ผลของวัสดุอัดแทรกต่อความแข็งผิวและการสึกของวัสดุผลิตซี่ฟันปลอม

นางสาว จตุพร ติยะพรัญชัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5209-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF FILLERS ON SURFACE HARDNESS AND WEAR OF ARTIFICIAL TOOTH MATERIALS

JATUPORN TIYAPARUNCHAI

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Sciences in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentristry

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5209-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของวัสดุอัดแทรกต่อความแข็งผิวและการสึกของวัสดุผลิตซี่ฟันปลอม
โดย	นางสาว จตุพร ติยะพรัญชัย
สาขาวิชา	ทันตกรรมประดิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สุรสิทธิ์ เกียรติพงษ์สาร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาตราจารย์ ทันตแพทย์ ศุภบูรณ์ บุรณเวช)

………………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล)

…………………………………………… กรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร. สุชิต พูลทอง)

…………………………………………… กรรมการ
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไพบูลย์ เตชะเลิศไพศาล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จตุพร ติยะพรัญชัย : ผลของวัสดุอัดแทรกต่อความแข็งผิวและการสึกของวัสดุผลิตซี่ฟันปลอม. (EFFECT OF FILLERS ON SURFACE HARDNESS AND WEAR OF ARTIFICIAL TOOTH MATERIALS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ทพ.ดร. ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล , 151 หน้า. ISBN 974-17-5209-1.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัสดุอัดแทรก 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และควอตซ์ ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนัก ต่อความแข็งผิว และความต้านทานการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน เปรียบเทียบกับซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด 4 ยี่ห้อ (Majordent, Cosmo HXL, Hard Pure และ Efucera–P® Simplerr) โดยมีชิ้นตัวอย่างกลุ่มละ 10 ชิ้น ทำการทดสอบความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ 5 ครั้งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง ด้วยแรง 500 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที แล้วทดสอบความต้านทานการสึกด้วยเครื่องแปรงระบบดิจิตอล ความเร็ว 70 รอบต่อนาที จำนวน 80,000 รอบ และคำนวณหามวลการสึก นำข้อมูลมาทดสอบทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว แล้วทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบ Dunnett's C สำหรับการทดสอบความแข็งผิว และแบบ Tamhane's T2 สำหรับการทดสอบความต้านการสึก ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าวัสดุอัดแทรกทั้งสามชนิดสามารถเพิ่มความแข็งผิวของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ และกลุ่ม ควอตซ์ร้อยละ 50 จะให้ผลดีที่สุด แต่น้อยกว่าซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure และ Efucera-P®Simplerr วัสดุอัดแทรกควอตซ์ปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณร้อยละ 20 สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ และมากกว่าซี่ฟันปลอมอะคริลิกทุกยี่ห้อ โดยกลุ่มควอตซ์ร้อยละ 50 จะให้ผลดีที่สุด นอกจากนี้ปริมาณวัสดุอัดแทรกมีผลต่อความแข็งผิว และความต้านทานการสึก โดยเมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นความแข็งผิวจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ความต้านทานการสึกจะลดลงยกเว้นกลุ่มควอตซ์ ขนาดของวัสดุอัดแทรกไม่มีผลต่อความแข็งผิวของโพลีเมทิลเมทาคริเลต แต่มีผลต่อความต้านทานการสึก โดยถ้าขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กลงความต้านทานการสึกจะยิ่งเพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจะแปรผกผันกันในกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรก ขณะที่ซี่ฟันปลอมอะคริลิกจะแปรผันตามกัน

ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..
ปีการศึกษา 2546

4476105332 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEY WORD: POLYMETHYL METHACRYLATE / FILLER / SURFACE HARDNESS / WEAR RESISTANCE

JATUPORN TIYAPARUNCHAI : EFFECT OF FILLERS ON SURFACE HARDNESS AND WEAR OF ARTIFICIAL TOOTH MATERIALS. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR DOCTOR PIYAWAT PHANKOSOL, 151 pp. ISBN 974-17-5209-1.

The objective of this research was to study the effect on surface hardness and wear resistance when adding three different fillers: Calcium carbonate (CaCO3), Kaolin, and Quartz, with a range of 10% to 50% by weight to a heat-cured clear Polymethyl methacrylate (PMMA). The results were compared against four commercial acrylic resin teeth (Majordent, Cosmo HXL, Hard Pure and Efucera–P® Simplerr). Each group of material consisted of 10 samples. Vickers Hardness Tests (500 gm. force and a duration of 15 seconds) were used for testing for 5 times each. The wear resistance tests using a V-8 cross brushing machine at 70 rpm were run 80,000 times. Then the worn mass was calculated. After they were analyzed with One-Way ANOVA, Multiple Comparison Dunnett's C was used to test the surface hardness and Tamhane's T2 was used to test the wear resistance at $P < 0.05$. The results demonstrated that all three fillers increased the hardness of PMMA. Fifty percent quartz filler yielded the highest hardness of all, but was lower than the hardness of Hard Pure and Efucera–P® Simplerr. It was noted that 10-50% quartz and 20% CaCo3 fillers appeared to enhance the wear resistance of PMMA above all 4 types of commercial acrylic resin teeth. Fifty percent quartz provided the best results. In addition, the amount of filler also affected surface hardness and wear resistance. The more filler added, the higher the surface hardness was whereas wear resistance started to decline except in the case of quartz filler. Even though there was no effect on surface hardness, the fillers' particle size, however, had an effect on the wear resistance in that the smaller the size of the particle the higher the wear resistance. For enhanced PMMA, the relationship between surface hardness and wear resistance was inverse in proportion while it was proportional in commercial acrylic resin teeth.

Department Prosthodontics Student's……………………………………………

Field of study Prosthodontics Advisor's……………………………………………..

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เลย ถ้าปราศจากความช่วยเหลือและความดูแลเอาใจใส่ของ รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทำให้การดำเนินการในขั้นตอนต่างๆมีความสะดวกราบรื่นและมีประสิทธิภาพตลอดการทำงานในครั้งนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาทางด้านสถิติในการวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัทเดนท์สพลาย (ประเทศไทย จำกัด) ที่ได้เอื้อเฟื้อซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Cosmo HXL ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอเชียเด้นท์ ที่ได้เอื้อเฟื้อซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure และบริษัทเด็นตัล วิชั่น จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Efucera-P® Simplerr และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ ศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก และหน่วยงานปฏิบัติการทันตกรรม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

จตุพร ติยะพรัญชัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่ หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..........ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..........จ

กิตติกรรมประกาศ..........ฉ

สารบัญ..........ช

สารบัญตาราง..........ฌ

สารบัญภาพ..........ฏ

บทที่

1. บทนำ..........1

  ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..........1

  วัตถุประสงค์ของการวิจัย..........1

  คำถามของการวิจัย..........2

  สมมติฐานของการวิจัย..........2

  ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย..........2

  ข้อตกลงเบื้องต้น..........3

  ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..........3

  วิธีดำเนินการวิจัย..........3

  ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย..........4

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

  แนวคิดและทฤษฎี..........5

  โพลีเมอร์..........8

  โพลีเมทิลเมทาคริเลต..........18

  การสึก..........26

  การวัดความแข็ง..........29

  วัสดุอัดแทรก..........35

  เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..........45

3. วิธีดำเนินการวิจัย

  ประชากร..........48

  วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..........51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย......51

วิธีการทดสอบความแข็งผิว......52

วิธีการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี......66

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบความแข็งผิว......73

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี......79

5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายวัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง......84

อภิปรายผลการวิจัย......90

สรุปผลการวิจัย......97

ข้อเสนอแนะ......98

รายการอ้างอิง......99

ภาคผนวก......104

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์......151

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการวัดความแข็งด้วยวิธีต่างๆ.....................................34

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณของผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต วัสดุอัดแทรก และโมโนเมอร์ ตามเปอร์เซ็นต์ของวัสดุอัดแทรก...58

ตารางที่ 3 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มที่ 0-19 ในการทดสอบความแข็งผิว..74

ตารางที่ 4 แสดงการเรียงลำดับค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบจากน้อยไปหามาก........75

ตารางที่ 5 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มที่ 0-19 ในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขีดสี...79

ตารางที่ 6 แสดงการเรียงลำดับค่ามวลการสึกเฉลี่ยจากน้อยไปหามาก...............................80

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของซี่ฟันปลอมอะคริลิก 16 ยี่ห้อ เรียงลำดับจากน้อยไปมาก..85

ตารางที่ 8 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบความแข็งผิว เมื่อเติมวัสดุอัดแทรกชนิดต่างๆ..105

ตารางที่ 9 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว...............106

ตารางที่ 10 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของข้อมูล ในการทดสอบความแข็งผิว..110

ตารางที่ 11 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่ม ในการทดสอบความแข็งผิว..110

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว................111

ตารางที่ 13 แสดงการทดสอบความมีอิทธิพลระหว่างตัวแปรในการทดสอบความแข็งผิว.......121

ตารางที่ 14 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบความต้านทานการสึก จากการขัดสีเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกชนิดต่างๆ 122

ตารางที่ 15 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูล ในการทดสอบความต้านทานการสึก...123

ตารางที่ 16 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของข้อมูล ในการทดสอบความต้านทานการสึก...127

ตารางที่ 17 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่ม ในการทดสอบความต้านทานการสึก...128

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก.....128

ตารางที่ 19 แสดงการทดสอบความมีอิทธิพลระหว่างตัวแปร ในการทดสอบความต้านทานการสึก......138

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความแข็งผิวของกลุ่มที่ 0-19......139

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี ของกลุ่มควบคุม......141

ตารางที่ 22 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 1 ($CaCO_3$ 10 %)......141

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 2 ($CaCO_3$ 20 %)......142

ตารางที่ 24 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 3 $CaCO_3$ 30 %)......142

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 4 ($CaCO_3$ 40 %)......143

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 5 ($CaCO_3$ 50 %)......143

ตารางที่ 27 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 6 (Kaolin 10 %)......144

ตารางที่ 28 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 7 (Kaolin 20 %)......144

ตารางที่ 29 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 8 (Kaolin 30 %)......145

ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 9 (Kaolin 40 %)......145

ตารางที่ 31 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 10 (Kaolin 50 %)......146

ตารางที่ 32 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 11 (Quartz 10 %)......146

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

ตารางที่ 33 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 12 Quartz 20 %)......147

ตารางที่ 34 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 13 (Quartz 30 %)......147

ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 14 (Quartz 40 %)......148

ตารางที่ 36 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 15 (Quartz 50 %)......148

ตารางที่ 37 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 16 (Majordent)......149

ตารางที่ 38 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 17 (Cosmo HXL)......149

ตารางที่ 39 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 18 (Hard Pure)......150

ตารางที่ 40 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 19 (Efucera-P®Simplerr)......150

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของโพลีเมอร์……………………………………………10

รูปที่ 2 แสดงปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบขั้น…………………………………12

รูปที่ 3 แสดงสูตรโครงสร้างของโพลีเมทิลเมทาคริเลต…………………………………………...18

รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างของเมทิลเมทาคริเลต…………………………………………………….20

รูปที่ 5 แสดงขบวนการเกิดการสึก……………………………………………………………..29

รูปที่ 6 แสดงลักษณะรอยกดวิกเกอร์…………………………………………………………33

รูปที่ 7 แสดงภาพแม่แบบทองเหลืองที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นตัวอย่าง……………………………..53

รูปที่ 8 แสดงภาพแม่แบบทองเหลืองยึดกับแผ่นกระจกใส และขี้ผึ้งสีงาช้าง…………………….53

รูปที่ 9 แสดงส่วนประกอบของภาชนะหล่อแบบฟันปลอมทองเหลือง…………………………...54

รูปที่ 10 แสดงภาพเครื่องผสมสุญญากาศ……………………………………………………55

รูปที่ 11 แสดงภาพการลงฟลาสก์แม่แบบทองเหลือง
ในภาชนะหล่อแบบฟันปลอมทองเหลือง……………………………………………55

รูปที่ 12 แสดงภาพเครื่องอัดฟลาสก์ไฮโดรลิก………………………………………………56

รูปที่ 13 แสดงภาพเครื่องกำจัดขี้ผึ้ง…………………………………………………………57

รูปที่ 14 แสดงภาพฟลาสก์ส่วนครึ่งบน และ ล่างหลังลงฟลาสก์เสร็จ…………………………...57

รูปที่ 15 แสดงภาพลักษณะผงโพลีเมทิลเมทาคริเลตและวัสดุอัดแทรก………………………58

รูปที่ 16 แสดงภาพเครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอล……………………………………………58

รูปที่ 17 แสดงภาพเครื่องบ่ม เรซิน อะคริลิก……………………………………………………...59

รูปที่ 18 แสดงชิ้นเรซิน อะคริลิกที่ได้หลังบ่ม มีลักษณะเรียบมันและไม่มีรูพรุน………………...60

รูปที่ 19 แสดงชิ้นเรซิน อะคริลิก ขนาด 5 x 8 มิลลิเมตร หลังตัดด้วยเครื่องตัดฟัน……………...60

รูปที่ 20 แสดงภาพเครื่องตัดฟัน…………………………………………………………………61

รูปที่ 21 แสดงแม่พิมพ์พลาสติกสำหรับทำฐานยึดชิ้นตัวอย่าง…………………………………..61

รูปที่ 22 แสดงชิ้นตัวอย่างโพลีเมทิลเมทาคริเลต หลังทำฐานยึดด้วยเรซินหล่อใส……………...62

รูปที่ 23 แสดงภาพซี่ฟันปลอมอะคริลิกหลัง 4 ยี่ห้อ……………………………………………...62

รูปที่ 24 แสดงซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ หลังฝังในท่อน้ำพลาสติกพีวีซี ด้วยอะครอลิก เรซิน
ชนิดที่ใช้ทำถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล……………………………………………...63

รูปที่ 25 แสดงภาพเครื่องขัดผิววัสดุระบบดิจิตอล………………………………………………63

รูปที่ 26 แสดงชิ้นตัวอย่างซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ หลังขัดด้วยหัวสักหลาด…………………64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 27 แสดงภาพเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง……………………………..65
รูปที่ 28 แสดงภาพเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค……………………………………..65
รูปที่ 29 แสดงภาพซี่ฟันปลอมอะคริลิกหน้า 4 ยี่ห้อ………………………………………..67
รูปที่ 30 แสดงชิ้นตัวอย่างซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ หลังทำฐานยึดด้วยเรซินหล่อใส………..67
รูปที่ 31 แสดงแปรงสีฟันที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี………………..68
รูปที่ 32 แสดงภาพเครื่องควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่าในแนวราบ……………………………….69
รูปที่ 33 แสดงภาพเครื่องแปรงระบบดิจิตอล…………………………………………………….70
รูปที่ 34 แสดงการยึดชิ้นตัวอย่างและแปรงสีฟันเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอล………………70
รูปที่ 35 แสดงภาพขณะแปรงชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องแปรงระบบดิจิตอล………………………..71
รูปที่ 36 แสดงภาพเครื่องกวนแบบแตกตัว……………………………………………………….71
รูปที่ 37 แสดงภาพเครื่องวัดปริมาณความตึง..…………………………………………………..71
รูปที่ 38 แสดงการตั้งค่าความตึงของแปรงสีฟันต่อชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวัดปริมาณความตึง….72
รูปที่ 39 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยตามชนิด และ ปริมาณของวัสดุอัดแทรก
เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ…….……………………77
รูปที่ 40 แผนภูมิแท่งแสดงค่ามวลการสึกเฉลี่ยตามชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรก
เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ…………………………..82
รูปที่ 41 แสดงลักษณะการแบ่งชั้นต่างๆของซี่ฟันปลอมอะคริลิก……………………………….86
รูปที่ 42 แสดงภาพรอยกดของกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ได้จากการทดสอบความแข็งผิว
ด้วยเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค………………………………………………….89
รูปที่ 43 แสดงภาพถ่ายอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด…………………92
รูปที่ 44 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังแปรงของกลุ่มควบคุม และ
กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า……………….94

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซี่ฟันปลอมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญองค์ส่วนหนึ่งในฟันปลอมถอดได้ ทั้งชนิดฟันปลอมบางส่วนถอดได้ (Removable partial denture) หรือฟันปลอมทั้งปาก (Complete denture) เพื่อใช้ทดแทนฟันธรรมชาติของผู้ป่วยที่สูญเสียไปไม่ว่าจะมีสาเหตุมาจาก ฟันผุ โรคปริทันต์ อุบัติเหตุ หรือจากพยาธิสภาพต่าง ๆ ที่เกิดภายในช่องปาก โดยทั่วไปซี่ฟันปลอมจะหมายถึงซี่ฟันประดิษฐ์สำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิตทั้งฟันบนและฟันล่างเป็นชุด ๆ แต่ละชุดมี รูปร่าง ขนาด และ สี แตกต่างกัน เพื่อให้ทันตแพทย์สามารถเลือกซี่ฟันปลอมที่เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละบุคคลได้ แต่เนื่องจากปัจจุบันมีการศึกษาถึงวัสดุสำหรับประดิษฐ์ซี่ฟันปลอมในประเทศไทยอยู่น้อย จึงได้จัดทำโครงการวิจัย เพื่อหาวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตซี่ฟันปลอมที่มีประสิทธิภาพดีกว่า หรือใกล้เคียงกับซี่ฟันปลอมที่มีขายในท้องตลาด โดยวัสดุที่เลือกใช้นั้นจะต้องใช้ได้ง่ายสามารถลอกเลียนรายละเอียดของฟันธรรมชาติให้มีลักษณะทางกายวิภาคที่ถูกต้อง ไม่เป็นพิษ ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก ยึดติดกับฐานฟันปลอมได้ดี และที่สำคัญจะต้องหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตซี่ฟันปลอมขึ้นใช้เองภายในประเทศ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่สามารถเพิ่มความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ผลิตซี่ฟันปลอม
2. ศึกษาผลของวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิด ต่อความแข็งผิวและความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน

คำถามของการวิจัย

ชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิวและคุณสมบัติในความต้านทานต่อการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอม

สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานว่าง : ชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรก มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิว และ คุณสมบัติในการต้านทานต่อการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอม

สมมติฐานแย้ง : ชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรก ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิว และ คุณสมบัติในการต้านทานต่อการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอม

ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีชนิดของวัสดุอัดแทรกและจำนวนชิ้นทดสอบน้อย ทำให้ผลการทดสอบที่ได้อาจไม่ครอบคลุมแนวโน้มของวัสดุอัดแทรกทั้งหมด อีกทั้งยังเป็นการทดลองเชิงปฏิบัติการที่มีสภาวะแวดล้อมแตกต่างไปจากสภาวะภายในช่องปาก จึงไม่สามารถนำผลการทดสอบที่ได้มาอ้างอิงถึงประสิทธิภาพของวัสดุนี้ในสิ่งมีชีวิตได้โดยสมบูรณ์ หากต้องการทราบผลที่แน่นอนควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติของวัสดุภายใต้สภาวะภายในช่องปากต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบของแต่ละยี่ห้อ จะต้องมีขนาดเท่ากัน และผลิตคราวเดียวกัน โดยไม่จำกัดสีของแต่ละยี่ห้อ
2. การสร้างชิ้นงาน และการทดลองในทุกขั้นตอนจะกระทำโดยบุคคลคนเดียวตลอดทั้งงานวิจัย
3. ในการวิจัยครั้งนี้ จะใช้อุปกรณ์และเครื่องมือเดียวกันตลอดการดำเนินงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่สามารถเพิ่มความแข็งผิว และคุณสมบัติในการต้านทานต่อการสึกของพลาสติกที่นำมาใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอมได้อย่างเหมาะสม
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตซี่ฟันปลอมขึ้นใช้เองภายในประเทศ
3. เป็นแนวทางในการเลือกใช้ซี่ฟันปลอมของทันตแพทย์เพื่อสร้างชิ้นฟันปลอมให้กับผู้ป่วยที่สูญเสียฟันธรรมชาติไปเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยในการศึกษานี้ จะทำการทดสอบ 2 การทดสอบ คือ การทดสอบความแข็งผิว และ การทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี โดยแต่ละการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 20 กลุ่ม ตามชนิด และ ปริมาณวัสดุอัดแทรก 3 ชนิด ที่เติมลงในโพลีเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และ ควอตซ์ ในปริมาณร้อยละ 10, 20 , 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ไม่ได้เติมวัสดุอัดแทรกชนิดใดๆเลย และซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด 4 ยี่ห้อ ได้แก่ Majordent, Cosmo HXL, Hard Pure และ Efucera – P® Simplerr โดยในแต่ละกลุ่มการทดสอบจะมีชิ้นตัวอย่างกลุ่มละ 10 ชิ้น เพื่อหาชนิด และ ปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเติมในโพลีเมทิลเมทาคริเลตเพื่อประดิษฐ์ซี่ฟันปลอมอะคริลิก

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นสองส่วนตามการทดสอบ คือ ส่วนแรกจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแข็งผิว และสำหรับส่วนที่สองจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี โดยทั้งสองส่วนจะมีลำดับขั้นตอนในการนำเสนอเหมือนกัน คือ ลำดับแรกจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาของกลุ่มทดสอบแต่ละกลุ่มในรูปของตาราง จากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาเรียงลำดับจากน้อยไปหามากในรูปแบบตาราง และนำเสนอแผนภูมิแท่ง เพื่อหากลุ่มทดสอบที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทั้งสองของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และ กลุ่มทดสอบที่เป็นซี่ฟันปลอม อะคริลิกทั้งสี่ยี่ห้อ จากนั้นจึงนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) แล้วจึงสรุปผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ได้ของแต่ละกลุ่ม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

พลาสติกถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางทันตกรรมอย่างมากมายในช่วง 67 ปีที่ผ่านมา โดยในระยะแรกราวปี ค.ศ. 1937 ได้มีการนำเอาวัลคะไนท์ (vulcanite) เซลลูโลส ไนเตรท (cellulose nitrate) ฟีนอล ฟอร์มาล์ดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) และ ไวนิล เรซิน (vinyl resins) มาใช้ในการทำวัสดุฐานฟันปลอม แต่ขบวนการผลิตก็ยังไม่สามารถผลิตพลาสติกที่มีคุณสมบัติที่เป็นที่พอใจตามความต้องการทางทันตกรรมได้ ซึ่งคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการของพลาสติกทางทันตกรรม ได้แก่ มีความแข็งแรงเพียงพอ สามารถยืดหยุ่นได้ และมีความต้านทานต่อแรงกระแทกจากการเคี้ยว และการขัดสี ไม่เปลี่ยนแปลงมิติ ในสภาวะต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และแรงที่มากระทำ มีความใส หรือโปร่งแสง เพื่อที่จะสามารถเลียนแบบอวัยวะหรือเนื้อเยื่อในช่องปากที่ต้องการทดแทนได้ มีสีที่สวย และคงทนหลังจากนำมาประดิษฐ์เป็นฟันปลอมแล้ว มีความต้านทานต่อของเหลวภายในช่องปาก สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อในช่องปากได้ดี มีขบวนการประดิษฐ์เป็นชิ้นฟันปลอมที่ง่าย และ ไม่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองที่เป็นอันตราย มีราคาที่ถูก และไม่ต้องการเครื่องมือที่ยุ่งยาก ราคาแพงในการผลิต (Brauer, 1966; Anusavice, 1996)

ต่อมาได้มีการพัฒนานำเอาพลาสติกมาใช้ประโยชน์นอกเหนือจากการทำ วัสดุฐานฟันปลอมอย่างกว้างขวาง เช่น นำมาทำเป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิก วัสดุบุฐานฟันปลอม วัสดุซ่อมฟันปลอม วัสดุอุดฟันหน้า ซิเมนท์ เฝือกฟันในทันตกรรมจัดฟัน วัสดุทำถาดพิมพ์ปาก เป็นต้น และคาดหวังว่าในอนาคตจะสามารถนำเอาพลาสติกมาใช้ประโยชน์อื่นๆทางทันตกรรมได้กว้างขวางยิ่งขึ้น (Brauer,1966; Anusavice, 1996)

จากการสำรวจในปี ค.ศ. 1959 เกี่ยวกับการทำงานทางทันตกรรมของทันตแพทย์ทั่วไปในประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงระยะเวลาหนึ่งปี พบว่ามีการทำฟันปลอมทั้งปากให้กับผู้ป่วยจำนวน 5.6 ล้านชิ้น ฟันปลอมถอดได้บางส่วน 3.7 ล้านชิ้น และมีการอุดฟัน 166 ล้านตำแหน่ง และอีกการสำรวจในปีเดียวกันพบว่ามีประชากรที่มีอายุมากกว่า 21 ปีใส่ฟันปลอมถึงร้อยละ 50 ของ

ประชากรทั้งหมด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการบริโภคพลาสติกทางทันตกรรมของมนุษย์จะมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในอนาคต (Bureau of Economic Research and Statistic, ADA,1961)

McCabe (1990) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติตามอุดมคติที่ต้องการของซี่ฟันปลอมไว้ดังนี้ คือ ต้องมีความสวยงาม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุด โดยซี่ฟันปลอมจะต้องไม่สามารถหาข้อแตกต่างจากซี่ฟันธรรมชาติได้ไม่ว่าจะเป็นรูปร่าง สี และความใส ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำซี่ฟันปลอมจะต้องสามารถทำให้มีความหลากหลายของสี และความใสได้ตั้งแต่ปลายฟันจนถึงบริเวณเหงือก ต้องสามารถยึดได้ดีกับฐานฟันปลอม ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำซี่ฟันปลอมและฐานฟันปลอมจะต้องเข้ากันได้ดี ต้องมีความหนาแน่นต่ำ เพื่อให้ฟันปลอมมีน้ำหนักเบา ต้องมีความแข็งแรงและเหนียวเพียงพอที่จะต้านทานต่อการแตกหักได้ง่าย ต้องมีความแข็งผิวเพียงพอที่จะต้านทานต่อแรงขัดสีภายในช่องปากและขณะทำความสะอาด แต่ก็ต้องสามารถกรอปรับแต่งการสบฟันได้ด้วยหัวกรอทางทันตกรรม

วัสดุที่ใช้ผลิตซี่ฟันปลอมในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ (Lindquist และคณะ, 1995) ได้แก่ ซี่ฟันปลอมเรซิน อะคริลิก ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติ (unimproved acrylic resin) ซี่ฟันปลอมเรซิน อะคริลิก ที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติ (modified improved resin) และซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน

ซึ่งซี่ฟันปลอมแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป โดยซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติ จะมีความต้านทานการอัด (Impact resistance) สูงกว่าซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน ทำให้ไม่เกิดความกระทบกระเทือนต่อเนื้อเยื่อใต้ฐานฟันปลอม เหนียวไม่แตกหักง่ายและยึดกับวัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกได้ดีด้วยพันธะทางเคมี กรอปรับต่างได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือง่ายต่อการติดสีและดูดกลิ่น ที่สำคัญที่สุดคือไม่ทนเปลวไฟและสารละลาย ทำให้มีการทำลายของพื้นผิวและลานตัว (crazing) ง่ายส่งผลให้มีความต้านทานต่อการขัดสีต่ำ (Cornell และคณะ, 1957) และมีอัตราการสึกค่อนข้างเร็ว ดังนั้นในระยะหลังบริษัทผู้ผลิตจึงได้ผลิตซี่ฟันปลอมอะคริลิก ที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติหลายประการ ซึ่งทำให้ซี่ฟันปลอมมีความแข็งและต้านทานต่อการขัดสีได้ดีขึ้น ส่วนซี่ฟันปลอมพอร์ซเลนนั้นจะมีความสามารถในการต้านทานต่อการขัดสีได้ดีกว่า ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงสี แข็งแต่เปราะและแตกหักได้ง่าย ทำให้คู่สบไม่ว่าจะเป็นผิวเคลือบฟัน ทอง หรือ อะคริลิกสึกได้ ไม่ยึดกับวัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำร่องยึดด้านใต้ของซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน เพื่อเพิ่มการยึดอยู่ของซี่ฟันปลอมพอร์ซเลนกับฐานฟันปลอมอะคริลิก และเนื่องจากซี่ฟันปลอมพอร์ซเลนมีความแข็งผิวมากทำให้ยากต่อการกรอปรับแต่งด้วยเครื่องมือทางทันตกรรม และก่อให้เกิดเสียงเวลาผู้ป่วยเคี้ยว (clicking sound) (Dentist’s desk reference, ADA,1983; Whitman และคณะ, 1987; Ekfeldt และ Qilo,1989;

Winkler และคณะ, 1992; Hirano และคณะ, 1998; Kawano และคณะ, 2002) นอกจากวัสดุที่ใช้ผลิตซี่ฟันปลอมทั้ง 3 ชนิดนี้แล้ว เดิมเคยมีการใช้โลหะผสมในการทำซี่ฟันปลอมเช่นกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดีแต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับทางด้านความสวยงาม และวิธีการผลิตยุ่งยากและใช้เวลานาน ทำให้ไม่นิยมใช้วัสดุชนิดนี้ในการทำซี่ฟันปลอมในปัจจุบัน (Suzuki, Sakoh และ Shiba, 1990)

จากการสำรวจการเลือกใช้ซี่ฟันปลอมของทันตแพทย์ ชี้ให้เห็นว่าทันตแพทย์มากกว่าร้อยละ 90 เคยใช้หรือใช้ซี่ฟันปลอมอะคริลิกอยู่ โดยหนึ่งในสิบของทันตแพทย์เหล่านี้จะเลือกใช้ซี่ฟันปลอมอะคริลิกเฉพาะในบางกรณี และที่เหลือจะใช้ในทุกกรณี โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการซี่ฟันที่สั้นมากๆ (Sweeny และคณะ, 1958) ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical properties) ที่เด่นหลายประการของซี่ฟันปลอมอะคริลิก นอกจากนี้ Schultz (1951) ยังพบว่าผู้ป่วยส่วนใหญ่ชื่นชอบฟันปลอมที่ทำจากซี่ฟันปลอมอะคริลิกมากกว่า ทำให้ซี่ฟันปลอมอะคริลิกยังคงเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างฟันปลอมมากที่สุดในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาทางคลินิกที่สำคัญที่สุดของการเลือกใช้ซี่ฟันปลอมอะคริลิก คือ มีความต้านทานต่อการสึกต่ำ และสูญเสียความสามารถของซี่ฟันปลอมในการคงความสัมพันธ์ของการสบฟันที่ดีไป (Hirano และคณะ, 1998) โดยเฉพาะในฟันหลังจะมีอัตราการสึกเร็วกว่าฟันหน้าซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์ของการสบฟันที่ผิดปกติ สูญเสียมิติในแนวดิ่งของใบหน้า (Vertical dimension) ความสามารถในการบดเคี้ยวลดลง และเกิดความเค้นในแนวนอนอย่างมากบนเยื่อเมือก (oral mucosa) และสันกระดูกใต้ฐานฟันปลอมโดยเฉพาะบริเวณด้านหน้า (anterior alveolar ridges) เป็นผลให้เกิดการสูญเสียความสูงของสันกระดูกบริเวณนี้และมีอิทธิพลต่อความสวยงามในการใส่ฟันปลอมด้วย (Whitman และคณะ,1987; Ekfeldt และ Qilo,1989; Winkler และคณะ,1992; Lindquist และคณะ,1995)

ในการสังเคราะห์พลาสติกเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ทางทันตกรรม จะต้องได้รับการยอมรับถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความเสถียรทางเคมี หรือมิติ มีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการสังเคราะห์ และต้องมีความแข็งแรง ไม่เปราะ สำหรับการเลือกชนิดของพลาสติกที่จะนำมาทำซี่ฟันปลอมอะคริลิก นอกจากคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว ความสวยงามก็เป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอย่างมากในการเลือกชนิดของพลาสติก ซึ่งจะต้องมีความใส สามารถย้อมสีได้ อีกทั้งยังต้องสามารถให้การยึดแน่นทางเคมีอย่างดีกับวัสดุฐานฟันปลอมอีกด้วย

ดังนั้นการศึกษาถึงทฤษฎีของโพลีเมอร์ไม่ว่าจะเป็นในแง่ประวัติความเป็นมา ส่วนประกอบและคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโพลีเมอร์ จะนำไปสู่ข้อสรุปผลการวิจัยถึงกระแสการใช้โพลีเมอร์ในการทำซี่ฟันปลอมอะคริลิก เพื่อใช้ในการประดิษฐ์ฟันปลอมที่มีประสิทธิภาพ

สูงสุด และอาจเป็นแนวทางในการประดิษฐ์ซี่ฟันปลอมอะคริลิกขึ้นใช้เองภายในประเทศในอนาคต

<u>โพลีเมอร์</u> (Polymer)

ชื่อพ้อง ยางสังเคราะห์ (synthetic resins)

พลาสติก (plastics)

พลาสติก เป็นชื่อกว้าง ๆ ที่ให้เรียกสารประกอบอินทรีย์บางชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ แต่ก็พบตามธรรมชาติ มีคุณสมบัติแผ่หรือยืดตัวได้ สามารถหลอมหรือทำให้อ่อนตัว เพื่อทำเป็นแผ่น เส้น หรือประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ ปัจจุบันพลาสติกมีมากมายหลายชนิด นับวันจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นและเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรามากยิ่งขึ้น

โพลีเมอร์เป็นศัพท์ที่ได้จาก poly แปลว่า มาก กับ mers แปลว่า หน่วย ดังนั้น โพลีเมอร์จึงเป็นสารที่เกิดจากการรวมของหน่วยเล็กๆ ของสารประกอบอินทรีย์จำนวนมากเข้าด้วยกัน กลายเป็นก้อนมหโมเลกุล (macromolecule)

ส่วนหน่วยเคมีเล็ก ๆ ที่ประกอบเป็นโพลีเมอร์นั้น เรียกว่า โมโนเมอร์ (monomers) สำหรับโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 ขึ้นไป เรียกว่า ไฮโพลีเมอร์ (high polymers) (เจน รัตนไพศาล, 2533)

ก. รูปโครงสร้างของโพลีเมอร์ โมเลกุล (Structure shape of polymer molecules)

1. โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของโพลีเมอร์มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ

1.1. โพลีเมอร์ชนิดเส้น (Linear polymers) เกิดจากโมโนเมอร์เชื่อมเป็นเส้นยาวโดยส่วนปลายมาต่อกันเป็นสายโซ่โพลีเมอร์ แบ่งเป็น

1.1.1. โพลีเมอร์ชนิดเดียวแบบเส้น (Linear homopolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวเรียงตัวเป็นเส้นยาว

1.1.2. โพลีเมอร์ร่วมแบบเส้น (Linear copolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ต่างชนิดกันเรียงตัวในรูปแบบสลับ แบบกลุ่ม หรือแบบสุ่ม (Linear alternating copolymer, Linear block copolymer, Linear random copolymer)

1.2. โพลีเมอร์ชนิดกิ่ง (Branched polymers) เกิดจากโมโนเมอร์เส้นหนึ่งต่อเป็นกิ่งกับโมโนเมอร์อีกเส้นหนึ่ง มีคุณสมบัติบางอย่างดีกว่าชนิดเส้น แบ่งเป็น

1.2.1. โพลีเมอร์ชนิดเดียวแบบกิ่ง (Branched homopolymer) ประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวเรียงตัวกันเป็นกิ่ง

1.2.2. โพลีเมอร์ร่วมแบบกิ่ง จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ต่างชนิดกันเรียงตัวเป็นโครงสร้างแบบกิ่งในรูปแบบสลับ (Branched random copolymer) หรือแบบกราฟ (Graft-branched copolymer) โดยแบบกราฟจะประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดหนึ่งเรียงตัวเป็นสายหลัก และมีโมโนเมอร์อีกชนิดหนึ่งเรียงตัวเป็นกิ่งต่อจากสายหลัก

1.3. โพลีเมอร์ชนิดเชื่อมไขว้ (Crosslinked polymers) เป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างสามมิติ หรือเชื่อมเป็นตาข่าย ได้จากโพลีเมอร์กิ่งเส้นหนึ่งต่อกับโพลีเมอร์กิ่งอีกเส้นหนึ่ง โพลีเมอร์ชนิดเชื่อมไขว้มีคุณสมบัติบางอย่างดีกว่าชนิดเส้นและชนิดกิ่ง

2. โครงสร้างของโพลีเมอร์ร่วม แบ่งออกเป็น 3 แบบ อาศัยการเรียงตัวของหน่วยโมโนเมอร์

2.1. แบบสลับ (alternating copolymer) ประกอบด้วยหน่วยโมโนเมอร์ต่างชนิดเรียงตัวสลับกัน

ABABABABABABABABABABABAB

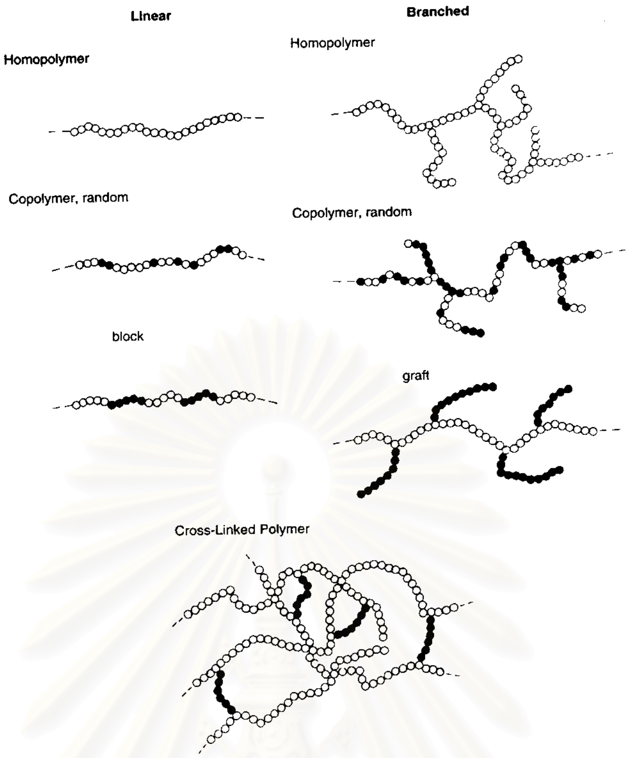
2.2. แบบกลุ่ม (block copolymer) ประกอบด้วยหน่วยโมโนเมอร์ต่างชนิดเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม

AAAAAABBBBBAAAAAABBBBBBB

2.3. แบบสุ่ม (random copolymer) ประกอบด้วยหน่วยโมโนเมอร์ต่างชนิดเรียงตัวคละกันไม่เป็นระเบียบ

AAABBBABBAABAAABBBBABABB

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของโพลีเมอร์ (Craig และ Powers, 2002)

ข. น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์

น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ต่ำ ๆ เป็นของเหลว และจะข้นจนกระทั่งแข็งเมื่อค่าสูงขึ้นตามลำดับ ดังนั้นการหาค่าของน้ำหนักโมเลกุลช่วยในการสังเคราะห์และนำไปประยุกต์ให้เหมาะสมกับงาน

เนื่องจากโพลีเมอร์แต่ละเส้นมีความยาวไม่เท่ากัน จึงต้องหาค่าเป็นน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) ที่ใช้กันทั่วไปมี 2 วิธี ค่าที่ได้ของแต่ละวิธีไม่เท่ากันแต่ใกล้เคียงกัน

วิธีที่ 1 หาจากจำนวนโมโนเมอร์เฉลี่ยของแต่ละโมเลกุลโพลีเมอร์ (number average molecular weight) โดยคำนวณจากสูตร

$$\overline{M}_n = M_0 \overline{x}_n$$

โดย M_0 คือ น้ำหนักโมเลกุลของโครงสร้างโมโนเมอร์หนึ่งหน่วย และ $\overline{x}_n$ คือ จำนวนเฉลี่ยของการเกิดโพลีเมอไรเซชัน (number average degree of polymerization) ซึ่งหาได้จาก จำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมด หารด้วย จำนวนโมเลกุลโพลีเมอร์ทั้งหมด

วิธีที่ 2 หาจากน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของการเกิดโพลีเมอไรเซชัน (weight average molecular weight) โดยคำนวณจากสูตร

$$\overline{M}_w = M_0 \overline{x}_w$$

โดย $\overline{x}_w$ คือ น้ำหนักเฉลี่ยของการเกิดโพลีเมอไรเซชัน (weight average degree of polymerization) ซึ่งหาได้จากน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่าง หารด้วยจำนวนโมล (moles) ที่มีอยู่

น้ำหนักโมเลกุลที่พบทางทันตกรรมมีได้ตั้งแต่ 8,000-39,000 ยังมีพบรายงานว่ามีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยถึง 600,000 สำหรับซี่ฟันพลาสติกที่มีโครงสร้างชนิดเชื่อมขวาง มักจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง

อัตราส่วนระหว่าง $\overline{M}_w$: $\overline{M}_n$ เรียกว่า โพลีดิสเพอร์ซิตี้ (polydispersity) ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการหาขอบเขตการกระจายขนาดโมเลกุลของโพลีเมอร์ ถ้าอัตราส่วนระหว่าง $\overline{M}_w$: $\overline{M}_n$ มีค่ามากนั่นหมายความว่าขอบเขตการกระจายของขนาดโมเลกุลกว้าง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าเท่ากับ 1 จะหมายความว่าโมเลกุลโพลีเมอร์ทุกโมเลกุลมีน้ำหนักเท่ากัน และไม่มีการกระจายตัวของขนาดโมเลกุล (เจน รัตนไพศาล, 2533; Anusavice, 1996)

ค. กลไกของโพลีเมอไรเซชัน (Polymerization mechanism)

เมื่อโมโนเมอร์ทำปฏิกิริยาต่อกันกลายเป็นสายโซ่โพลีเมอร์ เรียกปฏิกิริยานั้นว่า โพลีเมอไรเซชัน (polymerization) ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ โพลีเมอไรเซชันแบบขั้น หรือ ควบแน่น และ โพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ หรือ รวมตัว

1. โพลีเมอไรเซชันแบบขั้น หรือ ควบแน่น (step growth or condensation polymerization) โดยหลังจากเกิดโพลีเมอไรเซชัน จะมีโมเลกุลเล็กๆ เชิงเดียวเกิดขึ้น (by product) เช่น น้ำ แอมโมเนีย (ammonia) กรดแฮโลเจน (halogen acid) ซึ่งโมโนเมอร์ที่จะเกิดโพลีเมอไรเซชันแบบขั้น จะต้องมีกลุ่มฟังชันแนล (functional group) เป็นตัวทำปฏิกิริยาให้สายโซ่โพลีเมอร์เชื่อมต่อกัน เช่น -OCO- , -O- , -NHCO- , -S- , -OCOO- และ $-SO_2-$ โดยกลุ่มฟังชันแนลต่างชนิดกันอย่างน้อยสองกลุ่มที่ทำปฏิกิริยากัน กลุ่มฟังชันแนลเหล่านี้อาจอยู่ในโมโนเมอร์โมเลกุลเดียวกันหรือจากต่างโมโนเมอร์ก็ได้ และเมื่อกลายเป็นโพลีเมอร์แบบขั้นจะมีโครงสร้าง ดังนี้

-R-Z-R-Z-R-Z-R-Z-R-Z-R-Z-R-Z-R-Z-R-Z

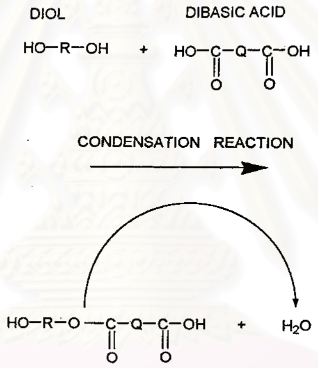
เมื่อ R เป็นกลุ่มอะลิฟาติก หรือ อะโรมาติก (aliphatic or aromatic groups) และ Z เป็นกลุ่มฟังชันแนล

โดยทั่วไปนิยมเรียกปฏิกิริยานี้ว่า โพลีเมอไรเซชันแบบขั้น มากกว่าควบแน่น เนื่องจากในบางกรณีการทำปฏิกิริยากันระหว่างโมโนเมอร์โดยกลุ่มฟังชันแนล อาจไม่มีการขับโมเลกุลเล็ก ๆ เชิงเดียวออกมา เช่น โพลียูลิเทน จึงควรเรียกโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นจะเหมาะสมกว่า

ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยค่อยๆเพิ่มโมเลกุลจาก โมโนเมอร์ เป็น ไดเมอร์ ไทรเมอร์ เททระเมอร์ เพนทาเมอร์ เฮกซาเมอร์ เฮปทาเมอร์ ออกทาเมอร์ จนกลายเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเขียนปฏิกิริยาโดยสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$\text{n-mer} + \text{m-mer} \longrightarrow (n + m) - \text{mer}$$

เช่น การเตรียมโพลีเอสเตอร์ จากไดออล (diol) กับ ไดแอซิด (diacid)



<u>รูปที่ 2</u> แสดงปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบขั้น (Anusavice, 1996)

ในการพยายามยับยั้งขบวนการเกิดโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นก่อนที่โมเลกุลของโพลีเมอร์จะมีขนาดใหญ่เท่าจริง เนื่องจากยิ่งโพลีเมอร์มีขนาดโมเลกุลใหญ่ก็จะทำให้คุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล และ จำนวนโมเลกุลลดลง เช่น ไนลอน (nylon) ต้องการขนาดโมเลกุลเพียง 10,000 ถึง 20,000 เท่านั้น จึงจะให้คุณสมบัติที่ดี แต่การยับยั้งขบวนการเกิดโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นนี้ก็ทำได้ยาก

ในปัจจุบันพลาสติกที่เกิดจากขบวนการโพลีเมอไรเซชันแบบขั้น ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการบูรณะทางทันตกรรม หรือ ทางทันตกรรมประดิษฐ์มากนัก แต่จะนำไปใช้กันมากในชีวโพลีเมอร์ (biologic polymers) เช่น คอลลาเจน กรดไรโบนิวคลิอิก ตัวอย่างวัสดุทาง ทันตกรรมที่ใช้โพลีเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ วัสดุพิมพ์ปากโพลีซัลไฟด์ และ ซิลิโคนชนิดควบแน่น เป็นต้น (เจน รัตนไพศาล, 2533; Anusavice, 1996)

2. โพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ หรือ รวมตัว (chain or addition polymerization) หลังจากเกิดโพลีเมอไรเซชันแล้ว ไม่มีการขับโมเลกุลเล็กๆ ออกมา

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ของพลาสติกทางทันตกรรม แตกต่างจากโพลีเมอไรเซชันแบบขั้น เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของโพลีเมอร์ขณะเกิดขบวนการโพลีเมอไรเซชัน หรือ อีกในหนึ่ง คือ โมเลกุลโพลีเมอร์ขนาดใหญ่จะประกอบไปด้วยหน่วยโมโนเมอร์ที่มีโครงสร้างเดียวกันตลอดสาย

ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และได้โพลีเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถจำกัดขนาดโมเลกุลได้จำนวนมาก โดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากโมโนเมอร์ตัวแรกที่ถูกกระตุ้น และเกิดการสร้างสายโซ่โพลีเมอร์อย่างรวดเร็วจนกระทั่งหน่วยโมโนเมอร์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาหมด ดังนั้นขบวนการเกิดปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นได้ง่ายแต่ยากต่อการควบคุม

สิ่งจำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ คือ โมโนเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาจะต้องมีกลุ่มไม่อิ่มตัว (unsaturated group) หรือ พันธะคู่ (double bond) อยู่ในโครงสร้าง และจะต้องมีแรดิคัลอิสระ (free radical) กระตุ้นให้เกิดการสร้างสายโซ่โพลีเมอร์ขึ้นได้

ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่เกิดขึ้น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น (induction or initiation) ขั้นแผ่ขยายห่วงโซ่ (propagation) ขั้นสิ้นสุดของปฏิกิริยา (termination) และการย้ายสายโซ่ (chain transfer)

<u>ขั้นเริ่มต้น</u> เกิดปฏิกิริยา 2 ตอน ตอนแรกเกิดจากตัวกระตุ้น (activator) ทำปฏิกิริยากับตัวเริ่มต้น (initiator, I) ทำให้ตัวเริ่มต้นแยกตัวให้ อินิเทียล แฟรคเมนท์ แรดิคัล (initial fragment radical, R) หรือที่เรียกกันว่า แรดิคัลอิสระ (free radical) ซึ่งได้แก่ อินทรีย์โมเลกุลที่มีอิเลคทรอนเดี่ยว (unpaired electron)

$$I \xrightarrow{\text{ตัวกระตุ้น}} 2R^{\cdot}$$

ตอนที่สอง แรดิกัลอิสระทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์โมเลกุลได้อินิเทียล โมโนเมอร์ แรดิกัล (initial monomer radical) สรุปปฏิกิริยาตอนนี้ ได้ดังนี้

$$R^{\cdot} + M \longrightarrow M_1^{\cdot}$$

เมื่อ M เป็นโมโนเมอร์โมเลกุล และ M_1 เป็น อินิเทียล โมโนเมอร์ แรดิกัล

ตัวแทนที่ (initial fragment radical) ได้จากตัวเริ่มต้น (initiator) อนุโลมเรียกว่า คะตะลิสต์ (catalyst) ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนพันธะคู่ของ คาร์บอน-คาร์บอน

ของโมโนเมอร์เป็นพันธะเดี่ยว แล้วให้ อินิเทียล โมโนเมอร์ แรดิกัล ซึ่งมี แอคทิฟเซนเตอร์ (actice center) ติดท้ายและพร้อมทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์อื่นเป็นสายโซ่ต่อไป

ตัวกระตุ้น ที่ใช้ในการแยกแรดิคัลอิสระ มีมากมาย ได้แก่ ความร้อน โฟโตเคมิกัล (photochemical initiation) รังสี สารเคมี การใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox initiation) เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น

<u>ขั้นแผ่ขยายห่วงโซ่</u> ประกอบด้วยการรวมตัวของ $M_1^{\cdot}$ กับโมโนเมอร์ที่เหลือจำนวนมาก อาจเป็นพันเป็นหมื่น เป็นแสน หรือมากกว่า ได้สายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์ ซึ่งมีแอคทิฟเซนเตอร์ต่อท้าย

การรวมของโมโนเมอร์แต่ละหน่วย จะได้สายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์ใหม่ โครงสร้างคงเหมือนกับ $M_1^{\cdot}$ แต่ขนาดโตขึ้น

$$M_1^{\cdot} + M \longrightarrow M_2^{\cdot}$$
$$M_2^{\cdot} + M \longrightarrow M_3^{\cdot}$$
$$M_3^{\cdot} + M \longrightarrow M_4^{\cdot}$$

หรืออาจเขียนสูตรทั่วไป

$$M_n^{\cdot} + M \longrightarrow M_{(n+1)}^{\cdot}$$

ปฏิกิริยาห่วงโซ่เกิดรวดเร็วมาก

<u>ขั้นสิ้นสุดของปฏิกิริยา</u> ของสายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์ มี 2 แบบ คือ

(1) แบบจับคู่ หรือ ผสมกัน (coupling or combination) เกิดขึ้นโดยแอคทิฟเซนเตอร์ของสายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์ 2 สาย ทำปฏิกิริยากันเป็น 1 สายโซ่โมเลกุล โดยมีสูตรทั่วไป คือ

$$M_n + M_m \longrightarrow M_{m+n}$$

ปฏิกิริยาสิ้นสุดของสายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์ส่วนมากเป็นแบบจับคู่

(2) แบบไม่ได้สัดส่วน (disproportionation) เกิดขึ้นโดยไฮโดรเจนแรดิกัล จากแรดิกัลเซนเตอร์ของสายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์สายหนึ่ง ย้ายไปทำปฏิกิริยากับแรดิกัลเซนเตอร์ของอีกสายโซ่โพรเพเกติงโพลีเมอร์อีกสายหนึ่ง

จากการรวมลักษณะนี้จะได้โพลีเมอร์โมเลกุล 2 พวก คือ ชนิดอิ่มตัว (saturated polymer molecules) กับชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polymer molecules) โดยมีสูตรทั่วไป คือ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$M_n^{\cdot} + M_m^{\cdot} \longrightarrow M_n + M_m$$

การย้ายสายโซ่ (chain transfer) ไปทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลที่กำลังแผ่ขยายให้หยุดโต โดยปฏิกิริยาการย้ายสายโซ่ อาจเกิดจาก

(1) ย้ายส่วนแอคทิฟเซนเตอร์ของแรดิกัลจากตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง

(2) ย้ายอะตอมระหว่างสายโซ่แรดิกัลกับโมโนเมอร์

สารที่ทำให้เกิดการย้ายสายโซ่ เรียกว่า ตัวกระทำให้เกิดการย้ายสายโซ่ (chain transfer agent) เช่น โมโนเมอร์ตัวเริ่มต้น และสารละลาย โดยมีสูตรทั่วไปคือ

$$M_n^{\cdot}\ XA \longrightarrow M_n\text{-}X + A^{\cdot}$$

การยับยั้ง และ การหน่วง (inhibition and retardation) สารบางชนิดสามารถยับยั้งหรือหน่วงแรดิกัลทุกชนิดให้หยุดทำปฏิกิริยา หรือทำให้ปฏิกิริยาของแรดิกัลช้าลง สารที่สามารถหยุดปฏิกิริยาของแรดิกัล เรียกว่า ตัวยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) ปฏิกิริยาที่หยุดนั้น เรียกว่า การยับยั้ง และสารที่ทำให้ปฏิกิริยาของแรดิกัลเกิดช้าลง เรียกว่า ตัวหน่วงปฏิกิริยา (retarder) ดังนั้นการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นเริ่มต้นจะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน และการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุดจะเป็นการลดระดับการเกิดโพลีเมอไรเซชัน หรือ เป็นการลดน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างสารที่ทำให้เกิดการยับยั้ง หรือการหน่วงปฏิกิริยา ได้แก่ ไฮโดรควิโนน (hydroquinone) ยูจินิล (eugenol) และออกซิเจนจำนวนมาก จากกลไกการทำงานของสารเหล่านี้จึงสารมารถนำมาใช้ประโยชน์โดยเติมไฮโดรควิโนนปริมาณเล็กน้อยในเมทิลเมทาคริเลต เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดโพลีเมอไรเซชันอย่างถาวร เป็นการยืดอายุการใช้งานของวัสดุ (เจน รัตนไพศาล, 2533; Anusavice, 1996; Craig และ Powers, 2002)

ง. ข้อแตกต่างระหว่างโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่กับโพลีเมอไรเซชันแบบขั้น

1. ปฏิกิริยาของโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นจะเกิดตามขั้นตอน (stepwise reaction) ระหว่างกลุ่มฟังชันแนล แต่ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่จะต้องอาศัยตัวเริ่มต้น หรือคะตะลิสต์ปล่อยรีแอคทิฟสปีชีส์ (reactive species) ออกมาเสียก่อน แล้วรีแอคทิฟนี้ทำให้ปฏิกิริยาต่อกันเป็นสายโซ่

2. ความเร็วของปฏิกิริยาของโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ เกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยา

โพลีเมอไรเซชันแบบขั้น

3. ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นจะการขับหน่วยโมเลกุลเล็กๆ เชิงเดียวออกมาเป็นผลพลอยได้ภายหลังการเกิดปฏิกิริยา แต่โพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ไม่มี

4. ความเข้มข้นของโมโนเมอร์หลังเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ จะลดลงทันที แต่ของโพลีเมอไรเซชันแบบขั้นจะลดลงตามส่วนที่ทำปฏิกิริยา (เจน รัตนไพศาล, 2533)

จ. อิทธิพลต่างๆ ต่อคุณสมบัติ

1. น้ำหนักโมเลกุล โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ขนาดโตขึ้น ทำให้อุณหภูมิหลอมตัวและความหนืดสูงขึ้น กลสมบัติสูงขึ้น สามารถต้านทานความร้อนได้ดีกว่าลีเมอร์ขนาดเล็ก

2. ส่วนประกอบ โพลีเมอร์ร่วมมีกลสมบัติดีกว่าโพลีเมอร์ธรรมดา

3. โครงสร้าง กลสมบัติ สมบัติความร้อน เคมี และไฟฟ้า เพิ่มมากขึ้นตามลำดับจากโพลีเมอร์ห่วงโซ่ กิ่ง และตาข่าย

ฉะนั้นการใส่สารเชื่อมไขว้เพื่อให้เกิดเชื่อมโยงเป็นตาข่าย ทำให้โพลีเมอร์มีคุณสมบัติต่างๆ สูงกว่าชนิดห่วงโซ่ หรือชนิดต่อกิ่ง

4. ตัวทำให้นุ่ม (Plasticiser) เป็นสารที่ผสมในโพลีเมอร์เพื่อให้อ่อนนุ่ม ลดความหนืดและมอดุลัสยืดหยุ่น ตัวทำให้นุ่มมี 3 ชนิด คือ

4.1. ชนิดสะลายกับสารละลาย (solvent type)

4.2. ชนิดที่ไม่ละลายกับสารละลาย (non-solvent type)

4.3 ชนิดแทรกเนื้อโพลีเมอร์ (internal type) ซึ่งนิยมมาก เช่น ทาลเลตเอสเทอร์ กลิเซอ-รอล (phthalate esters glycerol) และ ไกลคอล (glycol)

5. วัสดุอัดแทรก (Filler) เป็นสารเติมแต่งลงในโพลีเมอร์ เพื่อให้แข็งแกร่งทนต่อแรงกระแทก ดึง ฉีกขาด และความร้อนมากขึ้น ตัวอย่าง ใยแก้วเป็นวัสดุอัดแทรกกับโพลีเอสเตอร์ คาร์บอนดำ และซิลิกา ใช้ผสมกับอีลาสโทเมอร์

6. การย่อยสลายโพลีเมอร์ (Degradation of polymers) ตัวการที่ทำให้เกิดการย่อยสลายของโพลีเมอร์ อาจเป็นด้านพลังงาน เช่น ความร้อน พลังงานกลและรังสี หรืออาจเป็นทางเคมี เช่น เกิดไฮโดรลิซีส ออกซิเดชัน และปฏิกิริยาอื่นๆ ตัวอย่างการย่อยสลาโดยความร้อน

6.1. การย่อยสลายของโพลีเมอร์แบบขั้น เรียกว่า random degradation เกิดจากห่วงโซ่ขาดหรือถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ

6.2. การเสื่อมของโพลีเมอร์สายโซ่ เรียกว่า chain depolymerization เกิดจากการแยกตัวของโมโนเมอร์เป็นหน่วยเล็ก ๆ ออกจากโพลีเมอร์สายโซ่ โดยการกระตุ้นของแสงอัลตราไวโอเลต ออกซิเจนโอโซน หรือสารอื่นที่ทำให้โพลีเมอร์นั้นมีคุณสมบัติเสื่อมลง

7. สารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น สี (Colorant) สารช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ (flame retardant) และสารช่วยหล่อลื่น (lubricant) เป็นต้น

ฉ. การประยุกต์ของโพลีเมอร์ (Application of polymers)

1. กลสมบัติ ในทางปฏิบัติ นิยมหาค่าของการเสียรูป และ การแผ่ตัวของโพลีเมอร์มากกว่ากลสมบัติอื่น กลสมบัติทั้งสองนี้ หาได้จากมอดุลัสกำลังความแข็งแรงสูงสุด และการยืดหดตัว

โพลีเมอร์ใดมีกลสมบัติเหล่านี้สูงต่ำเพียงใด ขึ้นอยู่กับการเกิดเป็นผลึก การเชื่อมขวาง และค่าของ Tg และ Tm

โพลีเมอร์ที่เกิดผลึกได้น้อย หรือการเชื่อมขวางมีได้น้อย หรือมีค่า Tg ต่ำ เป็นโพลีเมอร์ที่สามารถยืดตัวได้มาก แต่กำลังความแข็งแรงต่ำ

จากกลสมบัติเหล่านี้ จึงสามารถผลิตโพลีเมอร์เป็นเส้นใย(fiber) แผ่นอ่อน (flexible plastic) แผ่นแข็ง (rigid plastic) หรือ อีลาสโทเมอร์ (elastomer)

2. สมบัติไฟฟ้า นำไปใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น หุ้มสายไฟ

ช. วิธีหล่อ (Method of moulding)

โพลีเมอร์สามารถทำให้เป็นแผ่น เส้น โฟม และรูปแบบต่างได้ การหล่อแบบอาจหล่อได้หลายวิธี เช่น

1. แบบอัด (Compression moulding) อบโพลีเมอร์ชนิดอ่อนตัวด้วยความร้อน แล้วนำไปอัด ปล่อยให้เย็นลง ได้แบบที่ต้องการ

2. แบบฉีด (Injection moulding) บรรจุโพลีเมอร์ชนิดอ่อนตัวด้วยความร้อนในกระบอกฉีดแล้วอบด้วยความร้อนจนอ่อนตัว จึงฉีดเข้าแบบและอัดทิ้งให้เย็น จะได้แบบจำลองที่ต้องการ

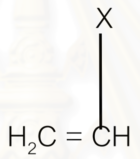
3. แบบเหวี่ยง (Casting technic) ผสมโพลีเมอร์ชนิดสายโซ่ค่อนข้างเหลวเหวี่ยงเข้าในเบ้า ในการหล่อแบบของโพลีเมอร์ชนิดสายโซ่ต้องใช้วิธีผสมให้ข้น (dough technic) ผสมโมโนเมอร์และตัวเริ่มต้นในโพลีเมอร์เป็นเนื้อเดียว ปล่อยให้โมโนเมอร์ที่เกินระเหยออกจนโพลีเมอร์

ข้นราว 80 เปอร์เซ็นต์ นำไปอัดในแบบ และให้เกิดโพลีเมอร์ไรซ์ โดยการบ่มด้วยความร้อนหรือสารเคมี จะได้แบบที่ต้องการ (เจน รัตนไพศาล, 2533)

โดยโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ โพลีเมเทิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทำฐานฟันปลอมอะคริลิกจึงสามารถยึดติดกันได้ดี ใส สามารถเติมแต่งสีได้ และมีราคาถูก

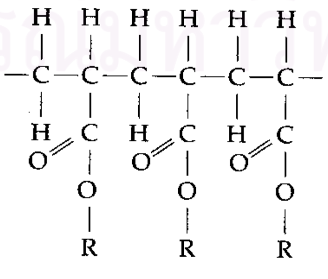
<u>โพลีเมทิลเมทาคริเลต</u> (Polymethyl methacrylate) มีอักษรย่อว่า **PMMA**

เรซิน อะคริลิก (acrylic resin) เป็นอนุพันธ์ของเอทิลีน (ethylene) และมีกลุ่มไวนีล (vinyl group) อยู่ในโครงสร้าง มีสูตรโครงสร้าง ดังนี้



อนุกรมของเรซิน อะคริลิก (acrylic resin series) ที่เกี่ยวข้องกับงานทางทันตกรรม มีอย่างน้อย 2 อนุกรม คือ อนุกรมที่ได้จากกรดอะคริลิก (CH_2=CHCOOH) กับอนุกรมจากกรดเมทาคริลิก (CH_2=C(CH_3)COOH) สารประกอบของอนุกรมทั้งสองได้จากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบรวมตัว

แม้สารเหล่านี้จะแข็งและใส แต่เนื่องจากมีขั้วซึ่งเป็นกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group, -COOH) ทำให้ดูดน้ำมาก โดยน้ำจะเป็นตัวทำให้สายโซ่โพลีเมอร์แยกตัว ทำให้วัสดุอ่อนและลดกำลังความแข็งแรงลง ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในช่องปาก แต่เอสเตอร์ (ester group, -COOR) ของกรดเหล่านี้ใสและดูดน้ำน้อยมาก จึงนำมาใช้ในช่องปากได้ เช่น โพลีเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังนี้



<u>รูปที่ 3</u> แสดงสูตรโครงสร้างของโพลีเมทิลเมทาคริเลต (Anusavice, 1996)

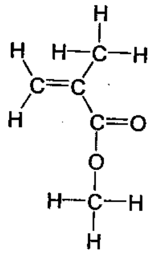
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ R แทนเอสเตอร์ แรดิกัล ของอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ซึ่งทำให้เกิดเรซิน อะคริลิกชนิดต่าง ๆ มากมาย แต่ที่นิยมใช้ทำฟันประดิษฐ์และฐานฟันปลอม ได้แก่ โพลีเมทิลเมทาคริเลต ที่มี R เป็น CH_3 แรดิกัล

เมทิลเมทาคริเลต มีลักษณะใส และเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โดยมีกายสมบัติ ดังนี้ คือ

1. น้ำหนักโมเลกุล 100
2. มีจุดหลอมเหลว –48 องศาเซลเซียส (-54.4 ^{o}F)
3. จุดเดือด 100.8 องศาเซลเซียส (213 ^{o}F)
4. ความหนาแน่น 0.945 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (68 ^{o}F)
5. ความร้อนระหว่างเกิดปฏิกิริยา (heat of polymerization) เท่ากับ 12.9 กิโลกรัม-แคลอรีต่อโมล
6. เป็นตัวทำละลายสารอินทรีย์ที่ดีมาก

เมทิลเมทาคริเลต โมเลกุลเชิงเดียว หรือเรียกว่า โมโนเมอร์ (simple molecule or monomer) สามารถรวมตัวเป็นมหโมเลกุล หรือเรียกว่า โพลีเมอร์ (macromolecule or polymer) ของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้โดยปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบรวมตัว ซึ่งเกิดจากตัวกระตุ้น อาจเป็นความร้อน แสงอัลตราไวโอเลต หรือสารอินทรีย์ ไปแยกหรือทำปฏิกิริยากับตัวเริ่มต้นให้ปล่อยแรดิกัลอิสระออกมาทำปฏิกิริยากับเมทิลเมทาคริเลตเชิงเดียว กลายเป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลต แต่ในทางทันตกรรมนิยมใช้ตัวกระตุ้นเป็นสารเคมี เนื่องจากวิธีการนำโพลีเมทิลเมทาคริเลตมาอัดเข้าในเครื่องอัดแบบ (compression mould) ที่ทำด้วยโลหะยุ่งยากและค่าใช้จ่ายสูง จึงได้มีการดัดแปลงวิธีการให้ง่ายขึ้น โดยทำให้โพลีเมทิลเมทาคริเลตอ่อนตัวด้วยเมทิลเมทาคริเลต หรือโมโนเมอร์ ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการเป็นสารละลายของเมทิลเมทาคริเลตที่เป็นของเหลว ละลายโพลีเมทิลเมทาคริเลต (dead polymer) ให้นุ่มตัวเสียก่อน แล้วจึงอัดในเบ้า และเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือหลังจากละลายโพลีเมทิลเมทาคริเลต จะเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรซ์กับแรดิกัลอิสระจากเบนโซอิลเพอร์อกไซด์ ได้เป็นสายโซ่โพลีเมทิลเมทาคริเลต ทำให้เกิดสายโซ่โพลีเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ได้โพลีเมอร์ขนาดใหญ่ยิ่งขึ้นเมื่อรวมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลตเดิม เทคนิคดังกล่าวเรียกว่า Polymer-monomer-dough of plastic mould for denture ข้อดีคือ กลสมบัติสูงขึ้น การหดตัวน้อยลง ทำให้โมโนเมอร์เมทิลเมทาคริเลต มีความสำคัญต่อวงการทันตแพทย์มากขึ้น



รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างของ MMA (Anusavice , 1996)

ระดับการเกิดโพลีเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตไม่แน่นอน ขึ้นกับสภาวะของการเกิดปฏิกิริยานั้น เช่น อุณหภูมิ วิธีการกระตุ้น ชนิดและความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น ความบริสุทธิ์ของสารเคมี และปัจจัยอื่นอีก พบว่าหากมีการเกิดโพลีเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์จะมีการหดตัวเชิงปริมาตร 21 %

ในวงการทันตแพทย์ที่เรียกโพลีเรซิน อะคริลิก (polyacrylic resin) นั้นหมายถึง เอสเตอร์ของอนุกรมจากกรดเมทาคริลิก

โพลีเมทิลเมทาคริเลต เป็นเรซินแข็งและใส สามารถนำแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 250 นาโนเมตร มีความเสถียรภาพ ไม่เปลี่ยนสีเมื่อโดนแสงอัลตราไวโอเลต และมีเสถียรภาพทางเคมีต่อความร้อน มีกำลังความแข็งแรงสูงสุดในกลุ่มเดียวกัน อ่อนตัวที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส (257 ^{o}F) เหมาะสำหรับอัดในเบ้า ขึ้นรูปเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติก และที่อุณหภูมินี้ถึง 200 องศาเซลเซียส จะเริ่มมีปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชันเกิดขึ้น ถ้าทำให้ร้อนถึง 450 องศาเซลเซียส (842 ^{o}F) จะมี 90% ของโพลีเมอร์ที่ถูกโพลีเมอไรซ์กลายเป็นโมโนเมอร์ หรือเมทิลเมทาคริเลตเดิมอีก

โพลีเมทิลเมทาคริเลตเหมือนกับอะคริลิก เรซินชนิดอื่น คือ มีการดูดซึมน้ำ โดยขบวนการอมน้ำ (imbibition) ทำให้มีการเพิ่มน้ำหนัก 0.5 % หลังจากแช่ในน้ำนาน 1 อาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 0 - 60 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซึมน้ำที่อิสระ แต่จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล คือ ถ้า โพลีเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะมีการเพิ่มของน้ำหนักน้อย และขบวนการดูดซึมนี้สามารถผันกลับได้ถ้าเรซินถูกทำให้แห้ง

เนื่องจากโพลีเมทิลเมทาคริเลตเป็นโพลีเมอร์ชนิดเส้น จึงสามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม (chloroform) และ อะซิโตน (acetone) (เจน รัตนไพศาล, 2533; Combe, 1986; Wright และคณะ, 1994; Anusavice, 1996)

โพลีเมทิลเมทาคริเลต แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของตัวกระตุ้น ได้แก่ โพลีเมทิลเมทาคริเลตชนิดบ่มด้วยความร้อน โพลีเมทิลเมทาคริเลตชนิดบ่มด้วยสารเคมี และโพลีเมทิลเมทาคริเลตชนิดบ่มด้วยแสง (Wright และคณะ,1994)

โพลีเมทิลเมทาคริเลตชนิดบ่มด้วยความร้อน (Heat-cured or heat-activated polymethyl methacrylate)

เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่บ่มด้วยความร้อน กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน ความร้อนอาจเป็นน้ำร้อน แสงอัลตราไวโอเลต หรือหม้ออบไมโครเวฟก็ได้ แต่จะต้องไม่ร้อนเกิน 70 องศาเซลเซียส (158 ^{o}F)

การนำไปใช้ทางทันตกรรม ใช้ทำฐานฟันปลอม ทั้งชนิดฟันปลอมถอดได้บางส่วนและฟันปลอมทั้งปาก ใช้ทำเป็นเหงือกปลอมในฟันปลอมถอดได้ฐานโลหะ และใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอมประดิษฐ์

1. <u>องค์ประกอบ</u>

1.1. ส่วนผง (Powder)

1.1.1. โพลีเมอร์ ลักษณะใส หรือ มีสี เป็นเม็ดละเอียดของโพลีเมทิลเมทาคริเลต ขนาด 50-250 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคของส่วนผงจะมีอิทธิพลต่อระยะอัด (doughing time) อาจมีโพลีเมอร์ร่วมเพื่อเพิ่มกลสมบัติของโพลีเมอร์

1.1.2. ตัวเริ่มต้น ส่วนใหญ่มักเป็น เบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ 0.2-0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.1.3. รงควัตถุ สีที่ฉาบตามผิวของเม็ดโพลีเมอร์ ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

1.1.4. อื่น ๆ ได้แก่ สีทึบแสง (opacifier) ตัวทำให้นุ่ม และเส้นใยอินทรีย์ (organic fiber)

1.2. ส่วนเหลว (Liquid)

1.2.1. โมโนเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต เป็นของเหลวใสไม่เสถียร ระเหยง่าย จึงใส่สารหักห้าม (stabilizer) เช่น ไฮโดรควิโนน (hydroquinone) 0.006 เปอร์เซ็นต์ และบรรจุในขวดสีชา เพื่อป้องกันการเกิดโพลีเมอไรเซชันขณะเก็บ

1.2.2. สารเชื่อมไขว้ เพื่อให้สายโซ่โพลีเมอร์ 2 เส้น เชื่อมโยงกัน ทำให้มีกำลังความแข็งแรงสูงขึ้นและทนต่อแรงกระแทก เช่น เอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต (ethylene glycol dimethacrylate) 1-2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Anusavice, 1996)

1.2.3. อื่น ๆ ได้แก่ ผสม เอทิลอะคริเลต (ethyl acrylate, EGDMA) ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เป็นโพลีเมอร์ร่วม

ในบางกรณี อาจเห็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตอยู่ในรูปของ เจล (gel) ซึ่งเป็นการผสมกันก่อน (premixed) ระหว่างโพลีเมอร์ กับโมโนเมอร์ และเจลนี้จะถูกนำไปอัดด้วยความดัน (press-packed) หรือบ่มด้วยความร้อน (Wright และคณะ, 1994)

2. <u>คุณสมบัติ</u>

2.1. กลสมบัติ

2.1.1. ความถ่วงจำเพาะ 1.19

2.1.2. น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ผง 500 ขึ้นไป สำหรับโพลีเมอร์ที่ผ่านการบ่มแล้วมีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 ขึ้นไป

2.1.3. กำลังแรงดึง 8,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (597.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 58.6 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก และจะต่ำอีกถ้าน้ำหนักโมเลกุลลดลง หรือมีสิ่งเจือปนตกค้าง

2.1.4. มอดุลัสยืดหยุ่น 350,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (24,605 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 2,413.3 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร)

2.1.5. กำลังกระแทก 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (4.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 0.41 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร) หรือมีการยืดยาวก่อนการหัก (elongation to fracture) 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำมากดังนั้นจึงเปราะ (brittle)

2.1.6. ความแข็งผิวชนิดนูป 18-20 ซึ่งต่ำมาก จึงสึกหรอง่าย

2.2. กายภาพสมบัติ

2.2.1. อัตราการขยายตัวเมื่อร้อน 81×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส

2.2.2. การนำความร้อนต่ำมาก

2.2.3. ละลายน้ำเพียง 0.028 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรใน 24 ชั่วโมง

2.2.4. การดูดน้ำ (sorption) ทั้งที่ผิว (adsorption) และดูดถึงเนื้อ (absorption) 2 เปอร์เซ็นต์เมื่ออิ่มตัว หรือมีน้ำหนักเพิ่มอีก 0.5 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักเดิมเมื่อแช่น้ำนาน 7 วัน

2.2.5. ปริมาตร – การหดตัว เกิด 2 ระยะ คือ ระยะแรก เกิดเมื่อผสมส่วนผงกับส่วนเหลวจนถึงระยะอ่อนนุ่มก่อนอัด เรียกว่า การหดตัวเชิงปริมาตรของระยะอ่อนนุ่ม (volume shrinkage of dough stage) หดตัว 7 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลกับมิติของเรซิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระยะสอง เกิดการหดตัวระหว่างเชิงปฏิบัติการ ขณะที่บ่มและทำให้เย็นลง หดตัวประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อมิติของเรซิน

2.2.6. ความหนาแน่นของโพลีเมทิลเมทาคริเลต 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากการหดตัวขณะเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน (polymerization shrinkage) ซึ่งมีค่า 21 เปอร์เซ็นต์

2.2.7. ย้อมด้วยรงควัตถุได้ เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ แคดเมียม-แดง

2.2.8. อาจระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในปาก เกิดจากโมโนเมอร์ที่ตกค้างหลังบ่มแล้ว มีประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ถ้าโพลีเมทิลเมทาคริเลตยิ่งหนา โมโนเมอร์ที่ตกค้างก็ยิ่งมากขึ้น นอกจากนี้โมโนเมอร์ที่ตกค้างจะทำหน้าที่เป็นตัวทำให้นุ่ม ทำให้เรซินอ่อนแอลง และหักงอได้ง่ายขึ้น

3. <u>อัตราส่วนโมโนเมอร์ต่อโพลีเมอร์ หรือ ส่วนเหลวต่อส่วนผง</u> ใช้อัตราส่วน 1 : 3-3.5 โดยปริมาตร หรือ 1 : 2.5 โดยน้ำหนัก ควรตวงหรือชั่งให้ได้อัตรส่วนที่กำหนด เนื่องจากหากโพลีเมอร์มากเกินไป โพลีเมอร์ที่ละลายจะตกค้างเป็นเม็ดเล็ก ๆ ในเนื้อของโพลีเมอร์หลังบ่ม แต่หากโมโนเมอร์มากเกินไป โพลีเมอร์ที่ได้จะหดตัวมากขึ้น

4. <u>การละลายของโพลีเมอร์</u> ควรใช้ภาชนะผสมที่ทำด้วยแก้ว หรือพอร์สเลนที่ปากกว้างและมีฝาปิด เพื่อป้องกันไม่ให้โพลีเมอร์ติดภาชนะ และโมโนเมอร์ระเหยเร็วเกินไป

โพลีเมอร์ละลายในโมโนเมอร์ตามขั้นตอน ดังนี้

4.1. ขั้นเป็นเม็ดทราย (wet sand-like stage) เป็นระยะที่ โพลีเมอร์เริ่มผสมกับโมโนเมอร์ แต่ยังไม่ละลาย ยังเห็นเป็นเม็ดคล้ายทรายอยู่

4.2. ขั้นเป็นเส้นใย (stringy stage) เป็นระยะที่โมโนเมอร์เริ่มละลายโพลีเมอร์ โดยผิวชั้นนอกของเม็ดโดดพลีเมอร์ถูกเจาะ แล้วละลายในโมโนเมอร์ ลักษณะเป็นเส้นใยและเหนียว

4.3. ขั้นอ่อนนุ่ม (dough stage) เป็นระยะที่โพลีเมอร์ละลายในโมโนเมอร์กลายเป็นเนื้อเดียว จำนวนโมโนเมอร์เหลือเพียงเล็กน้อย ขั้นนี้มีลักษณะอ่อนนุ่ม ปั้นเป็นก้อนได้ ไม่ติดภาชนะหรือมือ ไม่มีเส้นใย และแผ่ตามซอกตามมุมได้ เป็นขั้นที่เหมาะสำหรับอัดลงแบบหล่อ ไม่เกิดรูพรุน

เวลาตั้งแต่เริ่มผสมโพลีเมอร์กับโมโนเมอร์จนกระทั่งถึงระยะอ่อนนุ่มนี้เรียกว่า ระยะเวลาอัด (dough time)

ระยะเวลาอัดอาจเร็วหรือช้า ย่อมแล้วแต่ ขนาดของโพลีเมอร์ ถ้าขนาดเล็กจะละลายได้เร็ว ระยะเวลาอัดก็เร็ว น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์สูง ละลายตัวได้ช้า ระยะเวลาอัดช้า ถ้าใส่สารทำให้นุ่ม ระยะเวลาอัดช้าลง อุณหภูมิสูงเร่งให้ระยะเวลาอัดเร็วขึ้น อัตราส่วนของโพลีเมอร์มากกว่าอัตราส่วนปกติ ทำให้ระยะเวลาอัดเร็วขึ้น

ระยะเวลาอัดไม่ต่ำกว่า 5 นาที (ควรดูคำแนะนำบนฉลากและปฏิบัติตามคำแนะนำนั้น ๆ ซึ่งอาจมีระยะเวลาแตกกกต่างออกไป

ขั้นคล้ายยาง (rubber-like strage) เป็นขั้นสุดท้ายที่มีโมโนเมอร์เหลือน้อยที่สุด ลักษณะคล้ายยาง ยืดหยุ่นได้ ไม่สามารแผ่ออกได้ ไม่เหมาะสำหรับอัด

5. <u>การอัด</u> (Packing) ต้องการให้โพลีเมทิลเมทาคริเลตไหลเต็มแบบหล่อด้วยแรงอัด โดยหลักเกณฑ์ของการอัด คือ โพลีเมอร์จะต้องอยู่ในขั้นอ่อนนุ่ม และมีปริมาณมากกว่าปริมาตรของเบ้าเล็กน้อย แรงอัดจะต้องสูงพอที่จะให้โพลีเมอร์ไหลถึงซอกและมุมเล็กๆได้ และจะต้องให้โพลีเมอร์นั้นแน่น (สังเกตได้ เนื้อโพลีเมอร์เป็นเงาใส ไม่มีจุดเล็กเป็นแฉกที่ผิว เมื่อแยกฟลาสก์ดู)

เทคนิคการอัดมี 2 แบบ คือ แบบอัดระหว่างฟลาสค์ส่วนบนกับล่างสามารถดูว่าอัดโพลีเมอร์เต็มแบบหล่อหรือไม่ (trial closure technic) กับแบบฉีดตามท่อ (injection technic) ซึ่งไม่สามารถแยกออกมาดูว่าเต็มแบบหล่อหรือไม่ เพียงอัดให้โพลีเมอร์เต็มท่ออัดเท่านั้น ข้อดีของแบบนี้ คือไม่มีส่วนเกินโพลีเมอร์ตามขอบของเดนเจอร์ แต่วิธีการยุ่งยาก

6. <u>วิธีบ่ม</u> (Curing process) นิยาม การบ่ม (curing) หมายถึง การเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นวัสดุที่ใช้งานได้ โดยการอัดความร้อนหรือสารเคมี เรียกว่า ตัวบ่ม (curing agent) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารเคมี physiochemical change)

หลักการบ่มให้ความร้อนแยกแรดิกัลอิสระจากเบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์เฉพาะที่เป็นตัวละลายเท่านั้นให้กลายเป็นโพลีเมอร์ โดยให้เบนโซอิลเพอร์ออกไซด์แยกตัว ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (158^{o}F) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับโพลีเมอไรซ์เมทิลเมทาคริเลตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรูพรุน

ความร้อนที่ใช้บ่ม อาจเป็นความร้อน แสงอัลตราไวโอเลต เตาอบ และอื่น ๆ

วิธีที่สะดวกและประหยัด ได้แก่ บ่มในน้ำอุ่น (water bath) แต่ต้องควบคุมอุณหภูมิและเวลาให้ถูกต้องมี 2 วิธี ตามข้อกำหนดของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา เลขที่ 12 (American Dental Association Specification No. 12) สำหรับโพลีเมอร์สร้างฐานฟันปลอม คือ

6.1. บ่มระยะสั้นในน้ำอุ่น 73.9 องศาเซลเซียส (158°F) ระยะเวลา 90 นาที เพื่อให้เกิดโพลีเมอร์ไรซ์ แล้วเร่งให้น้ำเดือดอีก 30 นาที เพื่อให้โพลีเมอไรเซชันสมบูรณ์และไล่โมโนเมอร์ที่เหลือออก

6.2. บ่มระยะยาวในน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิ 73.9 องศาเซลเซียส (165°F) ต่อเนื่องกันเป็นเวลาอย่างน้อย 9 ชั่วโมง (ADA, 1976-1978)

การบ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลต ในอุณหภูมิต่ำ ๆ จะได้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าการบ่มในอุณหภูมิสูง ๆ เพราะปริมาณของโมโนเมอร์มีมากกว่าในอุณหภูมิสูง

ข้อระวัง ไม่ควรบ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตในระยะเริ่มแรกสูงกว่าอุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส (180°F) ถ้าเกินระดับอุณหภูมินี้ ความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากความร้อนของน้ำในระดับอุณหภูมินี้รวมกับอุณหภูมิที่มีความร้อนคายออกมาระหว่างปฏิกิริยา สูงเกินกว่าจุดเดือดของโมโนเมอร์ซึ่งมีค่า 100.3 องศาเซลเซียส (213.4°F) ทำให้โมโนเมอร์นั้นเดือดและระเหยเร็วเกินไป อาจเป็นเหตุให้เกิดรูพรุนได้

อุณหภูมิของน้ำที่ใช้บ่มรวมกับอุณหภูมิที่ความร้อนคายออกมาระหว่างปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นนี้เรียกว่า อุณหภูมิสิขร (peak temperature) (เจน รัตนไพศาล, 2533; Combe, 1986; Wright และคณะ, 1994; Anusavice, 1996)

สำหรับโพลีเมทิลเมทาคริเลตชนิดบ่มด้วยสารเคมี และชนิดบ่มด้วยแสง เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติกับชนิดบ่มด้วยความร้อน พบว่าชนิดบ่มด้วยสารเคมีจะเกิดรูพรุนมากกว่า มีความแข็งแรงหลังบ่มเสร็จเพียง 80 เปอร์เซ็นต์ ของชนิดบ่มด้วยความร้อน มีมิติที่ถูกต้องแค่ในระยะแรกหลังบ่มทำให้เพิ่มโอกาสในการดูดซึมน้ำได้มากขึ้น มีคุณสมบัติในการไหลแผ่และการคืบไม่ดีทำให้เกิดการบิดตัวได้ง่าย มีโมโนเมอร์หลงเหลืออยู่ในปริมาณมาก อาจสูงถึง 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของชนิดบ่มด้วยความร้อน มีความเสถียรของสีเมื่อใช้ไปนานๆ และความต้านทานต่อการขัดสีต่ำ (Combe, 1986; Wright และคณะ, 1994) ดังนั้นจึงไม่เลือก โพลีเมทิลเมทาคริเลตทั้งสองชนิดนี้มาใช้ในการทดลองครั้งนี้

คุณสมบัติที่สำคัญที่ต้องการจากพลาสติกที่ใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอมอะคริลิก ได้แก่ มีความต้านทานต่อการสึกสูง โดยวิธีที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัตินี้มีหลายวิธี ซึ่งการทดสอบกายสมบัติ เช่น ความแข็งผิว และ การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการสึก ก็เป็นวิธีที่สามารถวัดความต้านทานของพลาสติกที่ใช้ผลิตซี่ฟันปลอมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงรูปแบบของการสึก สาเหตุ และ วิธีการทดสอบชนิดความต้านทานการสึกชนิดต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ และเป็นแนวทางในการเลือกวิธีในการทดสอบ

<u>การสึก</u> (Wear)

การสึกเป็นปรากฏการณ์ที่พบได้เสมอในทางทันตกรรม เกิดเมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวเคลื่อนที่เลื่อนหรือไถลผ่านกันคล้ายกับได้รับแรงกระทำ สถาบันวิศวกรรมเครื่องกลแห่งราชอาณาจักร (The Institution of Mechanical Engineers of the United Kingdom) ได้ให้คำนิยามของการสึกว่า " เป็นการสูญเสียวัตถุบางส่วนจากบริเวณพื้นผิวของวัตถุโดยการทำงานทางกลศาสตร์ " โดยขบวนการทางกลศาสตร์นี้สามารถทำให้เกิดการสึกรวมทั้ง การถู (rubbing) การอัด (impact) การขูด (scraping) และ การกร่อน (erosion) การสึกอาจเกิดขึ้นได้หลายขบวนการ เช่น การขัดสี (abrasive wear) การเกาะติด (adhesive wear) การกร่อน (corrosive wear) การล้าของพื้นผิว (surface fatigue wear) และการสึกชนิดอื่นๆอีกมากมาย นอกจากนี้การใช้ความร้อน สารเคมี หรือไฟฟ้าก็สามารถทำให้เกิดขบวนการสึกบนพื้นผิววัตถุได้เช่นกัน (Sulong และ Aziz, 1990)

Mair และคณะ (1992 และ 1996) ได้กล่าวว่า การสึกเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เมื่อพื้นผิวของวัตถุเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน ซึ่งการสึกนั้นไม่ได้เกิดขึ้นจากขบวนการเพียงขบวนการเดียว แต่เป็นผลรวมของหลายขบวนการที่เกิดขึ้นอย่างอิสระบนพื้นผิววัตถุ โดยปัจจัยสำคัญที่ใช้วัดปริมาณการสึก คือ ระยะเวลาที่พื้นผิวของวัตถุเคลื่อนที่สัมผัสกัน

Stafford และ Smith (1973) กล่าวว่า ตามปกติแล้วจะพบการสัมผัส (contact) ที่เกิดขึ้นในการวิจัยทางคลินิก (in vivo) อยู่สองชนิดด้วยกัน คือ การสัมผัสชนิดเคลื่อนที่ (dynamic type) ซึ่งมีอยู่แล้วในฟันธรรมชาติ ทำให้เกิดการนำทางขณะขากรรไกรล่างเคลื่อนไถลตามระนาบเอียงของฟันไปด้านข้างและด้านหน้า (lateral and protrusive guidance) และนั่นคือการเลื่อนไถลประถมภูมิ ชนิดที่สองเกิดขึ้นขณะที่ขากรรไกรล่างเคลื่อนที่ปิดในลักษณะบานพับ และเกิดการสัมผัสหยุดในศูนย์ (centric stop contact) ซึ่งการสัมผัสชนิดนี้จะเป็นการรวมกันระหว่างการอัด และ การเลื่อนไถลในระยะ 1 มิลลิเมตร โดยการอัดไม่ได้ทำให้เกิดการสึก ดังนั้นหลักการของการสึกเกิดขึ้นจากการสัมผัสแบบเลื่อนไถล นอกจากนี้การสัมผัสชนิดเลื่อนไถลยังเกิดมาก ขณะที่ขากรรไกรล่างเคลื่อนที่นอกเหนือการทำงาน (para-function) ดังนั้นจึงเกิดการสึกมากขึ้นเช่นกัน (Bloem และคณะ, 1988)

โดยสรุปแล้วการสึก คือ การเสื่อมลงของพื้นผิววัตถุ ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงและการเคลื่อนที่ โดยขบวนการจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แต่สม่ำเสมอและเกิดตลอดเวลา ซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่ การสึกจากการกัดกร่อน หรือ ผุพัง (Corrosive wear) การสึกจากการเกาะติด หรือ การยึดติด (Adhesive wear) การสึกจากการชะ หรือ การกัดเซาะ (Erosive wear) การสึกจากการ

กระแทก หรือ การสึกจากการเคาะ (Impact wear or percussive wear) การสึกจากความล้าของพื้นผิว (Surface fatigue) และ การสึกจากการขัดสี (Abrasive wear)

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสึกวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมมีมากมาย เช่น แรงและการเคลื่อนที่ของระบบบดเคี้ยว สารหล่อลื่นในช่องปาก ซึ่งเป็นผลรวมของทั้งน้ำลาย และความเป็นกรด-ด่าง สิ่งแปลกปลอมภายในช่องปาก การอยู่ในสภาวะหรือบรรยากาศที่เอื้อให้เกิดการสึกเป็นเวลานาน พฤติกรรมของผู้ป่วย อาหารที่รับประทาน สุขภาพช่องปาก สุดท้ายคือพื้นผิวและชนิดของวัสดุที่ใช้ในการบูรณะ (Khan และคณะ, 1984; Mair, 1992; Lindquist และคณะ, 1995)

การสึกจากการกัดกร่อน หรือผุพัง เป็นการสึกที่เกิดร่วมกับการขัดสี (friction) ในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกร่อน โดยผลของการกร่อนจะทำให้เกิดแผ่นฟิล์มบางๆ (protective film) ทำหน้าที่ป้องกันพื้นผิววัตถุ แต่หากแผ่นฟิล์มนี้ถูกไถลจนสึกหมดไปการกร่อนก็จะเกิดขึ้นอีก การสึกชนิดนี้มีความสำคัญมากต่อการกร่อนของโลหะผสมในช่องปาก (Bloem และคณะ, 1988) Pugh ในปี 1973 ได้ให้คำนิยามของการสึกชนิดนี้ว่า เป็นการสึกจากสารเคมี ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างสิ่งแวดล้อมและพื้นผิวที่ลื่นทำให้เกิดการหลุดออกของผลผลิต (by product) จากปฏิกิริยานี้ การกัดกร่อนจะเกิดอย่างรวดเร็วในระยะแรกและช้าลง หรือหยุดอย่างสมบูรณ์หลังจากมีการสร้างแผ่นฟิล์ม (cohesive film) เกาะติดบนผิวของวัตถุ แต่เมื่อใดที่แผ่นฟิล์มถูกกำจัดออกไปพื้นผิววัตถุจะปรากฏและเกิดการกัดกร่อนจากสารเคมีต่อไป

Lipson (1967) กล่าวว่า สภาวะที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนของวัสดุทางทันตกรรมภายในช่องปาก ได้แก่ แรงในการสบฟันที่มากเกินไป (neuromuscular force) ชนิดของแรง และการเคี้ยวที่เร็วเกินไป ผลของการหล่อลื่นจากน้ำลาย คุณภาพของวัสดุที่ใช้ เช่น องค์ประกอบ ความแข็ง คุณสมบัติทางกายภาพหลังจากผสมวัสดุ การมีสิ่งแปลกปลอมในเนื้อวัสดุ พื้นผิวของวัสดุ สภาวะทางเคมีภายในช่องปาก และอุณหภูมิ โดยผลของการกัดกร่อนจะต้องไม่ทำให้การทำหน้าที่และความสวยงามของวัสดุลดลง และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่มีพิษต่อร่างกาย (Mahalick และคณะ, 1971; Sulong และ Aziz, 1990)

การสึกจากการเกาะติด หรือการยึดติด เป็นการสึกชนิดที่พบได้บ่อยที่สุด เกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่มีความแข็งเลื่อนไถลไปบนพื้นผิวของวัสดุชนิดอื่น หรือมีแรงกดต่อวัสดุชนิดนั้น ทำให้มีการหลุดออกของอนุภาคเล็กๆ จากพื้นผิวที่ถูกถู (Sulong และ Aziz, 1990) Burwell ได้อธิบายถึงการสึกชนิดนี้ว่า เป็นการสึกที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุสองชิ้นเคลื่อนที่เลื่อนไถลบนพื้นผิวซึ่งกันและกัน ทำให้การยึดติดกันนั้นถูกทำลายไม่ใช่ที่รอยต่อระหว่างพื้นผิวเดิมแต่เป็นที่ภายในเนื้อวัตถุนั้น ส่งผลให้มีอนุภาคบางส่วนแตกหลุดออกมาเกาะติดไปกับวัตถุอีกชิ้นที่เลื่อนไถลผ่านกัน และปรากฏการณ์นี้สามารถทำให้ลดลงได้หากมีการใช้สารหล่อลื่น (Bloem และคณะ, 1988) โดยสรุป คือ เป็น

การสึกที่เกิดขึ้นขณะที่มีการเฉือนระหว่างพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอสองพื้นผิว (Mahalick และคณะ, 1971; Lindquist และคณะ, 1995)

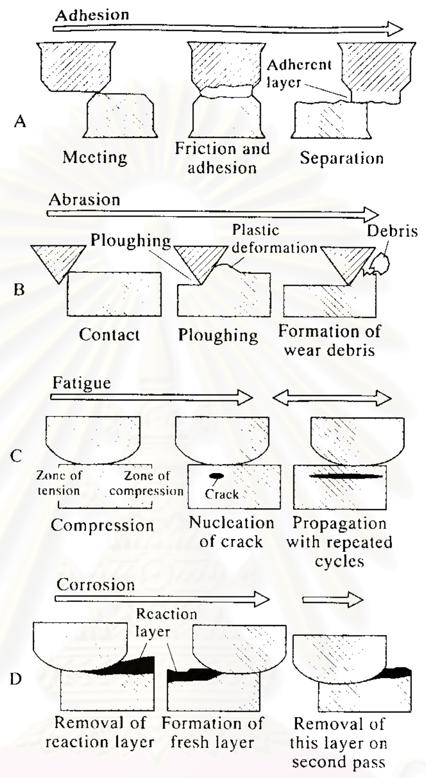
การสึกจากการชะ หรือ การกัดเซาะ เป็นการสึกที่เกิดขึ้นเมื่อมีอนุภาคที่เป็นของแข็ง หรือของเหลวกระทบบนพื้นผิววัสดุ ทำให้เกิดการกัดเซาะพื้นผิวบริเวณที่อนุภาคนั้นกระทบ และพื้นผิวที่ถูกกัดเซาะนั้นจะมีความขรุขระมากกว่าการสึกที่เกิดจากการขัดสี Sarkar ในปี 1980 ได้อธิบายถึงชนิดของการกัดเซาะทางทันตกรรม ว่ามีอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ การกัดเซาะที่เกิดจากการกระทำของทันตแพทย์ (Idiopathic erosion) โดยให้การขัดพื้นผิวบางส่วนของฟัน และ การกัดเซาะที่เกิดจากกลเคมี (Chemicomechanical erosion) เกิดจากการกด หรือเลื่อนไถลบนพื้นผิวฟัน หรือเกิดจากกรดหรือสารละลายที่มีค่า pH ต่ำในช่องปาก (Sulong และ Aziz, 1990)

การสึกจากการกระแทก หรือ การสึกจากการเคาะ เป็นรูปแบบของการสึกที่เกิดจากการกระแทกซ้ำๆ ของพื้นผิวที่มีความแข็งสองพื้นผิว แตกต่างจากการสึกจากการกัดเซาะเนื่องจากการสึกจากการกัดเซาะจะเกิดจากการกระแทกของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กบนพื้นผิว ในทางทันตกรรมการสึกจากการกระแทกสามารถเกิดขึ้นได้ขณะเคี้ยว กลืน และการกัดเน้นฟัน นั่นคือมีการเคลื่อนที่ของฟันในขากรรไกรล่างเข้ามาใกล้กับฟันในขากรรไกรบน (Sulong และAziz, 1990)

การสึกจากความล้าของพื้นผิว เป็นการสึกชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดการแตกหักของวัสดุ เมื่อพื้นผิวหรือเนื้อของวัสดุใต้พื้นผิวเกิดรอยร้าวและพัฒนาไปเป็นการแตกหักของพื้นผิว โดยความล้าเกิดขึ้นจากความเค้นที่ได้รับเป็นเวลานานและมีความเค้นที่ปล่อยออกมา การสึกชนิดนี้เกิดขึ้นได้มากในวัสดุที่มีความแข็งแรงดึงน้อยกว่าหนึ่งในสามของความแข็งแรงกด (Bloem และคณะ,1988)

การสึกจากการขัดสี เป็นการสึกที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวที่แข็งและขรุขระ หรือมีอนุภาคที่แข็งมากไถไปบนวัสดุที่มีความอ่อนนุ่มกว่า ดังนั้นพื้นผิววัสดุที่มีการสึกชนิดนี้จะมีอนุภาคที่หลุดออกมาจากการสึกอัดอยู่ที่พื้นผิวด้วย การสึกชนิดนี้มีประโยชน์ทางทันตกรรม เช่น ใช้ในการขัดวัสดุต่างๆทางทันตกรรม ใช้ในการตะไบเพื่อรักษาคลองรากฟัน และหัวขัดต่างๆ สำหรับการสึกในช่องปากนั้นเกิดได้หลายแบบขึ้นกับตำแหน่งในการบูรณะ Asmussen ในปี 1985 ได้รายงานว่า การบูรณะฟัน คลาสที่ 3 และ คลาสที่ 4 (Class III and IV restoration) จะมีสาเหตุของการสึกมาจากการแปรงฟันด้วยยาสีฟันเป็นอันดับแรก ขณะที่การบูรณะฟันบริเวณด้านบดเคี้ยวจะมีสาเหตุของการสึกมาจากการอัดของอาหารบนวัสดุบูรณะขณะกัดและเคี้ยวอาหารทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนพื้นผิววัสดุบูรณะซึ่งเป็นสาเหตุของการสึก ส่วนการสึกที่มีสาเหตุมาจากการแปรงฟันขึ้นกับปัจจัยหลายๆ อย่างด้วยกัน ได้แก่ ชนิดของขนแปรง ลักษณะของผงขัดในยาสีฟัน และความแรงและความถี่ในการแปรงฟันของแต่ละบุคคล (Sulong และ Aziz, 1990) การสึกชนิดนี้มีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการสึกอยู่ 2 หรือ 3 องค์ประกอบ ในกรณีที่การสึกเกิดจาก 2

องค์ประกอบ คือจะเกิดจากพื้นผิวที่มีความแข็งต่างกันมาสัมผัสกัน ทำให้พื้นผิวที่แข็งกว่าครูดพื้นผิวที่นุ่มกว่าเกิดเป็นร่องจำนวนมากเรียงกัน แต่ถ้ามีองค์ประกอบ 3 องค์ประกอบ การสึกจะเกิดจากมีอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งแทรกอยู่ระหว่างพื้นผิวที่สัมผัสกัน



รูปที่ 5 แสดงขบวนการเกิดการสึก (A) การสึกจากการเกาะติด, (B) การสึกจากการขัดสี, (C) การสึกจากความล้าของพื้นผิว, (D) การสึกจากการกัดกร่อน (Mair และคณะ, 1996)

การวัดความแข็ง (Hardness test)

ความแข็งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรม อาจให้คำนิยามของความแข็งอย่างกว้างๆ ว่าเป็นความต้านทานต่อการทำให้พื้นผิวเป็นรอยอย่างถาวร หรือการเจาะ (Janardan, 1974; Sivarajan,1980; Craig และ Powers, 2002)

การให้คำจำกัดความที่ชัดเจนของความแข็งจะเป็นเรื่องที่ยากเนื่องจากขบวนการทดสอบจะอยู่ในระดับจุลภาค ซึ่งจะสัมพันธ์กับลักษณะพื้นผิวที่ซับซ้อนและความเค้นในวัสดุที่ทดสอบ แม้จะมีความยากในการให้คำจำกัดความ แต่แนวคิดนี้ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับวัสดุที่แข็งและอ่อนนุ่ม คือความสัมพันธ์กับความต้านทานต่อการทำให้เกิดรอย ดังนั้นความแข็งคือ การวัดความ

ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก และ คือการวัดแรงที่ทำให้เกิดรอยบนพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

จากคำจำกัดความนี้ก็จะเป็นที่กระจ่างชัดว่า ทำไมคุณสมบัตินี้จึงมีความสำคัญทางด้านทันตกรรม เนื่องจากความแข็งเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงความยากง่ายของการขัดและความต้านทานต่อการขูดขีดของวัสดุ วิธีทดสอบความแข็งของวัสดุที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ บริเนลล์ นูป วิกเกอร์ รอกเวลล์ และ ชอร์-เอ

การทดสอบแต่ละวิธีจะแตกต่างกันเล็กน้อย และมีข้อดีข้อเสียต่างกัน อย่างไรก็ดีการทดสอบทุกแบบขึ้นกับการเจาะของหัวกดขนาดเล็กที่มีรูปร่างสมมาตรกดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ทำการทดสอบ แต่แตกต่างกันที่วัสดุที่ใช้ทำหัวกด รูปทรงของหัวกด และแรงที่ใช้กด วัสดุที่ใช้ทำหัวกดอาจทำมาจาก โลหะ (Steel) ทังสเตน คาร์ไบด์ (tungsten cabide) หรือเพชร (dismond) โดยรูปทรงอาจเป็นทรงกลม (sphere), รูปโคน (cone) พีระมิด (pyramid) หรือเข็ม (needle) และแรงกดที่ใช้ก็มีตั้งแต่ 1 ถึง 3,000 กิโลกรัม การเลือกวิธีทดสอบความแข็งก็ขึ้นกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ ช่วงของค่าความแข็งผิวที่คาดว่าจะได้รับ และ ตำแหน่งในการกด (Craig และ Powers, 2002)

วัสดุที่มีความสามารถต้านทานการเกิดรอยกดได้มาก วัสดุนี้จะมีค่าความแข็งผิวมาก แต่ถ้าวัสดุที่มีความต้านทานการกดได้น้อย หรือ เกิดรอยลึกได้ง่ายแสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งผิวต่ำ ความแข็งผิวมีหน่วยเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ความแข็งของวัสดุเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ควรรู้ก่อนที่จะทำการเลือกวัสดุนั้นๆ โดยวิธีที่ใช้วัดความแข็งมีหลายวิธี ดังนี้ (Sivarajan,1980)

1. <u>การวัดความแข็งบริเนลล์</u> (Brinell Hardness test-BHN)

เป็นการวัดความแข็งโดยวิธีการกด การทดสอบชนิดนี้คิดค้นโดย Mr. J.A. Brinell เป็นวิธีการวัดที่เป็นที่ยอมรับกันมาก หัวกดของบริเนลล์จะเป็นลูกเหล็กทรงกลมขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดมีขนาด 18 มิลลิเมตร ซึ่งจะให้แรงกด 3,000 กิโลกรัมลงบนพื้นผิวของวัสดุ ในกรณีที่วัสดุมีความนิ่ม แรงกดที่ใช้ลดลงเหลือเพียง 500 กิโลกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดจะมีขนาด 5 มิลลิเมตร ดังนั้นรอยกดจึงไม่ลึกมากจนเกินไป เวลาที่ใช้ในการกด 30 วินาที ลักษณะของรอยกดที่ได้จะมีลักษณะเป็นวงกลม และค่าความแข็งผิวจะทำการวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด และทำการเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้ 2 ครั้ง แล้วนำมาคำนวณหาค่าความแข็ง โดยค่าความแข็งที่ได้เรียกว่าค่า Brinell hardness number-BHN มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

ความคลาดเคลื่อนมักเกิดขึ้นในขณะที่วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด โดยถือว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดจะมีความยาวเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางขณะที่หัวกดสัมผัสกับผิว

ของวัสดุ แต่ความจริงแล้วขนาดของรอยกดจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด เนื่องจากการคืนรูป (Elastic recovery) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อโลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น

การวัดความแข็งชนิดนี้จะใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการทดสอบโลหะในอุตสาหกรรม ได้แก่ การทดสอบอิทธิพลของความเย็นและความร้อนต่อโลหะในส่วนที่แตกหัก การทดสอบพื้นผิวของผลิตภัณฑ์โลหะที่ผ่านการขัดโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย เช่น เพลารถ และ รางรถไฟ เป็นต้น (Sivarajan,1980)

2. <u>การวัดความแข็งรอกเวลล์</u> (Rockwell Hardness test)

เป็นการวัดความลึกของรอยกดภายใต้แรงกดที่คงที่ โดยใช้หัวกดเหล็กกล้าทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว และแรงกดหลัก 100 หรือ 150 กิโลกรัม โดยวัสดุจะต้องทำมุม 120 องศากับหัวกด แรงกดรองจะมีขนาด 10 กิโลกรัม ซึ่งเป็นแรงที่เริ่มกดในช่วงแรกจนกว่าวัสดุจะแนบสนิทกับหัวกดดีเสียก่อน หลังจากนั้นเครื่องจึงจะเริ่มกดด้วยแรงกดหลัก และความลึกของรอยกดจะถูกบันทึกโดยอัตโนมัติ โดยการวัดด้วยไดออลเกจ (dial gauge) ค่าที่ได้ออกมาจะนำมาจัดเป็นรอกเวลล์สเกล เป็น A-G ความแตกต่างของสเกลของวัสดุที่ต่างกัน ก็ย่อมมีระดับความแข็งผิวที่ต่างกันด้วย

Rockwell hardness test ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศอเมริกา เพราะมีความรวดเร็วและไม่มีความคลาดเคลื่อนของบุคคลในการวัด รอยที่กดได้มีขนาดเล็กมากดังนั้นวัสดุจะไม่ถูกทำลายเสียหายหลังจากการวัดความแข็ง ใช้ได้กับวัสดุทั่วไป และโลหะ

การวัดโดยวิธี Rockwell test ที่จะได้ค่าที่ถูกต้องจะต้องปฏิบัติดังนี้ หัวกดและวัสดุที่จะทำการทดสอบต้องสะอาด แห้ง มีพื้นผิวเรียบและทำมุมที่ถูกต้องกับหัวกด ความหนาของวัสดุจะต้องเพียงพอที่รอยกดจะไม่ทะลุลงไปอีกด้านของพื้นผิววัสดุ โดยวัสดุจะต้องมีวามหนาอย่างน้อย 10 เท่าของความลึกของรอยกด การเว้นช่วงระหว่างรอยกดแต่ละรอยจะต้องมีระยะอย่างน้อย 4 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และแรงกดจะต้องเท่ากับมาตรฐานที่กำหนด (Sivarajan,1980)

3. <u>การวัดความแข็งชอร์ เอ</u> (Shore A Hardness test)

วิธีนี้จะนำมาใช้ในการวัดค่าความแข็งผิวของยางหรือพลาสติกที่อ่อนนุ่ม ชอร์ เอ สเกล จะแบ่งเป็น 0 ถึง 100 หน่วย ถ้าวัสดุสามารถถูกกดได้มากก็จะมีสเกล เป็น 0 แต่ถ้าไม่สามารถกดให้เป็นรอยได้เลย หมายความว่ามีค่าเท่ากับ 100 โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความแข็งชนิดนี้เรียกว่า Shore A durometer

หัวกดที่ใช้เป็นรูปทรงกรวย โดยปลายของหัวกดจะมีลักษณะเป็นเข็มปลายทื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร และด้านฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

วัสดุที่นำมาวัดด้วยวิธีนี้ ได้แก่ วัสดุบุฐานฟันปลอม (Denture liners-resilient) วัสดุพิมพ์ปาก (impression material) วัสดุบูรณะช่องปากและใบหน้า (maxillofacial material) และ mouth protector material (Craig และ Powers, 2002)

4. <u>การวัดความแข็งนูป</u> (Knoop hardness test-KHN)

หัวกดของนูป จะทำมาจากเพชรเหมือนกับวิกเกอร์ แต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของรูปร่างและขอบเขตของหัวกด โดยนูปจะได้รอยกดที่เป็นสี่เหลี่ยมที่มีเส้นทแยงมุมเส้นหนึ่งยาวกว่าอีกเส้นหนึ่ง คล้ายกับสี่เหลี่ยมด้านขนาน และทำการวัดเส้นทแยงมุมที่ยาวกว่าเพียงเส้นเดียวเท่านั้น แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าความแข็งนูป (Knoop hardness number-KHN) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักที่กดกับพื้นที่ของรอยกด โดยคำนวณจากสูตร

$$KHN = \frac{L}{l^2 Cp}$$

และหน่วยที่ใช้วัด คือ kg/mm^2 เมื่อ L คือ น้ำหนักที่ใช้กด l คือ ความยาวของเส้นทแยงมุมที่ยากกว่าของรอยกด และ Cp คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของค่า l ต่อพื้นที่ของรอยกด

ข้อดีของการทดสอบด้วยวิธีนี้ คือ สามารถทดสอบวัสดุที่มีความแข็งผิวหลายช่วง เนื่องจากถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนน้ำหนักในการกดได้หลายค่า ดังนั้นผลที่ได้ก็จะแปรตามน้ำหนักที่กดและลักษณะของวัสดุนั้น

การทดสอบความแข็งวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะ เช่น แก้ว ผิวเคลือบฟัน เนื้อฟัน ตัวขัด (Abrasives) ซีเมนต์ (Cements-luting consistency) ซีเมนต์ไลเนอร์ (cement liners) โลหะผสมโคบอลต์-โคเมียม และ เรซินที่ใช้ทางทันตกรรม (Denture resins) (Sivarajan,1980; Craig และ Powers, 2002)

5. <u>การวัดความแข็งวิกเกอร์</u> (Vickers hardness test-VHN)

วิธีนี้ใช้หัวกดพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ทำมาจากเพชรซึ่งมีมุม 136 องศา แรงกด 5-120 กิโลกรัม เหมาะสำหรับวัดความแข็งของวัสดุที่มีความเปราะ จึงเหมาะในการวัดความแข็งผิวของฟันธรรมชาติและฟันปลอม โดยวิธีนี้มีหลักการคล้ายคลึงกับการทดสอบความแข็งนูปและบริเนลล์ แต่มีความแตกต่างกันตรงวิธีนี้จะใช้หัวกดรูปพีรามิด แรงกดทำให้รอยกดคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนผิววัสดุ ค่าความแข็งของวัสดุจะถูกวัดจากเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้ง

สองเส้น นำมาหาค่าเฉลี่ยแล้วคำนวณออกมาเป็นค่าความแข็งผิววิกเกอร์ (Vicker's hardness number-VHN)

ทั้งการทดสอบความแข็งบริเนลล์ และ วิกเกอร์ต่างถูกนำใช้วัดความแข็งของโลหะผสมที่ใช้ในทางทันตกรรม และค่าความแข็งวิกเกอร์-บริเนลล์ มีความสัมพันธ์กันคือ

$$VHN = 1.05 \text{ X} BHN$$

การคำนวณหาค่า VHN จะคำนวณ โดย ค่าหน่วยของแรง = F/A เมื่อ F คือ น้ำหนักที่ใช้กด (กิโลกรัม) A คือ รอยกดรูปพีระมิดของหัวกด D คือ เส้นทแยงมุมของรูปพีระมิด (มิลลิเมตร) โดยที่ $A = D^2 / 1.854$

ดังนั้น $VHN = 1.854A / D^2$ รอยกดที่ได้สามารถปรากฏในลักษณะแตกต่างกันดังนี้

รูปที่ 6 แสดงลักษณะรอยกดวิกเกอร์ (ก) รอยกดปกติ, (ข) รอยกดเมื่อวัสดุหนาแน่นมาก, (ค) รอยกดเมื่อวัสดุหนาแน่นน้อย (Janardan, 1974)

ลักษณะรอยกดปกติของหัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม จะมีลักษณะดังรูปที่ 6(ก) ถ้าหากวัสดุมีความหนาแน่นมาก หรือ ได้รับความร้อน พบว่าจะได้รอยกดดังรูปที่ 6(ข) ซึ่งรอยกดแบบนี้จะทำให้ค่าความแข็งที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ส่วนวัสดุที่หนาแน่นน้อย หรือโลหะที่ได้รับความเย็นจะได้รอยกดดังรูปที่ 6(ค) ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งน้อยกว่าที่เป็นจริง

การวัดค่าความแข็งโดยวิธีนี้ไม่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากขั้นตอนในการเตรียมวัสดุช้าและต้องการความละเอียดรอบคอบสูง

การทดสอบความแข็งนูปและวิกเกอร์จัดเป็นการทดสอบความแข็งผิวแบบจุลภาค (microhardness test) ซึ่งต่างจากการทดสอบความแข็งบริเนนล์และรอกเวลล์ ที่จัดทำเป็นการทดสอบความแข็งผิวมหภาค (macrohardness test) ซึ่งใช้แรงกดที่สูงกว่า

วัสดุที่สามารถใช้วัดด้วยการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ ได้แก่ อะลูมินา (Alumina-recrystallized) อมัลกัม ซีเมนต์ไลเนอร์ โลหะผสมโคบอลต์-โคเมียม โลหะผสมทอง ยิปซัม (Gypsum) โลหะผสมนิกเกิล-โคเมียม (Nickel-chromium alloys) โลหะผสมแพลลาเดียม และพอร์ซเลน เป็นต้น (Janardan, 1974; Sivarajan,1980; Craig และ Powers, 2002)

แต่อย่างไรก็ดีคุณสมบัติความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกของพลาสติกที่นำมาใช้ในการผลิตซี่ฟันปลอมอะคริลิกสามารถเพิ่มได้ โดยขบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การเติมวัสดุอัดแทรก ซึ่งมีมากมายหลายชนิด ขึ้นกับคุณสมบัติที่ต้องการจากวัสดุอัดแทรก ที่สำคัญได้แก่ สามารถเพิ่มความแข็งผิวและความต้านทานต่อการสึกได้สูง สามารถเติมแต่งสีได้ สามารถเข้ากันได้ดีกับพลาสติกชนิดที่ใช้ และไม่เป็นพิษ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงวัสดุอัดแทรกแต่ละชนิด เพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการวัดความแข็งด้วยวิธีต่างๆ

การวัดความแข็ง	วิธีการวัด	หัวกด	วัสดุทดสอบ	หน่วย
บริเนลล์	กดแรง 500 -3,000 กก. เวลา 30 วินาที	ลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-18 มม.	โลหะ	กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร
รอกเวลล์	กดแรง 100-150 กก. วัสดุทำมุม 120° กับหัวกด	ลูกเหล็กกล้าทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว	วัสดุทั่วไปและโลหะ	มาตราส่วน $R_C^{20} - R_C^{70}$ $R_B^{0} - R_B^{100}$
ชอร์-เอ	-	รูปทรงกรวยปลายเป็นเข็มที่อขนาด 0.8 มม. ฐานขนาด 1.6 มม.	วัสดุแข็งแต่เปราะ เช่น ผิวเคลือบฟัน	มาตราส่วน 0 -100
นูป	เหมือนบริเนลล์	หัวกดเพชรรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน	วัสดุแข็งแต่เปราะ เช่น ผิวเคลือบฟัน	กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร
วิกเกอร์	แรงกด 5 – 125 กก. เหมือนบริเนลล์ และนูป	หัวกดเพชรรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	วัสดุแข็งแต่เปราะ เช่น ฟันปลอม	กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

<u>วัสดุอัดแทรก</u> (Filler)

เป็นสารเติมแต่งที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นผง แตกต่างจากเนื้อพลาสติกทั้งโครงสร้างและองค์ประกอบ เนื่องจากเดิมพลาสติกมีราคาแพง และคุณสมบัติยังไม่เป็นที่พอใจ ดังนั้นจึงมีการเติมวัสดุอัดแทรกลงในโพลีเมอร์ เพื่อเพิ่มปริมาณโพลีเมอร์ เป็นการลดต้นทุนในการผลิต และปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของพลาสติกให้ดีขึ้น โดยทั่วไปมักจะใช้วัสดุอัดแทรกที่เป็นอนินทรีย์ (inorganic) มากกว่าอินทรีย์ (organic) (เจน รัตนไพศาล, 2533; Wake, 1971; Seymor, 1978; Gachter และ Muller, 1990; Murphy, 1996)

วัสดุอัดแทรกเฉื่อยต่อปฏิกิริยา (inert filler) จะเติมเพื่อเพิ่มปริมาณโพลีเมอร์ และ ลดต้นทุนในการผลิต สำหรับวัสดุอัดแทรกไวต่อปฏิกิริยา (active filler) จะเติมเพื่อปรับปรุงกลสมบัติและกายสมบัติเฉพาะของโพลีเมอร์ หรืออาจเรียกว่า วัสดุอัดแทรกเสริมความแข็งแรง (reinforcing filler) แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากคำจำกัดความไม่เฉพาะเจาะจง (Gachter และ Muller, 1990)

วัสดุอัดแทรกมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติก ได้แก่ เพิ่มความแข็ง (rigidity) ความแข็งตึง (stiffness) ความแข็งผิว (surface hardness) และปรับคุณสมบัติของพื้นผิวพลาสติก ทำให้การขยายตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพลาสติกคงที่ (thermal stability) ลดการหดตัว (shrinkage) และ การเปลี่ยนแปลงมิติ (dimensional stability) ของพลาสติก เพิ่มความสามารถในการทนความร้อน และเปลวไฟ (heat resistance and flame retardency) ของพลาสติก ปรับปรุงหรือควบคุมลักษณะการนำไฟฟ้า (electrical characteristics) เพิ่มกำลังความแข็ง (strength) มอดุลัสยืดหยุ่น กำลังแรงดึง กำลังแรงอัด และ ความคืบ (creep) ของพลาสติก ปรับปรุงคุณสมบัติรีโอโลจิคอล (rheological properties) ของพลาสติก ปรับปรุงคุณสมบัติในการมองเห็น (appearance) เช่น ความทึบแสง สี ความหยาบละเอียด (texture) เพิ่มความหนาแน่น (density) และปริมาณของพลาสติกเพื่อลดต้นทุนในการผลิต อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการนำโพลีเมอร์เข้าสู่ขบวนการต่างๆ (processability) เช่น การผสม การไหลแผ่ การกระจายตัว การหล่อลื่น เป็นต้น (Wake, 1971; Seymor, 1978; Gachter และ Muller, 1990; Murphy, 1996)

แต่อย่างไรก็ดีข้อเสียของการเติมวัสดุอัดแทรกก็ยังมีอยู่ ซึ่งได้แก่ วัสดุอัดแทรกที่เป็นชนิดแร่และมีความแข็ง อาจเพิ่มน้ำหนักของพลาสติกได้ ดังนั้นการใช้วัสดุอัดแทรกที่น้ำหนักเบาจะเป็นที่น่าสนใจมากกว่า นอกจากนี้การกระจายรูปร่าง และการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของวัสดุอัดแทรกในเนื้อโพลีเมอร์ อาจทำให้คุณสมบัติต่างๆที่ได้น้อยกว่าการไม่เติมวัสดุอัดแทรกลงในพลาสติกเลย (Gachter และ Muller, 1990; Murphy, 1996)

การเติมวัสดุอัดแทรกให้กระจายทั่วเนื้อที่ของโพลีเมอร์ ทำให้กลสมบัติของโพลีเมอร์นั้นสูงกว่าโพลีเมอร์เดิม และกลสมบัติของโพลีเมอร์ที่เสริมด้วยวัสดุอัดแทรกนี้จะมีค่าสูงเท่าใด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุอัดแทรก เช่น วัสดุอัดแทรกขนาดเล็ก มีพื้นผิวจับกับโพลีเมอร์ได้มากกว่าขนาดใหญ่ พื้นผิวขรุขระของวัสดุอัดแทรกจับแน่นกว่าวัสดุอัดแทรกที่มีพื้นผิวเรียบหรือรูปทรงกลม การคลุกวัสดุอัดแทรกด้วยสารยึดควบคู่ (coupling agent) ซึ่งทำหน้าที่ยึดทั้งวัสดุอัดแทรกและโพลีเมอร์ จะทำให้โพลีเมอร์ที่ได้มีแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่าโพลีเมอร์ก่อนผสมวัสดุอัดแทรก หรือโพลีเมอร์ที่ผสมวัสดุอัดแทรกแต่ไม่ได้ใช้สารยึดควบคู่ และปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่ใช้ ถ้ามีปริมาณสูง ย่อมมีกลสมบัติสูงกว่าโพลีเมอร์ที่มีปริมาณวัสดุอัดแทรกต่ำ (เจน รัตนไพศาล, 2533)

วัสดุอัดแทรกที่ใช้เติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติก มีหลายชนิด แต่ที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้มี 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และ ควอตซ์ เนื่องจากวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งผิว และความต้านทานต่อการสึกของพลาสติก และมีข้อดี ข้อเสียในการใช้งานแตกต่างกัน อีกทั้งยังหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

ก. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

เป็นสารประกอบที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการตกตะกอนของสารต่างๆ เป็นหินในท้องทะเล รวมไปถึงสัตว์ที่มีกระดูกสันหลังชนิดต่างๆ โดยโครงสร้างที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบมักทำหน้าที่ปกป้อง พยุง และช่วยในการเคลื่อนที่ของร่างกาย

โดยทั่วไปแล้วผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีด้วยกัน 2 รูป ได้แก่ แคลไซท์ (calcite) มีลักษณะเป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้า (rhombohedral) มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 และ มีความแข็ง (hardness) 3.0 โมห์ (moh) และ อราโกไนท์ (aragonite) มีลักษณะรูปออโทรอมบิค (orthorhombic) และพบเป็นรูปปริซึมเข็ม หรือ ทรงกลม (needle-shaped prisms or spherulites) ในน้ำพุร้อนธรรมชาติ มีความถ่วงจำเพาะ 2.93 และมีความแข็ง 3.5 โมห์ เมื่อให้ความร้อนกับอราโกไนท์ก็จะเปลี่ยนรูปเป็นแคลไซท์ (Wake, 1971)

การแบ่งชนิดของแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ และโดโลไมท์

1. <u>แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากธรรมชาติ</u> (Natural calcium carbonates)

พบได้จาก ชอล์ก (chalk) มีลักษณะเป็นก้อนร่วน ประกอบไปด้วยผลึกแคลไซท์ละเอียด และหยาบ เกิดจากการทับถมของเปลือกหอย และโครงกระดูกของฟอซซิลขนาดเล็ก

หินปูน (limestone) มีลักษณะเกาะกันแน่น ประกอบไปด้วยฟอซซิลขนาดใหญ่ และเปลือกหอย

หินอ่อน (marble) เกิดจากการเปลี่ยนรูปของตะกอนหิน เมื่อถูกความร้อนภายในโลก ประมาณ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันที่สูง ทำให้หินที่ได้มีความแข็ง มีความหนาแน่นสูง และมีโครงสร้างหยาบ

องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ

แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)	98 ถึง 99.5	เปอร์เซ็นต์
แมกนิเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$)	สูงถึง 0.5	เปอร์เซ็นต์
เฟอร์เรต (Fe_2O_3)	สูงถึง 0.2	เปอร์เซ็นต์
อะลูมิโน-ซิลิเกต คอลลอยดอล (alumino silicate colloidal)	สูงถึง 1.0	เปอรเซ็นต์
ปริมาณความชื้น (moisture content)	สูงถึง 0.3	เปอร์เซ็นต์
(DIN ISO 787 part 2, ISO 787/2 – 1981)		
การติดไฟ (loss on ignition)	43.3 ถึง 43.8	เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่น	สูงถึง 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	
ความแข็งโมห์ (moh hardness)	3	
ระดับความขาว (degree of whiteness)	85 ถึง 95	เปอร์เซ็นต์
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	9.0 ถึง 9.5	
การดูดซึมน้ำมัน (oil absorption)	9 ถึง 21 กรัมต่อ 100 กรัมพาวเดอร์ (powder)	
พื้นที่ผิวเฉพาะ (specific surface)	1 ถึง 15	ตารางเมตรต่อกรัม
เลข DOP (DOP number)	9 ถึง 33 กรัมต่อ 100 กรัมพาวเดอร์	
มวลโมเลกุล	100.09	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคโดยเฉลี่ย	ประมาณ 1-3	ไมโครเมตร
ดัชนีการหักเหของแสง (refractive index)	ต่ำ	

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดนี้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุอัดแทรกในพลาสติกมากที่สุด โดยนำมาผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปน เช่น เหล็ก และ ซิลิกา เพื่อลดการทำลายพลาสติกให้มีอายุการใช้งานสั้นลง จากนั้นจึงนำมาบดให้ละเอียดเพียงพอที่จะมีกายสมบัติเหมาะสม

ในการเติมในพลาสติก และมีราคาที่ต่ำ แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีคุณภาพดี จะต้องมีลักษณะ คือ มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง ไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน มีพื้นที่ผิวเฉพาะต่ำ มีสีขาวหรือสีอ่อน

ข้อดีของแคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่

- มีราคาถูก เหมาะในการใช้เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของโพลีเมอร์
- ไม่มีพิษ ไม่ระคายเคืองต่อร่างกาย และไม่มีกลิ่น
- มีสีขาว ง่ายต่อการเติมสี และ มีดัชนีการหักเหของแสงต่ำใกล้เคียงกับตัวทำให้นุ่มและเรซินทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยมาก
- นิ่ม โดยมีค่าความแข็งโมห์ 3
- อนุภาคแห้ง ไม่มีน้ำหลงเหลืออยู่หลังจากการบวนการตกผลึก
- มีวัตถุดิบสำรองมากมาย
- มีอนุภาคหลายขนาดอาจมากกว่าวัสดุอัดแทรกอื่นทุกชนิด ซึ่งทำให้สามารถเลือกขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานได้
- สามารถควบคุมการกระจายของขนาดอนุภาค ให้เหมาะสมกับการอัดในแต่ละระบบโพลีเมอร์
- ง่ายต่อการเคลือบผิวด้วยสารอื่นขณะอยู่ในรูปแห้ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการไหลแผ่ของพลาสติกขณะหลอมเหลว (melt rheology) และกายสมบัติบางประการของพลาสติก สารที่ใช้เคลือบ เช่น กรดสเตียริก แคลเซียมสเตียเรต หรือ โรซิน

ในปัจจุบันได้มีการพยายามเพิ่มคุณสมบัติความเข้ากันได้กับไขมัน (lipophilic characteristic) ของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยการปรับสภาพพื้นผิวที่เหมาะสมหรือการเคลือบผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

- ง่ายต่อการผสมตามสูตรที่กำหนด และผสมเข้ากับสารอื่นได้ง่าย
- เป็นตัวปรับสภาพกรด (acid acceptor) ของโพลีเมอร์
- ลดการหดตัวระหว่างการขึ้นรูป และการบ่มของโพลีเมอร์
- เพิ่มความแข็งตึง และมอดุลัสยืดหยุ่นของโพลีเมอร์
- มีความเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (550-600 องศาเซลเซียส) แต่ถ้าหากให้ความร้อน 800 - 900 องศาเซลเซียส จะสลายให้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)
- ไม่ทำให้ส่วนของเครื่องจักรสึกจากการขัดสี
- มีการกระจายของอนุภาคในโพลีเมอร์ได้ดี โดยเฉพาะชนิดที่ได้รับการเคลือบผิวอนุภาค และมีอิทธิพลต่อกลสมบัติและคุณสมบัติไฟฟ้าของโพลีเมอร์น้อยมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ไม่มีผลต่อตัวทำให้นุ่มและสารเพิ่มประสิทธิภาพ (addtive) อื่นๆ
- ปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิวที่ได้รับการขัด
- เพิ่มกำลังแรงกระแทกของโพลีเมอร์ โดยเฉพาะชนิดที่ได้รับการเคลือบผิวอนุภาค

แต่เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารที่มีขั้ว จึงเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้ง่าย ทำให้มีข้อเสียซึ่งได้แก่

- เมื่อทำปฏิกิริยากับกรด จะสลายตัวให้คาร์บอนไดออกไซด์ และ เกลือที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นพลาสติกหลายชนิดจึงต้องเพิ่มความแข็งแรงของพันธะระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและโพลีเมอร์ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการทำปฏิกิริยากับกรด
- เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 800 - 900 องศาเซลเซียส จะสลายตัว และ ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ เกิดแคลเซียมออกไซด์ขึ้น
- แคลเซียมคาร์บอเนตมีรูปร่างเป็นผลึกทรงสามเหลี่ยมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโพลีเมอร์ได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสารอื่น
- การทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตแห้ง จำเป็นต้องใช้กระบวนการที่ระวังความชื้นมาก เนื่องจากปริมาณความชื้นที่ต้องการของแคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.06 - 0.2 (Wake, 1971; Seymor, 1978; Katz และ Milwski, 1980; Gachter และ Muller, 1990; Murphy, 1996)

2. <u>แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ หรือ การตกตะกอน</u> (Synthetic or precipitated calcium carbonates)

โดยทั่วไปจะรู้จักในนามของ CCP (Calcium carbonicum praecipitatum) ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคโดยเฉลี่ย	ประมาณ 0.004 ถึง 0.07 ไมโครเมตร
ระดับความขาว	95 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์
การดูดซึมน้ำมัน	35 ถึง 40 กรัมต่อ 100 กรัมพาวเดอร์
พื้นที่ผิวเฉพาะ	32 ถึง 40 กรัมต่อ 100 กรัมพาวเดอร์

คุณสมบัติเฉพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดนี้ คือ มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ทำให้ง่ายต่อการปรับสภาพพื้นผิวของอนุภาค มีระดับความบริสุทธิ์สูง โดยมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ถึง 99.75 เปอร์เซ็นต์ (Wake, 1971) มีโครงสร้างเป็นผลึกอราโกไนท์ และ เนื่องจากมีการปรับสภาพพื้นผิวทำให้มีการกระจายของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตในเนื้อโพลีเมอร์ได้ดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ก็นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุอัดแทรกในพลาสติก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ โดยคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ได้จะเหมือนกับโพลีเมอร์ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ได้จากธรรมชาติ แต่มีข้อดีนอกเหนือจากข้างต้นซึ่ง ได้แก่

- เพิ่มกำลังแรงกระแทกของโพลีเมอร์ได้ดีกว่า
- เพิ่มความเงาบริเวณพื้นผิวพลาสติก เพิ่มความแข็งแรงดึง เพิ่มความต้านทานต่อการตกหัก เพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาด
- เพิ่มมอดุลัสยืดหยุ่นของโพลีเมอร์
- ทนต่อสภาพอากาศได้ดี
- มีอิทธิพลอย่างมากต่อการไหลแผ่ของพลาสติก

สำหรับข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากธรรมชาติจะมีข้อด้อยกว่า ดังนี้

- มีราคาแพงกว่า
- แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดสังเคราะห์มีพื้นที่ผิวเฉพาะใหญ่กว่า ทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นขณะอยู่ในขบวนการสังเคราะห์สูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดนี้ในปริมาณที่สูงได้
- มีผลต่อการลดประสิทธิภาพของ ตัวทำให้นุ่ม สารคงสภาพ (stabilizers) สารหล่อลื่น และสารอื่นๆ (Wake, 1971; Gachter และ Muller, 1990)

3. <u>โดโลไมท์</u> (Dolomite)

โดโลไมท์เป็นแมกนิเซียมคาร์บอเนต และ และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโครงสร้างรวมกันอย่างสมบูรณ์ ($CaMg(CO_3)_2$ หรือ $MgCO_3 \cdot CaCO_3$) มีรูปร่างเป็นผลึก สามารถสังเคราะห์ได้จากเกลือแมกนิเซียม ซึ่งโดยทั่วไปเป็นแมกนิเซียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนต เป็นคาร์บอเนตพื้นฐานที่นำมาใช้มากในการผลิตยา

องค์ประกอบและคุณสมบัติของโดโลไมท์

$CaCO_3$	54.0	เปอร์เซ็นต์
$MgCO_3$	45.6	เปอร์เซ็นต์
Al_2O_3	0.03	เปอร์เซ็นต์
Fe_2O_3	0.2	เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่น	2.85	เปอร์เซ็นต์
ความแข็งโมห์	3	

ระดับความขาว	85-95 เปอร์เซ็นต์
PH	10
พื้นที่ผิวเฉพาะ	1-10 ตารางเมตรต่อกรัม
การดูดซึมน้ำมัน	13-20 กรัมต่อ 100 กรัมพาวเดอร์

โดโลไมท์สามารถนำไปใช้ในขบวนการผลิตพลาสติกเช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ โดยมีคุณสมบัติเด่น คือ มีการกระจายของอนุภาคที่ดี และสามารถทำให้เปียกได้ มีการดูดซึมน้ำมัน และ ประสิทธิภาพของตัวทำให้นุ่มปานกลาง และมีระดับความขาวสูง สำหรับข้อเสียของโดโลไมท์ เนื่องจากการที่โดโลไมท์สามารถละลายในน้ำได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงทำให้มีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพดินฟ้าอากาศได้น้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการสึกกร่อนของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ (Wake, 1971; Katz และ Milwski, 1980)

ข. ดินขาว (Kaolin)

ดินขาวเป็นแร่ธาตุชนิด ไฮดรัส อะลูมิโน ซิลิเกต (Hydrous alumino silicate) รู้จักกันดีในนามของ พอร์ซิเลน เอิร์ธ (porcelain earth) หรือ เคลย์ (clay) หรือ ไชน่าเคลย์ (Chaina clay)

ดินขาวเป็นผลิตผลสุดท้ายของแกรไนท์ (granite) และ เฟล์ดสปาร์ (feldspar) ซึ่งพบได้ทั่วโลก มักพบร่วมกับ ควอตซ์ ไมกา คาร์บอน เหล็ก และ ไททาเนียมออกไซด์ ดินขาวมีรูปร่างเป็นผลึกรูปหกเหลี่ยมแบน (hexagonal pletelet) สองชั้นของไฮดรัส อะลูมิโน ซิลิเกต ประกอบด้วยชั้นต่างๆ ที่มีพันธะทางเคมีของซิลิกาและยิปป์ไซท์ ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กัน

ดินขาวแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่

1. <u>ดินขาวที่ได้จากธรรมชาติ</u> (The natural hydrous form)

เป็นดินขาวที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ประมาณ 1-2 ไมโครเมตร ประกอบไปด้วยสองส่วน คือ คาโอลิไนท์ ประถมภูมิ และ ทุติยภูมิ (primary or soft kaolin และ secondary or ball clay or hard kaolin) โดยดินขาวทุติยภูมินี้จะเป็นการนำดินขาวมาเข้ากระบวนการเพื่อลดปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้ลดลง ซึ่งอย่างน้อยร้อยละ 75 ของอนุภาคทั้งหมดจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร และทำให้มีราคาถูกลงแต่สีไม่สวย จึงมักใช้ในงานที่ไม่เน้นความสวยงามของสีมากนัก

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว ประกอบไปด้วย Al_2O_3 38.8 เปอร์เซ็นต์ SiO_2 45.4 เปอร์เซ็นต์ MgO 0.2 เปอร์เซ็นต์ K_2O 0.97 เปอร์เซ็นต์ Na_2O 0.07 เปอร์เซ็นต์ และ FeO เปลี่ยนแปลงได้

คุณสมบัติเด่นของดินขาวธรรมชาติ มีดังนี้

- มีราคาถูก
- มีระดับความขาวมาก จึงสามารถย้อมสีได้
- ไม่นำไฟฟ้า และปรับปรุงความต้านทานต่อความสั่นสะเทือน
- ทนทานต่อการขัดถู
- ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและกรดที่มีความเข้มข้นสูง
- มีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งส่งผลให้มีความหนืดสูง
- ความเป็นกรดเล็กน้อยของ hydrous form ที่ pH 5.0-5.6 ทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย
- อนุภาคจะเกิดการกระจายอย่างรวดเร็วในพลาสติก โดยเฉพาะเมื่อเติมสารช่วยในการกระจาย หรือ สารลดความตึงผิว
- การที่มีโครงสร้างเป็นผลึกแบนเป็นชั้นๆ ทำให้พื้นผิวของพลาสติกมีความเรียบมัน และเพิ่มความแข็งผิวของพลาสติก
- ลดการดูดซึมน้ำของพลาสติก
- ลดการเกิดรอยร้าวของพลาสติก

การใช้งานร่วมกับเทอร์โมเซต ดินขาวมักใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับพลาสติกเทอร์โมเซตชนิดที่นำมาใช้งานควรมีขนาดน้อยกว่า 44 u (+325 mesh) เนื่องจากวัสดุอัดแทรกที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะทำให้เกิดการกระจายที่ไม่มีระเบียบ การเกิดรอยร้าวและคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่ำลง โดยในการใช้งานต่างๆ คุณสมบัติของสารประกอบมักจะขึ้นอยู่กับระดับการกระจายตัวของวัสดุอัดแทรกและการบรรจุ (packing, P_f) ดังนั้นดินขาวชนิดที่มีการปรับสภาพพื้นผิวจะถูกนำมาใช้งานมากกว่า เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดีกว่าซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพสูงสุดของวัสดุอัดแทรก

การใช้งานร่วมกับเทอร์โมพลาสติก ดินขาวที่มีอนุภาคละเอียดจะมีคุณสมบัติเพิ่มค่ากำลังแรงดึง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดที่มีการปรับสภาพพื้นผิวจะไม่ทำให้เกิดการยืดยาว (elongation) และค่ากำลังแรงกระแทกสูงขึ้น นอกจากนี้ดินขาวยังถูกนำไปใช้ในการผลิตพลาสติกหุ้มสายไฟ เนื่องจากคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

2. <u>ดินขาวสตุ</u> (The calcined anhydrous form) เป็นดินขาวที่ได้รับการเผาเพื่อให้โมเลกุลเกิดการสูญเสียน้ำจนร่วนเป็นผงที่อุณหภูมิประมาณ 750-1000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเมื่อมองเห็นดีเยี่ยม มีความแข็งมากกว่าชนิดธรรมชาติ ปรับปรุงคุณสมบัติการหักเหของแสงให้ดีขึ้น มีความต้านทานความชื้นได้ดี มีการกระจายอนุภาคและควบคุมการไหลแผ่ได้ดีกว่าชนิดธรรมชาติ นอกจากนี้ยังทำให้เทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น แต่มีการหดตัวของพลาสติกมากกว่าวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต

ในกระบวนการผลิตดินขาว เราสามารถจำแนกเกรดของดินขาวตามกรรมวิธีในการผลิต ได้แก่

2.1. Air – floated grade ดินขาวชนิดนี้ผลิตโดยนำสินแร่มาทำให้แห้งผ่านกระบวนการบดและแยกเจือปนออกไป จะสามารถแยกแร่ออกได้เป็นชั้น ๆ ตามธรรมชาติ

2.2. Water – leached grade เป็นดินขาวที่ผ่านกระบวนการแขวนลอยในน้ำ (water suspension) การกำจัดสี และทำให้แยกเป็นส่วนๆ โดยการ เหวี่ยงเพื่อให้เกิดการกระจายของอนุภาค หลังจากนั้นจะถูกนำไปกรองในสุญญากาศเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่แห้งมาผ่านกระบวนการบดเพื่อลดการจับตัวเป็นก้อนในการใช้งานกับพลาสติก

2.3. Beneficiated grade ดินขาวชนิดนี้จะผ่านกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีเพื่อกำจัดสีซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย มีความบริสุทธิ์ และได้วัสดุอัดแทรกที่มีสีขาว (high brightness)

2.4. Calcined grade เป็นดินขาวชนิดที่ใช้อย่างแพร่หลายโดยจะเผาที่อุณหภูมิต่ำๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า หรือเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้สีที่ได้ขาวขึ้น จากนั้นจะนำมาผ่านกระบวนการบดเพื่อลดการจับตัวเป็นก้อนที่เกิดจากการเผา

2.5. Surface – treated grade เป็นดินขาวทุกชนิดข้างต้นที่นำมาผ่านสารปรับสภาพพื้นผิว (surface modifying agent) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า การกระจายตัว การกันน้ำ และเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งานกับพลาสติก

บริเวณปลายของโมเลกุลของดินขาวเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ดินขาวจึงมีแนวโน้มที่จะต่อต้านการกระจายตัว โดยจับตัวกันด้วยพันธะที่แข็งแรง คุณสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ดังนั้นบริเวณพื้นผิวที่ไวจะทำปฏิกิริยากับเกลืออโลหะเพื่อให้ได้การกระจายตัวที่สมบูรณ์

ฉะนั้นการปรับสภาพพื้นผิว (surface treatment) ของดินขาวจะช่วยเพิ่มข้อดีทางกายภาพ โดยปรับปรุงพันธะของโพลีเมอร์ การกระจายตัว การไหลแผ่ นอกจากนี้ความเป็นกรดของดินขาวอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการกับอีพอกซี (epoxy) และไวนิล (vinyl) นอก

เสียจากด้านที่เป็นกรดจะถูกยับยั้งโดยการปรับสภาพพื้นผิวก่อน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการผลิตพลาสติกเกือบทุกชนิด

ทั้ง natural kaolin และ calcined kaolin มีความทนทานต่อสารเคมี การกำจัดน้ำออกในกระบวนการจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1000 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิในกระบวนการทำพลาสติก (Wake, 1971; Katz และ Milwski, 1980; Gachter และ Muller, 1990; Murphy, 1996)

ค. ควอตซ์ (Quartz)

เป็นรูปแบบหนึ่งของซิลิกาธรรมชาติมีลักษณะเป็นผลึก ส่วนใหญ่มักพบเป็นปริซึมรูป 6 เหลี่ยม (Wake, 1971) ประกอบไปด้วย 3 ชนิด ได้แก่ ผง (powder) คริปโตคริสตัลลีน (cryptocrystalline) และ ไมโครคริสตัลลีน (Microcrystalline) ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่ผิวเฉพาะ การดูดซับน้ำมัน และ การดูดซับความชื้น แต่แตกต่างกันเพียงขนาดของผลึก โดยชนิดผงจะมีขนาดผลึก 1.5-10 ไมโครเมตร คริปโตคริสตัลลีน มีขนาดผลึก 2-10 ไมโครเมตร และ ไมโครคริสตัลลีน มีขนาดผลึก 4 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นชนิดที่มีขนาดผลึกละเอียดที่สุด และสามารถรวมตัวเชื่อมกันเป็นกลุ่มก้อนได้ ทำให้คุณสมบัติในการขัดสีวัสดุอื่นให้สึกน้อยกว่า 2 ชนิดแรก (Seymor, 1978) ควอตซ์ทั้ง 3 ชนิด มีความหนาแน่น ประมาณ 2.65 กรัมต่อตารางเซนติเมตร มีความแข็งโมห์ 7 (Wake, 1971; Gachter และ Muller, 1990) และมีพื้นผิวที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ โดยเฉพาะมีความต้านทานต่อกรดสูง ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูริก แต่ไม่ทนต่อด่างที่แรง (Seymor, 1978)

การนำมาใช้งานทางพลาสติกมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพิ่มความแข็งแรงให้กับพลาสติก และลดต้นทุนการผลิต นอกจากข้อดีทั้ง 2 ข้อ ข้างต้นแล้วคอวอตซ์ยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติอื่นๆให้กับพลาสติกได้อีก เช่น เพิ่มมอดุลัสยืดหยุ่น เพิ่มกำลังแรงอัด และกำลังแรงโค้งงอ เพิ่มความเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อน (Seymor, 1978) ลดการเกิดรอยร้าวและการหดตัวของพลาสติก เพิ่มมิติเสถียรภาพเมื่อให้ความร้อนกับพลาสติก (Gachter และ Muller, 1990) และเนื่องจากคุณสมบัติที่เหมือนกับของควอตซ์ทั้ง 3 ชนิด จึงสามารถนำมาใช้งานสลับกันได้ (Seymor, 1978)

นอกจากนี้ควอตซ์ยังสามารถนำมาปรับสภาพพื้นผิวด้วย ออแกนโนฟังชันแนลไซเลน (organo-func tional silanes) และ ไททาเนต (titanates) เพื่อปรับปรุงกายสมบัติและความเข้ากันได้กับพลาสติกให้มากยิ่งขึ้น โดยต้องเลือกใช้ชนิดของไซเลนที่เข้ากันได้กับเรซินแต่ละระบบ (Seymor, 1978) ข้อเสียของควอตซ์มีอยู่ 2 ข้อ ใหญ่ๆ ได้แก่ การมีผลึกที่แข็งมากทำให้

เครื่องมือที่ในขบวนการผลิตพลาสติกสึกได้ ซึ่งสามารถลดการสึกของเครื่องมือนี้ได้โดยการใช้ควอตซ์ชนิดที่มีขนาดผลึกละเอียด เช่น คริปโตคริสตัลลีน และ ไมโครคริสตัลลีน เป็นวัสดุอัดแทรกแทน นอกจากนี้ฝุ่นละอองของผลึกซิลิกาบางชนิดยังทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ โดยหากมีการสูดดมเอาฝุ่นละอองนี้เป็นระยะเวลานานจะเกิดอันตรายกับปอด หรือที่รู้จักกันดีว่า โรคซิลิโคซิส (silicosis) ซึ่ง OSHA ได้กำหนดปริมาณของฝุ่นควอตซ์เมื่อสูดดมเข้าทางระบบหายใจแล้วไม่ทำให้เกิดอันตรายเท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการที่ซิลิกามีความสามารถในการดูดซับสูง อาจทำให้ผิวหนัง หรือ เยื่อเมือกบริเวณที่สัมผัสกับซิลิกาโดยตรงเกิดการแห้งได้ ซึ่งอาการเหล่านี้จะหายไปเองเมื่อเอาซิลิกาออก (Seymor, 1978) ดังนั้นในการใช้งานควอตซ์จึงควรใส่ถุงมือ และผ้าปิดปากและจมูก เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการวิจัยของ Bowen (1963) ได้ทำการทดลองเติมผงซิลิกาที่ปรับสภาพด้วยไวนิลไซเลน ลงในออแกนนิกโพลีเมอร์ที่ใช้ในทางทันตกรรม พบว่า โพลีเมอร์ที่ได้มีกายสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อแข็งของฟันธรรมชาติมากกว่าโพลีเมอร์ที่ไม่ได้เติมผงซิลิกา โดยทำให้ความแข็ง การหดตัว และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง และทำให้กำลังแรงกด มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านทานต่อการเกิดรอยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการละลายตัวในน้ำน้อยลงเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดเดียวกันที่เติมผงซิลิกาซึ่งไม่ได้รับการปรับสภาพด้วยไวนิลไซเลน

Li และคณะ (1985) ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ และ ขนาดของวัสดุอัดแทรกต่อคุณสมบัติของคอมโพสิต โดยเติมวัสดุอัดแทรกแบเรียม โบโรซิลิเกต ที่ทำการปรับสภาพ ขนาด 2 ไมโครเมตร และ 15 ไมโครเมตร ปริมาณต่างๆ กัน ลงไปในโพลีฟีนิลลีน โพลีเมทิลเมทาคริเลต เรซิน ชนิดแข็งตัวด้วยแสง พบว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุอัดแทรกมีผลให้เพิ่มความแข็ง กำลังแรงอัด ความแข็งตึง และลดการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุอัดแทรกขนาด 15 ไมโครเมตร สามารถปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการสึกจากการแปรงฟันได้ดีกว่า ขนาด 2 ไมโครเมตร และการเพิ่มปริมาณวัสดุอัดแทรกจะทำให้การสึกลดลง

จากผลการวิจัยของ Germain และคณะ (1985) ซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของวัสดุอัดแทรก ต่อคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ชนิดไมโครฟิลล์ โดยเติมซิลิกาที่ได้รับการปรับสภาพ ขนาดอนุภาค 20 และ 40 นาโนเมตร ในปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะสามารถเพิ่มความลึกของแสงในการบ่ม ความเสถียรของสี ความแข็ง กำลังแรงอัด ความแข็งตึง ขณะที่การดูดซึมน้ำ และ ความต้านทานการสึกจะลดลง

O'Brien และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ ที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน ต่อการกระจายแสง และความแตกต่างของความเงา (scattering และ contrast gloss) ซึ่งใช้เป็นตัวบอกถึงสีและความใสของวัสดุ ในคอมโพสิต เรซิน และหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทั้งสองกับความขรุขระของพื้นผิวคอมโพสิต เรซิน โดยเติมผงควอตซ์ที่มีรูปร่างเป็นเส้นสั้น (short fiber) และ เม็ดเล็กๆ (granular) ขนาด 1.5-3.3 ไมโครเมตร ในปริมาณ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ผงควอตซ์ที่มีอนุภาคเป็นเม็ดกลมเล็กๆ จะสามารถสะท้อนแสงและทำให้เกิดความเงาได้มากกว่าชนิดเส้น โดยคุณสมบัติทั้งสองนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ ควอตซ์และขนาดอนุภาคลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทั้งสองกับความขรุขระของพื้นผิวคอมโพสิต เป็นแบบผกผันและเชิงเส้นตรง

Calais และคณะ (1988) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของน้ำต่อกำลังแรงโค้งงอของคอมโพสิต เรซิน 3 ชนิด โดยแต่ละชนิดผสมวัสดุอัดแทรกแตกต่างกัน คือ ควอตซ์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว แบเรียม กลาส และ ซิลิกาที่มีลักษณะพรุน พบว่าวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิดไม่ได้ช่วยลดอิทธิพลของน้ำต่อกำลังโค้งงอของคอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับพบว่าอิทธิพลของน้ำอาจมีผลต่อเนื้อคอมโพสิตมากกว่าที่รอยต่อระหว่างอนุภาคของวัสดุอัดแทรกกับเนื้อคอมโพสิต และรอยแตกที่พบบนอนุภาคของซิลิกาพรุนเมื่อแช่ในน้ำนาน น่าจะบ่งบอกได้ว่าน้ำมีผลต่อวัสดุอัดแทรกชนิดนี้น้อยมาก

จากรายงานของ Mandikos และคณะ (2001) ซึ่งได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกและความแข็งของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต 6 ชนิดเปรียบเทียบกับผิวเคลือบฟัน พบว่าคุณสมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่าผิวเคลือบฟันมีความแข็งและความต้านทานการสึกมากกว่าวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ที่ใช้ในการทดสอบทุกชนิด

Bum-Soon Lim และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการสึกของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต 4 ชนิดที่มีการเติมวัสดุอัดแทรกในปริมาณต่างๆ ตั้งแต่ 20-35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ความต้านทานการสึกของคอมโพสิต เรซิน จะเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุอัดแทรก และได้ให้ความเห็นว่าการมีการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคของวัสดุอัดแทรก และเนื้อคอมโพสิตอาจเป็นประการหนึ่งที่สามารถลดอัตราการสึกได้

Chen (2004) ได้ทำการศึกษาผลของวัสดุอัดแทรก 4 ชนิด ได้แก่ ดินขาว ผงแก้ว ซิลิกอนไดออกไซด์ และ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ต่อกลสมบัติของเรซิน อะคริลิกที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใย พบว่าเมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นกำลังแรงกระแทก และ กำลังแรงโค้งงอจะลดลง ขณะที่ความแข็งผิวจะเพิ่มขึ้น และซิลิกอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์จะเพิ่มความแข็งผิวได้มากที่สุด

จากการวิจัยข้างต้นจึงเป็นที่น่าสนใจว่า การเติมวัสดุอัดแทรกลงในพลาสติกที่ใช้สำหรับผลิตซี่ฟันปลอมอะคริลิกจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติความแข็งผิว และความต้านทานการสึกของพลาสติกได้หรือไม่ จึงได้จัดทำโครงการวิจัยนี้ขึ้นเพื่อตอบคำถามดังกล่าว และใช้เป็นแนวทางในการผลิตซี่ฟันปลอมขึ้นใช้เองภายในประเทศในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงปฏิบัติการ ที่ใช้ผลอ้างอิงถึงการศึกษาในสิ่งมีชีวิต เพื่อหาวัสดุที่ให้คุณสมบัติเหมาะสำหรับนำมาใช้ผลิตซี่ฟันปลอม โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสี

ประชากร

วิธีดำเนินงานวิจัยในการศึกษานี้ จะทำการทดสอบ 2 การทดสอบ คือ การทดสอบความแข็งผิว และ การทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี โดยแต่ละการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 20 กลุ่ม ตามชนิด และ ปริมาณวัสดุอัดแทรก 3 ชนิด ที่เติมลงในโพลีเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และ ควอตซ์ ในปริมาณร้อยละ 10, 20 , 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ไม่ได้เติมวัสดุอัดแทรกชนิดใดๆเลย และซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด 4 ยี่ห้อ ได้แก่ Majordent, Cosmo HXL, Hard Pure และ Efucera – P® Simplerr โดยในแต่ละกลุ่มการทดสอบจะมีชิ้นตัวอย่างกลุ่มละ 10 ชิ้น และมีการจัดแบ่งกลุ่มในการทดสอบความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกเหมือนกัน ดังนี้

กลุ่ม 0 คือ กลุ่มควบคุม เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มความร้อนที่ไม่เติมวัสดุอัดแทรกใด ๆ

กลุ่ม 1 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 2 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 3 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่ม 4 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 5 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 6 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 7 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 8 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 9 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 10 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 11 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 12 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 13 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 14 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 15 เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน ที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

กลุ่ม 16 เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Majordent

กลุ่ม 17 เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Cosmo HXL

กลุ่ม 18 เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure

กลุ่ม 19 เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Efucera – P ® Simplerr

การเลือกตำแหน่งซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบ จะเลือกใช้ฟันกรามใหญ่ล่างซี่ที่ 1 ข้างขวาและซ้าย ในการทดสอบความแข็งผิว สำหรับฟันตัดกลางบนขวาและซ้ายจะใช้ในการ

ทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี โดยไม่จำกัดสีของซี่ฟันปลอมอะคริลิกในแต่ละยี่ห้อ แต่ในยี่ห้อเดียวกันจะต้องมีขนาดเท่ากัน และผลิตในคราวเดียวกัน

แผนผังการทดสอบความแข็งผิว และ การทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี

PMMA (control)		= กลุ่มที่ 0
PMMA + $CaCO_3$	10%	= กลุ่มที่ 1
	20%	= กลุ่มที่ 2
	30%	= กลุ่มที่ 3
	40%	= กลุ่มที่ 4
	50%	= กลุ่มที่ 5
PMMA + ดินขาว	10%	= กลุ่มที่ 6
	20%	= กลุ่มที่ 7
	30%	= กลุ่มที่ 8
	40%	= กลุ่มที่ 9
	50%	= กลุ่มที่ 10
PMMA + ควอตซ์	10%	= กลุ่มที่ 11
	20%	= กลุ่มที่ 12
	30%	= กลุ่มที่ 13
	40%	= กลุ่มที่ 14
	50%	= กลุ่มที่ 15
ซี่ฟันปลอมอะคริลิก	Majordent	= กลุ่มที่ 16
	Cosmo HXL	= กลุ่มที่ 17
	Hard Pure	= กลุ่มที่ 18
	Efucera–P® Simplerr	= กลุ่มที่ 19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน (Luthinium, Italy)

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate precipitated GR for analysis, Merck KGaA, Germany)

ดินขาว (Kaolin Ph Eur, Fluka, Switzerland)

ควอตซ์ (Quartz fine ground, Sigma, U.S.A.)

ซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ ได้แก่
- Majordent (Major Prodotti Dentari SPA, Italy)
- Cosmo HXL (Densply Ltd., U.S.A.)
- Hard Pure (Pure Cebu Yamaichi Corporation, Japan)
- Efucera-P® Simplerr (Yamahachi dental MFGM., Co., Japan)

ยาสีคอลเกตฟันรสยอดนิยม (บริษัทคอลเกต ปาล์มโอลีฟ ประเทศไทยจำกัด)

แปรงสีฟัน (ชนิดขนแปรงแข็ง)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอล (Electronic Semi-micro-, Analytical and Precision Balances, Sartorius, รุ่น BP 110S, Germany)

เครื่องผสมสุญญากาศ (Combination Unit, Model D, Whip Mix Corporation, U.S.A.)

เครื่องอัดฟลาสก์ไฮดรอลิก (Hydraulic flask press, รุ่น EWL 5414, Kavo, West Germany)

เครื่องกำจัดขี้ผึ้ง (Boil-out Unit, model EWL 5521, Kavo, West Germany)

เครื่องบ่มอะคริลิกด้วยความร้อน (Curing unit, รุ่น EWL 5518, Kavo, West Germany)

เครื่องตัดฟัน (Low speed cutting machine, รุ่น ISOMET 1000, BUEHLER, U.S.A.)

เครื่องขัดผิววัสดุระบบดิจิตอล (Digital Polishing Machine, รุ่น DPS 3200 Ser. 19965, Imptech, South Africa.)

เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (Digital Ultrasonic Cleansing Unit, Transonic Digital S, รุ่น TP 20703100, Elma, Germany)

เครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค (Microhardness Tester, รุ่น FM-700e, TYPE D, Future-tech CORP., Tokyo, Japan, Vicker indenter No. 33906 HV)

เครื่องควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่าในแนวราบ (Orbital Incubator, รุ่น SI 50, Stuart Scientific CO. LTD., UK)

เครื่องกวนแบบแตกตัว (Dispersion Mixer, Ultra Turrax®, รุ่น T25 basic, IKA Labortechnik, Malaysia)

เครื่องแปรงระบบดิจิตอล (V-8 cross brushing machine, SABRI Dental Enterprises, Inc., U.S.A.)

เครื่องวัดปริมาณความตึง (Dontrix tension gage, Dontrix®, รุ่น 16 OZ, E.T.M. Corporation, 3M Unitek, Monrovia, Calofornia, U.S.A.)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM, Model JSM-5410LV, Jeol, Japan)

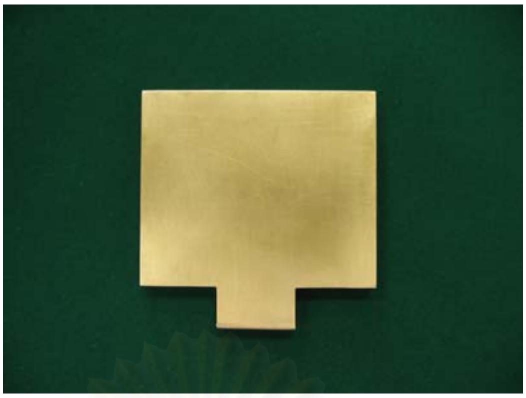
วิธีการทดสอบความแข็งผิว

วิธีทดสอบความแข็งผิวของวัสดุที่ใช้กันทั่วไปมีหลายวิธี ได้แก่ บริเนลล์ นูป วิกเกอร์ รอกเวลล์ และชอร์-เอ ซึ่งการทดสอบแต่ละวิธีจะแตกต่างกันเล็กน้อย และมีข้อดีข้อเสียต่างกัน สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกวิธีการทดสอบความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับวัดความแข็งของวัสดุที่มีความเปราะ จึงเหมาะในการวัดความแข็งผิวของฟันธรรมชาติและฟันปลอม

1. การเตรียมชิ้นตัวอย่าง

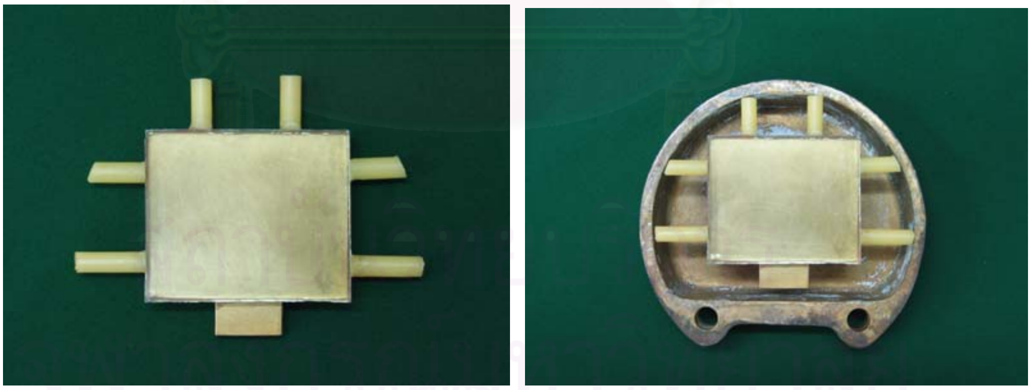
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับโพลีเมทิลเมทาคริเลตกลุ่มที่ 0-15 ซึ่งเป็นกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่เติมวัสดุอัดแทรกชนิดและปริมาณต่างๆ จะมีวิธีการเหมือนกัน ดังนี้

1.1. การเตรียมแม่แบบทองเหลือง ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร โดยมีด้ามจับขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร อยู่ด้านหนึ่งของแม่แบบทองเหลืองใช้สำหรับยึดเข้ากับเครื่องตัดฟัน (Low speed cutting machine, รุ่น ISOMET 1000, BUEHLER, U.S.A.) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงภาพแม่แบบทองเหลืองที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นตัวอย่าง

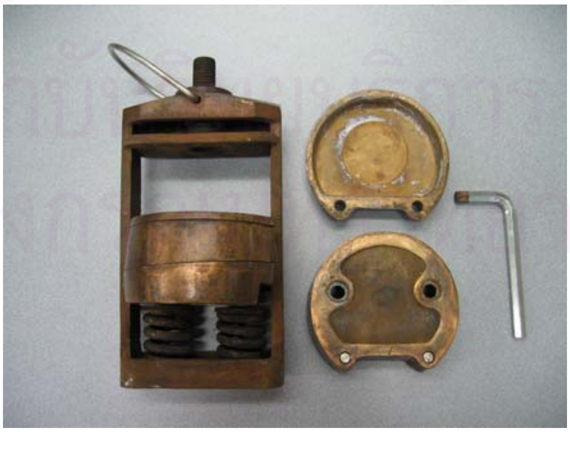
1.2. นำแม่แบบทองเหลืองมายึดกับแผ่นกระจกใสที่ตัดเตรียมไว้ ขนาดกว้าง 5.3 เซนติเมตร ยาว 6.3 เซนติเมตร และหนา 4 มิลลิเมตร ที่ด้านใดด้านหนึ่งของแม่แบบโดยการเคลือบด้วยขี้ผึ้งสีชมพู (pink baseplate wax) โดยรอบแม่แบบ และจะทำให้ง่ายต่อการนำแม่แบบออกจาก ฟลาสก์ส่วนครึ่งล่าง จากนั้นนำขี้ผึ้งสีงาช้างชนิดแท่ง (ivory wax) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร มายึดที่บริเวณรอยต่อระหว่างแม่แบบทองเหลืองและแผ่นกระจก 3 ด้าน ด้านละ 2 ตำแหน่ง โดยให้ความยาวของแท่งขี้ผึ้งเกือบถึงขอบด้านในของฟลาสก์ทองเหลือง เพื่อเป็นทางระบายออกของเรซิน อะคริลิกขณะทำการอัดฟลาสก์ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงภาพแม่แบบทองเหลืองยึดกับแผ่นกระจกใส และขี้ผึ้งสีงาช้าง

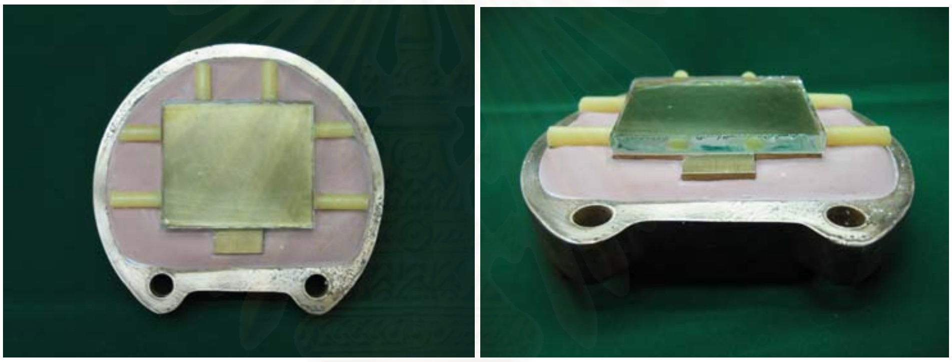
1.3. นำแม่แบบทองเหลืองจากข้อ 1.2. มาลงฟลาสก์ (flasking) ในภาชนะหล่อแบบฟันปลอมทองเหลือง (Hanau flask ejector) (รูปที่ 9) โดยผสมปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris, Whip Mix Corp., Kentucky, U.S.A.) บนเครื่องสั่น (vibrator) เทลงในฟลาสก์ส่วนครึ่งล่าง (lower half of flask) เกลี่ยปูนให้ทั่ว ให้ได้รับปูนประมาณครึ่งหนึ่งของฟลาสก์ส่วนครึ่งล่าง

จากนั้นผสมปลาสเตอร์หินที่มีความแข็งสูง (Type IV ADA Specification No. 25, Vel Mix Classic Pink, Kerr Lab, U.S.A.) ในอัตราส่วนผง 100 กรัม ต่อน้ำ 23 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องผสมสุญญากาศ (Combination Unit, Model D, Whip Mix Corporation, U.S.A.) (รูปที่ 10) เทลงบนปูนปลาสเตอร์ให้ระดับของปลาสเตอร์หินสูงกว่าขอบบนของฟลาสก์ส่วนครึ่งล่างเล็กน้อย หรือหนาประมาณครึ่งนิ้ว เพื่อให้ปลาสเตอร์หินมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะไม่เกิดการแตกหักขณะอัดเรซินอะคริลิกในเครื่องอัดฟลาสก์ แล้วจึงตักปลาสเตอร์หินที่เหลือเล็กน้อยมาป้ายบนแม่แบบทองเหลืองบริเวณด้านที่ไม่ได้ยึดกับกระจกใสให้ทั่ว เพื่อให้ได้รายละเอียดของชิ้นงานและป้องกันการเกิดฟองอากาศบนพื้นผิวของแม่แบบทองเหลือง จากนั้นนำแม่แบบทองเหลืองด้านที่ป้ายปลาสเตอร์หินมาวางลงบนปลาสเตอร์หินในฟลาสก์ส่วนครึ่งล่าง ให้แม่แบบอยู่กึ่งกลางของฟลาสก์และปลายของขี้ผึ้งสีงาช้างเกือบถึงของด้านในของฟลาสก์ โดยขณะวางค่อยๆวางเอียงจากด้านหนึ่งของแม่แบบมาอีกด้านหนึ่งเพื่อไล่ฟองอากาศ และให้ด้านที่เป็นกระจกใสอยู่ด้านบน ค่อยๆเคาะแม่แบบให้จมลงในปลาสเตอร์หินประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาของแม่แบบทองเหลืองโดยรอบ แล้วจึงใช้มีดตัดขี้ผึ้ง (wax knife) ตักปลาสเตอร์หินส่วนเกินออก และระวังไม่ให้เกินขอบด้านในของฟลาสก์ส่วนครึ่งล่าง ซึ่งอาจทำให้ประกบกับฟลาสก์ส่วนครึ่งบน (upper half of flask) ไม่สนิท จากนั้นจึงแต่งผิวของปลาสเตอร์หินให้เรียบ รอจนปูนปลาสเตอร์และปลาสเตอร์หินเย็นและแข็งตัวเต็มที่ ประมาณ 30 นาที จึงทำการตัดแต่งปลาสเตอร์หินไม่ให้มีรอยคอดเว้าที่จะเกิดการล๊อคของปูนในฟลาสก์ส่วนครึ่งล่างและครึ่งบน อันจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นตัวอย่างได้ แล้วขัดแต่งผิวปลาสเตอร์หินให้เรียบด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 800 (Waterproof adhesive paper, type DCC, Sunkyo, TOA, Japan) ตั้งทิ้งไว้จนปูนแห้ง ดังรูปที่ 11



<u>รูปที่ 9</u> แสดงส่วนประกอบของภาชนะหล่อแบบฟันปลอมทองเหลือง

รูปที่ 10 แสดงภาพเครื่องผสมสุญญากาศ (Combination Unit, Model D, Whip Mix Corporation, U.S.A.)



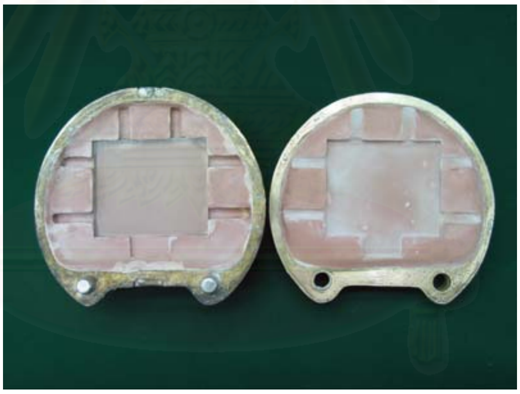
รูปที่ 11 แสดงภาพการลงฟลาสก์แม่แบบทองเหลืองในภาชนะหล่อแบบฟันปลอมทองเหลือง

เมื่อปูนในฟลาสก์ส่วนครึ่งล่างแข็งและแห้งดีแล้ว ใช้พู่กันเบอร์ 8 จุ่มสารคั่นกลาง (tin foil substitute, Stelon) ทาบางๆไปทิศทางเดียวกันบนผิวของปลาสเตอร์หินให้ทั่วแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง การทาสารคั่นกลางในขั้นตอนนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ปลาสเตอร์หินในฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและล่างเชื่อมติดกันทำให้แยกฟลาสก์ทั้งสองส่วนออกจากกันได้ง่าย จากนั้นนำฟลาสก์ส่วนครึ่งบนมาประกบกับฟลาสก์ส่วนครึ่งล่างให้สนิท แล้วผสมปลาสเตอร์หินด้วยเครื่องผสมสุญญากาศตามอัตราส่วนข้างต้น ค่อยๆเทลงในฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและล่างที่ประกบกันบนเครื่องสั่น โดยเริ่มเทจากจุดเดียวแล้วปล่อยให้ปลาสเตอร์หินค่อยๆไหลไปจนคลุมแม่แบบและกระจกใสจนทั่ว แล้วจึงเทส่วนที่เหลือลงไปในฟลาสก์จนปลาสเตอร์หินมีความหนาประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงฟลาสก์ส่วนครึ่งบน หรือหนาประมาณครึ่งนิ้ว จากนั้นผสมปูนปลาสเตอร์บนเครื่องสั่นเททับอีกชั้นจนเต็มฟลาสก์ส่วนครึ่งบน ปิดฝาฟลาสก์แล้วนำไปอัดทิ้งไว้ในเครื่องอัดฟลาสก์ไฮโดรลิก (Hydraulic flask press, model EWL 5414, Kavo, West Germany) (รูปที่ 12) ด้วยแรงดัน 20,000 นิวตัน นาน 30 นาที จนปูนเย็นลงและแข็งตัวเต็มที่

รูปที่ 12 แสดงภาพเครื่องอัดฟลาสก์ไฮโดรลิก (Hydraulic flask press, model EWL 5414, Kavo, West Germany)

1.4. นำภาชนะหล่อแบบฟันปลอมที่ลงฟลาสก์เรียบร้อยแล้ว มาแกะแยกฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและล่างออกจากกัน จะพบว่าแผ่นกระจกใสจะติดอยู่กับฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและแม่แบบทองเหลืองจะติดอยู่กับฟลาสก์ส่วนครึ่งล่าง นำฟลาสก์ทั้งสองส่วนไปกำจัดขี้ผึ้งและสิ่งปนเปื้อนที่ตกค้างอยู่ด้วยเครื่องกำจัดขี้ผึ้ง (Boil-out Unit, model EWL 5521, Kavo, West Germany) (รูปที่ 13) โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แกะแม่แบบทองเหลืองออกจากฟลาสก์ส่วนครึ่งล่างอย่างระมัดระวังไม่ให้ปลาสเตอร์หินบิ่นแตกเสียหาย ทำความสะอาดฟลาสก์ทั้งสองส่วนด้วยน้ำอุ่นอีกครั้งแล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง (รูปที่ 14) จากนั้นใช้พู่กันเบอร์ 8 จุ่มสารคั่นกลางทางบางๆให้ทั่วบริเวณที่เป็นปลาสเตอร์หินทั้งในฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและครึ่งล่างในขณะที่ปูนยังร้อนอยู่ โดยทาไปในทิศทางเดียวกัน การทาสารคั่นกลางในขั้นตอนนี้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำจากปลาสเตอร์หินซึมสัมผัสกับเรซิน อะคริลิก และเพื่อไม่ให้เรซิน อะคริลิกแทรกเข้าไปในเนื้อของปลาสเตอร์หิน ซึ่งจะแยกออกยากและเสียเวลามาก จากนั้นปล่อยให้ปูนเย็นตัวลงและสารคั่นกลางแห้งสนิท

รูปที่ 13 แสดงภาพเครื่องกำจัดขี้ผึ้ง (Boil-out Unit, model EWL 5521, Kavo, West Germany)



รูปที่ 14 แสดงภาพฟลาสก์ส่วนครึ่งบน และ ล่างหลังลงฟลาสก์เสร็จ

1.5. ชั่งส่วนผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต และวัสดุอัดแทรกชนิดต่างๆ (รูปที่ 15) ให้ได้สัดส่วนตามเปอร์เซ็นต์ของวัสดุอัดแทรกที่ต้องการในแต่ละกลุ่ม (ดังตารางที่ 2) และชั่งโมโนเมอร์ในอัตราส่วน ผงต่อน้ำ เท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอล (Electronic Semi-micro-, Analytical and Precision Balances, Sartorius, รุ่น BP 110S, Germany) (รูปที่ 16) ที่มีความเที่ยงตรงอย่างน้อย 0.1 มิลลิกรัม

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณของผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต วัสดุอัดแทรก และโมโนเมอร์ตามเปอร์เซ็นต์ของวัสดุอัดแทรก

ร้อยละวัสดุอัดแทรก (%)	ปริมาณ PMMA (gm.)	ปริมาณวัสดุอัดแทรก (gm.)	ปริมาณโมโนเมอร์ (gm.)
0 %	30	0	15
10%	27	3	15
20%	24	6	15
30%	21	9	15
40%	18	12	15
50%	15	15	15

ก. ข.

ค. ง.

รูปที่ 15 แสดงภาพลักษณะ (ก) ผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต, (ข) ผงแคลเซียมคาร์บอเนต, (ค) ผงดินขาว, (ง) ผงควอตซ์

รูปที่ 16 แสดงภาพเครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอล (Electronic Semi-micro-, Analytical and Precision Balances, Sartorius, รุ่น BP 110S, Germany)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

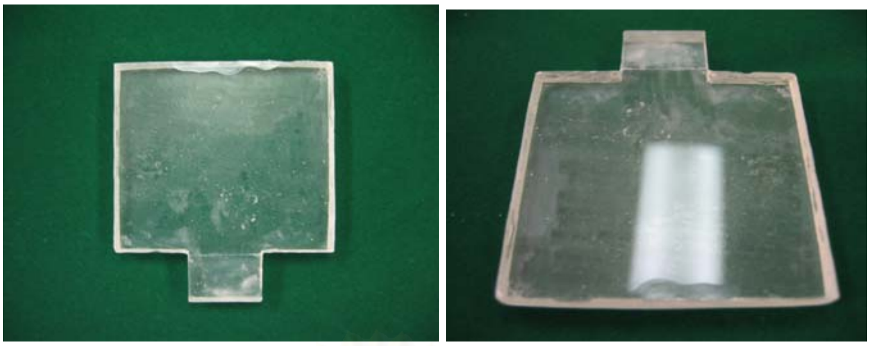
จากนั้นผสมส่วนผงของโพลีเมทิลเมทาคริเลตและวัสดุอัดแทรกให้เข้ากัน โดยใช้พายผสมคนสารทั้งสองในถ้วยผสมเป็นเวลา 10 นาที จนกระทั่งมองดูแล้วเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทโมโนเมอร์ลงในส่วนผง ผสมทั้งสองส่วนให้เข้ากันภายในเวลา 1-2 นาที ปิดฝาให้สนิท รอจนส่วนผสมอยู่ในระยะอ่อนนุ่มปั้นเป็นก้อนได้ ตักส่วนผสมออกจากถ้วยแล้วอัดเข้าไปในฟลาสก์ส่วนครึ่งล่างกดส่วนผสมให้กระจายจนทั่วเบ้าและมีปริมาตรเกินไว้เล็กน้อย ปิดด้วยฟลาสก์ส่วนครึ่งบน แล้วนำไปเข้าเครื่องอัดฟลาสก์ไฮโดรลิกที่แรงดัน 20,000 นิวตัน โดยค่อยๆเพิ่มแรงดันจนกระทั่งฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและล่างประกบกันสนิท รอจนแน่ใจว่าไม่มีส่วนผสมไหลเกินออกมาอีก ตัดส่วนเกินทิ้ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีกประมาณ 60 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันสมบูรณ์

1.6. นำภาชนะหล่อแบบฟันปลอมที่ผ่านการอัดเรียบร้อยแล้วไปบ่มในเครื่องบ่มเรซิน อะคริลิก (Curing unit, model EWL 5518, Kavo, West Germany) (รูปที่ 17) ด้วยวิธีการบ่มระยะยาวในน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิ 73.9 องศาเซลเซียส ต่อเนื่องเป็นเวลา 9 ชั่วโมง หลังบ่มเสร็จแล้วนำภาชนะหล่อแบบฟันปลอมมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

<u>รูปที่ 17</u> แสดงภาพเครื่องบ่ม เรซิน อะคริลิก (Curing unit, model EWL 5518, Kavo, West Germany)

1.7. เมื่อภาชนะหล่อแบบฟันปลอมเย็นดีแล้ว แยกฟลาสก์ส่วนครึ่งบนและล่างออกจากกัน แล้วใช้มีดตัดขี้ผึ้งค่อยๆแกะชิ้นเรซิน อะคริลิกออกจากภาชนะหล่อแบบฟันปลอม ระวังอย่าให้เกิดการบิ่นแตกของปลาสเตอร์หิน นำชิ้นเรซิน อะคริลิกที่ได้มากรอแต่งส่วนเกินออกด้วยหัวกรอคาร์ไบด์สำหรับกรออะคริลิก (acrylic carbide bur) และตรวจสอบความสมบูรณ์ของชิ้นเรซิน อะคริลิกที่ได้โดยด้านที่ติดกระจกใสต้องเรียบมันและไม่มีรูพรุน ดังรูปที่ 18

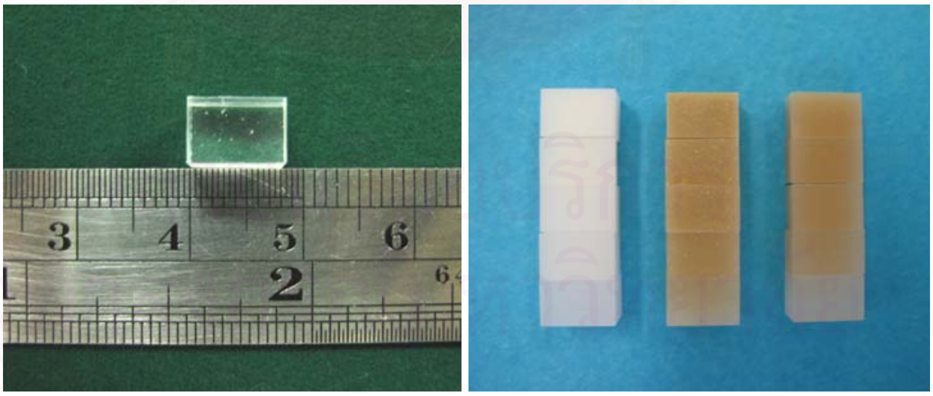
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



<u>รูปที่ 18</u>   แสดงชิ้นเรซิน อะคริลิกที่ได้หลังบ่ม มีลักษณะเรียบมันและไม่มีรูพรุน

<u>หมายเหตุ</u>   กรณีที่ไม่มีการบิ่นแตกของปลาสเตอร์หินขณะแกะชิ้นตัวอย่าง   และกระจกใสไม่มีรอยแตกร้าว   ก็สามารถนำภาชนะหล่อแบบฟันปลอมไปอัดเรซินอะคริลิกในครั้งต่อไปได้อีก   แต่ต้องสังเกตว่าหากชั้นแผ่นฟิล์มของสารคั่นกลางมีการหลุดลอกหรือแยกตัวออกจากปลาสเตอร์หินให้ทาสารคั่นกลางซ้ำใหม่และรอให้แห้งสนิทก่อนทำการอัดเรซินอะคริลิกในครั้งต่อไป

1.8. นำชิ้นเรซิน อะคริลิกที่ได้มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 8 มิลลิเมตร (รูปที่ 19) ด้วยเครื่องตัดฟัน (Low speed cutting machine, รุ่น ISOMET 1000, BUEHLER, U.S.A.) (รูปที่ 20) จากนั้นเลือกชิ้นตัวอย่างที่ได้ขนาด และมีผิวเรียบมัน ไม่มีรูพรุนและไม่มีรอยขีดข่วนกลุ่มละ 10 ชิ้น เพื่อนำมาทำฐานยึดด้วยเรซินหล่อใสในขั้นตอนต่อไป



ก.   ข.   ค.   ง.

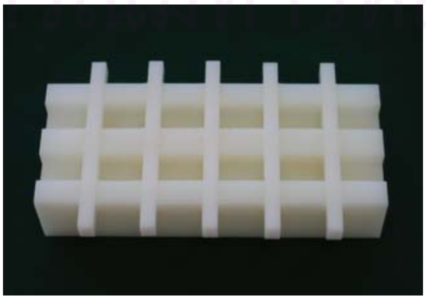
<u>รูปที่ 19</u>   แสดง (ก) ชิ้นเรซิน อะคริลิก ขนาด 5 x 8 มิลลิเมตร หลังตัดด้วยเครื่องตัดฟัน, (ข) แคลเซียมคาร์บอเนต, (ค) ดินขาว, (ง) ควอตซ์

<u>รูปที่ 20</u> แสดงภาพเครื่องตัดฟัน (Low speed cutting machine, รุ่น ISOMET 1000, BUEHLER, U.S.A.)

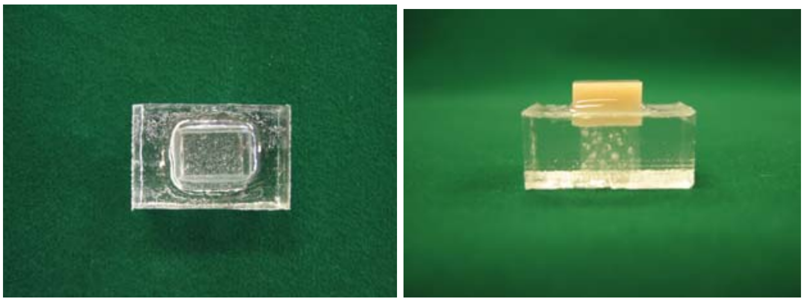
<u>หมายเหตุ</u> ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความแข็งผิวจะนำไปใช้เป็นชิ้นตัวอย่างในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี เพื่อลดปริมาณชิ้นตัวอย่างในการวิจัย เนื่องจากการทำชิ้นตัวอย่างทำได้ยากและเสียเวลามาก ดังนั้นการเตรียมชิ้นตัวอย่างในการทดสอบความแข็งผิวจึงต้องมีขนาดพอดีที่จะยึดเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอลได้ โดยฐานเรซินจะมีความกว้าง 13 มิลลิเมตร ยาว19 สูง 8.5 มิลลิเมตร และมีชิ้นตัวอย่างฝังอยู่ตรงกลาง มีด้านผิวเรียบมันอยู่สูงจากขอบบนของฐาน 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 22

1.9. นำชิ้นเรซิน อะคริลิกที่เหลือจากการตัดในข้อ 1.8. มาตัดให้ได้ขนาด กว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 8 มิลลิเมตร และสูง 6.5 มิลลิเมตร ยึดใต้ชิ้นตัวอย่างที่ตัดเสร็จเรียบร้อยจากข้อ 1.8. ด้วยกาวเรซิน ทำให้ด้านหน้าตัดที่เรียบมันของชิ้นตัวอย่างอยู่สูงจากขอบบนของฐานเรซิน 3 มิลลิเมตร และ ขนานกับแนวราบ

1.10. นำแม่พิมพ์พลาสติกสำหรับทำฐานยึดชิ้นตัวอย่างเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอลมาทาวาสลินให้ทั่ว (รูปที่ 21) นำชิ้นตัวอย่างจากข้อ 1.9. มาวางในแม่พิมพ์ แล้วจึงผสมเรซินหล่อใสเทลงในแม่พิมพ์จนเต็ม ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเรซินแข็งตัวจึงแกะชิ้นตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ ทำการตัดแต่งเรซินส่วนเกินด้วยคัตเตอร์



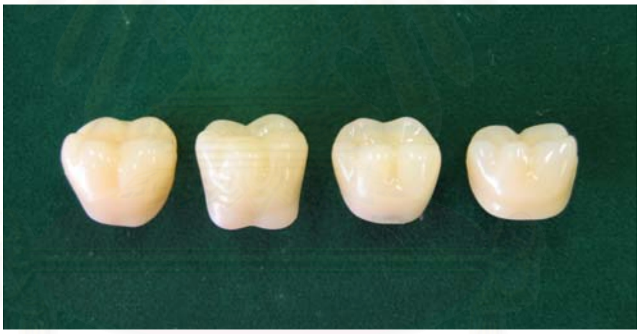
<u>รูปที่ 21</u> แสดงแม่พิมพ์พลาสติกสำหรับทำฐานยึดชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 22 แสดงชิ้นตัวอย่างโพลีเมทิลเมทาคริเลต หลังทำฐานยึดด้วยเรซินหล่อใส

การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับกลุ่มที่ 16-19 จะมีวิธีการเตรียมเหมือนกัน โดยในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ซี่ฟันปลอมอะคริลิกฟันหลัง ได้แก่ ฟันกรามใหญ่ซี่ที่ 1 ทั้งซ้ายและขวา อย่างละ 5 ซี่ ของแต่ละยี่ห้อมาเตรียมชิ้นตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.11. นำซี่ฟันปลอมอะคริลิกออกมาจากแผงฟัน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษทิชชูจนไม่มีขี้ผึ้งติด (รูปที่ 23)



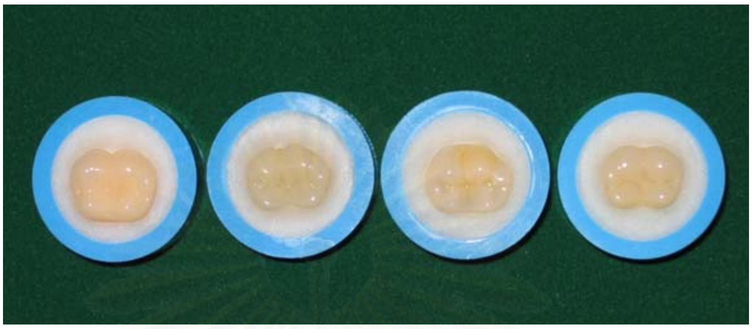
ก. ข. ค. ง.

รูปที่ 23 แสดงภาพซี่ฟันปลอมอะคริลิกหลัง 4 ยี่ห้อ (ก) Majordent, (ข) Cosmo HXL, (ค) Hard Pure, (ง) Efucera–P® Simplerr

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.12. นำเรซิน อะคริลิกชนิดที่ใช้ทำถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล (Custom Tray Material, Fastray™, Bosworth Compamy, U.S.A.) มาผสมในถ้วยผสมยางให้มีลักษณะเหลวเทลงในท่อน้ำพลาสติกพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตรสูง 1 เซนติเมตรที่ตัดและขัดเตรียมไว้บนแผ่นกระเบื้อง

1.13. เมื่อเรซิน อะคริลิกเริ่มแข็งตัว จึงนำซี่ฟันปลอมที่เตรียมไว้ฝังลงในเรซิน โดยให้ด้านบดเคี้ยวของซี่ฟันปลอมสูงจากเรซินประมาณ 3 มิลลิเมตร รอจนเรซิน อะคริลิกแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 24



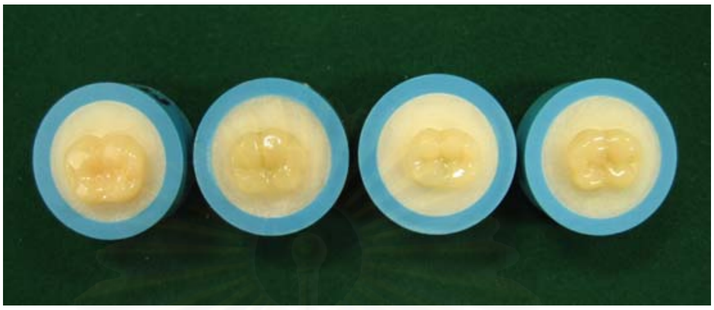
ก. ข. ค. ง.

รูปที่ 24 แสดงซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ หลังฝังในท่อน้ำพลาสติกพีวีซี ด้วยอะครอลิก เรซินชนิดที่ใช้ทำถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล (ก) Majordent, (ข) Cosmo HXL, (ค) Hard Pure, (ง) Efucera–P® Simplerr

1.14. นำมาขัดพื้นผิวด้านสบฟันที่จะทำการทดสอบ โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุระบบดิจิตอล (Digital Polishing Machine, รุ่น DPS 3200 Ser. 19965, Imptech, South Africa.) (รูปที่ 25) และกระดาษทรายน้ำละเอียด เบอร์ 1200 ความเร็วในการขัด 100 รอบต่อนาที เพื่อให้เกิดพื้นผิวที่เรียบและขนานกับแนวระนาบ ขัดออกประมาณ 0.5 มิลลิเมตร หรือประมาณ 10 วินาที เพื่อให้ไม่ลึกเกินผิวชั้นนอกของซี่ฟันปลอมอะคริลิก

รูปที่ 25 แสดงภาพเครื่องขัดผิววัสดุระบบดิจิตอล (Digital Polishing Machine, รุ่น DPS 3200 Ser. 19965, Imptech, South Africa.)

1.15. นำมาขัดเบา ๆ ด้วยหัวขัดสักหลาดซึ่งต่อกับเครื่องไมโครมอเตอร์ โดยไม่ให้เกิดความร้อน ด้วยความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที ให้พื้นผิวที่ต้องการทดสอบมีความมันเป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้สามารถมองเห็นรอยกดจากกล้องจุลทรรศน์ได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 26



ก. ข. ค. ง.

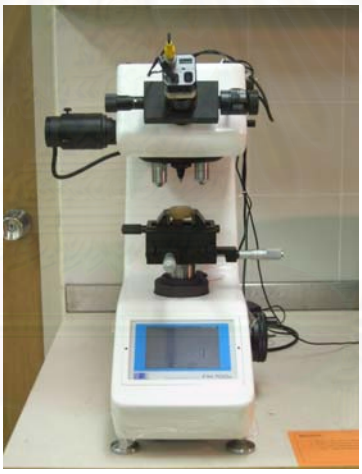
รูปที่ 26 แสดงชิ้นตัวอย่างซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ หลังขัดด้วยหัวสักหลาด (ก) Majordent, (ข) Cosmo HXL, (ค) Hard Pure, (ง) Efucera–P® Simplerr

2. ขั้นตอนการวัดความแข็งผิว

ขั้นตอนการวัดเริ่มจากนำชิ้นตัวอย่างที่ได้ทั้งหมดมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (Digital Ultrasonic Cleansing Unit, Transonic Digital S, รุ่น TP 20703100, Elma, Germany) (รูปที่ 27) เป็นเวลา 15 วินาที ซับให้แห้งด้วยกระดาษซับที่สะอาด จากนั้นนำทำการทดสอบความแข็งผิวและบันทึกผลทีละกลุ่ม โดยนำชิ้นตัวอย่างมายึดเข้ากับเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค (Microhardness Tester, รุ่น FM-700e, TYPE D, Future-tech CORP., Tokyo, Japan, Vicker indenter No. 33906 HV) (รูปที่ 28) และเลือกกดบริเวณที่มีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน ซึ่งดูได้จากกล้องจุลทรรศน์ของเครื่องวัดความแข็งผิว กดชิ้นทดสอบด้วยหัวกดวิกเกอร์ (Vicker's indenter) ด้วยแรงและเวลาตามมาตรฐานของเครื่อง คือ 500 กรัม (4.905 N) เป็นเวลา 15 วินาที (คู่มือการใช้งานเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค; Mandicos และคณะ, 2001) ตรวจดูลักษณะรอยกดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ โดยจะต้องมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เส้นทแยงมุมทั้งสองมีความยาวใกล้เคียงกัน ถ้ารอยกดที่ได้มีความแตกต่างไปจากนี้ จะไม่นำข้อมูลมาใช้ และทำการกดใหม่อีกครั้งในบริเวณอื่น จากนั้นวัดความยาวของเส้นทแยงมุมทั้งสองเส้น ซึ่งเครื่องจะคำนวณออกมาเป็นค่าความแข็งผิวในหน่วยวิกเกอร์ (Vicker hardness number–VHN) โดยอัตโนมัติ ทำการกดชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 5 ครั้งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง บันทึกผลที่ได้ และทำการทดสอบจนครบทุกกลุ่ม

สำหรับในกลุ่มที่ 16-19 ซึ่งเป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ จะกดบริเวณด้านบดเคี้ยวของซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่ทำการขัดเรียบร้อยแล้ว โดยมีวิธีการกดเช่นเดียวกับในกลุ่มที่ 0-15

รูปที่ 27 แสดงภาพเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (Digital Ultrasonic Cleansing Unit, Transonic Digital S, รุ่น TP 20703100, Elma, Germany)



รูปที่ 28 แสดงภาพเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค (Microhardness Tester, รุ่น FM-700e, TYPE D, Future-tech CORP., Tokyo, Japan, Vicker indenter No. 33906 HV)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้ในแต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม เอสพีเอสเอส รุ่น 10.0 โดยหาค่าความแข็งผิวเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม และตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลในแต่ละกลุ่ม โดยใช้วิธี One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test แล้วทำการเปรียบเทียบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-WAY Analysis of Variance) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มา

ทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของแต่ละกลุ่ม ด้วยวิธี Levene's Test แล้วจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) แบบ Dunnett's C เพื่อหาความแตกต่างของค่าความแข็งผิวเฉลี่ยโดยการจับคู่ทีละกลุ่ม จนครบทุกกลุ่ม

วิธีการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าการสึกภายในช่องปากเป็นขบวนการที่ซับซ้อน และยังมีความแตกต่างกันในแต่ละบุคคล จึงเป็นการยากที่จะสร้างให้เกิดสภาวะต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการสึกได้ในการทดสอบเพียงครั้งเดียว ด้วยเหตุนี้ปัญหาการสึกอันเนื่องมาจากการแปรงฟันจึงได้ถูกหยิบยกขึ้นมาพิจารณา เนื่องจากเป็นปัญหาหนึ่งของการสึก และอาจเป็นปัญหาสำคัญเฉพาะสำหรับวัสดุที่ได้รับการแปรงฟันเท่านั้น เช่น วัสดุที่ใช้อยู่บริเวณพื้นผิวด้านริมฝีปาก ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับการสึกสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การทดสอบทางคลินิก การวัดการสึกโดยใช้เครื่องจำลองสภาพการบดเคี้ยวในห้องปฏิบัติการ การวัดการสึกจากคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความแข็ง หรือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นต้น (Craig และ Powers, 1975) สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบการสึกโดยดัดแปลงมาจากแนวทางของ ISO/TS 14569 -1 ในปี 1999 เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการประเมินความต้านทานการสึกจากการแปรงฟัน

1. การเตรียมชิ้นตัวอย่าง

ในกลุ่มที่ 0-15 จะใช้ชิ้นตัวอย่างที่นำมาจากการทดสอบความแข็งผิว ดังนั้นจึงมีการเตรียมชิ้นตัวอย่างเฉพาะในกลุ่มที่ 16-19 ซึ่งเป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ ซึ่งได้แก่ ยี่ห้อ Majordent , Cosmo HXL , Hard Pure และ Efucera – P ® Simplerr ตามลำดับเท่านั้น (รูปที่ 29) โดยนำซี่ฟันปลอมอะคริลิกฟันหน้า ได้แก่ ฟันตัดกลางบนซ้ายและขวา อย่างละ 5 ซี่ ของแต่ละยี่ห้อมาเตรียมชิ้นตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. ข. ค. ง.

รูปที่ 29 แสดงภาพซี่ฟันปลอมอะคริลิกหน้า 4 ยี่ห้อ (ก) Majordent, (ข) Cosmo HXL, (ค) Hard Pure, (ง) Efucera–P® Simplerr

1.1. นำซี่ฟันปลอมอะคริลิกออกมาจากแผงฟันแล้ว เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษทิชชูจนไม่มีขี้ผึ้งติด

1.2. นำซี่ฟันปลอมอะคริลิกมากรอตัดบริเวณด้านปลายฟัน ด้านใกล้กลาง ด้านไกลกลาง และ ด้านคอฟันออก ให้เหลือบริเวณส่วนกลางฟันที่มีลักษณะเรียบเป็นระนาบ ไม่โค้งนูน ขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร และ ยาว 8 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมให้มีขนาดเท่ากับขนาดของชิ้นตัวอย่างในกลุ่มที่ 0-15

1.3. นำซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่กรอตัดเรียบร้อยแล้ว มาวางในแม่พิมพ์พลาสติกที่ใช้เตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับเครื่องแปรงระบบดิจิตอลซึ่งทาวาสลินไว้เรียบร้อยแล้ว โดยใช้ดินน้ำมันรองด้านลิ้นของซี่ฟันปลอม และให้ด้านริมฝีปากสูงจากเรซินประมาณ 3 มิลลิเมตรโดยรอบและขนานกับแนวระนาบมากที่สุด

1.4. นำเรซินหล่อใสมาผสม และ เทลงในแม่พิมพ์จนเต็ม ตั้งทิ้งไว้จนเรซินแข็งตัวอย่างสมบูรณ์จึงแกะชิ้นตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ ทำการตัดแต่งเรซินส่วนเกินด้วยคัตเตอร์แต่ไม่ต้องขัดพื้นผิวด้านหน้าของซี่ฟันปลอมแต่อย่างใด (รูปที่ 30)

ก. ข. ค. ง.

รูปที่ 30 แสดงชิ้นตัวอย่างซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ หลังทำฐานยึดด้วยเรซินหล่อใส (ก) Majordent, (ข) Cosmo HXL, (ค) Hard Pure, (ง) Efucera–P® Simplerr

2. ขั้นตอนการเตรียมแปรงสีฟัน

แปรงสีฟันที่ใช้จะมีลักษณะเป็นขนแปรงไนลอน 4 แถว หน้าตัดเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนแปรง 0.01 นิ้ว (Winkler และคณะ, 1992) และมีความแข็งตึงของขนแปรง อยู่ในระดับ 7 หรือ 9 -10 เซนตินิวตันต่อตารางเมตร ซึ่งจัดเป็นขนแปรงชนิดแข็ง ตาม ISO 8627 ในปี 1987 มีด้ามจับตรง

นำแปรงสีฟันมาเจาะรูเพื่อใช้ยึดเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอล โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู คือ ที่ 67 มิลลิเมตร วัดจากปลายหัวแปรง และที่ 50.8 มิลลิเมตร วัดจากจุดศูนย์กลางของรูแรก และตัดความยาวด้ามแปรงส่วนเกินซึ่งจะกีดขวางเมื่อนำไปยึดเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอลออก และแช่น้ำดีไอออไนซ์ 1 คืน ก่อนทำการทดสอบ ดังรูปที่ 31

รูปที่ 31 แสดงแปรงสีฟันที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี

3. ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี

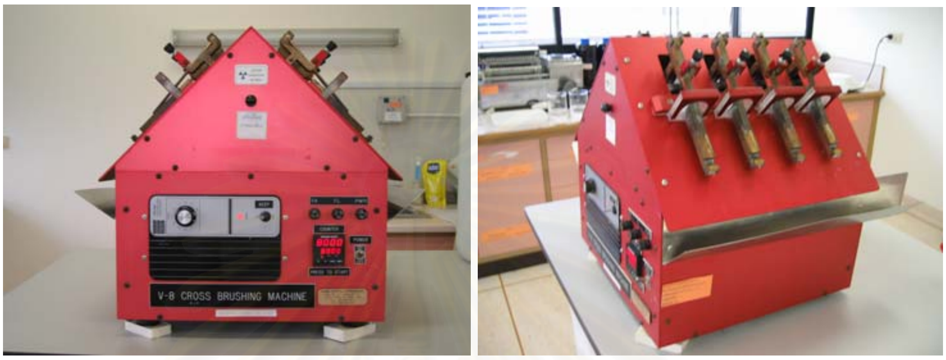
นำชิ้นตัวอย่างทั้งหมดมาแช่ในน้ำกลั่นที่รักษาอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่าในแนวราบ (Orbital Incubator, รุ่น SI 50, Stuart Scientific CO. LTD., UK) (รูปที่ 32) เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำมาทดสอบ จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ แล้วทำความสะอาดอีกครั้งในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 15 นาที นำชิ้นตัวอย่างที่ทำความสะอาดแล้วออกมาทีละชิ้นซับให้แห้งด้วยกระดาษซับ หรือ ผ้าแห้ง จนกระทั่งมองแล้วไม่ชื้น จากนั้นแกว่งในอากาศเป็นเวลา 15 วินาที จึงชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอลที่มีความแม่นยำ 0.1 มิลลิกรัม ภายในเวลา 1 นาที หลังจากนำชิ้นตัวอย่างออกจากน้ำ แล้วบันทึกผลเป็นมวลที่ 1 (m_1) ทำจนครบชิ้นตัวอย่างทุกกลุ่ม (ISO/TS 14569 –1)

<u>รูปที่ 32</u> แสดงภาพเครื่องควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่าในแนวราบ (Orbital Incubator, รุ่น SI 50, Stuart Scientific CO. LTD., UK)

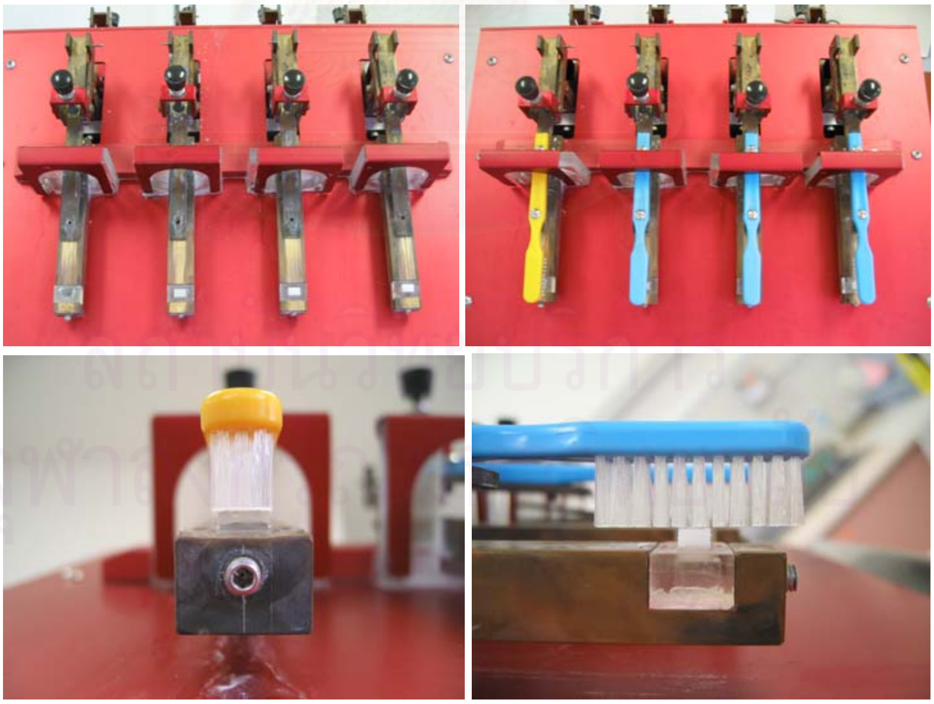
เนื่องจากเครื่องแปรงระบบดิจิตอล (V-8 cross brushing machine, SABRI Dental Enterprises, Inc., U.S.A.) (รูปที่ 33) สามารถทำการแปรงได้พร้อมกันคราวละ 8 ชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นจึงจัดกลุ่มในการทดสอบและบันทึกผลออกเป็น 4 ชุด ตามชนิดของวัสดุอัดแทรก โดยกลุ่มที่ 0-5 จะทำการทดสอบและบันทึกผลพร้อมกัน จากนั้นจึงทำการทดสอบกลุ่มที่ 6-10, 11-15 และกลุ่มที่ 16-19 พร้อมกันตามลำดับ

<u>วิธีการแปรง</u> นำแปรงสีฟันที่เตรียมไว้ และชิ้นตัวอย่างที่ทำการบันทึกมวลที่ 1 เรียบร้อยแล้วมายึดเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอล (รูปที่ 34) ทำการแปรงด้วยแรง 250 กรัม อัตราเร็ว 70 รอบต่อนาที เป็นจำนวน 80,000 รอบ (ISO/TS 14569 –1; Kafalias และคณะ, 1963) โดยขณะแปรงชิ้นตัวอย่างจะต้องจุ่มอยู่ในส่วนผสมของยาสีฟันกับน้ำดีไอออไนซ์ (รูปที่ 35) ที่ผสมด้วยเครื่องกวนแบบแตกตัว (Dispersion Mixer, Ultra Turrax®, รุ่น T25 basic, IKA Labortechnik, Malaysia) (รูปที่ 36) ในอัตราส่วน 2 กรัมของน้ำดีไอออไนซ์ ต่อ 1 กรัมของยาสีฟัน (ยาสีฟันคอลเกต รสยอดนิยม, บริษัทคอลเกต ปาล์มโอลีฟ ประเทศไทยจำกัด) ที่มีลักษณะตาม ISO 11609 ในปี 1995 หลังจากแปรงชิ้นตัวอย่างเสร็จในแต่ละรอบ ให้ยกแปรงสีฟันขึ้นโดยไม่ทำให้ขนแปรงงอถอดชิ้นตัวอย่างที่แปรงแล้วออกจากเครื่อง ทำความสะอาดชิ้นตัวอย่างและทำให้แห้งด้วยวิธีการเดียวกับข้างต้น ชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างภายใน 1 นาทีหลังจากนำชิ้นตัวอย่างออกจากน้ำด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอลที่มีความแม่น 0.1 มิลลิกรัม บันทึกผล เป็นมวลที่ 2 (m_2) จากนั้นเปลี่ยนชิ้นตัวอย่างชุดใหม่ยึดเข้ากับเครื่องแปรง ก่อนที่จะเริ่มการแปรงในแต่ละรอบ ต้องตั้งค่าความตึงของแปรงสีฟันต่อชิ้นทดสอบที่บริเวณหัวแปรง ด้วยเครื่องวัดปริมาณความตึง (Dontrix tension gage, Dontrix®, รุ่น 16 OZ, E.T.M. Corporation, 3M Unitek, Monrovia, Calofornia, U.S.A.) โดยขณะตั้งค่าความตึงเครื่องวัดปริมาณความตึงจะต้องตั้งฉากกับด้ามแปรง ดึงจนกระทั่งด้ามแปรงขนานกับแท่นยึดชิ้นตัวอย่าง และได้แรง 250 กรัม (2.4525 N) ตามที่กำหนด และตรวจสอบซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้งก่อนเริ่ม

แปรง (รูปที่ 37 และ 38) ตลอดการทดสอบขนแปรงจะต้องแช่อยู่ในน้ำดีไอออไนซ์ หรือส่วนผสมของยาสีฟันและน้ำดีไอออไนซ์เพื่อไม่ให้ขนแปรงแห้ง เมื่อแปรงชิ้นตัวอย่างครบในแต่ละกลุ่มให้เปลี่ยนแปรงสีฟันใหม่ทุกครั้งก่อนเริ่มแปรงชิ้นตัวอย่างในกลุ่มต่อไป ทำการแปรงและชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจนครบทุกชิ้น (ISO/TS 14569 –1)



รูปที่ 33 แสดงภาพเครื่องแปรงระบบดิจิตอล (V-8 cross brushing machine, SABRI Dental Enterprises, Inc., U.S.A.)

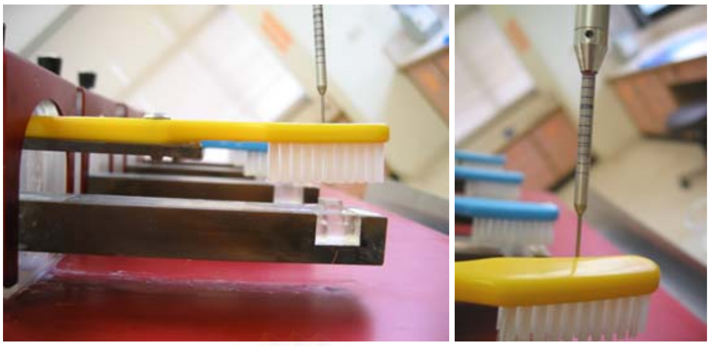


รูปที่ 34 แสดงการยึดชิ้นตัวอย่างและแปรงสีฟันเข้ากับเครื่องแปรงระบบดิจิตอล

รูปที่ 35 แสดงภาพขณะแปรงชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องแปรงระบบดิจิตอล

รูปที่ 36 แสดงภาพเครื่องกวนแบบแตกตัว (Dispersion Mixer, Ultra Turrax®, รุ่น T25 basic, IKA Labortechnik, Malaysia)

รูปที่ 37 แสดงภาพเครื่องวัดปริมาณความตึง (Dontrix tension gage, Dontrix®, รุ่น 16 OZ, E.T.M. Corporation, 3M Unitek, Monrovia, Calofornia, U.S.A.)



รูปที่ 38 แสดงการตั้งค่าความตึงของแปรงสีฟันต่อชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวัดปริมาณความตึง

4. ขั้นตอนการคำนวณหามวลการสึก

นำผลที่ได้จากมวลที่ 1 และ มวลที่ 2 มาทำการคำนวณหาน้ำหนักที่หายไป หรือ มวลการสึก (worn mass, Δm) ของชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นของกลุ่มทดลอง และของกลุ่มควบคุม (Δm_{ref}) ในหน่วยกรัม ด้วยสูตร

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

$$\Delta m_{ref} = m_{1ref} - m_{2ref}$$

เมื่อ m_{1ref} คือ น้ำหนัก หรือ มวลของชิ้นตัวอย่างในกลุ่มควบคุมก่อนทำการทดสอบ

m_{2ref} คือ น้ำหนัก หรือ มวลของชิ้นตัวอย่างในกลุ่มควบคุมหลังทำการทดสอบ

บันทึกผลการคำนวณในแต่ละกลุ่มเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ

5. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้ในแต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม เอสพีเอสเอส รุ่น 10.0 โดยหาค่ามวลการสึกเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม และตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลในแต่ละกลุ่ม โดยใช้วิธี Kolmogorov-Smirnov Test แล้วทำการเปรียบเทียบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของแต่ละกลุ่ม ด้วยวิธี Levene’s Test แล้วจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) แบบ Tamhane’s T2 เพื่อหาความแตกต่างของค่ามวลการสึกเฉลี่ยโดยการจับคู่ทีละกลุ่ม จนครบทุกกลุ่ม

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยครั้งนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นสองส่วนตามการทดสอบ คือ ส่วนแรกจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแข็งผิว และสำหรับส่วนที่สองจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี โดยทั้งสองส่วนจะมีลำดับขั้นตอนในการนำเสนอเหมือนกัน คือ ลำดับแรกจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาของกลุ่มทดสอบแต่ละกลุ่มในรูปของตาราง จากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาเรียงลำดับจากน้อยไปหามากในรูปแบบตาราง และนำเสนอแผนภูมิแท่ง เพื่อหากลุ่มทดสอบที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทั้งสองของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และ กลุ่มทดสอบที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกทั้งสี่ยี่ห้อ จากนั้นจึงนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) แล้วจึงสรุปผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparison) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ได้ของแต่ละกลุ่ม

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบความแข็งผิว

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเชิงพรรณนา พบว่ากลุ่มทดสอบทั้งหมดมีค่าความแข็งผิวเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 3 โดยจะเห็นได้ว่ากลุ่มทดสอบโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิดทุกกลุ่ม และ กลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกทั้ง 4 ยี่ห้อ คือกลุ่ม 1-19 มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มควบคุมซึ่งเป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ไม่ได้เติมวัสดุอัดแทรกชนิดใดๆ นอกจากนี้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่มยังมีค่าน้อยมากซึ่งมีค่าเป็นทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่งหรือสอง

ตารางที่ 3 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มที่ 0-19 ในการทดสอบความแข็งผิว

Group	% Filler	N	Mean (VHN)	Std. Deviation (VHN)
0	Control	50	17.908	0.08291
1	$CaCO_3$ 10%	50	18.750	0.08864
2	$CaCO_3$ 20%	50	19.840	0.09897
3	$CaCO_3$ 30%	50	20.458	0.09708
4	$CaCO_3$ 40%	50	21.912	0.12100
5	$CaCO_3$ 50%	50	21.558	0.10300
6	Kaolin 10%	50	19.144	0.09723
7	Kaolin 20%	50	19.846	0.09941
8	Kaolin 30%	50	20.256	0.10300
9	Kaolin 40%	50	20.966	0.11500
10	Kaolin 50%	50	21.414	0.12300
11	Quartz 10 %	50	18.196	0.07273
12	Quartz 20 %	50	19.452	0.09528
13	Quartz 30%	50	20.652	0.09947
14	Quartz 40%	50	23.744	0.10100
15	Quartz 50%	50	25.606	0.12200
16	Majordent	50	18.456	0.25300
17	Cosmo HXL	50	21.386	0.20200
18	Hard Pure	50	33.560	0.26900
19	Efucera-P	50	40.530	0.22900

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 แสดงการเรียงลำดับค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบจากน้อยไปหามาก

Order	Group	% Filler	Mean (VHN)
1	**0**	**Control**	**17.908**
2	11	Quartz 10 %	18.196
3	**16**	**Majordent**	**18.456**
4	1	$CaCO_3$ 10%	18.750
5	6	Kaolin 10%	19.144
6	12	Quartz 20 %	19.452
7	2	$CaCO_3$ 20%	19.840
8	7	Kaolin 20%	19.846
9	8	Kaolin 30%	20.256
10	3	$CaCO_3$ 30%	20.458
11	13	Quartz 30%	20.652
12	9	Kaolin 40%	20.966
13	**17**	**Cosmo**	**21.386**
14	10	Kaolin 50%	21.414
15	5	$CaCO_3$ 50%	21.558
16	4	$CaCO_3$ 40%	21.912
17	14	Quartz 40%	23.744
18	15	Quartz 50%	25.606
19	**18**	**Hard Pure**	**33.560**
20	**19**	**Efucera-P**	**40.530**

หมายเหตุ เส้น ▬ คือกลุ่มทดสอบคู่ที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

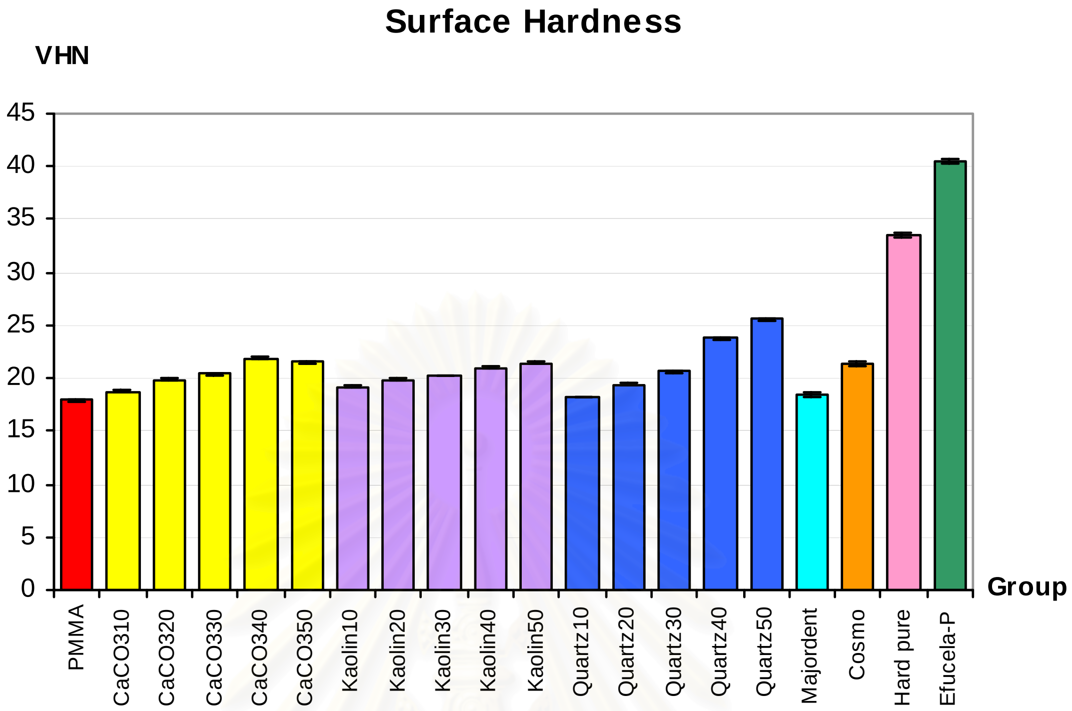
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของทุกกลุ่มมาเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ดังตารางที่ 4 พบว่ากลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Efucera–P® Simplerr มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุด คือ 40.53 VHN รองลงมาคือกลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าความแข็งผิวเฉลี่ย 33.56 และ 25.606 VHN ตามลำดับ สำหรับกลุ่มที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ กลุ่มควบคุม ซึ่งมีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยเท่ากับ 17.908 VHN

เมื่อนำค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบที่ 1-15 ซึ่งเป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรก 3 ชนิด ในปริมาณต่างๆ มาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวเฉลี่ยพื้นฐานของกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกทั้ง 4 ยี่ห้อ พบว่ากลุ่มทดสอบโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิด (กลุ่มที่ 1-15) ทุกกลุ่มสามารถเพิ่มค่าความแข็งผิวของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ โดยมีเพียงกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เพียงกลุ่มเดียวที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มควบคุมแต่น้อยกว่ากลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Majordent

ส่วนกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ 30 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ 30 เปอร์เซ็นต์ 40 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Majordent แต่น้อยกว่ากลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Cosmo HXL

ส่วนกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Cosmo HXL แต่น้อยกว่ากลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure และไม่มีกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกกลุ่มใดที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure และ Efucera–P® Simplerr



รูปที่ 39 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยตามชนิด และ ปริมาณของวัสดุอัดแทรก เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ

จากรูปที่ 39 หากพิจารณาตามปริมาณวัสดุอัดแทรกที่เติมลงในโพลีเมทิลเมทาคริเลต พบว่าเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ดินขาวจะเพิ่มค่าความแข็งผิวเฉลี่ยได้มากที่สุด รองลงมาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และ ควอตซ์ ตามลำดับ

เมื่อเติมวัสดุอัดแทรกในโพลีเมทิลเมทาคริเลตปริมาณ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ควอตซ์จะเพิ่มค่าความแข็งผิวเฉลี่ยได้มากที่สุด รองลงมาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และ ดินขาว ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาตามชนิดของวัสดุอัดแทรกที่เติมในโพลีเมทิลเมทาคริเลต พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุดที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ดินขาว และ ควอตซ์จะให้ค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุดที่ 50 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาตามความสามารถในการเพิ่มความแข็งผิว พบว่ากลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลต ที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุด คือ 25.606 VHN รองลงมาเป็น ควอตซ์ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ย เท่ากับ 23.744

VHN และ แคลเซียมคาร์บอเนต 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ย เท่ากับ 21.912 VHN ตามลำดับ

จากตารางที่ 9 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูล พบว่า มีกลุ่มทดสอบ 8 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 4, 8, 10, 15, 16, 17, 18, 19 มีการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ เนื่องจากมีค่า ค่าสถิติ p มากกว่า 0.05 อีก 12 กลุ่ม มีค่าสถิติ p น้อยกว่า 0.05 ทำให้การแจกแจงของข้อมูลโดยรวมเป็นแบบไม่ปกติ แต่เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกกลุ่มทดสอบมีค่าน้อยมาก คือ 0.072-0.269 VHN เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม และจากการวิจัยของ Chen (2004) ซึ่งทำการทดสอบผลของวัสดุอัดแทรกในเรซิน อะคริลิก พบว่าการแจกแจงของข้อมูลในแต่ละกลุ่มเป็นแบบปกติ จึงถือว่าข้อมูลของทุกกลุ่มทดสอบในการวิจัยครั้งนี้มีการแจกแจงแบบปกติเช่นกัน ดังนั้นจึงทำการทดสอบหาความแตกต่างของค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม โดยใช้การทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว

จากตารางที่ 10 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) พบว่าค่าสถิติ p น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอย่างน้อย 1 คู่

จากตารางที่ 11 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูลในแต่กลุ่มทดสอบ ด้วยวิธี Levene's test พบว่าค่าสถิติ p ที่ได้เท่ากับ 0 ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่มทดสอบไม่เท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 12 ในภาคผนวก เป็นการเปรียบเทียบเชิงซ้อนเพื่อทดสอบว่ากลุ่มทดสอบใดบ้างที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยต่างกัน โดยสรุปผลการทดสอบทีละคู่ได้ ดังนี้

กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่ 2) และ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่ 7) มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่10) และ กลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Cosmo HXL (กลุ่มที่ 17) มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกลุ่มอื่นๆ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี

ตารางที่ 5 แสดงค่ามวลการสึกเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มที่ 0-19 ในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี

Group	% Filler	N	Mean (gm.)	Std. Deviation (gm.)
0	Control	10	0.00140	0.000169
1	$CaCO_3$ 10%	10	0.00142	0.000113
2	$CaCO_3$ 20%	10	0.00119	0.000172
3	$CaCO_3$ 30%	10	0.00241	0.000172
4	$CaCO_3$ 40%	10	0.00455	0.000217
5	$CaCO_3$ 50%	10	0.00443	0.000312
6	Kaolin 10%	10	0.00149	0.000128
7	Kaolin 20%	10	0.00142	0.000147
8	Kaolin 30%	10	0.00188	0.000122
9	Kaolin 40%	10	0.00238	0.000229
10	Kaolin 50%	10	0.00345	0.000263
11	Quartz 10 %	10	0.00133	0.000170
12	Quartz 20 %	10	0.00114	0.000117
13	Quartz 30%	10	0.00120	0.000163
14	Quartz 40%	10	0.00120	0.000105
15	Quartz 50%	10	0.00100	0.000141
16	Majordent	10	0.00567	0.000149
17	Cosmo HXL	10	0.00498	0.000122
18	Hard Pure	10	0.00334	0.000150
19	Efucera-P	10	0.00179	0.000099

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเชิงพรรณนา พบว่ากลุ่มทดสอบทั้งหมดมีค่ามวลการสึกเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกกลุ่มทดสอบมีค่าน้อยมาก คือ ทศนิยมตำแหน่งที่ 4 และ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม

ตารางที่ 6 แสดงการเรียงลำดับค่ามวลการสึกเฉลี่ยจากน้อยไปหามาก

Order	Group	% Filler	Mean (gm.)
1	15	Quartz 50%	0.00100
2	12	Quartz 20 %	0.00114
3	2	$CaCO_3$ 20%	0.00119
4	14	Quartz 40%	0.00120
4	13	Quartz 30%	0.00120
6	11	Quartz 10 %	0.00133
7	**0**	**Control**	**0.00140**
8	1	$CaCO_3$ 10%	0.00142
8	7	Kaolin 20%	0.00142
10	6	Kaolin 10%	0.00149
11	**19**	**Efucera-P**	**0.00179**
12	8	Kaolin 30%	0.00188
13	9	Kaolin 40%	0.00238
14	3	$CaCO_3$ 30%	0.00241
15	**18**	**Hard Pure**	**0.00334**
16	10	Kaolin 50%	0.00345
17	5	$CaCO_3$ 50%	0.00443
18	4	$CaCO_3$ 40%	0.00455
19	**17**	**Cosmo**	**0.00498**
20	**16**	**Majordent**	**0.00567**

หมายเหตุ เส้น ▬ คือกลุ่มทดสอบคู่ที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำค่ามวลการสึกเฉลี่ยของทุกกลุ่มการทดสอบมาเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ดังตารางที่ 6 จะพบว่ากลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิก ยี่ห้อ Majordent มีค่ามวลการสึกเฉลี่ยมากที่สุด คือ 0.00567 กรัม รองลงมา คือ กลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Cosmo HXL และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามวลการสึกเฉลี่ย 0.00498 และ 0.00455 กรัม ตามลำดับ สำหรับกลุ่มที่มีค่ามวลการสึกเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

ซึ่งมีค่ามวลการสึกเฉลี่ย เท่ากับ 0.001 กรัม รองลงมา คือ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามวลการสึกเฉลี่ยเท่ากับ 0.00114 และ 0.00119 กรัม ตามลำดับ

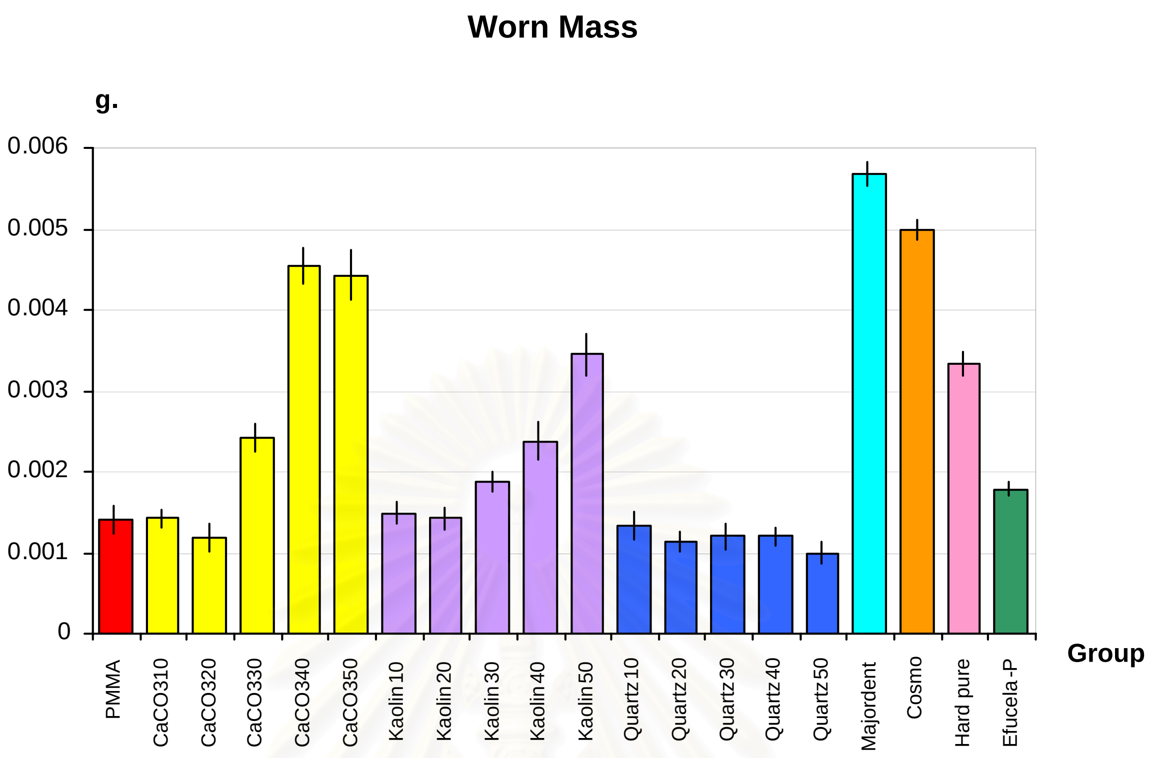
ความต้านทานการสึกจากการขัดสีจะแปรผกผันกับค่ามวลการสึก หากค่ามวลการสึกมากจะมีความต้านทานการสึกน้อย แต่หากค่ามวลการสึกน้อยจะมีความต้านทานการสึกมาก ดังนั้นกลุ่มทดสอบที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการสึกจากการขัดสีได้ จะต้องมีค่ามวลการสึกเฉลี่ยน้อยกว่ากลุ่มควบคุม ซึ่งได้แก่ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ ในปริมาณ 10-50 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่ 2, 11, 12, 13, 14 และ 15) ดังตารางที่ 6

กลุ่มที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกทั้ง 4 ยี่ห้อ มีความต้านทานการสึกจากการขัดสีน้อยกว่ากลุ่มควบคุม โดยเรียงลำดับจากความต้านทานการสึกมากไปน้อย คือ ซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Efucera–P® Simplerr, Hard Pure, Cosmo HXL และ Majordent ตามลำดับ (ตารางที่ 6)

จากรูปที่ 40 หากพิจารณาตามปริมาณวัสดุอัดแทรกที่เติมลงในโพลีเมทิลเมทาคริเลต พบว่าควอตซ์จะสามารถเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการสึกจากการขัดสีได้ดีที่สุด ในทุกปริมาณการเติมวัสดุอัดแทรก 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาตามชนิดของวัสดุอัดแทรกที่เติมในโพลีเมทิลเมทาคริเลต พบว่าควอตซ์จะเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการสึกได้มากที่สุดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตและ ดินขาวจะเพิ่มมากที่สุดที่ 20 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาตามความสามารถในการเพิ่มความต้านทานการสึกจากการขัดสี พบว่ากลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรก ควอตซ์ ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มความต้านทานการสึกได้มากที่สุด รองลงมาเป็น ควอตซ์ 20 เปอร์เซ็นต์ และ แคลเซียมคาร์บอเนต 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 40 แผนภูมิแท่งแสดงค่ามวลการสึกเฉลี่ยตามชนิดและปริมาณของวัสดุอัดแทรก เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และซี่ฟันปลอมอะคริลิก 4 ยี่ห้อ

จากตารางที่ 15 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าทุกกลุ่มทดสอบมีค่าสถิติ p มากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลของทุกกลุ่มทดสอบมีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นจึงทำการทดสอบหาความแตกต่างของค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแต่ละกลุ่มโดยใช้การทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว

จากตารางที่ 16 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าค่าสถิติ p น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอย่างน้อย 1 คู่

จากตารางที่ 17 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูลในแต่กลุ่มทดสอบ ด้วยวิธี Levene's test พบว่าค่าสถิติ p ที่ได้เท่ากับ 0 ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่มทดสอบไม่เท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 18 ในภาคผนวก เป็นการเปรียบเทียบเชิงซ้อนเพื่อทดสอบว่ากลุ่มทดสอบใดบ้างที่มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยต่างกัน โดยสรุปผลการทดสอบทีละคู่ได้ ดังนี้

ค่ามวลการสึกเฉลี่ยของ กลุ่มควบคุม กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ในปริมาณ 10-50 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่ 0, 1, 2, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาว ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่ 3 และ 9) มีค่ามวลการสึกเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มที่ 4 และ 5) มีค่ามวลการสึกเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Efucera–P® Simplerr (กลุ่มที่ 8 และ 19) มีค่ามวลการสึกเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกดินขาวในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure (กลุ่มที่ 10 และ 18) มีค่ามวลการสึกเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ส่วนกลุ่มอื่นๆ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังสรุปไว้ในตารางที่ 6

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายวัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อหา ชนิด และ ปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่สามารถเพิ่มความแข็งผิว และ คุณสมบัติในการต้านทานต่อการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ผลิตซี่ฟันปลอม โดยวัสดุอัดแทรกทั้งสามชนิด ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และ ควอตซ์ ที่ได้เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นวัสดุอัดแทรกที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทั้งสองได้ และนิยมใช้เป็นวัสดุอัดแทรกในพลาสติก มีสีค่อนข้างขาวทำให้ง่ายต่อการเติมสีให้คล้ายกับฟันธรรมชาติ และมีข้อดี ข้อเสียในการใช้งานแตกต่างกัน ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ อีกทั้งยังหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

เปอร์เซ็นต์ของวัสดุอัดแทรกทีใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากการวิจัยนำร่อง โดยการเติมวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิดตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ในโพลีเมทิลเมทาคริเลต พบว่าวัสดุอัดแทรกที่เลือกใช้มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต ทำให้การเติมวัสดุอัดแทรกในเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้นจะมีปริมาตรของส่วนผงเพิ่มขึ้นกว่าเดิมมาก โดยเฉพาะเมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเกิน 50 เปอร์เซ็นต์ จึงไม่สามารถผสมส่วนผงกับโมโนเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ตามอัตราส่วนที่ถูกต้อง คือ ส่วนผงต่อส่วนน้ำเท่ากับ 2.5 : 1 โดยน้ำหนัก และภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนจะได้ชิ้นตัวอย่างที่มีรูพรุนร่วน เมื่อนำไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค พบว่ารอยกดที่ได้ไม่ชัดเจน และไม่เป็นเหลี่ยมที่ถูกต้อง เนื่องจากชิ้นตัวอย่างมีความเปราะและนิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อผสมส่วนผงที่มีปริมาณวัสดุอัดแทรก 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ลงในโมโนเมอร์ พบว่าส่วนผงละลายในโมโนเมอร์ได้ค่อนข้างช้า และส่วนผสมที่ได้ค่อนข้างแห้งผสมยาก อาจทำให้วัสดุอัดแทรกและผงโพลีเมทิลเมทาคริเลตกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เพื่อให้ง่ายต่อการผสมจึงได้ปรับอัตราส่วนผงต่อน้ำเป็น 2 : 1 และปรับปริมาณการเติมวัสดุอัดแทรกให้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกันในวัสดุอัดแทรกทุกชนิด

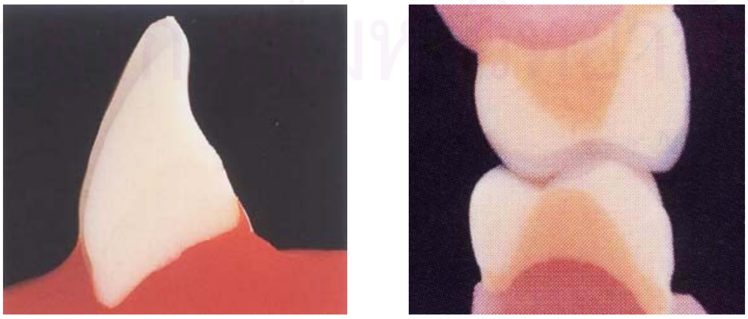
การเลือกยี่ห้อของซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เลือกจากซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จำนวน 16 ยี่ห้อ ซึ่งได้ศึกษานำร่องโดยการทดสอบความแข็งผิววิกเกอร์ ด้วยเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค โดยใช้ฟันกรามใหญ่ซี่ที่ 1 ข้างขวา ยี่ห้อละ 3 ซี่ ทำการกด 5 ครั้งต่อ 1 ซี่ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของแต่ละยี่ห้อ ได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของซี่ฟันปลอมอะคริลิก 16 ยี่ห้อเรียงลำดับจากน้อยไปมาก

ยี่ห้อ	ความแข็งผิวเฉลี่ย (VHN)
New Ace (Yamahachi dental MFGM., Co., Japan)	18.35
Majordent (Major Prodotti Dentari SPA, Italy)	18.59
^{SR}Orthotyp PE (Ivoclar Vivadent technical Company Ltd., Liechtenstein)	18.76
Acry Rock (Ruthinium S.A. de Argentina)	19.59
Fx Posterior (Yamahachi dental MFGM., Co., Japan)	19.68
Million (Yamahachi dental MFGM., Co., Japan)	19.69
Pure - α (Pure Cebu Yamaichi Corporation, Japan)	19.72
Crisma (Technodent Industries Co. Ltd., Pakistan)	19.76
Ivostar, Gnatostar (Ivoclar Vivadent technical Company Ltd., Liechtenstein)	20.06
Ortolux TOP (Unidesa-ODI Uniun dental S.A., Spain)	20.21
Basic (Heraeus Kulzer Company Ltd., Germany)	20.52
^{SR}Vivodent PE (Ivoclar Vivadent technical Company Ltd., Liechtenstein)	20.81
Cosmo HXL (Densply Ltd., U.S.A.)	21.09
Endura Anterio / Posterio (Shofu INC., Kyoto, Japan)	28.75
Hard Pure (Pure Cebu Yamaichi Corporation, Japan)	31.52
Efucera–P® Simplerr (Yamahachi dental MFGM., Co., Japan)	40.68

จากนั้นจึงเลือกซี่ฟันปลอมอะคริลิกมา 4 ยี่ห้อ โดยเลือกจากค่าความแข็งผิว น้อย ปานกลาง และมาก ซึ่งสามารถเป็นตัวแทนบอกถึงขอบเขตของความแข็งผิว และความต้านทานต่อการสึกจากการขัดสีได้ นอกจากนี้ยี่ห้อที่เลือกต้องหาซื้อได้ เป็นที่รู้จัก มีราคาไม่แพงจนเกินไป ซึ่งได้แก่ Majordent, Cosmo HXL, Hard Pure, Efucera–P ® Simplerr

การเลือกตำแหน่งซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบ จากการวิจัยนำร่องโดยนำซี่ฟันอะคริลิกหน้าบน ซึ่งได้แก่ ฟันตัดกลางบนขวา จำนวน 5 ซี่ ข้างซ้าย จำนวน 5 ซี่ สำหรับฟันหลัง ได้แก่ ฟันกรามใหญ่ล่างซี่ที่ 1 ข้างขวา จำนวน 5 ซี่ ข้างซ้าย จำนวน 5 ซี่ มาทดสอบความแข็งผิวโดยทั้งหมดเป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อคอสโมเลขผลิต 0318 พบว่ามีความแข็งผิวของฟันอะคริลิกหน้าและหลัง ซ้ายและขวา ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้ฟันกรามใหญ่ล่างซี่ที่ 1 ข้างขวาและซ้าย ในการทดสอบความแข็งผิว เนื่องจากซี่ฟันปลอมอะคริลิกที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2-3 ชั้น (ดังรูปที่ 41) โดยชั้นเรซินอะคริลิกผิวนอกสุดจะมีความแข็งมากกว่าชั้นเรซิน อะคริลิกภายใน มีความหนาจากบริเวณปลายฟัน หรือ ยอดปุ่มฟัน ประมาณ1-1.5 มิลลิเมตร และค่อย ๆ บางลงจนถึงบริเวณคอฟัน ซึ่งหลังจากการขัดบริเวณด้านบดเคี้ยวออกประมาณ 0.5 มิลลิเมตร เพื่อให้พื้นผิวทดสอบเรียบขนานกับแนวนอนจะมีพื้นที่ในการทดสอบความแข็งผิวมากกว่าการใช้ซี่ฟันตัดกลางบน นอกจานนี้ยังเป็นฟันซี่ที่รับแรงกดแนวตรงมากที่สุดในการบดเคี้ยว สำหรับฟันตัดกลางบนขวาจะใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดกว้าง ค่อนข้างระนาบ และไม่โค้งนูน เหมาะในการนำมาทดสอบด้วยวิธีการแปรงฟัน อีกทั้งยังสามารถควบคุมรูปร่างระหว่างซี่ฟันปลอมอะคริลิกและชิ้นทดสอบทั้งหมดให้มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดได้ โดยไม่จำกัดสีของซี่ฟันปลอมอะคริลิกในแต่ละยี่ห้อ แต่ในยี่ห้อเดียวกันจะต้องมีขนาดเท่ากัน และผลิตในคราวเดียวกัน เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดความแตกต่างของซี่ฟันปลอมแต่ละซี่ในยี่ห้อเดียวกัน



รูปที่ 41 แสดงลักษณะการแบ่งชั้นต่างๆของซี่ฟันปลอมอะคริลิก

การแบ่งกลุ่มทดสอบในการวิจัยในครั้งนี้ ได้แบ่งกลุ่มทดสอบออกเป็น 20 กลุ่ม เนื่องจากกลุ่มทดสอบที่เป็นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณต่างๆ มีตัวแปรในการทดสอบ 2 ตัวแปร คือ ชนิดของวัสดุอัดแทรก และ ปริมาณวัสดุอัดแทรกที่เติม แต่กลุ่มทดสอบที่เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิกทั้ง 4 ยี่ห้อ มีตัวแปรในการทดสอบเพียงปัจจัยเดียว คือ ยี่ห้อของซี่ฟันปลอมอะคริลิก ซึ่งเทียบเท่ากับชนิดของวัสดุอัดแทรก ทำให้การใช้การทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ไม่สมบูรณ์ และค่าสถิติที่ได้ไม่ถูกต้อง นอกจากนี้จากตารางที่ 13 และ 19 ในภาคผนวก เป็นการทดสอบหาความมีอิทธิพลซึ่งกันและกันของตัวแปรชนิดของวัสดุอัดแทรก และ ปริมาณวัสดุอัดแทรก พบว่า ค่าสถิติ p เท่ากับ 0 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรทั้งสอง ไม่มีอิทธิพลต่อกัน ดังนั้นจึงสามารถแยกกลุ่มทดสอบออกได้เป็น 20 กลุ่ม อย่างอิสระดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัยหัวข้อประชากร

วิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างในการทดสอบความแข็งผิวได้ดัดแปลงมาจาก ISO TR 14577 Metallic materials-Hardness test- Universal test ปี 1995 และ คู่มือการใช้งานเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค เครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค (Microhardness Tester, รุ่น FM-700e, TYPE D, Future-tech CORP., Tokyo, Japan, Vicker indenter No. 33906 HV) เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องและเป็นไปตามแนวทางที่ถูกต้องของ ISO โดยข้อกำหนดว่าความหนาของชิ้นตัวอย่างจะต้องมากกว่า 10 เท่าของความลึกของรอยกด และไม่ทำให้เกิดรอยนูนหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบนพื้นผิวด้านหลังของชิ้นตัวอย่างเมื่อมองด้วยตาเปล่า ซึ่งในกรณีการทดสอบแบบวิกเกอร์ ความลึกของรอยกดจะมีค่า 1/7 ของเส้นทแยงมุมดังนั้นความหนาของชิ้นตัวอย่างที่น้อยที่สุดควรจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุม และพื้นผิวด้านทดสอบจะต้องถูกขัดให้เรียบขนานกับด้านรองรับ และทำมุมถูกต้องกับหัวกด พื้นผิวต้องสะอาด ปราศจากฝุ่น น้ำมัน หรือสารอื่นๆ นอกจากนี้ขบวนการในการเตรียมชิ้นตัวอย่างจะต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความแข็งผิว เช่น การทำให้เกิดความร้อนหรือความเย็น ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งผิวที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป ดังนั้นก่อนนำชิ้นตัวอย่างไปวัดค่าความแข็งผิวจึงต้องทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 15 นาที

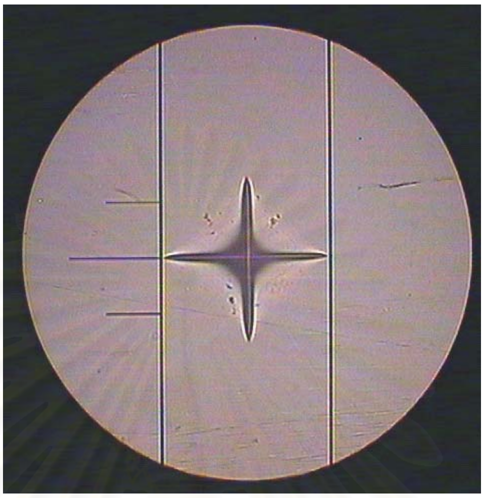
เนื่องจากการทำชิ้นตัวอย่างในกลุ่มที่ 0-15 ของการทดสอบความแข็งผิว และการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี ทำได้ยากและเสียเวลามาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณชิ้นตัวอย่างในการวิจัย จึงใช้ชิ้นตัวอย่างชิ้นเดียวกันทั้งสองการทดสอบ โดยการเตรียมชิ้นตัวอย่างจะต้องมีขนาดพอดีกับแท่นยึดชิ้นตัวอย่างของเครื่องแปรงระบบดิจิตอล และเป็นไปตามแนวทางในการเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบความแข็งผิวข้างต้นด้วย

วิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างในกลุ่มที่ 0-15 ซึ่งเป็นกลุ่มโพลีเมทิลทาคริเลตที่ไม่เติมวัสดุอัดแทรก และกลุ่มโพลีเมทิลทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกชนิดและปริมาณต่างๆ โดยการลงฟลาสก์ในภาชนะหล่อแบบฟันปลอม พร้อมกับแผ่นกระจกใส และแท่งขี้ผึ้งสีงาช้าง แล้วนำมาบ่มในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 73.9 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง นั้น เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากแนวทางของ American Dental Association Specification No.12 (1976 ถึง 1978) มีข้อดี คือ ชิ้นตัวอย่างที่ได้จะมีความเรียบและเป็นมันเงาบริเวณพื้นผิวด้านที่ติดกับแผ่นกระจก ทำให้ไม่ต้องขัดแต่ง และเป็นการควบคุมให้ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทุกชิ้นมีพื้นผิวเหมือนกัน การใช้แท่งขี้ผึ้งสีงาช้างทำทางออกของเรซิน อะคริลิกขณะอัดในเครื่องอัดฟลาสก์ไฮดรอลิกนั้น มีข้อดี คือ ลดการหดตัวของชิ้นเรซิน อะคริลิกเนื่องจากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน เป็นการป้องกันไม่ให้ชิ้นเรซินอะคริลิกที่ได้มีการบิดตัว และเกิดพื้นผิวที่ไม่เรียบมันบริเวณด้านที่ติดแผ่นกระจก สำหรับการบ่มเรซิน อะคริลิกในน้ำอุ่นที่รักษาอุณหภูมิให้คงที่นั้นเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรูพรุนในเนื้อเรซินอะคริลิก(เจน รัตนไพศาล, 2533; Combe, 1986; Wright และคณะ,1994; Anusavice, 1996; Craig, 2002) ดังนั้นการเตรียมชิ้นตัวอย่างด้วยวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่สามารถควบคุมได้ และยังประหยัดอีกด้วย

การใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร สูง 1 เซนติเมตร มาเตรียมฐานยึดซี่ฟันปลอมอะคริลิกในกลุ่มทดสอบที่ 16-19 นั้น มีข้อดี คือ เตรียมได้ง่าย เสียค่าใช้จ่ายน้อย และสามารถยึดเข้ากับเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาคได้อย่างมั่นคง รอยกดที่ได้จึงมีความชัดเจน

วิธีการวัดค่าความแข็งผิวในการวิจัยครั้งนี้ดัดแปลงมาจากวิธีการของ ISO TR 14577 ปี 1995 และ คู่มือการใช้งานเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค (Microhardness tester , Future-tech CORP, Tokyo, Japan รุ่น FM-700 Ser. FMX 0074, Vicker indenter No. 33906 HV) เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องและเป็นไปตามแนวทางที่ถูกต้องของ ISO ซึ่งมีข้อกำหนดเกี่ยวกับวิธีการกด คือ การวัดควรทำในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 23 $\pm$ 5 องศาเซลเซียส แรงที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ในช่วง 0.01 – 1,000 นิวตัน ชิ้นตัวอย่างจะต้องยึดอยู่บนแท่นรองรับอย่างมั่นคง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกด 2 รอย ควรมีระยะอย่างน้อยเท่ากับ 40 เท่าของความลึกรอยกด ตาม ISO TR 14577 หรือ อย่างน้อย 4 เท่า ของเส้นทแยงมุมของรอยกด ตามคู่มือการใช้เครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกด กับขอบชิ้นตัวอย่าง ควรมีระยะอย่างน้อยเท่ากับ 20 เท่าของความลึกรอยกด ตาม ISO TR 14577 หรืออย่างน้อย 2.5 เท่า ของเส้นทแยงมุมของรอยกด ตามคู่มือการใช้เครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค และไม่ควรให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะทำการกด มิฉะนั้นจะทำให้ค่าความแข็งผิวที่วัดได้

คลาดเคลื่อนไป สำหรับแรงกดและเวลาในการทดสอบนี้จะใช้ตามมาตรฐานของเครื่อง เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานของเครื่อง และได้รอยกดที่เห็นชัดเจน ดังรูปที่ 42



รูปที่ 42 แสดงภาพรอยกดของกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ได้จากการทดสอบความแข็งผิวด้วยเครื่องวัดความแข็งผิวแบบจุลภาค

การทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว พบว่า มีกลุ่มทดสอบ 8 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 4, 8, 10, 15, 16, 17, 18, 19 มีการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ เนื่องจากมีค่าสถิติ p มากกว่า 0.05 อีก 12 กลุ่ม มีค่าสถิติ p น้อยกว่า 0.05 ทำให้การแจกแจงของข้อมูลโดยรวมเป็นแบบไม่ปกติ แต่เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกกลุ่มทดสอบมีค่าน้อยมาก คือ 0.072-0.269 VHN เมื่อเทียบกับค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม คือ 17.908-40.53 VHN และจากการวิจัยของ Chen (2004) ซึ่งทำการทดสอบผลของวัสดุอัดแทรกในเรซินอะคริลิก พบว่าการแจกแจงของข้อมูลในแต่ละกลุ่มเป็นแบบปกติ จึงถือว่าข้อมูลของทุกกลุ่มทดสอบในการวิจัยครั้งนี้มีการแจกแจงแบบปกติเช่นกัน ดังนั้นจึงทำการทดสอบหาความแตกต่างของค่าความแข็งผิวเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม โดยใช้การทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว

วิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี นำมาจากวิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างของเครื่องแปรงระบบดิจิตอล (V-8 cross brushing machine, SABRI Dental Enterprises, Inc., U.S.A.) โดยใช้แม่พิมพ์พลาสติกสำหรับทำฐานเรซินที่มีมาพร้อมเครื่องแปรงระบบดิจิตอล ได้ขนาดของฐานเรซินหล่อใส กว้าง 13 มิลลิเมตร ยาว 19 มิลลิเมตร

สูง 8.5 มิลลิเมตร และมีชิ้นตัวอย่างฝังอยู่ตรงกลาง มีด้านผิวเรียบมันอยู่สูงจากขอบบนของฐาน 3 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบการสึกจากการขัดสีในการวิจัยครั้งนี้ เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากแนวทางของ ISO/TS 14569–1 (1999) เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการประเมินความต้านทานการสึกจากการแปรงฟัน ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่นำมาทำซี่ฟันปลอมประดิษฐ์ และ ส่วนวีเนีย (veneering) ของครอบฟัน และสะพานฟัน อีกทั้งยังสามารถนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบหาความแตกต่างระหว่างวัสดุอย่างคร่าวๆ ได้อีกด้วย

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบความแข็งผิว พบว่าวัสดุอัดแทรกทั้งสามชนิดสามารถเพิ่มค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนได้ โดยค่าความแข็งผิวเฉลี่ยจะมากขึ้นเมื่อปริมาณของวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีเมทิลทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุด โดยเฉพาะที่ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และ ดินขาว สอดคล้องกับการศึกษา Chen (2004) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของวัสดุอัดแทรก 4 ชนิด ได้แก่ ดินขาว ผงแก้ว ซิลิคอนไดออกไซด์ และ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ต่อเรซิน อะคริลิก ที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใย พบว่าความแข็งผิวของ เรซินอะคริลิกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติมซิลิคอนไดออกไซด์จะสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้มากกว่าวัสดุอัดแทรกชนิดอื่น และได้ค่าความแข็งผิวมากที่สุดเมื่อเติมซิลิคอนไดออกไซด์ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ Li และคณะ (1985) และ Germain และคณะ (1985) ได้ทำการศึกษาผลของวัสดุอัดแทรกที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารยึดควบคู่ไซเลน (silane coupling agent) ในวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ชนิดบ่มด้วยแสง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุอัดแทรกในวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต จะทำให้ความแข็งผิวของ เรซินคอมโพสิต มีค่าเพิ่มขึ้น และ Mandikos และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาความแข็งผิวของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต 6 ชนิดเปรียบเทียบกับผิวเคลือบฟันของมนุษย์ พบว่า วัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ชนิดที่มีวัสดุอัดแทรกอยู่ในปริมาณมากจะมีค่าความแข็งผิวมากกว่าวัสดุบูรณะฟันเรซิน คอมโพสิต ที่มีปริมาณวัสดุอัดแทรกน้อย แต่มีค่าน้อยกว่าผิวเคลือบฟันของมนุษย์ สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ วัสดุอัดแทรกทั้งสามชนิดมีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งผิวของพลาสติกได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุอัดแทรก จึงทำให้ค่าความแข็งผิวมากขึ้น และรอยกดที่ได้จาก

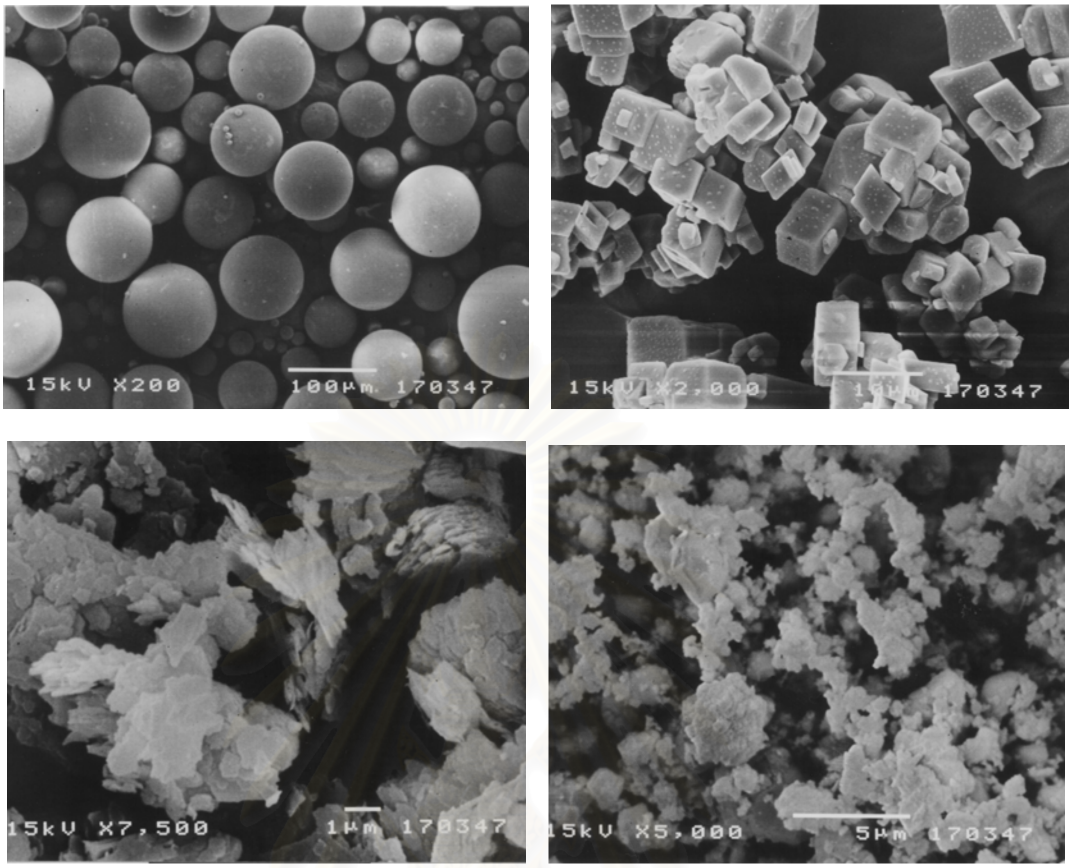
เครื่องวัดความแข็งผิวมีขนาดเล็กลง และเนื่องจากวัสดุอัดแทรกควอตซ์มีค่าความแข็งโมห์ เท่ากับ 7 ซึ่งมากกว่าวัสดุอัดแทรกชนิดอื่นที่ทดสอบ (Wake, 1971; Gachter และ Muller, 1990) จึงทำให้โพลีเมทิลทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งผิวมากกว่าโพลีเมทิลทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต และ ดินขาว แต่ก็ยังน้อยกว่าค่าความแข็งผิวของซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure, Efucera-P®Simplerr และผิวเคลือบฟันซึ่งมีความแข็งผิว 350 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร (McCabe, 1990)

Condon และ Feracane (1997) และ Mandikos (2001) กล่าวว่าคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุผสม (composite) มีอิทธิพลมาจากเนื้อของวัสดุผสม (matrix) แล้ว ชนิดของวัสดุอัดแทรก ขนาดของวัสดุอัดแทรก ปริมาณของวัสดุอัดแทรก และ ระดับการเชื่อมติดกันของวัสดุอัดแทรกกับเนื้อเรซิน ก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุผสมเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Li และคณะ (1985) และ Noort (2002) ที่ว่าเมื่อปริมาณของวัสดุอัดแทรกในวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้คุณสมบัติของวัสดุผสมเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความแข็ง การดูดซึมน้ำ กำลังแรงอัด มอดุลัสยืดหยุ่น และ ความต้านทานการสึก เป็นต้น

เจน รัตนไพศาล (2533) ได้ให้ความหมายของ " วัสดุผสม " ไว้ว่า เป็นวัสดุที่เกิดจากการผสมระหว่างวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไป และมีปริมาณมากพอควร ผลของการผสมทำให้วัสดุหนึ่งมีคุณสมบัติบางอย่างดีกว่าอีกวัสดุหนึ่ง แต่มีคุณสมบัติบางอย่างด้อยกว่า สำหรับการวิจัยในครั้งนี้การนำเอาวัสดุอัดแทรกเติมลงในโพลีเมทิลเมทาคริเลตจึงถือว่าเป็นวัสดุผสม ดังนั้นในการอภิปรายผลการวิจัยจึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นด้วย เพื่อให้การอภิปรายผลของการวิจัยชัดเจนยิ่งขึ้น

จากการนำผงโพลีเมทิลทาคริเลต วัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และควอตซ์ มาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM, Model JSM-5410LV, Jeol, Japan) พบว่าโพลีเมทิลทาคริเลตมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด และไม่สม่ำเสมอ คือ ประมาณ 50-100 ไมโครเมตร และมีรูปร่างเป็นทรงกลม รองลงมา คือ แคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดอนุภาคประมาณ 5-8 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้า และ ดินขาว มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.5-2 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นผลึกแบนเกาะกันเป็นชั้น สำหรับควอตซ์จะมีขนาดเล็กที่สุด คือ ประมาณ 0.1-2 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นปริซึมรูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 43

ก. ข. ค. ง.



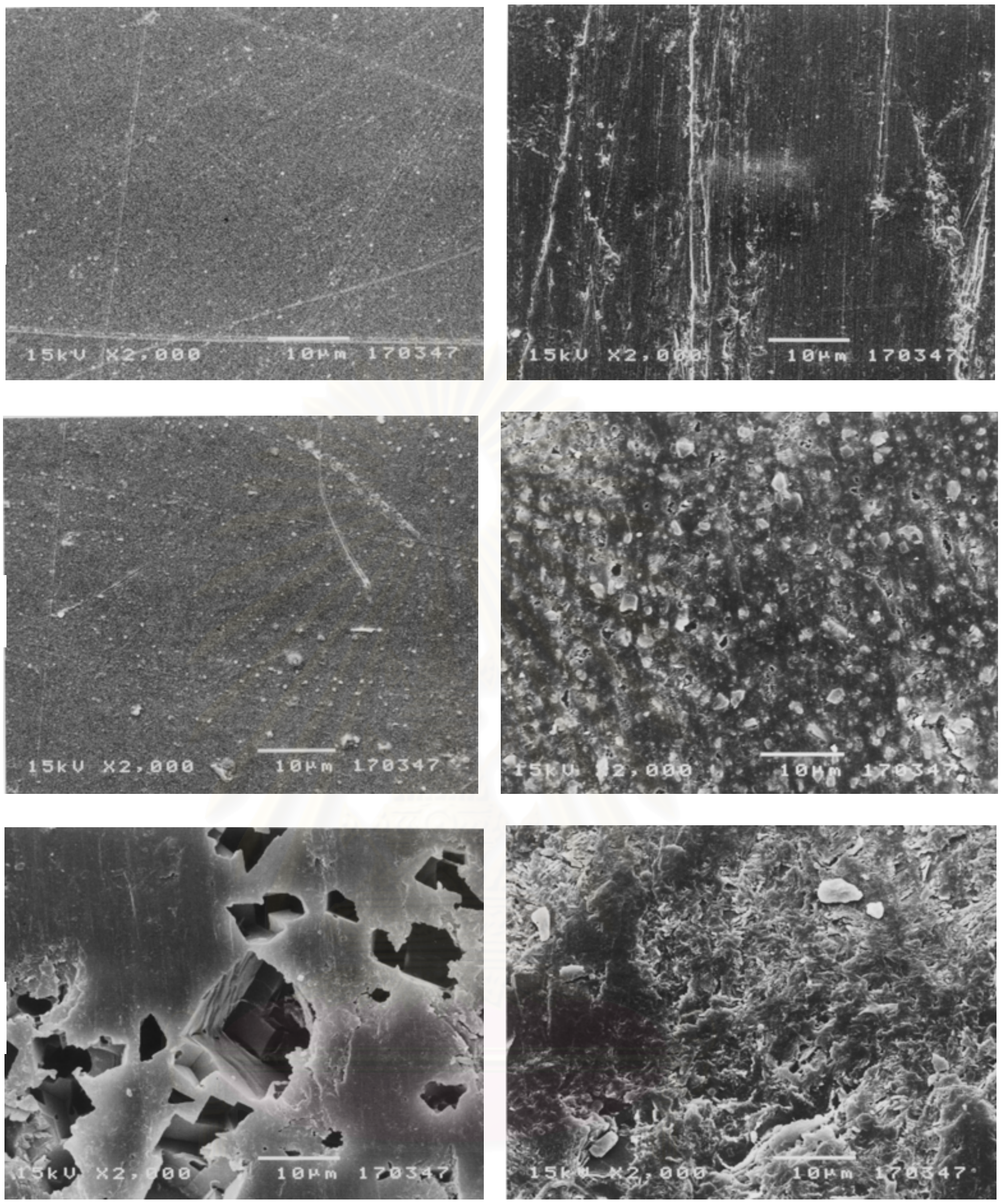
รูปที่ 43 แสดงภาพถ่ายอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM, Model JSM-5410LV, Jeol, Japan) (ก) ผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต กำลังขยาย 200 เท่า, (ข) ผงแคลเซียมคาร์บอเนต กำลังขยาย 2,000 เท่า, (ค) ผงดินขาว กำลังขยาย 7,500 เท่า, (ง) ผงควอตซ์ กำลังขยาย 5,000 เท่า

เมื่อนำผลการเรียงลำดับค่าความแข็งผิวเฉลี่ยที่ได้จากตารางที่ 4 ในบทที่ 4 ซึ่งค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาวตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของวัสดุอัดแทรกที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุอัดแทรกไม่มีผลต่อค่าความแข็งผิวของโพลีเมทิลเมทาคริเลต สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Li และคณะ (1985) ซึ่งทำการศึกษาในวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต

จากผลการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี พบว่ามีเพียงวัสดุอัดแทรกควอตซ์ปริมาณ 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นที่สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนได้ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการศึกษาของ Lang และคณะ (1992) ซึ่งได้ทำการศึกษาขนาดของวัสดุ

อัดแทรกและการจำแนกชนิดของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต 12 ชนิด โดยวิธีการล้างแยกเอาอนุภาคของวัสดุอัดแทรกออกจากเนื้อวัสดุบูรณะฟัน และจำแนกวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิตทั้ง 12 ชนิด ออกได้เป็น 4 กลุ่ม ตามขนาดของวัสดุอัดแทรก แล้วทำการศึกษาความต้านทานการสึกของวัสดุบูรณะฟันทั้ง 4 กลุ่ม พบว่า วัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ที่มีขนาดอนุภาคของวัสดุอัดแทรกเล็ก การสึกจะลดลง นอกจากนี้ Germain และคณะ (1985) ได้รายงานว่า การใช้วัสดุอัดแทรกที่มีอนุภาครวมตัวเชื่อมกันเป็นกลุ่มก้อนได้ จะสามารถเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการสึกของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ได้มากกว่าวัสดุอัดแทรกที่อนุภาคไม่สามารถรวมตัวกันได้ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้วัสดุอัดแทรกควอตซ์มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด มีรูปร่างเป็นปริซึมรูปหกเหลี่ยม ยึดเกาะกับเนื้อเรซิน อะคริลิกได้ดี อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการรวมตัวเชื่อมกันเป็นกลุ่มก้อนได้ ทำให้โพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์มีความต้านการสึกมากที่สุด เห็นได้จากการนำชิ้นตัวอย่างในกลุ่มควบคุม กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และควอตซ์ ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ หลังแปรงด้วยเครื่องแปรงระบบดิจิตอลมาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เปรียบเทียบกับพื้นผิวก่อนแปรงของกลุ่มควบคุมและกลุ่มกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์ ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 44) พบว่ามวลการสึกที่ได้จากกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกส่วนใหญ่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาควัสดุที่หลุดออกจากเนื้อเรซิน อะคริลิก โดยกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกควอตซ์มีการหลุดออกของอนุภาควัสดุอัดแทรกน้อยที่สุด รองลงมาเป็นดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ สำหรับกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว พบว่าเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกทั้งสองชนิดนี้ในปริมาณมากขึ้น ความต้านทานการสึกจะลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ De Gee และคณะ (1984) และ Germain และคณะ (1985) ซึ่งทำการศึกษาในวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ทั้งนี้เนื่องจากดินขาวแม้จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับควอตซ์ แต่การที่อนุภาคเป็นผลึกแบนเกาะกันเป็นชั้นๆ ทำให้อนุภาคหลุดได้ง่ายกว่าควอตซ์ ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตถึงแม้อนุภาคจะมีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้าซึ่งยึดเกาะกับเนื้อเรซิน อะคริลิกได้ดีกว่าอนุภาคของดินขาว ทำให้สามารถเพิ่มคุณสมบัติในการต้านทานการสึกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่การที่ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตใหญ่กว่าควอตซ์และดินขาวประมาณ 4 เท่า และไม่สามารถเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนได้ ทำให้ง่ายต่อการหลุดขณะแปรงมากกว่าควอตซ์ และ ดินขาว เมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นยิ่งปริมาณวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว ในโพลีเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มมากขึ้น ยิ่งทำให้มวลของอนุภาควัสดุอัดแทรกที่หลุดเพิ่มมากขึ้นตาม

ก. ข. ค. ง. จ. ฉ.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>รูปที่ 44</u> แสดงภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังแปรงของกลุ่มควบคุม และ กลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ก) กลุ่มควบคุมก่อนแปรง, (ข) กลุ่มควบคุมหลังแปรง, (ค) กลุ่มควอตซ์ ก่อนแปรง, (ง) กลุ่มควอตซ์ หลังแปรง , (จ) กลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต หลังแปรง, (ฉ) กลุ่มดินขาว หลังแปรง

อย่างไรก็ดีผลการศึกษาปริมาณ ของวัสดุอัดแทรกต่อความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตในการวิจัยครั้งนี้ มีความขัดแย้งกับผลการศึกษาที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเมื่อปริมาณของวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นความต้านทานการสึกจะเพิ่มขึ้นตาม ดังเช่นการศึกษาของ Li และคณะ (1985) และ Condon และ Feracane (1997) โดย Li ได้ทำการศึกษาผลของวัสดุ

อัดแทรก โบโรซิลิเกต กลาส ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารยึดควบคู่ไซเลน ต่อการสึกโดยการแปรงของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณของวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นการสึกของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต จะลดลง สำหรับ Condon และ Feracane ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณวัสดุอัดแทรก และการปรับสภาพวัสดุอัดแทรกต่อการสึกของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกลดลงการสึกจะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อวัสดุอัดแทรกมีปริมาณน้อยกว่า 48 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุอัดแทรก (inter-particle spacing, IPS) ที่จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการสึกของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิตได้ คือ อย่างน้อย 0.43 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าการสึกของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่ปรับสภาพด้วยสารยึดควบคู่ไซเลน (γ-methacryloxypropyltrimethoxysilane, MPS) ในวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ลดลง ซึ่ง Condon และ Feracane ได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่า การสึกเกิดจากการนำเอาเนื้อของวัสดุบูรณะฟันออกไป ทำให้อนุภาควัสดุอัดแทรกขาดการรองรับและยื่นออกมาจากเนื้อวัสดุบูรณะฟัน ส่งผลให้ง่ายต่อการหลุด ดังนั้นการปรับปรุงให้เกิดการยึดกันระหว่างอนุภาควัสดุอัดแทรกและเนื้อวัสดุจะทำให้ลดการหลุดของอนุภาควัสดุอัดแทรก และยังคงทำหน้าที่ป้องกันการสึกของเนื้อวัสดุได้ต่อไป ซึ่งการศึกษาของ De Gee และคณะ และ Germain และคณะ แตกต่างจาก การศึกษาทั้งสองนี้ โดย De Gee ได้ให้เหตุผลว่าการปรับสภาพพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้แรงยึดระหว่างอนุภาควัสดุอัดแทรกและเนื้อวัสดุลดลง สำหรับ Germain ได้ให้เหตุผลว่าชิ้นตัวอย่างที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ชนิดไมโครฟิลล์ ทั้งหมด โดยเนื้อวัสดุแตกต่างจากการศึกษาอื่น ดังนั้นจึงไม่สามารถนำผลที่ได้ไปทำนายพฤติกรรมของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ระบบอื่นๆได้ สำหรับการวิจัยในครั้งนี้การที่คุณสมบัติความต้านทานการสึกจากขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกลดลง เมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจาก อนุภาคของวัสดุอัดแทรกไม่ยึดเกาะกับเนื้อเรซิน อะคริลิก เป็นผลให้อนุภาควัสดุอัดแทรกหลุดออกจากเนื้อเรซิน อะคริลิกขณะได้รับการขัดสี ดังจะเห็นได้จากภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดหลังแปรงด้วยเครื่องแปรงระบบดิจิตอล (รูปที่ 44) ซึ่งอนุภาคของวัสดุอัดแทรกจะหลุดมากขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของวัสดุอัดแทรกผสมในเนื้อเรซินอะคริลิกเพิ่มมากขึ้น

เป็นที่ยอมรับกันว่า ความต้านทานการสึกของวัสดุชนิดหนึ่งสามารถคาดคะเนได้จากลักษณะความแข็งและกำลังแรง (strength) ของวัสดุชนิดนั้น แต่จากรายงานผลการวิจัยหลายฉบับที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าอาจไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความแข็ง กำลังแรง และการสึกจากการขัดสี (Moser และ Greener, 1972, 1973; Harrison และ Droughn, 1976)

Mandikos และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกและความแข็งผิวของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบการสึกและความแข็งผิวของวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต แต่ละชนิด จะไม่พบความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรนี้ ซึ่งเหมือนกับการรายงานผลที่ผ่านมา แต่ถ้าทำการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าจากวัสดุบูรณะฟัน เรซิน คอมโพสิต ทุกกลุ่มมารวมกัน จะพบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างความต้านทานการสึก และความแข็งผิว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งควรจะมีการศึกษาต่อในอนาคต สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ จากผลการทดสอบความแข็งผิวและความต้านทานการสึกจากการขัดสี พบว่าเมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้น ความแข็งผิวจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ความต้านทานการสึกจะลดลง โดยจะเห็นได้ค่อนข้างชัดจากกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว ในขณะที่ความแข็งผิวของกลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิกทั้ง 4 ยี่ห้อ เพิ่มขึ้น ความต้านทานการสึกจะเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้การที่ความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรในกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่เติมวัสดุอัดแทรกแตกต่างจากกลุ่มซี่ฟันปลอมอะคริลิก เนื่องจากอนุภาควัสดุอัดแทรกในกลุ่มโพลีเมทิลเมทาคริเลตไม่สามารถยึดเกาะกับเนื้อเรซิน อะคริลิกได้ ทำให้เมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นการสึกจะเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุอัดแทรกด้วยสารยึดควบคู่ไซเลน เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของวัสดุอัดแทรกกับเนื้อเรซิน อะคริลิก และถ่ายทอดแรงจากเนื้อเรซินอะคริลิกที่อ่อนแอมาสู่วัสดุอัดแทรกที่แข็งแรงกว่า จึงเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการแตกและการสึกของเนื้อเรซิน อะคริลิกได้ (Gladwin และ Bagby, 2000; Noort, 2002)

อย่างไรก็ตามหากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความแข็งและความต้านทานการสึกจากการขัดสี สามารถนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อคาดคะเนความต้านทานการสึกของวัสดุ โดยใช้ผลจากการทดสอบความแข็งผิวได้จริง จะเป็นการลดค่าใช้จ่าย และ ความยุ่งยากในขบวนการทดสอบการสึก ซึ่งจะต้องมีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการวิจัย

1. วัสดุอัดแทรกทั้งสามชนิดสามารถเพิ่มความแข็งผิวให้กับโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนได้ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุอัดแทรกในโพลีเมทิลเมทาคริเลตค่าความแข็งผิวที่ได้จะเพิ่มขึ้นตาม และวัสดุอัดแทรกควอตซ์ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าความแข็งผิวมากที่สุด แต่น้อยกว่าค่าความแข็งผิวของซี่ฟันปลอมอะคริลิกยี่ห้อ Hard Pure และ Efucera-P® Simplerr

2. วัสดุอัดแทรกควอตซ์ปริมาณ 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนได้ และสามารถเพิ่มความต้านการสึกได้มากกว่าซี่ฟันปลอมอะคริลิกทุกยี่ห้อที่ใช้ในการทดสอบ โดยวัสดุอัดแทรกควอตซ์ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกได้มากที่สุด

3. วัสดุอัดแทรกที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนได้พร้อมกัน คือ ควอตซ์ปริมาณ10-50 เปอร์เซ็นต์ และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยวัสดุอัดแทรกควอตซ์ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถเพิ่มคุณสมบัติทั้งสองได้มากที่สุด

4. ปริมาณของวัสดุอัดแทรกมีผลต่อทั้งความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อน โดยหากปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งผิวจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ในทางกลับกันหากปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นความต้านทานการสึกจะลดลง ยกเว้นวัสดุอัดแทรกควอตซ์ที่มีความต้านทานการสึกของแต่ละปริมาณไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. ขนาดของวัสดุอัดแทรกไม่มีผลต่อความแข็งผิวของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใส ชนิดบ่มด้วยความร้อน แต่มีผลต่อความต้านทานการสึกจากการขัดสี โดยหากขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กลงความต้านทานการสึกจะยิ่งเพิ่มขึ้น

6. ความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสีจะแปรผกผันกันในโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนที่เติมวัสดุอัดแทรก ขณะที่ซี่ฟันปลอมอะคริลิกจะแปรผันตามกัน

ข้อเสนอแนะ

1. วัสดุอัดแทรกที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตใสชนิดบ่มด้วยความร้อนได้พร้อมกัน คือ ควอตซ์ปริมาณ10-50 เปอร์เซ็นต์ และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกเหล่านี้ในปริมาณที่มากขึ้นสีของเรซิน อะคริลิกที่ได้จะเข้มขึ้น และความใสของโพลีเมทิลเมทาคริเลตลดลง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเกี่ยวกับสีของเรซิน อะคริลิกเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบฟัน และ เนื้อฟันของมนุษย์ ซึ่งจะทำให้สามารถเลือก ชนิด และ ปริมาณของวัสดุอัดแทรกที่มีสีและความใสใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ และสามารถเพิ่มคุณสมบัติความแข็งผิว และ ความต้านทานการสึกจากการขัดสีของโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้

2. จากผลการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสี พบว่าเมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้น ความต้านทานการสึกจะลดลง เนื่องจากอนุภาควัสดุอัดแทรกไม่สามารถยึดเกาะกับเนื้อเรซิน อะคริลิกได้ ทำให้เมื่อปริมาณวัสดุอัดแทรกเพิ่มขึ้นการสึกจะเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุอัดแทรกด้วยสารยึดควบคู่ไซเลน เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของวัสดุอัดแทรกกับเนื้อ เรซิน อะคริลิก จึงมีความสำคัญต่อคุณสมบัติความต้านทานการสึกจากการขัดสีเป็นอย่างมาก ซึ่งควรจะทำการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เจน รัตนไพศาล. 2533. ทันตวัสดุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: บริษัทโรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด.

ภาษาอังกฤษ

American Dental Association. 1976-1978. Guide to dental materials and devices. 8th ed. Chicago: American Dental Association.

American Dental Association. 1983. Dentist's desk reference: Materials, Instruments and Equipments. 2nd ed. Chicago: American Dental Association.

Anusavice, K. J. 1996. Phillip's science of dental materials. 10th ed. Philadelphia: W. B. Saunders Company.

Asmussen, E. 1985. Clinical relevance of physical, chemical and bonding properties of composite resins. Oper Dent 10: 61-73.

Bloem, T. J.; McDowell, G. C.; Lang, B. R.; and Powers, J. M. 1988. In vivo wear: Part II: Wear and abrasion of composite restorative materials. J Prosthet Dent 60: 242-253.

Bowen, R. L. 1963. Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. J Am Dent Assoc 66: 57-64.

Brauer, G. M. 1966. Dental applications of polymers: a review. J Am Dent Assoc 72: 1151-1158.

Brauer of Economic Research and Statistics, American Dental Association. 1959. Survey dental practice XI, Dental services rendered XII: Summary. J Am Dent Assoc 62: 627, 764.

Calais, J. G.; and Soderholm, K. J. M. 1988. Influence of filler type and water exposure on flexural strength of experimental composite resin. J Dent Res 67(5): 836-840.

Camobell, P. M.; Johnston, W. M.; and O'Brien, W. J. 1986. Light scattering and gloss of and experimental quartz-filled composite. J Dent Res 65(6): 892-894.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chen, S. Y. 2004. Effect of fillers on the fiber reinforced acrylic resin. J Dent Res 83(Spec Iss A): abst number 3249.

Combe, E. C. 1986. Notes on dental materials. 5th ed. Edinburgh: Churchill Livingstone.

Condon, J. R.; and Ferracane, J. L. 1997. In vitro wear of composite with varied cure, filler level, and filler treatment. J Dent Res 76(7): 1405-1411.

Cornell, J. A.; Jordan, J. S.; Ellis, S.; and Rose, E. E. 1957. A method of comparing the wear resistance of various materials used for artificial teeth. J Am Dent Assoc 54: 608-614.

Craig, R. G.; and Powers, J. M. 1976. Wear of dental tissues and materials. Int Dent J 26(2): 121-133.

Craig, R. G.; and Powers, J. M. 2002. Restorative dental materials. 11th ed. Missuri: Mosby.

De Gee, A. J.; Ten Harkel, E. C.; and Davidson, C. L. 1984. Abrasion of microfilled BIS-GMA/TEGMA resin in relation to its filler content. J Dent Res 63(4): 532.

Ekfeldt, A.; and Qilo, G. 1989. Wear mechanisms of resin and porcelain denture teeth. Acta Odontol Scand 47: 391-399.

Gachter, R.; and Muller, H. 1990. Plastic additive handbook. 3rd ed. Munich: Hanser.

Harrison, A. 1978. A wear of combination of acrylic resin and porcelain in abrasion testing machine. J Oral Rehabil 4: 111-115.

Harrison, A.; and Draughn, R. A. 1976. Abrasive wear, tensile strength, and hardness of dental composite resin-Is there a relationship?. J Prosthet Dent 36(4): 395-398.

Hirano, S.; May, K. B.; Wagner, W. C.; and Hacker, C. H. 1998. In vitro wear of resin denture teeth. J Prosthet Dent 79: 152-155.

International organization for standardization: Reference number ISO 3696. 1987. Water for analytical laboratory use–Specification and test methods. 1st ed. Switzerland: ISO.

International organization for standardization: Reference number ISO 8627. 1987. Dentistry–Stiffness of the tufted area of tooth-brush. 1st ed. Switzerland: ISO.

International organization for standardization: Reference number ISO 11609. 1995. Dentistry–Toothpastes–Requirements, test methods and marking. 1st ed. Switzerland: ISO.

International organization for standardization: Reference number ISO/TS 14569-1. 1999. Dental materials–Guidance on testing of wear resistance: Part I Wear by tooth brushing. 1st ed. Switzerland : ISO.

International organization for standardization: Reference number ISO/TR 14577. 1995. Metallic materials–Hardness test–Universal test. 1st ed. Switzerland: ISO.

Jaarda, M. L.; Wang, R. –F.; and Lang, B. R. 1997. A regression analysis of filler particle content to predict composite wear. J Prosthet Dent 77: 57-67.

Janardan, J. H. A. 1974. Material science and process. 1st ed. Delhi: Dhanpat Rai.

Kafalias, M. C.; Swartz, M. L.; and Phillips, R. W. 1963. Physical properties of selected dental resins: Part I. J Prosthet Dent 13(6): 1087-1107.

Kawano, F.; Ohguri, T.; Ichikawa, T.; Mizuno, I.; and Hasegawa, A. 2002. Effect of filler fraction and filler surface treatment on wear of microfilled composites. Int J Prosthodont 15(3): 243-247.

Katz, H. S.; and Malewski, J. V. 1978. Handbook of fillers and reinforcements for plastics. New York: Reinhold.

Khan, Z.; Morris, J.C.; and Fraunhofer, J. A. 1984. Wear of nonanatomic (monoplane) acrylic resin denture teeth. J Prosthet Dent 52: 172-174.

Lang, B. R.; Jaarda, M.; and Wang, R. -F. 1992. Filler particle size and composite resin classification systems. J Oral Rehabil 19: 569-584.

Li, Y.; Swartz, M. L.; Phillips, R. W.; Moore, B. K.; and Roberts, T. A. 1985. Effect of filler content and size on properties of composites. J Dent Res 64(12): 1396-1401.

Lim, B. -S. ; Ferracance, J. L.; Condon, J. R.; and Adey, J. D. 2002. Effect of filler fraction and filler surface treatment on wear of microfilled composites. Dent Mater 18: 1-11.

Lindquist, T. J.; Ogle, R. E.; and Davis, E. L. 1995. Twelve-month results of a clinical wear study of three artificial tooth materials. J Prosthet Dent 74: 156-161.

Mahalick, J. A.; Knap, F. J.; and Weiter, E. J. 1971. Occlusal wear in prosthodontics. J Am Dent Assoc 82: 154-159.

Mair, L. H. 1992. Wear in dentistry-current terminology. J Dent 20: 14-144.

Mair, L. H.; Stolarski, T. A.; Vowles, R. W.; and Lloyd, C. H. 1996. Conference report-Wear: mechanisms, manifestations, and measurement-Report of a workshop. J Dent 24: 141-148.

Mandikos, M. N.; McGivney, G. P.; Davis, E.; and Carter, J. M. 2001. A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins. J Prosthet Dent 85: 386-395.

McCabe, J. F. 1990. Applied dental materials. 7th ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications.

Moser, J. B.; and Greener, E. H. 1972. Property studies of three composite resins. Int Assoc Dent Res Abst. No. 571.

Moser, J. B.; and Greener, E. H. 1973. A comparative properties study of three new restorative resins. Int Assoc Dent Res Abst. No. 34.

Murphy, J. 1996. The additive for plastics handbook. Oxford: Elsevier Advanced Technology.

Operating instructions. 2001. V-8 cross brushing machine. Illinois: SABRI Dental Enterprises.

Schultz, A. W. 1951. Comfort and chewing efficiency in dentures. J Prosthet Dent 1: 38-48.

Seymour, R. B. 1978. Additive for plastic, Vol.1. Mississippi: Academic Press.

Sivarajan , V. 1980. Introduction to materials science. Bangalore: VK Publishers.

St. Germain, H.; Swartz, M. L.; Phillips, R. W.; Moore, B. K.; and Roberts, T. A. 1985. Properties of microfilled composite resin as influenced by filler content. J Dent Res 64(2): 155-160.

Sulong, M. Z. A. M.; and Aziz, R. A. 1990. Wear of materials used in dentistry: A review of the literature. J Prosthet Dent 63: 342-349.

Suzuki, S.; Sakoh, M.; and Shiba, A. 1990. Impact resistance of highly crosslinked plastic denture teeth. J Biomed Mater Res 24: 1661-1671.

Sweeney, W. T.; Yost, E. L.; and Fee, J. G. 1958. Effect of filler fraction and filler surface treatment on wear of microfilled composites. J Am Dent Assoc 56: 833-841.

Van Noort, R. 2002. Introduction to dental materials. 2th ed. Edinburgh, London, New York, Philadelphia, St Louis, Sydney, Tolonto: Mosby.

Wake, W. C. 1971. Fillers for Plastics. London: Butterworth.

Whitman, D. J.; McKinney, J. E.; Hinman, R. W.; Hesby, R. A.; and Pelleu, G. B. 1987. In vitro wear rates of three types of commercial denture tooth materials. J Prosthet Dent 57: 243-246.

Winkler, S.; Monasky, G. E.; and Kwok, J. 1992. Laboratory wear investigation of resin posterior denture teeth. J Prosthet Dent 67: 812-814.

Wright, P. S. 1994. The clinical handling of dental materials. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบความแข็งผิวเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกชนิดต่างๆ

Group	N	Mean (VHN)	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum (VHN)	Maximum (VHN)
					Lower Bound	Upper Bound		
0	50	17.908	8.291E-02	1.172E-02	17.884	17.932	17.8	18.1
1	50	18.750	8.864E-02	1.254E-02	18.725	18.775	18.6	18.9
2	50	19.840	9.897E-02	1.400E-02	19.812	19.868	19.7	20.0
3	50	20.458	9.708E-02	1.373E-02	20.430	20.486	20.3	20.6
4	50	21.912	0.121	1.706E-02	21.878	21.946	21.7	22.1
5	50	21.558	0.103	1.459E-02	21.529	21.587	21.4	21.7
6	50	19.144	9.723E-02	1.375E-02	19.116	19.172	19.0	19.3
7	50	19.846	9.941E-02	1.406E-02	19.818	19.874	19.7	20.0
8	50	20.256	0.103	1.461E-02	20.227	20.285	20.1	20.4
9	50	20.966	0.115	1.632E-02	20.933	20.999	20.8	21.2
10	50	21.414	0.123	1.738E-02	21.379	21.449	21.2	21.6
11	50	18.196	7.273E-02	1.029E-02	18.175	18.217	18.1	18.3
12	50	19.452	9.528E-02	1.347E-02	19.425	19.479	19.3	19.6
13	50	20.652	9.947E-02	1.407E-02	20.624	20.680	20.5	20.8
14	50	23.744	0.101	1.433E-02	23.715	23.773	23.6	23.9
15	50	25.606	0.122	1.724E-02	25.571	25.641	25.4	25.8
16	50	18.456	0.253	3.582E-02	18.384	18.528	18.1	18.9
17	50	21.386	0.202	2.857E-02	21.329	21.443	21.0	21.8
18	50	33.560	0.269	3.801E-02	33.484	33.636	33.1	34.0
19	50	40.530	0.229	3.236E-02	40.465	40.595	40.1	41.0
Total	1000	22.182	5.389	0.170	21.847	22.516	17.8	41.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

GR			surface hardness
0	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	17.908
		Std. Deviation	8.291E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.206
		Positive	.198
		Negative	-.206
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.460
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.028
1	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	18.750
		Std. Deviation	8.864E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.234
		Positive	.194
		Negative	-.234
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.652
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.009
2	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	19.840
		Std. Deviation	9.897E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.217
		Positive	.217
		Negative	-.168
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.534
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.018
3	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	20.458
		Std. Deviation	9.708E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.205
		Positive	.205
		Negative	-.187
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.449
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.030
4	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	21.912
		Std. Deviation	.121
	Most Extreme Differences	Absolute	.167
		Positive	.143
		Negative	-.167
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.182
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.122
5	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	21.558
		Std. Deviation	.103

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

GR			surface hardness
5	Most Extreme Differences	Absolute	.198
		Positive	.173
		Negative	-.198
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.400
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.040
6	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	19.144
		Std. Deviation	9.723E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.215
		Positive	.215
		Negative	-.178
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.517
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.020
7	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	19.846
		Std. Deviation	9.941E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.207
		Positive	.178
		Negative	-.207
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.460
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.028
8	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	20.256
		Std. Deviation	.103
	Most Extreme Differences	Absolute	.186
		Positive	.186
		Negative	-.185
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.316
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.063
9	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	20.966
		Std. Deviation	.115
	Most Extreme Differences	Absolute	.196
		Positive	.196
		Negative	-.136
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.388
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.042

ตารางที่ 9 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

GR			surface hardness
10	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	21.414
		Std. Deviation	.123
	Most Extreme Differences	Absolute	.178
		Positive	.125
		Negative	-.178
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.258
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.084
11	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	18.196
		Std. Deviation	7.273E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.242
		Positive	.238
		Negative	-.242
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.711
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.006
12	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	19.452
		Std. Deviation	9.528E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.213
		Positive	.187
		Negative	-.213
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.505
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.022
13	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	20.652
		Std. Deviation	9.947E-02
	Most Extreme Differences	Absolute	.205
		Positive	.179
		Negative	-.205
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.452
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.030
14	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	23.744
		Std. Deviation	.101
	Most Extreme Differences	Absolute	.208
		Positive	.208
		Negative	-.170
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.470
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.027
15	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	25.606
		Std. Deviation	.122

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

GR			surface hardness
15	Most Extreme Differences	Absolute	.160
		Positive	.160
		Negative	-.160
	Kolmogorov-Smirnov Z		1.134
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.153
16	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	18.456
		Std. Deviation	.253
	Most Extreme Differences	Absolute	.127
		Positive	.127
		Negative	-.112
	Kolmogorov-Smirnov Z		.902
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.391
17	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	21.386
		Std. Deviation	.202
	Most Extreme Differences	Absolute	.135
		Positive	.125
		Negative	-.135
	Kolmogorov-Smirnov Z		.956
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.320
18	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	33.560
		Std. Deviation	.269
	Most Extreme Differences	Absolute	.119
		Positive	.093
		Negative	-.119
	Kolmogorov-Smirnov Z		.840
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.481
19	N		50
	Normal Parameters[a,b]	Mean	40.530
		Std. Deviation	.229
	Most Extreme Differences	Absolute	.111
		Positive	.103
		Negative	-.111
	Kolmogorov-Smirnov Z		.787
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.566

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตารางที่10 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

ANOVA

surface hardness

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	28994.99	19	1526.052	76970.98	.000
Within Groups	19.430	980	1.983E-02		
Total	29014.42	999			

ตารางที่ 11 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่ม ในการทดสอบความแข็งผิว

Test of Homogeneity of Variances

surface hardness

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
22.925	19	980	.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
0	1	-.842*	2.816E-02	-.906	-.778
	2	-1.932*	2.816E-02	-2.000	-1.864
	3	-2.550*	2.816E-02	-2.618	-2.482
	4	-4.004*	2.816E-02	-4.081	-3.927
	5	-3.650*	2.816E-02	-3.720	-3.580
	6	-1.236*	2.816E-02	-1.304	-1.168
	7	-1.938*	2.816E-02	-2.007	-1.869
	8	-2.348*	2.816E-02	-2.418	-2.278
	9	-3.058*	2.816E-02	-3.133	-2.983
	10	-3.506*	2.816E-02	-3.584	-3.428
	11	-.288*	2.816E-02	-.346	-.230
	12	-1.544*	2.816E-02	-1.611	-1.477
	13	-2.744*	2.816E-02	-2.813	-2.675
	14	-5.836*	2.816E-02	-5.905	-5.767
	15	-7.698*	2.816E-02	-7.776	-7.620
	16	-.548*	2.816E-02	-.689	-.407
	17	-3.478*	2.816E-02	-3.594	-3.362
	18	-15.652*	2.816E-02	-15.801	-15.503
	19	-22.622*	2.816E-02	-22.751	-22.493
1	0	.842*	2.816E-02	.778	.906
	2	-1.090*	2.816E-02	-1.160	-1.020
	3	-1.708*	2.816E-02	-1.778	-1.638
	4	-3.162*	2.816E-02	-3.241	-3.083
	5	-2.808*	2.816E-02	-2.880	-2.736
	6	-.394*	2.816E-02	-.464	-.324
	7	-1.096*	2.816E-02	-1.167	-1.025
	8	-1.506*	2.816E-02	-1.578	-1.434
	9	-2.216*	2.816E-02	-2.293	-2.139
	10	-2.664*	2.816E-02	-2.744	-2.584
	11	.554*	2.816E-02	.493	.615
	12	-.702*	2.816E-02	-.771	-.633
	13	-1.902*	2.816E-02	-1.973	-1.831
	14	-4.994*	2.816E-02	-5.065	-4.923
	15	-6.856*	2.816E-02	-6.936	-6.776
	16	.294*	2.816E-02	.152	.436
	17	-2.636*	2.816E-02	-2.753	-2.519
	18	-14.810*	2.816E-02	-14.960	-14.660
	19	-21.780*	2.816E-02	-21.910	-21.650

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
2	0	1.932*	2.816E-02	1.864	2.000
	1	1.090*	2.816E-02	1.020	1.160
	3	-.618*	2.816E-02	-.691	-.545
	4	-2.072*	2.816E-02	-2.155	-1.989
	5	-1.718*	2.816E-02	-1.794	-1.642
	6	.696*	2.816E-02	.623	.769
	7	-6.000E-03	2.816E-02	-8.025E-02	6.825E-02
	8	-.416*	2.816E-02	-.492	-.340
	9	-1.126*	2.816E-02	-1.206	-1.046
	10	-1.574*	2.816E-02	-1.658	-1.490
	11	1.644*	2.816E-02	1.579	1.709
	12	.388*	2.816E-02	.315	.461
	13	-.812*	2.816E-02	-.886	-.738
	14	-3.904*	2.816E-02	-3.979	-3.829
	15	-5.766*	2.816E-02	-5.849	-5.683
	16	1.384*	2.816E-02	1.240	1.528
	17	-1.546*	2.816E-02	-1.665	-1.427
	18	-13.720*	2.816E-02	-13.872	-13.568
	19	-20.690*	2.816E-02	-20.822	-20.558
3	0	2.550*	2.816E-02	2.482	2.618
	1	1.708*	2.816E-02	1.638	1.778
	2	.618*	2.816E-02	.545	.691
	4	-1.454*	2.816E-02	-1.536	-1.372
	5	-1.100*	2.816E-02	-1.175	-1.025
	6	1.314*	2.816E-02	1.241	1.387
	7	.612*	2.816E-02	.538	.686
	8	.202*	2.816E-02	.127	.277
	9	-.508*	2.816E-02	-.588	-.428
	10	-.956*	2.816E-02	-1.039	-.873
	11	2.262*	2.816E-02	2.198	2.326
	12	1.006*	2.816E-02	.934	1.078
	13	-.194*	2.816E-02	-.268	-.120
	14	-3.286*	2.816E-02	-3.360	-3.212
	15	-5.148*	2.816E-02	-5.230	-5.066
	16	2.002*	2.816E-02	1.858	2.146
	17	-.928*	2.816E-02	-1.047	-.809
	18	-13.102*	2.816E-02	-13.253	-12.951
	19	-20.072*	2.816E-02	-20.204	-19.940

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
4	0	4.004*	2.816E-02	3.927	4.081
	1	3.162*	2.816E-02	3.083	3.241
	2	2.072*	2.816E-02	1.989	2.155
	3	1.454*	2.816E-02	1.372	1.536
	5	.354*	2.816E-02	.270	.438
	6	2.768*	2.816E-02	2.686	2.850
	7	2.066*	2.816E-02	1.983	2.149
	8	1.656*	2.816E-02	1.572	1.740
	9	.946*	2.816E-02	.858	1.034
	10	.498*	2.816E-02	.407	.589
	11	3.716*	2.816E-02	3.641	3.791
	12	2.460*	2.816E-02	2.379	2.541
	13	1.260*	2.816E-02	1.177	1.343
	14	-1.832*	2.816E-02	-1.915	-1.749
	15	-3.694*	2.816E-02	-3.785	-3.603
	16	3.456*	2.816E-02	3.308	3.604
	17	.526*	2.816E-02	.401	.651
	18	-11.648*	2.816E-02	-11.804	-11.492
	19	-18.618*	2.816E-02	-18.755	-18.481
5	0	3.650*	2.816E-02	3.580	3.720
	1	2.808*	2.816E-02	2.736	2.880
	2	1.718*	2.816E-02	1.642	1.794
	3	1.100*	2.816E-02	1.025	1.175
	4	-.354*	2.816E-02	-.438	-.270
	6	2.414*	2.816E-02	2.339	2.489
	7	1.712*	2.816E-02	1.636	1.788
	8	1.302*	2.816E-02	1.225	1.379
	9	.592*	2.816E-02	.510	.674
	10	.144*	2.816E-02	5.905E-02	.229
	11	3.362*	2.816E-02	3.295	3.429
	12	2.106*	2.816E-02	2.032	2.180
	13	.906*	2.816E-02	.830	.982
	14	-2.186*	2.816E-02	-2.263	-2.109
	15	-4.048*	2.816E-02	-4.133	-3.963
	16	3.102*	2.816E-02	2.957	3.247
	17	.172*	2.816E-02	5.191E-02	.292
	18	-12.002*	2.816E-02	-12.154	-11.850
	19	-18.972*	2.816E-02	-19.105	-18.839

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
6	0	1.236*	2.816E-02	1.168	1.304
	1	.394*	2.816E-02	.324	.464
	2	-.696*	2.816E-02	-.769	-.623
	3	-1.314*	2.816E-02	-1.387	-1.241
	4	-2.768*	2.816E-02	-2.850	-2.686
	5	-2.414*	2.816E-02	-2.489	-2.339
	7	-.702*	2.816E-02	-.776	-.628
	8	-1.112*	2.816E-02	-1.187	-1.037
	9	-1.822*	2.816E-02	-1.902	-1.742
	10	-2.270*	2.816E-02	-2.353	-2.187
	11	.948*	2.816E-02	.884	1.012
	12	-.308*	2.816E-02	-.380	-.236
	13	-1.508*	2.816E-02	-1.582	-1.434
	14	-4.600*	2.816E-02	-4.674	-4.526
	15	-6.462*	2.816E-02	-6.545	-6.379
	16	.688*	2.816E-02	.544	.832
	17	-2.242*	2.816E-02	-2.361	-2.123
	18	-14.416*	2.816E-02	-14.567	-14.265
	19	-21.386*	2.816E-02	-21.518	-21.254
7	0	1.938*	2.816E-02	1.869	2.007
	1	1.096*	2.816E-02	1.025	1.167
	2	6.000E-03	2.816E-02	-6.825E-02	8.025E-02
	3	-.612*	2.816E-02	-.686	-.538
	4	-2.066*	2.816E-02	-2.149	-1.983
	5	-1.712*	2.816E-02	-1.788	-1.636
	6	.702*	2.816E-02	.628	.776
	8	-.410*	2.816E-02	-.486	-.334
	9	-1.120*	2.816E-02	-1.201	-1.039
	10	-1.568*	2.816E-02	-1.652	-1.484
	11	1.650*	2.816E-02	1.585	1.715
	12	.394*	2.816E-02	.321	.467
	13	-.806*	2.816E-02	-.880	-.732
	14	-3.898*	2.816E-02	-3.973	-3.823
	15	-5.760*	2.816E-02	-5.843	-5.677
	16	1.390*	2.816E-02	1.246	1.534
	17	-1.540*	2.816E-02	-1.659	-1.421
	18	-13.714*	2.816E-02	-13.866	-13.562
	19	-20.684*	2.816E-02	-20.816	-20.552

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
8	0	2.348*	2.816E-02	2.278	2.418
	1	1.506*	2.816E-02	1.434	1.578
	2	.416*	2.816E-02	.340	.492
	3	-.202*	2.816E-02	-.277	-.127
	4	-1.656*	2.816E-02	-1.740	-1.572
	5	-1.302*	2.816E-02	-1.379	-1.225
	6	1.112*	2.816E-02	1.037	1.187
	7	.410*	2.816E-02	.334	.486
	9	-.710*	2.816E-02	-.792	-.628
	10	-1.158*	2.816E-02	-1.243	-1.073
	11	2.060*	2.816E-02	1.993	2.127
	12	.804*	2.816E-02	.730	.878
	13	-.396*	2.816E-02	-.472	-.320
	14	-3.488*	2.816E-02	-3.565	-3.411
	15	-5.350*	2.816E-02	-5.435	-5.265
	16	1.800*	2.816E-02	1.655	1.945
	17	-1.130*	2.816E-02	-1.250	-1.010
	18	-13.304*	2.816E-02	-13.456	-13.152
	19	-20.274*	2.816E-02	-20.407	-20.141
9	0	3.058*	2.816E-02	2.983	3.133
	1	2.216*	2.816E-02	2.139	2.293
	2	1.126*	2.816E-02	1.046	1.206
	3	.508*	2.816E-02	.428	.588
	4	-.946*	2.816E-02	-1.034	-.858
	5	-.592*	2.816E-02	-.674	-.510
	6	1.822*	2.816E-02	1.742	1.902
	7	1.120*	2.816E-02	1.039	1.201
	8	.710*	2.816E-02	.628	.792
	10	-.448*	2.816E-02	-.537	-.359
	11	2.770*	2.816E-02	2.698	2.842
	12	1.514*	2.816E-02	1.435	1.593
	13	.314*	2.816E-02	.233	.395
	14	-2.778*	2.816E-02	-2.859	-2.697
	15	-4.640*	2.816E-02	-4.729	-4.551
	16	2.510*	2.816E-02	2.363	2.657
	17	-.420*	2.816E-02	-.543	-.297
	18	-12.594*	2.816E-02	-12.749	-12.439
	19	-19.564*	2.816E-02	-19.700	-19.428

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
10	0	3.506*	2.816E-02	3.428	3.584
	1	2.664*	2.816E-02	2.584	2.744
	2	1.574*	2.816E-02	1.490	1.658
	3	.956*	2.816E-02	.873	1.039
	4	-.498*	2.816E-02	-.589	-.407
	5	-.144*	2.816E-02	-.229	-5.905E-02
	6	2.270*	2.816E-02	2.187	2.353
	7	1.568*	2.816E-02	1.484	1.652
	8	1.158*	2.816E-02	1.073	1.243
	9	.448*	2.816E-02	.359	.537
	11	3.218*	2.816E-02	3.142	3.294
	12	1.962*	2.816E-02	1.880	2.044
	13	.762*	2.816E-02	.678	.846
	14	-2.330*	2.816E-02	-2.414	-2.246
	15	-4.192*	2.816E-02	-4.284	-4.100
	16	2.958*	2.816E-02	2.809	3.107
	17	2.800E-02	2.816E-02	-9.718E-02	.153
	18	-12.146*	2.816E-02	-12.302	-11.990
	19	-19.116*	2.816E-02	-19.253	-18.979
11	0	.288*	2.816E-02	.230	.346
	1	-.554*	2.816E-02	-.615	-.493
	2	-1.644*	2.816E-02	-1.709	-1.579
	3	-2.262*	2.816E-02	-2.326	-2.198
	4	-3.716*	2.816E-02	-3.791	-3.641
	5	-3.362*	2.816E-02	-3.429	-3.295
	6	-.948*	2.816E-02	-1.012	-.884
	7	-1.650*	2.816E-02	-1.715	-1.585
	8	-2.060*	2.816E-02	-2.127	-1.993
	9	-2.770*	2.816E-02	-2.842	-2.698
	10	-3.218*	2.816E-02	-3.294	-3.142
	12	-1.256*	2.816E-02	-1.319	-1.193
	13	-2.456*	2.816E-02	-2.521	-2.391
	14	-5.548*	2.816E-02	-5.614	-5.482
	15	-7.410*	2.816E-02	-7.485	-7.335
	16	-.260*	2.816E-02	-.399	-.121
	17	-3.190*	2.816E-02	-3.304	-3.076
	18	-15.364*	2.816E-02	-15.511	-15.217
	19	-22.334*	2.816E-02	-22.461	-22.207

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
12	0	1.544*	2.816E-02	1.477	1.611
	1	.702*	2.816E-02	.633	.771
	2	-.388*	2.816E-02	-.461	-.315
	3	-1.006*	2.816E-02	-1.078	-.934
	4	-2.460*	2.816E-02	-2.541	-2.379
	5	-2.106*	2.816E-02	-2.180	-2.032
	6	.308*	2.816E-02	.236	.380
	7	-.394*	2.816E-02	-.467	-.321
	8	-.804*	2.816E-02	-.878	-.730
	9	-1.514*	2.816E-02	-1.593	-1.435
	10	-1.962*	2.816E-02	-2.044	-1.880
	11	1.256*	2.816E-02	1.193	1.319
	13	-1.200*	2.816E-02	-1.273	-1.127
	14	-4.292*	2.816E-02	-4.366	-4.218
	15	-6.154*	2.816E-02	-6.236	-6.072
	16	.996*	2.816E-02	.853	1.139
	17	-1.934*	2.816E-02	-2.052	-1.816
	18	-14.108*	2.816E-02	-14.259	-13.957
	19	-21.078*	2.816E-02	-21.209	-20.947
13	0	2.744*	2.816E-02	2.675	2.813
	1	1.902*	2.816E-02	1.831	1.973
	2	.812*	2.816E-02	.738	.886
	3	.194*	2.816E-02	.120	.268
	4	-1.260*	2.816E-02	-1.343	-1.177
	5	-.906*	2.816E-02	-.982	-.830
	6	1.508*	2.816E-02	1.434	1.582
	7	.806*	2.816E-02	.732	.880
	8	.396*	2.816E-02	.320	.472
	9	-.314*	2.816E-02	-.395	-.233
	10	-.762*	2.816E-02	-.846	-.678
	11	2.456*	2.816E-02	2.391	2.521
	12	1.200*	2.816E-02	1.127	1.273
	14	-3.092*	2.816E-02	-3.167	-3.017
	15	-4.954*	2.816E-02	-5.037	-4.871
	16	2.196*	2.816E-02	2.052	2.340
	17	-.734*	2.816E-02	-.853	-.615
	18	-12.908*	2.816E-02	-13.060	-12.756
	19	-19.878*	2.816E-02	-20.010	-19.746

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
14	0	5.836*	2.816E-02	5.767	5.905
	1	4.994*	2.816E-02	4.923	5.065
	2	3.904*	2.816E-02	3.829	3.979
	3	3.286*	2.816E-02	3.212	3.360
	4	1.832*	2.816E-02	1.749	1.915
	5	2.186*	2.816E-02	2.109	2.263
	6	4.600*	2.816E-02	4.526	4.674
	7	3.898*	2.816E-02	3.823	3.973
	8	3.488*	2.816E-02	3.411	3.565
	9	2.778*	2.816E-02	2.697	2.859
	10	2.330*	2.816E-02	2.246	2.414
	11	5.548*	2.816E-02	5.482	5.614
	12	4.292*	2.816E-02	4.218	4.366
	13	3.092*	2.816E-02	3.017	3.167
	15	-1.862*	2.816E-02	-1.946	-1.778
	16	5.288*	2.816E-02	5.144	5.432
	17	2.358*	2.816E-02	2.238	2.478
	18	-9.816*	2.816E-02	-9.968	-9.664
	19	-16.786*	2.816E-02	-16.918	-16.654
15	0	7.698*	2.816E-02	7.620	7.776
	1	6.856*	2.816E-02	6.776	6.936
	2	5.766*	2.816E-02	5.683	5.849
	3	5.148*	2.816E-02	5.066	5.230
	4	3.694*	2.816E-02	3.603	3.785
	5	4.048*	2.816E-02	3.963	4.133
	6	6.462*	2.816E-02	6.379	6.545
	7	5.760*	2.816E-02	5.677	5.843
	8	5.350*	2.816E-02	5.265	5.435
	9	4.640*	2.816E-02	4.551	4.729
	10	4.192*	2.816E-02	4.100	4.284
	11	7.410*	2.816E-02	7.335	7.485
	12	6.154*	2.816E-02	6.072	6.236
	13	4.954*	2.816E-02	4.871	5.037
	14	1.862*	2.816E-02	1.778	1.946
	16	7.150*	2.816E-02	7.001	7.299
	17	4.220*	2.816E-02	4.095	4.345
	18	-7.954*	2.816E-02	-8.110	-7.798
	19	-14.924*	2.816E-02	-15.061	-14.787

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
16	0	.548*	2.816E-02	.407	.689
	1	-.294*	2.816E-02	-.436	-.152
	2	-1.384*	2.816E-02	-1.528	-1.240
	3	-2.002*	2.816E-02	-2.146	-1.858
	4	-3.456*	2.816E-02	-3.604	-3.308
	5	-3.102*	2.816E-02	-3.247	-2.957
	6	-.688*	2.816E-02	-.832	-.544
	7	-1.390*	2.816E-02	-1.534	-1.246
	8	-1.800*	2.816E-02	-1.945	-1.655
	9	-2.510*	2.816E-02	-2.657	-2.363
	10	-2.958*	2.816E-02	-3.107	-2.809
	11	.260*	2.816E-02	.121	.399
	12	-.996*	2.816E-02	-1.139	-.853
	13	-2.196*	2.816E-02	-2.340	-2.052
	14	-5.288*	2.816E-02	-5.432	-5.144
	15	-7.150*	2.816E-02	-7.299	-7.001
	17	-2.930*	2.816E-02	-3.101	-2.759
	18	-15.104*	2.816E-02	-15.299	-14.909
	19	-22.074*	2.816E-02	-22.255	-21.893
17	0	3.478*	2.816E-02	3.362	3.594
	1	2.636*	2.816E-02	2.519	2.753
	2	1.546*	2.816E-02	1.427	1.665
	3	.928*	2.816E-02	.809	1.047
	4	-.526*	2.816E-02	-.651	-.401
	5	-.172*	2.816E-02	-.292	-5.191E-02
	6	2.242*	2.816E-02	2.123	2.361
	7	1.540*	2.816E-02	1.421	1.659
	8	1.130*	2.816E-02	1.010	1.250
	9	.420*	2.816E-02	.297	.543
	10	-2.800E-02	2.816E-02	-.153	9.718E-02
	11	3.190*	2.816E-02	3.076	3.304
	12	1.934*	2.816E-02	1.816	2.052
	13	.734*	2.816E-02	.615	.853
	14	-2.358*	2.816E-02	-2.478	-2.238
	15	-4.220*	2.816E-02	-4.345	-4.095
	16	2.930*	2.816E-02	2.759	3.101
	18	-12.174*	2.816E-02	-12.352	-11.996
	19	-19.144*	2.816E-02	-19.306	-18.982

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความแข็งผิว

Multiple Comparisons

Dependent Variable: surface hardness
Dunnett C

(I) GR	(J) GR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
18	0	15.652*	2.816E-02	15.503	15.801
	1	14.810*	2.816E-02	14.660	14.960
	2	13.720*	2.816E-02	13.568	13.872
	3	13.102*	2.816E-02	12.951	13.253
	4	11.648*	2.816E-02	11.492	11.804
	5	12.002*	2.816E-02	11.850	12.154
	6	14.416*	2.816E-02	14.265	14.567
	7	13.714*	2.816E-02	13.562	13.866
	8	13.304*	2.816E-02	13.152	13.456
	9	12.594*	2.816E-02	12.439	12.749
	10	12.146*	2.816E-02	11.990	12.302
	11	15.364*	2.816E-02	15.217	15.511
	12	14.108*	2.816E-02	13.957	14.259
	13	12.908*	2.816E-02	12.756	13.060
	14	9.816*	2.816E-02	9.664	9.968
	15	7.954*	2.816E-02	7.798	8.110
	16	15.104*	2.816E-02	14.909	15.299
	17	12.174*	2.816E-02	11.996	12.352
	19	-6.970*	2.816E-02	-7.157	-6.783
19	0	22.622*	2.816E-02	22.493	22.751
	1	21.780*	2.816E-02	21.650	21.910
	2	20.690*	2.816E-02	20.558	20.822
	3	20.072*	2.816E-02	19.940	20.204
	4	18.618*	2.816E-02	18.481	18.755
	5	18.972*	2.816E-02	18.839	19.105
	6	21.386*	2.816E-02	21.254	21.518
	7	20.684*	2.816E-02	20.552	20.816
	8	20.274*	2.816E-02	20.141	20.407
	9	19.564*	2.816E-02	19.428	19.700
	10	19.116*	2.816E-02	18.979	19.253
	11	22.334*	2.816E-02	22.207	22.461
	12	21.078*	2.816E-02	20.947	21.209
	13	19.878*	2.816E-02	19.746	20.010
	14	16.786*	2.816E-02	16.654	16.918
	15	14.924*	2.816E-02	14.787	15.061
	16	22.074*	2.816E-02	21.893	22.255
	17	19.144*	2.816E-02	18.982	19.306
	18	6.970*	2.816E-02	6.783	7.157

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

ตารางที่ 13 แสดงการทดสอบความมีอิทธิพลระหว่างตัวแปรในการทดสอบความแข็งผิว

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: surface hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	28994.985[a]	19	1526.052	76970.98	.000
Intercept	497848.952	1	497848.952	2.5E+07	.000
GROUP	20775.344	6	3462.557	174644.4	.000
PERCENT	1791.840	4	447.960	22594.20	.000
GROUP * PERCENT	586.099	8	73.262	3695.205	.000
Error	19.430	980	1.983E-02		
Total	521042.230	1000			
Corrected Total	29014.415	999			

a. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 14 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาของการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีเมื่อเติมวัสดุอัดแทรกชนิดต่างๆ

Group	N	Mean (g.)	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum (g.)	Maximum (g.)
					Lower Bound	Upper Bound		
0	10	1.40E-03	1.69E-04	5.37E-05	1.27E-03	1.52E-03	.0012	.0017
1	10	1.42E-03	1.135E-04	3.59E-05	1.33E-03	1.50E-03	.0012	.0016
2	10	1.19 E-03	1.72E-04	5.46E-05	1.06E-03	1.31E-03	.0010	.0015
3	10	2.41 E-03	1.72E-04	5.46E-05	2.28E-03	2.53E-03	.0022	.0028
4	10	4.55 E-03	2.17E-04	6.87E-05	4.39E-03	4.70E-03	.0042	.0049
5	10	4.43 E-03	3.12E-04	9.89E-05	4.20E-03	4.65E-03	.0040	.0049
6	10	1.49 E-03	1.28E-04	4.06E-05	1.39E-03	1.58E-03	.0013	.0017
7	10	1.42E-03	1.47E-04	4.66E-05	1.31E-03	1.52E-03	.0012	.0016
8	10	1.88 E-03	1.22E-04	3.88E-05	1.79E-03	1.96E-03	.0017	.0020
9	10	2.38 E-03	2.29E-04	7.27E-05	2.21E-03	2.54E-03	.0020	.0027
10	10	3.45 E-03	2.63E-04	8.33E-05	3.26E-03	3.63E-03	.0031	.0040
11	10	1.33 E-03	1.70E-04	5.38E-05	1.20E-03	1.45E-03	.0011	.0015
12	10	1.14 E-03	1.17 E-04	3.71 E-05	1.05E-03	1.22E-03	.0010	.0013
13	10	1.20 E-03	1.63 E-04	5.16 E-05	1.08E-03	1.31E-03	.0010	.0014
14	10	1.20 E-03	1.05 E-04	3.33 E-05	1.12E-03	1.27E-03	.0011	.0014
15	10	1.00 E-03	1.41 E-04	4.47E-05	8.98E-04	1.10E-03	.0008	.0012
16	10	5.67 E-03	1.49 E-04	4.72E-05	5.56E-03	5.77E-03	.0054	.0059
17	10	4.98 E-03	1.22 E-04	3.88E-05	4.89E-03	5.06E-03	.0048	.0052
18	10	3.34 E-03	1.50 E-04	4.76E-05	3.23E-03	3.44E-03	.0031	.0036
19	10	1.79 E-03	9.94E-05	3.14E-05	1.71E-03	1.86E-03	.0016	.0019
Total	200	2.38 E-03	1.45E-03	1.02E-04	2.18E-03	2.58E-03	.0008	.0059

ตารางที่ 15 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

COMBINE			worn mass
0	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.400E-03
		Std. Deviation	1.700E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.222
		Positive	.222
		Negative	-.122
	Kolmogorov-Smirnov Z		.702
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.709
1	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.420E-03
		Std. Deviation	1.135E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.230
		Positive	.170
		Negative	-.230
	Kolmogorov-Smirnov Z		.728
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.665
2	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.190E-03
		Std. Deviation	1.729E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.177
		Positive	.177
		Negative	-.136
	Kolmogorov-Smirnov Z		.560
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.913
3	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	2.410E-03
		Std. Deviation	1.729E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.238
		Positive	.238
		Negative	-.162
	Kolmogorov-Smirnov Z		.752
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.624
4	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	4.550E-03
		Std. Deviation	2.173E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.109
		Positive	.109
		Negative	-.109
	Kolmogorov-Smirnov Z		.345
	Asymp. Sig. (2-tailed)		1.000
5	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	4.430E-03
		Std. Deviation	3.129E-04

ตารางที่ 15 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

COMBINE			worn mass
5	Most Extreme Differences	Absolute	.161
		Positive	.161
		Negative	-.139
	Kolmogorov-Smirnov Z		.509
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.958
6	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.490E-03
		Std. Deviation	1.287E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.231
		Positive	.169
		Negative	-.231
	Kolmogorov-Smirnov Z		.730
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.660
7	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.420E-03
		Std. Deviation	1.476E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.206
		Positive	.132
		Negative	-.206
	Kolmogorov-Smirnov Z		.652
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.789
8	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.880E-03
		Std. Deviation	1.229E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.236
		Positive	.164
		Negative	-.236
	Kolmogorov-Smirnov Z		.745
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.636
9	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	2.380E-03
		Std. Deviation	2.300E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.135
		Positive	.088
		Negative	-.135
	Kolmogorov-Smirnov Z		.426
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.993

ตารางที่ 15 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

COMBINE			worn mass
10	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	3.450E-03
		Std. Deviation	2.635E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.175
		Positive	.175
		Negative	-.092
	Kolmogorov-Smirnov Z		.554
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.919
11	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.330E-03
		Std. Deviation	1.703E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.241
		Positive	.177
		Negative	-.241
	Kolmogorov-Smirnov Z		.762
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.607
12	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.140E-03
		Std. Deviation	1.174E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.195
		Positive	.184
		Negative	-.195
	Kolmogorov-Smirnov Z		.618
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.840
13	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.200E-03
		Std. Deviation	1.633E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.230
		Positive	.190
		Negative	-.230
	Kolmogorov-Smirnov Z		.727
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.666
14	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.200E-03
		Std. Deviation	1.054E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.229
		Positive	.229
		Negative	-.171
	Kolmogorov-Smirnov Z		.723
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.673
15	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.000E-03
		Std. Deviation	1.414E-04

ตารางที่ 15 แสดงการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

COMBINE			worn mass
15	Most Extreme Differences	Absolute	.260
		Positive	.160
		Negative	-.260
	Kolmogorov-Smirnov Z		.823
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.507
16	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	5.670E-03
		Std. Deviation	1.494E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.180
		Positive	.120
		Negative	-.180
	Kolmogorov-Smirnov Z		.568
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.904
17	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	4.980E-03
		Std. Deviation	1.229E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.242
		Positive	.242
		Negative	-.158
	Kolmogorov-Smirnov Z		.767
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.599
18	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	3.340E-03
		Std. Deviation	1.506E-04
	Most Extreme Differences	Absolute	.155
		Positive	.145
		Negative	-.155
	Kolmogorov-Smirnov Z		.490
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.970
19	N		10
	Normal Parameters[a,b]	Mean	1.790E-03
		Std. Deviation	9.944E-05
	Most Extreme Differences	Absolute	.240
		Positive	.160
		Negative	-.240
	Kolmogorov-Smirnov Z		.759
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.612

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตารางที่ 16 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของข้อมูล ในการทดสอบความต้านทานการสึก

ANOVA

worn mass

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4.150E-04	19	2.184E-05	736.698	.000
Within Groups	5.337E-06	180	2.965E-08		
Total	4.204E-04	199			

ตารางที่ 17 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่ม ในการทดสอบความต้านทานการสึก

Test of Homogeneity of Variances

worn mass

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.338	19	180	.002

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	1	-2.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.217E-04	2.817E-04
	2	2.100E-04	7.7E-05	.924	-1.359E-04	5.559E-04
	3	-1.01E-03*	7.7E-05	.000	-1.356E-03	-6.64E-04
	4	-3.15E-03*	7.7E-05	.000	-3.549E-03	-2.75E-03
	5	-3.03E-03*	7.7E-05	.000	-3.575E-03	-2.49E-03
	6	-9.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.994E-04	2.194E-04
	7	-2.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.426E-04	3.026E-04
	8	-4.80E-04*	7.7E-05	.000	-7.861E-04	-1.74E-04
	9	-9.80E-04*	7.7E-05	.000	-1.396E-03	-5.64E-04
	10	-2.05E-03*	7.7E-05	.000	-2.515E-03	-1.58E-03
	11	7.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.733E-04	4.133E-04
	12	2.600E-04	7.7E-05	.185	-4.340E-05	5.634E-04
	13	2.000E-04	7.7E-05	.945	-1.364E-04	5.364E-04
	14	2.000E-04	7.7E-05	.706	-9.879E-05	4.988E-04
	15	4.000E-04*	7.7E-05	.004	8.212E-05	7.179E-04
	16	-4.27E-03*	7.7E-05	.000	-4.594E-03	-3.95E-03
	17	-3.58E-03*	7.7E-05	.000	-3.886E-03	-3.27E-03
	18	-1.94E-03*	7.7E-05	.000	-2.265E-03	-1.61E-03
	19	-3.90E-04*	7.7E-05	.003	-6.872E-04	-9.28E-05
1	0	2.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.817E-04	3.217E-04
	2	2.300E-04	7.7E-05	.432	-7.612E-05	5.361E-04
	3	-9.90E-04*	7.7E-05	.000	-1.296E-03	-6.84E-04
	4	-3.13E-03*	7.7E-05	.000	-3.508E-03	-2.75E-03
	5	-3.01E-03*	7.7E-05	.000	-3.557E-03	-2.46E-03
	6	-7.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.157E-04	1.757E-04
	7	.000000	7.7E-05	1.000	-2.697E-04	2.697E-04
	8	-4.60E-04*	7.7E-05	.000	-6.991E-04	-2.21E-04
	9	-9.60E-04*	7.7E-05	.000	-1.359E-03	-5.61E-04
	10	-2.03E-03*	7.7E-05	.000	-2.488E-03	-1.57E-03
	11	9.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.122E-04	3.922E-04
	12	2.800E-04*	7.7E-05	.007	4.696E-05	5.130E-04
	13	2.200E-04	7.7E-05	.431	-7.185E-05	5.119E-04
	14	2.200E-04	7.7E-05	.053	-1.308E-06	4.413E-04
	15	4.200E-04*	7.7E-05	.000	1.585E-04	6.815E-04
	16	-4.25E-03*	7.7E-05	.000	-4.522E-03	-3.98E-03
	17	-3.56E-03*	7.7E-05	.000	-3.799E-03	-3.32E-03
	18	-1.92E-03*	7.7E-05	.000	-2.194E-03	-1.65E-03
	19	-3.70E-04*	7.7E-05	.000	-5.862E-04	-1.54E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2	0	-2.10E-04	7.7E-05	.924	-5.559E-04	1.359E-04
	1	-2.30E-04	7.7E-05	.432	-5.361E-04	7.612E-05
	3	-1.22E-03*	7.7E-05	.000	-1.569E-03	-8.71E-04
	4	-3.36E-03*	7.7E-05	.000	-3.761E-03	-2.96E-03
	5	-3.24E-03*	7.7E-05	.000	-3.785E-03	-2.69E-03
	6	-3.00E-04	7.7E-05	.075	-6.134E-04	1.339E-05
	7	-2.30E-04	7.7E-05	.620	-5.561E-04	9.615E-05
	8	-6.90E-04*	7.7E-05	.000	-1.000E-03	-3.80E-04
	9	-1.19E-03*	7.7E-05	.000	-1.608E-03	-7.72E-04
	10	-2.26E-03*	7.7E-05	.000	-2.727E-03	-1.79E-03
	11	-1.40E-04	7.7E-05	1.000	-4.862E-04	2.062E-04
	12	5.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.577E-04	3.577E-04
	13	-1.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.496E-04	3.296E-04
	14	-1.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.134E-04	2.934E-04
	15	1.900E-04	7.7E-05	.947	-1.316E-04	5.116E-04
	16	-4.48E-03*	7.7E-05	.000	-4.808E-03	-4.15E-03
	17	-3.79E-03*	7.7E-05	.000	-4.100E-03	-3.48E-03
	18	-2.15E-03*	7.7E-05	.000	-2.479E-03	-1.82E-03
	19	-6.00E-04*	7.7E-05	.000	-9.019E-04	-2.98E-04
3	0	1.010E-03*	7.7E-05	.000	6.641E-04	1.356E-03
	1	9.900E-04*	7.7E-05	.000	6.839E-04	1.296E-03
	2	1.220E-03*	7.7E-05	.000	8.712E-04	1.569E-03
	4	-2.14E-03*	7.7E-05	.000	-2.541E-03	-1.74E-03
	5	-2.02E-03*	7.7E-05	.000	-2.565E-03	-1.47E-03
	6	9.200E-04*	7.7E-05	.000	6.066E-04	1.233E-03
	7	9.900E-04*	7.7E-05	.000	6.639E-04	1.316E-03
	8	5.300E-04*	7.7E-05	.000	2.197E-04	8.403E-04
	9	3.000E-05	7.7E-05	1.000	-3.879E-04	4.479E-04
	10	-1.04E-03*	7.7E-05	.000	-1.507E-03	-5.73E-04
	11	1.080E-03*	7.7E-05	.000	7.338E-04	1.426E-03
	12	1.270E-03*	7.7E-05	.000	9.623E-04	1.578E-03
	13	1.210E-03*	7.7E-05	.000	8.704E-04	1.550E-03
	14	1.210E-03*	7.7E-05	.000	9.066E-04	1.513E-03
	15	1.410E-03*	7.7E-05	.000	1.088E-03	1.732E-03
	16	-3.26E-03*	7.7E-05	.000	-3.588E-03	-2.93E-03
	17	-2.57E-03*	7.7E-05	.000	-2.880E-03	-2.26E-03
	18	-9.30E-04*	7.7E-05	.000	-1.259E-03	-6.01E-04
	19	6.200E-04*	7.7E-05	.000	3.181E-04	9.219E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
4	0	3.150E-03*	7.7E-05	.000	2.751E-03	3.549E-03
	1	3.130E-03*	7.7E-05	.000	2.752E-03	3.508E-03
	2	3.360E-03*	7.7E-05	.000	2.959E-03	3.761E-03
	3	2.140E-03*	7.7E-05	.000	1.739E-03	2.541E-03
	5	1.200E-04	7.7E-05	1.000	-4.391E-04	6.791E-04
	6	3.060E-03*	7.7E-05	.000	2.680E-03	3.440E-03
	7	3.130E-03*	7.7E-05	.000	2.743E-03	3.517E-03
	8	2.670E-03*	7.7E-05	.000	2.291E-03	3.049E-03
	9	2.170E-03*	7.7E-05	.000	1.718E-03	2.622E-03
	10	1.100E-03*	7.7E-05	.000	6.086E-04	1.591E-03
	11	3.220E-03*	7.7E-05	.000	2.821E-03	3.619E-03
	12	3.410E-03*	7.7E-05	.000	3.032E-03	3.788E-03
	13	3.350E-03*	7.7E-05	.000	2.955E-03	3.745E-03
	14	3.350E-03*	7.7E-05	.000	2.973E-03	3.727E-03
	15	3.550E-03*	7.7E-05	.000	3.166E-03	3.934E-03
	16	-1.12E-03*	7.7E-05	.000	-1.508E-03	-7.32E-04
	17	-4.30E-04*	7.7E-05	.015	-8.090E-04	-5.10E-05
	18	1.210E-03*	7.7E-05	.000	8.219E-04	1.598E-03
	19	2.760E-03*	7.7E-05	.000	2.383E-03	3.137E-03
5	0	3.030E-03*	7.7E-05	.000	2.485E-03	3.575E-03
	1	3.010E-03*	7.7E-05	.000	2.463E-03	3.557E-03
	2	3.240E-03*	7.7E-05	.000	2.695E-03	3.785E-03
	3	2.020E-03*	7.7E-05	.000	1.475E-03	2.565E-03
	4	-1.20E-04	7.7E-05	1.000	-6.791E-04	4.391E-04
	6	2.940E-03*	7.7E-05	.000	2.396E-03	3.484E-03
	7	3.010E-03*	7.7E-05	.000	2.467E-03	3.553E-03
	8	2.550E-03*	7.7E-05	.000	2.005E-03	3.095E-03
	9	2.050E-03*	7.7E-05	.000	1.484E-03	2.616E-03
	10	9.800E-04*	7.7E-05	.000	3.925E-04	1.568E-03
	11	3.100E-03*	7.7E-05	.000	2.555E-03	3.645E-03
	12	3.290E-03*	7.7E-05	.000	2.744E-03	3.836E-03
	13	3.230E-03*	7.7E-05	.000	2.686E-03	3.774E-03
	14	3.230E-03*	7.7E-05	.000	2.682E-03	3.778E-03
	15	3.430E-03*	7.7E-05	.000	2.887E-03	3.973E-03
	16	-1.24E-03*	7.7E-05	.000	-1.783E-03	-6.97E-04
	17	-5.50E-04*	7.7E-05	.046	-1.095E-03	-4.92E-06
	18	1.090E-03*	7.7E-05	.000	5.469E-04	1.633E-03
	19	2.640E-03*	7.7E-05	.000	2.090E-03	3.190E-03

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
6	0	9.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.194E-04	3.994E-04
	1	7.000E-05	7.7E-05	1.000	-1.757E-04	3.157E-04
	2	3.000E-04	7.7E-05	.075	-1.339E-05	6.134E-04
	3	-9.20E-04*	7.7E-05	.000	-1.233E-03	-6.07E-04
	4	-3.06E-03*	7.7E-05	.000	-3.440E-03	-2.68E-03
	5	-2.94E-03*	7.7E-05	.000	-3.484E-03	-2.40E-03
	7	7.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.105E-04	3.505E-04
	8	-3.90E-04*	7.7E-05	.000	-6.440E-04	-1.36E-04
	9	-8.90E-04*	7.7E-05	.000	-1.291E-03	-4.89E-04
	10	-1.96E-03*	7.7E-05	.000	-2.417E-03	-1.50E-03
	11	1.600E-04	7.7E-05	.997	-1.498E-04	4.698E-04
	12	3.500E-04*	7.7E-05	.001	1.010E-04	5.990E-04
	13	2.900E-04	7.7E-05	.069	-1.039E-05	5.904E-04
	14	2.900E-04*	7.7E-05	.007	5.056E-05	5.294E-04
	15	4.900E-04*	7.7E-05	.000	2.167E-04	7.633E-04
	16	-4.18E-03*	7.7E-05	.000	-4.463E-03	-3.90E-03
	17	-3.49E-03*	7.7E-05	.000	-3.744E-03	-3.24E-03
	18	-1.85E-03*	7.7E-05	.000	-2.134E-03	-1.57E-03
	19	-3.00E-04*	7.7E-05	.004	-5.354E-04	-6.46E-05
7	0	2.000E-05	7.7E-05	1.000	-3.026E-04	3.426E-04
	1	.000000	7.7E-05	1.000	-2.697E-04	2.697E-04
	2	2.300E-04	7.7E-05	.620	-9.615E-05	5.561E-04
	3	-9.90E-04*	7.7E-05	.000	-1.316E-03	-6.64E-04
	4	-3.13E-03*	7.7E-05	.000	-3.517E-03	-2.74E-03
	5	-3.01E-03*	7.7E-05	.000	-3.553E-03	-2.47E-03
	6	-7.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.505E-04	2.105E-04
	8	-4.60E-04*	7.7E-05	.000	-7.361E-04	-1.84E-04
	9	-9.60E-04*	7.7E-05	.000	-1.366E-03	-5.54E-04
	10	-2.03E-03*	7.7E-05	.000	-2.489E-03	-1.57E-03
	11	9.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.330E-04	4.130E-04
	12	2.800E-04*	7.7E-05	.038	7.811E-06	5.522E-04
	13	2.200E-04	7.7E-05	.647	-9.476E-05	5.348E-04
	14	2.200E-04	7.7E-05	.236	-4.512E-05	4.851E-04
	15	4.200E-04*	7.7E-05	.001	1.283E-04	7.117E-04
	16	-4.25E-03*	7.7E-05	.000	-4.550E-03	-3.95E-03
	17	-3.56E-03*	7.7E-05	.000	-3.836E-03	-3.28E-03
	18	-1.92E-03*	7.7E-05	.000	-2.221E-03	-1.62E-03
	19	-3.70E-04*	7.7E-05	.001	-6.323E-04	-1.08E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
8	0	4.800E-04*	7.7E-05	.000	1.739E-04	7.861E-04
	1	4.600E-04*	7.7E-05	.000	2.209E-04	6.991E-04
	2	6.900E-04*	7.7E-05	.000	3.797E-04	1.000E-03
	3	-5.30E-04*	7.7E-05	.000	-8.403E-04	-2.20E-04
	4	-2.67E-03*	7.7E-05	.000	-3.049E-03	-2.29E-03
	5	-2.55E-03*	7.7E-05	.000	-3.095E-03	-2.00E-03
	6	3.900E-04*	7.7E-05	.000	1.360E-04	6.440E-04
	7	4.600E-04*	7.7E-05	.000	1.839E-04	7.361E-04
	9	-5.00E-04*	7.7E-05	.006	-9.000E-04	-1.00E-04
	10	-1.57E-03*	7.7E-05	.000	-2.027E-03	-1.11E-03
	11	5.500E-04*	7.7E-05	.000	2.434E-04	8.566E-04
	12	7.400E-04*	7.7E-05	.000	4.974E-04	9.826E-04
	13	6.800E-04*	7.7E-05	.000	3.832E-04	9.768E-04
	14	6.800E-04*	7.7E-05	.000	4.477E-04	9.123E-04
	15	8.800E-04*	7.7E-05	.000	6.115E-04	1.149E-03
	16	-3.79E-03*	7.7E-05	.000	-4.068E-03	-3.51E-03
	17	-3.10E-03*	7.7E-05	.000	-3.348E-03	-2.85E-03
	18	-1.46E-03*	7.7E-05	.000	-1.740E-03	-1.18E-03
	19	9.000E-05	7.7E-05	1.000	-1.379E-04	3.179E-04
9	0	9.800E-04*	7.7E-05	.000	5.638E-04	1.396E-03
	1	9.600E-04*	7.7E-05	.000	5.607E-04	1.359E-03
	2	1.190E-03*	7.7E-05	.000	7.721E-04	1.608E-03
	3	-3.00E-05	7.7E-05	1.000	-4.479E-04	3.879E-04
	4	-2.17E-03*	7.7E-05	.000	-2.622E-03	-1.72E-03
	5	-2.05E-03*	7.7E-05	.000	-2.616E-03	-1.48E-03
	6	8.900E-04*	7.7E-05	.000	4.891E-04	1.291E-03
	7	9.600E-04*	7.7E-05	.000	5.541E-04	1.366E-03
	8	5.000E-04*	7.7E-05	.006	9.998E-05	9.000E-04
	10	-1.07E-03*	7.7E-05	.000	-1.571E-03	-5.69E-04
	11	1.050E-03*	7.7E-05	.000	6.336E-04	1.466E-03
	12	1.240E-03*	7.7E-05	.000	8.405E-04	1.639E-03
	13	1.180E-03*	7.7E-05	.000	7.673E-04	1.593E-03
	14	1.180E-03*	7.7E-05	.000	7.808E-04	1.579E-03
	15	1.380E-03*	7.7E-05	.000	9.761E-04	1.784E-03
	16	-3.29E-03*	7.7E-05	.000	-3.697E-03	-2.88E-03
	17	-2.60E-03*	7.7E-05	.000	-3.000E-03	-2.20E-03
	18	-9.60E-04*	7.7E-05	.000	-1.367E-03	-5.53E-04
	19	5.900E-04*	7.7E-05	.001	1.904E-04	9.896E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
10	0	2.050E-03*	7.7E-05	.000	1.585E-03	2.515E-03
	1	2.030E-03*	7.7E-05	.000	1.572E-03	2.488E-03
	2	2.260E-03*	7.7E-05	.000	1.793E-03	2.727E-03
	3	1.040E-03*	7.7E-05	.000	5.734E-04	1.507E-03
	4	-1.10E-03*	7.7E-05	.000	-1.591E-03	-6.09E-04
	5	-9.80E-04*	7.7E-05	.000	-1.568E-03	-3.92E-04
	6	1.960E-03*	7.7E-05	.000	1.503E-03	2.417E-03
	7	2.030E-03*	7.7E-05	.000	1.571E-03	2.489E-03
	8	1.570E-03*	7.7E-05	.000	1.113E-03	2.027E-03
	9	1.070E-03*	7.7E-05	.000	5.689E-04	1.571E-03
	11	2.120E-03*	7.7E-05	.000	1.654E-03	2.586E-03
	12	2.310E-03*	7.7E-05	.000	1.852E-03	2.768E-03
	13	2.250E-03*	7.7E-05	.000	1.787E-03	2.713E-03
	14	2.250E-03*	7.7E-05	.000	1.791E-03	2.709E-03
	15	2.450E-03*	7.7E-05	.000	1.992E-03	2.908E-03
	16	-2.22E-03*	7.7E-05	.000	-2.680E-03	-1.76E-03
	17	-1.53E-03*	7.7E-05	.000	-1.987E-03	-1.07E-03
	18	1.100E-04	7.7E-05	1.000	-3.500E-04	5.700E-04
	19	1.660E-03*	7.7E-05	.000	1.200E-03	2.120E-03
11	0	-7.00E-05	7.7E-05	1.000	-4.133E-04	2.733E-04
	1	-9.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.922E-04	2.122E-04
	2	1.400E-04	7.7E-05	1.000	-2.062E-04	4.862E-04
	3	-1.08E-03*	7.7E-05	.000	-1.426E-03	-7.34E-04
	4	-3.22E-03*	7.7E-05	.000	-3.619E-03	-2.82E-03
	5	-3.10E-03*	7.7E-05	.000	-3.645E-03	-2.56E-03
	6	-1.60E-04	7.7E-05	.997	-4.698E-04	1.498E-04
	7	-9.00E-05	7.7E-05	1.000	-4.130E-04	2.330E-04
	8	-5.50E-04*	7.7E-05	.000	-8.566E-04	-2.43E-04
	9	-1.05E-03*	7.7E-05	.000	-1.466E-03	-6.34E-04
	10	-2.12E-03*	7.7E-05	.000	-2.586E-03	-1.65E-03
	12	1.900E-04	7.7E-05	.861	-1.139E-04	4.939E-04
	13	1.300E-04	7.7E-05	1.000	-2.068E-04	4.668E-04
	14	1.300E-04	7.7E-05	1.000	-1.693E-04	4.293E-04
	15	3.300E-04*	7.7E-05	.035	1.171E-05	6.483E-04
	16	-4.34E-03*	7.7E-05	.000	-4.665E-03	-4.02E-03
	17	-3.65E-03*	7.7E-05	.000	-3.957E-03	-3.34E-03
	18	-2.01E-03*	7.7E-05	.000	-2.335E-03	-1.68E-03
	19	-4.60E-04*	7.7E-05	.001	-7.577E-04	-1.62E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
12	0	-2.60E-04	7.7E-05	.185	-5.634E-04	4.340E-05
	1	-2.80E-04*	7.7E-05	.007	-5.130E-04	-4.70E-05
	2	-5.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.577E-04	2.577E-04
	3	-1.27E-03*	7.7E-05	.000	-1.578E-03	-9.62E-04
	4	-3.41E-03*	7.7E-05	.000	-3.788E-03	-3.03E-03
	5	-3.29E-03*	7.7E-05	.000	-3.836E-03	-2.74E-03
	6	-3.50E-04*	7.7E-05	.001	-5.990E-04	-1.01E-04
	7	-2.80E-04*	7.7E-05	.038	-5.522E-04	-7.81E-06
	8	-7.40E-04*	7.7E-05	.000	-9.826E-04	-4.97E-04
	9	-1.24E-03*	7.7E-05	.000	-1.639E-03	-8.41E-04
	10	-2.31E-03*	7.7E-05	.000	-2.768E-03	-1.85E-03
	11	-1.90E-04	7.7E-05	.861	-4.939E-04	1.139E-04
	13	-6.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.538E-04	2.338E-04
	14	-6.00E-05	7.7E-05	1.000	-2.857E-04	1.657E-04
	15	1.400E-04	7.7E-05	.995	-1.243E-04	4.043E-04
	16	-4.53E-03*	7.7E-05	.000	-4.805E-03	-4.26E-03
	17	-3.84E-03*	7.7E-05	.000	-4.083E-03	-3.60E-03
	18	-2.20E-03*	7.7E-05	.000	-2.476E-03	-1.92E-03
	19	-6.50E-04*	7.7E-05	.000	-8.709E-04	-4.29E-04
13	0	-2.00E-04	7.7E-05	.945	-5.364E-04	1.364E-04
	1	-2.20E-04	7.7E-05	.431	-5.119E-04	7.185E-05
	2	1.000E-05	7.7E-05	1.000	-3.296E-04	3.496E-04
	3	-1.21E-03*	7.7E-05	.000	-1.550E-03	-8.70E-04
	4	-3.35E-03*	7.7E-05	.000	-3.745E-03	-2.96E-03
	5	-3.23E-03*	7.7E-05	.000	-3.774E-03	-2.69E-03
	6	-2.90E-04	7.7E-05	.069	-5.904E-04	1.039E-05
	7	-2.20E-04	7.7E-05	.647	-5.348E-04	9.476E-05
	8	-6.80E-04*	7.7E-05	.000	-9.768E-04	-3.83E-04
	9	-1.18E-03*	7.7E-05	.000	-1.593E-03	-7.67E-04
	10	-2.25E-03*	7.7E-05	.000	-2.713E-03	-1.79E-03
	11	-1.30E-04	7.7E-05	1.000	-4.668E-04	2.068E-04
	12	6.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.338E-04	3.538E-04
	14	.000000	7.7E-05	1.000	-2.885E-04	2.885E-04
	15	2.000E-04	7.7E-05	.825	-1.097E-04	5.097E-04
	16	-4.47E-03*	7.7E-05	.000	-4.786E-03	-4.15E-03
	17	-3.78E-03*	7.7E-05	.000	-4.077E-03	-3.48E-03
	18	-2.14E-03*	7.7E-05	.000	-2.457E-03	-1.82E-03
	19	-5.90E-04*	7.7E-05	.000	-8.765E-04	-3.03E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
14	0	-2.00E-04	7.7E-05	.706	-4.988E-04	9.879E-05
	1	-2.20E-04	7.7E-05	.053	-4.413E-04	1.308E-06
	2	1.000E-05	7.7E-05	1.000	-2.934E-04	3.134E-04
	3	-1.21E-03*	7.7E-05	.000	-1.513E-03	-9.07E-04
	4	-3.35E-03*	7.7E-05	.000	-3.727E-03	-2.97E-03
	5	-3.23E-03*	7.7E-05	.000	-3.778E-03	-2.68E-03
	6	-2.90E-04*	7.7E-05	.007	-5.294E-04	-5.06E-05
	7	-2.20E-04	7.7E-05	.236	-4.851E-04	4.512E-05
	8	-6.80E-04*	7.7E-05	.000	-9.123E-04	-4.48E-04
	9	-1.18E-03*	7.7E-05	.000	-1.579E-03	-7.81E-04
	10	-2.25E-03*	7.7E-05	.000	-2.709E-03	-1.79E-03
	11	-1.30E-04	7.7E-05	1.000	-4.293E-04	1.693E-04
	12	6.000E-05	7.7E-05	1.000	-1.657E-04	2.857E-04
	13	.000000	7.7E-05	1.000	-2.885E-04	2.885E-04
	15	2.000E-04	7.7E-05	.360	-5.645E-05	4.564E-04
	16	-4.47E-03*	7.7E-05	.000	-4.738E-03	-4.20E-03
	17	-3.78E-03*	7.7E-05	.000	-4.012E-03	-3.55E-03
	18	-2.14E-03*	7.7E-05	.000	-2.409E-03	-1.87E-03
	19	-5.90E-04*	7.7E-05	.000	-7.969E-04	-3.83E-04
15	0	-4.00E-04*	7.7E-05	.004	-7.179E-04	-8.21E-05
	1	-4.20E-04*	7.7E-05	.000	-6.815E-04	-1.58E-04
	2	-1.90E-04	7.7E-05	.947	-5.116E-04	1.316E-04
	3	-1.41E-03*	7.7E-05	.000	-1.732E-03	-1.09E-03
	4	-3.55E-03*	7.7E-05	.000	-3.934E-03	-3.17E-03
	5	-3.43E-03*	7.7E-05	.000	-3.973E-03	-2.89E-03
	6	-4.90E-04*	7.7E-05	.000	-7.633E-04	-2.17E-04
	7	-4.20E-04*	7.7E-05	.001	-7.117E-04	-1.28E-04
	8	-8.80E-04*	7.7E-05	.000	-1.149E-03	-6.11E-04
	9	-1.38E-03*	7.7E-05	.000	-1.784E-03	-9.76E-04
	10	-2.45E-03*	7.7E-05	.000	-2.908E-03	-1.99E-03
	11	-3.30E-04*	7.7E-05	.035	-6.483E-04	-1.17E-05
	12	-1.40E-04	7.7E-05	.995	-4.043E-04	1.243E-04
	13	-2.00E-04	7.7E-05	.825	-5.097E-04	1.097E-04
	14	-2.00E-04	7.7E-05	.360	-4.564E-04	5.645E-05
	16	-4.67E-03*	7.7E-05	.000	-4.964E-03	-4.38E-03
	17	-3.98E-03*	7.7E-05	.000	-4.249E-03	-3.71E-03
	18	-2.34E-03*	7.7E-05	.000	-2.635E-03	-2.05E-03
	19	-7.90E-04*	7.7E-05	.000	-1.043E-03	-5.37E-04

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
16	0	4.270E-03*	7.7E-05	.000	3.946E-03	4.594E-03
	1	4.250E-03*	7.7E-05	.000	3.978E-03	4.522E-03
	2	4.480E-03*	7.7E-05	.000	4.152E-03	4.808E-03
	3	3.260E-03*	7.7E-05	.000	2.932E-03	3.588E-03
	4	1.120E-03*	7.7E-05	.000	7.324E-04	1.508E-03
	5	1.240E-03*	7.7E-05	.000	6.969E-04	1.783E-03
	6	4.180E-03*	7.7E-05	.000	3.897E-03	4.463E-03
	7	4.250E-03*	7.7E-05	.000	3.950E-03	4.550E-03
	8	3.790E-03*	7.7E-05	.000	3.512E-03	4.068E-03
	9	3.290E-03*	7.7E-05	.000	2.883E-03	3.697E-03
	10	2.220E-03*	7.7E-05	.000	1.760E-03	2.680E-03
	11	4.340E-03*	7.7E-05	.000	4.015E-03	4.665E-03
	12	4.530E-03*	7.7E-05	.000	4.255E-03	4.805E-03
	13	4.470E-03*	7.7E-05	.000	4.154E-03	4.786E-03
	14	4.470E-03*	7.7E-05	.000	4.202E-03	4.738E-03
	15	4.670E-03*	7.7E-05	.000	4.376E-03	4.964E-03
	17	6.900E-04*	7.7E-05	.000	4.115E-04	9.685E-04
	18	2.330E-03*	7.7E-05	.000	2.027E-03	2.633E-03
	19	3.880E-03*	7.7E-05	.000	3.615E-03	4.145E-03
17	0	3.580E-03*	7.7E-05	.000	3.274E-03	3.886E-03
	1	3.560E-03*	7.7E-05	.000	3.321E-03	3.799E-03
	2	3.790E-03*	7.7E-05	.000	3.480E-03	4.100E-03
	3	2.570E-03*	7.7E-05	.000	2.260E-03	2.880E-03
	4	4.300E-04*	7.7E-05	.015	5.095E-05	8.090E-04
	5	5.500E-04*	7.7E-05	.046	4.921E-06	1.095E-03
	6	3.490E-03*	7.7E-05	.000	3.236E-03	3.744E-03
	7	3.560E-03*	7.7E-05	.000	3.284E-03	3.836E-03
	8	3.100E-03*	7.7E-05	.000	2.852E-03	3.348E-03
	9	2.600E-03*	7.7E-05	.000	2.200E-03	3.000E-03
	10	1.530E-03*	7.7E-05	.000	1.073E-03	1.987E-03
	11	3.650E-03*	7.7E-05	.000	3.343E-03	3.957E-03
	12	3.840E-03*	7.7E-05	.000	3.597E-03	4.083E-03
	13	3.780E-03*	7.7E-05	.000	3.483E-03	4.077E-03
	14	3.780E-03*	7.7E-05	.000	3.548E-03	4.012E-03
	15	3.980E-03*	7.7E-05	.000	3.711E-03	4.249E-03
	16	-6.90E-04*	7.7E-05	.000	-9.685E-04	-4.12E-04
	18	1.640E-03*	7.7E-05	.000	1.360E-03	1.920E-03
	19	3.190E-03*	7.7E-05	.000	2.962E-03	3.418E-03

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของข้อมูลในการทดสอบความต้านทานการสึก

Multiple Comparisons

Dependent Variable: worn mass
Tamhane

(I) COMBINE	(J) COMBINE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
18	0	1.940E-03*	7.7E-05	.000	1.615E-03	2.265E-03
	1	1.920E-03*	7.7E-05	.000	1.646E-03	2.194E-03
	2	2.150E-03*	7.7E-05	.000	1.821E-03	2.479E-03
	3	9.300E-04*	7.7E-05	.000	6.015E-04	1.259E-03
	4	-1.21E-03*	7.7E-05	.000	-1.598E-03	-8.22E-04
	5	-1.09E-03*	7.7E-05	.000	-1.633E-03	-5.47E-04
	6	1.850E-03*	7.7E-05	.000	1.566E-03	2.134E-03
	7	1.920E-03*	7.7E-05	.000	1.619E-03	2.221E-03
	8	1.460E-03*	7.7E-05	.000	1.180E-03	1.740E-03
	9	9.600E-04*	7.7E-05	.000	5.530E-04	1.367E-03
	10	-1.10E-04	7.7E-05	1.000	-5.700E-04	3.500E-04
	11	2.010E-03*	7.7E-05	.000	1.685E-03	2.335E-03
	12	2.200E-03*	7.7E-05	.000	1.924E-03	2.476E-03
	13	2.140E-03*	7.7E-05	.000	1.823E-03	2.457E-03
	14	2.140E-03*	7.7E-05	.000	1.871E-03	2.409E-03
	15	2.340E-03*	7.7E-05	.000	2.045E-03	2.635E-03
	16	-2.33E-03*	7.7E-05	.000	-2.633E-03	-2.03E-03
	17	-1.64E-03*	7.7E-05	.000	-1.920E-03	-1.36E-03
	19	1.550E-03*	7.7E-05	.000	1.283E-03	1.817E-03
19	0	3.900E-04*	7.7E-05	.003	9.283E-05	6.872E-04
	1	3.700E-04*	7.7E-05	.000	1.538E-04	5.862E-04
	2	6.000E-04*	7.7E-05	.000	2.981E-04	9.019E-04
	3	-6.20E-04*	7.7E-05	.000	-9.219E-04	-3.18E-04
	4	-2.76E-03*	7.7E-05	.000	-3.137E-03	-2.38E-03
	5	-2.64E-03*	7.7E-05	.000	-3.190E-03	-2.09E-03
	6	3.000E-04*	7.7E-05	.004	6.456E-05	5.354E-04
	7	3.700E-04*	7.7E-05	.001	1.077E-04	6.323E-04
	8	-9.00E-05	7.7E-05	1.000	-3.179E-04	1.379E-04
	9	-5.90E-04*	7.7E-05	.001	-9.896E-04	-1.90E-04
	10	-1.66E-03*	7.7E-05	.000	-2.120E-03	-1.20E-03
	11	4.600E-04*	7.7E-05	.001	1.623E-04	7.577E-04
	12	6.500E-04*	7.7E-05	.000	4.291E-04	8.709E-04
	13	5.900E-04*	7.7E-05	.000	3.035E-04	8.765E-04
	14	5.900E-04*	7.7E-05	.000	3.831E-04	7.969E-04
	15	7.900E-04*	7.7E-05	.000	5.367E-04	1.043E-03
	16	-3.88E-03*	7.7E-05	.000	-4.145E-03	-3.61E-03
	17	-3.19E-03*	7.7E-05	.000	-3.418E-03	-2.96E-03
	18	-1.55E-03*	7.7E-05	.000	-1.817E-03	-1.28E-03

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

ตารางที่ 19 แสดงการทดสอบความมีอิทธิพลระหว่างตัวแปรในการทดสอบความต้านทานการสึก

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: worn mass

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4.150E-04[a]	19	2.184E-05	736.698	.000
Intercept	1.188E-03	1	1.188E-03	40075.97	.000
GROUP	2.091E-04	6	3.485E-05	1175.423	.000
PERCENT	7.068E-05	4	1.767E-05	595.938	.000
GROUP * PERCENT	6.138E-05	8	7.673E-06	258.778	.000
Error	5.337E-06	180	2.965E-08		
Total	1.557E-03	200			
Corrected Total	4.204E-04	199			

a. R Squared = .987 (Adjusted R Squared = .986)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความแข็งผิวของกลุ่มที่ 0-19 (VHN)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความแข็งผิวของกลุ่มที่ 0-19 (VHN)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มควบคุม(กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.6014	2.5999	0.0015
2	2.5078	2.5065	0.0013
3	2.5079	2.5067	0.0012
4	2.5510	2.5497	0.0013
5	2.5512	2.5496	0.0016
6	2.5490	2.5476	0.0014
7	2.5329	2.5317	0.0012
8	2.5765	2.5750	0.0015
9	2.5164	2.5151	0.0013
10	2.5173	2.5156	0.0017

ตารางที่ 22 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 1 ($CaCO_3$ 10 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.4991	2.4978	0.0013
2	2.5359	2.5345	0.0014
3	2.5750	2.5736	0.0014
4	2.5457	2.5442	0.0015
5	2.5650	2.5635	0.0015
6	2.4973	2.4957	0.0016
7	2.5370	2.5356	0.0014
8	2.6428	2.6416	0.0012
9	2.5626	2.5611	0.0015
10	2.5927	2.5913	0.0014

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 2 ($CaCO_3$ 20 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5545	2.5530	0.0015
2	2.5964	2.5951	0.0013
3	2.5616	2.5604	0.0012
4	2.6651	2.6637	0.0014
5	2.6340	2.6330	0.0010
6	2.5600	2.5588	0.0012
7	2.5930	2.5919	0.0011
8	2.5442	2.5432	0.0010
9	2.5167	2.5155	0.0012
10	2.5479	2.5469	0.0010

ตารางที่ 24 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 3 ($CaCO_3$ 30 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5971	2.5943	0.0028
2	2.5555	2.5530	0.0025
3	2.6011	2.5988	0.0023
4	2.5754	2.5731	0.0023
5	2.4999	2.4976	0.0023
6	2.5244	2.5220	0.0024
7	2.6367	2.6342	0.0025
8	2.6713	2.6688	0.0025
9	2.6501	2.6479	0.0022
10	2.6413	2.6390	0.0023

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 4 ($CaCO_3$ 40 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.6309	2.6266	0.0043
2	2.6511	2.6468	0.0043
3	2.6676	2.6628	0.0048
4	2.5833	2.5788	0.0045
5	2.5814	2.5772	0.0042
6	2.6855	2.6812	0.0043
7	2.5523	2.5480	0.0043
8	2.5964	2.5915	0.0049
9	2.6358	2.5313	0.1045
10	2.6745	2.6702	0.0043

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 5 ($CaCO_3$ 50 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5892	2.5852	0.0040
2	2.5733	2.5693	0.0040
3	2.6157	2.6111	0.0046
4	2.5877	2.5833	0.0044
5	2.5989	2.5946	0.0043
6	2.6891	2.6843	0.0048
7	2.6823	2.6774	0.0049
8	2.6369	2.6326	0.0043
9	2.6706	2.6659	0.0047
10	2.5488	2.5445	0.0043

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ตารางที่ 27</u> แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 6 (Kaolin 10 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5571	2.5556	0.0015
2	2.5769	2.5755	0.0014
3	2.6191	2.6176	0.0015
4	2.5490	2.5477	0.0013
5	2.5206	2.5189	0.0017
6	2.5404	2.5388	0.0016
7	2.5268	2.5253	0.0015
8	2.5682	2.5666	0.0016
9	2.5705	2.5692	0.0013
10	2.5601	2.5586	0.0015

<u>ตารางที่ 28</u> แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 7 (Kaolin 20 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5911	2.5899	0.0012
2	2.5361	2.5345	0.0016
3	2.5536	2.5524	0.0012
4	2.5546	2.5533	0.0013
5	2.5585	2.5570	0.0015
6	2.5119	2.5104	0.0015
7	2.5515	2.5500	0.0015
8	2.5339	2.5325	0.0014
9	2.5883	2.5867	0.0016
10	2.5239	2.5225	0.0014

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 29 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 8 (Kaolin 30 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5818	2.5800	0.0018
2	2.6479	2.6461	0.0018
3	2.5161	2.5141	0.0020
4	2.5754	2.5734	0.0020
5	2.5657	2.5640	0.0017
6	2.6143	2.6124	0.0019
7	2.6297	2.6280	0.0017
8	2.5965	2.5946	0.0019
9	2.5954	2.5934	0.0020
10	2.5714	2.5694	0.0020

ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 9 (Kaolin 40 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.6645	2.6622	0.0023
2	2.5544	2.5524	0.0020
3	2.6241	2.6217	0.0024
4	2.6465	2.6444	0.0021
5	2.6204	2.6178	0.0026
6	2.6087	2.6065	0.0022
7	2.6318	2.6294	0.0024
8	2.6723	2.6697	0.0026
9	2.6798	2.6773	0.0025
10	2.6072	2.6045	0.0027

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 31 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 10 (Kaolin 50 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.6078	2.6045	0.0033
2	2.6655	2.6619	0.0036
3	2.6307	2.6272	0.0035
4	2.7215	2.7184	0.0031
5	2.6880	2.6848	0.0032
6	2.5831	2.5794	0.0037
7	2.6399	2.6365	0.0034
8	2.6133	2.6093	0.0040
9	2.6945	2.6911	0.0034
10	2.7108	2.7075	0.0033

ตารางที่ 32 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 11 (Quartz 10 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.4960	2.4945	0.0015
2	2.5204	2.5193	0.0011
3	2.5349	2.5337	0.0012
4	2.5543	2.5530	0.0013
5	2.5619	2.5608	0.0011
6	2.6005	2.5991	0.0014
7	2.5507	2.5492	0.0015
8	2.5502	2.5487	0.0015
9	2.5823	2.5811	0.0012
10	2.4969	2.4954	0.0015

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 33 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 12 (Quartz 20 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5791	2.5780	0.0011
2	2.4121	2.4111	0.0010
3	2.6293	2.6282	0.0011
4	2.4051	2.4039	0.0012
5	2.6064	2.6052	0.0012
6	2.5829	2.5819	0.0010
7	2.5252	2.5242	0.0010
8	2.6240	2.6227	0.0013
9	2.5873	2.5860	0.0013
10	2.5757	2.5745	0.0012

ตารางที่ 34 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 13 (Quartz 30 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5470	2.5460	0.0010
2	2.5119	2.5108	0.0011
3	2.5755	2.5741	0.0014
4	2.5601	2.5591	0.0010
5	2.5774	2.5764	0.0010
6	2.5870	2.5856	0.0014
7	2.5686	2.5673	0.0013
8	2.6253	2.6240	0.0013
9	2.5223	2.5211	0.0012
10	2.4580	2.4567	0.0013

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 14 (Quartz 40 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5842	2.5830	0.0012
2	2.4692	2.4679	0.0013
3	2.4703	2.4692	0.0011
4	2.4848	2.4837	0.0011
5	2.4921	2.4907	0.0014
6	2.5404	2.5392	0.0012
7	2.5230	2.5219	0.0011
8	2.4996	2.4985	0.0011
9	2.5703	2.5690	0.0013
10	2.5166	2.5154	0.0012

ตารางที่ 36 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 15 (Quartz 50 %) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.5742	2.5731	0.0011
2	2.6369	2.6358	0.0011
3	2.5403	2.5394	0.0009
4	2.5816	2.5804	0.0012
5	2.6012	2.6004	0.0008
6	2.5523	2.5512	0.0011
7	2.6432	2.6424	0.0008
8	2.6710	2.6699	0.0011
9	2.5459	2.5449	0.0010
10	2.6019	2.6010	0.0009

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 37 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 16 (Majordent) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.8259	2.8202	0.0057
2	2.7638	2.7583	0.0055
3	2.8211	2.8153	0.0058
4	2.7660	2.7604	0.0056
5	2.7780	2.7723	0.0057
6	2.8229	2.8170	0.0059
7	2.7533	2.7476	0.0057
8	2.8100	2.8042	0.0058
9	2.7561	2.7507	0.0054
10	2.8140	2.8084	0.0056

ตารางที่ 38 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 17 (Cosmo HXL) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.9160	2.9109	0.0051
2	2.8517	2.8467	0.0050
3	2.8557	2.8508	0.0049
4	2.8473	2.8421	0.0052
5	2.9334	2.9285	0.0049
6	2.8054	2.8006	0.0048
7	2.8843	2.8792	0.0051
8	2.9195	2.9145	0.0050
9	2.8448	2.8399	0.0049
10	2.8539	2.8490	0.0049

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 39 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 18 (Hard Pure) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.9483	2.9451	0.0032
2	2.8124	2.8089	0.0035
3	2.7989	2.7955	0.0034
4	2.9180	2.9144	0.0036
5	2.8461	2.8428	0.0033
6	2.8693	2.8659	0.0034
7	2.8990	2.8958	0.0032
8	2.7800	2.7766	0.0034
9	2.9744	2.9777	-0.0033
10	2.9430	2.9399	0.0031

ตารางที่ 40 แสดงข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการสึกจากการขัดสีของกลุ่มที่ 19 (Efucera-P®Simplerr) (กรัม)

ชิ้นที่	มวลที่ 1 (m_1)	มวลที่ 2 (m_2)	มวลการสึก (Δm)
1	2.7784	2.7767	0.0017
2	2.9436	2.9418	0.0018
3	2.9816	2.9797	0.0019
4	2.8301	2.8282	0.0019
5	2.8684	2.8665	0.0019
6	3.0333	3.0315	0.0018
7	2.9542	2.9525	0.0017
8	2.8857	2.8839	0.0018
9	2.8814	2.8796	0.0018
10	2.8112	2.8096	0.0016

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว จตุพร ติยะพรัญชัย เกิดวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทันตแพทยศาสตร์บัณฑิต คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 เข้ารับราชการตำแหน่งทันตแพทย์ 4 ประจำโรงพยาบาลบ้านหมอ อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี เป็นเวลา 1 ปี ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันเป็นทันตแพทย์อิสระในจังหวัดกรุงเทพมหานคร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย