

ความแข็งแรงกล้าของวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต



นางสาว กมลลา กฤโตปการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมหัตถการ ภาควิชาทันตกรรมหัตถการ

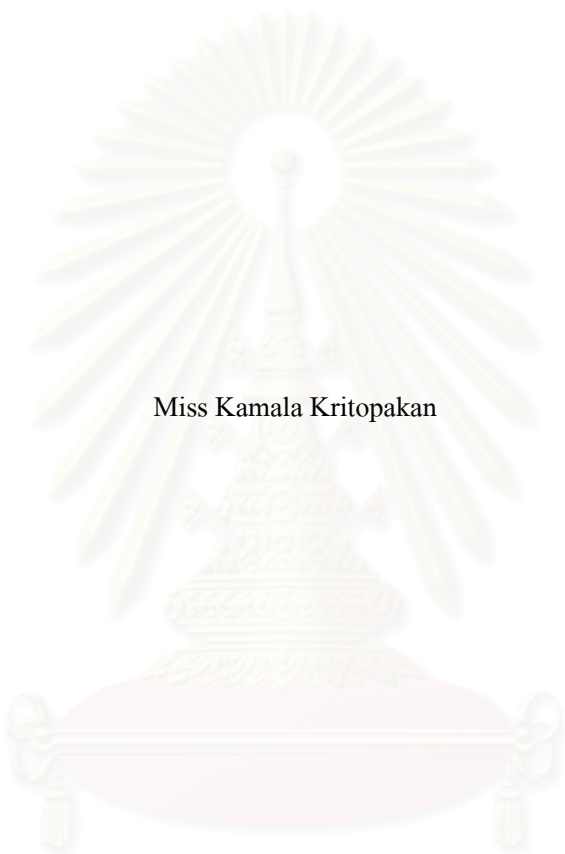
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6995-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FATIGUE STRENGTH OF RESTORATIVE RESIN COMPOSITES



Miss Kamala Kritopakan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Operative dentistry

Department of Operative dentistry

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic year 2004

ISBN 974-17-6995-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความแข็งแรงล้าของวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต
โดย	นางสาว กมลลา กฤโตปการ
สาขาวิชา	ทันตกรรมหัตถการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.รังสิมา สกฤณะมรรคา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุจิต พูลทอง

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง จุติมา ภูศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ขวัญตา จารุอำพรพรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร. รังสิมา สกฤณะมรรคา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ทันตแพทย์ ดร. สุจิต พูลทอง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ชัยวัฒน์ มณีบุษย์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. มโน คุรัตน์)

นางสาว กมลดา กฤโตปการ : ความแข็งแรงล้าของวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต (FATIGUE STRENGTH OF RESTORATIVE RESIN COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษา: อ.รังสิมา สกฤตนะมรรคา, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.สุจิต พูลทอง จำนวนหน้า 84 หน้า. ISBN 947-17-6995-4.

วัตถุประสงค์ งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุเรซินคอมโพสิตในปัจจุบัน

วิธีการทดลอง วัสดุเรซินคอมโพสิตจำนวน 5 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ [Admira (Voco), CeramX (Dentsply), Filtek Supreme translucent (3M ESPE), Filtek Supreme standard (3M ESPE) และ Z250 (3M ESPE)] จะถูกเตรียมเป็นชิ้นทดสอบรูปแผ่นกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มม.หนา 2 มม.) และเก็บไว้ในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสก่อนการทดสอบ ความแข็งแรงแบบสถิตของวัสดุเรซินคอมโพสิต (n=15) ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบแอกเซล ส่วนวิธีสแตร์เคสถูกนำมาใช้เพื่อหาความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุ ที่ได้จากการให้แรงจำนวน 10,000 รอบแก่ชิ้นทดสอบด้วยความถี่ 2.0 รอบ/วินาที

ผลการทดลอง Filtek Supreme translucent มีค่าความแข็งแรงแบบสถิตสูงที่สุด CeramX มีค่าต่ำสุด ในขณะที่ค่าความแข็งแรงแบบสถิตของ Supreme standard และ Z250 แตกต่างกันอย่างไม่น่าสำคัญ วัสดุ Z250 มีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าสูงสุด รองลงมาคือวัสดุ Filtek Supreme standard ตามด้วยวัสดุ Admira และ CeramX ที่มีค่าความแข็งแรงนี้เท่ากัน แต่วัสดุ Filtek Supreme translucent ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิตสูงที่สุด กลับมีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าต่ำที่สุด ค่าความแข็งแรงแบบสถิตมีค่ามากกว่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าอย่างมีนัยสำคัญสำหรับทุกผลิตภัณฑ์ และความแข็งแรงแบบสถิตไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

สรุป วัสดุที่มีค่าความแข็งแรงแบบสถิตสูงที่สุดไม่ได้มีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าสูงที่สุด การตอบสนองของวัสดุเรซินคอมโพสิตต่อแรงทั้งสองแบบนี้มีความแตกต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น สตีเฟนส และทัฟเนส ซึ่งขนาดของฟิลเลอร์ และองค์ประกอบในเรซินเมทริกซ์ มีผลต่อคุณสมบัติดังกล่าวของวัสดุ เราควรให้ความสำคัญกับค่าความแข็งแรงภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุมากขึ้น และนำมาใช้ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุ นอกเหนือจากค่าความแข็งแรงแบบสถิต

ภาควิชา ทันตกรรมหัตถการ

สาขาวิชา ทันตกรรมหัตถการ

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4676101032 : MAJOR Operative Dentistry

KEY WORD: FATIGUE / FLEXURAL STRENGTH / RESIN COMPOSITES

KAMALA KRITOPAKAN: FATIGUE STRENGTH OF RESTORATIVE RESIN COMPOSITES. THESIS ADVISOR: DOCTOR RANGSIMA SAKOOLNAMARKA, THESIS COADVISOR: DOCTOR SUCHIT POOLTHONG, 84 pp. ISBN 974-17-6995-4.

Objectives. The aim of this study was to investigate flexural fatigue strength of new generation of resin composite materials under cyclic loading.

Materials & Methods. Disc specimens (13 mm. in diameter and 2 mm. in thickness) of 5 different resin composites [Admira (Voco), CeramX (Dentsply), Filtek Supreme translucent (3M ESPE), Filtek Supreme standard (3M ESPE) and Z250 (3M ESPE)] were prepared and stored in 37°C distilled water for 24 hours before testing. Bi-axial flexural strength test (a-ball-on-three-ball) was selected to evaluate the bi-axial flexural strength (n=15) using a universal testing machine. Flexural fatigue strength of resin composites were determined for 10,000 cycles under the same loading apparatus and support at a frequency of 2.0 Hz. (n=20). The staircase method was used for flexural fatigue strength evaluation.

Results. Filtek Supreme translucent showed the highest bi-axial flexural strength value, while CeramX exhibited the lowest value. The bi-axial strength values of Supreme standard and Z250 were not significantly different. Z250 showed the highest flexural fatigue value. Both Z250 and Filtek Supreme standard were significantly higher the flexural fatigue strength than Filtek Supreme translucent. For each material, the initial strength was significantly higher than the fatigue strength. There was no linear correlation between static and fatigue strength.

Conclusions. The material which had the highest bi-axial flexural strength did not show the highest flexural fatigue strength. The resin composite materials responded to static force differently from cyclic loading since the applied forces were different. The reaction depends on properties of materials used such as stiffness and toughness. Because the resin composite materials used in oral cavity are subject to cyclic loading force, it is suggested that more consideration should be emphasized on the fatigue strength.

Department Operative Dentistry	Student’s signature.....
Field of study Operative Dentistry	Advisor’s signature.....
Academic year 2004	Co-advisor’s signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อ.ทพญ.ดร.รังสิมา สกฤตณะมรรคา และ อ.ทพ.ดร.สุชาติ พูลทอง สำหรับคำปรึกษาแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ อ.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและเป็นพี่ปรึกษาเรื่องความล่าช้า ขอขอบพระคุณ อ.ไพพรรณ พิทยานนท์ สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับสถิติที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในการสร้างอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ บริษัท 3เอ็ม (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท เด็นทัล วิชั่น จำกัด และบริษัท เดนท์สพลาย (ประเทศไทย) จำกัด ที่มอบส่วนลดในการซื้อวัสดุสำหรับงานวิจัย และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมอีกหลายท่านซึ่งไม่ได้แสดงนามไว้ในที่นี้ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช-ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ-ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1-4
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
สมมุติฐานของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5-21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22-30
วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	22
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	22
วิธีวิจัย.....	24
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	28
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	31-46
ผลความแข็งแรงดัดขวางแบบสแตติก.....	31
ผลความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า.....	33
ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสแตติก และค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า.....	34
ผลการตรวจดูลักษณะพื้นผิวแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	35-46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย.....	47-50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	51-52
รายการอ้างอิง.....	53-56
ภาคผนวก.....	57-83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงขนาด รูปร่างของฟิลเลอร์ และองค์ประกอบในเรซินเมทริกซ์ ของวัสดุเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบ.....	23
ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	31
ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	33
ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล และค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า.....	34
ตารางที่ 5 แสดงวัสดุที่นำมาทดสอบ.....	49

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 1 แสดงสูตรโครงสร้างของ Methacrylate, Bis-GMA, UDMA และ TEGDMA.....	7-8
ภาพที่ 2 แสดงการแบ่งกลุ่มของเรซินคอมโพสิต.....	10
ภาพที่ 3 แสดงภาพเปรียบเทียบนาโนคอมโพสิตที่มีนาโนเมอร์ นาโนคลัสเตอร์ และไฮบริดคอมโพสิตที่มีฟิลเลอร์ขนาดไมโครเมตร.....	11
ภาพที่ 4 แสดงไซเลนที่ขี้อระหว่างฟิลเลอร์และเรซินเมทริกซ์ในเรซินคอมโพสิต.....	12
ภาพที่ 5 แสดงการทดลองไดอะมีเทอเลเทนเซิล และการทดลองความทนแรงอัด.....	14
ภาพที่ 6 แสดงรอยร้าวที่ผิวนอก และภายในเนื้อวัสดุ.....	16
ภาพที่ 7 แสดงการขยายตัวของรอนร้าวแบบ ductile tearing.....	17
ภาพที่ 8 แสดงการขยายตัวของรอยร้าวแบบ cleavage.....	18
ภาพที่ 9 แสดง mist, mirror และ hackle บนพื้นผิวรอยแตก.....	18
ภาพที่ 10 แสดงกราฟของระดับความเครียด กับลอการิทึมของจำนวนรอบ ที่ทำให้ชิ้นทดลองเกิดการแตกหัก.....	20
ภาพที่ 11 แสดงความน่าจะเป็นของความล้มเหลว ของวัสดุที่ระดับความเครียดต่างๆ.....	21
ภาพที่ 12 แสดงแบบหล่อเทฟลอนที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุเรซินคอมโพสิต.....	24
ภาพที่ 13 แสดงชุดกดแบบลูกเหล็กกลมหนึ่งลูก กดบนส่วนรองรับที่เป็นลูกเหล็กกลมสามลูก....	25
ภาพที่ 14 แสดงเครื่องทดสอบสากลชนิดเซอร์โว.....	26
ภาพที่ 15 แสดงการยึดชุดกดแบบลูกเหล็กกลมหนึ่งลูก กดบนส่วนรองรับที่เป็นลูกเหล็กกลมสามลูกเข้ากับอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ.....	27
ภาพที่ 16 แสดงชุดกดแบบลูกเหล็กกลมหนึ่งลูก กดบนส่วนรองรับที่เป็น ลูกเหล็กกลมสามลูก	28
ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างการเรียงข้อมูลความแข็งแรงที่ได้จากวิธีสเตรสเคส.....	29
ภาพที่ 18 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ของความแข็งแรงคัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซลสำหรับวัสดุทั้ง 5 ชนิด.....	32
ภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงคัดขวางแบบสถิติ และความแข็งแรงคัดขวางภายใต้ภาวะความล้า.....	34
ภาพที่ 20 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Admira จากการทดลองแบบสถิติ.....	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

ภาพที่ 21 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ CeramX จากการทดลองแบบสแตติก.....	37
ภาพที่ 22 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Supreme standard จากการทดลองแบบสแตติก.....	38
ภาพที่ 23 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Supreme translucent จากการทดลองแบบสแตติก.....	39
ภาพที่ 24 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Z250 จากการทดลองแบบสแตติก.....	40
ภาพที่ 25 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Admira จากการทดลองล้า.....	41
ภาพที่ 26 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ CeramX จากการทดลองล้า.....	42
ภาพที่ 27 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Supreme standard จากการทดลองล้า.....	43
ภาพที่ 28 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Supreme translucent จากการทดลองล้า.....	44
ภาพที่ 29 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหัก ของวัสดุ Z250 จากการทดลองล้า.....	45
ภาพที่ 30 แสดงลักษณะ river line pattern บนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Supreme translucent	46

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุบูรณะที่ดีนั้นนอกจากจะต้องมีความแข็งแรงแล้วควรให้ความสวยงามด้วย วัสดุที่สามารถบูรณะได้ทั้งในฟันหน้าและฟันหลัง จะได้รับความนิยมจากทันตแพทย์ผู้ใช้มากกว่าด้วย ปัจจัยเรื่องความสะดวก ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตจึงพยายามที่จะพัฒนาวัสดุสีเหมือนฟันให้มีความทนทานและแข็งแรงมากขึ้นเพื่อให้ทนทานต่อแรงบดเคี้ยวได้ดี วัสดุบูรณะฟันจะอยู่ในช่องปากซึ่งเป็นสภาวะที่มีความชื้น มีอุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอาหารหรือเครื่องดื่มที่รับประทาน รวมถึงได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ จากการบดเคี้ยว ในสภาวะดังกล่าวอาจจะทำให้วัสดุเกิดการแตกหักได้ด้วยแรงระดับต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength) ของวัสดุ การแตกหักของวัสดุที่เกิดจากการได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ อยู่ระยะเวลาหนึ่งนี้ เกิดเนื่องจากวัสดุมีความล้า (fatigue) ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ความล้านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อความเสียหายในวัสดุพวกโลหะ เซรามิก รวมถึงพอลิเมอร์ด้วย (Callister, 2000) การศึกษาถึงความแข็งแรงของวัสดุบูรณะส่วนใหญ่จะเป็นการให้แรงสถิต (static) ซึ่งเป็นแรงคงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก แต่แรงดังกล่าวนี้ไม่ใช่ลักษณะของแรงที่จะทำให้วัสดุบูรณะในช่องปากเกิดการแตกหัก (Baran และคณะ, 2001) ถ้าต้องการทราบว่าวัสดุชนิดใดจะสามารถทนทานต่อความล้าได้ดีจะต้องทำการทดสอบความล้า (fatigue test) (Braem และคณะ, 1994) การศึกษาถึงค่าขีดจำกัดความล้าคดขวาง (flexural fatigue limit; FFL) เมื่อให้แรงไดนามิกกระทำซ้ำ ๆ บนวัสดุเรซินคอมโพสิตเป็นจำนวน 10^7 รอบ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 37-67% ของค่าความแข็งแรงคดขวางแบบสถิต (initial flexural strength) เท่านั้น (Lohbauer และคณะ, 2003) การเติมผงโลหะ (metal particle) เข้าเป็นส่วนประกอบในวัสดุกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ดูเหมือนจะไม่ได้ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุแต่อย่างใด เนื่องจากค่าความแข็งแรงคดขวางที่ได้ไม่แตกต่างไปจากวัสดุที่ไม่มีผงโลหะ แต่พบว่าการมีผงโลหะทำให้วัสดุมีความต้านทานต่อการแตกหักเนื่องจากความล้าคดขวาง (flexural fatigue fracture resistance) สูงกว่าชนิดที่ไม่มีผงโลหะ (Nakajima และคณะ, 1996) แสดงให้เห็นว่าการศึกษาที่ดูเพียงความแข็งแรงเริ่มต้นของวัสดุภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาก่อนหน้านั้นไม่เพียงพอ แต่ควรจะต้องคำนึงถึงความล้าของวัสดุที่จะเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากมีผลต่ออายุการใช้งานของวัสดุบูรณะในช่องปาก (Scherrer และคณะ, 2003) ค่าความแข็งแรงของวัสดุภายใต้ภาวะความล้าจะเป็นข้อมูลที่ดีที่จะบอกถึงความทนทาน และอายุการใช้งานของวัสดุได้

ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงผลของการเกิดความล้าในวัสดุจากการให้แรงกระทำซ้ำ ๆ ต่อความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุบุรณะสีเหมือนฟันชนิดเรซินคอมโพสิต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบ
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า กับค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิตของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบ
3. เพื่อศึกษาว่าค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า และค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิตของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงหรือไม่

สมมติฐานการวิจัย

1. ค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบไม่มีความแตกต่างกัน
2. ค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า และค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิตของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบไม่มีความแตกต่างกัน
3. ค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า และค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิตของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบไม่มีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยเป็นการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุบุรณะเรซินคอมโพสิตในห้องปฏิบัติการ มีการเตรียมชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความชื้นของห้องปฏิบัติการ และให้แรงแกว่งขึ้นทดลอง 2 ลักษณะ คือ แรงสถิตคงที่จนวัสดุเกิดการแตกหัก และแรงแบบไดนามิก

ลักษณะซายน์เวฟ (sine wave) กระทำซ้ำ ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาถึงผลของการให้แรงกระทำซ้ำ ๆ ต่อความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต โดยที่ขณะทำการทดสอบความความล้า นั้นจะทำภายใต้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ $37^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$

ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการเตรียมชิ้นทดสอบ และการทำการทดสอบจะกระทำโดยผู้วิจัยเพียงคนเดียว และเนื่องจากการหาค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้สภาวะความล้าจะต้องมีการกำหนดจำนวนรอบของแรงที่ให้ ในการทดลองนี้จึงกำหนดให้แรงจำนวน 10,000 รอบ ที่ความถี่ 120 รอบ/นาที ซึ่งเทียบเป็นการบดเคี้ยวในช่องปากเป็นเวลาประมาณ 12 วัน (Yoshida และคณะ, 2003)

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการจำลองปัจจัยต่างๆ โดยรอบไม่สามารถทำให้เหมือนสภาพในช่องปากจริงทุกประการได้
2. ถึงแม้ว่าขนาดของชิ้นทดสอบจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับการทดลองลักษณะอื่นๆ เช่น ไคอะมีเทอลเทนเซิล หรือการทดลองความทนแรงอัด แต่ขนาดของชิ้นทดสอบก็ยังคงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของวัสดุบูรณะจริงในช่องปาก

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

Fatigue: ความล้า

Fatigue strength: ความแข็งแรงล้า

Flexural strength: ความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติก

Flexural fatigue strength: ความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

Stiffness (สติฟเนส): คุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด เป็นคุณสมบัติที่ตรงกันข้ามกับความยืดหยุ่นของวัสดุ (flexibility)

Toughness (ทัฟเนส): ความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานต่อการแตกหัก แสดงออกมาเป็นปริมาณของพลังงานที่จะทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก

Elastic modulus (อีลาสติคโมดูลัส): คุณสมบัติของวัสดุที่จะบอกถึงสติฟเนสของวัสดุในช่วงอีลาสติค (elastic range; การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงนี้ วัสดุจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับแรงยึดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล คือ วัสดุที่มีแรงยึดพื้นฐานเหล่านี้สูง วัสดุจะมีความแข็ง (rigid) และมีสติฟเนสสูง

Yield strength (ความแข็งแรงยืดค้): ความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือระดับความเค้นที่ทำให้วัสดุเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายถึงผลของการให้แรงกระทำซ้ำ ๆ ต่อความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุบูรณะสีเหมือนฟันชนิดเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบ
2. สามารถทราบถึงความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุที่ทำการทดสอบ ที่เกิดจากการให้แรงกระทำซ้ำ ๆ ซึ่งเป็นลักษณะของแรงที่ใกล้เคียงกับแรงที่เกิดกับวัสดุในช่องปาก
3. สามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติก กับค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุที่ทำการทดสอบ
4. สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการเลือกใช้วัสดุบูรณะสีเหมือนฟันชนิดเรซินคอมโพสิต

วิธีดำเนินการวิจัย

วิจัยเชิงทดลอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

ความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิตนั้นเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ เพราะทำให้ทันตแพทย์ได้เห็นถึงคุณสมบัติอีกลักษณะหนึ่งในเรื่องของความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ และเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคัดเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปทดสอบในทางคลินิกซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าต่อไป แต่เนื่องจากการทดสอบความล้านี้ใช้เวลานาน และต้องการเครื่องมือที่สามารถให้แรงกระทำซ้ำ ๆ แบบไดนามิกได้นั้น จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ผู้วิจัยหันมาทำการทดสอบความแข็งแรงโดยการให้แรงสแตติกซึ่งมากกว่าการทดสอบความล้า ดังนั้นข้อมูลความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิตนั้น จึงมีการรายงานผลออกมาไม่มากนัก ๆ ที่เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่มีรูปแบบการให้แรงที่ใกล้เคียงกับการบดเคี้ยวมากกว่า ในปี ค.ศ. 1979 การหาค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุเรซินคอมโพสิตแบบบ่มตัวด้วยตัวเองโดยใช้การทดสอบความทนแรงอัด พบว่าวัสดุที่มีค่าความทนแรงอัดสูงจะมีขีดจำกัดความล้าแรงอัด (compressive fatigue limit) สูงด้วย (Draughn, 1979) ในขณะที่การทดสอบวัสดุเรซินคอมโพสิตแบบบ่มตัวด้วยการฉายแสงโดยการทดสอบโพพอยท์เบนดิง พบว่าวัสดุที่มีความแข็งแรงดัดขวางแบบสแตติกสูงที่สุด ไม่ได้มีความต้านทานความล้า (fatigue resistance) ที่สูงที่สุด (Lohbauer และคณะ, 2003)

ความล้าที่เกิดจากความล้า (fatigue failure) นั้นจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ เริ่มจากมีรอยร้าวเกิดขึ้น (crack initiation) ตามด้วยการขยายตัวของรอยร้าว (crack propagation) ในขั้นตอนนี้การให้แรงในแต่ละครั้งจะทำให้รอยร้าวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายจะเกิดความล้มเหลวอย่างมหันตภัย (catastrophic failure) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ปริมาณของแรงที่ให้ (mean stress) จะมีผลต่อพฤติกรรมความล้าของวัสดุ โดยที่ถ้าเพิ่มปริมาณของแรงที่ให้ อายุของวัสดุภายใต้ความล้าจะลดลง และเนื่องจากความเค้นสูงสุดของแรงที่ให้จะเกิดที่ผิวของวัสดุ รอยร้าวที่ทำให้วัสดุเกิดความล้มเหลวจึงมักจะเริ่มขึ้นที่ผิวของวัสดุ โดยเฉพาะบริเวณที่มีความเค้นสะสม ดังนั้นลักษณะพื้นผิวของวัสดุจะมีผลต่ออายุของวัสดุภายใต้ความล้าเช่นกัน (surface effect) (Callister, 2000) สำหรับวัสดุเรซินคอมโพสิตที่ประกอบด้วยส่วนเสริมความแข็งแรง เช่น ฟิลเลอร์ หรือไฟเบอร์

กระจายอยู่ในเรซินเมทริกซ์ที่มีคุณสมบัติกึ่งเปราะ (quasi-brittle) วัสดุจะทนทานต่อแรงที่มากระทำ ได้โดยถ่ายทอดแรงที่เกิดจากส่วนเมทริกซ์ไปสู่ส่วนเสริมความแข็งแรงนี้ ดังนั้นกลไกของความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากความล้า (fatigue-induced damage) จะเกิดขึ้นได้แตกต่างกันไปในวัสดุแต่ละชนิด ขึ้นกับชนิดของส่วนเสริมความแข็งแรง (ฟิลเลอร์หรือไฟเบอร์) ทิศทางของแรงที่ให้ ความแข็งแรงของแต่ละส่วนประกอบรวมถึงความแข็งแรงของการยึดติดของทั้งสองส่วน (เมทริกซ์ และ ส่วนเสริมความแข็งแรง) นอกจากนี้ยังรวมถึงการมีรอยร้าว หรือฟองอากาศในเนื้อวัสดุด้วย ส่งผลให้ข้อมูลความล้า (fatigue data) ของวัสดุบูรณะที่มีองค์ประกอบตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจะมีความแตกต่างกันมากกว่าวัสดุที่เป็นเนื้อเดียว (monolithic materials) (*Baran และคณะ, 2001*)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

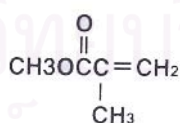
1. วัสดุบูรณะชนิดเรซินคอมโพสิต

วัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต คือ วัสดุที่นำเอาวัสดุต่างชนิดกัน มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน มารวมกันได้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุเดิม องค์ประกอบที่สำคัญในวัสดุเรซินคอมโพสิต คือ เรซินเมทริกซ์ (resin matrix) ฟิลเลอร์ (filler) สารเชื่อมต่อกัน (coupling agent) และตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (initiators of polymerization) (*Albers, 2002*)

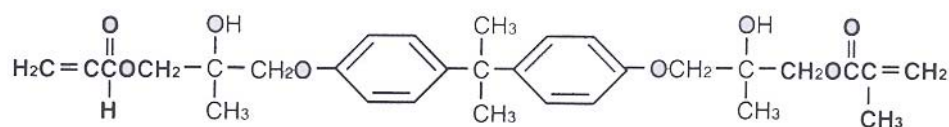
1.1 เรซินเมทริกซ์ (resin matrix)

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของเรซินเมทริกซ์จะเป็น ไดเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์สายยาว (long dimethacrylate copolymers) ที่นิยมในปัจจุบันคือ Bis-GMA (2,2-bis[4-(2-hydroxy-3-methacryloxypropoxy)-phenyl]-propane) เนื่องจาก Bis-GMA มีสายโมเลกุลที่ค่อนข้างยาวและมีเมอโนเมอร์ที่ปลายทั้งสองข้าง (difunctional monomer) (*ภาพที่ 1*) ภายหลังปฏิกิริยาบ่มตัวจะได้โครงสร้างตาข่ายของสายพอลิเมอร์ (cross-linked polymer) ที่มีการหดตัวต่ำ (low shrinkage) นอกจากนี้ Bis-GMA ยังมีโครงสร้างอะโรมาติก (aromatic structure) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแข็งแรงอัด (compressive strength) และลดการดูดน้ำ (water sorption) ของวัสดุเรซินคอมโพสิตด้วย (*Albers, 2002*) นอกจากนี้ Bis-GMA แล้วเรซินคอมโพสิตบางชนิดใช้เมอโนเมอร์ที่เป็นพวก UDMA (urethane dimethacrylates) เช่น 1,6-bis[methacryloxy-2-ethoxycarbonylamino]-2,4,4-trialon (UEDMA) ที่

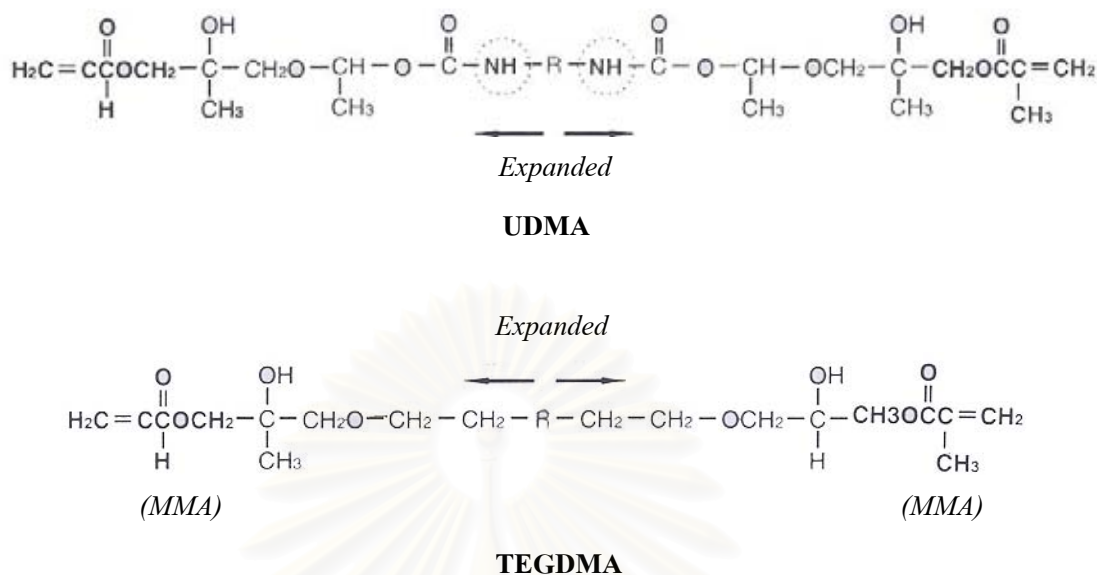
ใช้ในวัสดุเรซินคอมโพสิต Isomolar®(Vivadent) หรือใช้ร่วมกับ Bis-GMA เช่น Heliomolar® (Vivadent) พอลิเมอร์จำพวก UEDMA จะเพิ่มทัพเนส (toughness) ให้กับเรซินคอมโพสิต เพราะการเชื่อมโยงของยูเรเทน (urethane linkage) จะทำให้เรซินคอมโพสิตมีความยืดหยุ่น (flexibility) มากกว่าเรซินคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบเป็น Bis-GMA (*Ferrance, 1995*) เนื่องจาก Bis-GMA มีความหนืดสูง จึงมักมีการเติมเรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า (low molecular weight) เช่น TEGDMA (triethylene glycol dimethacrylate), UDM (urethane dimethacrylate) เพื่อลดความหนืด และเพื่อให้สามารถเติมฟิลเลอร์ได้ (*Bowen, 1963*) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุเรซินคอมโพสิต ลดความเปราะ (brittle) และเพิ่มความแข็งแรงตามขอบ (marginal edge strength) แต่ในขณะเดียวกันก็จะลดความต้านทานต่อการขัดสี (wear resistance) ไปด้วย (*Albers, 2002*) การศึกษาที่ดูผลของปริมาณ Bis-GMA, UEDMA และ TEGDMA ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเรซินคอมโพสิตพบว่า โมโนเมอร์ที่มี 70 mol% ของ UEDMA และ 30 mol% ของ TEGDMA จะได้เรซินคอมโพสิตที่มีความแข็งแรง (tensile strength) สูงที่สุด แต่จะมีอีลาสติคโมดูลัส (Elastic modulus) ค่อนข้างต่ำ (8 GPa) ในขณะที่โมโนเมอร์ที่มี 50 mol% ของ Bis-GMA และ 50 mol% ของ TEGDMA จะมีอีลาสติคโมดูลัส สูงถึง 10.5 GPa นอกจากนี้ยังพบว่า การมี UEDMA จะเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางของเรซินคอมโพสิต แต่ TEGDMA กลับมีผลลดความแข็งแรงดัดขวางนี้ จะเห็นว่าส่วนประกอบของเรซินเมทริกซ์ที่แตกต่างกัน มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเรซินคอมโพสิต ดังนั้นส่วนประกอบของเรซินเมทริกซ์ และอัตราส่วนของโมโนเมอร์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการของเรซินคอมโพสิตชนิดนั้น ๆ ว่าต้องการให้เรซินคอมโพสิตมีความแข็งแรงหรือต้องการให้มีความยืดหยุ่นสูง แล้วจึงเลือกใช้ให้เหมาะสมตามแต่ละกรณีที่ต้องการ (*Asmussen และ Peutzfeldt, 1998*)



Methacrylate (MMA)



Bis-GMA



ภาพที่ 1 แสดงสูตรโครงสร้างของ Methacrylate, Bis-GMA, UDMA และ TEGDMA (Albers, 2002)

นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอวัสดุเรซินคอมโพสิตใหม่ ที่ไม่ได้มีองค์ประกอบพื้นฐานของเรซินเมทริกซ์เป็น Bis-GMA แต่เป็น organic-inorganic copolymer เรียก ORMOCER (ORganically MOdified CERamic) โดยโครงสร้างจะมีส่วนอินทรีย์สารที่สามารถเกิดการบ่มตัวได้ (polymerizable organic unit) เช่น กลุ่มเมทาคริเลต ยึดติดกับแกนกลางที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติ (3-dimensional backbone) เมื่อบ่มตัวก็จะเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติของโคพอลิเมอร์ (3-dimensionally cross-linked copolymer) โดยมีฟิลเลอร์ที่เป็นแก้วเซรามิกและซิลิกาแทรกอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายนี้ เช่น Admira (Voco, 1999) การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Admira กับไฮบริดคอมโพสิต (Amelogen[®], Ultradent, USA) พบว่า Admira มีความแข็ง (hardness) ความต้านทานการสึกสูงกว่า และมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าด้วย (Tagtekin และคณะ, 2004)

1.2 อนุภาคฟิลเลอร์ (filler particles)

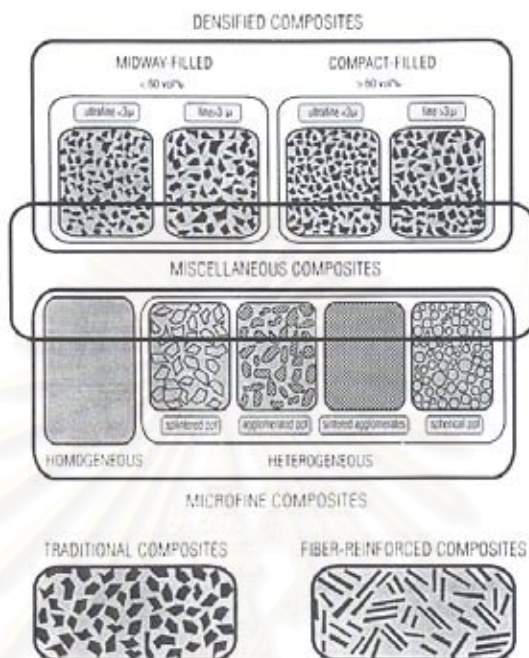
โดยทั่วไปสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของเรซินคอมโพสิตจะขึ้นกับปริมาณฟิลเลอร์ เพราะฟิลเลอร์จะทำให้เรซินเมทริกซ์มีความมั่นคงในมิติ (dimensional stability) ลดการหดตัวของเรซินคอมโพสิตเนื่องจากการบ่มตัว (polymerization shrinkage) ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (coefficient of thermal expansion) และเพิ่มความแข็ง (Kim และคณะ, 1994) ฟิลเลอร์ที่ใช้มีขนาดตั้งแต่ 0.04 μm - 100 μm เช่น ควอทซ์แบบผลึก (crystalline quartz), ซิลิกาไฟ

โรไลติก (pyrolytic silica) เช่น Aerosil®(Degussa) หรือแก้ว เช่น ลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต แบเรียมอะลูมิเนียมซิลิเกต หรือสตรอนเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต ชนิดของฟิลเลอร์ที่เลือกใช้จะถูกกำหนดด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ คุณลักษณะเชิงแสง (optical characteristics) ของวัสดุเรซินคอมโพสิต เนื่องจากมอดูลของเรซินคอมโพสิตจะมีดัชนีหักเห (refractive index) ประมาณ 1.55 ซึ่งฟิลเลอร์ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างไปจากค่านี้นี้มาก ๆ จะทำให้เรซินคอมโพสิตดูทึบแสง (optically opaque) ไม่สวยงาม (*Ferracance, 1995*)

ในปี 1983, Lutz และ Phillips ได้แบ่งประเภทของเรซินคอมโพสิตโดยอาศัยขนาดของฟิลเลอร์เป็นเกณฑ์ โดยแบ่งออกเป็นคอมโพสิตแบบดั้งเดิม (traditional composite) ซึ่งมีขนาดฟิลเลอร์เฉลี่ยประมาณ 1-15 μm แต่ถ้าฟิลเลอร์มีขนาดอยู่ในช่วง 0.04 - 0.1 μm จะเรียกไมโครฟิลล์ (microfills) และสำหรับคอมโพสิตที่มีฟิลเลอร์เป็นอนุภาคแก้ว (5 μm) ผสมกับไมโครฟิลล์ (0.4 μm) เรียกว่าไฮบริด (Hybrid) นอกจากนี้เรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์ยังแบ่งออกเป็นอีกสองกลุ่มย่อย คือ กลุ่มที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และกลุ่มที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ในกลุ่มที่เป็นเนื้อเดียวกันจะเป็นการนำเอาฟิลเลอร์ขนาดเล็กเข้าผสมกับเรซินเมทริกซ์โดยตรง เรซินคอมโพสิตชนิดนี้ไม่สามารถเติมฟิลเลอร์ได้ในปริมาณมาก เนื่องจากฟิลเลอร์ที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) มาก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการนำเอาฟิลเลอร์ขนาดเล็กนี้ไปผ่านการอัดรวมกันเป็นก้อนโดยการเผา (sintering) การทำให้ตกตะกอน (precipitation) การกวดอัด (condensation) หรือการยึดเชื่อมกัน (silanization) ก่อนมารวมกับเรซินเมทริกซ์ โดยให้ได้ปริมาณของฟิลเลอร์ประมาณ 70 % โดยน้ำหนักแล้วจึงนำไปบ่มตัว ภายหลังการบ่มตัวจะนำมาบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาด 1-200 μm เรียก พรีพอลิเมอร์ไรซ์เรซินฟิลเลอร์ (prepolymerized resin filler) แล้วจึงเติมฟิลเลอร์นี้เติมลงไปในเรซินคอมโพสิตชนิดไมโครฟิลล์ร่วมกับฟิลเลอร์ขนาดเล็ก ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณฟิลเลอร์เป็น 35-72 % โดยน้ำหนัก เรียกเรซินคอมโพสิตไมโครฟิลล์ชนิดนี้ว่ากลุ่มที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

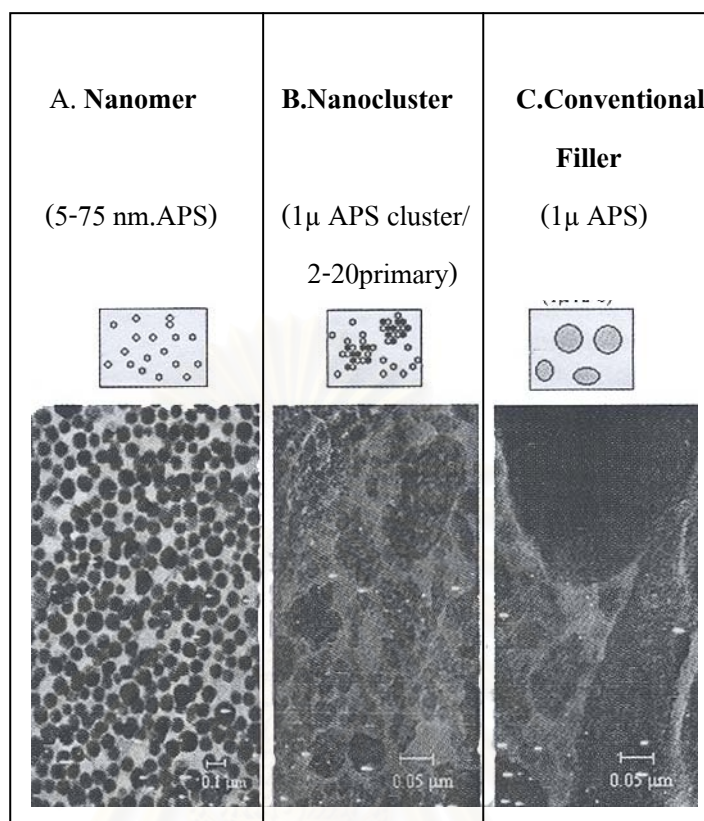
ในปี 1992, Willems และคณะได้แบ่งประเภทของเรซินคอมโพสิตตามขนาดของฟิลเลอร์ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ Lutz และ Phillips แตกต่างกันที่ขนาดโดยเฉลี่ยของฟิลเลอร์จะมีขนาดเล็กลงและไม่ใช้คำว่าไฮบริด เนื่องจากคอมโพสิตส่วนใหญ่เป็นไฮบริดที่มีซิลิกาชนิดอสัณฐาน (amorphous silica) ผสมอยู่เพื่อไม่ให้วัสดุเหนียวติดเครื่องมือ แต่จะแบ่งคอมโพสิตออกเป็น มิดเวย์ฟิล (midway-filled; มีฟิลเลอร์ < 60 % โดยปริมาตร) และคอมแพคฟิล (compact-filled; มีฟิลเลอร์ > 60 % โดยปริมาตร) ซึ่งทั้งสองประเภทจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามขนาดของฟิลเลอร์ ได้แก่ อัลตราฟาย (ultrafine, ขนาดโดยเฉลี่ย < 3 μm) และ ฟาย (fine, ขนาดโดยเฉลี่ย > 3

μm) ส่วนกลุ่มของไมโครฟิลล์ยังใช้การแบ่งแบบเดิม และมีคอมโพสิตกลุ่มใหม่ที่มีเพิ่มขึ้นมา คือ คอมโพสิตชนิดเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composite) (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 แสดงการแบ่งกลุ่มของเรซินคอมโพสิต (Willems และคณะ, 1992)

ปัจจุบันมีการนำนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เข้ามาผลิตฟิลเลอร์อนุภาคเล็กระดับนาโนเมตร (Nanofiller particle) 2 รูปแบบ คือ นาโนเมอร์ริก (Nanomeric; NM) และนาโนคลัสเตอร์ (Nanocluster; NCs) โดยเรซินคอมโพสิตที่มีอนุภาคนาโนเมอร์ริกจะเป็นคอมโพสิตที่มีอนุภาคเดี่ยวของซิลิกาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-75 nm กระจายอยู่เดี่ยว ๆ (Monodisperse) ในเนื้อเรซินคอมโพสิต โดยไม่รวมตัวกัน (Non-aggregate) หรือเกาะกลุ่มกัน (Non-agglomerate) บนผิวของฟิลเลอร์จะมี 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPTS) ซึ่งเป็นสารเชื่อมต่อ (coupling agent) ที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นซิลิกาเอสเทอร์ (silica ester) สำหรับสร้างพันธะกับฟิลเลอร์ ส่วนปลายอีกข้างเป็นกลุ่มเมธาคริเลต ซึ่งสารเชื่อมต่อชนิดนี้จะป้องกันฟิลเลอร์รวมกลุ่ม หรือเกาะกลุ่มกันก่อนการบ่มตัว แต่จะทำให้ฟิลเลอร์เกิดพันธะทางเคมี (chemical bond) กับเรซินเมทริกซ์ขณะมีการบ่มตัว ส่วนนาโนคลัสเตอร์ถูกผลิตออกมา 2 รูปแบบ คือ อนุภาคเซอร์โคเนียซิลิกา (zirconia-silica particle) ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 2-20 nm เกาะกลุ่มกัน (agglomerate) ได้ก่อนกลมของฟิลเลอร์ขนาดแตกต่างกันโดยเฉลี่ยประมาณ 0.6 μm หรือใช้อนุภาคซิลิกา (silica particle) ขนาด 75 nm นำมารวมตัวกันได้ก่อนกลมของฟิลเลอร์ขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 0.6 μm เช่นกัน (ภาพที่ 3) ที่ผิวของนาโนคลัสเตอร์ทั้งสองกลุ่มนี้จะมี MPTS เป็นสารเชื่อมต่อเช่นกัน (Mitra และคณะ, 2003)

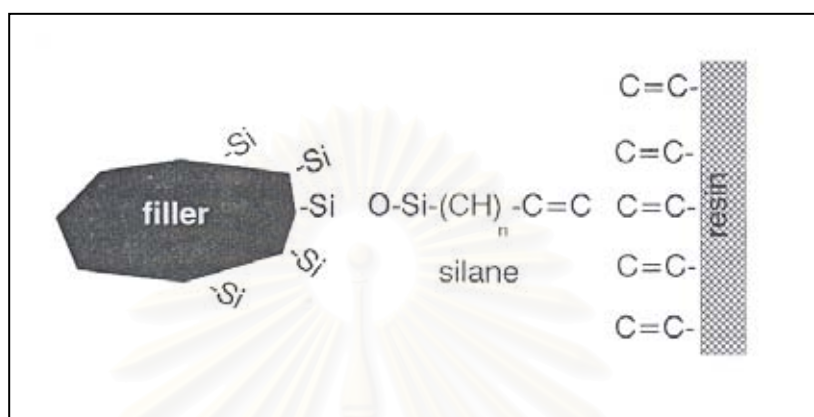


ภาพที่ 3 แสดงภาพเปรียบเทียบเรซินคอมโพสิตแต่ละชนิด A. คอมโพสิตที่มีนาโนเมอร์ B.คอมโพสิตที่มีนาโนคลัสเตอร์ และ C. ไฮบริดคอมโพสิตที่มีฟิลเลอร์ขนาดไมโครเมตร (Mitra และคณะ, 2003)

1.3 สารเชื่อมต่อกุ้ควบ (coupling agent)

สารเชื่อมต่อกุ้ควบที่จะช่วยยึดฟิลเลอร์เข้ากับเรซินเมทริกซ์ คือ สารไฮเลน สารชนิดนี้มีโมเลกุลที่ปลายข้างหนึ่งเป็นกลุ่มซิลานอล (silanol group; Si-OH) ส่วนปลายอีกข้างเป็นกลุ่มเมธาคริเลต (C=C) (ภาพที่4) ทำให้สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์ ทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างกลุ่มซิลิกาที่มีออกซิเจนเกาะ (silicon-oxygen groups) บนฟิลเลอร์ที่มีพื้นฐานเป็นซิลิกา (silica-based filler) กับกลุ่มเมธาคริเลตของเรซินเมทริกซ์ ซึ่งเรซินคอมโพสิตส่วนใหญ่มักจะมีฟิลเลอร์จำพวกซิลิกาเป็นส่วนประกอบอยู่แล้ว สารไฮเลนที่นิยมคือสารเมธาคริลีออกซิโพรพิลไตรเมทอซิเลน (3-methacryloxypropyltrimethoxysilane; MPS) โพรเมทต้า (4-META) ไททานเนต (titanates) หรือเซอร์โคเนต (zirconates) (Ferracance, 1995) สารไฮเลนจะลดแรงตึงผิว (surface tension) ระหว่างฟิลเลอร์และเรซินเมทริกซ์ เรซินที่มีสารไฮเลนจะมีการยึดเกาะทางกายภาพ (physical

bond) ที่ดีกับฟิลเลอร์เพราะเรซินสามารถแนบ (adapt) ไปกับผิวที่ขรุขระของฟิลเลอร์ได้ ลดการหลุดของอนุภาคฟิลเลอร์ออกจากเรซินเมทริกซ์ (Albers, 2002)



ภาพที่ 4 แสดงโซ่เล่นที่ยึดระหว่างฟิลเลอร์ และเรซินเมทริกซ์ในเรซินคอมโพสิต (Ferracance, 1995)

1.4 ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (initiators of polymerization)

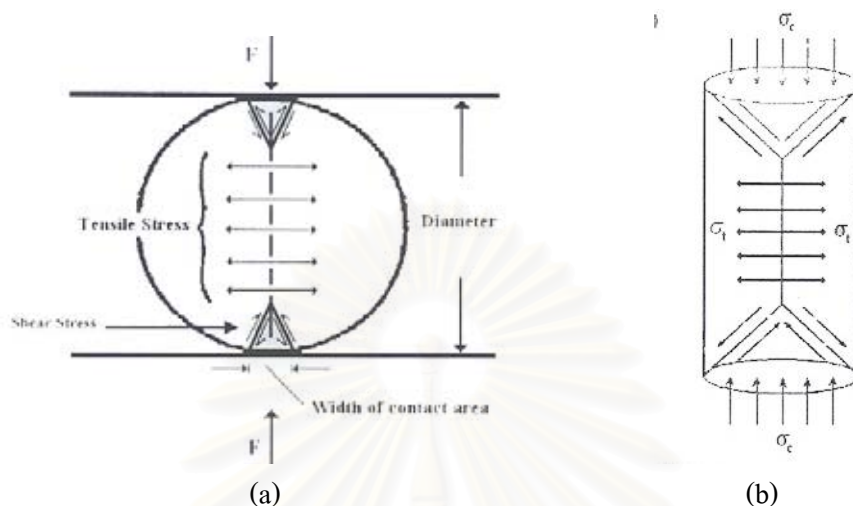
ปฏิกิริยาบ่มตัวของเรซินคอมโพสิตเกิดขึ้น โดยจะต้องมีตัวกระตุ้นจากภายนอก (external stimuli) ซึ่งการกระตุ้นนี้เกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ในคอมโพสิตชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง (self-cured or auto-cured composite resin) ปฏิกิริยาการบ่มตัวจะเกิดจากการนำส่วนเบส (base) ที่มีตัวตั้งต้นทางเคมี (chemical initiator) เข้าผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่มีตัวกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมี (chemical activator) สำหรับเรซินคอมโพสิตชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน (heated-cured materials) จะใช้อุณหภูมิ 100°C หรือมากกว่ามาเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา แต่เรซินคอมโพสิตชนิดบ่มตัวด้วยการฉายแสง (light-cured materials) จะใช้แสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 470 nm กระตุ้นตัวตั้งต้นซึ่งก็คือแคมโฟควิโนน (Camphorquinone; CQ) ที่เป็นส่วนประกอบในเรซินคอมโพสิตชนิดนี้ (Albers, 2002)

2. รูปแบบวิธีการทดลอง (test method)

การประเมินความแข็งแรง (strength) ของวัสดุบูรณะทางทันตกรรมสามารถทำได้โดยทำการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอลเทนเซิล (diametral tensile test) (*Baharav และคณะ, 1997*) การทดสอบความทนแรงอัด (compressive test) (*Jandt และคณะ, 2000*) การทดสอบความแข็งแรงดึง (tensile test) การทดสอบความแข็งแรงคดขวาง (flexural strength test) (*Baran และคณะ, 1999; Ferracane และคณะ, 1998; Kelsey และคณะ, 2000; Manhart และคณะ, 2000; Yap และคณะ, 2003; Zhao และคณะ, 1997*) หรือรวมกันมากกว่าหนึ่งรูปแบบ (*Asmussen และ Peutzfeldt, 1998; Ban และ Anusavice, 1990; Brosh และคณะ, 1999; Huysmans และคณะ, 1996*) การทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอลเทนเซิล เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงในวัสดุที่เปราะ โดยให้แรงกดในแนวผ่านเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ยาว 6 มม.) (*ภาพที่ 5a*) วิธีนี้มีการเตรียมชิ้นทดสอบที่ไม่ยุ่งยากเหมือนการทดสอบความแข็งแรงดึงที่ต้องทำชิ้นทดลองเป็นรูปคัมเบล (dumbbell) หรือทำเป็นชิ้นทดสอบขนาดเล็ก แต่ถ้าวัสดุที่นำมาทดลองไม่มีความเปราะ (brittle) วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนแตกหัก ทำให้จุดสัมผัสบนชิ้นทดสอบเปลี่ยนเป็นพื้นผิวสัมผัส (flat area of contact) ผลคือทำให้เกิดแรงเฉือน (shear force) ที่ส่วนปลายของแนวผ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง (the apex of diametral plane) ซึ่งทำให้การแปลผลมีความยุ่งยากขึ้น มีผลต่อความถูกต้องของข้อมูล (*Craig, 1993; Darvell, 1990*) และอาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างกันของข้อมูลความแข็งแรงของวัสดุจากต่างแหล่งทดลอง ความเชื่อถือได้ของข้อมูลจะลดลงกรณีทดสอบวัสดุเรซินคอมโพสิตด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอลเทนเซิล (*Zidan และคณะ, 1980*)

ชิ้นทดสอบสำหรับการทดลองความทนแรงอัดจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ยาว 6 มม.) เช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอลเทนเซิล แต่ทิศทางของแรงที่ให้ต่างกัน คือจะให้แรงกดในแนวตามความยาวของชิ้นงาน (longitudinal compression) การแตกหักที่เกิดขึ้นเป็นผลจากทั้งแรงดึงและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นทดลองเหมือนในการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอลเทนเซิล (*ภาพที่ 5b*) ค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอลเทนเซิล และการทดสอบความทนแรงอัดมีความสอดคล้องกัน (high correlation) (*Ban และ Anusavice, 1990*) แต่เนื่องจากขนาดชิ้นทดสอบสำหรับการทดลองทั้งสองแบบนี้มีขนาดเล็กไปจากรูปร่างที่ใช้ในทางคลินิกมาก และสำหรับวัสดุเรซินคอมโพสิตก็มีข้อจำกัดในระดับความลึกของการฉายแสงที่ไม่เกิน 2-4 มม. (*Rueggeberg และคณะ, 1994; Peutzfeldt และคณะ, 2000*) การที่ชิ้นทดลองมีความสูงถึง 6 มม. ส่วนกลางของชิ้นทดสอบอาจจะมี

การบ่มตัวที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งลดความน่าเชื่อถือของค่าความแข็งแรงที่ได้ และอาจจะเป็นสาเหตุให้เกิดความแตกต่างของข้อมูลจากต่างแหล่งทดลอง (*Palin และคณะ, 2003*)



ภาพที่ 5 a) แสดงการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอเทนเซิล

b) แสดงแรงกดที่ทำให้บริเวณส่วนปลายของแท่งขึ้นทดลองทรงกระบอกของการทดสอบความทนแรงอัด ทำให้เกิดแรงเฉือนตามแนวรูปกรวย (cone shape) และแรงดึง (tensile) ในแนวกึ่งกลาง (central part) ของทรงกระบอก (*Palin และคณะ, 2003*)

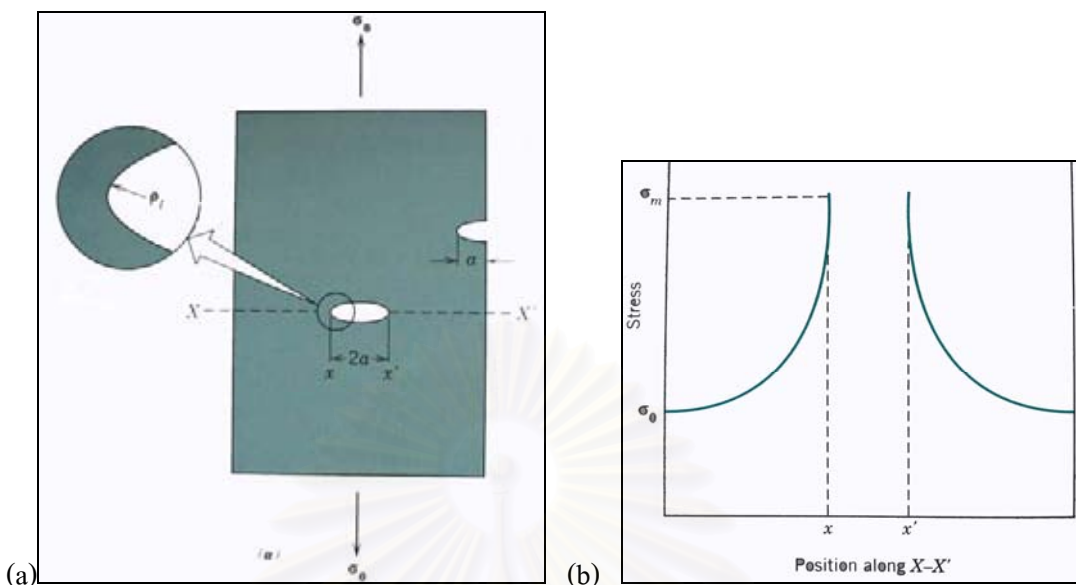
การทดสอบความแข็งแรงค้ำขวางชนิดยูนิแอกเซิล (uni-axial flexural test) เป็นการทดสอบที่ให้แรงกดหนึ่งจุดที่ผิวด้านบนของชิ้นทดลองรูปแท่ง (bar) ยาว 25 มม. กว้าง 2 มม. และสูง 2 มม. โดยมีจุดรองรับ (support) สองจุดที่ผิวล่างของชิ้นทดสอบเรียกการทดสอบทรีพอยท์เบนดิง (3-point bending test) หรือให้แรงกดสองจุดบนชิ้นทดสอบรูปร่างเดียวกันและมีจุดรองรับสองจุด เรียก การทดสอบโฟพอยท์เบนดิง (4-point bending test) การให้แรงกดที่ผิวด้านบนจะทำให้เกิดความเค้นแรงดึง (pure tensile stress) ที่ผิวด้านล่าง (lower surface) ของชิ้นทดสอบ การทดสอบรูปแบบนี้ได้รับความนิยมเนื่องจากทั้งวิธีการทดสอบ และการเตรียมชิ้นทดสอบไม่ยุ่งยาก ทำให้เกิดจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (crack initiation) ในวัสดุที่มีความเปราะ แต่มีข้อด้อย คือ การมีรอยตำหนิตามขอบ (edge defect) จะมีผลต่อผลการทดลองทำให้มีการกระจายของข้อมูลสูง (*Ban และ Anusavice, 1990*)

การทดสอบความแข็งแรงค้ำขวางชนิดไบแอกเซิล (bi-axial flexural test) เป็นการทดสอบที่มีข้อดีมากกว่าการทดสอบความแข็งแรงค้ำขวางชนิดยูนิแอกเซิล การทดสอบความแข็งแรงดึงแบบไดอะมีเทอเทนเซิล และการทดสอบความทนแรงอัด การทดสอบชนิดนี้จะให้แรงกดที่ผิวบนของชิ้นทดสอบรูปแผ่นกลม (disc-shape) โดยที่ส่วนรองรับจะเป็นได้ตั้งแต่ลูกเหล็กกลมสามลูก (three

ball) ที่ถูกจัดเรียงให้มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางและระยะระหว่างกันเท่ากัน ไปจนถึงวงแหวนกลม (ring) ซึ่งไม่ว่าส่วนรองรับจะเป็นแบบจุดหรือแบบวงแหวนกลมก็ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกัน (Williams และคณะ, 2002) สามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้ เมื่อให้แรงกดที่ด้านบนของชิ้นทดลอง จะเกิดความเค้นแรงดึงที่ผิวด้านล่างของชิ้นทดลองได้ต่อจุดที่ให้แรงซึ่งเป็นบริเวณส่วนกลาง (central) ของชิ้นทดสอบ ดังนั้นสภาพขอบของชิ้นทดสอบ (edge condition) จะไม่มีผลต่อผลการทดลอง เหมือนกับที่เกิดขึ้นในการทดสอบความแข็งแรงคัดขวางชนิดยูนิเอคเซล นอกจากนี้ที่ความเร็วการกด (loading rate) 0.1 มม./นาทีก และ 1.0 มม./นาทีก (เทียบเป็น stress rate = 0.64 และ 6.4 MPa/s. ตามลำดับ) ให้ค่าความแข็งแรงคัดขวางที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Ban และ Anusavice, 1990) ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงคัดขวางชนิดไบเอคเซลเป็นการทดสอบที่ให้ข้อมูลค่าความแข็งแรงสำหรับวัสดุทางทันตกรรมที่เชื่อถือได้มากกว่า เพราะวิธีการทดลอง (test condition) ไม่มีผลต่อผลการทดลอง (Palin และคณะ, 2003; Ban และ Anusavice, 1990) ลักษณะหัวกดที่ใช้กดในการทดลองชนิดนี้มีทั้งที่เป็นวงกลมผิวหน้าตัดเรียบ (piston) ลูกเหล็กทรงกลม (ball) หรือเป็นวงแหวนกลม (ring) การใช้หัวกดที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมผิวหน้าตัดเรียบกดที่ผิวด้านบนของชิ้นทดสอบนั้น ถ้าผิวสัมผัสทั้งสองผิวนี้ไม่ขนานกันจะทำให้ผิวหน้าตัดของหัวกดแต่ละไม่พร้อมกันทั้งหมดบนผิวของชิ้นทดสอบ ในกรณีนี้จะทำให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มีความคลาดเคลื่อน การใช้หัวกดที่เป็นเหล็กทรงกลมเป็นอีกลักษณะหนึ่งที่น่าสนใจ แต่มีข้อกำหนดคือรัศมีของลูกเหล็กหัวกดจะต้องเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นทดสอบ ($r_0 < 0.5t$) หรือความหนาของชิ้นทดลองจะต้องหนามากกว่าสองเท่าของรัศมีลูกเหล็กหัวกด และเป็นความหนาที่เมื่อให้แรงกดแล้วจะไม่ทำให้ชิ้นทดลองเกิดการโค้งงอ (deflection) มากกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาขณะเกิดการแตกหัก (Ban และ Anusavice, 1990)

3. การแตกหัก (Fracture)

Fracture strength ของวัสดุที่มีความแข็ง (solid material) คือ cohesive force ระหว่างอะตอมของวัสดุนั้น แต่การที่วัสดุมักจะมีรอยตำหนิ (flaw) หรือรอยร้าว (crack) ขนาดเล็ก ทั้งที่ผิวนอกหรือในเนื้อวัสดุอยู่เสมอ เมื่อให้แรงดึงแก่วัสดุ จะเกิดมีการสะสมความเค้นที่ส่วนปลายของรอยตำหนิ หรือรอยร้าว (crack tip) นั้น ซึ่งความเค้นที่สะสมนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นกับรูปร่าง และการเรียงตัวของรอยร้าว (ภาพที่ 6) (Callister, 2000)



ภาพที่ 6 แสดงรอยร้าวที่ผิวนอก และภายในเนื้อวัสดุ (a) แสดงความเค้นที่ส่วนปลายของรอยร้าว (b) แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนว X-X' (Callister, 2000)

จากภาพ วัสดุมีรอยร้าวรูปร่างวงตัวในแนวตั้งฉากกับแรงที่ให้ (applied stress) จะพบว่า ระยะทางที่ห่างจากส่วนปลายของรอยร้าวออกไปจะมีความเค้นสะสมลดน้อยลง และความเค้นสูงสุดที่บริเวณส่วนปลายของรอยร้าวจะเป็นดังสูตรต่อไปนี้

$$\sigma_m = \sigma_0 \left[1 + 2 \frac{a}{\rho_t} \right] \text{-----(1)}$$

เมื่อ σ_0 = ปริมาณแรงที่ดึง

ρ_t = รัศมีความโค้งของส่วนปลายของรอยร้าว

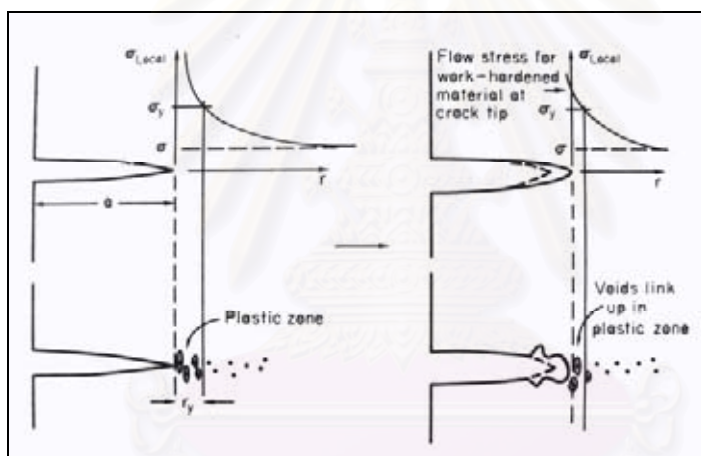
a = ครึ่งหนึ่งของความยาวของ internal crack

จากสูตร จะเห็นว่าในกรณีที่รอยร้าวมีรูปร่างยาว และมีรัศมีความโค้งที่บริเวณส่วนปลายของรอยร้าวแคบ จะส่งผลให้ความเค้นที่บริเวณส่วนปลายของรอยร้าวมีค่าสูงมาก ซึ่งจะทำให้วัสดุมีการแตกหักต่อไปได้อย่างรวดเร็ว

การที่วัสดุจะเกิดการแตกหักได้นั้น จะต้องมีการเกิดขึ้นของรอยร้าว (crack formation) และมีการขยายตัวของรอยร้าว รูปแบบของการแตกหักแบ่งตามความสามารถของวัสดุในการเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (plastic deformation) มี 2 รูปแบบ ดังนี้ (Ashby และ Jones, 1980)

1. Ductile tearing

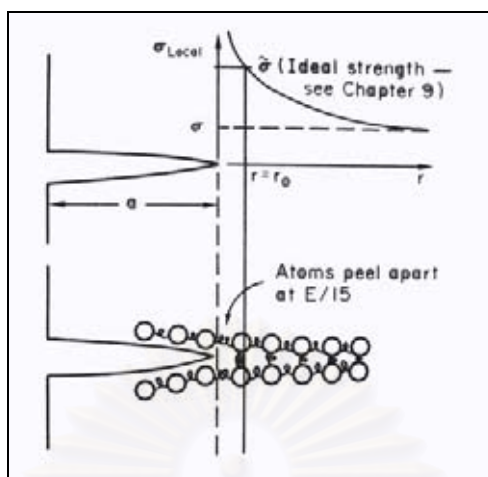
ในโลหะที่มีความเหนียว (ductile metal) หรือโลหะชนิดที่สามารถมีการไหลแผ่ (flow) ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรได้ เช่น ทองแดง (pure copper) นั้น เมื่อเราให้แรงดึงแก่วัสดุชนิดนี้ การมี plastic flow ของวัสดุจะทำให้เกิด micro void ในส่วน plastic zone (ภาพที่ 7) และการขยายตัวของรอยร้าวจะไปตามแนวการเชื่อมต่อของ micro void เหล่านี้ เรียกการขยายตัวของรอยร้าวลักษณะนี้ว่า ductile tearing การขยายตัวของรอยร้าวชนิดนี้จะต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากในการเกิด plastic flow นั้นถ้า plastic zone มีความกว้างมากเท่าไร จะต้องใช้พลังงานในการขยายตัวของรอยร้าวมากขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้การมี plastic flow จะมีผลทำให้ส่วนปลายของรอยร้าวที่มีปลายแหลม (sharp crack) ในตอนแรก เปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นปลายมน (blunt crack) ส่งผลให้ความเค้นที่สะสมบริเวณส่วนปลายของรอยร้าวลดลง



ภาพที่ 7 แสดงการขยายตัวของรอยร้าวแบบ ductile tearing (Ashby และ Jones, 1980)

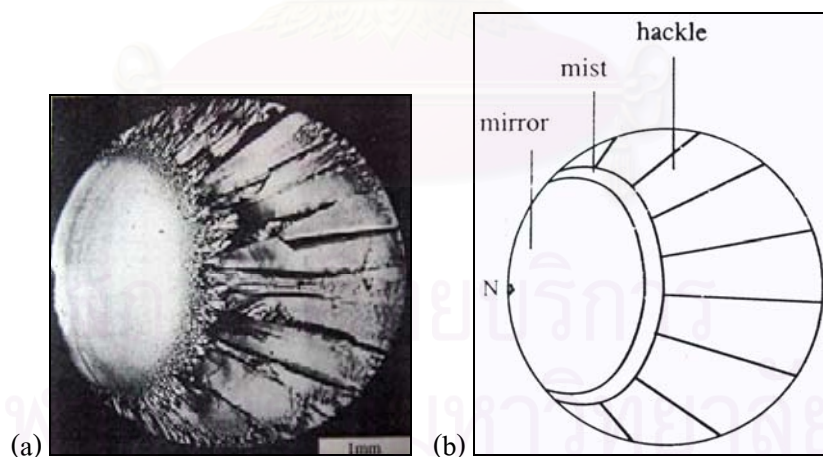
2. Cleavage

ในวัสดุพวกแก้ว หรือเซรามิก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงสุด และจะไม่มีการเกิด plastic deformation หรือมีน้อยมาก ดังนั้นการที่ส่วนปลายของรอยร้าวที่มีปลายแหลมจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นปลายมนจึงไม่เกิดขึ้น ความเค้นที่สะสมบริเวณส่วนปลายของรอยร้าวมีปริมาณสูง ทำให้เกิดการแตกของแรงยึดระหว่างอะตอม และมีการขยายของรอยร้าวไปตามแนวของอะตอม เรียก cleavage (ภาพที่ 8) พลังงานที่ใช้ในการแตกแรงยึดระหว่างอะตอมในกรณีนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่าที่ใช้ในการแตกแบบ ductile tearing มาก เป็นเหตุผลว่าทำไมวัสดุพวกแก้ว หรือเซรามิกจึงมีความเปราะมาก



ภาพที่ 8 แสดงการขยายตัวของรอยร้าวแบบ cleavage (Ashby และ Jones, 1980)

การศึกษาพื้นผิวรอยแตกหักของวัสดุ เพื่อที่จะหาจุดกำเนิดของการแตกหัก และสาเหตุของการแตกหักนั้น เรียกว่า Fractography โครงสร้างระดับย่อย (microstructure) ของวัสดุนั้น จะมีผลต่อภาพพื้นผิวรอยแตกที่เห็น นอกจากนี้การดูพื้นผิวรอยแตกจะทำให้เราเห็นรายละเอียดที่เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ (material-specific) การดูลักษณะที่เกิดขึ้นของ mirror, mist และ hackle (ภาพที่ 9) ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาบนพื้นผิวรอยแตกดังกล่าว



ภาพที่ 9 แสดง mist, mirror และ hackle บนพื้นผิวรอยแตก (a) ภาพถ่ายพื้นผิวแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงส่วนของ mirror ที่มีรูปร่างเกือบครึ่งวงกลม ล้อมรอบด้วยขอบเล็ก ๆ ของ mist ซึ่งค่อย ๆ เปลี่ยนเป็น hackle (b) รูปไดอะแกรมแสดงลักษณะการเรียงตัวของ mirror, mist และ hackle ของรูป (a) (Hull, 1999)

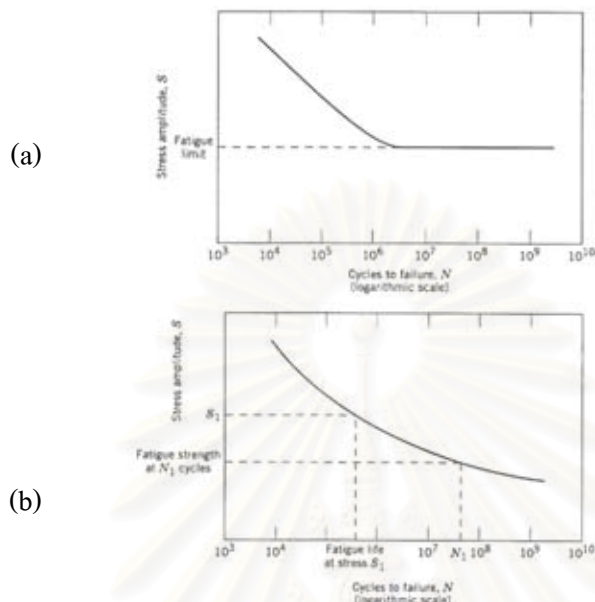
จากภาพที่ 9b จุด N ที่ผิวของวัสดุเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก การขยายตัวช่วงแรกของรอยร้าวจะได้พื้นผิวที่มีผิวเรียบ เรียก mirror บริเวณที่ถัดออกมาจาก mirror จะเริ่มมีความขรุขระเล็กน้อย เรียก mist ส่วนบริเวณสุดท้ายที่เป็นวงนอกสุด คือ hackle ส่วนนี้จะมี ความขรุขระมากที่สุด ทิศทางการเรียงตัวของ hackle จะสามารถบอกทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้ และในชั้นทดสอบจากการทดสอบตัดขวาง จุดสิ้นสุดของ hackle จะบอกถึงรอยต่อระหว่างบริเวณที่มีความเค้นเกิดจากแรงดึง และบริเวณที่มีความเค้นเกิดจากแรงกด การให้แรงดึงแก่วัสดุที่มีรอยตำหนิ หรือรอยร้าว จะเกิดมีความเค้นสะสมที่บริเวณส่วนปลายของรอยร้าว จนเมื่อให้แรงมากที่ระดับหนึ่ง รอยร้าวจะมีการขยายตัว ภายใต้สภาวะนี้ความเค้นสะสมบริเวณส่วนปลายของรอยร้าวจะมีปริมาณมาก การขยายตัวของรอยร้าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีการปลดปล่อยพลังงานออกมามากด้วย โดยเฉพาะที่ส่วนปลายของรอยร้าว ซึ่งทั้งหมดจะมีผลเพิ่มความขรุขระอย่างมากของพื้นผิวรอยแตก แสดงเป็นลักษณะของ mirror, mist และ hackle (Hull, 1999)

4. ความล้า (fatigue)

วัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำให้เกิดความเค้นและความเครียด (stress or strain) นานระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดความเสียหายขึ้นกับวัสดุ เช่น แตกหัก ลีก หรือสูญเสียความแข็งแรงไป ด้วยขบวนการที่เรียกว่า ความล้า (Baran และคณะ, 1999) วัสดุบูรณะต่างๆในช่องปากก็เกิดความล้าเช่นกัน (Wiskott และคณะ, 1995) ผลก็คือทำให้เกิดความล้าหรือการสึก (fail or wear) ของเนื้อวัสดุ (Reid และคณะ, 1990) การศึกษาภาวะความล้าในทางห้องปฏิบัติการจะทำให้เราเข้าใจการเกิดความล้าในทางคลินิกได้ดีขึ้น (Braem และคณะ, 1994)

ความล้าที่เกิด ขึ้นกับปริมาณของแรงที่กระทำและจำนวนรอบของแรงกระทำ ข้อมูลความล้าจะแสดงในรูปของกราฟเรียกเส้นโค้งเอสเอ็น (S-N curve) (ภาพที่ 10) เป็นกราฟแสดงค่าความเค้น (stress; S) กับลอการิทึมของจำนวนรอบที่ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดการแตกหัก (log N; N) จากกราฟในภาพที่ 10 จะเห็นว่าถ้าให้แรงกระทำมาก หรือถ้าทำให้วัสดุเกิดความเค้นสูงวัสดุจะแตกหักเมื่อให้แรงเพียงไม่นาน (low number of cycle) แต่ถ้าลดระดับความเค้นที่ให้ลง จะต้องให้แรงในจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นวัสดุจึงจะเกิดการแตกหัก ดังนั้นในการหาค่าความแข็งแรงภายใต้ภาวะความล้าจะต้องมีการกำหนดจำนวนรอบของแรงที่ให้ ในทางกลับกันถ้าต้องการหาอายุของวัสดุภายใต้ความล้า (fatigue life) ของวัสดุนั้นจะต้องมีการกำหนดระดับความเค้นที่จะให้แก่วัสดุ สำหรับวัสดุบางชนิดพบว่าที่ความเค้นระดับหนึ่งแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนรอบของแรงที่ให้มากขึ้นเท่าไร

แต่วัสดุก็จะไม่เกิดการแตกหัก ที่ความเค้นระดับนี้จะเรียกว่าขีดจำกัดความล้า (fatigue limit หรือ endurance limit) (Craig และ Power, 2002; Callister, 2000)

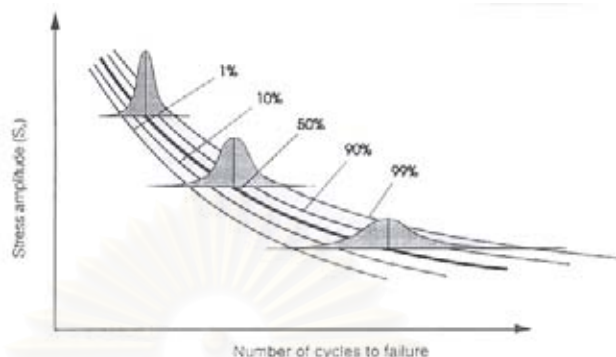


ภาพที่ 10 แสดงกราฟของระดับของความเค้น (S) กับลอการิทึมของจำนวนรอบ (N) ที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก (Callister, 2000)

- (a) วัสดุที่มีขีดจำกัดความล้า กราฟจะเกิดเป็นเส้นตรงในแนวอนที่ความเค้นระดับหนึ่ง
- (b) วัสดุไม่มีขีดจำกัดความล้า เส้นโค้งของกราฟจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้น

จะเห็นว่าเมื่อแรงที่กระทำมีปริมาณลดลง วัสดุก็จะสามารถทนทานต่อความล้าได้นานมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่พบได้เสมอในการทดสอบความล้า และเนื่องจากในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าการมีรอยตำหนิในเนื้อวัสดุจะนั้นมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ การแสดงข้อมูลของเส้นโค้งเอสเอ็นในรูปแบบโอกาสของความอยู่รอด (chance of survival) ของวัสดุ น่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า (ภาพที่ 11) เพราะเป็นกราฟที่แสดงความน่าจะเป็นของความล้มเหลว (probabilities of failure) ของวัสดุที่ความเค้นระดับต่าง ๆ แต่การสร้างเส้นโค้งเอสเอ็นเต็มรูปแบบดังกล่าวหรือที่เรียกว่า ฟูลเอสเอ็นไดอะแกรม (full S-N diagram) นั้นมีข้อด้อย คือ ต้องทำการทดลองเดิมซ้ำหลาย ๆ ครั้ง และใช้เวลานาน (Wiskott และคณะ, 1995) วิธีสเตร์เคส (staircase technique) ถูกนำเสนอขึ้นมาเพื่อใช้หาความแข็งแรงล้าของวัสดุ เป็นวิธีที่มีความตรงไปตรงมาและเข้าใจได้ง่าย มีความเฉพาะเจาะจงกว่า ข้อมูลที่ได้จะบอกถึงค่าความเค้นที่ 50% ของชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักภายใต้แรงในจำนวน

รอบที่กำหนด โดยมีหลักการอยู่บนข้อมูลเชิงปริมาณว่าวัสดุจะเกิดการแตกหักหรือไม่ (fail or non-fail) (Draughn, 1979)



ภาพที่ 11 แสดงความน่าจะเป็นของความล้มเหลว ของวัสดุที่ความเค้นระดับต่าง ๆ (Wiskott และคณะ, 1995)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การทดสอบความล้าเป็นการทดสอบที่ใช้เวลาในการทดสอบนานกว่า การทดสอบแบบสแตติก และมีความยุ่งยากมากกว่า วิธีการทดสอบที่เลือกใช้ควรเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือและสภาพของการทดลองไม่ควรมีผลต่อผลการทดลอง เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยและสามารถนำผลการทดลองจากต่างแหล่งทดลองมาเปรียบเทียบกันได้ การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบเอกเซลเป็นอีกการทดสอบหนึ่งที่มีความเหมาะสม และนิยมใช้การทดสอบความแข็งแรงล้าในวัสดุเซรามิก แต่การนำมาใช้ทดสอบวัสดุเรซินคอมโพสิตยังมีไม่มากนัก ซึ่งข้อมูลที่ได้น่าจะมีประโยชน์มากกว่าการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดยูนิเอกเซล เนื่องจากสภาพของชิ้นทดสอบมีผลต่อผลการทดลองน้อยกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุเรซินคอมโพสิต Filtek Supreme ชนิด standard (3M ESPE Dental Products, St. Paul, MN, USA)
2. วัสดุเรซินคอมโพสิต Filtek Supreme ชนิด translucent (3M ESPE Dental Products, St. Paul, MN, USA)
3. วัสดุเรซินคอมโพสิต Filtek Z250 (3M ESPE Dental Products, St. Paul, MN, USA)
4. วัสดุเรซินคอมโพสิต Admira (Voco, Cuxhaven, Germany)
5. วัสดุเรซินคอมโพสิต Ceram X (Dentsply, Konstanz, Germany)
6. แบบหล่อเทฟลอนชนิดแยกชิ้นส่วนได้ สำหรับทำชิ้นทดสอบรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร
7. ใบบายพลาสติกผสมซีเมนต์
8. แผ่นพลาสติกไฮเซลล์ลูตอยด์
9. แผ่นโลหะ
10. ตู้น้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องทดสอบสากลชนิดเซอร์โว (Instron 8872 universal testing machine, Instron corporation, England)
2. เครื่องฉายแสง (3M ESPE Elipar[®] 2500, USA) (เส้นผ่านศูนย์กลางของปลายนำแสง = 13 มม.)
3. เครื่องตรวจสอบความเข้มแสงเครื่องฉายแสง (Optilux radiometer model 100, Kerr, USA)
4. เครื่องวัดความหนาแบบดิจิตอล ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (Digimatic Micrometer, Mitutoyo, Japan)
5. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ความละเอียด 0.01 มิลลิกรัม (Electronic balance, Delham)
6. ตู้เก็บควบคุมอุณหภูมิ (Contherm Digital series incubators)
7. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, JSM 5410LV, Tokyo, Japan)

ตารางที่ 1 แสดงขนาด รูปร่างของฟิลเลอร์ และองค์ประกอบในเรซินเมทริกซ์ ของวัสดุเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบ

วัสดุ	รูปร่างของฟิลเลอร์	ฟิลเลอร์	ขนาดของฟิลเลอร์	เรซินเมทริกซ์
Admira	Irregular (ORMOCER molecule), Round	Ba-Al-Borosilicate glass, Silicon dioxide	0.04-0.7 μm .	Inorganic-organic siloxanepolymer, Bis-GMA, HEMA, UDMA
Ceram X mono	Irregular Round	- Glass filler - nanofiller	1.1-1.5 μm . 10 nm.	Nano-sized of Inorganic-organic copolymer
Filtek Supreme standard	Round	Majority -> nano Cluster Minority -> nanomeric	0.6-1.4 μm . 20 nm.	Bis-GMA Bis-EMA(6) UDMA TEGDMA
Filtek Supreme translucent	Round	Majority -> nanomeric Minority -> nano Cluster	75 nm. 0.6-1.4 μm .	Bis-GMA Bis-EMA(6) UDMA TEGDMA
Filtek Z250	Round	zirconia-silica	0.01-3.5 μm . average -> 0.6 μm .	Bis-GMA Bis-EMA(6) UDMA TEGDMA

วิธีวิจัย

1. การเตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุเรซินคอมโพสิต

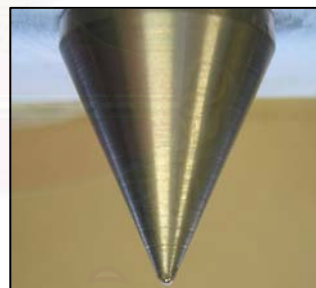
- นำวัสดุเรซินคอมโพสิตน้ำหนัก 0.58-0.62 กรัม (ขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุแต่ละชนิด) กดอัดลงในแบบหล่อเทฟลอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มม. (ภาพที่ 12) ด้วยใบพายพลาสติกผสมซีเมนต์ให้มีส่วนเกินเล็กน้อย โดยที่ผิวล่างรองรับด้วยแผ่นพลาสติกใสเซลล์ลูลอยด์รูปวงกลม
- ปิดทับด้านบนของวัสดุเรซินคอมโพสิตด้วยแผ่นพลาสติกใสเซลล์ลูลอยด์ ปิดทับอีกชั้นด้วยแผ่นโลหะก่อนจะใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัมวางทับที่ชิ้นบนสุดเป็นเวลา 60 วินาที เพื่อให้ได้ลักษณะของการกดอัดเหมือนกันในทุก ๆ ชิ้นทดสอบ
- ฉายแสง (ความเข้มแสง 700 mW/cm^2) ที่วัสดุเรซินคอมโพสิตด้วยเครื่องฉายแสง (3M ESPE Elipar[®] 2500, USA) ผ่านแผ่นพลาสติกใสเซลล์ลูลอยด์เพื่อให้วัสดุเกิดการบ่มตัวตามคำแนะนำของแต่ละบริษัท
- ภายหลังการฉายแสงนำชิ้นทดสอบออกจากแบบหล่อเทฟลอน และดึงแผ่นพลาสติกใสเซลล์ลูลอยด์ออก
- ตรวจสอบชิ้นทดสอบภายหลังจากนำออกจากแบบหล่อเทฟลอน ชิ้นทดสอบจะถูกคัดออกถ้าพบมีฟองอากาศที่ผิวบนหรือผิวล่างของชิ้นทดสอบ
- ชิ้นทดสอบจะถูกตกแต่งขอบส่วนเกินด้วยใบมีดคม และจะไม่ถูกขัดแต่งใด ๆ อีก ชิ้นทดสอบจะถูกนำไปเก็บรักษาในน้ำกลั่นอุณหภูมิ $37 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 วันก่อนนำไปทดสอบ



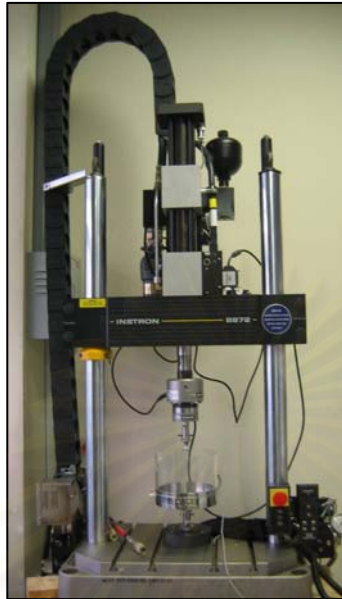
ภาพที่ 12 แสดงแบบหล่อเทฟลอนที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุเรซินคอมโพสิต

2. การทดสอบความแข็งแรงตัดขวางชนิดไบแอกเซล

- ชั้นทดสอบจำนวน 15 ชั้นสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ รวมเป็น 75 ชั้น จะถูกนำมาทดลองในชั้นตอนนี้
- นำชั้นทดสอบวางบนแท่นที่มีส่วนรองรับเป็นลูกเหล็กทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 มิลลิเมตร) จำนวนสามลูก โดยทั้งสามลูกจะมีระยะห่างเท่ากัน และให้การรองรับเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (ภาพที่ 13)
- ให้แรงกดที่ผิวด้านบนของวัสดุด้วยลูกเหล็กกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร) (ภาพที่ 13) ด้วยเครื่องทดสอบสากลชนิดเซอร์โว (ภาพที่ 14) ที่ความเร็วการกด 0.5 มิลลิเมตร/นาที่ จนวัสดุเกิดการแตกหัก
- ขณะทำการกดชิ้นงาน จะทำการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (displacement) ในแนวตั้งตลอดตั้งแต่เริ่มกดจนวัสดุเกิดการแตกหัก เพื่อนำไปสร้างกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve)
- สุ่มเลือกชั้นทดสอบที่แตกหักกลุ่มละ 2 ตัวอย่าง เพื่อนำไปดูลักษณะผิวของรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 13 แสดงชุดกดแบบลูกเหล็กกลมหนึ่งลูก กดบนส่วนรองรับที่เป็นลูกเหล็กกลมสามลูก

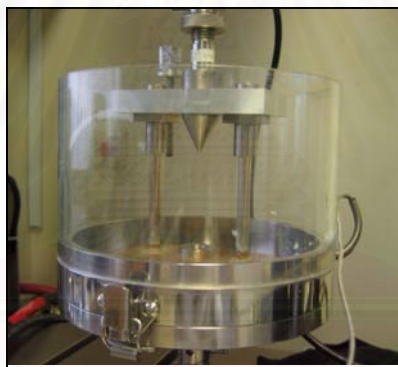


ภาพที่ 14 แสดงเครื่องทดสอบสากลชนิดเซอร์โว

3.การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความถี่ด้วยวิธีสเตรเคส (Yoshida และคณะ, 2003; Draughn, 1979)

- ซึ้นทดสอบจำนวน 20 ซึ้นสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ รวมเป็น 100 ซึ้น จะถูกนำมาทดลองในซึ้นตอนนี้
- ซึ้นตอนการวางซึ้นทดสอบในซึ้นตอนนี้ จะเหมือนกับการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางดั่งที่กล่าวมาแล้ว
- สำหรับแรงที่ให้อในซึ้นตอนนี้จะเป็นการให้แรงกระทำซ้ำ ๆ ด้วยแรงกดตลอดรูปแบบซายน์ (sine wave) คือ จะเป็นการให้แรงกดมากสลับกับกดน้อยด้วยจังหวะที่คงที่สม่ำเสมอ ที่ผิวด้านบนของวัสดุ ด้วยความถี่ 120 รอบ / นาที (2 Hz.) (Braem และคณะ, 1994) รวมเป็นจำนวนทั้งหมด 10,000 รอบ
- ซึ้นทดสอบซึ้นแรกของแต่ละผลิตภัณฑ์จะถูกกดด้วยแรงเริ่มต้นที่ประมาณ 50 % ของความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิติกของแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้จากการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบแอคเชลที่ผ่านมา

- ในกรณีที่ซึ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหักภายหลังได้รับแรงจำนวน 10,000 รอบแล้ว ซึ้นทดสอบซึ้นใหม่ของผลิตภัณฑ์เดียวกันจะถูกนำมาทดสอบต่อไป ด้วยปริมาณของแรงที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 1 เมกะปาสคาล เป็นจำนวน 10,000 รอบ ต่อไป
- แต่ถ้าเกิดมีการแตกหักของซึ้นทดสอบซึ้นก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ ซึ้นทดสอบซึ้นใหม่ของผลิตภัณฑ์เดียวกันจะถูกนำมาทดสอบด้วยปริมาณของแรงที่ลดลงจากเดิม 1 เมกะปาสคาล เป็นจำนวน 10,000 รอบ ต่อไป
- ในขั้นตอนนี้การให้แรงแก่ซึ้นทดสอบ จะกระทำภายในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ $37 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (ภาพที่ 15) โดยระดับของน้ำจะครอบคลุมผิวด้านบนของซึ้นทดสอบ และอยู่เหนือกว่าผิวด้านบนของซึ้นทดสอบประมาณ 5 มิลลิเมตร
- สุ่มเลือกซึ้นทดสอบที่แตกหักกลุ่มละ 2 ตัวอย่าง เพื่อนำไปดูลักษณะผิวของรอยแตกหัก ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ภาพที่ 15 แสดงการยึดชุดทดสอบลูกเหล็กกลมหนึ่งลูก กดบนส่วนรองรับที่เป็นลูกเหล็กกลมสามลูกเข้ากับอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การคำนวณค่าความแข็งแรงตัดขวางชนิดไบแอคเซล

ความเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหัก (the failure stress; σ) ณ.บริเวณผิวด้านล่างของชิ้นทดสอบจะได้รับการคำนวณด้วยสมการต่อไปนี้ โดยมีภาพที่ 16 แสดงภาพประกอบ

$$\sigma = \frac{AP}{t^2} \text{ ----- (2)}$$

โดยที่

$$A = \frac{3}{4\pi} \left[\frac{2(1+\nu) \ln\left(\frac{a}{r_0^*}\right) + (1-\nu) \left\{ \frac{(2a^2 - r_0^{*2})}{2b^2} \right\} + (1+\nu) \right] \text{ ----- (3)}$$

P = แรงที่ทำให้เกิดการแตกหัก

ν = Poisson's ratio

a = รัศมีของส่วนที่ให้การรองรับ (5 มิลลิเมตร)

b = รัศมีของชิ้นทดลอง (6.5 มิลลิเมตร)

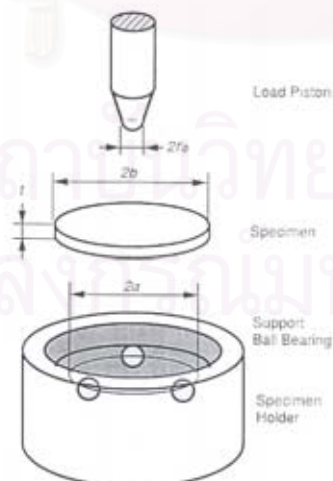
t = ความหนาของชิ้นทดลอง

r_0^* = รัศมีของลูกเหล็กที่เป็นหัวกด

และ

$$r_0^* = \sqrt{(1.6 r_0^2 + t^2) - 0.675 t} \text{ ----- (4)}$$

r_0^* = รัศมีของจุดสัมผัสระหว่างลูกเหล็กหัวกดและชิ้นทดลอง



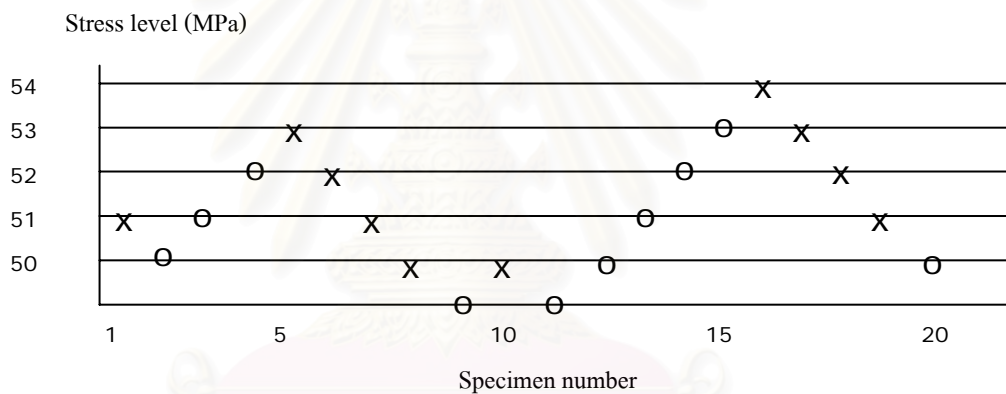
ภาพที่ 16 แสดงชุดกดแบบลูกเหล็กกลมหนึ่งลูก กดบนส่วนรองรับที่เป็นลูกเหล็กกลมสามลูก

(a-ball-on-three-ball loading system) (Ban และคณะ, 1992)

ภายหลังการคำนวณค่าความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบเอกเซลของแต่ละวัสดุแล้ว จะนำค่าตัวเลขดังกล่าวไปหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบเอกเซล ในกรณีถ้าเกิดมีค่าความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบเอกเซลที่มีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวัสดุชนิดนั้น ๆ จะถือเป็นค่าที่ผิดปกติ (*Taylor, 1997*) ค่าความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบเอกเซลดังกล่าวจะถูกคัดออก และจะทำการทดลองหาค่าความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบเอกเซลใหม่ทดแทนค่าดังกล่าวที่ถูกคัดออก

2. การคำนวณค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรเคส

ค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าจากการทดลองนี้ คือ ค่าความเค้นที่ 50% ของชั้นทดลองจะเกิดการแตกหักภายในแรงที่ให้จำนวน 10,000 รอบ ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างผลการทดลองความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรเคส



ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างการเรียงข้อมูลความแข็งแรงที่ได้จากวิธีสเตรเคส

ข้อมูลจากภาพข้างต้นจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงต่อไปโดยใช้ตารางวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

วัสดุ	stress (Mpa)	i	n_i (failure)	in_i	$i^2 n_i$
Admira	54	4			
	53	3			
	52	2			
	51	1			
	50	0			
			$N = \sum n_i$	$A = \sum in_i$	$B = \sum i^2 n_i$

โดยที่ stress = ระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก

i = ลำดับของระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก โดยที่ระดับต่ำสุดจะเท่ากับ 0
= 0, 1, 2,.....

n_i = จำนวนของขึ้นทดลองที่แตกหักที่ระดับความเค้นนั้น

ภายหลังการสร้างตารางข้างต้น จะนำตัวเลขในตารางมาคำนวณหาค่ากลาง (Mean; \bar{X}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) ของค่าความแข็งแรงคัดขวางภายใต้ภาวะความล้า จากสมการต่อไปนี้

$$\bar{X} = X_0 + d \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) \quad \text{----- (5)}$$

$$SD = 1.62 d \left\{ \left[\frac{NB - A^2}{N^2} \right] + 0.029 \right\} \quad \text{----- (6)}$$

โดยที่ X_0 = ระดับความเค้นต่ำสุดที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก
 d = ปริมาณของแรงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง (1 เมกะปาสคาล)
 A = ผลรวมของ in_i
 B = ผลรวมของ $i^2 n_i$
 N = ผลรวมของ n_i

ภายหลังการคำนวณค่าความแข็งแรงคัดขวางแบบสถิติชนิดไบนารี และค่าความแข็งแรงคัดขวางภายใต้ภาวะความล้าแล้ว จะนำค่าความแข็งแรงดังกล่าวมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยค่าสถิติแบบพารามетริกซ์ ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) โดยมีชนิดของวัสดุเรซินคอมโพสิตเป็นปัจจัยที่ต้องการทดสอบ และทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ชนิดทูคี (Tukey's HSD multiple comparison) ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงคัดขวางแบบสถิติ และค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงคัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุแต่ละยี่ห้อด้วยค่าสถิติที่ (one sample t-test) ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงคัดขวางภายใต้ภาวะความล้า กับค่าความแข็งแรงคัดขวางแบบสถิติ ใช้การทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) โดยทั้งหมดจะคำนวณด้วยโปรแกรม เอส พี เอส เอส (SPSS version 10) กำหนดค่านัยสำคัญที่ $P < 0.05$

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์

(*รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงไว้ในภาคผนวก)

จากการทดลองพบว่าวัสดุ Supreme translucent มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสูงสุด (167.13 เมกะปาสคาล) วัสดุ Supreme standard, Z250, และ Admira มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกรองลงมาตามลำดับ ส่วนวัสดุ CeramX มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกต่ำสุด (109.89 เมกะปาสคาล) (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติก (เมกะปาสคาล) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (จำนวน = 15 ชิ้นตัวอย่าง)

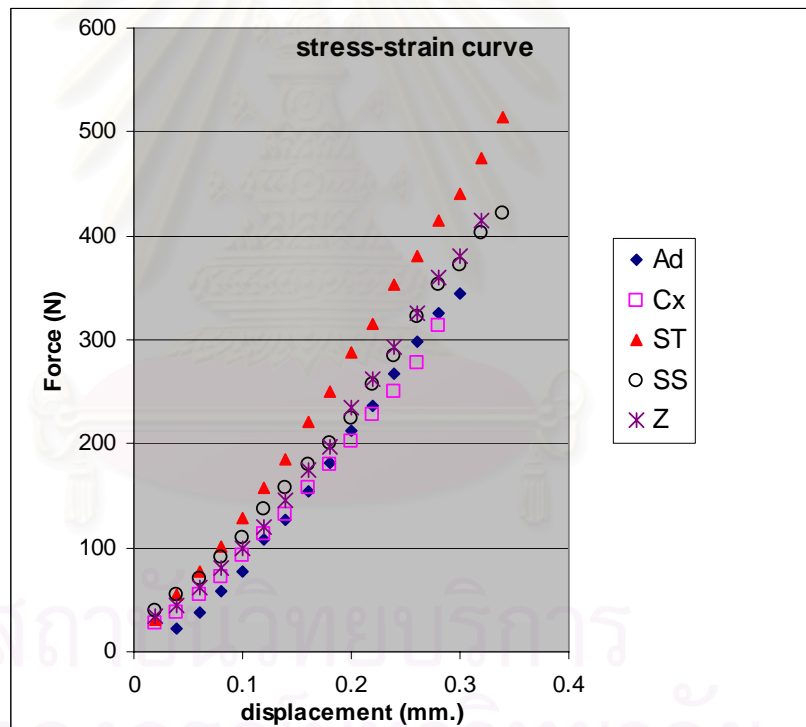
วัสดุ	ค่าความแข็งแรง สูงสุด (เมกะปาสคาล)	ค่าความแข็งแรง ต่ำสุด (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
Admira (Ad)	137.10	106.12	122.67 ^c	10.18
CeramX (Cx)	119.08	101.87	109.89 ^d	5.35
Supreme translucent (ST)	183.44	150.50	167.13 ^a	9.50
Supreme standard (SS)	169.14	134.76	154.78 ^b	8.30
Z250 (Z)	174.01	134.48	147.01 ^b	11.35

**อักษรตัวยกที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดทู่ที สำหรับความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติก ที่ความเชื่อมั่น 95 % พบว่าวัสดุ Supreme translucent มีความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสูงกว่าวัสดุชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกของวัสดุ Supreme standard และ Z250 ที่อยู่ในระดับ 2 และ 3 ตามลำดับนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนวัสดุ

Admira มีค่าความแข็งแรงตัดขวางแบบสเตติกน้อยกว่าวัสดุ Z250 แต่ก็มีค่ามากกว่าวัสดุ CeramX อย่างมีนัยสำคัญ

การบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวตั้งของชิ้นทดสอบขณะให้แรงกดจะถูกนำมาสร้างกราฟความเค้น-ความเครียดดังภาพที่ 18 จากภาพ ความชันของกราฟจะถึงบอกค่าอึลลาคิกมอดูลัสของวัสดุ วัสดุ Supreme translucent มีความชันของกราฟสูงที่สุดแสดงถึงค่าอึลลาคิกมอดูลัสที่สูง ในขณะที่วัสดุอื่น ๆ มีความชันใกล้เคียงกัน วัสดุที่มีค่าอึลลาคิกมอดูลัสสูงจะมีค่าสตีฟเนสสูง (*Craig และ Power, 2002*) แสดงให้เห็นว่าวัสดุ Supreme translucent มีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุ Admira , CeramX, Supreme standard และ Z250



ภาพที่ 18 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ของความแข็งแรงตัดขวางแบบสเตติก ชนิดไบแอคเซลสำหรับวัสดุเรซินคอมโพสิตทั้ง 5 ชนิด

ความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดลองนั้นอยู่ในช่วง 50.50 – 52.77 เมกะปาสคาล โดยวัสดุ Z250 มีค่าความแข็งแรงชนิดนี้สูงสุด (52.77 เมกะปาสคาล) วัสดุ Supreme standard มีความแข็งแรงรองลงมา ส่วนวัสดุ CeramX และ Admira มีความแข็งแรงเท่ากัน แต่วัสดุ Supreme translucent ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสูงสุด กลับมีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าต่ำสุด (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า (เมกะปาสคาล) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ตัวเลขในวงเล็บแสดงจำนวนชิ้นตัวอย่างที่นำมาหาค่าเฉลี่ย)

วัสดุ	ค่าความแข็งแรงสูงสุด* (เมกะปาสคาล)	ค่าความแข็งแรงต่ำสุด* (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
Admira (Ad)	53	49	51.20 (10) ^{a, b}	2.65
CeramX (Cx)	52	50	51.20 (10) ^{a, b}	0.71
Supreme translucent (ST)	51	49	50.50 (11) ^b	1.23
Supreme standard (SS)	54	51	52.70 (10) ^a	1.50
Z250 (Z)	54	51	52.77 (11) ^a	1.25

*ค่าความแข็งแรงสูงสุดและต่ำสุดที่วัสดุไม่เกิดการแตกหักเมื่อให้แรงจำนวน 10⁴ รอบ

**อักษรตัวยกที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดทูที สำหรับความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าที่ความเชื่อถือ 95 % พบว่าความแข็งแรงดัดขวางภาวะความล้าของวัสดุ Admira, CeramX, Supreme standard และ Z250 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าเปรียบเทียบกับวัสดุ Supreme translucent จะพบว่าวัสดุ Supreme standard และ Z250 มีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้ามากกว่า Supreme translucent อย่างมีนัยสำคัญ

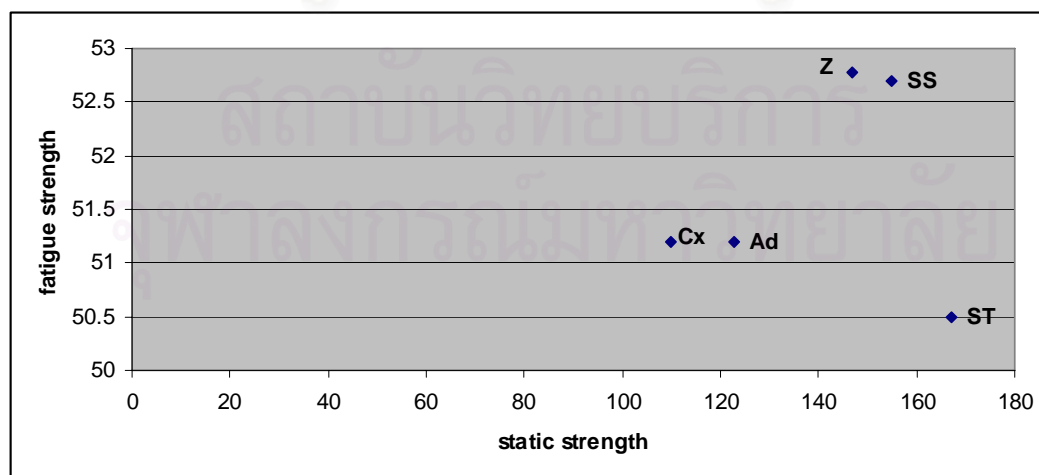
เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติก และค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของแต่ละวัสดุด้วยค่าสถิติที (one-sample t test) พบว่าทั้งสองค่ามีความแตกต่างกัน คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบ

สถิติมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 % สำหรับทุกวัสดุ (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิต และค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

วัสดุ	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิต (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า (เมกะปาสคาล)	ค่าพี (p-value)
Admira (Ad)	122.67 (10.18)	51.20 (2.65)	< 0.05
CeramX (Cx)	109.89 (5.35)	51.20 (0.71)	< 0.05
Supreme translucent (ST)	167.13 (9.50)	50.50 (1.23)	< 0.05
Supreme standard (SS)	154.78 (8.30)	52.70 (1.50)	< 0.05
Z250 (Z)	147.01 (11.35)	52.77 (1.25)	< 0.05

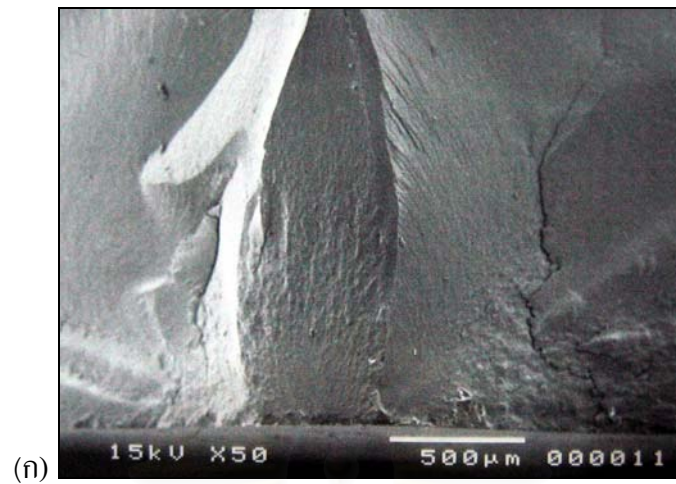
การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิต และความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน พบว่า ได้ค่า $r = 0.152$ ซึ่งเป็นค่าที่เข้าใกล้เลขศูนย์ แสดงว่าค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิต และความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าไม่มีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรง ดังภาพที่ 19



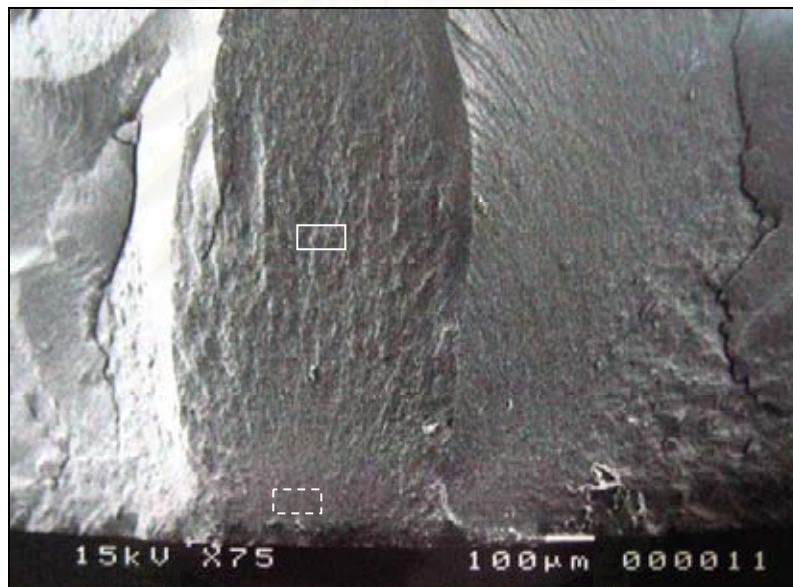
ภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิต และค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

ผลการตรวจดูลักษณะพื้นผิวแตกหักของชิ้นทดสอบจากการทดสอบความแข็งแรงตัดขวาง ชนิดไบแอคเซล และการทดสอบความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะรอยแตกหักจากการทดลองแบบสเตติก เปรียบเทียบกับ รอยแตกหักจากการทดลองล้ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในวัสดุชนิดเดียวกัน (ภาพที่ 20-29) แต่ใน รอยแตกหักจากการทดลองล้า จะพบส่วนของ mirror ได้มากกว่า ดังจะเห็นจากภาพขยาย 10,000 เท่าบริเวณใกล้กับจุดเริ่มต้นของการแตกหักในรอยแตกหักจากการทดลองล้า นั้น จะมีความเรียบ มากกว่าที่พบในรอยแตกหักจากการทดลองแบบสเตติก แสดงให้เห็นว่าการแตกหักในการทดลอง แบบสเตติกจะเกิดขึ้นเร็วกว่าการแตกหักจากการทดลองล้า และเมื่อเปรียบเทียบรอยแตกหักในวัสดุ ต่างชนิดกัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด ยกเว้นวัสดุ Supreme translucent ที่จะมี ลักษณะ river line pattern ในชิ้นทดสอบทั้งจากการทดสอบความแข็งแรงตัดขวางชนิดไบแอคเซล และจากการทดสอบความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้า (ภาพที่ 30) และนอกจากรูปแบบ ของการแตกหักแล้ว ภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถบอกรายละเอียด อื่น ๆ ของวัสดุได้อีก เช่น ลักษณะของฟิลเลอร์ ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุ Supreme standard และ Z250 มี ฟิลเลอร์รูปร่างกลมขนาดเล็ก-ใหญ่แตกต่างกัน วัสดุ Supreme translucent มีฟิลเลอร์รูปร่างกลม เช่นกัน แต่จะมีขนาดเล็กกว่ามาก ฟิลเลอร์ที่เรียงตัวแทรกกันอยู่ในวัสดุ Supreme translucent มี ขนาดใกล้เคียงกัน ส่วนฟิลเลอร์ของวัสดุ Admira และ CeramX นั้น จะมีทั้งที่เป็นรูปร่างไม่แน่นอน (irregular) และรูปร่างกลมเรียงตัวแทรกกันอยู่

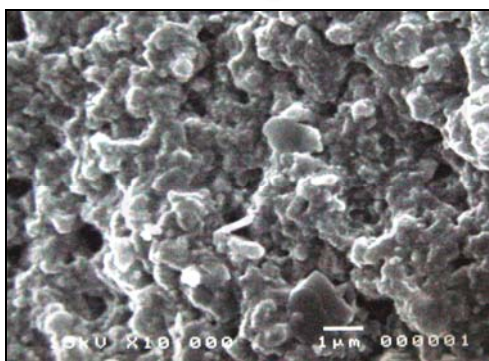
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



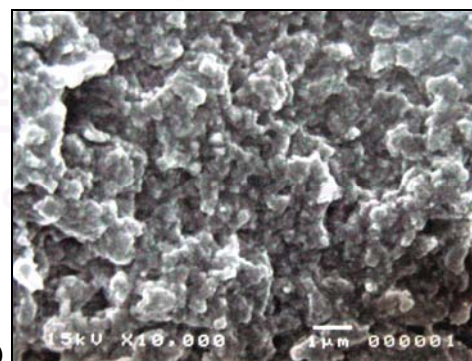
(ก)



(ข)



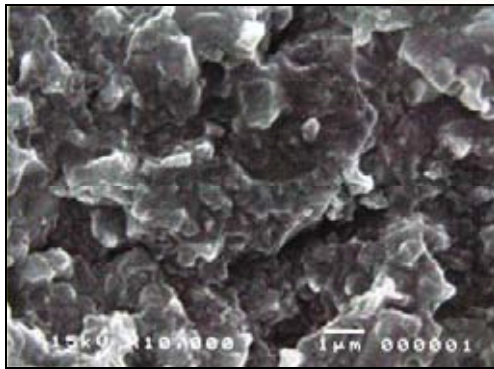
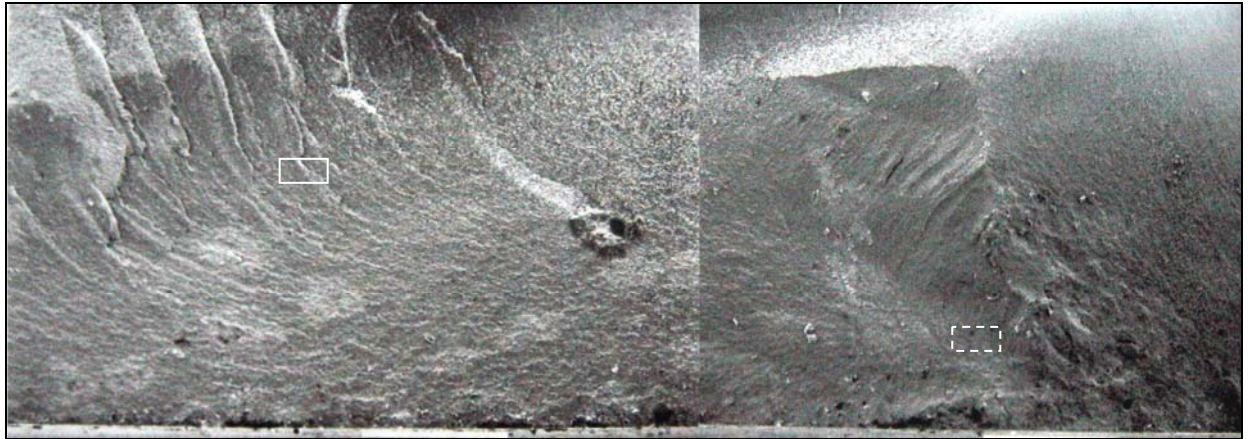
(ค)



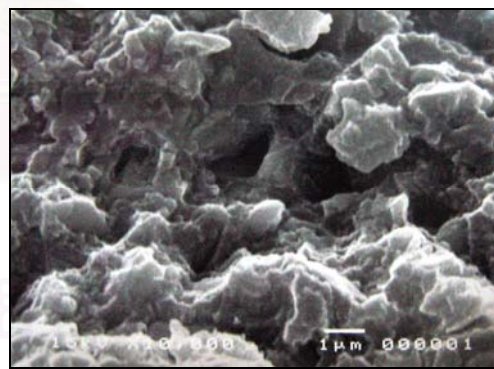
(ง)

ภาพที่ 20 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Admiral จากการทดลองแบบสถิติก (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror (---) ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle (□)

(ก)

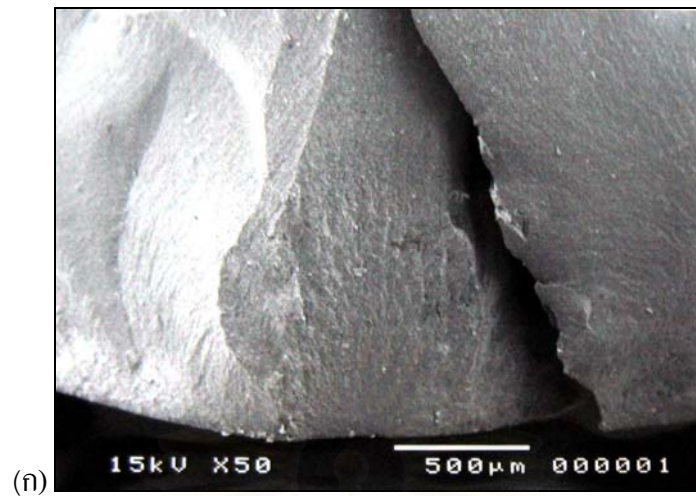


(ข)



(ค)

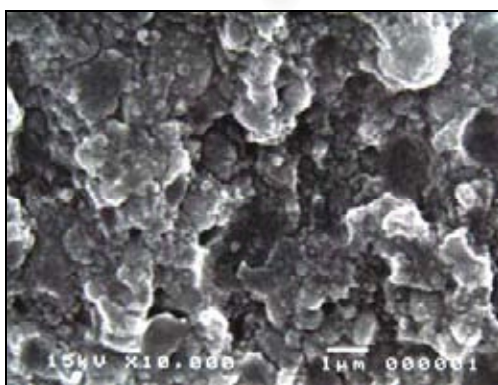
ภาพที่ 21 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ CeramX จากการทดลองแบบสถิต (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([- - -]) (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle (□)



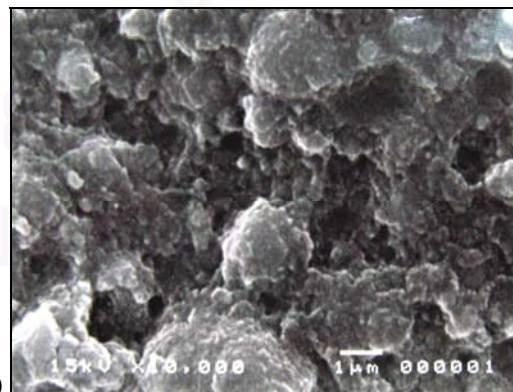
(ก)



(ข)

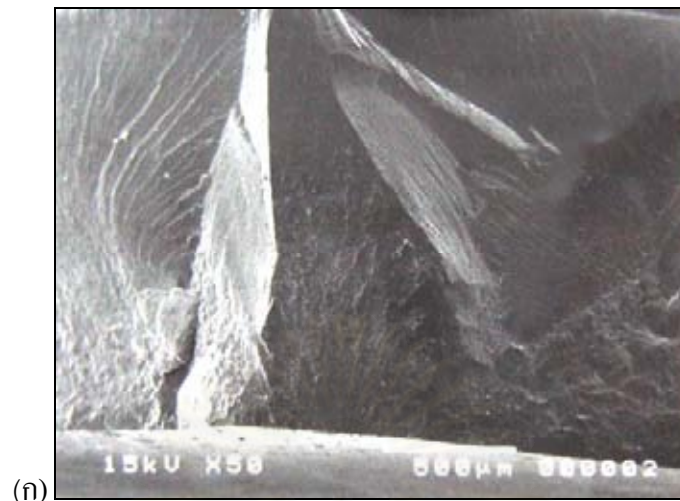


(ค)

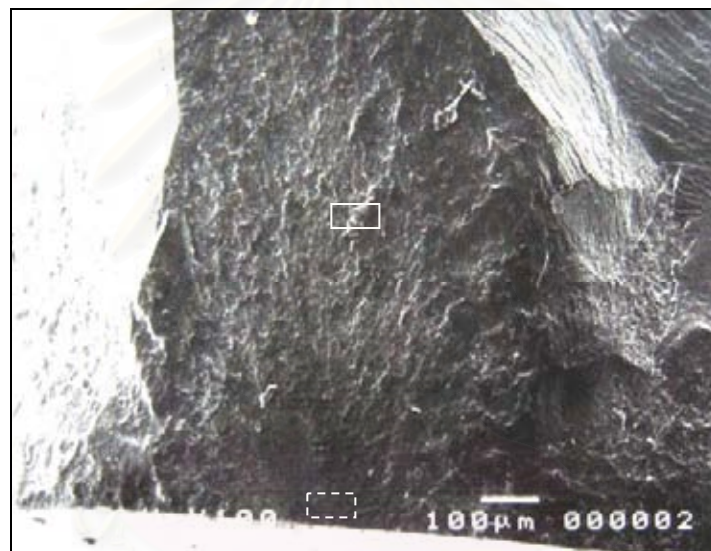


(ง)

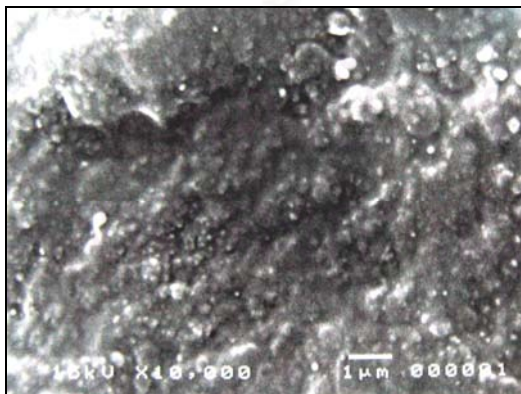
ภาพที่ 22 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Supreme standard จากการทดลองแบบสถิต (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่าบริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([- - -]) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle (□)



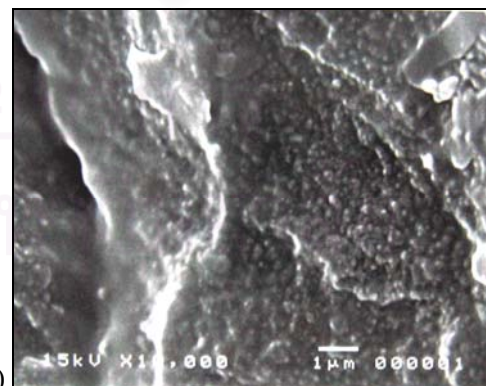
(ก)



(ข)

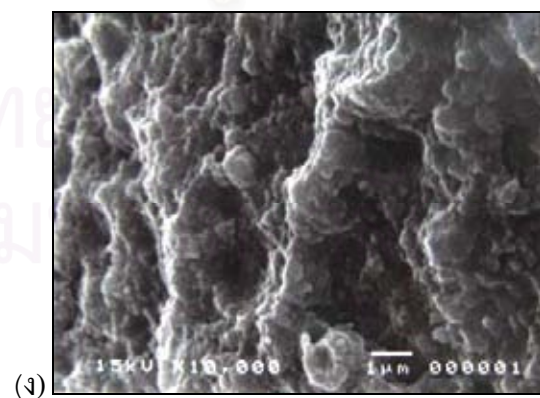
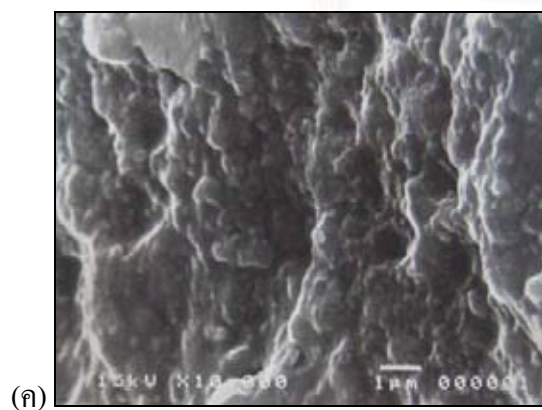
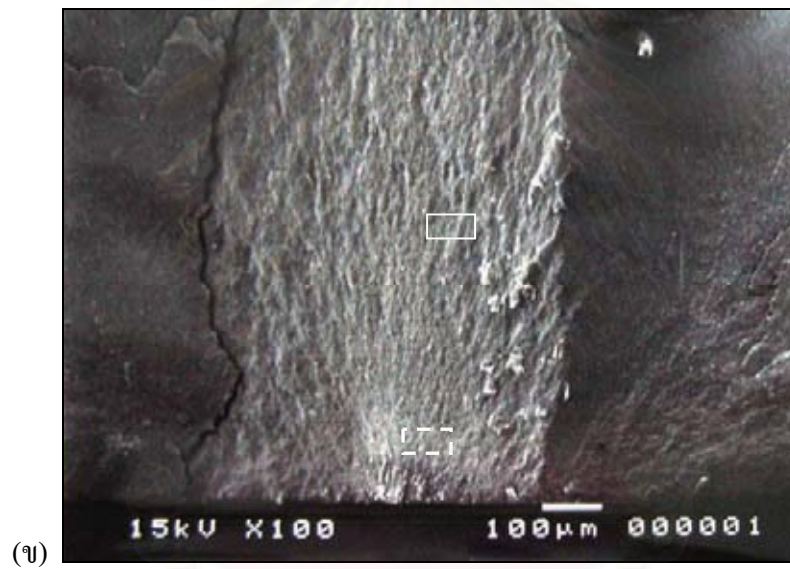
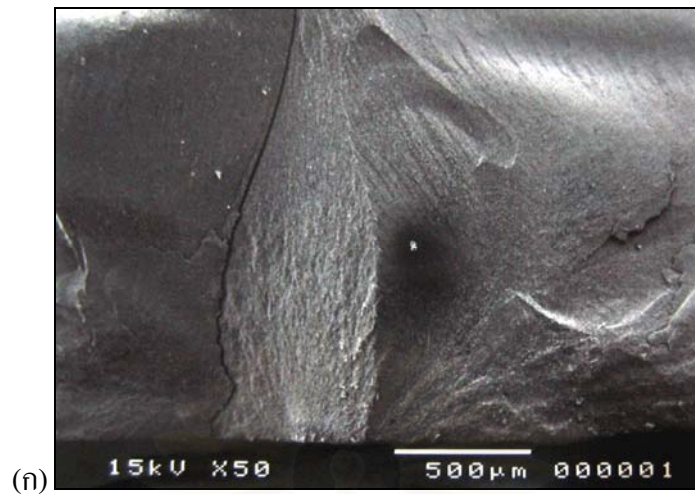


(ค)

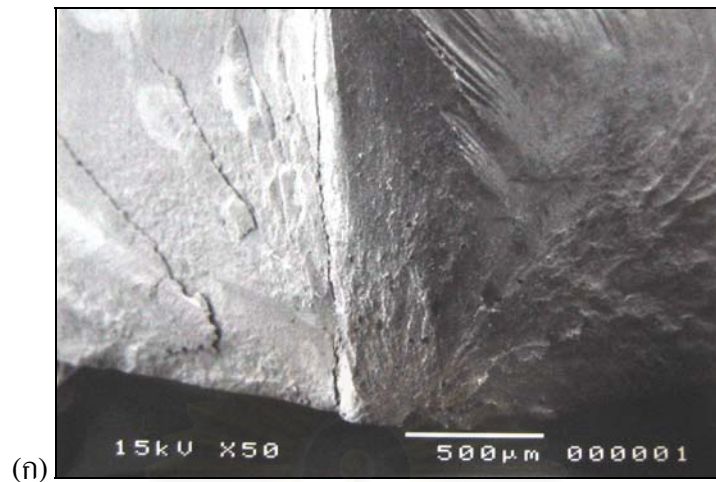


(ง)

ภาพที่ 23 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Supreme translucent จากการทดลองแบบสถิตย์ (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror (┌───┐) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle (□)



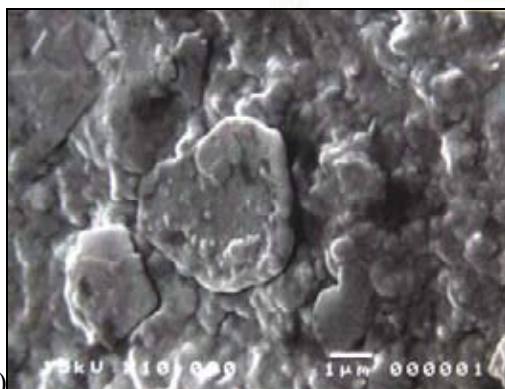
ภาพที่ 24 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Z250 จากการทดลองแบบสแตติก (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([---]) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle (□)



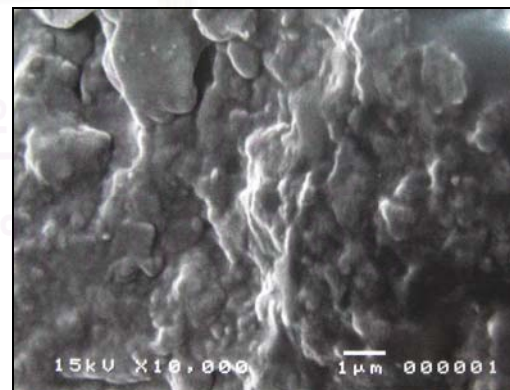
(ก)



(ข)

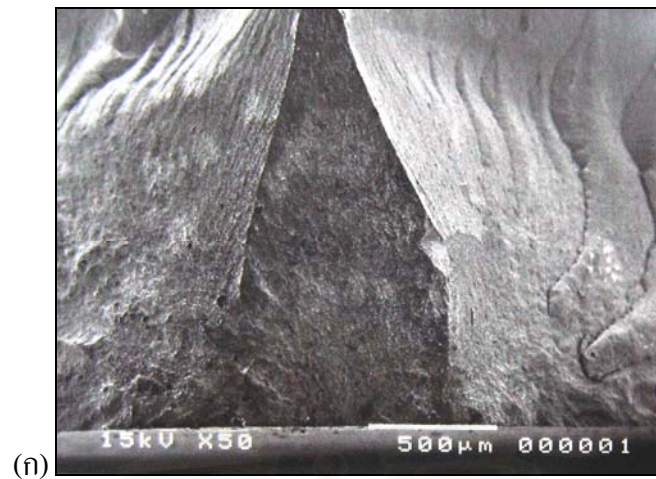


(ค)

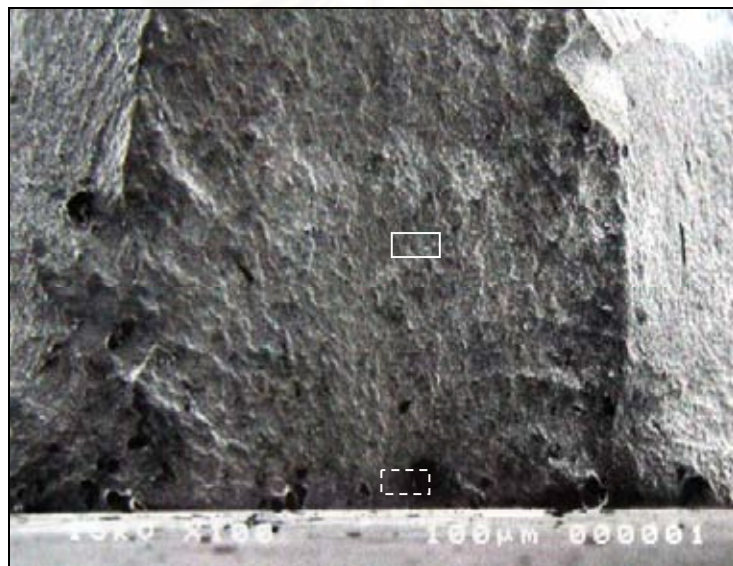


(ง)

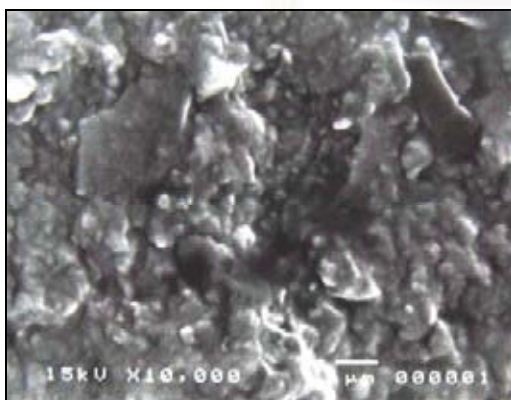
ภาพที่ 25 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Admiral จากการทดลองล้ม (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([---]) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle ([])



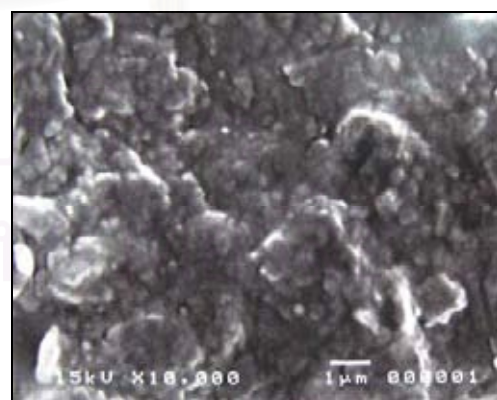
(ก)



(ข)

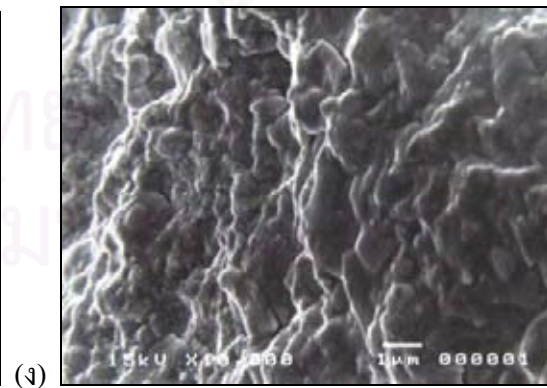
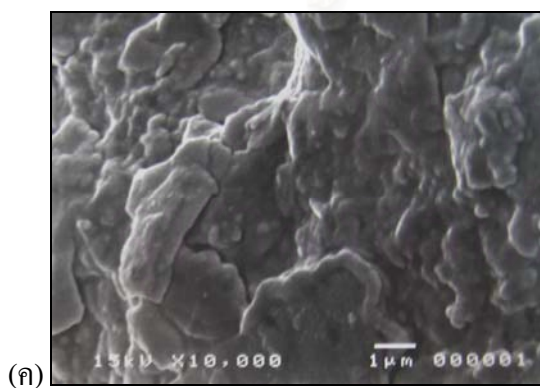
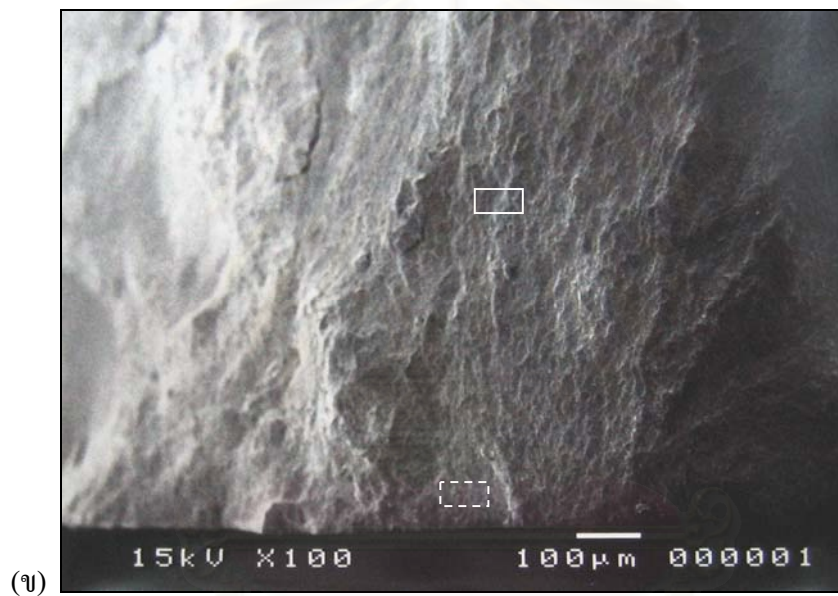
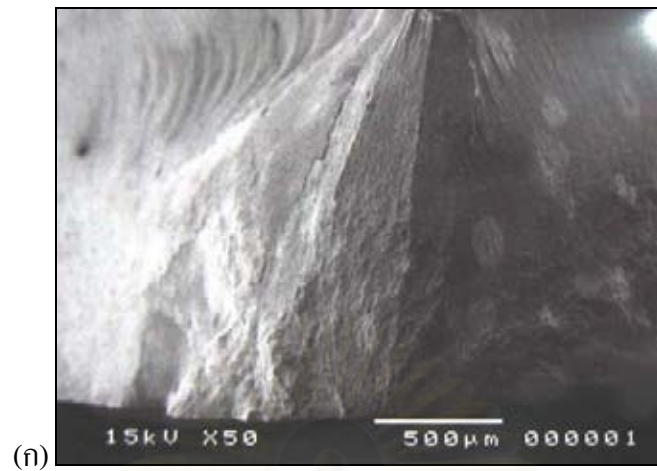


(ค)

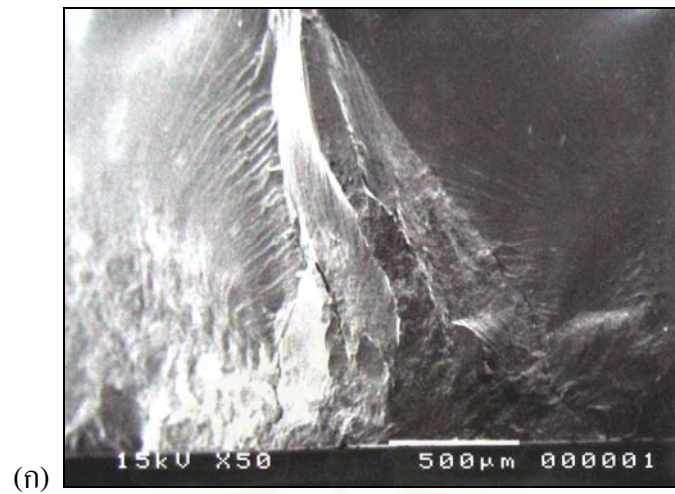


(ง)

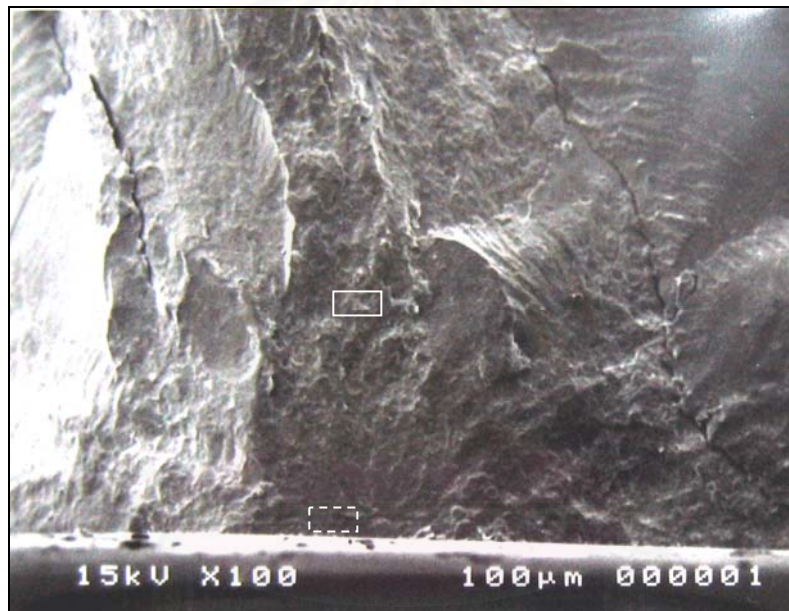
ภาพที่ 26 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ CeramX จากการทดลองล้ม (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror (□) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle (□)



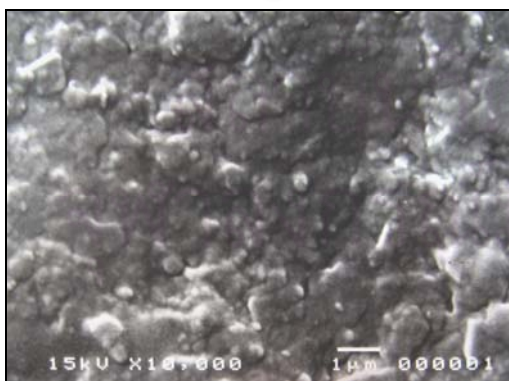
ภาพที่ 27 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Supreme standard จากการทดลองฉีก (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([---]) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle ([])



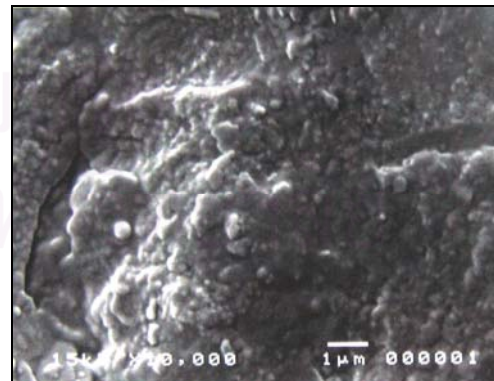
(ก)



(ข)

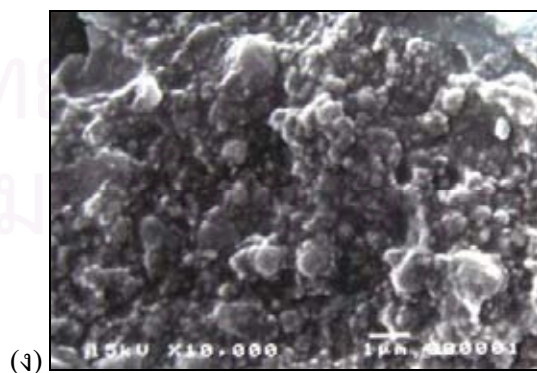
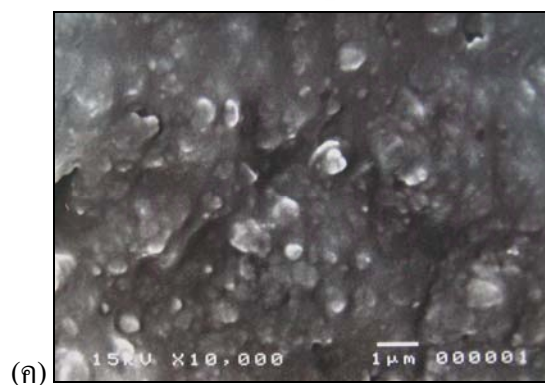
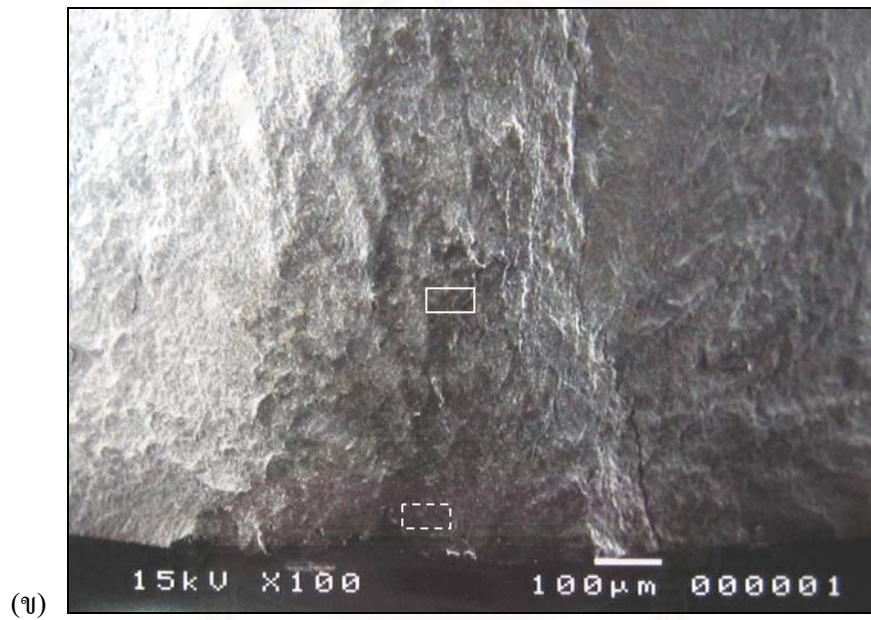


(ค)

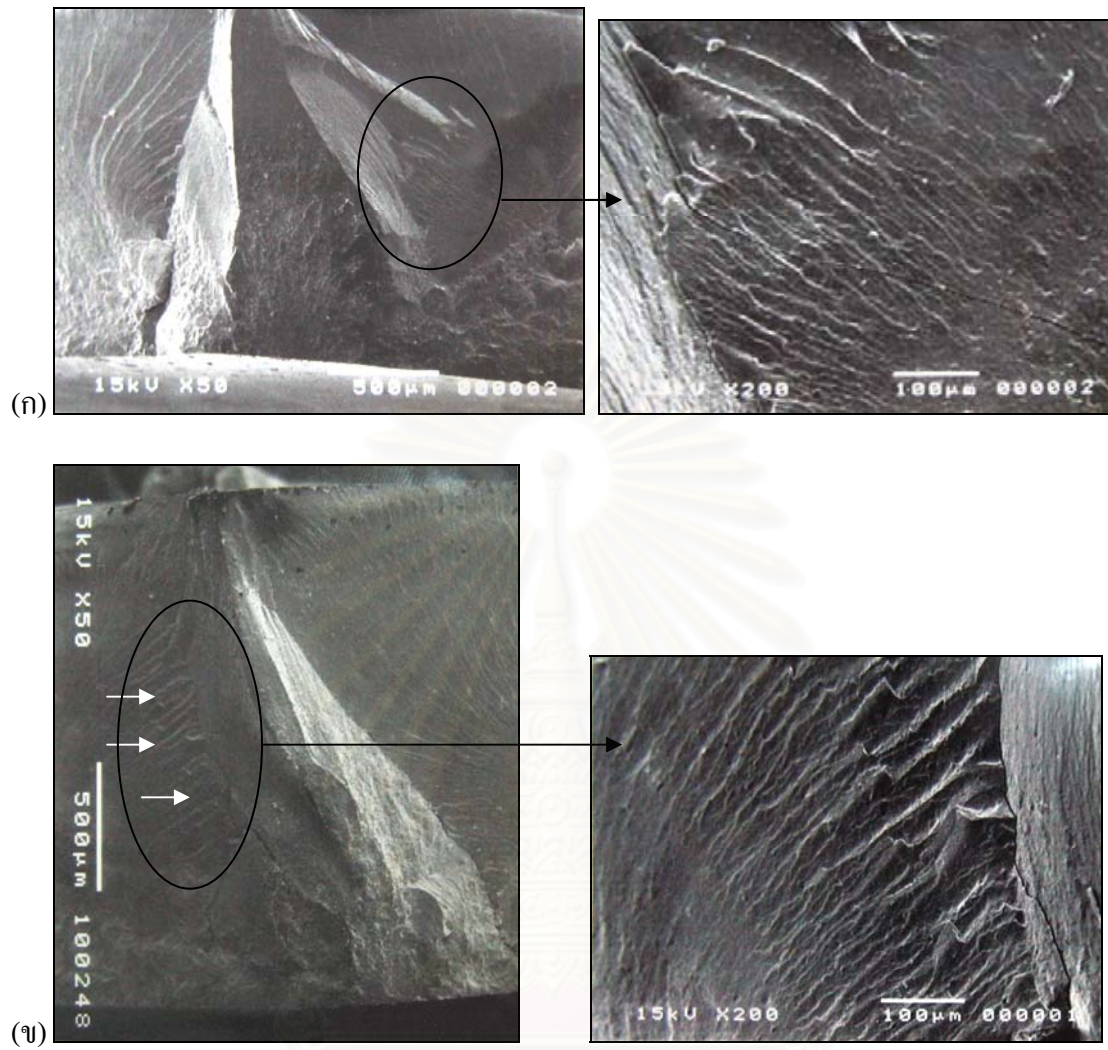


(ง)

ภาพที่ 28 แสดงภาพขยายจุดทรานส์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Supreme translucent จากการทดลองดี (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([]) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle ([])



ภาพที่ 29 แสดงภาพขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Z250 จากการทดลองด้า (ก) แสดงภาพขยาย 50 เท่าบนผิวพื้นผิวแตกหัก (ข) แสดงภาพขยาย 100 เท่า บริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (ค) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ mirror ([---]) (ง) แสดงภาพขยาย 10,000 เท่า บริเวณ hackle ([])



ภาพที่ 30 แสดงลักษณะ river line pattern บนผิวพื้นผิวแตกหักของวัสดุ Supreme translucent (ก) จากการทดลองแบบสแตติก (ข) ภาพจากการทดลองแบบล้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การอภิปรายผลการวิจัย

การหาค่าความแข็งแรงดัดขวางของวัสดุเรซินคอมโพสิต ส่วนใหญ่นิยมใช้การทดสอบชนิดยูนิแอกเซล เช่น การทดสอบทรีพอยท์เบนดิง และโฟพอยด์เบนดิง แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวยังมีข้อด้อย เนื่องจากรอยตำหนิตามขอบอาจจะมีผลทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักก่อนด้วยระดับของแรงที่น้อยกว่าควรจะเป็น นอกจากนั้นชิ้นทดสอบยังมีโอกาสที่จะเกิดรอยตำหนิในเนื้อวัสดุแม้ว่าจะมีการควบคุมในขั้นตอนการทำชิ้นทดสอบอย่างระมัดระวัง รอยตำหนิที่เกิดขึ้นจะมีขนาดและการเรียงตัวที่แตกต่างกันออกไป ในกรณีชิ้นงานได้รับแรงกระทำจากการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดยูนิแอกเซล ซึ่งมีการกระจายของแรงในแนวเดียว (uniaxial) รอยตำหนิที่มีการเรียงตัวที่แตกต่างกันดังกล่าว มีโอกาสเกิดเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักได้แตกต่างกัน เพราะรัศมี ความโค้งที่ส่วนปลายของรอยร้าวหรือรอยตำหนิมีความแตกต่างกัน (สูตรที่ 1) แต่ในการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบแอกเซลที่ใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากแรงกดที่ด้านบนของชิ้นทดลองจะทำให้เกิดความเค้นแรงดึงที่ผิวด้านล่างของชิ้นทดสอบได้ต่อจุดที่ให้แรงซึ่งเป็นบริเวณส่วนกลาง (central) ของชิ้นทดสอบ รอยตำหนิตามขอบของชิ้นทดสอบจึงไม่มีผลต่อผลการทดลองเหมือนกับที่เกิดขึ้นในการทดสอบชนิดยูนิแอกเซล นอกจากนี้การทดสอบชนิดไบแอกเซลมีการกระจายแรงสองแนวแกน (biaxial) รอยตำหนิในเนื้อวัสดุที่มีทิศทางการเรียงตัวที่แตกต่างกัน สามารถมีโอกาเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักได้ไม่แตกต่างกัน ซึ่งจะลดการกระจายของข้อมูลความแข็งแรง ทำให้การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบแอกเซลเป็นการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น (Palin และคณะ, 2003; Ban และ Anusavice, 1990) แต่การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบแอกเซลที่ใช้ก็ยังคงมีข้อด้อยบางประการ คือ ความเค้นแรงดึงสูงสุดจะเกิดที่บริเวณจุดศูนย์กลางผิวล่างของชิ้นทดสอบได้ต่อจุดที่กด ซึ่งในกรณีที่บริเวณนั้นมีฟองอากาศหรือรอยตำหนิอยู่ ก็อาจจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่ได้ และเพื่อลดความผิดพลาดในกรณีที่หวัคดแบบวงกลมผิวหน้าตัดเรียบอาจมีผิวที่ไม่ขนานกับผิวหน้าตัดของชิ้นทดสอบ ซึ่งจะทำให้หวัคดแต่ละไม่พร้อมกันทั้งหมดบนผิวของชิ้นทดสอบ หวัคดที่ใช้ในทดสอบความแข็งแรงดัดขวางชนิดไบแอกเซลในการทดสอบครั้งนี้จึงใช้หวัคดมีลักษณะเป็นลูกเหล็กทรงกลม (Ban และ Anusavice, 1992)

การศึกษาภาวะความล้าในทางห้องปฏิบัติการจะทำให้เราเข้าใจการเกิดความล้าในทางคลินิกได้ดีขึ้น (Braem และคณะ, 1994) วิถีสเตรสเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษาหาค่าความแข็งแรงภายใต้สภาวะความล้าของวัสดุ (Draughn, 1979; Bream และคณะ, 1995; Lohbauer และคณะ, 2003; Yoshida และคณะ, 2004) วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความตรงไปตรงมา เข้าใจได้ง่าย และมีความ

เฉพาะเจาะจงและใช้ขึ้นทดสอบจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอื่น (Draughn, 1979) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะบอกถึงแนวโน้มของความแข็งแรงของวัสดุเมื่อต้องรับแรงกระทำซ้ำ ๆ อย่างต่อเนื่อง และบอกถึงระดับความเค้นที่ 50% ของขึ้นทดลองจะเกิดการแตกหักภายใต้แรงในจำนวนรอบที่กำหนด เนื่องจากวัสดุเรซินคอมโพสิตที่มีปริมาณฟิลเลอร์สูงเป็นวัสดุที่มีขีดจำกัดความล้าค่อนข้างชัดเจน คือ เมื่อได้รับแรงที่ระดับสูงกว่าขีดจำกัดความล้า วัสดุจะเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การได้รับแรงระดับต่ำกว่าขีดจำกัดความล้า วัสดุจะสามารถทนได้โดยไม่เกิดการแตกหัก (McCabe และคณะ, 1990) มีการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุเรซินคอมโพสิตมีแนวโน้มที่จะแตกหัก 2 ช่วง คือ ในช่วงต้น ๆ ก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ และเมื่อให้แรงผ่านไปมากกว่า 100,000 รอบ (Huysmans และคณะ, 1992) ดังนั้นในการทดลองนี้ได้กำหนดให้แรงจำนวน 10,000 รอบ แม้ว่าจะเทียบเท่ากับอายุการใช้งานของวัสดุในช่องปากเพียง 12 วัน (Yoshida และคณะ, 2003)

วัสดุเรซินคอมโพสิตที่นำมาทดสอบ (ตารางที่ 5) เป็นวัสดุที่มีข้อบ่งชี้ได้ทั้งในพื้นหน้าและพื้นหลัง ในทุกวัสดุจึงมีปริมาณของฟิลเลอร์ค่อนข้างสูง (56-60 % โดยปริมาตร) แต่แตกต่างกันที่ลักษณะและขนาดของฟิลเลอร์รวมถึงองค์ประกอบในส่วนเรซินเมทริกซ์ ฟิลเลอร์ในวัสดุเรซินคอมโพสิตจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและมีความสวยงามมากขึ้น (Ferracane และคณะ, 1987; Van Dijken และคณะ, 1989) มีการศึกษาที่ยืนยันว่าการเพิ่มปริมาณของฟิลเลอร์ตั้ง 0 ถึง 52 % โดยปริมาตร จะทำให้วัสดุ เรซินคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของฟิลเลอร์ที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของฟิลเลอร์ที่มากกว่า > 60 % โดยปริมาตร กลับมีผลลดความแข็งแรงของวัสดุเรซินคอมโพสิต (Ikejima และคณะ, 2003) การเพิ่มปริมาณฟิลเลอร์ที่เป็นฟิลเลอร์ขนาดเล็กแทรกในวัสดุเรซินคอมโพสิตชนิดไฮบริด จะมีผลเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุเรซินคอมโพสิต โดยเฉพาะพวกที่มีฟิลเลอร์รูปร่างกลมจะมีค่าความแข็งแรงดัดขวางสูง เนื่องจากสามารถเติมฟิลเลอร์เข้าไปในวัสดุ เรซินคอมโพสิตได้ในปริมาณที่มากกว่าวัสดุที่มีฟิลเลอร์รูปร่างไม่แน่นอน (irregular) (Kim และคณะ, 2002)

ตารางที่ 5 แสดงวัสดุที่นำมาทดสอบ

วัสดุ	บริษัทผู้ผลิต	รูปแบบของวัสดุ	ปริมาณฟิลเลอร์ (vol%)
Admira	Voco (Germany)	ORMOCER	56
Ceram X mono	Dentsply (Germany)	Nano-ceramic	57
Filtek Supreme Standard	3M ESPE (USA)	Nanocluster	59
Filtek Supreme Translucent	3M ESPE (USA)	Nanomeric	57
Filtek Z250	3M ESPE (USA)	Hybrid	60

วัสดุ Supreme translucent, Supreme standard และ Z250 ของบริษัท 3M ESPE นั้น มีองค์ประกอบในส่วนเรซินเมทริกซ์เหมือนกัน คือ Bis-GMA ส่วนผสม (blend) ของ Bis-EMA(6) และ UDMA และ TEGDMA แต่ลักษณะและขนาดของฟิลเลอร์ของวัสดุ 3 ชนิดนี้แตกต่างกัน (ตารางที่ 1) วัสดุ Supreme translucent มีฟิลเลอร์ส่วนใหญ่เป็นนาโนเมอริก ซึ่งเป็นซิลิกาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 nm กระจายอยู่เดี่ยว ๆ แต่วัสดุ Supreme standard จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ของฟิลเลอร์เป็นนาโนคลัสเตอร์ ที่มีขนาดของฟิลเลอร์เริ่มต้นอยู่ในช่วง 2-20 nm มาเกาะกลุ่มกันไว้ก่อนกลมของ ฟิลเลอร์ขนาดแตกต่างกัน (0.6 -1.4 μm) ผสมกับนาโนเมอริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 nm ส่วนวัสดุ Z250 มีฟิลเลอร์เป็นเซอร์โคเนีย-ซิลิการูปร่างกลม ขนาด 0.01-3.5 μm . (Mitra และคณะ, 2003) ในการทดสอบครั้งนี้ วัสดุ Supreme translucent และ Supreme standard ที่มีฟิลเลอร์รูปร่างกลมขนาดเล็กระดับนาโนเมตร มีค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสูงลำดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การที่วัสดุ Supreme translucent มีฟิลเลอร์ขนาดเล็กประมาณ 75 นาโนเมตร เรียงตัวแบบกระจายไม่รวมกลุ่มหรือเกาะกลุ่มกันนั้น น่าจะมีส่วนทำให้วัสดุชนิดนี้มีค่าสตีเฟนสูง (ภาพที่ 18) เมื่อให้แรงค้อยกดแบบสเตติกจะต้องใช้พลังงานมากในการที่จะทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก (Craig และคณะ, 2002) แม้ว่าวัสดุ Supreme standard จะมีฟิลเลอร์ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร แต่ฟิลเลอร์ส่วนใหญ่จะเป็นนาโนคลัสเตอร์ซึ่งเป็นการเกาะกลุ่มกันของฟิลเลอร์เป็นก้อนกลมขนาดเล็ก-ใหญ่แตกต่างกันในช่วงกว้าง ทำให้ลักษณะของฟิลเลอร์ของวัสดุ Supreme standard มีความคล้ายคลึงกับฟิลเลอร์ของวัสดุ Z250 ซึ่งน่าจะเป็นเหตุผลที่วัสดุทั้งสองชนิดนี้ไม่มีค่าความแข็งแรงดัดขวางแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ข้อดีของการมีฟิลเลอร์ขนาดนาโนเมตรในวัสดุ Supreme standard ก็คือ มีความมันวาวที่คงทนกว่า (Mitra และคณะ, 2003) และมีความต้านทานต่อการสึกที่ดีกว่า (Yap และคณะ, 2004) วัสดุ Admira และ CeramX มี ORMOCER โมเลกุลที่เป็นพวกซิล็อกเซน (siloxane) รูปร่างไม่แน่นอนแทนที่บางส่วนของเรซินเมทริกซ์ ส่วนฟิลเลอร์มีทั้งที่เป็นรูปร่างกลมและไม่แน่นอน การมี ORMOCER ทำให้ปริมาณเรซินเมทริกซ์ซึ่งเป็นจุดต่อของวัสดุเรซินคอมโพสิตทั้งในเรื่องของความแข็งแรงและการดูดน้ำเข้าตัว (Albers, 2002) ลดลง วัสดุพวก ORMOCER จะมีการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาบ่มตัวลดลง และมีความต้านทานต่อการสึกสูงขึ้น (Yap, และคณะ 2004; Taglekin และคณะ 2004) แต่จากการทดลองในครั้งนี้พบว่าวัสดุพวก ORMOCER ไม่ได้มีค่าความแข็งแรงดัดขวางเมื่อรับแรงแบบสเตติกสูงกว่าวัสดุเรซินคอมโพสิตพวกที่มีองค์ประกอบหลักเป็น Bis-GMA

ความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุ Admira, CeramX, Supreme standard และ Z250 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่วัสดุ Supreme standard และ Z250 มีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าสูงกว่า Supreme translucent อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนหนึ่งน่าจะ

เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุ Supreme translucent ที่มีค่าสตีเฟนส์และค่าความแข็งแรงยืดสูง ร่วมกับมีความเปราะมากกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่นำมาทดสอบ ดังจะเห็นได้จาก river line pattern (ภาพที่ 30) (Hull, 1999; Kim และคณะ, 1994; Wulpi, 1985) ที่พบบนพื้นผิวแตกหักของวัสดุชนิดนี้ โดยที่ไม่พบในวัสดุชนิดอื่นเลย ลักษณะนี้ของวัสดุ Supreme translucent บ่งบอกว่าวัสดุชนิดนี้มีค่าอิลาสติกมอดูลัสที่ค่อนข้างสูง ซึ่งวัสดุเรซินคอมโพสิตที่มีค่าอิลาสติกมอดูลัสสูงมักจะไม่นทนทานต่อแรงกระทำซ้ำ ๆ (Bream และคณะ, 1994) เพราะเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ แม้ว่าจะให้แรงในระดับที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ ก็สามารถทำให้วัสดุเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วได้ เหตุผลนี้น่าจะมีส่วนทำให้วัสดุ Supreme translucent มีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น วัสดุ Z250 และ Supreme standard มีปริมาณฟิลเลอร์สูงกว่าวัสดุชนิดอื่น โดยเป็นฟิลเลอร์รูปร่างกลมขนาดใหญ่-เล็กแทรกกันอยู่ ทำให้วัสดุมีความทนทานต่อการแตกหักได้ดี (Ikejima และคณะ, 2003; Kim และคณะ, 2002) ดังจะเห็นได้จากการที่วัสดุทั้งสองชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิติก และความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าอยู่ในอันดับต้น ๆ ส่วนวัสดุ Admira และ CeramX ที่มีโมเลกุล ORMOCER แทนที่องค์ประกอบของเรซินคอมโพสิตนั้น ไม่ได้มีผลเพิ่มความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิติกของวัสดุให้สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นที่นำมาทดสอบ แต่ในกรณีที่รองรับแรงกระทำซ้ำที่ระดับต่ำนั้น วัสดุสองชนิดนี้ให้ค่าความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างกันไป จากวัสดุ Z250 และ Supreme standard แสดงว่าภายใต้การทดสอบนี้วัสดุพวก ORMOCER มีความสามารถในการให้การรองรับแรงแบบกระทำซ้ำ ๆ ได้ดีกว่าแรงแบบสถิติก

จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิติกไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความแข็งแรงดัดขวางที่ทดสอบภายใต้ภาวะความล้า วัสดุที่มีความแข็งแรงดัดขวางแบบสถิติกสูงไม่จำเป็นต้องให้ค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าที่สูงด้วย เนื่องจากรูปแบบของแรงที่ทำให้มีความแตกต่างกัน วัสดุเรซินคอมโพสิตจึงมีการตอบสนองต่อแรงกระทำสองรูปแบบนี้แตกต่างกัน แต่การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเรซินคอมโพสิตส่วนใหญ่มักจะเป็นการให้แรงคงที่สถิติกแก่วัสดุจนเกิดการแตกหักภายในการกดครั้งเดียว ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการให้แรงกระทำซ้ำ ๆ หลาย ๆ ครั้งติดต่อกันบนวัสดุ ซึ่งเป็นรูปแบบของแรงที่มีความใกล้เคียงกับแรงที่เกิดกับวัสดุในช่องปากมากกว่าแรงแบบสถิติกนั้น จะได้ค่าความแข็งแรงที่มีความแตกต่างออกไป เพราะเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ อยู่ช่วงเวลาหนึ่งจะเกิด ความล้าในเนื้อวัสดุทำให้วัสดุสามารถรองรับแรงได้ในระดับที่ต่ำลง ดังนั้นข้อมูลความแข็งแรงแบบสถิติกสามารถบอกคุณสมบัติของวัสดุเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น แต่เพื่อให้เห็นการตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุในช่องปากได้ชัดเจนมากขึ้น เราควรให้ความสำคัญแก่ข้อมูลความแข็งแรงภายใต้ภาวะความล้าของวัสดุมากกว่าและสามารถใช้เป็นข้อมูลที่ดีในการเลือกวัสดุในทางคลินิกได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ภายใต้สภาวะของการทดสอบในครั้งนี้พบว่า

1. วัสดุ Filtek Supreme translucent มีค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสูงที่สุด วัสดุ Filtek Supreme standard, Z250 และ Admira มีค่าสูงรองลงมาตามลำดับและวัสดุ CeramX มีค่าต่ำสุด

2. ค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าโดยการให้แรงจำนวน 10,000 รอบที่ได้จากทดสอบด้วยวิธีสเตรเคส พบว่าวัสดุ Z250 มีค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่ไม่สูงกว่าวัสดุ Filtek Supreme Standard, Admira และ CeramX อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเทียบกับวัสดุ Filtek Supreme translucent ที่มีค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสูงที่สุด พบว่าวัสดุ Z250 และ Filtek Supreme standard มีค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้ามากกว่าวัสดุ Filtek Supreme translucent อย่างมีนัยสำคัญ และความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า มีช่วงระยะห่างที่น้อยกว่าค่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติก

3. ความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้ามีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกสำหรับทุกวัสดุ

4. ความแข็งแรงดัดขวางแบบสเตติกของทุกวัสดุไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบความแข็งแรงค้ำขวางภายใต้ภาวะความล้าของการวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้วิธี สแตร์เคสในการหาระดับของความเค้นที่วัสดุจะทนอยู่ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งก็คือค่าขีดจำกัด ความล้าของจำนวนรอบของแรงที่ให้หรือระดับความเค้นที่กำหนด แต่จะไม่เห็นถึงความสัมพันธ์ ระหว่างระดับของแรงที่ให้ และอายุการใช้งานของวัสดุภายใต้ความล้า ซึ่งถ้าต้องการทราบ ความสัมพันธ์นี้ จะต้องทำการทดสอบแบบ continuous test คือ ทำการทดลองโดยลดระดับความ เค้นที่ให้ลดเรื่อย ๆ และในแต่ละระดับของแรงที่ให้นั้นจะนับจำนวนรอบของแรงที่ทำให้วัสดุ สามารถทนได้ก่อนเกิดการแตกหัก ได้ผลการทดลองเป็นเส้นโค้งเอสเอ็น ที่เห็นความสัมพันธ์ ระหว่างระดับของแรงที่ให้และอายุการใช้งานของวัสดุภายใต้ความล้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Albers HF (2002). Tooth-colored restoratives; Principles and techniques. 9th ed, Hamilton, London: BC Decker.pp.81-90.
- Ashby MF & Jones DR (1980). Engineering materials: An introduction to their properties and applications. 1st ed, New York: Pergamon Press.pp.129-134.
- Asmussen E & Peutzfeldt A (1998). Influence of UEDMA, Bis-GMA and TEGDMA on selected mechanical properties of experimental resin composites. Dent Mater 14:51-56.
- Baharav H, Brosh T, Pilo R, Cardash H (1997). Effect of irradiation time on tensile properties of stiffness and strength of composites. J Prosthet Dent 77:471-474.
- Ban S, Hasegawa J, Anusavice KJ (1992). Effect of loading conditions on bi-axial flexural strength of dental cements. Dent Mater 8:100-104.
- Ban S & Anusavice KJ (1990). Influence of test method on failure stress of brittle dental materials. J Dent Res 69:1791-1799.
- Baran G, Boberick K, McCool J (2001). Fatigue of restorative materials. Crit Rev Oral Biol Med 12:350-360
- Baran G, McCool J, Boberick K, Zhang H (1999). Size effect in resin/glass composite flexural strengths. J Oral Rehabil 26:775-780.
- Bowen RL (1963). Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. J Am Dent Assoc 66:57-64.
- Braem M, Lambrechts P, Vanherle G (1994). Clinical relevance of laboratory fatigue study. J Dent 22:97-102.
- Brosh T, Gaynor Y, Belov I, Pilo R (1999). Analysis of strength properties of light-cured resin composites. Dent Mater 15:174-9.
- Callister WD (2000). Materials science & engineering: An introduction, 5th ed, New York: John Wiley & Sons.pp.209-216.
- Craig RG & Power JM (2002). Restorative dental materials, 11th ed, St. Louis, Missouri: Mosby.pp.90-91.
- Craig RG (1993). Restorative dental materials. 9th ed, St. Louis, Missouri: Mosby.pp.83-85.
- Darvell BW (1990). Uni-axial compression tests and the validity of indirect tensile strength. J Mater Sci 25:757-80.

- Draughn RA (1979). Compressive fatigue limits of composite restorative materials. J Dent Res 58:1093-1096.
- Ferracane JL (1995). Current trends in dental composites. Crit Rev Oral Biol Med 6:302-318.
- Ferracane JL, Antonio RC, Matsumoto H (1987). Variables affecting the fracture toughness of dental composite. J Dent Res 66:1140-1145.
- Ferracane JL, Berge HX, Condon JR (1998). In vitro aging of dental composite in water-effect of degree of conversion, filler volume, and filler/matrix coupling. J Biomed Mater Res 42:465-472
- Hull D (1999). Fractography: observing, measuring & interpreting fracture surface topography. 1st ed, UK: The press syndicate of the university of Cambridge.pp.91-94.
- Huysmans MCDNJM, Van der Varst PGT, Lautenschlager EP, Monaghan P (1996). The influence of simulated clinical handling on the flexural and compressive strength of posterior composite restorative materials. Dent Mater 12:116-120.
- Huysmans MCDNJM, Van der Varst PGT, Schafer R, Peters MCRB, Plasschaert AJM, Soltesz U (1992). Fatigue behavior of direct post-and-core-restored premolars. J Dent Res 71:1145-1150.
- Ikejima I, Nomoto R, McCabe JF (2003). Shear punch strength and flexural strength of model composites with varying filler volume fraction, particle size and silanation. Dent Mater 19:206-211.
- International Standards Organization (1992). Dentistry-Resin-based filling materials; ISO 4049:1988/Cor.1: 1992, Geneva: International Standards Organization.pp.6-8.
- Jandt KD, Mills RW, Blackwell GB, Ashworth SH (2000). Depth of cure and compressive strength of dental composites cured with blue light emitting diodes (LEDs). Dent Mater 16:41-47.
- Kelsey WP, Latta MA, Shaddy RS, Stansilav CM (2000). Physical properties of three packable resin-composite restorative materials. Oper Dent 25:331-335.
- Kim KH, Ong JL, Okuno O (2002). The effect of filler loading and morphology on the mechanical properties of contemporary composites. J Prosthet Dent 87:642-649.
- Kim KH, Park JH, Imai Y, Kishi T (1994). Microfracture mechanisms of dental resin composites containing spherically-shaped filler particles. J Dent Res 73:499-504.

- Lohbauer U, Von der Horst T, Frankenberger R, Kramer N, Petschelt (2003). Flexural fatigue behavior of resin composite dental restoratives. Dent Mater 19:435-440.
- Lutz F, Phillips RW (1983). A classification and evaluation of composite resin systems. J Prosthet Dent 50:480-488.
- Manhart J, Kunzelmann KH, Chen HY, Hickel R (2000). Mechanical properties of new composite restorative materials. J Biomed Mater Res 53:353-361.
- MaCabe JF, Carrick TE, Chadwick RG, Walls AWG (1990). Alternative approaches to evaluating the fatigue characteristics of materials. Dent Mater 6:24-28.
- Mitra SB, WU D, Holmes BN (2003). An application of nanotechnology in advanced dental materials. J Am Dent Assoc 134:1382-1390.
- Nakajima H, Watkins JH, Arita K, Hanaoka K, Okabe T (1996). Mechanical properties of glass ionomers under static and dynamic loading. Dent Mater 12:30-37.
- Palin WM, Fleming GJP, Burke FJT, Marquis PM, Randall RC (2003). The reliability in flexural strength testing of a novel dental composite. J Dent 31:549-557.
- Peutzfeldt A, Sahafi A, Asmussen E (2000). Characterization of resin composite polymerized with plasma arc curing units. Dent Mater 16:330-336
- Reid CN, Fisher J, Jacobsen PH (1990). Fatigue and wear of dental materials. J Dent 18:209-215.
- Rueggeberg FA, Caughman WF, Curtis JW, Davis HC (1994). A predictive model for the polymerization of photo-activated resin composites. Int J Prosthodont 7:159-166.
- Scherrer SS, Wiskott AHW, Hunziker VC, Belser UC (2003). Monotonic flexural and fatigue strength of composites for provisional and definitive restorations. J Prosthet Dent 39:579-588.
- Tagtekin DA, Yanikoglu FC, Bozkurt FO, Kologlu B, Sur H (2004). Selected characteristics of Ormocer and a conventional hybrid resin composite. Dent Mater 20:487-497.
- Taylor JR (1997). An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements. 1st ed, Sausalito, CA: University scientific books.
- Van Dijken JWV, Wing KR, Ruyter IE (1989). An evaluation of the radiopacity of composite restorative materials used in class I and class II cavities. Acta Odontol Scand 47:401-407.
- Voco. Scientific product information, home page:1999.
- Williams JA, Billington RW, Pearson GJ (2002). The effect of the disc support system on bi-axial tensile strength of a glass ionomer cement. Dent Mater 18:376-379.

- Williams G, Lambrecht P, Bream M, Celis JP, Vanherle G (1992). A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics. Dent Mater 8:310-319.
- Wiskott HW, Nicholls J, Belser U (1995). Stress fatigue: basic principle and prosthodontic implications. Int J Prosthet 8:105-116.
- Wulpi DJ (1985). Understanding how components fail. Ohio: The American society for metals. pp90-95.
- Yap AUJ, Tan CH, Chung SM (2004). Wear behavior of new composite restoration. Oper Dent 29-3:269-274.
- Yap AUJ, Teoh SH (2003). Comparison of flexural properties of composite restoratives using the ISO and mini-flexural tests. J Oral Rehabil 30:171-177.
- Yoshida K, Condon JR, Atsuta M, Ferracane JL (2003). Flexural fatigue strength of CAD/CAM composite material and dual-cured resin luting cements. Am J Dent 16:177-180.
- Yoshida K, Motimoto N, Tsuo Y, Atsuta (2004). Flexural fatigue behavior of machinable and light-activated hybrid composites for esthetic restorations. J Biomed Mater Res Part B:Appl Biomater 70B:218-222.
- Zhao D, Botsis J, Drummond JL (1997). Fracture studies of selected dental restorative composites. Dent Mater 13:198-207.
- Zidan O, Asmussen E, Jørgensen KD (1980). Tensile strength of restorative resins. Scand J Dent Res 88:285-289.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล (นิวตัน และเมกะปาสกาล) ความหนาของชิ้นทดสอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ Admira

ชิ้นตัวอย่างที่	ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm.)	ค่าความแข็งแรงตัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบเอกเซล (N)	ค่าความแข็งแรงตัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบเอกเซล (MPa)
1	2.04	401.14	137.10
2	2.19	444.81	129.69
3	2.11	385.59	121.25
4	2.13	404.29	125.02
5	2.11	336.39	106.12
6	2.05	371.24	124.98
7	2.10	420.35	134.58
8	2.14	364.93	111.68
9	2.20	379.86	109.30
10	2.21	409.09	116.52
11	2.25	482.81	132.77
12	2.13	395.01	122.41
13	2.15	432.08	131.55
14	2.16	431.63	128.85
15	2.18	367.46	108.24

ข้อมูลค้ำค่าความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอคเซล (นิวตัน และเมกะปาสคาล) ความหนาของชั้นทดสอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ Ceram X

ชั้นตัวอย่างที่	ความหนาของชั้นทดสอบ (mm.)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอคเซล (N)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอคเซล (MPa)
1	2.00	287.49	101.87
2	1.98	300.12	109.08
3	1.91	281.84	110.86
4	2.02	325.80	113.31
5	1.97	305.99	112.97
6	2.03	309.54	106.72
7	2.02	323.33	112.97
8	2.02	328.75	114.84
9	1.88	292.44	119.08
10	2.04	348.91	118.48
11	2.03	305.07	104.95
12	2.05	311.33	105.26
13	1.94	273.64	104.02
14	1.95	291.58	109.60
15	1.93	271.39	104.34

ข้อมูลค้ำค่าความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอคเซล (นิวตัน และเมกะปาสคาล) ความหนาของชั้นทดสอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ Supreme translucent

ชั้นตัวอย่างที่	ความหนาของชั้นทดสอบ (mm.)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอคเซล (N)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอคเซล (MPa)
1	2.00	482.06	172.13
2	2.10	533.01	169.75
3	1.99	461.79	165.44
4	2.07	459.55	151.42
5	1.99	454.03	163.57
6	2.05	515.95	174.07
7	2.01	458.10	161.96
8	2.03	518.39	178.72
9	2.11	582.10	183.44
10	2.03	437.96	150.50
11	2.11	500.13	158.77
12	2.00	490.21	174.47
13	2.07	482.42	159.63
14	1.99	475.21	171.77
15	1.97	468.27	171.34

ข้อมูลค้ำค่าความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอกเซล (นิวตัน และเมกะปาสกาล) ความหนาของชั้นทดสอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ Supreme standard

ชั้นตัวอย่างที่	ความหนาของชั้นทดสอบ (mm.)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอกเซล (N)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอกเซล (MPa)
1	1.93	401.54	154.38
2	2.06	453.64	151.08
3	1.93	425.93	164.50
4	2.06	404.65	134.76
5	1.93	413.74	159.07
6	2.07	456.12	150.29
7	1.92	391.90	152.40
8	1.98	439.48	159.74
9	2.05	502.44	169.14
10	1.95	411.85	154.80
11	2.04	459.18	156.26
12	1.96	384.41	142.87
13	2.02	446.75	155.38
14	1.95	427.36	160.63
15	2.12	500.68	156.46

ข้อมูลค้ำค่าความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอกเซล (นิวตัน และเมกะปาสกาล) ความหนาของชั้นทดสอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ Z250

ชั้นตัวอย่างที่	ความหนาของชั้นทดสอบ (mm.)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอกเซล (N)	ค่าความแข็งแรงดัดขวาง เริ่มต้นชนิดไบแอกเซล (MPa)
1	1.85	373.39	157.48
2	1.95	417.41	156.89
3	1.86	373.15	155.54
4	1.97	367.37	135.02
5	1.85	324.71	136.95
6	1.93	452.59	174.01
7	1.93	366.43	141.20
8	1.96	364.77	135.57
9	1.88	347.45	141.48
10	1.81	321.80	142.16
11	1.87	326.42	134.48
12	1.95	409.74	154.01
13	1.89	385.56	155.19
14	1.93	364.31	139.43
15	1.97	394.86	145.78

แสดงการบันทึกข้อมูลดิบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรส
ผลติภรณ์ Admiral

ในกลุ่ม

No.	Thickness	Load (N)		Stress (MPa)		Maximum stress (MPa)	Note
	(mm.)	Mean	Amplitude	Mean	Amplitude		
1	2.120	137.5	25.5	43.0	8.0	51.0	F
2	2.083	132.5	21.0	43.0	7.0	50.0	NF
3	2.040	126.5	23.5	43.0	8.0	51.0	NF
4	2.096	134.0	28.5	43.0	9.0	52.0	NF
5	2.023	123.5	29.5	43.0	10.0	53.0	F
6	2.063	129.5	27.5	43.0	9.0	52.0	F
7	2.140	140.5	26.0	43.0	8.0	51.0	F
8	2.079	132.0	21.5	43.0	7.0	50.0	F
9	2.062	129.5	18.0	43.0	6.0	49.0	NF
10	2.108	136.0	22.0	43.0	7.0	50.0	F
11	2.085	132.5	18.5	43.0	6.0	49.0	NF
12	2.055	128.5	21.0	43.0	7.0	50.0	NF
13	1.994	120.0	22.5	43.0	8.0	51.0	NF
14	2.026	124.5	26.0	43.0	9.0	52.0	NF
15	1.990	119.5	28.0	43.0	10.0	53.0	NF
16	2.120	137.5	35.5	43.0	11.0	54.0	F
17	2.105	135.5	31.5	43.0	10.0	53.0	F
18	2.009	122.0	25.5	43.0	9.0	52.0	F
19	2.058	129.0	24.0	43.0	8.0	51.0	F
20	2.084	132.5	21.5	43.0	7.0	50.0	NF

*F = วัสดุเกิดการแตกหักก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ

*NF = วัสดุไม่เกิดการแตกหักภายหลังให้แรงครบ 10,000 รอบ

แสดงการบันทึกข้อมูลดิบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรสเฟส ในกลุ่ม
ผลิตภัณฑ์ Ceram X

No.	Thickness	Load (N)		Stress (MPa)		Maximum stress (MPa)	Note
	(mm.)	Mean	Amplitude	Mean	Amplitude		
1	1.937	112.5	18.5	43.0	7.0	50.0	NF
2	2.070	130.5	21.0	43.0	8.0	51.0	NF
3	2.085	132.5	28.0	43.0	9.0	52.0	F
4	1.942	113.5	21.0	43.0	8.0	51.0	F
5	1.996	120.5	19.5	43.0	7.0	50.0	NF
6	2.006	122.0	22.5	43.0	8.0	51.0	NF
7	2.036	126.0	26.0	43.0	9.0	52.0	NF
8	2.012	122.5	28.5	43.0	10.0	53.0	F
9	1.990	119.5	25.0	43.0	9.0	52.0	F
10	2.032	125.5	23.0	43.0	8.0	51.0	F
11	1.991	120.0	19.5	43.0	7.0	50.0	NF
12	2.056	128.5	24.0	43.0	8.0	51.0	F
13	1.980	118.5	19.0	43.0	7.0	50.0	NF
14	1.967	116.5	22.0	43.0	8.0	51.0	NF
15	2.011	122.5	25.5	43.0	9.0	52.0	F
16	1.917	110.0	20.5	43.0	8.0	51.0	NF
17	1.943	113.5	24.0	43.0	9.0	52.0	F
18	2.000	121.0	19.5	43.0	8.0	51.0	NF
19	2.001	121.0	25.5	43.0	9.0	52.0	F
20	2.013	122.5	23.0	43.0	8.0	51.0	F

*F = วัสดุเกิดการแตกหักก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ

*NF = วัสดุไม่เกิดการแตกหักภายหลังให้แรงครบ 10,000 รอบ

แสดงการบันทึกข้อมูลดิบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรสเคส ในกลุ่ม
ผลิตภัณฑ์ Supreme translucent

No.	Thickness	Load (N)		Stress (MPa)		Maximum stress (MPa)	Note
	(mm.)	Mean	Amplitude	Mean	Amplitude		
1	2.070	130.5	27.5	43.0	9.0	52.0	F
2	1.994	119.0	23.5	43.0	8.0	51.0	F
3	2.050	128.0	20.5	43.0	7.0	50.0	F
4	1.998	120.5	17.0	43.0	6.0	49.0	NF
5	1.946	114.0	18.5	43.0	7.0	50.0	NF
6	1.977	118.0	22.0	43.0	8.0	51.0	NF
7	2.065	130.0	27.0	43.0	9.0	52.0	F
8	1.986	119.0	22.0	43.0	8.0	51.0	F
9	2.103	135.0	22.0	43.0	7.0	50.0	F
10	2.010	122.5	17.0	43.0	6.0	49.0	NF
11	2.184	147.0	24.0	43.0	7.0	50.0	F
12	2.200	149.5	21.0	43.0	6.0	49.0	NF
13	2.111	136.5	22.0	43.0	7.0	50.0	NF
14	2.000	121.0	22.5	43.0	8.0	51.0	NF
15	2.125	138.5	28.5	43.0	9.0	52.0	F
16	2.064	129.5	24.5	43.0	8.0	51.0	NF
17	2.063	129.5	27.0	43.0	9.0	52.0	F
18	2.114	137.0	25.0	43.0	8.0	51.0	F
19	2.102	135.0	22.0	43.0	7.0	50.0	F
20	2.043	126.5	18.0	43.0	6.0	49.0	NF

*F = วัสดุเกิดการแตกหักก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ

*NF = วัสดุไม่เกิดการแตกหักภายหลังให้แรงครบ 10,000 รอบ

แสดงการบันทึกข้อมูลดิบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรสเคส ในกลุ่ม
ผลิตภัณฑ์ Supreme standard

No.	Thickness	Load (N)		Stress (MPa)		Maximum stress(MPa)	Note
	(mm.)	Mean	Amplitude	Mean	Amplitude		
1	1.941	113.0	21.5	43.0	8.0	51.0	NF
2	2.052	128.0	27.0	43.0	9.0	52.0	NF
3	1.946	114.0	26.5	43.0	10.0	53.0	NF
4	2.036	126.0	32.0	43.0	11.0	54.0	F
5	1.961	116.0	27.0	43.0	10.0	53.0	F
6	1.956	115.0	24.5	43.0	9.0	52.0	F
7	2.059	129.0	24.0	43.0	8.0	51.0	NF
8	2.108	136.0	28.5	43.0	9.0	52.0	NF
9	1.953	115.0	26.5	43.0	10.0	53.0	NF
10	1.995	120.5	30.5	43.0	11.0	54.0	NF
11	2.016	123.0	34.5	43.0	12.0	55.0	F
12	1.954	115.0	29.5	43.0	11.0	54.0	F
13	2.056	129.0	29.5	43.0	10.0	53.0	F
14	2.072	130.5	27.5	43.0	9.0	52.0	F
15	1.972	117.5	22.0	43.0	8.0	51.0	NF
16	1.975	117.5	24.5	43.0	9.0	52.0	NF
17	1.938	113.0	26.0	43.0	10.0	53.0	NF
18	2.052	128.0	33.0	43.0	9.0	54.0	F
19	1.939	113.0	26.0	43.0	8.0	53.0	F
20	2.024	124.0	26.0	43.0	7.0	52.0	F

*F = วัสดุเกิดการแตกหักก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ

*NF = วัสดุไม่เกิดการแตกหักภายหลังให้แรงครบ 10,000 รอบ

แสดงการบันทึกข้อมูลดิบค่าความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรสเคส ในกลุ่ม
ผลิตภัณฑ์ Z250

No.	Thickness	Load (N)		Stress (MPa)		Maximum stress (MPa)	Note
	(mm.)	Mean	Amplitude	Mean	Amplitude		
1	1.955	115	29.5	43.0	11	54	F
2	1.933	112	26.5	43.0	10	53	F
3	1.865	104	21.5	43.0	9	52	NF
4	1.976	118	27	43.0	10	53	NF
5	1.941	113	29	43.0	11	54	F
6	1.891	107	25	43.0	10	53	F
7	1.868	104	22	43.0	9	52	NF
8	1.936	112.5	26.5	43.0	10	53	F
9	1.869	104	22	43.0	9	52	NF
10	2.015	123	30	43.0	10	53	F
11	1.943	113.5	24	43.0	9	52	F
12	1.914	110	20	43.0	8	51	NF
13	1.961	116	24	43.0	9	52	F
14	1.855	102.5	19	43.0	8	51	NF
15	1.927	111.5	23.5	43.0	9	52	NF
16	1.960	115.5	27	43.0	10	53	NF
17	1.917	110	28.5	43.0	11	54	NF
18	1.933	112	31.5	43.0	12	55	F
19	1.993	120	30.5	43.0	11	54	F
20	1.901	108	25.5	43.0	10	53	F

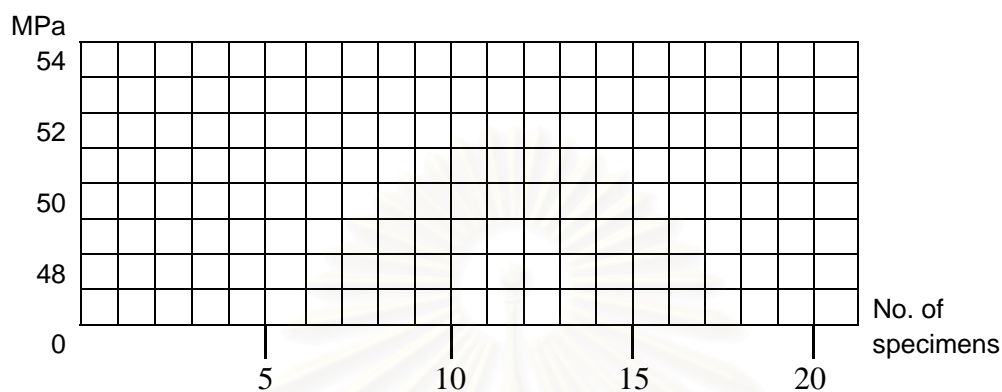
*F = วัสดุเกิดการแตกหักก่อนให้แรงครบ 10,000 รอบ

*NF = วัสดุไม่เกิดการแตกหักภายหลังให้แรงครบ 10,000 รอบ

แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรส
ผลิตภัณฑ์

ในกลุ่ม

Material : Admira



stress (Mpa)	i	n_i (failure)	in_i	$i^2 n_i$
54	4	1	4	16
53	3	2	6	18
52	2	2	4	8
51	1	3	3	3
50	0	2	0	0
		$N = \sum n_i$	$A = \sum in_i$	$B = \sum i^2 n_i$
		N = 10	A = 17	B = 45

$$X = X_0 + d (A/N - 1/2)$$

$$= 51.20$$

$$SD = 1.62 d \left\{ \left[\frac{NB - A^2}{N^2} \right] + 0.029 \right\}$$

$$= 2.65$$

stress = ระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก

i = ลำดับของระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก โดยที่ระดับต่ำสุดจะเท่ากับ 0
= 0, 1, 2,.....

n_i = จำนวนของขึ้นทดลองที่แตกหักที่ระดับความเค้นนั้น

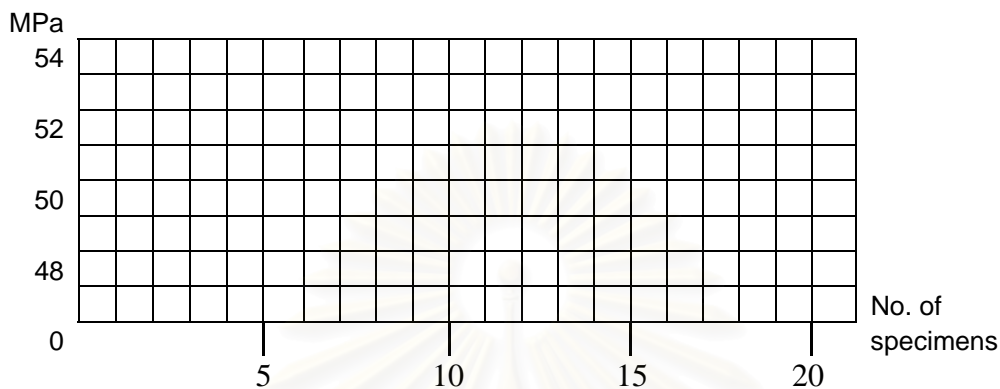
X	51.20
---	--------------

SD	2.65
----	-------------

แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสแตร์เลส
ผลติภันท์

ในกลุ่ม

Material : Ceram X



stress (Mpa)	i	n _i (failure)	i n _i	i ² n _i
53	2	1	2	4
52	1	5	5	5
51	0	4	0	0
		$N = \sum n_i$ N = 10	$A = \sum i n_i$ A = 7	$B = \sum i^2 n_i$ B = 9

$$X = X_0 + d (A/N - 1/2)$$

$$= 51.20$$

$$SD = 1.62 d \left\{ \left[\frac{NB - A^2}{N^2} \right] + 0.029 \right\}$$

$$= 0.71$$

stress = ระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก

i = ลำดับของระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก โดยที่ระดับต่ำสุดจะเท่ากับ 0
= 0, 1, 2,.....

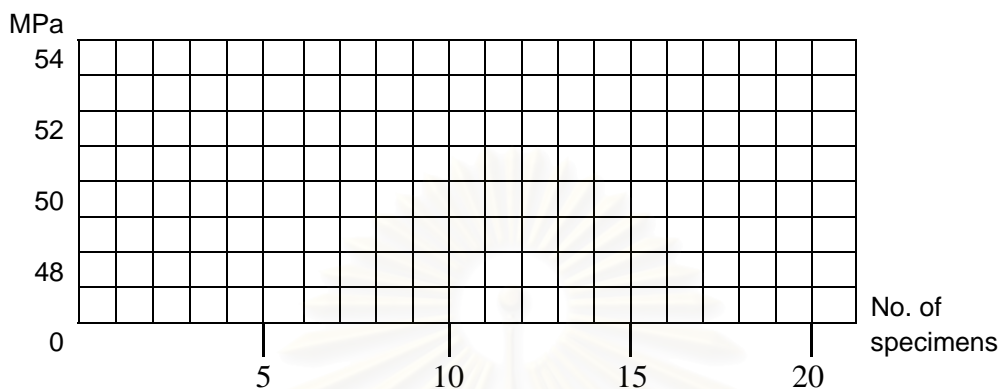
n_i = จำนวนของชิ้นทดลองที่แตกหักที่ระดับความเค้นนั้น

X	51.20
SD	0.71

แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรส
ผลิตภัณฑ์

ในกลุ่ม

Material : Supreme translucent



stress (Mpa)	i	n_i (failure)	in_i	$i^2 n_i$
52	2	4	8	16
51	1	3	3	3
50	0	4	0	0
		$N = \sum n_i$ N = 11	$A = \sum in_i$ A = 11	$B = \sum i^2 n_i$ B = 19

$$X = X_0 + d (A/N - 1/2)$$

$$= 50.50$$

$$SD = 1.62 d \left\{ \left[\frac{NB - A^2}{N^2} \right] + 0.029 \right\}$$

$$= 1.23$$

stress = ระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก

i = ลำดับของระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก โดยที่ระดับต่ำสุดจะเท่ากับ 0
= 0, 1, 2,.....

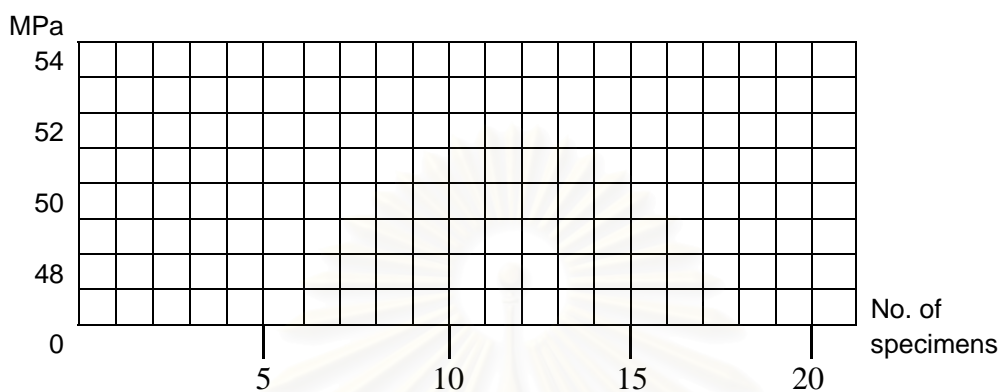
n_i = จำนวนของชิ้นทดลองที่แตกหักที่ระดับความเค้นนั้น

X	50.50
---	--------------

SD	1.23
----	-------------

แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสเตรสแลส ในกลุ่ม
ผลิตภัณฑ์

Material : Supreme standard



stress (Mpa)	i	n_i (failure)	in_i	$i^2 n_i$
55	3	1	3	9
54	2	3	6	12
53	1	3	3	3
52	0	3	0	0
		$N = \sum n_i$ N = 10	$A = \sum in_i$ A = 12	$B = \sum i^2 n_i$ B = 24

$$X = X_0 + d (A/N - 1/2)$$

$$= 52.7$$

$$SD = \frac{1.62 d \{ [NB - A^2] + 0.029 \}}{N^2}$$

$$= 1.50$$

stress = ระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก

i = ลำดับของระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก โดยที่ระดับต่ำสุดจะเท่ากับ 0
= 0, 1, 2,.....

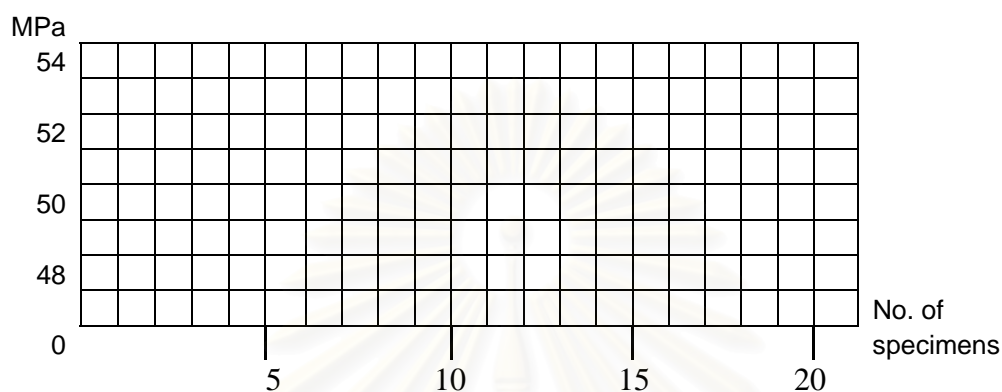
n_i = จำนวนของชิ้นทดลองที่แตกหักที่ระดับความเค้นนั้น

X	52.7
SD	1.50

แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยวิธีสแตร์เลส
ผลิตภัณฑ์

ในกลุ่ม

Material : Z250



stress (Mpa)	i	n_i (failure)	in_i	$i^2 n_i$
55	3	1	3	9
54	2	3	6	12
53	1	5	5	5
52	0	2	0	0
		$N = \sum n_i$	$A = \sum in_i$	$B = \sum i^2 n_i$
		N = 11	A = 14	B = 26

$$X = X_0 + d (A/N - 1/2)$$

$$= 52.77$$

$$SD = 1.62 d \left\{ \left[\frac{NB - A^2}{N^2} \right] + 0.029 \right\}$$

$$= 1.25$$

stress = ระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก

i = ลำดับของระดับความเค้นที่ขึ้นทดลองเกิดการแตกหัก โดยที่ระดับต่ำสุดจะเท่ากับ 0
= 0, 1, 2,.....

n_i = จำนวนของขึ้นทดลองที่แตกหักที่ระดับความเค้นนั้น

X	52.77
---	-------

SD	1.25
----	------

แสดงการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอกเซล

	MATERIAL	Kolmogorov-Smirnov Statistic	df	Sig.	Shapiro-Wilk Statistic	df	Sig.
STRENGTH	admira	.128	15	.200	.934	15	.314
	ceram x	.140	15	.200	.950	15	.522
	supreme translucent	.142	15	.200	.967	15	.809
	supreme standard	.161	15	.200	.945	15	.455
	z250	.199	15	.114	.888	15	.064

จากการวิเคราะห์ด้วยสถิติโคลโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (Kolmogorov-Smirnov) ซึ่งเป็นสถิติที่ใช้วิเคราะห์การกระจายของข้อมูล พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มในการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอกเซลมีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ ที่ $p < 0.5$

การทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of variances) ในกลุ่มข้อมูลที่ทำ การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอกเซล

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.495	4	70	.051

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอคเซล

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่มทดลอง	33155.458	4	8288.864	98.562	.000
ภายในกลุ่มทดลอง	5886.854	70	84.098		
ผลรวมทั้งหมด	39042.312	74			

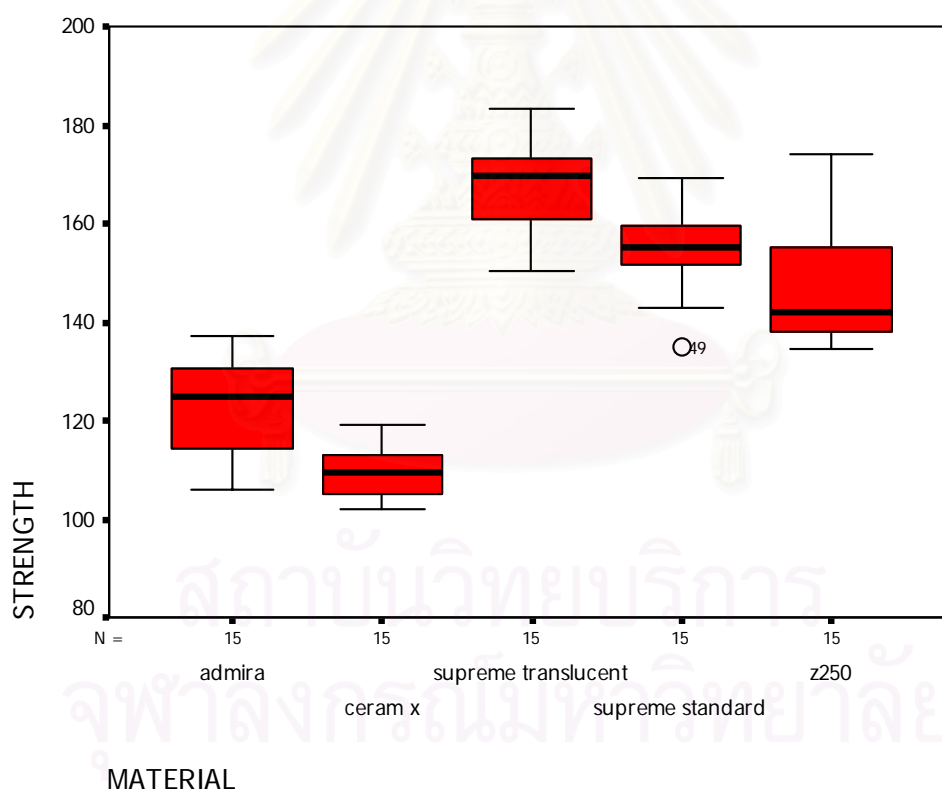
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดสอบในทดสอบความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอคเซล ที่ $p < 0.05$

การเปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยทูกี (Tukey's multiple comparison) ระหว่างกลุ่มในการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางเริ่มต้นชนิดไบแอคเซล

(I) MATERIAL	(J) MATERIAL	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig
admira	ceram x	12.7807	3.34859	.003
	supreme translucent	-44.4613	3.34859	.000
	supreme standard	-32.1133	3.34859	.000
	z250	-24.3420	3.34859	.000
ceram x	admira	-12.7807	3.34859	.003
	supreme translucent	-57.2420	3.34859	.000
	supreme standard	-44.8940	3.34859	.000
	z250	-37.1227	3.34859	.000
supreme translucent	admira	44.4613	3.34859	.000
	ceram x	57.2420	3.34859	.000
	supreme standard	12.3480	3.34859	.004
	z250	20.1193	3.34859	.000

supreme standard	admira	32.1133	3.34859	.000
	ceram x	44.8940	3.34859	.000
	supreme translucent	-12.3480	3.34859	.004
	z250	7.7713	3.34859	.151
z250	admira	24.3420	3.34859	.000
	ceram x	37.1227	3.34859	.000
	supreme translucent	-20.1193	3.34859	.000
	supreme standard	-7.7713	3.34859	.151

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



กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงค้ำขวางเริ่มต้นชนิดไบออคเซล (เมกะปาสกาล) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

แสดงการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

	MATERIAL	Kolmogorov-Smirnov Statistic	df	Sig.	Shapiro-Wilk Statistic	df	Sig.
FATIGUE	Admira	.200	10	.200	.932	10	.466
	CeramX	.272	10	.035	.802	10	.015
	Supreme translucent	.232	11	.101	.795	11	.008
	Supreme standard	.181	10	.200	.895	10	.191
	Z250	.255	11	.044	.899	11	.181

จากการวิเคราะห์ด้วยสถิติโคลโมโกรฟ-สเมอนอฟ (Kolmogorov-Smirnov) ซึ่งเป็นสถิติที่ใช้วิเคราะห์การกระจายของข้อมูล พบว่า ข้อมูลทุกกลุ่มในการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้ามีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ ที่ $p < 0.5$

การทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of variances) ในกลุ่มข้อมูลที่ทำ การทดสอบความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.551	4	47	.203

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความถี่

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่มทดลอง	43.460	4	10.865	11.106	.000
ภายในกลุ่มทดลอง	45.982	47	.978		
Total	89.442	51			

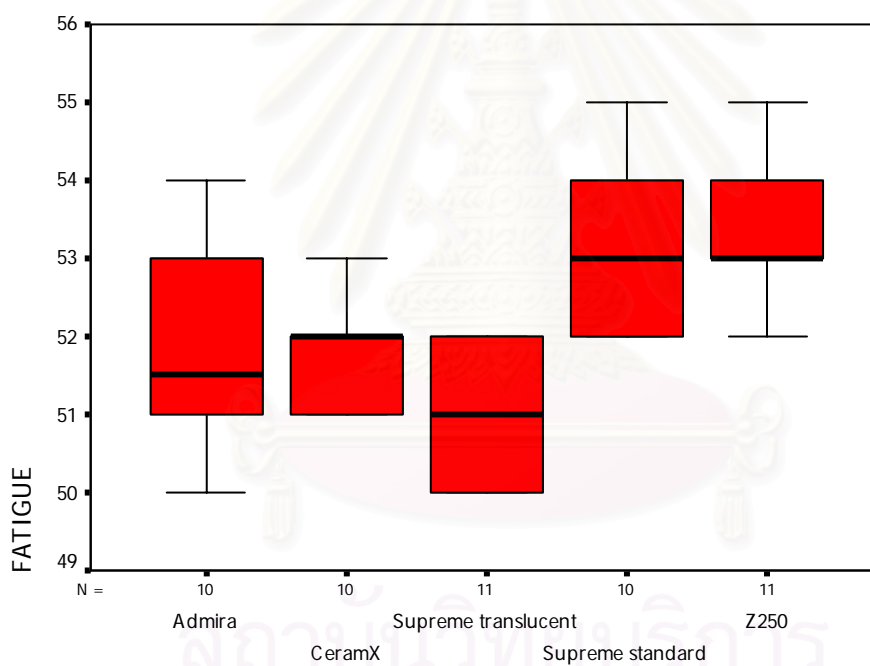
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดสอบในทดสอบความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความถี่ที่ $p < 0.05$

การเปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยทูกี (Tukey's multiple comparison) ระหว่างกลุ่มในการทดสอบความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความถี่

(I) MATERIAL	(J) MATERIAL	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Admira	CeramX	.00	.442	1.000
	Supreme translucent	.70	.432	.493
	Supreme standard	-1.50	.442	.012
	Z250	-1.57	.432	.006
CeramX	Admira	.00	.442	1.000
	Supreme translucent	.70	.432	.493
	Supreme standard	-1.50	.442	.012
	Z250	-1.57	.432	.006
Supreme translucent	Admira	-.70	.432	.493
	CeramX	-.70	.432	.493
	Supreme standard	-2.20	.432	.000
	Z250	-2.27	.422	.000

Supreme standard	Admira	1.50	.442	.012
	CeramX	1.50	.442	.012
	Supreme translucent	2.20	.432	.000
	Z250	-.07	.432	1.000
Z250	Admira	1.57	.432	.006
	CeramX	1.57	.432	.006
	Supreme translucent	2.27	.422	.000
	Supreme standard	.07	.432	1.000

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



MATERIAL

กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางภายใต้ภาวะความล้า (เมกะพลาสติก) และค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐาน

แสดงค่าเฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซลของวัสดุ Admira

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
STRENGTH	15	122.6707	10.17995	2.62845

แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล กับค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความถี่ (51.14) ของวัสดุ Admira

Test Value = 51.20						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
STRENGTH	27.191	14	.000	71.4707	65.8332	77.1081

แสดงค่าเฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซลของวัสดุ Ceram X

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
STRENGTH	15	109.8900	5.34901	1.38111

แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล กับค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความถี่ (51.20) ของวัสดุ Ceram X

Test Value = 51.20						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
STRENGTH	42.495	14	.000	58.6900	55.7278	61.6522

แสดงค่าเฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซลของวัสดุ Supreme translucent

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
STRENGTH	15	167.1320	9.50662	2.45460

แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล กับค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความถี่ (50.50) ของวัสดุ Supreme translucent

Test Value = 50.50						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
STRENGTH	47.516	14	.000	116.6320	111.3674	121.8966

แสดงค่าเฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซลของวัสดุ Supreme standard

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
STRENGTH	15	154.7840	8.30496	2.14433

แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล กับค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความถี่ (52.70) ของวัสดุ Supreme standard

Test Value = 52.70						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
STRENGTH	47.606	14	.000	102.0840	97.4849	106.6831

แสดงค่าเฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซลของวัสดุ Z250

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
STRENGTH	15	147.0127	11.35334	2.93142

แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล กับค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้า (52.77) ของวัสดุ Z250

Test Value = 52.77						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
STRENGTH	32.149	14	.000	94.2427	87.9554	100.5299

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แสดงการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล

		STATIC	FATIGUE
N		5	5
Normal Parameters	Mean	140.2960	51.6620
	Std. Deviation	23.50600	1.01751
Most Extreme Differences	Absolute	.212	.275
	Positive	.173	.275
	Negative	-.212	-.246
Kolmogorov-Smirnov Z		.475	.615
Asymp. Sig. (2-tailed)		.978	.844

จากการวิเคราะห์ด้วยสถิติโคลโมโกรอฟ-สมอนอฟ พบว่า ข้อมูลค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล และค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้า มีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ ที่ $p < 0.5$

แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล และค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้า

		STATIC	FATIGUE
STATIC	Pearson Correlation	1	.152
	Sig. (2-tailed)	.	.807
	N	5	5
FATIGUE	Pearson Correlation	.152	1
	Sig. (2-tailed)	.807	.
	N	5	5

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงตัดขวางเริ่มต้นชนิดไบเอกเซล และค่าความแข็งแรงตัดขวางภายใต้ภาวะความล้าด้วยการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน พบว่าค่า $r = 0.152$ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้ 0 มาก

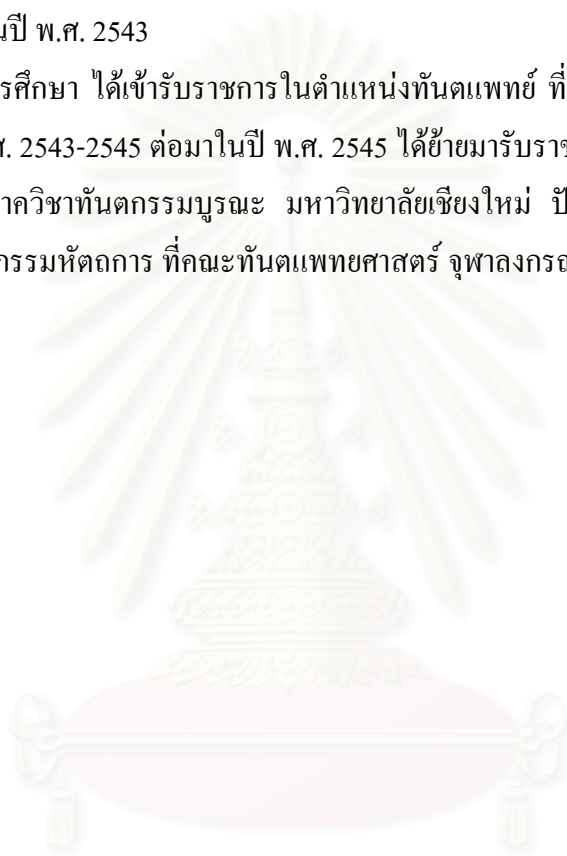
แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นทดสอบในแนวตั้งจากการทดสอบความแข็งแรงตัดขวางชนิดไป
แอกเซล ขณะทำการกดด้วยแรงสแตติก

Displacement (mm.)	Force (N)				
	Ad	Cx	ST	SS	Z
0.02		28	30.26	40.17	34.89
0.04	22.59	37.76	55.38	54.93	45.09
0.06	37.55	55.39	77.89	70.28	62.57
0.08	57.67	72.8	100.29	90.69	80.16
0.1	76.93	92.84	127.87	110.19	100.02
0.12	107.7	112.8	157.82	137.83	120.02
0.14	127.55	132.79	185.56	157.74	145.16
0.16	155.04	157.76	220.32	180.28	175.06
0.18	180.87	180.36	250.39	200.18	197.44
0.2	212.6	202.85	287.83	225.22	234.99
0.22	237.17	227.85	315.35	257.57	262.46
0.24	267.7	250.37	352.81	285.2	292.65
0.26	297.65	277.9	380.25	323.07	324.93
0.28	325.14	314.28	415.39	352.49	360.13
0.3	345.25		440.3	372.72	379.86
0.32			474.42	402.8	415.08
0.34			515	421.2	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว กมลลา กฤโตปการ เกิดวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดเชียงใหม่ จบการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย เชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2537 และศึกษาต่อในชั้นอุดมศึกษาที่คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2537 และจบการศึกษาทันตแพทยศาสตร์บัณฑิตในปี พ.ศ. 2543

หลังจากจบการศึกษา ได้เข้ารับราชการในตำแหน่งทันตแพทย์ ที่วิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดชลบุรี ในปี พ.ศ. 2543-2545 ต่อมาในปี พ.ศ. 2545 ได้ย้ายมารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ สาขาทันตกรรมหัตถการ ภาควิชาทันตกรรมบูรณะ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาทันตกรรมหัตถการ ที่คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย