



ผลของวิธีการบ่มตัวต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด

INFLUENCE OF CURING MODES ON DEGREE OF CONVERSION
OF TWO DUAL-CURED RESIN CEMENTS

คงวุฒิ เหลืองเรืองรอง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

ผลของวิธีการบ่มตัวต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสอง
ชนิด



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

INFLUENCE OF CURING MODES ON DEGREE OF CONVERSION
OF TWO DUAL-CURED RESIN CEMENTS



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF SCIENCE (Clinical Dentistry)
Faculty of Dentistry Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลของวิธีการบ่มตัวต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด

ของ

คงวุฒิ เหลืองเรืองรอง

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมคลินิก

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ เจียรพุมิ)

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิยม อ่างรงค์นันต์สกุล)

กรรมการ

(ดร. ทพญ.จารุมา ศักดิ์ดี)

ชื่อเรื่อง	ผลของวิธีการบ่มตัวต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด
ผู้วิจัย	คงวุฒิ เหลืองเรืองรอง
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ เจียรพุด

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทราบถึงผลของวิธีการบ่มตัวและชนิดเรซินซีเมนต์ที่ต้องการศึกษามีต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด ใช้วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบโดยใช้ซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟว์และซีเมนต์รีไลเอ็กซ์สองร้อย โดยแต่ละชนิดจะแบ่งออกเป็นสามกลุ่มย่อยตามวิธีการบ่มตัว ได้แก่กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที (SC 10 mins.) กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมง (SC 24 hrs.) และกลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านแผ่นปิดแก้วสไลด์ (LC) โดยใช้กลุ่มตัวอย่างกลุ่มละสิบชิ้น หาค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังจากผสมเรซินซีเมนต์แต่ละกลุ่มด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มมามานสเปกโตรสโคปและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสถิติ Two-way ANOVA และ Post hoc LSD test โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดลองคือกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์น้อยที่สุดคือซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ของร้อย ในกลุ่ม SC 10 mins. คือร้อยละ 32.82 และแตกต่างจากค่าที่ได้ในวิธีการบ่มตัวเดียวกันของซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟว์ซึ่งได้ผลคือร้อยละ 57.76 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และในกลุ่ม SC 24 hrs. ของรีไลเอ็กซ์สองร้อยมีค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์น้อยกว่าซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟว์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ แต่ไม่พบความแตกต่างระหว่างเรซินซีเมนต์ทั้งสองชนิดภายในกลุ่ม LC ดังนั้นจากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีการบ่มตัวและชนิดของเรซินซีเมนต์มีต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด ทั้งนี้ค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์สองร้อยยังไม่เพียงพอในการใช้งานทางคลินิกในช่วงสิบนาทีแรกหลังผสม

คำสำคัญ : เรซินซีเมนต์, บ่มตัวร่วม, วิธีการบ่มตัว, ชนิดของเรซินซีเมนต์, ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

Title	INFLUENCE OF CURING MODES ON DEGREE OF CONVERSION OF TWO DUAL-CURED RESIN CEMENTS
Author	KONGVUTH LUANGRUANGRONG
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Sirichan Chiaraputt

Objective: The purpose of this study was to evaluate how curing modes and resin cement type affect the degree of conversion of two dual-cured resin cements. Materials and methods: Two dual-cure resin cements, which were RelyX™ U200 and Panavia™ V5, were used in this study. Sixty specimens were divided into six groups according to the different curing mode (ten minutes after self-curing, twenty-four hours after self-curing and Light-curing) and different cement (n = 10). Resin cements were mixed, accordingly to the manufacturer, and placed into the glass slides. The degree of conversion was measured by Fourier transform raman spectroscopy. The data were statistically analyzed by two-way ANOVA and post hoc LSD test ($\alpha = 0.05$). Results: Significant differences were found at least among the specimens (p-value < 0.05). The degree of conversion of ten minutes after the self-curing group of RelyX™ U200 was found to have the lowest value (32.82%), which was significantly different (p-value < 0.05) from Panavia™ V5 using the same curing mode (57.76%). The degree of conversion of RelyX™ U200 was significantly lower than Panavia™ V5 twenty-four hours after the self-curing group (p-value < 0.05). There were no significant differences between two cements regarding the Light-curing group. Conclusion: The curing mode and cement type affected the degree of conversion. Therefore, the use of RelyX™ U200 in the light-attenuate situation must be noticed, in contrast with the conventional resin cement, which was more predictable.

Keyword : Resin cements, Dual-cured, Curing modes, Resin cements type, Degree of conversion

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ได้ หากปราศจากการคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ จาก ผศ.ทพญ.ดร.ศิริจันทร์ เจียรพุมิ ที่ปรึกษางานวิจัย และ อ.ทพ.วิชญ์ เลิศทวีลจิร ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ตลอดจนคณะกรรมการสอบเค้าโครงร่างปริญญานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบกับปริญญานิพนธ์และงานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้หน่วยงาน สังกัดคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทางผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณดังกล่าวมา ณ ที่นี้

หนึ่งในขั้นตอนการทดลองนั้น ได้รับความอนุเคราะห์ทั้งสถานที่ทำการทดลองและอุปกรณ์ เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มมามานสเปกโตรสโคปจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) พร้อมทั้งได้รับการอำนวยความสะดวกจากเจ้าหน้าที่ทุกท่านตลอดจนสามารถทำให้งานเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ตามที่วางแผนไว้ จึงขอกล่าวแสดงความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์นี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกล่าวขอบพระคุณครอบครัวที่คอยให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนกระทั่งสามารถดำเนินปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นไปด้วยดี

คงวุฒิ เหลืองเรืองรอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
ความสำคัญของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	4
ประชากรที่ใช้ในการวิจัย	4
กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย	4
ตัวแปรที่ศึกษา	4
กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
สมมติฐานในการวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
เรซินซีเมนต์ในทางทันตกรรม	6
1. การแบ่งประเภทตามระบบที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดและการปรับสภาพผิวฟัน.....	6
2. การแบ่งประเภทตามลักษณะการบ่มตัวของวัสดุ ในการแบ่งประเภทนี้แบ่งออกได้เป็น 3	
ประเภท.....	8

ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์.....	10
อุปกรณ์การฉายแสงเพื่อการบ่มตัวด้วยแสงของเรซินซีเมนต์	11
วิธีการวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์.....	13
คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและความสำคัญของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง	21
ประชากร	21
การเลือกกลุ่มตัวอย่าง	21
การเก็บรวบรวมข้อมูล	22
การเตรียมชิ้นงาน.....	22
การวัดค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์.....	29
การจัดกระทำข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล	29
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	30
ผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics).....	30
ผลการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way-ANOVA).....	31
ผลการเปรียบเทียบรายคู่ของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Post hoc tests	31
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	34
สรุปผลการวิจัย.....	34
อภิปรายผลการวิจัย	35
ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43
ภาคผนวก.....	48
ประวัติผู้เขียน.....	53



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงรายการวัสดุ ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานที่ใช้ในการศึกษา.....	26
ตาราง 2 ตารางแสดงผลผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนาของซีเมนต์รีไลเอกันซ์สองร้อย	33
ตาราง 3 ตารางแสดงผลผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนาของซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์.....	33
ตาราง 4 แสดงผลของค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวรวมทั้ง สองชนิด (กำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษใหญ่และเครื่องหมายดอกจันหมายถึงความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.05$) ระหว่างวิธีการบ่มตัว และตัวอักษรภาษาอังกฤษเล็กหมายถึงความแตกต่างระหว่างชนิดของเรซินซีเมนต์).....	33



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แสดงกรอบแนวคิดงานวิจัย.....	5
ภาพประกอบ 2 แสดงสมการหาค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์	14
ภาพประกอบ 3 แสดงแผ่นแก้วสไลด์สองแผ่นประกบกัน โดยแผ่นบนมีการเจาะเพื่อเป็นที่อยู่ ของเรซินซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ	23
ภาพประกอบ 4 แสดงแผ่นแก้วสไลด์สองแผ่นประกบกันและมีการยึดกันด้วยเทปขาว.....	23
ภาพประกอบ 5 แสดงขึ้นตัวอย่างในกลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสิบ นาที่และยี่สิบสี่ชั่วโมง โดยเมื่อผสมเรซินซีเมนต์ลงในช่องว่างที่เตรียมไว้แล้วของแผ่นแก้วสไลด์และ นำไปวางลงตรงช่องว่างที่เตรียมไว้จากแผ่นโลหะไร้สนิมเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกก่อนฉายแสง	25
ภาพประกอบ 6 แสดงขึ้นตัวอย่างในกลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านแผ่นปิดแก้วสไลด์ โดยเมื่อ ผสมเรซินซีเมนต์ลงในช่องว่างที่เตรียมไว้แล้วของแผ่นแก้วสไลด์แล้วจะนำแผ่นแก้วสไลด์อีกชิ้นมา ปิดทับและจึงฉายแสงจากเครื่องฉายแสง	27
ภาพประกอบ 7 แสดงสมการหาค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	29
ภาพประกอบ 8 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ตาม วิธีการบ่มตัวที่แตกต่างกันและจำแนกตามชนิดของเรซินซีเมนต์ กำหนดให้ค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณ การเกิดพอลิเมอร์ที่ยอมรับได้ทางคลินิกอยู่ที่ร้อยละ 50.....	32

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การรักษาทางทันตกรรมบูรณะนอกจากทำให้ผู้ป่วยที่มีปัญหาด้านการบดเคี้ยวกลับมาใช้งานได้ตามปกติแล้ว ชีงงานบูรณะก็ยังคงต้องมีความสวยงามในกรณีที่ใช้ทดแทนฟันธรรมชาติที่เกิดขึ้นพยาธิสภาพไป ไม่ว่าจะเป็นการบูรณะฟันด้วยการอุดหรือบูรณะโดยตรง (Direct restoration) หรือบูรณะด้วยชิ้นงานขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ (Indirect restoration) หนึ่งในกรณีที่ฟันเกิดพยาธิสภาพมากเกินกว่าจะสามารถบูรณะโดยตรงได้แล้วการรักษาด้วยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจากห้องปฏิบัติการจะสามารถสร้างเค้ารูป (Contour) ผิวสัมผัส (Contact surface) ความโปร่งแสง (Translucency) สภาพทึบแสง (Opacity) หรือสีของฟันได้ตามที่ทันตแพทย์ผู้ให้การรักษาทำการวางแผนไว้ล่วงหน้าได้ ในขณะเดียวกันช่วงทศวรรษที่ผ่านมาการก้าวเข้าสู่ยุคของการบูรณะด้วยวัสดุเซรามิกล้วน (All-ceramics) เพราะวัสดุประเภทนี้สามารถให้ความสวยงามใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ อีกทั้งยังมีการศึกษาที่บอกถึงอัตราการรอดชีวิตของวัสดุที่มีแนวโน้มที่สามารถใช้งานทางคลินิกได้จริง^[1] วัสดุเซรามิกประเภทลิเทียมไดซิลิเกต (Lithium disilicate) หรือเซอร์โคเนีย (Zirconia) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันและนำมาซึ่งการพัฒนาในแง่คุณสมบัติต่างๆของวัสดุบูรณะไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) คุณสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility)^[1, 2] ทำให้ปัจจุบันจึงเกิดการแข่งขันกันของบริษัทผู้ผลิตที่จำเป็นต้องพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ๆออกมาสู่ท้องตลาดตลอดเวลา

เรซินซีเมนต์ (Resin cement) เป็นวัสดุที่มีความเกี่ยวข้องอย่างมากในการบูรณะฟันด้วยชิ้นงานที่ขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ เดิมทีเรซินซีเมนต์จำเป็นต้องมีการใช้งานร่วมกับระบบสารยึดติด (Adhesive system) โดยทำการปรับสภาพผิวฟันก่อนการยึดติด ทั้งนี้วัสดุเรซินซีเมนต์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ที่สมบูรณ์ ซึ่งเรซินซีเมนต์สามารถจำแนกได้หลายรูปแบบและหนึ่งในรูปแบบของการจำแนกนั้นคือการจำแนกด้วยวิธีการบ่มตัว (Mode of curing) ของวัสดุ โดยจะมีทั้งการบ่มตัวด้วยแสง (Light-cure) บ่มตัวด้วยตัวเอง (Self-cure) และบ่มตัวร่วม (Dual-cure) เหตุผลที่การจำแนกตามวิธีการบ่มตัวที่แตกต่างกันนี้ จะมีข้อบ่งชี้ตามแต่ละสถานการณ์ทางคลินิก ยกตัวอย่างเช่นสถานการณ์ที่วัสดุบูรณะชนิดเซรามิกล้วนจำเป็นต้องมีความหนาหรือตำแหน่งที่ต้องการจะบูรณะมีความลึก ส่งผลให้พลังงานที่ส่งจากเครื่องฉายแสงผ่านวัสดุบูรณะเข้าสู่ตำแหน่งของเรซินซีเมนต์เกิดการลดทอนของความเข้มแสง

(Light attenuation) จากเครื่องฉายแสงลง^[3-6] หรืออยู่ในตำแหน่งที่แสงไม่สามารถส่องเข้าไปถึงอย่างในการบูรณะด้วยวัสดุโลหะ (Full metal restoration) โลหะเคลือบพอร์ซเลน (Porcelain-fuse-to-metal restoration) หรือการยึดติดเดือยฟันสำเร็จรูป (Prefabricated post) เป็นต้น ซึ่งความสมบูรณ์ของการเกิดพอลิเมอร์ในวัสดุบูรณะดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ด้วยวิธีบ่มตัวด้วยตัวเองเพิ่มเติมจากการบ่มตัวด้วยแสงเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเสนอให้ใช้เรซินซีเมนต์ประเภทบ่มตัวร่วม (Dual-cure resin cements) เพื่อหวังผลสำเร็จทางคลินิก แต่ทั้งนี้ก็ได้มีรายงานการศึกษาว่าเรซินซีเมนต์ชนิดนี้ยังคงจำเป็นต้องใช้แสงในการบ่มตัวอยู่จึงจะได้ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of conversion) ที่เพิ่มสูงขึ้นและเพียงพอต่อการใช้งานทางคลินิก^[4, 5, 7-10] ในขณะเดียวกันหากมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้คุณสมบัติต่างๆทั้งทางกล ทางกายภาพและทางเคมีของเรซินซีเมนต์ดังกล่าวนี้สามารถแสดงประสิทธิภาพได้มากขึ้น^[4, 5, 11]

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมกับสารยึดติดในระบบชนิดเซลฟ์-เอ็ทซ์ (Self-etch adhesive system) จะเกิดปัญหาความไม่เข้ากัน (Incompatibility)^[12, 13] ขึ้นระหว่างเรซินซีเมนต์กับสารยึดติด เนื่องจากมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรด (Acidic monomer) ในชั้นออกซิเจนอินฮิบิเตอร์ (Oxygen inhibited layer) ของสารยึดติด จะไปแย่งจับกับเอมีนตติยภูมิชนิดอะโรมาติก (Aromatic tertiary amine) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่ม (Initiator) ของปฏิกิริยาบ่มตัวด้วยตัวเอง ส่งผลให้คุณสมบัติการบ่มตัวด้วยตัวเองเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นในระบบสารยึดติดที่หลายบริษัทผลิตออกมาสู่ท้องตลาดใหม่จึงเริ่มมีการเติมเกลือของกรดอะโรมาติกซัลฟินิก (Salts of aromatic sulfinic acid) เพื่อไปแย่งทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดแทนให้ปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยตัวเองของเรซินซีเมนต์ดำเนินต่อไปได้อย่างสมบูรณ์^[12, 13]

เรซินซีเมนต์ชนิดเซลฟ์แอดฮีซีฟเรซินซีเมนต์ (Self-adhesive resin cement) ได้ถูกนำเสนอเข้าสู่ท้องตลาดครั้งแรกในปี 2002^[14] และปัจจุบันวัสดุมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะซีเมนต์ชนิดนี้ไม่ต้องทำสารยึดติดเข้ามาปรับสภาพผิวฟันก่อนเหมือนอย่างเรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติด (Conventional resin cement) ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและละเอียดอ่อน อาจทำให้เกิดการปนเปื้อน (Contamination) หรือเกิดความผิดพลาดระหว่างขั้นตอนการทำงานได้ แต่มีการศึกษาพบว่าเซลฟ์แอดฮีซีฟเรซินซีเมนต์ยังมีข้อจำกัดในด้านการใช้งานอยู่ทั้งในค่าความแข็งแรงของพันธะ (Bond strength) ประสิทธิภาพในการปรับสภาพผิวเคลือบฟันและเนื้อฟัน และความสมบูรณ์ของการเกิดพอลิเมอร์^[15, 16] เรซินซีเมนต์ชนิดนี้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมเพราะเชื่อว่าปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยตัวเองจะช่วยให้มี

การเกิดพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นในสถานการณ์ที่แสงจากเครื่องฉายแสงเข้าไม่ถึง แต่ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าม้งานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดพอลิเมอร์กับสภาวะแสงที่แตกต่างกันยังมีไม่มากนัก อีกทั้งวัสดุชนิดนี้มีความหลากหลายเนื่องจากมีหลายบริษัทผู้ผลิตต่างพัฒนาผลิตภัณฑ์ของตนเข้าสู่ท้องตลาดมากขึ้น

มีรายงานพบว่าในขั้นตอนการผลิตวัสดุบูรณะจำพวกเรซินคอมโพสิตโดยเฉพาะกลุ่มที่มีโครงสร้างหลักเป็นบิสจีเอ็มเอ (Bis-GMA) ซึ่งจะมีสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตคือบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A; BPA) เป็นส่วนประกอบหรือเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบนั้น ซึ่งบิสฟีนอลเอนี้มีรายงานว่าอาจมีผลต่อความผิดปกติของระบบต่อมไร้ท่อของทารกในครรภ์หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไป^[17-19] แต่ทั้งนี้ก็ยังอยู่ในขั้นตอนของการทดสอบในห้องทดลองอยู่ โดยการชะละลาย (Leaching) ของบิสฟีนอลเอออกสู่สภาพแวดล้อมช่องปากอาจเกิดขึ้นในกรณีวัสดุบูรณะบางชนิดไม่ได้รับการบ่มตัวที่เหมาะสมส่งผลให้บิสฟีนอลเอหรืออนุพันธ์ของบิสฟีนอลเอที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในมอนอเมอร์ส่วนตกค้าง (Residual monomer) ที่เกิดการชะละลายออกมาในช่องปากได้ โดยมอนอเมอร์ส่วนตกค้างนี้จะมีคั่งเหลือมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์และวิธีการบ่มตัวที่เหมาะสมต่อสถานการณ์นั้น^[5, 17]

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ต้องการทราบถึงผลของวิธีการบ่มตัวต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด

ความสำคัญของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้เมื่อทราบถึงค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมทั้งชนิดที่เป็นเรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดและเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์แล้ว จะสามารถนำไปเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานด้านคลินิกเพราะวัสดุแต่ละประเภทมีข้อบ่งชี้ในการใช้งานที่แตกต่างกันไปตามแต่สถานการณ์ทางคลินิก ไม่ว่าจะเป็นกรณีบูรณะครอบโลหะที่มีสภาพที่บดแสงหรือกรณีการยึดติดอย่างสำเร็จรูปที่มีความยากลำบากในการฉายแสงเพื่อบ่มตัว ดังนั้นผลของการศึกษาครั้งนี้จะทำให้ทราบผลของความสัมพันธ์ของปัจจัยด้านวิธีการบ่มตัวและชนิดของเรซินซีเมนต์ ให้เรซินซีเมนต์สามารถแสดงประสิทธิภาพสูงสุดในแง่คุณสมบัติทั้งทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีเพื่อสนับสนุนให้เกิดประสิทธิภาพในงานทันตกรรมบูรณะที่ในปัจจุบันมีแนวโน้มของการใช้วัสดุบูรณะด้วยชิ้นงานขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการมากขึ้น

ขอบเขตของการวิจัย

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย

1. เรซินซีเมนต์ชนิดเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์หนึ่งผลิตภัณฑ์ได้แก่ซีเมนต์รีไลเอกซ์-ยูสองร้อย (RelyX™ U200, 3M ESPE) โดยเรซินซีเมนต์ชนิดนี้จะเป็นเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วม
2. เรซินซีเมนต์ชนิดใช้ร่วมกับสารยึดติดหนึ่งผลิตภัณฑ์ได้แก่ซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ (Panavia™ V5, Kuraray Noritake) สี A2 Universal และเป็นเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมเช่นเดียวกัน โดยใช้ร่วมกับสารยึดติดจากผลิตภัณฑ์เดียวกัน (Panavia™ V5 Tooth Primer, Kuraray Noritake) ซึ่งเป็นสารยึดติดระบบเซลฟ์แอ็คทีฟชนิดชั้นตอนเดียว

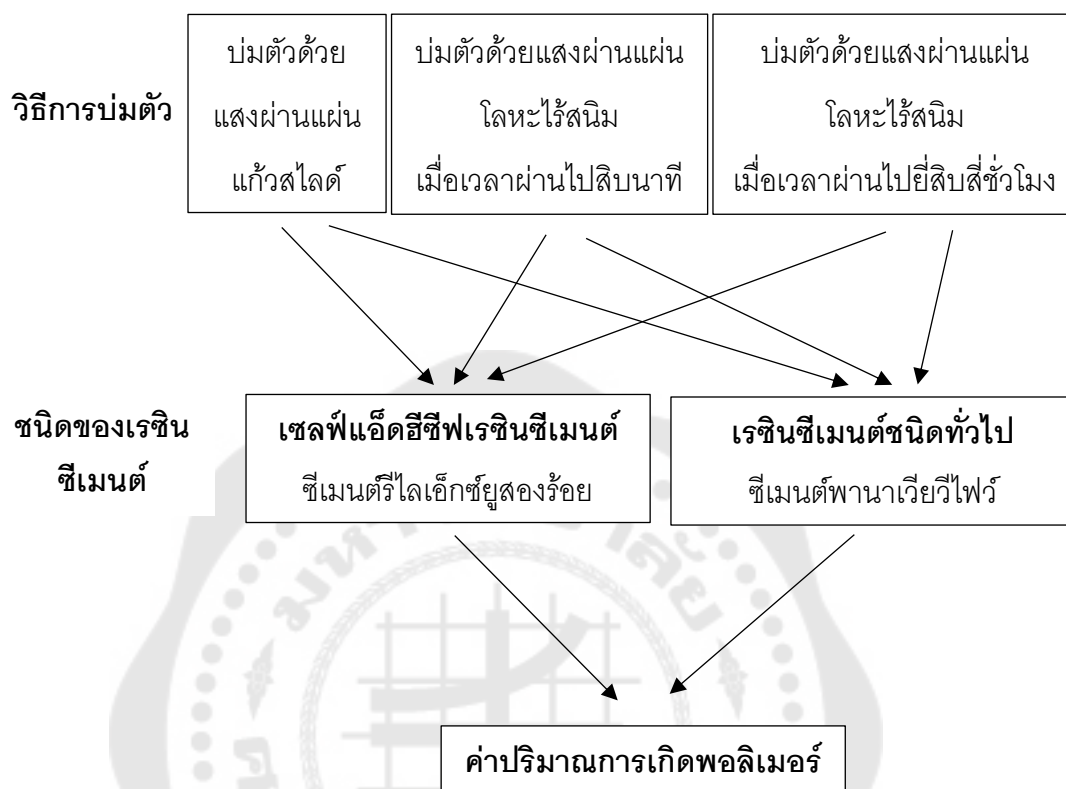
กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

1. เรซินซีเมนต์ชนิดเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์
 - 1.1 ซีเมนต์รีไลเอกซ์ยูสองร้อย
 - 1.1.1 ใช้วิธีการบ่มตัวด้วยแสงผ่านแผ่นโลหะไร้สนิม (Stainless steel)
 - 1.1.2 ใช้วิธีการบ่มตัวด้วยแสงผ่านแผ่นแก้วสไลด์
2. เรซินซีเมนต์ชนิดทั่วไป
 - 2.1 ซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ สี A2 Universal
 - 2.1.1 ใช้วิธีการบ่มตัวด้วยแสงผ่านโลหะไร้สนิม
 - 2.1.2 ใช้วิธีการบ่มตัวด้วยแสงผ่านแผ่นแก้วสไลด์

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ ได้แก่ วิธีการบ่มตัวและชนิดของเรซินซีเมนต์
2. ตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์
3. ตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ ความหนาของชิ้นงาน ปริมาณของวัสดุที่ใช้ วิธีการผสม คุณภาพของเครื่องฉายแสง ระยะห่างของแสงกับชิ้นงาน สิ่งปนเปื้อนขณะผสมและทำการทดลอง

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 แสดงกรอบแนวคิดงานวิจัย

สมมติฐานในการวิจัย

ไม่มีความแตกต่างของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างวิธีการบ่มตัวแต่ละวิธีของเรซินซีเมนต์ทั้งสองชนิด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เรซินซีเมนต์ในทางทันตกรรม (Dental resin cements)
2. ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์
3. อุปกรณ์การฉายแสงเพื่อการบ่มตัวด้วยแสงของเรซินซีเมนต์ (Light-curing units)
4. วิธีการวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์
5. คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและความสำคัญของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

เรซินซีเมนต์ในทางทันตกรรม

ปัจจุบันในงานทันตกรรมบูรณะมีวิธีการบูรณะหลากหลายรูปแบบมากกว่าสมัยอดีตกาล ซึ่งงานบูรณะที่ขึ้นรูปจากห้องปฏิบัติการ จึงเข้ามามีบทบาทในการรักษามากขึ้น ความสำเร็จของการรักษาในการบูรณะด้วยชิ้นงานบูรณะที่ขึ้นรูปจากห้องปฏิบัติการนี้ต้องขึ้นอยู่กับซีเมนต์ทางทันตกรรม (Dental cement) ที่ใช้ในการยึดติดชิ้นงานเข้ากับฟัน ทั้งนี้หากซีเมนต์ทางทันตกรรมมีเรซินเป็นส่วนประกอบจะเรียกว่าเรซินซีเมนต์ซึ่งมีส่วนประกอบของพอลิเมอร์ (Polymer) และกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในการยึดชิ้นงานเนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลและการละลายน้ำ (Solubility) ของวัสดุต่ำ อีกทั้งยังเกิดการยึดติดร่วมกับระบบสารยึดติดที่ได้ให้ผลการยึดติดที่มีค่าความแข็งแรงของพันธะที่มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพ (Durability) [4, 5, 11, 20, 21] โดยเรซินซีเมนต์สามารถแบ่งประเภทของวัสดุได้ทั้งระบบที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดและการปรับสภาพผิวฟันและแบ่งตามลักษณะการบ่มตัวของวัสดุโดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การแบ่งประเภทตามระบบที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดและการปรับสภาพผิวฟัน

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.1 เรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติด แบ่งได้ตามการปรับสภาพผิวฟันได้แก่

1.1.1 เรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดระบบเอตช์แอนด์รินส์ (Resin cement with etch-and-rinse adhesive system) ในเรซินซีเมนต์กลุ่มนี้จำเป็นต้องมีการปรับสภาพผิวฟันก่อนด้วยกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ความเข้มข้นร้อยละ 35-37 เป็นเวลา 15 วินาที [22] เพื่อลดแรงตึงผิวและเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดติดให้แก่ผิวเคลือบฟันและกำจัดชั้นเสมียร์ (Smear layer) ที่อุดตติอยู่ภายในท่อเนื้อฟันหลังจากการกรอตัดเนื้อฟันและเปิดให้ท่อเนื้อฟันเผยผิ้ออกมา

เพื่อให้สารยึดติดเข้าไปยึดติดได้พร้อมกับละลายแร่ธาตุบางส่วนที่ผิวเนื้อฟัน จากนั้นจึงทาไพรเมอร์ (Primer) เพื่อให้เส้นใยคอลลาเจนอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการยึดติดและช่วยเพิ่มการไหลแผ่ของสารยึดติดได้ดียิ่งขึ้น ขั้นตอนต่อมาจึงทาสารยึดติดที่มีส่วนประกอบของเรซิน ซึ่งเมื่อเกิดการบ่มตัวได้อย่างสมบูรณ์แล้วจะเกิดเป็นชั้นไฮบริด (Hybrid layer) ที่มีความหนา 8-10 ไมโครเมตร^[22] โดยขั้นตอนการทาไพรเมอร์และสารยึดติดนี้อาจพบทั้งชนิดแยกสองขั้นตอนหรือชนิดรวมหนึ่งขั้นตอนก็ได้ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เรซินซีเมนต์ในระบบนี้ได้แก่ Variolink™ Esthetic, Superbond C&B™, NX3 Nexus™ เป็นต้น

1.1.2 เรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับระบบสารยึดติดชนิดเซลฟ์เอ็ทซ์ (Resin cement with self-etch adhesive system) ในเรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้ใช้ไพรเมอร์หรือสารยึดติดที่มีการเติมมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรด ปรับสภาพผิวเคลือบฟันและเนื้อฟันแทนการใช้กรดฟอสฟอริกเพื่อหวังผลในการลดขั้นตอนและความยุ่งยากของการทำงานลง แต่เนื่องจากมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดนั้นเป็นกรดอ่อนซึ่งมีสภาพความเป็นกรดน้อยกว่ากรดฟอสฟอริก ทำให้การละลายชั้นเคลือบฟันออกไปไม่หมด จึงเกิดเป็นการละลายบางส่วนหรือปรับสภาพของชั้นเคลือบฟันและรวมเป็นส่วนหนึ่งของชั้นไฮบริด มอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดที่ใช้ปรับสภาพฟันนี้ยังสามารถเกิดพันธะเคมี (Chemical bond) กับผิวฟันได้ด้วยการเกิดพันธะเคมีกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ภายในเนื้อฟันซึ่งก่อให้เกิดเสถียรภาพของการยึดติดได้ดียิ่งขึ้น^[23] สารยึดติดระบบนี้จะให้ชั้นไฮบริดที่แคบกว่าระบบเอ็ทซ์แอนดรินส์ซึ่งมีความหนาอยู่ประมาณ 0.5 – 1 ไมโครเมตร มีผลช่วยลดอาการเสียวฟันได้จากการที่ไม่ได้กำจัดชั้นเคลือบฟันในท่อนเนื้อฟันออกหมด^[23] ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เรซินซีเมนต์ในระบบนี้ได้แก่ Panavia™ V5, Multilink™ Automix เป็นต้น

1.2 เซลฟ์เอ็ทซ์ไฟเรซินซีเมนต์ โดยเรซินซีเมนต์กลุ่มนี้ไม่ได้มีการใช้สารยึดติดร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อหวังผลของการลดขั้นตอนในการทำงานลงด้วยวิธีการเติมมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดเข้าไปเพื่อหวังผลให้เกิดการปรับสภาพฟันที่ผิวเคลือบฟันและเนื้อฟัน กลไกการปรับสภาพผิวของเรซินซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อเริ่มสัมผัสกับผิวฟันแล้วจะไปละลายผิวบางส่วนของไฮดรอกซีอะพาไทต์และเกิดเป็นชั้นไฮบริดและพันธะเคมีเช่นเดียวกันกับซีเมนต์ในระบบใช้สารยึดติดชนิดเซลฟ์เอ็ทซ์ โดยช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา เซลฟ์เอ็ทซ์ไฟเรซินซีเมนต์จะมีความเป็นกรดสูงแต่หลังจากซีเมนต์มีการสัมผัสกับผิวฟัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแร่ธาตุบนผิวฟันร่วมกับมอนอเมอร์ที่มีความกรดที่ไปทำปฏิกิริยากรด-เบส (Acid-base reaction) กับวัสดุอุดแทรกที่มีความเป็นเบส (Alkaline fillers) ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปซีเมนต์จะเข้าสู่สภาวะความเป็นกลางมากขึ้น อีกทั้งการ

แตกตัวของมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดนี้จำเป็นต้องใช้น้ำเป็นตัวเริ่มทำให้ซีเมนต์ชนิดนี้มีความเข้ากันได้กับสภาวะที่มีความชื้นมากกว่าซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดที่ต้องควบคุมความชื้นให้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพเพราะความชื้นอาจปนเปื้อนสู่ชั้นของสารยึดติดกับผิวฟันได้ แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าซีเมนต์ชนิดเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์จะมีชั้นไฮบริดเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เพราะวัสดุมีความหนืด (Viscosity) มากเกินที่จะแทรกซึมเข้าไปในชั้นของเส้นใยคอลลาเจนได้เนื่องจากวัสดุจำเป็นต้องมีปริมาณวัสดุอัดแทรก (Fillers) ที่มากพอเพื่อลดความเป็นกรดลงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ประกอบกับความเป็นกรดไม่ได้มีมากพอที่จะละลายชั้นเคลือบให้มีความลึกอย่างเพียงพอจึงทำให้ค่าความแข็งแรงของพันธะมีค่าน้อยกว่ากลุ่มเรซินซีเมนต์ทั้งสองกลุ่มที่กล่าวมาข้างต้น^[15] แต่อย่างไรก็ตามในซีเมนต์กลุ่มนี้มีข้อเด่นในด้านการใช้งานที่ง่ายและขั้นตอนน้อย บางการศึกษาจึงแนะนำให้ใช้ทดแทนซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของน้ำ (Water-base cement) เช่น ซิงค์ฟอสเฟต (Zinc phosphate) หรือกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (Glass ionomer cement) เป็นต้น เพราะแม้ว่าจะมีค่าความแข็งแรงของพันธะที่น้อยกว่าเรซินซีเมนต์กลุ่มอื่นๆ แต่ก็ยังมีค่าความแข็งแรงของพันธะมากกว่ากลุ่มซีเมนต์แบบทั่วไปหรือในวัสดุบูรณะที่ไม่มีความจำเป็นต้องการการยึดติดจากสารยึดติดในบางกรณีเป็นต้น^[14-16] ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เรซินซีเมนต์ในระบบนี้ได้แก่ RelyX™ U200, Maxem™, Multilink™ sprint เป็นต้น

2. การแบ่งประเภทตามลักษณะการบ่มตัวของวัสดุ ในการแบ่งประเภทนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

2.1 เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง (Self-cure resin cements) เรซินซีเมนต์ที่มีการบ่มตัวด้วยตัวเองจำเป็นต้องมีตัวเริ่มปฏิกิริยาซึ่งตัวเริ่มนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีและให้เป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ โดยตัวเริ่มมักจะใช้เป็นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) ที่ทำปฏิกิริยาร่วมกับเอมีนตติยภูมิชนิดอะโรมาติกหรืออาจเป็นสารประกอบชนิดอื่นตามแต่บริษัทผู้ผลิตจะพัฒนาวัสดุขึ้นมา ด้วยเหตุนี้ทำให้วัสดุมีบรรจุภัณฑ์แยกออกเป็น 2 ส่วนประกอบไปด้วยเบส (Base) และแคตตาลิสต์ (Catalyst) มีการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปเอมีนตติยภูมิจะมีผลทำให้สีของเรซินซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป^[24, 25] ไม่เหมาะแก่การใช้งานในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับความสวยงาม ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสมกับงานที่ใช้ร่วมกับวัสดุบูรณะที่บดแสง (Opacity) และไม่สามารถฉายแสงผ่านเข้าไปได้ จำเป็นต้องอาศัยเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองเพื่อหวังผลให้มีการเกิดพอลิเมอร์ได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้วัสดุจำเป็นต้องมีเวลาผสม (Mixing time) เวลาทำงาน (Working time) และเวลาแข็งตัว (Setting time) ตามแต่ที่บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดมา ดังนั้นหากต้องการยึดชิ้นงานหลายๆชิ้นพร้อมกันหรือจำเป็นต้องใช้เวลาในการยึด

ขึ้นงานนาน อาจเปลี่ยนไปเลือกใช้กลุ่มซีเมนต์ที่มีการบ่มตัวด้วยแสงเพื่อหวังผลให้มีระยะเวลาในการทำงานมากขึ้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เรซินซีเมนต์ในระบบนี้ได้แก่ Superbond C&B™

2.2 เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยแสง (Light-cure resin cements) เรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้จะมีตัวเริ่มปฏิกิริยาเป็นแคมฟอร์ควิโนน (Camphorquinone) ที่ตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงและมีสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาร่วมกัน (Co-initiator) คือเอมีนตติยภูมิกระตุ้นให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระเพื่อทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพอลิเมอร์ขึ้นได้ ใช้ตัวกระตุ้น (Activator) เป็นพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปตามประเภทของตัวเริ่มในวัสดุ ความยาวคลื่นที่มีใช้กันมากที่สุดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 468 - 470 นาโนเมตร ^[26] ซึ่งเป็นช่วงที่ให้แสงออกมาเป็นสีฟ้า ด้วยเหตุนี้วัสดุบูรณะที่ใช้งานร่วมกับเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยแสงจำเป็นที่จะต้องมีความโปร่งแสงเพียงพอที่จะให้แสงจากเครื่องฉายแสงส่องผ่านลงไปยังเรซินซีเมนต์ที่อยู่ใต้ต่อวัสดุบูรณะ การฉายแสงผ่านวัสดุบูรณะแม้ว่าจะแสงจะสามารถส่องผ่านวัสดุในกลุ่มคอมโพสิตเรซิน (Composite resin) หรือกลุ่มเซรามิกกล้วนได้บ้าง แต่ส่วนประกอบวัสดุ ความหนา และสีของวัสดุบูรณะจะมีผลต่อการลดทอนความเข้มแสงลง ^[3-6] ดังนั้นการฉายแสงให้ได้ระยะเวลาตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดแนะนำจึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรละเลย ในขณะเดียวกันเมื่อยึดชิ้นงานและยังไม่ได้ฉายแสงให้ครบตามระยะเวลาที่กำหนด ทันตแพทย์จำเป็นต้องควบคุมความชื้นจากสภาพแวดล้อมในช่องปากไม่ให้เกิดการปนเปื้อนเข้าสู่วัสดุเรซินซีเมนต์ซึ่งจะมีผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดพอลิเมอร์อีกด้วย ^[4] ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เรซินซีเมนต์ในระบบนี้ได้แก่ Variolink™ Veneer, Variolink™ II เป็นต้น

2.3 เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วม (Dual-cure resin cements) เรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้จะผสมข้อเด่นของกลุ่มที่บ่มตัวด้วยตัวเองและกลุ่มที่บ่มตัวด้วยแสงเข้าไว้ด้วยกันเพื่อขจัดข้อเสียของทั้งสองกลุ่มดังที่กล่าวมาข้างต้นและหวังผลการเกิดพอลิเมอร์ที่สมบูรณ์ในกรณีที่วัสดุบูรณะโปร่งแสงที่มีความหนาหรือกรณีที่เป็นวัสดุบูรณะทึบแสง ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ของเรซินซีเมนต์ในกลุ่มนี้จึงยังคงแบ่งออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกันกับกรณีเรซินซีเมนต์ที่บ่มตัวด้วยตัวเองที่หวังผลของปฏิกิริยา ในขณะเดียวกันภายในส่วนเบสของเรซินซีเมนต์จะมีส่วนประกอบเป็นตัวเริ่มที่ใช้การบ่มด้วยแสงนั่นคือแคมฟอร์ควิโนนเข้าไปด้วย ดังนั้นเมื่อมีการเกิดพอลิเมอร์จะสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ตามสถานการณ์ที่มีความเข้มแสงแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น แต่ข้อจำกัดที่ระบบนี้ยังคงมีอยู่นั้นคือจากส่วนประกอบของเรซินซีเมนต์ที่ยังคงมีเอมีนตติยภูมิชนิดอะโรมาติกอยู่พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีการเปลี่ยนสีของเรซินซีเมนต์อยู่ ^[24, 25] และยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ในแง่การใช้งานกรณีวัสดุบูรณะที่มีสภาพทึบแสงอย่างวัสดุบูรณะชนิดโลหะหรือวัสดุบูรณะชนิดโลหะเคลือบพอร์ซเลนที่ให้ผลค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ได้รับแสงในการ

บ่มตัวอย่างเพียงพอ แต่เมื่อเวลาผ่านไปยี่สิบสี่ชั่วโมง ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทางคลินิก [4, 6, 8, 27, 28] หรือถ้าฉายแสงให้นานขึ้นในวัสดุบูรณะที่นำแสงได้ก็สามารถลดเซกการลดทอนของแสงได้ มีการศึกษาที่พบว่าปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยตัวเองของเรซินซีเมนต์ชนิดนี้ยังมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แสงร่วมในการบ่มตัวก่อนเพื่อเป็นจุดตั้งต้นในการเกิดอนุมูลอิสระ [5, 9, 10, 12] ซึ่งผลของการศึกษานี้พบว่าเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมจะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ต่ำหากไม่ได้รับการบ่มตัวด้วยแสงเลย แต่จะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับการบ่มตัวด้วยแสงซึ่งแม้ว่าจะเป็นเพียงการฉายแสงผ่านสิ่งกีดขวางที่สามารถลดทอนความเข้มแสงลงได้อย่างการฉายแสงผ่านแผ่นเรซินคอมโพสิตหรือวัสดุเซรามิกที่มีความหนามากกว่า 2 มิลลิเมตร [5, 12, 29] โดยตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เรซินซีเมนต์ในระบบนี้ได้แก่ Panavia™ V5, RelyX™ U200, Multilink™ Automix เป็นต้น

ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

เรซินซีเมนต์มีองค์ประกอบย่อยหรือมอนอเมอร์ (Monomer) เป็นหมู่เมทาคริเลต (Methacrylate) ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลประกอบไปด้วยพันธะคู่ของคาร์บอนสายตรง (Aliphatic carbon-to-carbon double bond; $C=C_{\text{Aliphatic}}$) ครั้นเมื่อเกิดอนุมูลอิสระขึ้นจากทั้งปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยแสงหรือปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยตัวเองแล้ว อนุมูลอิสระดังกล่าวจะเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งพันธะคู่ของหมู่เมทาคริเลตซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นและอนุมูลอิสระดังกล่าวจะเข้าไปแย่งจับกับอิเล็กตรอนจึงเกิดการแตกตัวของพันธะคู่ออกมา เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นประกอบไปด้วยพันธะคู่ของคาร์บอนแบบวงแหวน (Aromatic carbon-to-carbon double bond; $C=C_{\text{Aromatic}}$) และมีอิเล็กตรอนอิสระเหลืออยู่ที่ชั้นนอกสุดของลำดับชั้นพลังงาน ซึ่งตำแหน่งนี้สามารถเกิดการจับคู่กันกับหมู่เมทาคริเลตที่มีอิเล็กตรอนอิสระเหลืออยู่ เกิดเป็นการแพร่ขยายของสายโซ่ของพอลิเมอร์ (Polymerization chain propagation) และนอกจากนี้ยังมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโครงข่ายในเชิงสามมิติขึ้นเรียกว่าการเกิดพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงข้าม (Cross-link polymerization) กระทั่งหมู่เมทาคริเลตได้รับการจับคู่ครบและไม่มีตำแหน่ง อิเล็กตรอนอิสระเหลืออยู่แล้วปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์จึงเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ดังนั้นค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์จึงหมายรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงจากพันธะคู่ของโมเลกุลกลายเป็นพันธะเดี่ยวนั่นเอง ในปัจจุบันยังไม่มีการระบุค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ที่เป็นค่าจำเพาะค่าใดค่าหนึ่ง โดยทั่วไปวัสดุคอมโพสิตเรซินที่ใช้ในการบูรณะฟันจะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่อยู่ในช่วงร้อยละ 50-70 [4, 5, 30, 31] เพื่อบรรลุคุณสมบัติของวัสดุที่ยอมรับได้ทางคลินิก

ดังนั้นเรซินซีเมนต์ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานที่เหมือนกันกับคอมโพสิตเรซินจึงควรมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้วัสดุสามารถแสดงประสิทธิภาพได้อย่างสูงสุด

มีบางการศึกษาที่ผ่านมามีพบว่าการใช้เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมหรือเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองที่ใช้งานร่วมกับสารยึดติดชนิดเซลฟ์เอ็ทซ์ทั้งระบบสองขั้นตอน หรือหนึ่งขั้นตอน จะเกิดปัญหาความไม่เข้ากัน เนื่องจากในการเกิดพอลิเมอร์เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองนั้น จำเป็นต้องมีเอมีนตติยภูมิเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับเบนโซิลเปอร์ออกไซด์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเกิดเป็นอนุมูลอิสระและเริ่มปฏิกิริยาการในการเกิดพอลิเมอร์ขึ้น ซึ่งหากชั้นของสารยึดติดที่เป็นชนิดเซลฟ์เอ็ทซ์ซึ่งมีส่วนประกอบของมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดอยู่และสารยึดติดที่ทาลงบนผิวตัวฟันนั้นชั้นผิวนอกสุดจะเกิดชั้นออกซิเจนอินฮิบิต โดยในชั้นนี้จะอุดมไปด้วยมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรด และถ้าหากมอนอเมอร์เหล่านี้มีค่าความเป็นกรดหรือค่าพีเอชน้อยกว่าสาม ($\text{pH} < 3$) มอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดจะไปทำปฏิกิริยากัด-เบสกับเอมีนตติยภูมิและหยุดยั้ง (Deactivate) การทำงานของอนุมูลอิสระส่งผลให้มีการเกิดพอลิเมอร์ลดลง^[12, 13] ด้วยเหตุนี้ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมาใหม่ขึ้นจึงมีการเติมเกลือของกรดอะโรมาติกซัลฟีนิก เพื่อหวังผลให้ไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่างเบนโซิลเปอร์ออกไซด์และเอมีนตติยภูมิสามารถดำเนินต่อและเกิดเป็นอนุมูลอิสระต่อไปได้ ดังนั้นกระบวนการบ่มตัวด้วยตัวเองจึงสามารถเกิดขึ้นต่อไปได้ และมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงขึ้น แต่มีบางการศึกษา^[12] พบว่าภาวะความไม่เข้ากันนี้ไม่ได้เป็นเพียงแค่ว่าปัจจัยเดียวเท่านั้นที่มีผลต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ แต่ยังมีปัจจัยด้านอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องอีก อาทิเช่น คุณสมบัติจำเพาะของเรซินซีเมนต์ชนิดที่ใช้ ปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่างเบนโซิลเปอร์ออกไซด์และเอมีนตติยภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยตัวเองของเรซินซีเมนต์ (Self-cure components) ที่ใช้ เป็นต้น

อุปกรณ์การฉายแสงเพื่อการบ่มตัวด้วยแสงของเรซินซีเมนต์

ในการบ่มตัวด้วยแสงของวัสดุ เพื่อให้วัสดุเกิดพอลิเมอร์ได้อย่างสมบูรณ์ส่วนประกอบที่สำคัญของวัสดุจำเป็นจะต้องมีตัวเริ่มที่สามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง เช่น แคมฟอร์ควิโนน ทีพีโอ (2,4,6-Trimethylbenzoyldiphenylphosphine oxide; TPO) พีพีดี (1-phenyl-1,2-propanedione; PPD) หรือไอโวเซอร์ลิน (Ivocerin™) เป็นต้น ซึ่งตัวเริ่มปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยแสงเหล่านี้จะดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นของแสงอยู่ในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) โดยแต่ละชนิดจะตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไป^[26] ตัวเริ่มปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยแสงที่นิยมใช้ในเรซินซีเมนต์คือแคมฟอร์ควิโนนที่มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาว

คลื่น 468 – 470 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นแสงที่มีสีฟ้า^[26] ทั้งนี้อุปกรณ์ในทางทันตกรรมที่ถูกออกแบบมาเพื่อการบ่มวัสดุที่มีตัวเริ่มต่าง ๆ นั้น จะถูกออกแบบมาให้ฉายแสงที่มีความยาวคลื่นครอบคลุมความยาวคลื่นของตัวเริ่มในวัสดุเพียงแต่อุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันตรงที่ผู้ผลิตออกแบบให้อุปกรณ์ฉายแสงนั้นฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้างหรือแคบหรือมีแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปล่อยแสงออกมาได้หลายความยาวคลื่นตามแต่วัสดุบูรณะจะตอบสนองต่อความยาวคลื่นที่จำเพาะได้

หนึ่งเครื่องฉายแสงที่ใช้ในทางทันตกรรมมีหลากหลายชนิดเช่น เครื่องฉายแสงชนิดควอตซ์ทังสเตนฮาโลเจน (Quartz-tungsten-halogen lights; QTH) ชนิดพลาสมาอาร์ค (Plasma-arc lights; PAC) ชนิดเลเซอร์อาร์กอนไอออน (Argon-ion lasers) ชนิดไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดี (Light-emitting diodes; LED) ซึ่งปัจจุบันนิยมที่สุดจะเป็นชนิดไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดีเนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัดพกพาได้สะดวก มีในรูปแบบไร้สาย ผลิตแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม มีความสว่างและความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อวัสดุบูรณะตามท้องตลาดในปัจจุบัน เช่นเดียวกันที่ผู้ผลิตหลายบริษัทได้ทำการแข่งขันกันทำให้ราคาของอุปกรณ์ฉายแสงชนิดนี้มีราคาที่ถูกลง เครื่องฉายแสงชนิดอื่นเช่นพลาสมาอาร์คหรือเลเซอร์อาร์กอนไอออนจึงลดความนิยมลงไป รวมไปถึงเครื่องฉายแสงบางชนิดได้เลิกใช้ไปในปัจจุบันแล้ว^[26]

เครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดีได้เริ่มมีการนำมาใช้ในงานทางทันตกรรมครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1990 โดยผลิตออกมาเพื่อทดแทนเครื่องฉายแสงชนิดควอตซ์ทังสเตนฮาโลเจนที่มีแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีฟ้าเช่นเดียวกัน แต่ด้วยลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดจากการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปยังไส้หลอดทังสเตน (Tungsten filament) ภายในกระเปาะคริสตัลควอตซ์ (Crystalline quartz casing) ที่บรรจุแก๊สฮาโลเจน (Halogen-based gas) และการส่องสว่างจะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านไส้หลอดก่อให้เกิดพลังงานความร้อนและแสงสว่างออกมา ดังนั้นอุปกรณ์จึงจำเป็นที่จะต้องมีการมีพัดลมระบายความร้อนที่เกิดจากการส่องสว่างนี้ขึ้นส่งผลให้เครื่องฉายแสงชนิดนี้มีขนาดใหญ่และกินพลังงานมาก แต่เครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดีจะสามารถแก้ไขข้อด้อยในจุดนี้ได้ ในช่วงเริ่มแรกจะมีเครื่องแอลอีดีรุ่นที่หนึ่ง (First-generation LEDs) ที่ให้แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแคบ (ช่วงประมาณ 470 นาโนเมตร) ที่มีความจำเพาะต่อตัวเริ่มปฏิกิริยาอย่างแคมฟอร์ควิโนนในวัสดุบูรณะเรซินคอมโพสิต เครื่องรุ่นนี้จะมีความเข้มแสงที่ต่ำโดยอยู่ในช่วง 160 – 400 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) และไม่ก่อให้เกิดความร้อนขณะผลิตแสงส่องสว่างออกมา ประหยัดพลังงานและสามารถใช้แหล่งกำเนิดพลังงานในรูปแบบของแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จไฟเข้าไปใหม่ได้ ผู้ผลิตสามารถผลิตออกมาให้มีขนาดกะทัดรัดพกพา

สะดวก ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นเครื่องแอลอีดีรุ่นที่สอง (Second-generation LEDs) ที่เพิ่มจำนวนไดโอดเปล่งแสงที่หัวของเครื่องฉายแสงซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มแสงขึ้นได้เป็น 500 – 1,400 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และเครื่องแอลอีดีรุ่นที่สาม (Third-generation LEDs) ที่มีการเพิ่มช่วงของความยาวคลื่นให้หลากหลายตามตัวเริ่มที่ได้รับการพัฒนาหลากหลายมากขึ้นในปัจจุบันนอกเหนือจากแคมฟอร์ควิโนน ^[26]

การเพิ่มความเข้มแสงในเครื่องฉายแสงชนิดแอลอีดีรุ่นใหม่ที่ออกวางจำหน่ายมีส่วนช่วยในการลดระยะเวลาในการฉายแสงวัสดุบูรณะ มีการศึกษาเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ที่มีแหล่งกำเนิดแสงมีความเข้มแสงต่างกัน โดยผลการศึกษาพบว่าด้วยระยะทางของการฉายแสงที่เท่ากันเครื่องฉายแสงที่มีความเข้มแสงมากกว่าจะทำให้เรซินซีเมนต์มีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงกว่าในเวลาเท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อใช้เครื่องฉายแสงที่มีความเข้มแสงต่ำกว่าโดนเพิ่มเวลาในการฉายให้นานขึ้น จะพบว่าค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ไม่มีความแตกต่างกัน ^[5, 6, 28]

วิธีการวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

ในการวัดค่าประมาณในการเกิดพอลิเมอร์นั้นสามารถทำได้สามวิธี ดังต่อไปนี้

1. การใช้วิธีการสั่นของโมเลกุล (Molecular vibrational methods) วิธีการนี้จะเป็นการส่งพลังงานเข้าไปกระตุ้นกับโมเลกุลของวัสดุที่จะทำการศึกษา หากพลังงานนั้นถูกดูดกลืนโดยวัสดุที่ต้องการศึกษาจะมีพลังงานบางส่วนเกิดการดูดกลืน (Absorbance) และมีพลังงานบางส่วนเกิดการกระเจิง (Scattering) ออกมา โดยธรรมชาติสารประกอบแต่ละชนิดจะมีปริมาณและคุณภาพในการดูดกลืนและเกิดการกระเจิงที่แตกต่างกัน ดังนั้นการแปลผลจะทำได้ในรูปแบบพีคของกราฟ โดยในแง่ของการวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์นั้นจะทำการวัดปริมาณพื้นที่ของคาร์บอนโดยพิจารณาจากพีคของกราฟก่อนการบ่มตัวหรือขณะหลังผสมทันที และวัดอีกครั้งเมื่อทำการบ่มตัวทั้งด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือบ่มตัวด้วยแสงแล้วนำมาเปรียบเทียบปริมาณพื้นที่ของคาร์บอนสายตรงที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งมาตรฐานภายใน (Internal standard) ซึ่งเป็นตำแหน่งในโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดพอลิเมอร์แล้ว โดยเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเกิดพอลิเมอร์นั้นจะสามารถนำมหาร้อยละค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ (%DC) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนขององค์ประกอบของโครงสร้างโมเลกุลระหว่างก่อนและหลังการเกิดพอลิเมอร์นั่นเอง โดยค่าการดูดกลืนพลังงาน (Absorbance peaks) ^[5, 8, 9, 12, 21, 32, 33] ของพื้นที่ของคาร์บอนสายตรงที่สามารถเปลี่ยนแปลง

ได้หลังจากเกิดพอลิเมอร์จะอยู่ในช่วง $1,635 - 1,640 \text{ cm}^{-1}$ เปรียบเทียบกับตำแหน่งมาตรฐานภายในที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเมื่อเกิดพอลิเมอร์แล้ว ตำแหน่งมาตรฐานภายในมักจะเลือกใช้ตามโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นในการหาค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์จะมีทั้งการใช้ค่าการดูดกลืนพลังงานของพันธะคู่คาร์บอนวงแหวนจะอยู่ในช่วง $1,607 - 1,610 \text{ cm}^{-1}$ และพันธะคู่คาร์บอนวงแหวนในช่วงความยาวคลื่น 1582 cm^{-1} ในกรณีที่สารตั้งต้นหรือเรซินซีเมนต์ชนิดที่ต้องการทดสอบไม่มีพันธะคู่คาร์บอนวงแหวนเป็นส่วนประกอบ จะเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) ในช่วงความยาวคลื่น $1,715 - 1,730 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\%DC = \left\{ 1 - \frac{[C=C_{\text{Apliphatic}} / \text{Internal standard}]_{\text{Polymer}}}{[C=C_{\text{Apliphatic}} / \text{Internal standard}]_{\text{Monomer}}} \right\} \times 100$$

ภาพประกอบ 2 แสดงสมการหาคร่าวๆปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

การใช้วิธีการสั่นของโมเลกุลจะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

1.1 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy; IR)

เทคนิคนี้จะอาศัยการฉายรังสีอินฟราเรด (Transmitted Infrared) ส่องผ่านไปยังสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา โดยปกติแล้วพันธะของอะตอมภายในโมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบของสารประกอบที่ต้องการศึกษาจะเกิดการสั่น (Vibration) ที่ความถี่จำเพาะค่าหนึ่ง และหากแสงอินฟราเรดที่ส่องผ่านโมเลกุลนั้นมีความถี่เท่ากับค่าความถี่การสั่นพันธะของอะตอมจะเกิดการดูดกลืนพลังงานหรือเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) รังสีอินฟราเรดที่ส่องผ่านจะไปตกกระทบกับตัวรับซึ่งจะแปลผลได้ตามค่าความถี่ที่เกิดการดูดกลืนไป จุดเด่นของเทคนิคนี้คือมีราคาถูกถ้าเปรียบเทียบกับวิธีการสั่นของโมเลกุลอื่นๆและการสั่นของพันธะที่เกิดขึ้นจะสั่นแบบไม่สมมาตร (Asymmetric vibrational mode) ซึ่งการสั่นแบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือมีการเตรียมชิ้นงานหลายขั้นตอนประกอบกับภาชนะบรรจุและตัวทำลายสารที่ต้องการศึกษาจำเป็นต้องไม่มีการดูดกลืนพลังงานในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดช่วงเดียวกับสารที่ต้องการศึกษาอีกด้วยเพราะจะทำให้เกิดการรบกวนการดูดกลืนของ

สารที่ต้องการศึกษา เช่นเดียวกับชิ้นตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลวหรือสารละลายจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ เพราะพันธะโมเลกุลของน้ำจะสั้นจากการดูดกลืนพลังงานไปด้วยผลที่ได้จึงถูกรบกวน ซึ่งเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีนี้สามารถแบ่งได้เป็น

1.1.1 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแบบดิสเพอร์ซีฟ (Dispersive Infrared Spectroscopy)

1.1.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

1.2 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

วิธีนี้จะแตกต่างจากวิธีอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีตรงที่ใช้หลักการการกระเจิงแสง (Scattering) โดยปกติแล้วเมื่อโฟตอน (Photon) ของแสงตกกระทบกับวัตถุ โฟตอนจะถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนให้มีค่าพลังงานสูงขึ้นอยู่ในสถานะเร้า เมื่ออิเล็กตรอนมีการคายพลังงานให้กลับมาอยู่สภาวะปกติแล้วจะมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาเกิดเป็นการกระเจิงแสงขึ้น ซึ่งถ้าหากพลังงานที่ถูกคายออกมามีปริมาณเท่ากับพลังงานเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบดังนั้นจะเกิดการกระเจิงที่เรียกว่าการกระเจิงแบบเรย์ไลย์ (Reyleigh Scattering) ซึ่งการกระเจิงลักษณะนี้จะมีพลังงานคงที่ไม่เกิดการสูญเสียหรือหายไป (Elastic process) และเกิดเป็นส่วนใหญ่ของปรากฏการณ์ทั้งหมด แต่จะมีการกระเจิงของแสงอีกลักษณะหนึ่งที่ปรากฏขึ้นเพียงเพียง 1 ใน 10^6 จากเหตุการณ์ทั้งหมดและเรียกลักษณะนี้ว่าการกระเจิงแบบรามาน (Raman Scattering) กล่าวคือเมื่อเกิดการกระเจิงของแสงแล้วอิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาให้พลังงานหรือความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจากแสงที่ตกกระทบ ซึ่งการคายพลังงานของอิเล็กตรอนนี้จะมีสองรูปแบบ ในกรณีแรกคืออิเล็กตรอนคายพลังงานลดลงจากพลังงานตั้งต้นจะเรียกว่าการกระเจิงแบบสโตค (Stoke Scattering) ที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ของเหตุการณ์ แต่ในกรณีที่สองคือถ้าอิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาแล้วมากกว่าพลังงานตั้งต้นจะเรียกว่าการกระเจิงแบบแอนไทสโตค (Anti-stoke Scattering) ดังนั้นผลต่างของพลังงานตั้งต้นของลำแสงตกกระทบกับพลังงานสุดท้ายหลังการคายพลังงานจะนำมาแปลผลเป็นค่าจำเพาะของสารประกอบที่จำเพาะ สิ่งที่น่าสนใจคือผลต่างของค่าพลังงานนี้จะเทียบเท่ากับค่าพลังงานหรือความถี่ที่ใช้ในการสั่นพันธะของอะตอมในเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ดังนั้นการแปลผลของเทคนิคทางรามานจะแปลผลได้ด้วยกราฟของค่าการดูดกลืนพลังงานได้เช่นเดียวกัน อนึ่งข้อดีของเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีคือใช้แสงตกกระทบและการกระเจิงของแสงดังนั้นจึงไม่มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงาน ประกอบกับชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายหลังทดสอบไปแล้ว ภาชนะที่ใช้บรรจุชิ้นงานหรือตัวทำ

ละลายจะไม่มีผลต่อผลของการศึกษาด้วย เนื่องด้วยพันธะของอะตอมเกิดการสั่นแบบสมมาตร (Symmetrical vibrational mode) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์อย่างเช่นในกรณีของพันธะคู่ของคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบของเรซินซีเมนต์จะสามารถดูดกลืนได้ดี น้ำในสารละลายซึ่งมีสภาพขี้จะไม่เกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้ไม่รบกวนการแปลผลของสัญญาณได้^[32, 34] โดยเทคนิคทางรามานแบ่งได้เป็น 2 วิธีการ ได้แก่

1.2.1 เทคนิคทางรามานแบบดิสเพอร์ซีฟ (Dispersive Raman Spectroscopy)

1.2.2 เทคนิคทางฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Raman Spectroscopy)

2. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry) วิธีการนี้จะใช้หลักการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของวัสดุเปรียบเทียบกับวัสดุอ้างอิงหรือสารมาตรฐานชนิดหนึ่งหรือวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) โดยหลักการวัดค่านี้จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) ซึ่งจะเป็นเตาอบให้ความร้อนโดยมีตู้สองฝั่งซึ่งประกอบไปด้วยถาด (Pan) ตู้ด้านหนึ่งใส่วัสดุที่ต้องการทดสอบ ส่วนตู้ด้านตรงข้ามจะเป็นวัสดุอ้างอิงส่วนมากจะใช้เป็นถาดเปล่าที่ไม่ได้ใส่วัสดุใด ส่วนตู้ด้านที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบเมื่อให้ความร้อนไปแล้ววัสดุที่มีมวลมากกว่าจะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการทำให้อุณหภูมิเทียบเท่ากับตู้ด้านตรงข้ามที่เป็นถาดเปล่าในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นค่าเฉพาะของสารที่ต้องการทดสอบนั้นๆ ซึ่งวิธีนี้มีเคยมีการศึกษาที่สามารถนำไปวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของทั้งเรซินซีเมนต์และวัสดุทางทันตกรรมอื่นๆได้^[35]

3. การใช้วิธีหาความแข็งของผิวในระดับไมโคร (Microhardness measurements) วิธีการนี้เป็นวิธีวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ได้ทางอ้อม สามารถใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สในระดับไมโคร (Vicker's microhardness measurements) หรือใช้การทดสอบความแข็งแบบนูบ (Knoop's microhardness measurement) กระทำโดยใช้หัวกดกดลงบนผิวของวัสดุที่ต้องการศึกษาไปในหลายตำแหน่งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยจากความลึกที่กดลงไปได้ในปริมาณแรงและเวลาที่กำหนดไว้ก่อน ทั้งนี้หากเรซินซีเมนต์มีการเกิดพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจะมีความแข็งของผิวที่เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งถ้าเทียบกับเรซินซีเมนต์ที่ไม่มีการเกิดพอลิเมอร์ที่สมบูรณ์ค่าความแข็งของผิวจะมีค่าน้อย^[5, 6, 21] วิธีนี้จะป็นวิธีที่นิยมใช้วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์เพื่อเปรียบเทียบควบคุมหรือเสริมสองวิธีการแรกทีกล่าวมาข้างต้น

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและความสำคัญของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์นั้นมีความสำคัญในการทำงานทางคลินิกไม่น้อยไปกว่าคุณสมบัติประการอื่นของเรซินซีเมนต์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องและมีผลต่อความสำเร็จของงานบูรณะทางทันตกรรมทั้งสิ้น หากวัสดุมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ไม่เพียงพอต่อการใช้งานทางคลินิก วัสดุจะมีคุณสมบัติด้านอื่นด้อยลงไปจากที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ ดังนั้นคุณสมบัติบางประการของวัสดุกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์มีดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์และลักษณะการบ่มตัวของวัสดุ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าเรซินซีเมนต์ที่มีการบ่มตัวด้วยแสงหากได้รับการฉายแสงที่มีความเข้มแสงที่มากพอและระยะเวลาที่พอเหมาะจะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่สูงกว่าเรซินซีเมนต์ที่มีการบ่มตัวด้วยตัวเอง^[4, 12] ในส่วนของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวรวมนั้น แม้ว่าเดิมที่ผู้ผลิตมีความคาดหวังว่าจะช่วยส่งเสริมปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในตำแหน่งที่ไม่สามารถฉายแสงหรือแสงเข้าถึงได้ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองเป็นตัวช่วยให้การเกิดพอลิเมอร์นั้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้นไป แต่จากผลการศึกษาส่วนใหญ่พบว่าเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวรวมนั้นยังมีความจำเป็นต้องใช้แสงในการบ่มตัวอยู่จึงสามารถให้ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่สูงเพียงพอต่อการใช้งานจริงทางคลินิก^[5, 9, 10, 12] มีการศึกษาพบว่าเซลฟ์แอดฮีซีฟเรซินซีเมนต์หากใช้ระบบในการบ่มวัสดุด้วยปฏิกิริยาทางเคมีเพียงอย่างเดียวจะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ลดลงถึงร้อยละ 11^[36] และค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์นี้จะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ของบริษัท โดยความแตกต่างของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวรวมนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเบนโซิลเปอร์ออกไซด์และเอมีนตติยภูมิซึ่งเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง ซึ่งหากมีปริมาณที่ผสมในส่วนประกอบของเรซินซีเมนต์มากจะทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองเพิ่มมากยิ่งขึ้น^[4]

2. ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์และคุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมักจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีแรงกระทำเกิดขึ้นต่อวัสดุซึ่งมีรายงานการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์และคุณสมบัติเชิงกลเป็นจำนวนหลายการศึกษา โดยส่วนมากจะเห็นพ้องกันคือเมื่อเรซินซีเมนต์มีการเกิดพอลิเมอร์ที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้มีค่าคุณสมบัติเชิงกลลดลงไปทั้งค่าความแข็งของผิวที่ลดลง กำลังดัดขวาง (Flexural strength) ลดลง ความทนแรงอัด (Compressive strength) ลดลงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ลดลง^[4, 5, 11] Zhang และคณะ^[11] ได้ทำการศึกษการเปรียบเทียบเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวรวมนั้นในตำแหน่งต่างๆของการยึดติดเฉื่อยพื้นสำเร็จรูปชนิด

โปร่งแสง (Translucent prefabricated fiber post) ภายในคลองรากฟันพบว่าในตำแหน่งบริเวณคอปันที่ได้รับปริมาณแสงจากเครื่องฉายแสงมากที่สุดจะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงกว่าเรซินซีเมนต์ในตำแหน่งใกล้เคียงรากฟันที่แสงจากเครื่องฉายแสงเข้ามาไม่ถึงหรือน้อยมาก เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมถ้าหากใช้แสงในการฉายเพื่อบ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์จะมีค่าความแข็งแรงของผิวที่สูงขึ้นกว่าการบ่มตัวด้วยปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเดียว เช่นเดียวกับการศึกษาของ Ilie^[20] พบว่าเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมมีค่าความแข็งแรงผิววิกเกอร์สอยู่ในช่วง 14.77 N/mm² และ 65.87 N/mm² แต่ในขณะที่เรซินซีเมนต์ที่เป็นชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองจะมีค่าความแข็งแรงผิววิกเกอร์สอยู่ในช่วง 1.79 N/mm² และ 50.99 N/mm² และมีการศึกษาที่ให้ผลในลักษณะเดียวกันคือเมื่อใช้เรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมแต่เมื่อจำกัดวิธีการบ่มตัวให้เหลือเพียงแค่การบ่มตัวด้วยตัวเองแล้วจะทำให้กำลังดัดขวางลดลงร้อยละ 68.9 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงร้อยละ 59.2 และค่าความแข็งแรงของผิวลดลงร้อยละ 91.1^[4]

3. ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์กับคุณสมบัติเชิงกายภาพ

คุณสมบัติเชิงกายภาพนั้นจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุซึ่งมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ เรซินซีเมนต์ที่มีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงจากการการบ่มตัวที่สมบูรณ์จะทำให้เรซินซีเมนต์มีความเหนียวความแข็งแรงผิวที่สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันมีการศึกษาพบว่าเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงและมีอัตราส่วนของปริมาณวัสดุอัดแทรกที่เพิ่มสูงขึ้นกลับมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ต่ำกว่าเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดต่ำกว่า^[8, 37] มีสาเหตุเพราะในขณะที่เกิดพอลิเมอร์จะมีการเคลื่อนที่ของอนุมูลอิสระเพื่อทำปฏิกิริยาต่อเป็นสายโซ่ขึ้นซึ่งในเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงจะทำให้การเคลื่อนที่ของอนุมูลอิสระลดลงและทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ยากกว่าเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดต่ำ

4. ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์กับคุณสมบัติเชิงเคมี

เรซินซีเมนต์ที่มีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ต่ำพบว่ามีค่าการละลายน้ำ^[4, 6, 36, 38] เพิ่มขึ้น และมีการศึกษาพบว่าอาจมีการชะละลายออกสู่สภาวะช่องปากแต่ก็ยังอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ (Subcytotoxic level)^[38] มีการดูดน้ำ (Water sorption) และเกิดภาวะเสื่อม (Degradation) ได้เร็วยิ่งขึ้นและทำให้ค่าความแข็งแรงของพันธะลดลงเป็นผลทำให้เกิดการละลายน้ำของซีเมนต์โดยเฉพาะตำแหน่งเส้นจบของฟัน (Finish line) และบริเวณขอบวัสดุบูรณะ (Margins) ทำให้เกิดการยึดติดที่ไม่แข็งแรงและเกิดภาวะฟันผุซ้ำ (Secondary caries) ขึ้นได้^[4, 6]

อีกหนึ่งเหตุผลที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงเคมี นั่นคือปัจจุบันนี้ในทางอุตสาหกรรมได้มีการใช้สารประกอบจำพวกบิสฟีนอลเอ เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเครื่องใช้ประเภทพลาสติกในชีวิตประจำวันเช่น ขวดพลาสติกบรรจุน้ำ ขวดนมของเด็ก กล่องพลาสติก หรือแม้กระทั่งสารเคลือบกระป๋องโลหะ เป็นต้น ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการเฝ้าระวังการใช้สารประกอบบิสฟีนอลเอในอุตสาหกรรมการผลิตเป็นวงกว้าง^[17] เนื่องจากมีรายงานการศึกษาพบว่าบิสฟีนอลเอมีผลต่อร่างกายในระบบต่อมไร้ท่อในสัตว์ทดลอง เพราะบิสฟีนอลเอสามารถประพฤติตัวเสมือนเป็นฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogen) ทั้งนี้บิสฟีนอลเอมีแนวโน้มที่จะเกิดพันธะขนาดอ่อนกับเอสโตรเจนรีเซปเตอร์ (Estrogen receptor)^[17] ผลที่เกิดขึ้นจากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าหนูเพศเมียมีมดลูกขนาดใหญ่ผิดปกติและมีการแบ่งเซลล์สืบพันธุ์ที่มากผิดปกติ เมื่อได้รับสารบิสฟีนอลเอเข้าสู่ร่างกายตั้งแต่วัยในครรภ์

หนูเพศเมียพบว่ามีต่อมน้ำนมโตกว่าปกติเมื่อได้รับสารบิสฟีนอลเอเข้าสู่ร่างกายตั้งแต่วัยในครรภ์^[17, 18, 39] และยังมีการศึกษาอื่นพบว่าสัตว์ทดลองที่ได้รับสารบิสฟีนอลเอเข้าสู่ร่างกายตั้งแต่วัยในครรภ์แล้วเมื่อถึงเวลาเจริญพันธุ์จะมีจำนวนทายาทลดลงและทายาทที่คลอดออกมาจะมีน้ำหนักตัวลดลงและจะมีการเข้าสู่ช่วงวัยเจริญพันธุ์ช้าลง^[17]

ในทางทันตกรรมมีการใช้บิสฟีนอลเอเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุบูรณะบางชนิดแต่สารประกอบนี้ไม่ได้อยู่ในรูปแบบของบิสฟีนอลเอบริสุทธิ์ แต่จะอยู่ในรูปแบบอนุพันธ์ของบิสฟีนอลเอ ซึ่งพบมากที่สุดจะเป็นวัสดุในกลุ่มเรซินคอมโพสิตและวัสดุเคลือบหลุมร่องฟัน (Sealant) ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นบิสฟีนอลเอไกลซิไดลไดเมทาคริเลตหรือบิสจีเอ็มเอ (Bisphenol A-glycidyl methacrylate; Bis-GMA) หรือในรูปแบบอนุพันธ์อื่นเช่น บิสฟีนอลเอไดเมทาคริเลตหรือบิสดีเอ็มเอ (Bisphenol A-dimethacrylate; Bis-DMA) หรือบิสฟีนอลเอไดไกลซิไดลอีเธอร์ (Bisphenol A-diglycidylether; BADGE) เป็นต้น มีการศึกษาพบว่าอนุพันธ์ของบิสฟีนอลเอเหล่านี้มักจะอยู่ในมอนอเมอร์ที่เป็นของเหลวโดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีการเกิดพอลิเมอร์ขึ้นได้ อย่างไรก็ตามบูรณะทำให้หลงเหลือมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ถูกทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่ออนุพันธ์บางชนิดอย่างบิสดีเอ็มเอเมื่อสัมผัสกับน้ำลายที่มีเอนไซม์เอสเตอเรส (Esterase) ในช่องปากแล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) แล้วแตกตัวให้เป็นบิสฟีนอลเอ แต่ในขณะที่อนุพันธ์อีกกลุ่มหนึ่งคือบิสจีเอ็มเอพบว่าไม่ได้เกิดปฏิกิริยาและให้เป็นผลิตภัณฑ์ดังกล่าว^[40] อนุพันธ์ของบิสฟีนอลเอเหล่านี้สามารถพบได้เป็นร้อยละ 20 ถึง 45 ของมอนอเมอร์ส่วนตกค้างที่หลงเหลือจากการเกิดพอลิเมอร์ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งมอนอเมอร์เหล่านี้จะพบมากที่สุดในบริเวณชั้นออกซิเจนอินิเอด^[17, 41] มีผลการศึกษาของ Joskaw และคณะพบว่าปริมาณของบิสฟีนอลเอเพิ่มขึ้นในน้ำลายถึงแปดสิบแปด

เท่าจากค่ามาตรฐาน (26.5 นาโนกรัม/มิลลิลิตร) ในทันทีหลังจากทำการเคลือบหลุมร่องฟันที่มี ส่วนประกอบของบิสดีเอ็มเอ และลดลงเหลือสิบเจ็ดเท่าจากค่ามาตรฐานเมื่อเวลาผ่านไปหนึ่ง ชั่วโมงแต่ไม่พบผลการศึกษาลักษณะนี้ในบิสจีเอ็มเอ^[42] และการศึกษาของ Becher และคณะ พบว่ามีบิสฟีนอลเอในสารละลายน้ำที่ทำการแช่เรซินคอมโพสิตและวัสดุเคลือบหลุมร่องฟันใน เวลาสี่สิบสี่ชั่วโมง แต่ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไปเป็นสองสัปดาห์ แต่อย่างไรก็ตามผล การศึกษานี้พบว่าปริมาณบิสฟีนอลเอที่ออกมาจากวัสดุบูรณะดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 0.04 – 9.6 นาโนกรัม/มิลลิลิตรซึ่งมีปริมาณน้อยมาก^[19] เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Kingsman และ คณะที่ศึกษาความเข้มข้นของบิสฟีนอลเอเปรียบเทียบก่อนและหลังอุดวัสดุเรซินคอมโพสิตเป็น เวลาสามสิบชั่วโมงพบว่ามีค่าความเข้มข้นของบิสฟีนอลเอในช่วงหนึ่งชั่วโมงแรกเพียง 0.21 นาโน กรัม/มิลลิลิตร และพบว่าในชั่วโมงถัดมาจะลดลงไปตามลำดับ^[43] ซึ่งหลายการศึกษาที่ผ่านมาล้วน มีค่าความเข้มข้นของบิสฟีนอลเอที่พบในน้ำลายมีน้อยมากหากเทียบกับเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดโดย สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (The US Environmental Protection Agency; EPA) ที่กำหนดไว้ว่าไม่ควรสัมผัสบิสฟีนอลเอเกิน 50 ไมโครกรัม/กิโลกรัม/วัน และได้มี ข้อคำแนะนำจากสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน (American Dental Association; ADA) ว่าไม่มี ความจำเป็นที่ต้องกังวลจากผลของบิสฟีนอลเอที่ออกมาจากวัสดุทางทันตกรรมซึ่งมิให้ใช้งานอยู่ ในปัจจุบัน^[17]

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นมีข้อแนะนำว่าในการรักษาทันตกรรมบูรณะ หากเป็นไปได้ควร หลีกเลี่ยงหรือกระทำให้น้อยที่สุดในช่วงที่ผู้ป่วยหญิงมีการตั้งครรภ์ทั้งในแง่ของการเคลือบหลุมร่อง ฟันและอุดฟันด้วยวัสดุอุดเรซินคอมโพสิต และในทันตกรรมสำหรับเด็กสามารถใช้สาลีในการเช็ด ทำความสะอาดฟันหลังจากทำการเคลือบหลุมร่องฟันไปหรือบ้วนน้ำออกหลังจากเคลือบหลุมร่อง ฟันแล้วจะสามารถลดความเสี่ยงในการสัมผัสกับบิสฟีนอลเอได้^[17]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- 1.การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง
- 2.ขั้นตอนการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.การวิเคราะห์ข้อมูล

การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร

1. เรซินซีเมนต์ชนิดเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์หนึ่งผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ซีเมนต์วีโลเอ็กซ์ ยูสองร้อย โดยเรซินซีเมนต์ชนิดนี้จะเป็นเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วม
2. เรซินซีเมนต์ชนิดใช้ร่วมกับสารยึดติดหนึ่งผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ สี A2 Universal และเป็นเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมเช่นเดียวกัน โดยใช้ร่วมกับสารยึดติดจากผลิตภัณฑ์เดียวกันที่เป็นสารยึดติดระบบเซลฟ์แอ็คทีฟแบบขั้นตอนเดียว

การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

กำหนดกลุ่มตัวอย่างให้ทั้งหมดคือชิ้นงานรวมทั้งหมดแปดสิบชิ้น และกลุ่มตัวอย่างที่นำมาศึกษาจะแบ่งเป็นกลุ่มละสิบชิ้น ($n = 10$)

1. เรซินซีเมนต์ชนิดเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์ เลือกใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์วีโลเอ็กซ์ยูสองร้อย

1.1 กลุ่มควบคุม คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์ โดยฉายแสงผ่านแผ่นแก้วสไลด์ขนาดหนึ่งมิลลิเมตร เป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที ตามระยะเวลาที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

1.2 กลุ่มทดลอง คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์ โดยฉายแสงผ่านโลหะไร้สนิมเป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที ตามระยะเวลาที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

1.2.1 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที

1.2.2 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบชั่วโมง

2. เรซินซีเมนต์ชนิดที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดเลือกใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ สี A2 Universal ร่วมกับสารยึดติดจากผลิตภัณฑ์เดียวกัน

2.1 กลุ่มควบคุม คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์ โดยฉายแสงผ่านแผ่นแก้วสไลด์ขนาดหนึ่งมิลลิเมตร เป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที ตามระยะเวลาที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

2.2 กลุ่มทดลอง คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์ โดยฉายแสงผ่านโลหะไร้สนิมเป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที ตามระยะเวลาที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

2.2.1 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที

2.2.2 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมง

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเตรียมชิ้นงาน

1. แผ่นแก้วสไลด์

1.1 นำแผ่นแก้วสไลด์ขนาดมาตรฐาน (25x75x1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร) ขึ้นแรกมาเจาะช่องขนาด 10x10 ตารางมิลลิเมตร ในตำแหน่งกึ่งกลาง

1.2 นำแผ่นแก้วสไลด์ขนาดเท่ากันขึ้นที่สองมาประกบติดด้านล่างต่อแก้วสไลด์ขึ้นแรก (ภาพประกอบ 3) ยึดติดแผ่นแก้วสไลด์ทั้งสองชั้นด้วยเทปกาวทั้งด้านซ้ายและขวาเพื่อไม่ให้ชิ้นงานขยับไปมา (ภาพประกอบ 4)

1.3 แบ่งกลุ่มทดลองออกเป็นสามกลุ่มได้แก่

1.3.1 กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที โดยจะกำหนดให้ตัวย่อในกลุ่มนี้แทนว่า “SC 10 mins.”

1.3.2 กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมง โดยจะหนดให้ตัวย่อในกลุ่มนี้แทนว่า “SC 24 hrs.”

1.3.3 กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านแผ่นปิดแก้วสไลด์ โดยจะหนดให้ตัวย่อในกลุ่มนี้แทนว่า “LC”

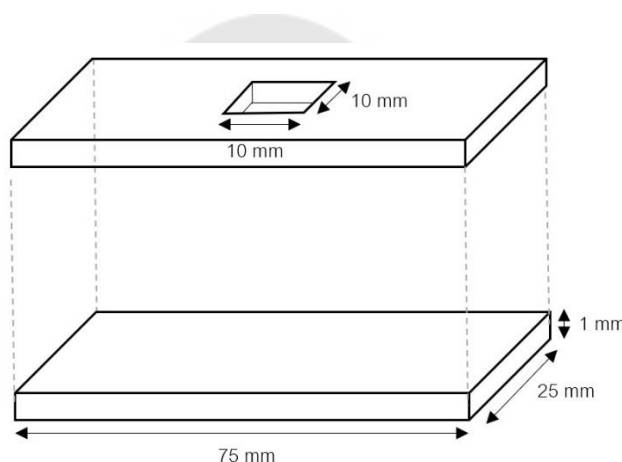
2. ผสมเรซินซีเมนต์แต่ละชนิดตามรายการจากตารางที่ 1

2.1 ซีเมนต์โรลเอ็กซ์ยูสองร้อย

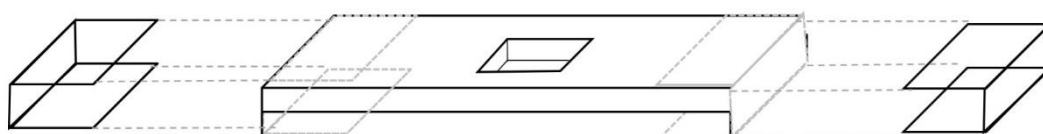
เลือกใช้ซีเมนต์ที่มาจากล็อต 4957491 และมีวันหมดอายุระบุข้างกล่องคือวันที่ 2020-08-31 กดซีเมนต์จากหลอดบรรจุภัณฑ์ 2 คลีกและผสมระหว่างเบสกับแคตาลิสต์ด้วยพายผสมซีเมนต์ (Cement spatula) ให้เข้ากันเป็นเวลา 10 วินาทีแล้วจึงนำเข้าเข้าสู่ช่องว่างที่เตรียมไว้ในแผ่นแก้วสไลด์ด้วยเซ็นทริกไซริงจ์ (Centrix Syringe) เพื่อลดฟองอากาศให้เต็มช่องว่าง

2.2 ซีเมนต์ฟานาเวียไฟร์

เลือกใช้ซีเมนต์ที่มาจากล็อต 00049 และมีวันหมดอายุระบุข้างกล่องคือวันที่ 2021-06-30 ทาสารยัดติดเป็นชั้นฟิล์มบางๆโดยทำการแตะสารยัดติดเพียงหนึ่งครั้งด้วยแปรงไมโครเบรช (Microbrush) และทำไปในทิศทางจากขอบซ้ายไปสุดยังขอบขวาของช่องว่างทั้งหมดจำนวน 4 แถวนับจากบนลงล่างซึ่งจะครอบคลุมพื้นที่ของช่องว่างพอดี พร้อมกับเป่าลมเบาๆเป็นเวลา 20 วินาทีก่อนตามคำแนะนำของบริษัท แล้วจึงผสมซีเมนต์ฟานาเวียไฟร์ สี A2 Universal ระหว่างเบสกับแคตาลีสต์จากหลอดบรรจุภัณฑ์เข้าสู่ช่องว่างที่เตรียมไว้ในแผ่นแก้วไลต์ให้เต็มช่องว่าง



ภาพประกอบ 3 แสดงแผ่นแก้วไลต์สองแผ่นประกบกัน โดยแผ่นบนมีการเจาะเพื่อเป็นที่อยู่ของเรซินซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพประกอบ 4 แสดงแผ่นแก้วไลต์สองแผ่นประกบกันและมีการยึดกันด้วยเทปกาว

3. ปิดวัสดุด้วยแผ่นกระจกปิดสไลด์ (Cover slip) ด้วยแรงกดนิ้ว (Finger pressure) จากผู้ทำการทดสอบเพียงคนเดียวให้แนบสนิท จากนั้นจึงรีดซีเมนต์ส่วนเกินออกและได้ฟองอากาศหลังการผสมออกเพื่อคงความหนาของเรซินซีเมนต์ให้มีความหนาอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร พร้อมทั้งเช็ดวัสดุส่วนที่เกินออกมาด้วยก้อนสำลี

4. ปิดทับด้วยวัสดุ 2 ชนิดประกอบไปด้วย

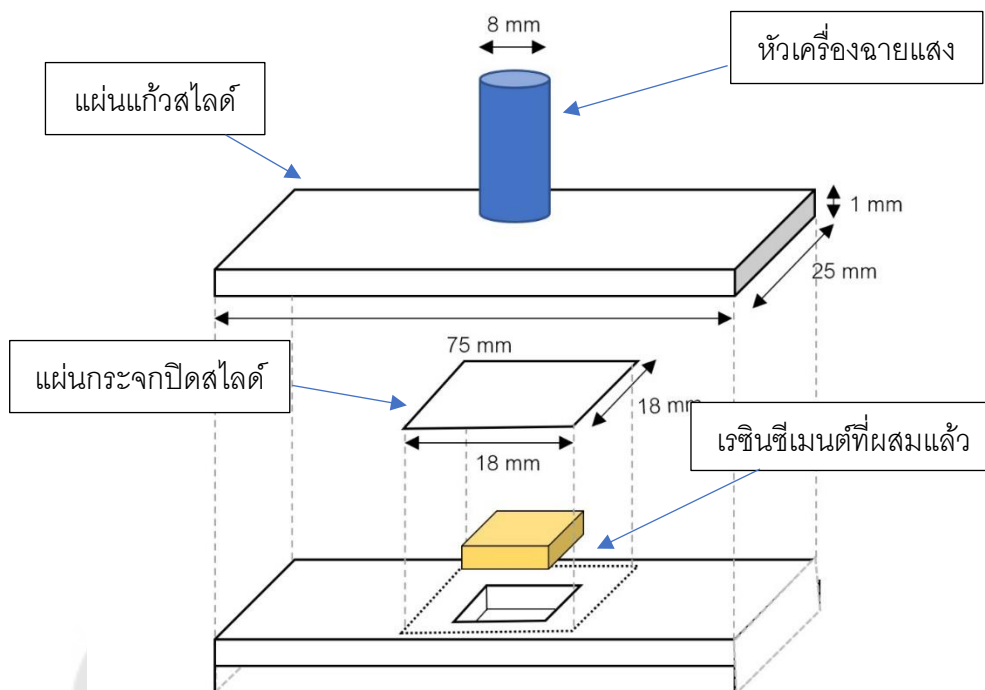
4.1 กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที และยี่สิบสี่ ชั่วโมง จะเตรียมแผ่นโลหะไร้สนิมที่มีขนาด 75x125x3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมีการเจาะพื้นที่ตรงกลางให้มีขนาด 35x85 ตารางมิลลิเมตร เพื่อให้สามารถวางแผ่นแก้วสไลด์จากขั้นตอน 1.2 ได้ และเมื่อผสมเรซินซีเมนต์ลงในช่องว่างที่เจาะรูของแผ่นแก้วสไลด์และเซตซีเมนต์ส่วนเกินเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการปิดทับด้วยแผ่นโลหะไร้สนิมอีกแผ่นที่มีขนาด 75x125x1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรและทำการฉายแสงในขั้นตอนต่อไป (ภาพประกอบ 5)

4.2 กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านแผ่นปิดแก้วสไลด์ จะนำแผ่นแก้วสไลด์ที่มีขนาด 25x75x1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร อีกแผ่นวางทับลงบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ที่ปิดช่องใส่ซีเมนต์อยู่แล้วจึงทำการฉายแสงลงไปโดยตรงในขั้นตอนต่อไป (ภาพประกอบ 6)

5. ฉายแสงลงบนชิ้นงานตัวอย่างโดยให้หัวปลายของเครื่องฉายแสงแนบไปกับแผ่นแก้วสไลด์กับแผ่นโลหะไร้สนิมและทำการฉายแสงเป็นเวลา ยี่สิบวินาที โดยเครื่องฉายแสงที่ใช้จะเป็นเครื่อง 3M ESPE Elipar™ โดยทำการวัดค่าความเข้มแสงไม่ต่ำกว่า 1,100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ตาราง 1 แสดงรายการวัสดุ ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้	ส่วนประกอบ	วิธีการใช้งาน
1. RelyX™ U200 (3M ESPE) - ปริมาณวัสดุอัด แทรกร้อยละ 43 โดย ปริมาตร - ขนาดอนุภาค ประมาณ 12.5 ไมโครเมตร	เบส : Mono-, di-, and tri-glycerol esters of phosphoric acid dimethacrylate, TEGDMA, glass, silica, sodium persulfate, tert-butylperoxy-3,5,5-trimethylhexanoate แคตาลีสต์ : substituted dimethacrylate, 1,12-dodecanedimethacrylate, glass, silica, calcium hydroxide, calcium salt of 1-benzyl-5-phenyl-barbic-acid, sodium p-toluenesulfinate	1. ผสมเบสและแคตาลีสต์ภายในระยะเวลา 20 วินาที 2. ทาเคลือบซีเมนต์ลงในตำแหน่งที่ต้องการแล3. ฉายแสงเป็นเวลา 20 วินาทีต่อต้านด้วยแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 400 – 500 นาโนเมตร
2. Panavia™ V5 (Kuraray Noritake) สี A2 Universal - ปริมาณวัสดุอัด แทรกร้อยละ 38 โดย ปริมาตร - ขนาดอนุภาค ประมาณ 0.1 - 6 ไมโครเมตร	เบส : Bis-GMA, TEGDMA, hydrophobic aromatic dimethacrylate, silanated barium glass filler, hydrophilic aliphatic dimethacrylate, fluoroaluminosilicate glass filler, colloidal silica, accelerator, initiator แคตาลีสต์ : Bis-GMA, hydrophobic aromatic dimethacrylate, hydrophilic aliphatic dimethacrylate, silanated barium glass, silanated aluminium oxide filler, colloidal silica, CQ, accelerator, pigments, others	1. ทาสารยึดติดลงไปยังตำแหน่งที่ต้องการเป็นเวลา 20 วินาที 2. เป่าลมเบาๆเพื่อไล่ตัวทำละลายออก 3. ผสมเบสและแคตาลีสต์จากหลอดผสมสำเร็จแล้วฉีดซีเมนต์ลงในตำแหน่งที่ต้องการแล้วทำการฉายแสงเป็นเวลา 20 วินาทีต่อต้าน
Panavia™ V5 Tooth Primer (Kuraray Noritake)	สารยึดติด : 10-MDP, original multifunctional monomer, new polymerization accelerator, HEMA, water, stabilizer	



ภาพประกอบ 6 แสดงขั้นตอนตัวอย่างในกลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านแผ่นปิดแก้วสไลด์ โดยเมื่อผสมเรซินซีเมนต์ลงในช่องว่างที่เตรียมไว้แล้วของแผ่นแก้วสไลด์แล้วจะนำแผ่นแก้วสไลด์อีกชิ้นมาปิดทับและจึงฉายแสงจากเครื่องฉายแสง

6. นำเข้าเครื่องทดสอบเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มมามานสเปกโตรสโคปีโดยเครื่อง InVia Raman Microscope (RENISHAW™) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ยืมอุปกรณ์และสถานที่จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ Renishaw WIRE 2.0 ในการประมวลผล การตั้งค่าเครื่องจะใช้เลเซอร์ Nd:YAG ฉายลงสู่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นตัวอย่างโดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นกระตุ้น (Excitation wavelength) อยู่ที่ 532 นาโนเมตร และความละเอียด (Resolution) อยู่ที่ 2 cm^{-1} ตั้งค่าเวลาฉาย (Exposure time) สิบวินาที อยู่ในช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม (Spectrum range) ที่ $1,600 - 1,800 \text{ cm}^{-1}$ และจะบันทึกค่าการดูดกลืน ณ ตำแหน่งสูงสุดของกราฟการแสดงผลรามานชิฟท์ (Raman shift) ในการศึกษาจะเลือกใช้ค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม $1,635 - 1,640 \text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงความยาวคลื่นของพันธะคู่คาร์บอนสายตรง ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ใช้

หาการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการเกิดพอลิเมอร์ และใช้ช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม $1,608 - 1,610 \text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงความยาวคลื่นของพันธะคู่คาร์บอนวงแหวนเป็นตำแหน่งมาตรฐานภายในกับซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ และใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ $1715 - 1730 \text{ cm}^{-1}$ กับซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยเป็นตำแหน่งมาตรฐานภายในเนื่องจากไม่มีโครงสร้างของพันธะคู่คาร์บอนวงแหวน แต่จะใช้เป็นตำแหน่งหมู่คาร์บอนิลแทนโดยจะทำการวัดค่าในชั้นตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนดดังต่อไปนี้

6.1 ซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อย

6.1.1 กลุ่มอ้างอิง คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ทันทีหลังจากซีเมนต์ผสมและบรรจุใส่แผ่นแก้วสไลด์เพื่อนำผลที่ได้ไปเข้าสู่ตรรกานวนค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของวัสดุทั้งในกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง จำนวนสิบชิ้น

6.1.2 กลุ่มทดลอง คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์โดยฉายแสงผ่านโลหะไร้สนิมเป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที

6.1.2.1 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที (SC 10 mins.) จำนวนสิบชิ้น

6.1.2.2 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมง (SC 24 hrs.) จำนวนสิบชิ้น

6.1.3 กลุ่มควบคุม คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์โดยฉายแสงผ่านแผ่นแก้วสไลด์ขนาดหนึ่งมิลลิเมตร เป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที (LC) จำนวนสิบชิ้น

6.2 ซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์

6.2.1 กลุ่มอ้างอิง คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ทันทีหลังจากซีเมนต์ผสมและบรรจุใส่แผ่นแก้วสไลด์เพื่อนำผลที่ได้ไปเข้าสู่ตรรกานวนค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของวัสดุทั้งในกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง จำนวนสิบชิ้น

6.2.2 กลุ่มทดลอง คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์โดยฉายแสงผ่านโลหะไร้สนิมเป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที

6.2.2.1 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที (SC 10 mins.) จำนวนสิบชิ้น

6.2.2.2 วัดค่าเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมง (SC 24 hrs.) จำนวนสิบชิ้น

6.2.3 กลุ่มควบคุม คือกลุ่มที่วัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังผสมเรซินซีเมนต์โดยฉายแสงผ่านแผ่นแก้วสไลด์ขนาดหนึ่งมิลลิเมตร เป็นระยะเวลาสี่สิบวินาที (LC) จำนวนสิบชิ้น

สำหรับชิ้นงานที่ยังอยู่ในระหว่างการระยะเวลาเพื่อทำการวัดในช่วงเวลาถัดไปจะนำชิ้นงานไปใส่ในภาชนะที่ปิดมิดชิดและไม่มีแสงจากภายนอกส่องลงไปถึง

การวัดค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์

นำชิ้นงานเข้าไปวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคทางรามานโดยเครื่อง InVia Raman Microscope (RENISHAW™) ตามระยะเวลาที่กำหนดโดยนำค่าการดูดกลืนที่บันทึกได้จากกราฟรามานชิฟท์ ในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้ค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม 1,635 - 1,640 cm^{-1} ที่เป็นช่วงความยาวคลื่นของพันธะคู่คาร์บอนสายตรงและใช้ช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม 1,608 - 1,610 cm^{-1} กับซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟร์ที่เป็นช่วงความยาวคลื่นของพันธะคู่คาร์บอนวงแหวนเป็นตำแหน่งมาตรฐานภายในและช่วงความยาวคลื่น 1715 - 1730 cm^{-1} กับซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อย ที่เป็นช่วงความยาวคลื่นของหมู่คาร์บอนิลเพื่อนำข้อมูลไปเข้าสู่สูตรร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ดังสมการต่อไปนี้

$$\%DC = \left\{ 1 - \frac{[C=C_{\text{Apliphatic}} / \text{Internal standard}]_{\text{Polymer}}}{[C=C_{\text{Apliphatic}} / \text{Internal standard}]_{\text{Monomer}}} \right\} \times 100$$

ภาพประกอบ 7 แสดงสมการหาค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

การจัดกระทำข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

คำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อใช้เป็นค่าสถิติเชิงพรรณนา ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของประชากรโดยใช้ Levene's test และในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้การวิเคราะห์ Two-way ANOVA แล้วนำมาหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มด้วย Post hoc tests ซึ่งจะเลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบแอลเอสดี (Least Significant Difference; LSD) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ทั้งนี้การคำนวณค่าสถิติจะใช้โปรแกรม SPSS statistics 19 (IBM®)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเรื่องผลของวิธีการบ่มตัวต่อปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วม 2 ชนิด ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนต่างๆ ที่ได้วางแผนไว้และสามารถทราบถึงผลของวิธีการบ่มตัวต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วม 2 ชนิดตามจุดประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ ทั้งนี้ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ได้จากการศึกษานี้ได้นำมาจากการคำนวณความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนของพลังงานทางเทคนิครามานออกมาในช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม $1,635 - 1,640 \text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงความยาวคลื่นของพันธะคู่คาร์บอนสายตรงและช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัม $1,608 - 1,610 \text{ cm}^{-1}$ กับเรซินซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟร์ที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นของพันธะคู่คาร์บอนวงแหวนเป็นตำแหน่งมาตรฐานภายในและช่วงความยาวคลื่น $1715 - 1730 \text{ cm}^{-1}$ กับเรซินซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ของร้อยละที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นของหมู่คาร์บอนิลเป็นตำแหน่งมาตรฐานภายในผ่านสมการหาค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ (ภาพประกอบ 7) โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics)

ผลหลังจากการศึกษาก็จะใช้ตัวอย่างซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ของร้อยละทั้งสิ้นสามสิบตัวอย่าง และซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟร์ทั้งสิ้นสามสิบตัวอย่าง และในซีเมนต์แต่ละชนิดจะแบ่งเป็นสามกลุ่มตามวิธีการบ่มตัวของวัสดุได้แก่ กลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านวัสดุโลหะเมื่อเวลาผ่านไปสิบนาที กับกลุ่มที่เวลาผ่านไปยี่สิบสี่ชั่วโมง และกลุ่มที่วัดค่าหลังฉายแสงผ่านแผ่นปิดแก้วสไลด์ หลังจากนั้นจะเรียกแทนกลุ่มตัวอย่างแทนว่า SC 10 mins. 24 hrs. และ LC ตามลำดับ โดยในแต่ละกลุ่มย่อยนี้จะแบ่งเป็นกลุ่มละสิบตัวอย่างตามแต่ละชนิดของซีเมนต์ซึ่งผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนาจะเป็นไปตามตารางแสดงผลผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนา โดยในกลุ่มตัวอย่างซีเมนต์ ซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ของร้อยละจะมีค่าเฉลี่ยร้อยละค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในกลุ่ม SC 10 mins. กับกลุ่ม 24 hrs. และกลุ่ม LC คือ 32.82, 58.38 และ 61.67 ตามลำดับ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 14.10, 16.19 และ 17.84 ตามลำดับ (ตาราง 2) และค่าเฉลี่ยร้อยละค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในกลุ่มตัวอย่างซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟร์ คือ 57.76, 76.47 และ 65.35 ตามลำดับ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 10.41, 10.34 และ 8.45 ตามลำดับ (ตาราง 3) ซึ่งเมื่อนำซีเมนต์ทั้งสอง

ชนิดมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ยอมรับได้ทางคลินิกจะเป็นดังที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 8

ผลการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way-ANOVA)

จากการทดสอบ Levene's test (ตาราง 7) และการวิเคราะห์ Two-way-ANOVA เพื่อทดสอบสมมติฐานของงานวิจัย (ตาราง 8) พบว่าจากปัจจัยด้านชนิดของเรซินซีเมนต์มีค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.001$) อย่างน้อย 1 คู่ เช่นเดียวกับปัจจัยด้านวิธีการบ่มตัวที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.001$) อย่างน้อย 1 คู่ และเมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาปฏิสัมพันธ์กัน (Interaction) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} = 0.044$) อย่างน้อย 1 คู่ ดังนั้นจากผลการทดสอบการวิเคราะห์ Two-way-ANOVA ข้างต้นที่กล่าวมาจึงทำให้ปฏิเสธสมมติฐานของงานวิจัยครั้งนี้

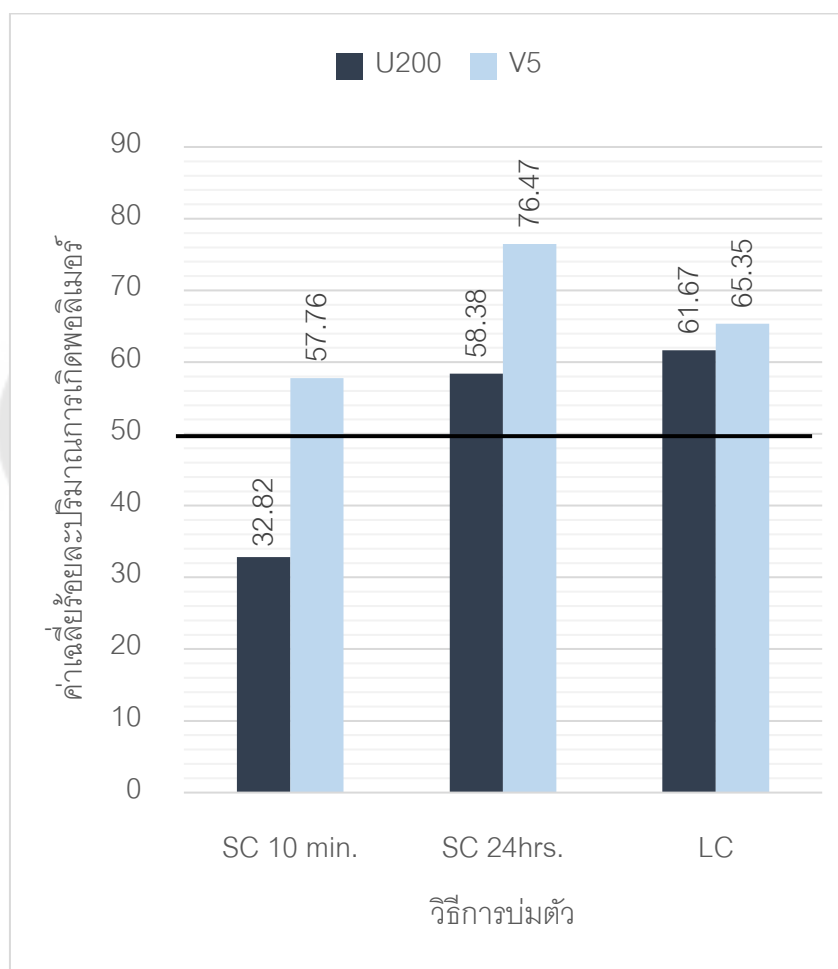
ผลการเปรียบเทียบรายคู่ของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Post hoc tests

หลังจากทราบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์จากปัจจัยต่างๆแล้ว จึงได้นำมาสู่ขั้นตอนการการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างโดยใช้ Post hoc tests ด้วยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบแอลเอสดี (LSD; Least Significant Difference) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง (ตาราง 4)

ในกรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างชนิดของเรซินซีเมนต์ในกลุ่ม SC 10 mins. และกลุ่ม SC 24 hrs. ของซีเมนต์พานาเวียไวไฟว์ที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์อยู่ที่ร้อยละ 57.76 และ 76.47 ตามลำดับซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างซีเมนต์วีโลเอ็กซ์ยูสองร้อยที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 32.82 และ 58.38 ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.001$ และ $p\text{-value} = 0.004$ ตามลำดับ) แต่ในกลุ่ม LC นั้นไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} = 0.539$)

ในกรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการบ่มตัวของเรซินซีเมนต์แต่ละชนิด พบว่าในค่าเฉลี่ยของร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์กลุ่ม SC 10 mins. ของซีเมนต์วีโลเอ็กซ์ยูสองร้อยจะมีความแตกต่างกับกลุ่ม SC 24 hrs. และกลุ่ม LC ทั้งคู่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.001$ ทั้งสองกลุ่ม) แต่ไม่มีความว่ามีความแตกต่างกันในกรณี

เปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มที่ SC 24 hrs. กับกลุ่ม LC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} = 0.583$) ในกรณีของกลุ่มตัวอย่างของซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์จะมีเพียงกลุ่ม SC 10 mins เท่านั้นที่จะมีความแตกต่างกับกลุ่มที่ SC 24 hrs. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} = 0.003$) แต่ไม่ความว่ามีความแตกต่างกันในกรณีเปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่ม LC ($p\text{-value} = 0.208$) เช่นเดียวกันกับในกรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่ม 24 hrs. และกลุ่ม LC ($p\text{-value} = 0.068$)



ภาพประกอบ 8 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ตามวิธีการบ่มตัวที่แตกต่างกันและจำแนกตามชนิดของเรซินซีเมนต์ กำหนดให้ค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ยอมรับได้ทางคลินิกอยู่ที่ร้อยละ 50

ตาราง 2 ตารางแสดงผลผลการศึกษาศาสตร์ทางสถิติเชิงพรรณนาของซีเมนต์รีไลเอ็ชยูสองร้อย

วิธีการบ่มตัว	จำนวน	Means %DC	S.D.
U200 - SC 10 mins.	10	32.82	14.10
U200 - SC 24 hrs.	10	58.38	16.19
U200 - LC	10	61.67	17.84

ตาราง 3 ตารางแสดงผลผลการศึกษาศาสตร์ทางสถิติเชิงพรรณนาของซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์

วิธีการบ่มตัว	จำนวน	Means %DC	S.D.
V5 - SC 10 mins.	10	57.76	10.41
V5 - SC 24 hrs.	10	76.47	10.34
V5 - LC	10	65.35	8.45

ตาราง 4 แสดงผลของค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวรวมทั้งสองชนิด (กำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษใหญ่และเครื่องหมายดอกจันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.05$) ระหว่างวิธีการบ่มตัวและตัวอักษรภาษาอังกฤษเล็กหมายถึงความแตกต่างระหว่างชนิดของเรซินซีเมนต์)

วิธีการบ่มตัว	ชนิดของเรซินซีเมนต์	
	Mean %DC (S.D.)	
	รีไลเอ็ชยูสองร้อย	พานาเวียวีไฟว์
SC 10 mins.	32.82 (14.10) ^{Aa}	57.76 (10.41) ^{*Ab}
SC 24 hrs.	58.38 (16.19) ^{Ba}	76.47 (10.34) ^{*Ab}
LC	61.67 (17.84) ^{Ba}	65.35 (8.45) ^{Aa}

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยเรื่องผลของวิธีการบ่มตัวต่อปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด ทางผู้วิจัยได้นำผลการวิจัยที่ได้มาประเมินและวิเคราะห์ทางสถิติแล้วจึงได้มีข้อสรุปในการดำเนินงาน โดยแบ่งหัวข้อในการสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. สรุปผลการวิจัย
2. อภิปรายผลการวิจัย
3. ข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาหาผลของวิธีการบ่มตัวต่อปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมสองชนิด พบว่าเรซินซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มของการเกิดพอลิเมอร์ที่ไปในทิศทางเดียวกันนั่นคือ กลุ่ม SC 10 mins. จะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์น้อยที่สุด แต่ในกลุ่ม SC 24 hrs. และกลุ่ม LC จะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แนวโน้มของค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในเรซินซีเมนต์ทั้งสองชนิดจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่ม SC 10 mins. โดยซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์จะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงกว่าซีเมนต์ไธโร-เอ็กซ์ยูสองร้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์จะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์เฉลี่ยคือร้อยละ 57.76 ซึ่งมีความใกล้เคียงค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ยอมรับได้ทางคลินิกคืออยู่ในช่วงร้อยละ 50-70^[4, 5, 30, 31] แต่ในกลุ่มของซีเมนต์ไธโรเอ็กซ์ยูสองร้อยจะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์เฉลี่ยคือร้อยละ 32.82 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ยอมรับได้ทางคลินิกมาก เช่นเดียวกับกลุ่ม SC 24 hrs. ที่ซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์จะมีค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์มากกว่าซีเมนต์ไธโรเอ็กซ์ยูสองร้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กลุ่ม LC จะไม่มีความแตกต่างกัน

ดังนั้นจากการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ได้ปฏิเสธสมมติฐานของงานวิจัยและสามารถสรุปได้ว่าในสถานการณ์บางกรณีทางคลินิก อาทิเช่นการยึดติดวัสดุบูรณะโลหะที่ไม่มีการส่องผ่านเข้าออกของแสงจากเครื่องฉายแสงนั้น การใช้เรซินซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์ที่มีตัวเร่ง (Accelerator) จะมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงกว่าซีเมนต์ไธโรเอ็กซ์ยูสองร้อยหลังการยึดวัสดุที่บ่มแสงในช่วงสิบนาทีก่อนหลังผสมและเมื่อเวลาผ่านไปยี่สิบสี่ชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในการใช้งานทาง

คลินิกของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ของรอยหลังผสมและยึดติดวัสดุ หากจำเป็นต้องทำการกรอแต่งวัสดุ ด้านบดเคี้ยวอันเป็นการส่งผ่านแรงกระทำลงไปยังชั้นของเรซินซีเมนต์ที่ยังไม่มีการบ่มตัวเท่าที่ควร อาจส่งผลให้คุณสมบัติของเรซินซีเมนต์อื่นๆ ด้อยลงตามไปด้วย และควรรอเวลาให้นานกว่าสิบ นาทีเพื่อรอให้ซีเมนต์ก่อตัวได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด

อภิปรายผลการวิจัย

โดยทั่วไปแล้วหากแบ่งเรซินซีเมนต์ออกตามชนิดของการบ่มตัว เรซินซีเมนต์แต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของส่วนประกอบและตัวเริ่มที่ใส่ลงในวัสดุ ในกลุ่มของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัว ร่วมจะเป็นการรวมกันระหว่างคุณสมบัติของทั้งเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองและชนิดบ่มตัว ด้วยแสง ทั้งนี้ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมจะประกอบไปด้วยตัวเริ่ม ปฏิกริยาของการบ่มตัวด้วยแสง นั่นคือแคมฟอร์ควิโนนและเอมีนตติยภูมิที่จะตอบสนองต่อแสง ในช่วงความยาวคลื่นจำเพาะและเริ่มปฏิกิริยาขึ้นโดยแตกตัวให้อนุมูลอิสระต่อไป ในขณะที่เดียวกัน ก็มีส่วนประกอบของตัวเริ่มปฏิกิริยาชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองไปด้วยคือมีส่วนผสมของเบนโซิลเปอร์ ออกไซด์และเอมีนตติยภูมิชนิดอะโรมาติกโดยเมื่อผสมกันแล้วจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระและ ดำเนินการเกิดพอลิเมอร์ต่อไป แนวคิดการรวมทั้งสองระบบนี้เข้าด้วยกันในเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัว ร่วมนี้ทำให้เชื่อว่าค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สามารถเพิ่มขึ้นจากการใช้งานที่มีข้อจำกัดบาง ประการอย่างกรณีที่แสงจากเครื่องฉายแสงส่องไปไม่ถึงและในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมให้ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วจากการบ่มตัวด้วยแสง

แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาสรุปไว้ว่าเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมควรจะต้องได้รับการฉาย แสงบ้างทั้งนี้เพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระเพื่อให้เกิดพอลิเมอร์เกิด มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่วัสดุไม่ได้รับแสงเลยและใช้เป็นวิธีการบ่มตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีอย่าง เดียว ซีเมนต์จะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์น้อยกว่าซีเมนต์ที่ได้รับการฉายแสงแม้ว่าจะ มีการลดทอนความเข้มลงจากความหนาของวัสดุบูรณะไปบ้าง แต่พบว่า ณ เวลาที่เท่ากันนั้นกลุ่ม ที่ได้รับแสงบางส่วนจะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับแสงเลยอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ^[4, 5, 7-10] ดังนั้นจากข้อสรุปดังกล่าวจึงเป็นข้อพึงระวังในแง่ของการใช้งานเรซิน ซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมภายใต้การทำงานภายใต้วัสดุบูรณะที่มีสภาพทึบแสงหรือบางตำแหน่งที่ไม่ สามารถฉายแสงเพื่อบ่มตัวได้อย่างเช่นกรณีปักเดือยฟันสำเร็จรูปหรือการยึดวัสดุโลหะที่มีสภาพ ทึบแสง เหตุการณ์ดังกล่าวนี้วัสดุจำเป็นต้องได้รับการบ่มตัวด้วยแสงบ้างแม้เพียงเล็กน้อยก็อาจ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ได้

เรซินซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยและซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ซึ่งทั้งสองชนิดเป็นเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมทั้งคู่ โดยชนิดแรกที่ถูกกล่าวมาจะเป็นเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์ ในขณะที่ชนิดที่สองจะเป็นเรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดระบบเซลฟ์แอ็คทีฟชั้นตอนเดียว มีหลายการศึกษาได้กล่าวไว้ว่าผลของค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมในแต่ละบริษัทผู้ผลิตได้ผลิตวัสดุที่มีสัดส่วนส่วนประกอบสำคัญแตกต่างกันไป (Product dependant) ^[4, 5, 8, 44] กล่าวคือแนวคิดที่ว่าวัสดุแต่ละผลิตภัณฑ์นั้นแม้จะมีวิธีการบ่มตัวที่เหมือนกัน แต่อาจมีปริมาณตัวเริ่มปฏิกิริยาบ่มตัวด้วยตัวเองและบ่มตัวด้วยแสงที่แตกต่างกันตามแต่ละสูตรของบริษัทผู้ผลิต ทำให้แนวโน้มของการเกิดพอลิเมอร์ไอออนเยี่ยงไปทิศทางใดทิศทางหนึ่งทั้งทิศทางการบ่มด้วยตัวเองหรือทิศทางการบ่มตัวด้วยแสง ส่งผลถึงค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์มีความหลากหลายตามแต่ประสิทธิภาพของวิธีการบ่มตัวนั้นๆ แต่แนวคิดดังกล่าวยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้เพราะทางบริษัทผู้ผลิตในแต่ละวัสดุนั้นไม่ได้เปิดเผยถึงข้อมูลปริมาณที่แน่นอนของส่วนประกอบสำคัญในวัสดุ

จากการศึกษาครั้งนี้เวลาที่สนใจคือที่ลิบนาที่หลังเริ่มผสมซีเมนต์ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่นานเกินไปหากต้องการรอหลังจากผสมซีเมนต์และเริ่มยี้ดวัสดุขณะเข้ากับฟันก่อนทำการกรอขัดแต่งด้านบดเคี้ยวในช่องปาก กล่าวคือในระยะเวลาลิบนาที่นี้หากต้องการให้เรซินซีเมนต์บรรลุถึงคุณสมบัติสูงสุดแล้วจำเป็นต้องควบคุมความชื้นไม่ให้เกิดการปนเปื้อนไปยังตำแหน่งที่ยี้ดซีเมนต์และยังไม่ควรกรอขัดแต่งวัสดุขณะในช่วงเวลานี้ มีการศึกษาของ Ruggerberg ในปี ค.ศ.1993^[45] ที่ให้ผลการศึกษาว่าการเกิดพอลิเมอร์ในเรซินซีเมนต์ชนิดบ่มตัวร่วมจะไม่มี ความแตกต่างกันในช่วงเวลาลิบนาที่และยี้ดลิบลิ้งหลังจากผสม จากเหตุผลดังที่กล่าวมาทั้งหมด ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาในช่วงเวลาลิบนาที่หลังเริ่มผสมซีเมนต์ แต่ผลการทดลองของงานวิจัยครั้งนี้พบว่าซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยในกลุ่ม SC 10 mins. จะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์เฉลี่ยคือร้อยละ 32.82 ซึ่งในการศึกษาของ Jang และคณะในปี 2017^[28] ได้ทดลองหาค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปีจากเรซินซีเมนต์หลายชนิดผ่านบล็อกเซรามิกที่มีขนาดและวิธีการบ่มตัวที่แตกต่างกัน ผลการทดลองของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยเมื่อเลือกใช้วิธีการบ่มตัวด้วยตัวเองหรือไม่ได้รับการฉายแสงเมื่อเวลาผ่านไปลิบนาที่หลังผสมนั้น พบว่ามีร้อยละค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์คือร้อยละ 30.63 ในขณะที่การศึกษาของ Moraes ในปี 2011^[46] ที่ได้หาค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูนิเซ็ม (RelyX™ Unicem, 3M ESPE) ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกับซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยในช่วงเวลาและวิธีการบ่มตัวที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าซีเมนต์ดังกล่าวมีค่าร้อยละปริมาณการเกิด

พอลิเมอร์ที่สืบทอดมาเมื่อใช้วิธีการบ่มตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีอย่างเดียวยังคือร้อยละ 28.4 ดังนั้นจากการศึกษาทั้งสองที่กล่าวมาแล้ว พบว่ามีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่ใกล้เคียงกันกับผลการศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้ ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยู่สองร้อยละเมื่อเวลาผ่านไปสืบทอดที่นั่นยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานทางคลินิก แต่สามารถพยากรณ์ได้ว่าหลังจากสืบทอดที่ไปแล้วปฏิกิริยา พอลิเมอร์จะสามารถดำเนินต่อไปได้อย่างค่อยเป็นค่อยไป ทั้งนี้เวลาที่เหมาะสมของซีเมนต์ชนิดนี้อยู่ที่ช่วงเวลาไหนนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป แต่มีข้อสังเกตว่าในการทำงานทางคลินิกหากใช้เวลาในการรอเรซินซีเมนต์ก่อตัวนานเกินกว่าสืบทอดที่หลังจากยัดวัสดุบูรณะไปแล้วอาจเป็นอุปสรรคต่อการทำงานจริงก็เป็นได้

โดยทั่วไปแล้วเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์ต้องใช้มอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดในการปรับสภาพผิวฟันเพื่อให้เกิดการยึดติด แต่อุปสรรคที่เกิดขึ้นขณะวัสดุกำลังเกิดพอลิเมอร์คือปัญหาความเข้ากันไม่ได้ของวัสดุที่มอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดจะไปยับยั้งการทำงานของเอมีนตติยภูมิชนิดอะโรมาติกที่ใช้เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาการบ่มตัวด้วยตัวเองส่งผลให้มีการปลดปล่อยอนุมูลอิสระที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาลดลง^[12, 13, 29] ทำให้มีการเกิดพอลิเมอร์ลดลงเกิดเป็นปัญหาความเข้ากันไม่ได้ของวัสดุขึ้น แต่จากส่วนประกอบที่ระบุโดยผู้ผลิตพบว่าซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยู่สองร้อยละมีส่วนประกอบของเอมีนตติยภูมิเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาบ่มตัวด้วยตัวเอง แต่จะมีอนุพันธ์ของกรดบาบิทูริก (Barbituric acid derivatives) เป็นตัวเริ่มแทนเอมีนตติยภูมิ ซึ่งตัวเริ่มดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติทนต่อสภาวะความเป็นกรดได้ (Acid-resistance initiator)^[16] และมีการเติมโซเดียมฟีโกลูอินซัลไฟเนท (Sodium p-toluensulfinate) ซึ่งเป็นเกลือของกรดอะโรมาติกซัลฟีนิก โดยทั้งสองส่วนประกอบนี้จะมีส่วนช่วยในเรื่องความเข้ากันไม่ได้ของเรซินซีเมนต์หลังจากผสมกันระหว่างเบสและแคตตาลิสต์ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถทำให้ปฏิกิริยาบ่มตัวด้วยตัวเองยังคงดำเนินต่อไปได้และมีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่มากขึ้น^[12, 13, 29]

ในขณะที่ซีเมนต์ฟานาเวียวีไฟว์เป็นระบบเรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดระบบเซลฟ์แอ็คทีฟโดยสารยึดติดของผลิตภัณฑ์นี้ จากคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตแนะนำให้ทาลงบนตัวฟันก่อนทำการยึดติดด้วยเรซินซีเมนต์เพื่อปรับสภาพผิวฟันเพราะส่วนประกอบหลักที่เป็นส่วนออกฤทธิ์ช่วยในการยึดติดคือ 10-MDP (10-Methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate) ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดที่เป็นอนุพันธ์ของกรดฟอสฟอริกที่มีเสถียรภาพดีที่สุดในแง่คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และสามารถทำให้เกิดการยึดติดกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์บนผิวฟันได้^[47-49] เป็นที่น่าสนใจว่าซีเมนต์ชนิดนี้ไม่ได้มีมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดผสมอยู่ทั้งในเบสและแคตตาลิสต์แต่จะผสมอยู่แค่ในสารยึดติดเท่านั้น^[29] ซึ่งต่างจากซีเมนต์

รีไลเอ็กซ์สองร้อยที่ใส่มอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดลงไปในซีเมนต์เพื่อหวังผลการปรับสภาพผิวฟัน ดังนั้นจากผลการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า แม้ว่าซีเมนต์รีไลเอ็กซ์สองร้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงตัวเริ่มดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเพื่อลดปัญหาความเข้ากันไม่ได้ แต่จากผลการทดลองของการวิจัยครั้งนี้เมื่อเวลาผ่านไปลิบนาที่หลังการผสมยังไม่ทำให้ซีเมนต์มีประสิทธิภาพเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาบ่มตัวด้วยตัวเองซึ่งหากเปรียบเทียบกับซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์ที่แยกเอามอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดออกมาไว้ที่สารยึดติดเพียงเท่านั้น

ซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกมาสู่ท้องตลาดเมื่อปี ค.ศ. 2015 ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่จำกัดและบางส่วนประกอบยังไม่ได้รับการเปิดเผยจากบริษัทผู้ผลิตแม้ในขณะนี้ยังมีการศึกษาที่ไม่ได้อ้างอิงถึงค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์โดยตรง แต่พบว่ามีการศึกษาคุณสมบัติอื่นๆที่สามารถเชื่อมโยงไปยังปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ได้ มีการศึกษาของ Tsujimoto ในปี 2018^[44] ที่ศึกษาความสัมพันธ์ของวิธีการบ่มตัวที่มีต่อคุณสมบัติด้านการสึกของเรซินซีเมนต์แต่ละชนิด ผลการศึกษพบว่าวิธีการบ่มตัวของซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์ไม่มีผลทำให้คุณสมบัติด้านการสึกของวัสดุแตกต่างกัน ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวจึงอนุมานได้ว่าซีเมนต์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการบ่มตัวด้วยวิธีบ่มตัวด้วยตัวเองและวิธีบ่มตัวร่วมไม่แตกต่างกัน และในการศึกษาของ Tagami และคณะในปี 2017^[29] พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของพันธะกับผิวเนื้อฟัน (Dentin bond strength) ระหว่างซีเมนต์พานาเวียเอฟทู (Panavia™ F2.0, Kuraray Noritake) และซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่กว่าของบริษัท ผลการทดลองพบว่าซีเมนต์ชนิดใหม่นี้มีค่าความแข็งแรงของพันธะกับผิวเนื้อฟันมากกว่าซีเมนต์ชนิดแรกอย่างมีนัยสำคัญทั้งวิธีการบ่มตัวร่วมและวิธีการบ่มตัวด้วยตัวเอง มีการศึกษาของ Aguiar ในปี 2010^[50] ที่ได้ทำการทดลองคล้ายกันแต่ใช้เป็นซีเมนต์พานาเวียเอฟทูซึ่งเป็นเรซินซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดชนิดเซฟเอดซ์ โดยการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปลิบนาที่เมื่อใช้วิธีการบ่มตัวด้วยตัวเองจะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์อยู่ที่ร้อยละ 63.3 ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้ผลการศึกษาของซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์จากการวิจัยครั้งนี้เล็กน้อย และการศึกษาของ Pereira และคณะในปี 2010^[51] ได้หาค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ของซีเมนต์พานาเวียเอฟทูเช่นเดียวกันโดยใช้วิธีตรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวิธี ^1H Stray-Field (^1H Stray-Field MRI method) และหาค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์หลังจากใช้วิธีการบ่มตัวด้วยตัวเองเมื่อเวลาผ่านไปลิบนาที่ได้ผลคือซีเมนต์มีค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์อยู่ที่ร้อยละ 51.1 ซึ่งผลการทดลองที่ได้น้อยกว่าผลการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ในกลุ่ม SC 10 mins. ของซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์อยู่เล็กน้อย

ในสารยึดติดของซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์นี้ยังมีตัวเร่งชนิดใหม่ที่ยังไม่ได้รับการเปิดเผยจากบริษัทผู้ผลิตโดยเชื่อว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดพอลิเมอร์กรณีที่แสงไม่สามารถส่องถึงได้ภายใต้วัสดุบูรณะ เรียกกระบวนการนี้ว่า “Touch-cure” กล่าวคือเมื่อซีเมนต์สัมผัสกับสารยึดติดแล้วจะเหนี่ยวนำให้มีการเกิดพอลิเมอร์ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองเสริมจากการเกิดพอลิเมอร์โดยรวมของวัสดุเพิ่มขึ้นไปอีก ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างเรซินซีเมนต์สองชนิดในกลุ่ม SC 10 mins. อาจจะเป็นผลจากตัวเร่งชนิดใหม่ที่ช่วยให้เกิด “Touch-cure” และเพิ่มค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วในช่วงสิบนาทีแรกหลังการผสม อีกทั้งความแตกต่างของปริมาณของตัวเริ่มปฏิกิริยาบ่มตัวด้วยตัวเองอาจมีผลของการเกิดพอลิเมอร์ในวิธีการบ่มตัวแบบไม่ใช้แสงแต่ประเด็นนี้ยังเป็นแค่ข้อสันนิษฐานอยู่เพราะบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายมักจะไม่ได้เปิดเผยปริมาณส่วนประกอบของวัสดุออกมาสู่สาธารณะ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปยี่สิบสี่ชั่วโมงพบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 76.47 และจะมากกว่ากลุ่ม 24 hrs. ของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยละที่มีอยู่ร้อยละ 58.38 ซึ่งจะมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} = 0.004$) ดังนั้นในคุณสมบัติของตัวเร่งชนิดใหม่นี้อาจมีผลส่งเสริมให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการบ่มตัวด้วยตัวเองก็เป็นได้

เป็นที่น่าสังเกตคือในกลุ่มซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์จะมีค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในกลุ่ม LC น้อยกว่าในกลุ่ม SC 24 hrs. แม้ว่าจะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากผลลัพธ์นี้มิได้เป็นการบ่งบอกว่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าของวัสดุเมื่อได้รับการฉายแสงโดยตรง ทั้งนี้มีข้อสันนิษฐานว่าในปฏิกิริยาการบ่มตัวร่วมอาจมีการเกิดพอลิเมอร์ดำเนินต่อไปได้หลังจากการฉายแสงไปแล้ว จากการศึกษาของ Jang และคณะในปี 2017^[28] ได้ทดลองฉายแสงโดยตรงลงไปยังซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยละและวัดค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่สิบนาทีได้ร้อยละ 65.38 แต่เมื่อเวลาผ่านไปยี่สิบสี่ชั่วโมงพบว่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 71.63 เช่นเดียวกับซีเมนต์รีไลเอ็กซ์เออาร์ซี (RelyX™ ARC, 3M ESPE) ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดชนิดอีเธอร์แอนด์-รินส์และบ่มตัวร่วม เมื่อฉายแสงโดนตรงจะมีร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่สิบนาทีและยี่สิบสี่ชั่วโมงเป็นร้อยละ 80.65 และ 86.97 ตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าทั้งสองช่วงเวลาดังกล่าวนี้อาจไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม แต่พิสูจน์ให้เห็นถึงแนวโน้มว่าหลังจากฉายแสงไปโดยตรงแล้ววัสดุยังสามารถมีการเกิดพอลิเมอร์เพิ่มเติมได้มากขึ้นกว่าเดิม

มีบางงานวิจัยนำเสนอถึงประเด็นเรื่องความหนืดของวัสดุหลังการบ่มตัวมีผลต่อการเกิดพอลิเมอร์ที่ดำเนินต่อไป กล่าวคือเมื่อเรซินซีเมนต์เริ่มมีการเกิดพอลิเมอร์แล้วหลังจากการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของตัวเริ่ม สายโซ่พอลิเมอร์จะแตกตัวจากพันธะคู่เป็นพันธะเดี่ยว ต่อมาสายโซ่จะ

เริ่มเกิดการเชื่อมต่อของสายพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงข้ามตามลำดับ เมื่อมีการเกิดพอลิเมอร์ที่เพียงพอถึงจุดหนึ่งจะมีการแข็งตัวของวัสดุ (Vitrification point) ซึ่งถ้าวัสดุก่อตัวเลยจุดนี้ไปแล้ว วัสดุจะมีความหนืดมากพอที่จะยุติการเคลื่อนที่หรือจำกัดการเคลื่อนที่ของมอนอเมอร์และอนุมูลอิสระลงอย่างมาก^[8, 28, 37] แม้ว่าการเกิดพอลิเมอร์จะดำเนินต่อไปได้บ้างแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง ทั้งนี้ในการฉายแสงโดยตรงไปยังซีเมนต์จะทำให้วัสดุแข็งตัวอย่างรวดเร็วขึ้น ทำให้วัสดุเข้าสู่จุดแข็งตัวส่งผลให้เกิดการตรึงตัวของมอนอเมอร์และอนุมูลอิสระ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงอย่างรวดเร็วมากหากเปรียบเทียบกับ การเกิดพอลิเมอร์ในวิธีการบ่มตัวด้วยตัวเองซึ่งจะเกิดพอลิเมอร์อย่างช้าๆตามเวลาที่ผ่านไปกระทั่งเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมง ดังนั้นการปล่อยให้ปฏิกิริยาค่อยๆดำเนินไปอย่างค่อยเป็นค่อยไปในขณะที่วัสดุยังไม่แข็งตัวมากนัก การเคลื่อนที่ของมอนอเมอร์และอนุมูลอิสระอาจเกิดการเคลื่อนที่และดำเนินปฏิกิริยาต่อไปได้มากกว่าการฉายแสงและแข็งตัวอย่างทันที

ปริมาณวัสดุอัดแทรกก็อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ได้ เพราะยังมีการเติมปริมาณวัสดุอัดแทรกมากขึ้นวัสดุจะมีความหนืดมากขึ้น หนึ่งในปัจจัยเรื่องความหนืดนี้อาจเป็นอุปสรรคต่อการเกิดพอลิเมอร์เหมือนดังที่ได้กล่าวไปแล้ว จากส่วนประกอบของผู้ผลิตที่เปิดเผยออกมาซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยจะมีปริมาณวัสดุอัดแทรกคือร้อยละ 43 โดยปริมาตร และมีขนาดของอนุภาควัสดุอัดแทรกโดยเฉลี่ยคือ 12.5 ไมโครเมตร ในขณะที่ซีเมนต์ พานาเวียวีไฟร์มีปริมาณวัสดุอัดแทรกคือร้อยละ 38 โดยปริมาตร และมีขนาดของอนุภาควัสดุอัดแทรกอยู่ในช่วง 0.1 – 6 ไมโครเมตร จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสองร้อยมีปริมาณวัสดุอัดแทรกในปริมาณมากและอนุภาคใหญ่กว่า จึงมีความเป็นไปได้ว่ามีความหนืดชั้นมากกว่าซีเมนต์พานาเวียวีไฟร์และสะท้อนออกมาเป็นการเกิดพอลิเมอร์ที่ช้ากว่าทั้งในช่วงลิบนาที่แรกและเมื่อผ่านไปสี่สิบสี่ชั่วโมงตามผลการทดลองครั้งนี้ แต่ประเด็นนี้ยังไม่มีหลักฐานที่แน่ชัด โดยการศึกษาของ Francescantonio ในปีค.ศ. 2013^[37] ที่เปรียบเทียบเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงกับความหนืดต่ำและพบว่าเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดต่ำกว่าจะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์สูงกว่าเรซินซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ความสำคัญของค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ในเรซินซีเมนต์นี้จะมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติอื่นๆของซีเมนต์ทั้งในด้านคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมี ค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์จะเป็นเพียงหนึ่งตัวชี้วัดเบื้องต้นของการทำงานทางคลินิกเท่านั้น หากเรซินซีเมนต์ไม่สามารถมีการเกิดพอลิเมอร์ได้ถึงจุดที่ยอมรับได้ทางคลินิก

คุณสมบัติต่างๆของเรซินซีเมนต์ก็จะด้อยลงไปจากที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำไว้ มีการศึกษาของ Lopes ในปี 2015 ^[5] ที่พบว่าเมื่อเรซินซีเมนต์ได้รับการบ่มตัวและมีการเกิดพอลิเมอร์ถึงจุดที่ยอมรับได้ทางคลินิกแล้ว จะไม่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงไปถึงคุณสมบัติเชิงกลอื่นๆของเรซินซีเมนต์อีกแต่อย่างใด แต่คุณสมบัติเชิงกลในช่วงนี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัสดุอัดแทรกและส่วนประกอบอื่นๆที่ผสมอยู่ในเรซินซีเมนต์มากกว่า ดังนั้นค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์จะเป็นแค่ข้อมูลที่คุณเบื้องต้นเท่านั้นที่จะบ่งบอกได้ว่าเรซินซีเมนต์จะสามารถแสดงประสิทธิภาพสูงสุดได้หรือไม่

มีรายงานว่าซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยู่สองร้อยซึ่งเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์มีส่วนประกอบสำคัญคือมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดและจะค่อยๆมีความเป็นกรดลดลงเมื่อการเกิดพอลิเมอร์ดำเนินไปเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้หากวัสดุไม่ได้มีการเกิดพอลิเมอร์ที่เพียงพอจะทำให้วัสดุยังคงความเป็นกรดอยู่ และมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดเหล่านี้ทำให้มีสภาพขั้วเพิ่มมากขึ้น เพิ่มโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับน้ำในสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ สิ่งที่เป็นผลตามมาคือวัสดุจะดูดน้ำและมีการละลายน้ำมากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาของ Kim และคณะในปี 2017 ^[10] พบว่าเมื่อซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยู่สองร้อยใช้วิธีการบ่มตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีเพียงอย่างเดียวเมื่อผ่านไปสี่สัปดาห์จะมีคุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) มากกว่ากลุ่มที่ใช้วิธีการบ่มตัวร่วมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เรซินซีเมนต์ชนิดที่ใช้ร่วมกับสารยึดติดจะมีคุณสมบัติความชอบน้ำน้อยกว่าเซลฟ์แอ็คทีฟเรซินซีเมนต์และไม่มีความแตกต่างกันระหว่างวิธีการบ่มตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีและวิธีการบ่มตัวร่วม ผลที่ตามมาหากวัสดุมีการละลายน้ำมากขึ้น ส่วนประกอบที่ไม่ได้มีการเกิดพอลิเมอร์จะละลายออกมาได้ในสภาพแวดล้อมในช่องปาก ซึ่งส่วนที่ละลายออกมาอาจมีมอนอเมอร์ที่มีความเป็นกรดซึ่งมีรายงานว่ามีความสามารถในการก่อความระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อช่องปาก ^[10, 17]

ในแง่การผสมของวัสดุก็ได้เคยมีรายงานว่าผลต่อค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์เนื่องจากซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยู่สองร้อยที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจะอยู่ในบรรจุภัณฑ์ชนิดคลิกเกอร์ (Clicker) ซึ่งจำเป็นต้องใช้การผสมด้วยมือก่อน มีรายงานว่าการผสมด้วยมืออาจทำให้มีฟองอากาศผสมอยู่ในเนื้อซีเมนต์ด้วย ^[27] ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ที่เป็นชั้นออกซิเจนอินฮิบิตตามผิวของฟองอากาศนั้นๆ อาจส่งผลให้ค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ลดลงได้ อีกทั้งยังเป็นตำแหน่งที่มีความเสี่ยงในการเกิดรอยร้าวในระดับไมโคร (Microcrack) ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักของวัสดุได้

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองทางห้องปฏิบัติการ กล่าวคือเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมในการใช้งานจริงทางคลินิก ดังนั้นอาจมีข้อจำกัดของงานวิจัยอยู่ในบางปัจจัย ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้มีปัจจัยด้านอุณหภูมิที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้เทียบเท่ากับอุณหภูมิร่างกายที่ 37 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของพื้นที่ทำการทดลอง ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบชิ้นงานดังกล่าวจำเป็นต้องผสมเรซินซีเมนต์แล้วจึงรอตามช่วงเวลาที่กำหนดจากนั้นจึงนำเข้าสู่การทดสอบทางรามาานซึ่งจำกัดให้เครื่องมือทำงานอยู่ในอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส มีการศึกษาที่ของ Franca และคณะในปี 2011 ^[52] กล่าวถึงผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มปริมาณการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ให้สูงขึ้น จากการศึกษาพบว่ามีความปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นจากการเพิ่มความร้อนก่อนการวัด ซึ่งหากวัดค่าปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของเรซินซีเมนต์จะมีร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ประมาณร้อยละ 45 แต่ในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 50 องศาเซลเซียสจะมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์อยู่ประมาณ ร้อยละ 60 ในกรณีที่ใช้วิธีการบ่มตัวด้วยตัวเอง เนื่องจากการเร่งให้มีการเคลื่อนที่ของมอนอเมอร์และเร่งปฏิกิริยาเคมีให้เกิดเร็วขึ้น ดังนั้นผลการศึกษานี้จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ โดยเฉพาะในกรณีของซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสของร้อยละในกลุ่ม SC 10 mins. อนึ่งจากคำแนะนำของบริษัทได้ระบุไว้ว่าซีเมนต์รีไลเอ็กซ์ยูสของร้อยละแนะนำว่าเวลาแข็งตัวของวัสดุในระบบการบ่มตัวด้วยตัวเองจะใช้เวลาเพียงหกนาที่เท่านั้น ดังนั้นจากผลการทดลองในกลุ่ม SC 10 mins. อาจมีค่าร้อยละปริมาณการเกิดพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นในอุณหภูมิช่องปากหรือที่ 37 องศาเซลเซียส

อีกประเด็นหนึ่งคือในแง่ความหนาของวัสดุ ที่มีบางการศึกษาที่ผ่านมาสามารถทำให้ขึ้นตัวอย่างบางได้ถึง 100 ไมโครเมตร ^[8, 12] ซึ่งเป็นความหนาที่ใกล้เคียงกับชั้นเรซินซีเมนต์ได้วัสดุบูรณะจากการใช้งานจริงทางคลินิกแต่ในการศึกษานี้จะมีความหนาของชิ้นงานคือหนึ่งมิลลิเมตร ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากหากสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการรอเวลาและควบคุมความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบได้ผลการศึกษานี้จึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย

บรรณานุกรม

1. Li RW, Chow TW, Matinlinna JP. Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: state of the art. *Journal of prosthodontic research*. 2014;58(4):208-16.
2. Rekow ED, Silva NR, Coelho PG, Zhang Y, Guess P, Thompson VP. Performance of dental ceramics: challenges for improvements. *J Dent Res*. 2011;90(8):937-52.
3. Jafari Z, Alaghehmand H, Samani Y, Mahdian M, Khafri S. Light transmittance of CAD/CAM ceramics with different shades and thicknesses and microhardness of the underlying light-cured resin cement. *Restor Dent Endod*. 2018;43(3):e27.
4. DE SOUZA G, BRAGA RR, CESAR PF, LOPES GC. Correlation between clinical performance and degree of conversion of resin cements: a literature review. *Journal of Applied Oral Science*. 2015;23:358-68.
5. Lopes Cde C, Rodrigues RB, Silva AL, Simamoto Junior PC, Soares CJ, Novais VR. Degree of Conversion and Mechanical Properties of Resin Cements Cured Through Different All-Ceramic Systems. *Braz Dent J*. 2015;26(5):484-9.
6. Puppin-Rontani RM, Dinelli RG, de Paula AB, Fucio SB, Ambrosano GM, Pascon FM. In-depth polymerization of a self-adhesive dual-cured resin cement. *Oper Dent*. 2012;37(2):188-94.
7. Shim JS, Kang JK, Jha N, Ryu JJ. Polymerization Mode of Self-Adhesive, Dual-Cured Dental Resin Cements Light Cured Through Various Restorative Materials. *J Esthet Restor Dent*. 2017;29(3):209-14.
8. Arrais CA, Giannini M, Rueggeberg FA. Kinetic analysis of monomer conversion in auto- and dual-polymerizing modes of commercial resin luting cements. *J Prosthet Dent*. 2009;101(2):128-36.
9. Moraes RR, Faria-e-Silva AL, Ogliari FA, Correr-Sobrinho L, Demarco FF, Piva E. Impact of immediate and delayed light activation on self-polymerization of dual-cured dental resin luting agents. *Acta Biomater*. 2009;5(6):2095-100.
10. Kim HJ, Bagheri R, Kim YK, Son JS, Kwon TY. Influence of Curing Mode on the Surface Energy and Sorption/Solubility of Dental Self-Adhesive Resin Cements. *Materials*

(Basel, Switzerland). 2017;10(2).

11. Zhang L, Magni E, Radovic I, Wang YJ, Chen JH, Ferrari M. Effect of curing modes of dual-curing luting systems and root regions on retention of translucent fiber posts in root canals. *J Adhes Dent*. 2008;10(3):219-26.
12. Arrais CA, Giannini M, Rueggeberg FA. Effect of sodium sulfinat salts on the polymerization characteristics of dual-cured resin cement systems exposed to attenuated light-activation. *J Dent*. 2009;37(3):219-27.
13. Gutierrez MF, Sutil E, Malaquias P, de Paris Matos T, de Souza LM, Reis A, et al. Effect of self-curing activators and curing protocols on adhesive properties of universal adhesives bonded to dual-cured composites. *Dent Mater*. 2017;33(7):775-87.
14. Radovic I, Monticelli F, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M. Self-adhesive resin cements: a literature review. *J Adhes Dent*. 2008;10(4):251-8.
15. Manso AP, Carvalho RM. Dental Cements for Luting and Bonding Restorations: Self-Adhesive Resin Cements. *Dent Clin North Am*. 2017;61(4):821-34.
16. Ferracane JL, Stansbury JW, Burke FJ. Self-adhesive resin cements - chemistry, properties and clinical considerations. *J Oral Rehabil*. 2011;38(4):295-314.
17. Fleisch AF, Sheffield PE, Chinn C, Edelstein BL, Landrigan PJ. Bisphenol A and related compounds in dental materials. *Pediatrics*. 2010;126(4):760-8.
18. Nagel SC, vom Saal FS, Thayer KA, Dhar MG, Boechler M, Welshons WV. Relative binding affinity-serum modified access (RBA-SMA) assay predicts the relative in vivo bioactivity of the xenoestrogens bisphenol A and octylphenol. *Environ Health Perspect*. 1997;105(1):70-6.
19. Becher R, Wellendorf H, Sakhi AK, Samuelsen JT, Thomsen C, Bolling AK, et al. Presence and leaching of bisphenol a (BPA) from dental materials. *Acta Biomater Odontol Scand*. 2018;4(1):56-62.
20. Ilie N, Simon A. Effect of curing mode on the micro-mechanical properties of dual-cured self-adhesive resin cements. *Clin Oral Investig*. 2012;16(2):505-12.
21. Mainardi Mdo C, Giorgi MC, Lima DA, Marchi GM, Ambrosano GM, Paulillo LA, et al. Effect of energy density and delay time on the degree of conversion and Knoop

microhardness of a dual resin cement. *J Investig Clin Dent*. 2015;6(1):53-8.

22. Pashley DH, Tay FR, Breschi L, Tjaderhane L, Carvalho RM, Carrilho M, et al. State of the art etch-and-rinse adhesives. *Dent Mater*. 2011;27(1):1-16.
23. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Yoshida Y, Mine A, De Munck J, Van Landuyt KL. State of the art of self-etch adhesives. *Dent Mater*. 2011;27(1):17-28.
24. Kilinc E, Antonson SA, Hardigan PC, Kesercioglu A. Resin cement color stability and its influence on the final shade of all-ceramics. *J Dent*. 2011;39 Suppl 1:e30-6.
25. Pissaia JF, Correr GM, Gonzaga CC, Cunha LFd. Influence of shade, curing mode, and aging on the color stability of resin cements. *Brazilian Journal of Oral Sciences*. 2015;14:272-5.
26. Rueggeberg FA, Giannini M, Arrais CAG, Price RBT. Light curing in dentistry and clinical implications: a literature review. *Braz Oral Res*. 2017;31(suppl 1):e61.
27. Yan YL, Kim YK, Kim KH, Kwon TY. Changes in degree of conversion and microhardness of dental resin cements. *Oper Dent*. 2010;35(2):203-10.
28. Jang Y, Ferracane JL, Pfeifer CS, Park JW, Shin Y, Roh BD. Effect of Insufficient Light Exposure on Polymerization Kinetics of Conventional and Self-adhesive Dual-cure Resin Cements. *Oper Dent*. 2017;42(1):E1-E9.
29. Tagami A, Takahashi R, Nikaido T, Tagami J. The effect of curing conditions on the dentin bond strength of two dual-cure resin cements. *Journal of prosthodontic research*. 2017;61(4):412-8.
30. da Silva EM, Almeida GS, Poskus LT, Guimaraes JG. Relationship between the degree of conversion, solubility and salivary sorption of a hybrid and a nanofilled resin composite. *Journal of applied oral science : revista FOB*. 2008;16(2):161-6.
31. Ferracane JL, Greener EH. The effect of resin formulation on the degree of conversion and mechanical properties of dental restorative resins. *J Biomed Mater Res*. 1986;20(1):121-31.
32. Shin WS, Li XF, Schwartz B, Wunder SL, Baran GR. Determination of the degree of cure of dental resins using Raman and FT-Raman spectroscopy. *Dental Materials*. 1993;9(5):317-24.

33. Moraes LG, Rocha RS, Menegazzo LM, de Araujo EB, Yukimito K, Moraes JC. Infrared spectroscopy: a tool for determination of the degree of conversion in dental composites. *Journal of applied oral science : revista FOB*. 2008;16(2):145-9.
34. Pianelli C, Devaux J, Bebelman S, Leloup G. The micro-Raman spectroscopy, a useful tool to determine the degree of conversion of light-activated composite resins. *J Biomed Mater Res*. 1999;48(5):675-81.
35. Cadenaro M, Navarra CO, Antonioli F, Mazzoni A, Di Lenarda R, Rueggeberg FA, et al. The effect of curing mode on extent of polymerization and microhardness of dual-cured, self-adhesive resin cements. *Am J Dent*. 2010;23(1):14-8.
36. Vrochari AD, Eliades G, Hellwig E, Wrbas KT. Curing efficiency of four self-etching, self-adhesive resin cements. *Dent Mater*. 2009;25(9):1104-8.
37. Di Francescantonio M, Aguiar TR, Arrais CA, Cavalcanti AN, Davanzo CU, Giannini M. Influence of viscosity and curing mode on degree of conversion of dual-cured resin cements. *European journal of dentistry*. 2013;7(1):81-5.
38. Nocca G, Iori A, Rossini C, Martorana GE, Ciasca G, Arcovito A, et al. Effects of barriers on chemical and biological properties of two dual resin cements. *Eur J Oral Sci*. 2015;123(3):208-14.
39. Colerangle JB, Roy D. Profound effects of the weak environmental estrogen-like chemical bisphenol A on the growth of the mammary gland of Noble rats. *J Steroid Biochem Mol Biol*. 1997;60(1-2):153-60.
40. Arenholt-Bindslev D, Breinholt V, Preiss A, Schmalz G. Time-related bisphenol-A content and estrogenic activity in saliva samples collected in relation to placement of fissure sealants. *Clin Oral Investig*. 1999;3(3):120-5.
41. Komurcuoglu E, Olmez S, Vural N. Evaluation of residual monomer elimination methods in three different fissure sealants in vitro. *J Oral Rehabil*. 2005;32(2):116-21.
42. Joskow R, Barr DB, Barr JR, Calafat AM, Needham LL, Rubin C. Exposure to bisphenol A from bis-glycidyl dimethacrylate-based dental sealants. *J Am Dent Assoc*. 2006;137(3):353-62.
43. Kingman A, Hyman J, Masten SA, Jayaram B, Smith C, Eichmiller F, et al.

Bisphenol A and other compounds in human saliva and urine associated with the placement of composite restorations. *J Am Dent Assoc.* 2012;143(12):1292-302.

44. Tsujimoto A, Barkmeier WW, Takamizawa T, Watanabe H, Johnson WW, Latta MA, et al. Simulated localized wear of resin luting cements for universal adhesive systems with different curing mode. *Journal of oral science.* 2018;60(1):29-36.

45. Rueggeberg FA, Caughman WF. The influence of light exposure on polymerization of dual-cure resin cements. *Oper Dent.* 1993;18(2):48-55.

46. Moraes RR, Boscato N, Jardim PS, Schneider LF. Dual and self-curing potential of self-adhesive resin cements as thin films. *Oper Dent.* 2011;36(6):635-42.

47. Carrilho E, Cardoso M, Marques Ferreira M, Marto CM, Paula A, Coelho AS. 10-MDP Based Dental Adhesives: Adhesive Interface Characterization and Adhesive Stability- A Systematic Review. *Materials (Basel, Switzerland).* 2019;12(5).

48. Aung SSMP, Takagaki T, Ko Ko A, Halabi S, Sato T, Ikeda M, et al. Adhesion durability of dual-cure resin cements and acid-base resistant zone formation on human dentin. *Dental Materials.* 2019;35.

49. Yoshida Y, Yoshihara K, Nagaoka N, Hayakawa S, Torii Y, Ogawa T, et al. Self-assembled Nano-layering at the Adhesive interface. *J Dent Res.* 2012;91(4):376-81.

50. Aguiar TR, Di Francescantonio M, Arrais CA, Ambrosano GM, Davanzo C, Giannini M. Influence of curing mode and time on degree of conversion of one conventional and two self-adhesive resin cements. *Oper Dent.* 2010;35(3):295-9.

51. Pereira SG, Fulgencio R, Nunes TG, Toledano M, Osorio R, Carvalho RM. Effect of curing protocol on the polymerization of dual-cured resin cements. *Dent Mater.* 2010;26(7):710-8.

52. Franca FA, Oliveira M, Rodrigues JA, Arrais CA. Pre-heated dual-cured resin cements: analysis of the degree of conversion and ultimate tensile strength. *Braz Oral Res.* 2011;25(2):174-9.



ภาคผนวก

ตาราง 1 ตารางแสดงผลผลการศึกษาทางสถิติเชิงพรรณนาของซีเมนต์รีไลเอกันซ์สองร้อยใน
ตัวอย่างทั้งสามสิบขึ้น

วิธีการบ่มตัว	% DC		จำนวน	Means %DC	S.D.
U200 SC 10 mins.	50.30	19.53	10	32.82	14.10
	12.59	59.18			
	28.42	26.61			
	32.78	24.34			
	33.17	41.32			
U200 SC 24 hrs.	77.62	39.13	10	58.38	16.19
	74.50	42.33			
	53.45	57.94			
	83.33	55.60			
	37.64	62.27			
U200 LC	48.99	70.13	10	61.67	17.84
	61.78	49.28			
	90.70	88.08			
	58.93	42.55			
	38.64	67.65			

ตาราง 2 ตารางแสดงผลผลการศึกษาศักยภาพทางสถิติเชิงพรรณนาของซีเมนต์พานาเวียวีไฟว์ในตัวอย่างทั้งสามลิบขึ้น

วิธีการบ่มตัว	%DC		จำนวน	Means %DC	S.D.
V5 SC 10 mins.	41.18	53.26	10	57.76	10.41
	53.37	73.31			
	72.07	60.86			
	56.03	64.52			
	57.69	45.26			
V5 SC 24 hrs.	78.57	59.73	10	76.47	10.34
	92.69	80.63			
	70.32	62.50			
	87.51	79.46			
	80.74	72.58			
V5 LC	53.67	60.91	10	65.35	8.45
	61.94	67.17			
	72.50	74.11			
	73.82	50.04			
	69.71	69.65			

ตาราง 3 แสดงการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของประชากรโดยใช้ Levene's test

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.434	5	54	0.227

ตาราง 4 แสดงผลการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way-ANOVA)

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	10385.505	5	2079.101	11.704	0.000	0.520
Intercept	207045.176	1	207045.176	1165.575	0.000	0.959
Cements type	3635.684	1	3635.684	20.467	0.000	0.275
Curing methods	5583.026	2	2791.513	15.715	0.000	0.368
Cements x Curing methods	1176.795	2	588.397	3.312	0.044	0.109
Error	9592.207	54	177.633			
Total	227032.889	60				
Corrected Total	19987.712	59				

ตาราง 5 แสดงผลการเปรียบเทียบพหุคูณแบบแอลเอสดี กรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างชนิดของเรซินซีเมนต์

Curing methods	Cements type		Mean Difference	Std.Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference	
						Lower Bound	Upper Bound
SC 10 mins.	U200	V5	-24.932	5.960	0.000	-36.882	-12.982
	V5	U200	24.932	5.960	0.000	12.982	36.882
SC 24 hrs.	U200	V5	-18.092	5.960	0.004	-30.042	-6.142
	V5	U200	18.092	5.960	0.004	6.142	30.042
LC	U200	V5	-3.681	5.960	0.539	-15.631	8.269
	V5	U200	3.681	5.960	0.539	-8.269	15.631

ตาราง 6 แสดงผลการเปรียบเทียบพหุคูณแบบแอลเอสดี กรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการบ่มตัวของเรซินซีเมนต์

Cements type	Curing methods		Mean Difference	Std.Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference	
						Lower	Upper
						Bound	Bound
U200	10 mins.	24 hrs	-25.557	5.960	0.000	-37.507	-13.607
		LC	-28.848	5.960	0.000	-40.798	-16.898
	24 hrs.	10 mins.	25.557	5.960	0.000	13.607	37.507
		LC	-3.291	5.960	0.583	-15.241	8.659
	LC	10 mins.	28.848	5.960	0.000	16.898	40.798
		24 hrs.	3.291	5.960	0.583	-8.659	15.241
V5	10 mins.	24 hrs	-18.717	5.960	0.003	-30.557	-6.767
		LC	-7.597	5.960	0.208	-19.547	4.353
	24 hrs	10 mins.	18.717	5.960	0.003	6.767	30.667
		LC	11.120	5.960	0.068	-0.830	23.070
	LC	10 mins.	7.597	5.960	0.208	-4.353	19.547
		24 hrs	-11.120	5.960	0.068	-23.070	0.830

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	คงวุฒิ เหลืองเรืองรอง
วัน เดือน ปี เกิด	2 มีนาคม 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2556
ที่อยู่ปัจจุบัน	190 ซ.รามคำแหง 9 (ธารารมณ) แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร

