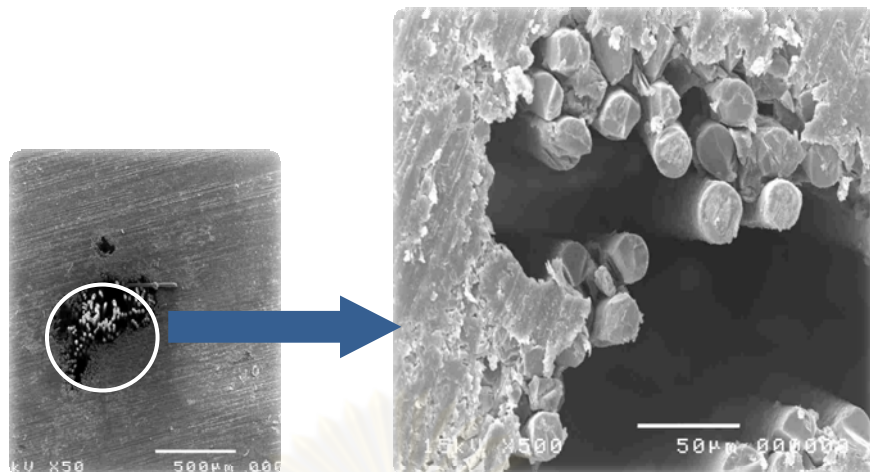


ภาพที่ 35 แสดงภาพตัดขวางของขึ้นททดสอบเรซินอะคริลิกจากกล่องอิเล็กทรอนิกส์แบบสองกราด ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)

สำหรับขึ้นททดสอบที่เสริมเส้นใยแก้ว จากภาพที่ 36 และ 37 แสดงหน้าตัดขวางของขึ้นททดสอบซึ่งพบว่า มีช่องว่างภายในเกิดขึ้นให้เห็น เนื่องมาจากการหลุดออกของเส้นใยแก้วที่ไม่มีการยึดติดกับเรซินเมทริกซ์บริเวณรอบ ๆ จากภาพกำลังขยาย 500 เท่า เห็นได้ชัดว่าพื้นผิวของเส้นใยแก้วไม่ได้ถูกเคลือบทับด้วยเรซินเมทริกซ์ ซึ่งสังเกตจากพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบของเส้นใยแต่ละเส้น ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์นี้จึงสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงตัดขวางของขึ้นททดสอบในกลุ่มนี้ ที่ให้ค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่ากลุ่มที่เพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินเมทริกซ์ด้วยสารเชื่อมยึด แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเชื่อมยึดสามารถส่งผลต่อความแข็งแรงตัดขวางได้

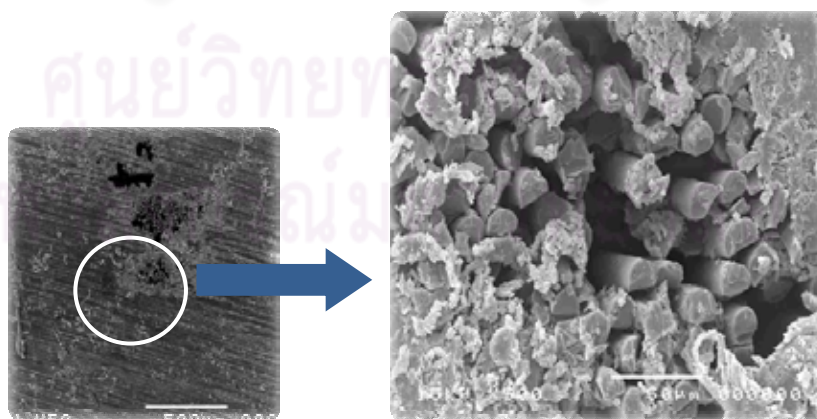


ภาพที่ 36 แสดงภาพตัดขวางของขึ้นททดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน จากกล่องอิเล็กทรอนิกส์แบบสองกราดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า(ซ้าย) และ 500 เท่า(ขวา)

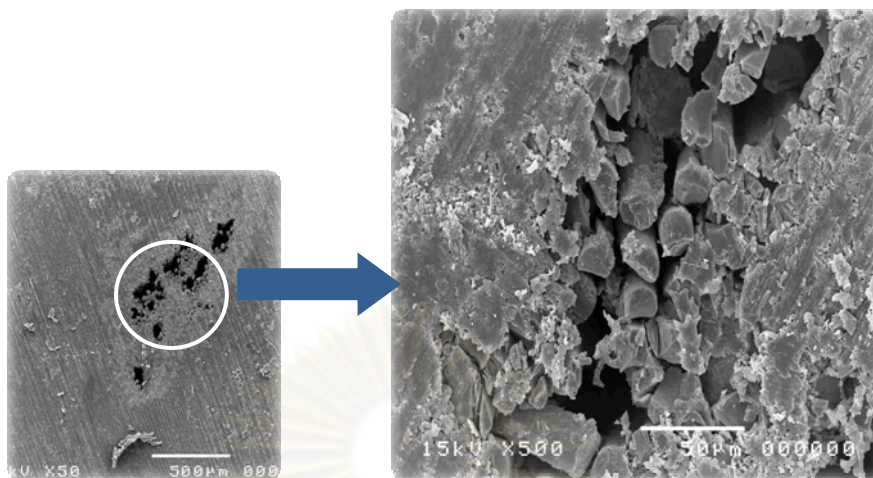


ภาพที่ 37 แสดงภาพตัดขวางของขึ้นททดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า(ซ้าย) และ 500 เท่า(ขวา)

ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของขึ้นททดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน แสดงดังภาพที่ 38 และ 39 จากหน้าตัดขวางของขึ้นททดสอบพบว่าเส้นใยยึดติดกับเรซินเมทริกซ์ได้ดี ซึ่งสังเกตได้จากความหนาแน่นของเส้นใยที่พบการหลุดออกของเส้นใยไม่มาก เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึด และจากภาพกำลังขยายที่สูงขึ้นพบว่าเส้นใยแก้วถูกปกคลุมไปด้วยเรซินเมทริกซ์โดยรอบ เส้นใยแต่ละเส้นมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ แสดงถึงความสามารถในการยึดติดกันระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินอะคริลิก ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงดัดขวางที่สูงสุดจากการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด

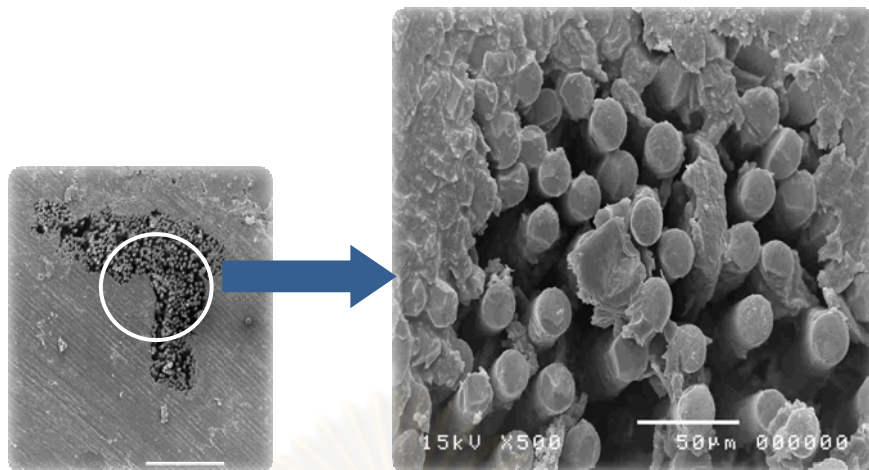


ภาพที่ 38 แสดงภาพตัดขวางของขึ้นททดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า(ซ้าย) และ 500 เท่า(ขวา)

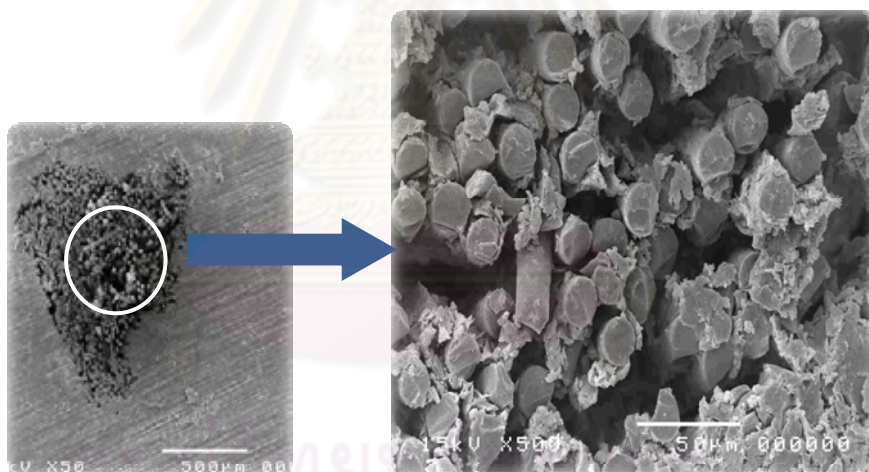


ภาพที่ 39 แสดงภาพตัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า(ซ้าย) และ 500 เท่า(ขวา)

และชั้นทดสอบในกลุ่มที่เสริมเส้นใยและเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเต แสดงภาพตัดขวางของชั้นทดสอบภายหลังการแตกหักดังภาพที่ 40 และ 41 ซึ่งพบว่าไม่มีช่องว่างที่เกิดจากการหลุดออกของเส้นใยเช่นเดียวกับกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมยึดไซเลน และจากภาพกำลังขยาย 500 เท่า พบเส้นใยแก้วถูกเคลือบทับด้วยเรซินเมทริกซ์เช่นกัน แสดงให้เห็นผลของการใช้สารเชื่อมยึดไททานเตเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินอะคริลิก จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงตัดขวางในกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงตัดขวางได้มากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมยึด แม้ค่าความแข็งแรงตัดขวางนี้ไม่สูงเท่ากลุ่มที่ใช้สารเชื่อมยึดไซเลน จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้สามารถนำมาอธิบายได้ว่า ค่าความแข็งแรงตัดขวางที่สูงขึ้นเป็นผลจากสารเชื่อมยึดไททานเตที่ใช้ปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยแก้วก่อนนำมาเสริมความแข็งแรงในชั้นทดสอบ ทำให้สามารถเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยและเรซินอะคริลิกได้จริง ส่งผลต่อการถ่ายทอดแรงจากเรซินเมทริกซ์ไปสู่เส้นใยที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงอยู่ภายในได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 40 แสดงภาพตัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและ
 เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานตที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่อง
 กรวดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า(ซ้าย) และ 500 เท่า(ขวา)



ภาพที่ 41 แสดงภาพตัดขวางของชั้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและ
 เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานตที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่อง
 กรวดด้วยกำลังขยาย 50 เท่า(ซ้าย) และ 500 เท่า(ขวา)

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1. การอภิปรายวิธีการทดลอง

จากข้อตกลงในงานวิจัยครั้งนี้ ระบุถึงสภาวะภายใต้ห้องปฏิบัติการที่เตรียมขึ้นทดสอบ โดยควบคุมให้อยู่ภายใต้ความชื้นและอุณหภูมิในห้องเดียวกัน เพื่อเป็นการควบคุมปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจมีผลต่อความแข็งแรงดัดขวางของชิ้นทดสอบ สำหรับการควบคุมความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นขณะเตรียมชิ้นทดสอบ การชั่งส่วนผงของเรซินอะคริลิกและเส้นใยใช้เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม และ 0.0001 กรัมตามลำดับ โดยการชั่งส่วนผงให้น้ำหนัก 0.4 กรัม น้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งดิจิตอลคือ 0.40 กรัม และการชั่งเส้นใยแก้วได้น้ำหนัก 0.026 กรัม น้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งดิจิตอลคือ 0.0260 กรัม แสดงให้เห็นถึงความเที่ยงตรงของการชั่งสารเพื่อสร้างชิ้นทดสอบทุก ๆ ชิ้น และนอกจากนี้การชั่งส่วนผงของเรซินอะคริลิก ในการวิจัยนี้ ใช้กระดาษตวงสารเพื่อชั่งส่วนผงก่อนผสมกับส่วนเหลวตวงด้วยปิเปต ขณะเทส่วนผงออกพบมีส่วนผงติดอยู่บนกระดาษตวงสาร 0.005 ± 0.001 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 1 – 1.5 ของปริมาณส่วนผงที่ชั่งเท่านั้น แสดงให้เห็นถึงการลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการเตรียมชิ้นทดสอบ

ความเหนียวของวัสดุอะคริลิกเรซินชนิดบ่มได้เองขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อัตราส่วนผสม อุณหภูมิในห้องทดลอง และระยะเวลาตั้งแต่ส่วนผงและส่วนเหลวผสมกันจนก่อนใส่ลงในแบบหล่อโลหะ ซึ่งในงานวิจัยได้ควบคุมเวลาตั้งแต่ผสมส่วนผงและน้ำ จนใส่ลงในแบบหล่อเป็นเวลา 5 วินาที เพื่อควบคุมความเหนียวของวัสดุให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดขณะใส่ลงในแบบหล่อนอกจากนี้การควบคุมเวลาดังกล่าวส่งผลถึงการควบคุมปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ ซึ่งมีผลต่อการยึดติดกับเส้นใยแก้วที่เสริมเข้าไปและเป็นการลดความแข็งแรงของวัสดุลง (Ruyter และคณะ, 1986)

การจัดเรียงเส้นใยแก้วในชิ้นทดสอบ เมื่อวางส่วนประกอบขั้นที่ 2 ของแบบหล่อโลหะ อาจทำให้เส้นใยแก้วแตกกระจายออกไปได้ เนื่องจากเส้นใยแก้วที่มีปริมาณมากไม่เกาะกลุ่มกันแน่น และขนาดความกว้างของแถบเส้นใยตามน้ำหนักที่ชั่งเมื่อนำมาเรียงเพื่อเตรียมวางในชิ้นทดสอบมีความกว้างประมาณ 2 มิลลิเมตร ทำให้ขณะสร้างชิ้นทดสอบอาจปรากฏมีเส้นใยแก้วถูกดันออกมาทางด้านข้างชิ้นทดสอบ ซึ่งมีผลต่อการดูดซึมน้ำเข้าในชิ้นทดสอบและส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุ (Lassila, Nohrstrom และ Vallittu, 2002; Vallittu, 1999) ปัญหาการแผ่กระจายออกด้านข้างขณะกดบ่มได้มากยิ่งขึ้นหากใช้เส้นใยแก้วในปริมาณมาก ซึ่งจากการรายงาน

ของ Vallittu สามารถกำจัดปัญหานี้ลงได้โดยการเคลือบผิวเส้นใยด้วยพอลิเมอร์ก่อน(Vallittu, 1999) นอกจากนี้ตำแหน่งของเส้นใยแก้วในชั้นทดสอบ แม้มีการจัดวางในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของชั้นทดสอบ แต่ขบวนการสร้างชั้นทดสอบขณะฉีดวัสดุในชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ร่วมกับการพยายามกดวางเส้นใยให้รวมอยู่ในชั้นทดสอบ ทำให้อาจเกิดแรงผลักทางอ้อมต่อเส้นใยดันให้เส้นใยลงไปในตำแหน่งครึ่งล่างของชั้นทดสอบ ดังนั้นขบวนการดังกล่าวมีผลต่อตำแหน่งเส้นใยแก้วที่เสริมอยู่ในชั้นทดสอบ Tirapelli และคณะอธิบายว่า ถ้าแรงที่กระทำบนชั้นทดสอบตั้งฉากกับแนวขนานของเส้นใยที่เสริมในชั้นงาน พบว่าเส้นใยที่วางอยู่ในด้านที่เกิดแรงดึงให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางมากกว่าเส้นใยที่วางอยู่ทางด้านที่เกิดแรงกด ดังนั้นตำแหน่งของเส้นใยแก้วซึ่งอยู่ด้านที่เกิดแรงดึงหรือด้านที่เกิดแรงกดอาจมีผลต่อค่าแรงที่วัดได้ และส่งผลต่อความแข็งแรงดัดขวาง(Tirapelli และคณะ, 2005) จากการศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งเส้นใยแก้วที่เคลือบผิวด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน พบว่ากลุ่มทดลองที่จัดวางเส้นใยแก้วบริเวณส่วนล่าง (lower one-third) ของชั้นทดสอบให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางมากกว่ากลุ่มทดลองที่จัดวางเส้นใยแก้วบริเวณส่วนกลาง (middle level) และส่วนบน (upper one-third) ของชั้นทดสอบ โดยให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ(Chung, Lin และ Wang, 1998)

หลังการเตรียมชั้นทดสอบเรียบร้อยแล้ว ควบคุมเวลาตั้งแต่ผสมส่วนผงกับส่วนเหลวจนเกิดการก่อตัวเต็มที่ประมาณ 15 นาทีจึงแกะชั้นทดสอบออกจากแบบหล่อโลหะ จากนั้นวัดขนาดชั้นทดสอบและขีดแต่งตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยกำหนดเวลาเพื่อนำไปแช่ในน้ำกลั่นพร้อมกันภายในเวลา 24 ชั่วโมง การควบคุมเวลาในช่วงนี้มีผลต่อปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ในชั้นทดสอบ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณของมอนอเมอร์ที่ตกค้างอยู่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบ(Ruyter และคณะ, 1986) และในขั้นตอนการขีดแต่งชั้นทดสอบ ใช้แท่นโลหะเป็นตัวยึดจับชั้นทดสอบขณะขีดแต่งด้วยกระดาษทราย โดยแท่นโลหะที่จับยึดชั้นทดสอบนี้มีความหนาของชั้นทดสอบให้เท่ากับที่ต้องการ โดยขีดแต่งด้านที่ขนานกันของชั้นทดสอบทีละคู่ จากนั้นพลิกชั้นทดสอบมาขีดอีกด้านที่ขนานกันจนได้ขนาดตามกำหนด

ความแข็งแรงของวัสดุบูรณะคอมโพสิตเสริมเส้นใย พิจารณาจากการทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง เนื่องจากการทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงด้วยวิธีอื่น ๆ ไม่เป็นที่น่าเชื่อถือและให้ผลไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ โดยความแข็งแรงดึง (tensile strength) เป็นการทดสอบซึ่งมีเทคนิคที่ค่อนข้างยุ่งยาก ผลการทดสอบไม่สามารถสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวขวางขณะที่มีแรงบิดเคี้ยว และไม่สามารถคัดเลือกพื้นผิวของชั้นทดสอบที่นำมาทดสอบได้ สำหรับการทดสอบความแข็งแรงกด (compressive strength) เป็นการทดสอบที่รวมรูปแบบของความ

ล้มเหลว (failure mode) ระหว่างแรงดึงและแรงเฉือนโดยทางอ้อม และการวัดความแข็งแรงดึงตามศูนย์กลาง (diametral tensile strength) เหมาะกับวัสดุที่ไม่มีพลาสติกไหลแบบพลาสติก (plastic flow) จึงไม่เหมาะที่นำมาใช้ทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางแบบ 3 จุด ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แรงกระทำที่เป็นแรงกด ณ ตำแหน่งที่ให้แรง และเป็นการวิเคราะห์แรงกระทำที่เป็นแรงดึงและแรงเฉือน ณ ตำแหน่งที่ต้านแรง จึงเป็นเครื่องมืออธิบายคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุบูรณะในทางทันตกรรมได้อย่างเหมาะสมที่สุด (Osman และ Owen, 1993; Xu และคณะ, 2003)

5.2. อภิปรายผลการวิจัย

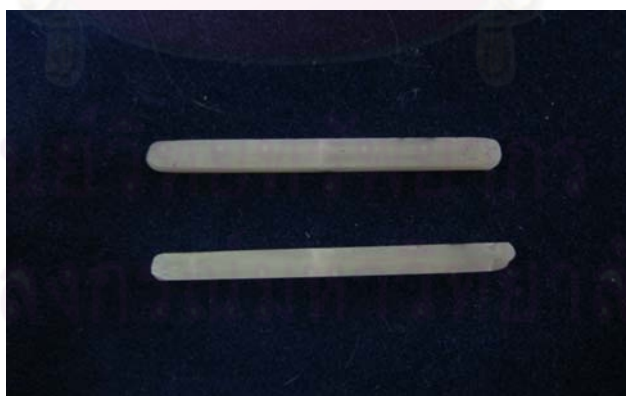
การแตกหักที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบกลุ่มที่ไม่ได้เสริมเส้นใยแก้ว ขณะทดสอบความแข็งแรงดัดขวางพบว่า เมื่อให้แรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ชิ้นทดสอบเกิดการงอตัวจนถึงค่าแรงระดับหนึ่งที่มาพอทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งรอยแตกมักเกิดที่บริเวณ ณ จุดกึ่งกลางความยาวของชิ้นทดสอบดังภาพที่ 42 และชิ้นทดสอบในกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้ว พบว่าเมื่อแรงที่มาพอกระทำลงบนวัสดุระดับหนึ่ง ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักขึ้นทางด้านที่เกิดแรงดึง อาจเกิดการแตกหักจนพบรอยแตกภายนอก หรือพบเพียงรอยร้าวภายในชิ้นทดสอบโดยไม่พบรอยแตกหักของวัสดุดังภาพที่ 43 และ 44 ในกรณีที่พบรอยแตกภายนอก รอยแตกที่เกิดขึ้นมักหยุดอยู่ ณ ตำแหน่งที่มีแนวเส้นใยทอดตัวขวางอยู่ ดังนั้นเส้นใยจึงทำหน้าที่รับแรงส่วนที่มากเกินกว่าวัสดุเรซินอะคริลิกสามารถทนแรงได้ และส่งผ่านแรงไปตามแนวของเส้นใยที่เสริมอยู่ จนเมื่อแรงที่กระทำนั้นมีขนาดมากพอทำให้วัสดุเรซินอะคริลิกเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยนี้แตกหักหรือโค้งงอได้ จากผลการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การแตกหักของชิ้นทดสอบถูกหยุดยั้งด้วยความแข็งแรงของเส้นใยที่ทอดขวางอยู่ โดยเส้นใยสามารถต่อต้านการแตกหักอย่างต่อเนื่องของเรซินเมทริกซ์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Vallittu ในปี 1999 และ Lassila และคณะในปี 2002 กล่าวไว้ว่าเส้นใยแก้วมีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อแรงดึงและสามารถหยุดยั้งการดำเนินต่อไปของรอยแตกร้าว (crack propogation) ในวัสดุได้ (Lassila และคณะ, 2002; Vallittu, 1999)



ภาพที่ 42 แสดงชิ้นส่วนที่เกิดการแตกหักภายหลังจากทดสอบของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้เสริมเส้นใย



ภาพที่ 43 แสดงชิ้นส่วนที่เกิดรอยแตกหักภายหลังจากทดสอบของชิ้นทดสอบที่เสริมเส้นใย



ภาพที่ 44 แสดงชิ้นส่วนที่เกิดรอยร้าวภายในชิ้นทดสอบที่เสริมเส้นใย

ในการวิจัยครั้งนี้ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงสุด 184.23 เมกะปาสคาล ในชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน ขณะที่กลุ่มทดสอบเรซินอะคริลิกที่ไม่ได้เสริมเส้นใยมีค่าความแข็งแรงดัดขวางเพียง 78.93 เมกะปาสคาล แสดงให้

เห็นว่าชั้นทดสอบที่มีการเสริมเส้นใยสามารถให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงขึ้นถึงร้อยละ 130 และในกลุ่มที่เสริมเส้นใยและเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเตสามารถเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางได้ถึงร้อยละ 110 เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา Chung และคณะพบค่าความแข็งแรงดัดขวางของชั้นทดสอบสูงสุด 64.1 เมกะปาสคาลในกลุ่มทดลองที่เสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในด้านที่เกิดแรงดึงของชั้นทดสอบ และกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้เสริมเส้นใยให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางเพียง 54.3 เมกะปาสคาล พบว่าสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางได้ถึงร้อยละ 20 จากการศึกษาดังกล่าวนี้ได้เสริมเส้นใยในรูปแบบที่ตัดให้มีมีความยาวสั้น ๆ ประมาณ 5 มิลลิเมตร เนื่องจากความยากลำบากในการเสริมเส้นใยเพื่อให้ได้ตำแหน่งการวางในทิศทางเดียวกันอย่างถูกต้อง พบว่าปริมาณที่ใส่ตั้งแต่ร้อยละ 1 – 3 โดยน้ำหนักไม่พบความแตกต่างของความแข็งแรงดัดขวาง จนเพิ่มปริมาณเส้นใยตั้งแต่ร้อยละ 4 – 8 โดยน้ำหนักสามารถเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางได้ถึงร้อยละ 40 Chung และคณะได้แนะนำให้ใช้ในกรณีที่ต้องใส่สะพานฟันชั่วคราวเป็นระยะเวลาสั้น แต่ควรระมัดระวังในตำแหน่งที่เป็นข้อต่อของสะพานฟันด้วย (Chung และคณะ, 1998) ดังนั้นจากความแข็งแรงดัดขวางที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 130 ในการวิจัยครั้งนี้จึงสามารถนำวัสดุไปใช้ทำสะพานฟันชั่วคราวทั้งในกรณีที่มีความยาวของสะพานฟันมาก หรือรองรับแรงบดเคี้ยวที่มากในระยะเวลาสั้น ๆ ได้เป็นอย่างดีโดยไม่ก่อให้เกิดการแตกหักบริเวณข้อต่อหรือส่วนอื่น ๆ ของสะพานฟันได้

จากการศึกษาของ Keyf และคณะปี 2003 ใช้สารไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (hydroxyethyl-methacrylate : HEMA) เพื่อปรับพื้นผิวเส้นใยแก้วที่ใช้เสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุพอลิเมทาคริเลตชนิดบ่มได้เอง พบว่าชั้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงสุด 66.3 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าความแข็งแรงดัดขวาง 62.4 เมกะปาสคาล และกลุ่มที่ไม่ได้เสริมเส้นใยได้ค่าความแข็งแรงดัดขวางเท่ากับ 52.9 เมกะปาสคาล จากการส่องชั้นทดสอบภายหลังการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าชั้นทดสอบที่ไม่มีการปรับสภาพพื้นผิวพบการยึดติดที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างเส้นใยและเรซินเมทริกซ์ และชั้นทดสอบที่ปรับสภาพพื้นผิวพบว่าเส้นใยถูกเคลือบด้วยเรซินเมทริกซ์ แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวกับเรซิน ด้วยสารไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ทำให้เกิดการสร้างพื้นผิวที่ชอบน้ำคือ หมู่ไฮดรอกซีบนเส้นใยแก้ว ดังนั้นการปรับพื้นผิวด้วยสารนี้จึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางแก่เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วได้ เห็นได้ว่าเส้นใยที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวเปรียบเหมือนการเติมวัสดุเข้าไปไม่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง เส้นใยนั้นอาจทำให้เกิดแตกหักของเรซินเมทริกซ์ที่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่ได้ (Keyf, Uzun และ Mutlu, 2003) สอดคล้องกับการวิจัยนี้ ซึ่งพบว่าผิวของเส้นใยแก้วที่ปรับพื้นผิวด้วยสารเชื่อมยึดถูกเคลือบด้วยเรซินเมทริกซ์ดังภาพที่ 38 - 41 ส่งผลถึงการยึดติดที่ดีของเส้นใยแก้วและเรซินเมทริกซ์ จากผลการศึกษาที่แสดงดัง

แผนภูมิแท่งภาพที่ 31 และ 32 สารเชื่อมยึดที่ใช้ปรับพื้นผิวเส้นใยแก้วในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นทดสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยได้ เนื่องจากคุณสมบัติการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินอะคริลิก สังเกตได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งที่เป็นประโยชน์ในการตรวจสอบคุณสมบัติการยึดติดของวัสดุเสริมความแข็งแรง

การเคลือบผิวของเส้นใยด้วยเรซินทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากความหนืดของเรซิน แต่การเคลือบผิวที่ดีสามารถทำให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยดูดซึมน้ำได้ลดลง จากการลดขนาดของช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เมื่อวัสดุแช่อยู่ในน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น 2 อย่างคือ น้ำสามารถทำลายพันธะระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และเส้นใยแก้ว ทำให้แรงยึดติดระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยที่ใช้สารเชื่อมยึดไฮเลนลดลง ขบวนการนี้เกิดจากการปลดปล่อยออกไซด์จากแก้วที่อยู่บนพื้นผิวของเส้นใย และเกิดการแตกสลายสาเหตุจากน้ำ (hydrolytic degradation) ของโครงข่ายพอลิไฮดรอกเซน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำและปฏิกิริยาการควบแน่นของสารเชื่อมยึด ดังนั้นจึงเป็นผลให้เกิดการลดลงของคุณสมบัติเชิงกลแบบผันกลับไม่ได้ อย่างหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงอีกทางเป็นผลให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงแบบผันกลับได้ โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นพลาสติก (plasticization) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยโมเลกุลของน้ำ จากการศึกษาของ Vallittu ในปี 2000 พบว่าการแช่ฐานพื้นปอลอมที่ทำด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในน้ำเป็นเวลา 180 วัน ทำให้ความแข็งแรงดัดขวางลดลงประมาณร้อยละ 27 (Vallittu, 2000) ความแข็งแรงที่ลดลงเนื่องจากการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดเป็นพลาสติกของพอลิเมอร์ กลไกเบื้องต้นของการดูดซึมน้ำใช้ขบวนการแพร่ (diffusion) ที่ถูกกระตุ้นจากความมีขั้วของสายโซ่พอลิเมอร์ โมเลกุลของน้ำจึงแพร่กระจายเข้าไปในช่องว่างระหว่างสายโซ่ทำให้สายโซ่นั้นแยกออกจากกัน โมเลกุลของน้ำจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นสารทำให้พอลิเมอร์นุ่ม และยังทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่เป็นผลทำให้ลดความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุลง (Lassila และคณะ, 2002)

ข้อดีของสารเชื่อมยึดไททานเตตในด้านความสวยงามคือ เมื่อนำไปใช้กับพอลิเมอร์ที่ใส สารประกอบฟีนอลิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกันออกซิเดชันหรือสารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสีได้ และจากการวิจัยครั้งนี้พบว่าชิ้นทดสอบในกลุ่มที่เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานเตต เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของเรซินอะคริลิกที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์เพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 45 ดังนั้นการนำสารเชื่อมยึดไททานเตตมาใช้ในการสร้างชิ้นพื้นปอลอมติดแน่นชนิดชั่วคราว จึงไม่เป็นปัญหาด้านความสวยงาม



ภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบสีของซินทอสอบเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน (ด้านขวา) กับสารเชื่อมยึดไททานेट (ด้านซ้าย)

เส้นใยประเภทอื่น ๆ ที่นำมาเสริมความแข็งแรงในเรซินอะคริลิก Manley และคณะ รายงานไว้ว่าเส้นใยคาร์บอนสามารถเพิ่มความแข็งแรงดึง ความล้าและความแข็งแรงดัดขวางแก่เรซินอะคริลิก (Manley และคณะ, 1979) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Larson และคณะในปี 1991 พบว่าการใช้เส้นใยคาร์บอนสามารถเสริมความแข็งแรงให้กับสะพานฟันติดแน่นชนิดชั่วคราวที่มีความยาวมากได้ดี แต่ปัญหาด้านความสวยงามของเส้นใยชนิดนี้ เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีสีดำ ทำให้ไม่นิยมนำมาใช้ในช่องปากบริเวณที่ต้องการความสวยงามและเป็นข้อพิจารณาหนึ่งในการเลือกใช้เสริมแรงในวัสดุที่ทำสะพานฟันชั่วคราว (Larson และคณะ, 1991) เส้นใยเคฟลาร์ ให้ผลในการเพิ่มความแข็งแรงกระแทกแก่เรซินอะคริลิกอย่างมีนัยสำคัญ (Berrong, Weed และ Young, 1990) แต่ยังคงพบปัญหาด้านความสวยงามจากสีของเส้นใยและการใช้งานค่อนข้างยุ่งยาก จึงนำมาใช้ในช่องปากน้อย นอกจากนี้เส้นใยพอลิเอทิลีนสามารถเพิ่มความแข็งแรงกระแทกและความแข็งแรงดัดขวางแก่เรซินอะคริลิกได้เช่นกัน ต่างจากเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยเคฟลาร์ตรงที่มีสีสวยงาม แต่ขบวนการในการกัดกร่อนพื้นผิวสามารถทำได้ยากในคลินิก (Vallittu, 1997b) ในทางตรงกันข้ามเส้นใยแก้วมีสีที่ค่อนข้างขาว เมื่อนำมาเติมในเรซินอะคริลิกทำให้มองไม่เห็นเส้นใย มีความสวยงามมากกว่าเส้นใยประเภทอื่น มีคุณสมบัติในการเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อในช่องปาก และมีความสามารถในการยึดติดกับเนื้อฟันหรือเรซิน รวมทั้งการใช้งานทั้งในห้องปฏิบัติการและในคลินิกทำได้ง่าย นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีเสถียรภาพขณะอยู่ในช่องปาก ทำให้เส้นใยแก้วถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากกว่าเส้นใยประเภทอื่น ๆ

ปัจจัยเรื่องแนวการเรียงตัวของเส้นใยเป็นสิ่งสำคัญต่อความแข็งแรงของเรซินอะคริลิก (Vallittu, 1997b, a) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยแก้วที่มีการเรียงตัวในทิศทางเดียววางตามแนว

ยาวของชิ้นทดสอบ เนื่องจากเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางเดียวและต่อเนื่องกันนี้แสดงให้เห็นผลการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลแก่เรซินอะคริลิกในห้องทดลองได้อย่างมาก(Vallittu, 1999) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาผลของการเสริมความแข็งแรงในทางคลินิกยังมีไม่มากนัก(Vallittu, 1997a) ในขณะที่เส้นใยเสริมแรงประเภทอื่นทั้งชนิดและปริมาณมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุเส้นใยแบบถักทอซึ่งมีการเรียงตัวของเส้นใยหลายทิศทาง ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงแก่เรซินอะคริลิกได้มากพอ จากงานวิจัยของ Solnit ปี 1991 การเสริมความแข็งแรงในสะพานฟันชั่วคราวด้วยเส้นใยแก้วแบบถักทอนี้ พบว่าเส้นใยเข้าไปทำให้เกิดการแตกหักของเรซินเมทริกซ์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันอยู่ เนื่องจากเส้นใยไม่ได้เรียงตัวอยู่ในแนวยาวต่อแรงที่กระทำ เป็นผลให้ลดความต้านทานต่อการแตกหักได้(Solnit, 1991) ตรงข้ามกับผลการศึกษาที่พบว่าเส้นใยประเภทถักทอหรือตาข่ายสามารถเสริมคุณสมบัติได้ดี เนื่องจากเส้นใยประเภทนี้สามารถเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุได้หลายทิศทาง(Kanie และคณะ, 2000; Vallittu, 1999)

5.3. สรุปผลการวิจัย

- 1) การเสริมเส้นใยแก้วสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางให้กับเรซินอะคริลิกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินเมทริกซ์ด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน และสารเชื่อมยึดไททานเตตสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางได้มากขึ้น
- 2) สารเชื่อมยึดไททานเตตสามารถเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วและเรซินอะคริลิกได้ ส่งผลให้เพิ่มค่าความแข็งแรงดัดขวางได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่เมื่อเทียบกับผลของสารเชื่อมยึดไซเลน พบว่าให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)
- 3) จากการแช่น้ำขึ้นทดสอบเป็นเวลาที่แตกต่างกัน คือ 7 วัน และ 30 วัน พบว่าขึ้นทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน ให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางสูงกว่าขึ้นทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำ 30 วันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในทุก ๆ กลุ่มทดลอง
- 4) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้วและคอมโพสิตเรซินเสริมเส้นใยแก้วที่เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดชนิดเดียวกัน

5.4. ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

สารเชื่อมยึดสามารถเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางให้แก่เรซินอะคริลิกเสริมเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยแก้วทำหน้าที่เป็นตัวหยุดยั้งการดำเนินต่อของรอยแตก และแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยแก้วและเรซินเมทริกซ์ซึ่งเกิดจากสารเชื่อมยึด ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่าสารเชื่อมยึดทั้งสองชนิดให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางแตกต่างกัน ภายใต้การควบคุมอัตราส่วนผงกับน้ำของเรซินอะคริลิกและปริมาณของเส้นใยแก้ว สำหรับการศึกษานในอนาคต เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งต่อการค้นคว้าต่อไปด้วยการวิเคราะห์ปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น การใช้ความดันช่วยลดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุเรซินอะคริลิกได้ ซึ่งส่งผลถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุนั้น การออกแบบหน้าตัดของตำแหน่งเส้นใย (cross-sectional design) ปริมาณเส้นใยที่เสริมเข้าไปในชั้นทดสอบ และการเรียงตัวของเส้นใยที่แบ่งเป็นการเรียงตัวแบบทิศทางเดียว แบบสองทิศทาง แบบสุ่ม หรือแบบถักทอ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ นอกจากนี้การนำสารเชื่อมยึดไททาเนตนี้มาใช้เพื่อทำหน้าที่เพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วและเรซินเมทริกซ์หรือในงานทันตกรรมด้านอื่น ๆ จำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติความเข้ากันได้ต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในกรณีที่ต้องการนำสารเคมีในทางอุตสาหกรรมด้านอื่นมาใช้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเชื่อมยึดไททาเนต เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในทางทันตกรรมต่อไปในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- พิสัยศิษฐ์ ชัยจรีนนท์. 2549 การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงตัดขวางของเรซินคอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยสองชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- อรอุษา สรวาวี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

ภาษาอังกฤษ

- Anusavice, K. J. 2003. Phillips' science of dental materials 11th ed. St. Louis Elsevier Science(USA).
- Beech, D. R. and Brown, D. 1972. The role of the filler-matrix interface in composite restorative materials based on poly(methylmethacrylate). Br Dent J 133(7): 297-300.
- Berrong, J. M., Weed, R. M. and Young, J. M. 1990. Fracture resistance of Kevlar-reinforced poly(methyl methacrylate) resin: a preliminary study. Int J Prosthodont 3(4): 391-5.
- Beyli, M. S. and von Fraunhofer, J. A. 1981. An analysis of causes of fracture of acrylic resin dentures. J Prosthet Dent 46(3): 238-41.
- Bowen, R. L. 1956. Use of epoxy resins in restorative materials. J Dent Res 35(3): 360-9.
- Bowen, R. L. 1963. Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. J Am Dent Assoc 66: 57-64.

- Bowman, A. J. and Manley, T. R. 1984. The elimination of breakages in upper dentures by reinforcement with carbon fibre. Br Dent J 156(3): 87-9.
- Braden, M., Davy, K. W., Parker, S., Ladizesky, N. H. and Ward, I. M. 1988. Denture base poly(methyl methacrylate) reinforced with ultra-thin modulus polyethylene fibers. Br Dent J 164(4): 109-13.
- Chee, W. W., Donovan, T. E., Daftary, F. and Siu, T. M. 1988. The effect of vacuum-mixed autopolymerizing acrylic resins on porosity and transverse strength. J Prosthet Dent 60(4): 517-9.
- Chen, T. M. and Brauer, G. M. 1982. Solvent effects on bonding organo-silane to silica surfaces. J Dent Res 61(12): 1439-43.
- Chung, K., Lin, T. and Wang, F. 1998. Flexural strength of a provisional resin material with fibre addition. J Oral Rehabil 25(3): 214-7.
- DeBoer, J., Vermilyea, S. G. and Brady, R. E. 1984. The effect of carbon fiber orientation on the fatigue resistance and bending properties of two denture resins. J Prosthet Dent 51(1): 119-21.
- Elrich, F. R. 1967. Reinforcement of polymers. J Dent Res 46(6): 1193.
- Freilich, M. A. 2000. Fiber-reinforced composites : in clinical dentistry. Chicago: Quintessence Publishing Co.
- Garoushi, S., Vallittu, P. K. and Lassila, L. V. 2007. Use of short fiber-reinforced composite with semi-interpenetrating polymer network matrix in fixed partial dentures. J Dent 35(5): 403-8.

- Gegauff, A. G. and Pryor, H. G. 1987. Fracture toughness of provisional resins for fixed prosthodontics. J Prosthet Dent 58(1): 23-9.
- Going, R. E. 1979. Reducing marginal leakage: a review of materials and techniques. J Am Dent Assoc 99(4): 646-51.
- Goldberg, A. J. and Burstone, C. J. 1992. The use of continuous fiber reinforcement in dentistry. Dent Mater 8(3): 197-202.
- Gutteridge, D. L. 1992. Reinforcement of poly(methyl methacrylate) with ultra-high-modulus polyethylene fibre. J Dent 20(1): 50-4.
- Hill, R. G. 1981. The crosslinking agent ethylene glycol dimethacrylate content of the currently available acrylic denture base resins. J Dent Res 60(3): 725-6.
- Kanie, T., Fujii, K., Arikawa, H. and Inoue, K. 2000. Flexural properties and impact strength of denture base polymer reinforced with woven glass fibers. Dent Mater 16(2): 150-8.
- Keyf, F., Uzun, G. and Mutlu, M. 2003. The effects of HEMA-monomer and air atmosphere treatment of glass fibre on the transverse strength of a provisional fixed partial denture resin. J Oral Rehabil 30(11): 1142-8.
- Kilfoil, B. M., Hesby, R. A. and Pelleu, G. B., Jr. 1983. The tensile strength of a composite resin reinforced with carbon fibers. J Prosthet Dent 50(1): 40-3.
- Kocadereli, I., Canay, S. and Akca, K. 2001. Tensile bond strength of ceramic orthodontic brackets bonded to porcelain surfaces. Am J Orthod Dentofacial Orthop 119(6): 617-20.

- Larson, W. R., Dixon, D. L., Aquilino, S. A. and Clancy, J. M. 1991. The effect of carbon graphite fiber reinforcement on the strength of provisional crown and fixed partial denture resins. J Prosthet Dent 66(6): 816-20.
- Lassila, L. V., Nohrstrom, T. and Vallittu, P. K. 2002. The influence of short-term water storage on the flexural properties of unidirectional glass fiber-reinforced composites. Biomaterials 23(10): 2221-9.
- Lawson, J. R. 1991. Alternative alloys for resin-bonded retainers. J Prosthet Dent 65(1): 97-9.
- Lehmann, F., Eickemeyer, G. and Rammelsberg, P. 2004. Fracture resistance of metal-free composite crowns-effects of fiber reinforcement, thermal cycling, and cementation technique. J Prosthet Dent 92(3): 258-64.
- Lim, C. C. 1995. Case selection for porcelain veneers. Quintessence Int 26(5): 311-5.
- Manley, T. R., Bowman, A. J. and Cook, M. 1979. Denture bases reinforced with carbon fibres. Br Dent J 146(1): 25.
- Matinlinna, J. P., Lassila, L. V., Ozcan, M., Yli-Urpo, A. and Vallittu, P. K. 2004. An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry. Int J Prosthodont 17(2): 155-64.
- McDonough, W. G., Antonucci, J. M. and Dunkers, J. P. 2001. Interfacial shear strengths of dental resin-glass fibers by the microbond test. Dent Mater 17(6): 492-8.
- Meiers, J. C. and Kazemi, R. B. 2005. Chairside replacement of posterior teeth using a prefabricated fiber-reinforced resin composite framework technique: a case report. J Esthet Restor Dent 17(6): 335-42; discussion 342.

- Miller, S. D. 1983. The anterior fixed provisional restoration: a direct method. J Prosthet Dent 50(4): 516-9.
- Mullarky, R. H. 1985. Aramid fiber reinforcement of acrylic appliances. J Clin Orthod 19(9): 655-8.
- Osman, Y. I. and Owen, C. P. 1993. Flexural strength of provisional restorative materials. J Prosthet Dent 70(1): 94-6.
- Ozcan, M., Pfeiffer, P. and Nergiz, I. 1998. A brief history and current status of metal- and ceramic surface-conditioning concepts for resin bonding in dentistry. Quintessence Int 29(11): 713-24.
- Ozcan, M. and Niedermeier, W. 2002. Clinical study on the reasons for and location of failures of metal-ceramic restorations and survival of repairs. Int J Prosthodont 15(3): 299-302.
- Ozcan, M. 2003. Evaluation of alternative intra-oral repair techniques for fractured ceramic-fused-to-metal restorations. J Oral Rehabil 30(2): 194-203.
- Powers, J. M., Sakaguchi, R. L. and Craig, R. G. 2006. Craig's restorative dental materials 12nd ed. St. Louis Mosby Elsevier.
- Rosenstiel, S. F., Land, M. F. and Fujimoto, J. 2006. Contemporary fixed prosthodontics 4th ed. St. Louis: Mosby Elsevier.
- Ruyter, I. E. and Svendsen, S. A. 1980. Flexural properties of denture base polymers. J Prosthet Dent 43(1): 95-104.

- Ruyter, I. E., Ekstrand, K. and Bjork, N. 1986. Development of carbon/graphite fiber reinforced poly (methyl methacrylate) suitable for implant-fixed dental bridges. Dent Mater 2(1): 6-9.
- Schreiber, C. K. 1971. Polymethylmethacrylate reinforced with carbon fibres. Br Dent J 130(1): 29-30.
- Sehajpal, S. B. and Sood, V. K. 1989. Effect of metal fillers on some physical properties of acrylic resin. J Prosthet Dent 61(6): 746-51.
- Soderholm, K. J. and Shang, S. W. 1993. Molecular orientation of silane at the surface of colloidal silica. J Dent Res 72(6): 1050-4.
- Solnit, G. S. 1991. The effect of methyl methacrylate reinforcement with silane-treated and untreated glass fibers. J Prosthet Dent 66(3): 310-4.
- Stafford, G. D. and Handley, R. W. 1975. Transverse bend testing of denture base polymers. J Dent 3(6): 251-5.
- Tezvergil, A., Lassila, L. V., Yli-Urpo, A. and Vallittu, P. K. 2004. Repair bond strength of restorative resin composite applied to fiber-reinforced composite substrate. Acta Odontol Scand 62(1): 51-60.
- Tirapelli, C., Ravagnani, C., Panzeri Fde, C. and Panzeric, H. 2005. Fiber-reinforced composites: effect of fiber position, fiber framework, and wetting agent on flexural strength. Int J Prosthodont 18(3): 201-2.
- Vallittu, P. K. and Lassila, V. P. 1992. Reinforcement of acrylic resin denture base material with metal or fibre strengtheners. J Oral Rehabil 19(3): 225-30.

- Vallittu, P. K. 1993. Comparison of two different silane compounds used for improving adhesion between fibres and acrylic denture base material. J Oral Rehabil 20(5): 533-9.
- Vallittu, P. K. 1994. Acrylic resin-fiber composite--Part II: The effect of polymerization shrinkage of polymethyl methacrylate applied to fiber roving on transverse strength. J Prosthet Dent 71(6): 613-7.
- Vallittu, P. K., Lassila, V. P. and Lappalainen, R. 1994a. Acrylic resin-fiber composite--Part I: The effect of fiber concentration on fracture resistance. J Prosthet Dent 71(6): 607-12.
- Vallittu, P. K., Lassila, V. P. and Lappalainen, R. 1994b. Transverse strength and fatigue of denture acrylic-glass fiber composite. Dent Mater 10(2): 116-21.
- Vallittu, P. K. 1996a. Dimensional accuracy and stability of polymethyl methacrylate reinforced with metal wire or with continuous glass fiber. J Prosthet Dent 75(6): 617-21.
- Vallittu, P. K. 1996b. A review of fiber-reinforced denture base resins. J Prosthodont 5(4): 270-6.
- Vallittu, P. K. 1997a. Curing of a silane coupling agent and its effect on the transverse strength of autopolymerizing polymethylmethacrylate-glass fibre composite. J Oral Rehabil 24(2): 124-30.
- Vallittu, P. K. 1997b. Ultra-high-modulus polyethylene ribbon as reinforcement for denture polymethyl methacrylate: a short communication. Dent Mater 13(6): 381-2.

- Vallittu, P. K. 1999. Flexural properties of acrylic resin polymers reinforced with unidirectional and woven glass fibers. J Prosthet Dent 81(3): 318-26.
- Vallittu, P. K. and Ekstrand, K. 1999. In vitro cytotoxicity of fibre-polymethyl methacrylate composite used in dentures. J Oral Rehabil 26(8): 666-71.
- Vallittu, P. K. 2000. Effect of 180-week water storage on the flexural properties of E-glass and silica fiber acrylic resin composite. Int J Prosthodont 13(4): 334-9.
- Williamson, D. L., Boyer, D. B., Aquilino, S. A. and Leary, J. M. 1994. Effect of polyethylene fiber reinforcement on the strength of denture base resins polymerized by microwave energy. J Prosthet Dent 72(6): 635-8.
- Wilson, E. G., Mandradjieff, M. and Brindock, T. 1990. Controversies in posterior composite resin restorations. Dent Clin North Am 34(1): 27-44.
- Xu, H. H., Schumacher, G. E., Eichmiller, F. C., Peterson, R. C., Antonucci, J. M. and Mueller, H. J. 2003. Continuous-fiber preform reinforcement of dental resin composite restorations. Dent Mater 19(6): 523-30.
- Yazdanie, N. and Mahood, M. 1985. Carbon fiber acrylic resin composite: an investigation of transverse strength. J Prosthet Dent 54(4): 543-7.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 15 แสดงการวิเคราะห์การแจกแจง (การกระจาย) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวาง

Tests of Normality

Acrylic resin	Time	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk			
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
No fiber	strength	7 days	.183	10	.200(*)	.885	10	.148
		30 days	.189	10	.200(*)	.896	10	.198
Add fiber without coupling agent	strength	7 days	.221	10	.181	.899	10	.216
		30 days	.223	10	.172	.938	10	.536
Add fiber with Monobond S	strength	7 days	.128	10	.200(*)	.935	10	.497
		30 days	.201	10	.200(*)	.916	10	.325
Add fiber with NDZ-201	strength	7 days	.222	10	.177	.889	10	.166
		30 days	.212	10	.200(*)	.920	10	.359

* This is a lower bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

ตารางที่ 16 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของความแข็งแรงดัดขวาง

Report

strength

Acrylic resin	Time	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
No fiber	7 days	10	78.9340	7.94150	63.49	87.00
	30 days	10	67.4027	6.10953	58.39	74.59
	Total	20	73.1683	9.08554	58.39	87.00
Add fiber without coupling agent	7 days	10	154.5362	9.39742	143.22	172.58
	30 days	10	137.5954	11.82609	113.21	154.82
	Total	20	146.0658	13.55003	113.21	172.58
Add fiber with Monobond S	7 days	10	184.2280	9.67018	168.57	196.26
	30 days	10	165.6064	11.87035	148.76	183.97
	Total	20	174.9172	14.22300	148.76	196.26
Add fiber with NDZ-201	7 days	10	166.5486	7.99445	157.61	179.86
	30 days	10	144.1540	9.73071	129.56	161.10
	Total	20	155.3513	14.39110	129.56	179.86

ตารางที่ 17 แสดงการทดสอบผลกระทบรวมของปัจจัยสารเชื่อมยึดและเวลาในการแช่น้ำด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA)

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: strength

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	14352.686(a)	5	2870.537	27.726	.000
Intercept	1512629.102	1	1512629.102	14610.47	.000
Fiber reinforced	8676.322	2	4338.161	41.902	.000
Acrylic resin					
Time	5598.356	1	5598.356	54.074	.000
Fiber reinforced	78.008	2	39.004	.377	.688
Acrylic resin * Time					
Error	5590.652	54	103.531		
Total	1532572.439	60			
Corrected Total	19943.337	59			

a R Squared = .720 (Adjusted R Squared = .694)

ตารางที่ 18 แสดงการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ด้วยการใช้การทดสอบแบบเลอวี้น (Levene's Test) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน

Test of Homogeneity of Variances

strength

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.359	3	36	.783

ตารางที่ 19 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน ด้วย
การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA)

strength

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	64543.315	3	21514.438	278.682	.000
Within Groups	2779.222	36	77.201		
Total	67322.537	39			

ตารางที่ 20 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน ด้วย
การเปรียบเทียบพหุคูณแบบเซฟเฟ (Scheffe multiple comparison)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: strength

Scheffe

(I) Acrylic resin add fiber	(J) Acrylic resin add fiber	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
No fiber	No coupling agent	-75.60225(*)	3.92939	.000	-87.1247	-64.0798
	Monobond S	-105.29405(*)	3.92939	.000	-116.8165	-93.7716
	NDZ-201	-87.61465(*)	3.92939	.000	-99.1371	-76.0922
No coupling agent	No fiber	75.60225(*)	3.92939	.000	64.0798	87.1247
	Monobond S	-29.69180(*)	3.92939	.000	-41.2142	-18.1694
	NDZ-201	-12.01240(*)	3.92939	.038	-23.5348	-.4900
Monobond S	No fiber	105.29405(*)	3.92939	.000	93.7716	116.8165
	No coupling agent	29.69180(*)	3.92939	.000	18.1694	41.2142
	NDZ-201	17.67940(*)	3.92939	.001	6.1570	29.2018
NDZ-201	No fiber	87.61465(*)	3.92939	.000	76.0922	99.1371
	No coupling agent	12.01240(*)	3.92939	.038	.4900	23.5348
	Monobond S	-17.67940(*)	3.92939	.001	-29.2018	-6.1570

* The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ 21 แสดงผลสรุปความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางในกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 7 วัน โดยจัดกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มเดียวกัน

Homogeneous Subsets
strength

Scheffe

Acrylic resin add fiber	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
No fiber	10	78.9340			
No coupling agent	10		154.5362		
NDZ-201	10			166.5486	
Monobond S	10				184.2280
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ 22 แสดงการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ด้วยการใช้การทดสอบแบบเลอวี (Levene's Test) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน

Test of Homogeneity of Variances
strength

Levene	df1	df2	Sig.
Statistic			
.950	3	36	.427

ตารางที่ 23 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน ด้วยการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA)

ANOVA
strength

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	54373.952	3	18124.651	175.637	.000
Within Groups	3714.974	36	103.194		
Total	58088.925	39			

ตารางที่ 24 แสดงการทดสอบข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน ด้วยการเปรียบเทียบพหุคูณแบบเซฟเฟ (Scheffe multiple comparison)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: strength

Scheffe

(I) Acrylic resin add fiber	(J) FRC	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Difference (I-J)	Lower Bound
No fiber	No coupling agent	-70.19270(*)	4.54299	.000	-83.5144	-56.8710
	Monobond S	-98.20370(*)	4.54299	.000	-111.5254	-84.8820
	NDZ-201	-76.75130(*)	4.54299	.000	-90.0730	-63.4296
No coupling agent	No fiber	70.19270(*)	4.54299	.000	56.8710	83.5144
	Monobond S	-28.01100(*)	4.54299	.000	-41.3327	-14.6893
	NDZ-201	-6.55860	4.54299	.561	-19.8803	6.7631
Monobond S	No fiber	98.20370(*)	4.54299	.000	84.8820	111.5254
	No coupling agent	28.01100(*)	4.54299	.000	14.6893	41.3327
	NDZ-201	21.45240(*)	4.54299	.001	8.1307	34.7741
NDZ-201	No fiber	76.75130(*)	4.54299	.000	63.4296	90.0730
	No coupling agent	6.55860	4.54299	.561	-6.7631	19.8803
	Monobond S	-21.45240(*)	4.54299	.001	-34.7741	-8.1307

* The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ 25 แสดงผลสรุปความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางในกลุ่มทดสอบที่แช่น้ำ 30 วัน โดยจัดกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มเดียวกัน

Homogeneous Subsets

strength

Scheffe

Acrylic resin add fiber	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
No fiber	10	67.4027		
No coupling agent	10		137.5954	
NDZ-201	10		144.1540	
Monobond S	10			165.6064
Sig.		1.000	.561	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่ไม่ได้เสริมเส้นใยแก้ว

Group Statistics					
		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error
Time		Mean			
strength	7 days	10	78.9340	7.94150	2.51132
	30 days	10	67.4027	6.10953	1.93200

ตารางที่ 27 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบที่ไม่ได้เสริมเส้นใยแก้ว ด้วยการทดสอบทีกรณีกกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)

Independent Samples Test											
		Levene's Test for Equality of Variances								t-test for Equality of Means	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Diff	95% Confidence Interval of the Difference		
									Lower	Upper	
strength	Equal variances assumed	.293	.595	3.639	18	.002	11.53125	3.16850	4.874481	8.18802	
	Equal variances not assumed			3.639	16.890	.002	11.53125	3.16850	4.842971	8.21953	

ตารางที่ 28 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้ว

Group Statistics					
		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error
Time		Mean			
strength	7 days	10	154.5362	9.39742	2.97172
	30 days	10	137.5954	11.82609	3.73974

ตารางที่ 29 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้ว ด้วยการทดสอบทีกรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Diff	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
strength	Equal variances assumed	.058	.813	3.547	18	.002	16.94080	4.77669	6.90534	26.97626
	Equal variances not assumed			3.547	17.126	.002	16.94080	4.77669	6.86851	27.01309

ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน

Group Statistics

	Time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
strength	7 days	10	184.2280	9.67018	3.05798
	30 days	10	165.6064	11.87035	3.75374

ตารางที่ 31 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลน ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Diff	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
strength	Equal	.397	.537	3.846	18	.001	18.62160	4.84167	8.44963	28.79357
	variances assumed			3.846	17.293	.001	18.62160	4.84167	8.41975	28.82345
	Equal									
	variances not assumed									

ตารางที่ 32 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททานิต

Group Statistics

	Time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
strength	7 days	10	166.5486	7.99445	2.52807
	30 days	10	144.1540	9.73071	3.07712

ตารางที่ 33 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไททาเนต ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน

(t-test)

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Diff	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
Strength	Equal	.275	.606	5.623	18	.000	22.39460	3.98244	14.02781	30.76139
	variances									
	assumed									
	Equal			5.623	17.347	.000	22.39460	3.98244	14.00517	30.78403
	variances									
	not									
	assumed									

ตารางที่ 34 แสดงการวิเคราะห์การแจกแจง (การกระจาย) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวาง
กลุ่มคอมโพสิตเรซิน

Tests of Normality

Composite resin	Time	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Add fiber with Monobond S	strength 7 days	.176	10	.200(*)	.898	10	.206

* This is a lower bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน

Group Statistics

Time		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
strength	Acrylic resin	10	184.2280	9.67018	3.05798
	Composite resin	10	176.3936	7.41678	2.34539

ตารางที่ 36 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน ด้วยการทดสอบทีกรณีกกลุ่ม

ตัวอย่างเป็นอิสระจากกัน (t-test)

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Diff	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
Strength	Equal variances assumed	.468	.503	2.033	18	.057	7.83440	3.85384	-.26222	15.93102
	Equal variances not assumed			2.033	16.866	.058	7.83440	3.85384	-.30140	15.97020

ตารางที่ 37 แสดงการวิเคราะห์การแจกแจง (การกระจาย) ของข้อมูลค่าเฉลี่ยมอดุลัสตัดขวางในกลุ่มคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้วใช้ร่วมกับสารเชื่อมยึดไซเลน

Tests of Normality								
Fiber reinforced Composite		Time	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
			Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Acrylic resin	modulus	7 days	.190	10	.200(*)	.893	10	.182
Composite resin		7 days	.202	10	.200(*)	.884	10	.144

* This is a lower bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

ตารางที่ 38 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมอดุลัสตัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน

Group Statistics					
Time		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
modulus	Acrylic resin	10	3115.4329	594.46083	187.98502
	Composite resin	10	3171.7126	935.91382	295.96194

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 39 แสดงการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยมอดูลัสตัดขวางของกลุ่มทดสอบเสริมเส้นใยแก้ว
 เพิ่มการยึดติดด้วยสารเชื่อมยึดไซเลนที่ผ่านการแช่น้ำ 7 วัน ด้วยการทดสอบที่กรณีกลุ่มตัวอย่างเป็น
 อิสระจากกัน (t-test)

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2- tailed)	Mean Difference	Std. Error Diff	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Strength	Equal variances assumed	2.828	.110	-.161	18	.874	-56.27970	350.61636	-792.89735	680.33795
	Equal variances not assumed			-.161	15.245	.875	-56.27970	350.61636	-802.55463	689.99523

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ประภาพร หอมจันทร์จีรัง เกิดที่ กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2523 สัญชาติ ไทย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต พ.ศ. 2547 จาก คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันทำงานเป็นพนักงานของมหาวิทยาลัย ตำแหน่ง อาจารย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัด พิษณุโลก ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 และได้ลาศึกษาต่อในหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย