



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

ผลของระยะห่างในการฉายแสงที่มีต่อการเกิดพอลิเมอร์ของกลาสไอโอโนเมอร์
ซีเมนต์ชนิดดัดแปลงด้วยเรซิน

**Effect of Light-Curing Distance on the Degree of Conversion of a Resin-
Modified Glass Ionomer Cement**

โดย

ดวงหทัย อภิลักขิตกุล

นลพรรณ ลือวิสุทธิชาติ

วิมพ์สิริ มนตรีโพธิ์

ฤดีมาศ โลเกศกระวี

กุลภัสสร เมตตา

กิตติชัย สิงห์รัตน์

อ.ดร.ปกรณ์ ชื่นจิตต์

สนับสนุนโดย

สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต

2568

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยเรื่อง ผลของระยะห่างระหว่างปลายของอุปกรณ์ให้แสงและพื้นผิวของซีเมนต์เรซินผสมไอออนเมอร์แก้ว สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือในการทำทดลองโดยนักศึกษาและขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนในการศึกษาวิจัย และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัยในทุกขั้นตอน รวมทั้งกรุณาพิจารณาและตรวจสอบความถูกต้องของรายงานการวิจัยเล่มนี้โดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยมหาวิทยาลัยรังสิต ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณบุคลากรผู้ปฏิบัติงานหน่วยวิจัย คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้กรุณาสละเวลาให้ข้อมูลประกอบการดำเนินการวิจัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง นำมาซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่สมบูรณ์ ส่งผลให้การวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ด้วยดี

ปกรณ์ ชื่นจิตต์ - ผู้วิจัยหลัก



ชื่อเรื่อง: ผลของระยะห่างในการฉายแสงที่มีต่อระดับการเกิดพอลิเมอร์ของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ชนิดดัดแปลงด้วยเรซิน

ผู้วิจัย: อ.ดร.ปกรณ ชื่นจิตต์

สถาบัน: วิทยาลัยทันตแพทยศาสตร์

ปีที่พิมพ์: 2568

สถานที่พิมพ์: มหาวิทยาลัยรังสิต

แหล่งที่เก็บรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์: มหาวิทยาลัยรังสิต จำนวนหน้างานวิจัย: 48 หน้า

คำสำคัญ: Resin-Modified Glass Ionomer Cement (RMGIC), Light-Curing Distance, Degree of Conversion (DC), Light Irradiance, Dental Restorations

ลิขสิทธิ์: มหาวิทยาลัยรังสิต

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการตรวจสอบผลของระยะห่างระหว่างปลายของเครื่องฉายแสงกับผิวของซีเมนต์กลาสไอโอโนเมอร์ชนิดดัดแปลงด้วยเรซิน (RMGIC) ต่อระดับการเกิดพอลิเมอร์ (DC) และความเข้มแสง การศึกษานี้เป็นการทดลองเชิงปริมาณที่ดำเนินการในสภาพห้องปฏิบัติการที่ควบคุม โดยที่ตัวอย่าง RMGIC ถูกฉายแสงด้วยระยะห่างที่แตกต่างกันระหว่างปลายเครื่องฉายแสงและพื้นผิวของวัสดุ ได้แก่ 0 มม., 4 มม., และ 8 มม.

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ความเข้มแสงจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น แต่ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไม่ได้แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในระยะที่ทดสอบ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าการฉายแสงเพื่อให้ RMGIC แข็งตัวอย่างมีประสิทธิภาพยังสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม แม้ว่าจะเพิ่มระยะห่างในการฉายแสงก็ตาม อย่างไรก็ตาม การลดลงของความเข้มแสงที่ระยะห่างที่มากขึ้นอาจมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลอื่น ๆ ของวัสดุ เช่น ความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอ

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าแม้ผู้ปฏิบัติงานทางคลินิกอาจมีความยืดหยุ่นบางอย่างในการเลือกระยะห่างในการฉายแสงโดยไม่ทำให้ระดับการเกิดพอลิเมอร์ลดลง แต่การรักษาระยะห่างที่น้อยที่สุดยังคงเป็นสิ่งที่แนะนำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีในระยะยาวสำหรับการบูรณะ ฟันพุทางทันตกรรม การวิจัยเพิ่มเติมจำเป็นต้องดำเนินการเพื่อประเมินผลของพารามิเตอร์การฉายแสงต่อสมบัติอื่น ๆ ของ RMGIC รวมถึงอิทธิพลของเทคโนโลยีการฉายแสงและระยะเวลาการฉายแสงที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางคลินิกให้ดีที่สุด

Title: Effect of Light-Curing Distance on the Degree of Polymerization of Resin-Modified Glass Ionomer Cement

Researcher: Pakorn Chuenjit

Institution: College of Dental Medicine

Year of Publication: 2025

Publisher: Rangsit University

Source: Rangsit University

No. of Pages: 48 pages

Keywords: Resin-Modified Glass Ionomer Cement (RMGIC), Light-Curing Distance, Degree of Conversion (DC), Light Irradiance, Dental Restorations

Copyrights: Rangsit University

Abstract

The objective of this study was to investigate the effect of the distance between the tip of the light-curing unit and the surface of resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) on the degree of conversion (DC) and light irradiance. This quantitative experimental study was conducted in a controlled laboratory setting, where RMGIC samples were cured at varying distances between the light-curing unit tip and the material surface, specifically at 0 mm, 4 mm, and 8 mm.

The results showed that although the light irradiance decreased significantly as the distance increased, the degree of conversion did not exhibit significant differences across the tested distances. This suggests that effective curing of RMGIC can still occur under suboptimal conditions, even with increased curing distances. However, reduced irradiance at greater distances could potentially impact other mechanical properties of the material, such as hardness and wear resistance.

These findings indicate that while clinicians may have some flexibility in curing distance without compromising the degree of conversion, maintaining a minimal distance is advisable to ensure optimal long-term outcomes for restorations. Further research is needed to evaluate the effect of curing parameters on other properties of RMGIC, as well as the potential influence of different light-curing technologies and exposure times, to optimize clinical performance.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป/ตาราง	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
นิยามศัพท์	2
ขอบเขตของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	25
การเตรียมชิ้นงาน	25
การวัดค่าความเข้มแสง	25
การวัดค่า degree of conversion	25
กลุ่มทดลอง	26
กลุ่มตัวอย่าง	27
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	28
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล	29
บทที่ 5 วิจารณ์	32
สรุป	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	44
ประวัติผู้วิจัย	46

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	องค์ประกอบของผง Glass Ionomer Cement สามชนิด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	8
2	โครงสร้างของกรดแอลคีนอิกชนิดต่าง ๆ	9
3	ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของ GIC	9
4	ตัวอย่าง resin-modified GICs	10
5	การปล่อยฟลูออไรด์สะสมจากผลิตภัณฑ์กลาสไอโอโนเมอร์ต่าง ๆ	11

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของ GC Gold Label II LC	27
2	รายละเอียดคุณลักษณะของเครื่องมือที่ใช้	28
3	ค่าความเข้มของแสง (Light Irradiance) และเปอร์เซ็นต์ระดับการเปลี่ยนแปลง	30



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

Glass ionomer cements (GICs) เป็นวัสดุอเนกประสงค์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในทันตแพทยศาสตร์สำหรับหลากหลายวัตถุประสงค์ ได้แก่ การเคลือบรองวัสดุอุดฟัน (lining) การยึดติด (bonding) การเคลือบปิดผิวฟัน (sealing) การยึดติดวัสดุทางทันตกรรม (cementing) และการบูรณะฟัน (restoring teeth) วัสดุนี้เป็นที่รู้จักกันดีในด้านคุณสมบัติทางชีวภาพ โดยเฉพาะความสามารถในการปล่อยฟลูออไรด์ ซึ่งช่วยในกระบวนการคืนแร่ธาตุของฟัน (remineralization) และลดความเสี่ยงของฟันผุซ้ำ (secondary caries) นับตั้งแต่การพัฒนา GICs ได้มีการปรับปรุงองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางคลินิก แม้ว่า GICs แบบดั้งเดิมจะมีข้อดีหลายประการ เช่น การยึดติดกับโครงสร้างฟันโดยตรงและการปล่อยฟลูออไรด์ แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความไวต่อความชื้น (moisture sensitivity) ความทนทานต่อการสึกหรอที่จำกัด (limited wear resistance) และความแข็งแรงเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ (relatively low mechanical strength) ข้อจำกัดเหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาสูตรใหม่ ๆ ของ GICs ซึ่งรวมถึงการพัฒนา resin-modified glass ionomer cements (RMGIC)

RMGIC ถือเป็นความก้าวหน้าสำคัญในวัสดุบูรณะทางทันตกรรม โดยการเติมองค์ประกอบของเรซินลงใน GICs วัสดุไฮบริดชนิดนี้จึงสามารถรวมข้อดีของ GICs แบบดั้งเดิม เช่น การยึดติดกับโครงสร้างฟันและการปล่อยฟลูออไรด์ เข้ากับคุณสมบัติที่ได้รับการปรับปรุงจากเทคโนโลยีเรซิน RMGIC มีความแข็งแรงเชิงกลที่สูงขึ้น (better mechanical strength) มีความสวยงามที่ดียิ่งขึ้น (higher esthetic appeal) มีความสะดวกในการใช้งาน (easier handling) และมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานขึ้น (longer working times) กระบวนการบ่มตัว (curing process) ของ RMGIC อาศัยทั้งปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดและเบส (acid-base reaction) ควบคู่ไปกับกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง (light-activated polymerization) ทำให้วัสดุชนิดนี้เป็นตัวเลือกที่เชื่อถือได้ในทางคลินิก ด้วยคุณสมบัติไฮบริดดังกล่าว RMGIC สามารถแก้ไขข้อจำกัดที่มีอยู่ของ GICs แบบดั้งเดิมได้ จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในสถานการณ์ทางคลินิกที่หลากหลาย

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางคลินิกของวัสดุที่บ่มด้วยแสง เช่น RMGIC คือ degree of conversion (DC) ซึ่งหมายถึงระดับประสิทธิภาพที่มอนอเมอร์ในวัสดุสามารถเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการบ่ม DC มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) และอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะ หากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันไม่สมบูรณ์ อาจส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลง (weaker material strength) มีมอนอเมอร์ตกค้างในปริมาณสูงขึ้น (increased residual monomer content) และเพิ่มความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของการบูรณะทางทันตกรรม ใน RMGIC การบรรลุ DC ที่เหมาะสมเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากต้องอาศัยทั้งปฏิกิริยาทางเคมีและการกระตุ้นด้วยแสง ดังนั้น การรับประกันว่ากระบวนการบ่มตัวเป็นไปอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการสร้างวัสดุที่แข็งแรง ทนทาน และสามารถรองรับแรงทางกลในช่องปากได้

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการบ่มตัวด้วยแสงคือ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิวของวัสดุ ในทางคลินิก ความลึกของโพรงฟันที่แตกต่างกันและความท้าทายในการรักษาระยะฉายแสงที่เหมาะสมอาจส่งผลต่อกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของ RMGIC ดังนั้น การทำความเข้าใจผลกระทบของระยะฉายแสงต่อ DC จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อผลลัพธ์ทางคลินิกที่เหมาะสม แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความเข้มของแสง (light intensity) และระยะฉายแสง (curing distance) ต่อ composite resins อยู่มากมาย แต่ยังคงมีช่องว่างขององค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ที่มีต่อ RMGIC ความไม่ชัดเจนนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อกำหนดแนวปฏิบัติที่ดีที่สุดในการบ่ม RMGIC โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นของระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับพื้นผิวของวัสดุ

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือการประเมินผลกระทบของระยะฉายแสงต่อ degree of conversion ของ resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) โดยมีเป้าหมายเฉพาะดังต่อไปนี้:

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะฉายแสงที่แตกต่างกันต่อ degree of conversion ของ RMGIC
2. เพื่อประเมินอิทธิพลของความเข้มของแสงที่ระยะต่าง ๆ ต่อความลึกของการบ่ม (depth of cure) และประสิทธิภาพของการพอลิเมอร์ไรเซชัน
3. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง light irradiance กับ degree of conversion โดยใช้ micro-Raman spectroscopy

โดยการบรรลุวัตถุประสงค์เหล่านี้ การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อให้เข้าใจแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการฉายแสงใน RMGIC ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงผลลัพธ์ทางคลินิกและเพิ่มความพึงพอใจของผู้ป่วย

นิยามศัพท์

- Resin-Modified Glass Ionomer Cement (RMGIC)

วัสดุบูรณะทางทันตกรรมที่ผสมผสานคุณสมบัติของ glass ionomer cement แบบดั้งเดิมเข้ากับองค์ประกอบของเรซิน เพื่อเพิ่มความเสถียรในการใช้งาน การบ่มตัว และคุณสมบัติเชิงกล

- Degree of Conversion (DC)

ร้อยละของหมู่มอนอเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการบ่มของวัสดุทางทันตกรรม ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ระดับของการพอลิเมอร์ไรเซชัน และมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

- Light Irradiance

กำลังของแหล่งกำเนิดแสงที่ตกกระทบบนพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัสดุทางทันตกรรม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน

- Polymerization

กระบวนการทางเคมีที่มอนอเมอร์ทำปฏิกิริยาและรวมตัวกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้วัสดุบูรณะทางทันตกรรมแข็งตัว ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

- Light-Curing Unit

อุปกรณ์ทางทันตกรรมที่ใช้ปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะ เพื่อกระตุ้นและทำให้กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของวัสดุที่บ่มด้วยแสง เช่น RMGIC สมบูรณ์

- Curing Distance

ระยะห่างระหว่างปลายอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิวของวัสดุทางทันตกรรมที่ทำการบ่ม ระยะนี้มีผลโดยตรงต่อ light irradiance และระดับของการพอลิเมอร์ไรเซชัน

- Mechanical Properties

คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดพฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งรวมถึงความแข็ง (hardness) ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และความยืดหยุ่น (flexibility) สำหรับวัสดุทางทันตกรรม mechanical properties มีความสำคัญต่อความทนทานและประสิทธิภาพการใช้งาน

- Environmental Conditions

ปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการบ่มของวัสดุทางทันตกรรม การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างเหมาะสมช่วยให้ได้ผลลัพธ์ของการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ

- Photoinitiator

สารประกอบทางเคมีในวัสดุที่บ่มด้วยแสง ซึ่งดูดซับพลังงานแสงและกระตุ้นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ประสิทธิภาพของ photoinitiator มีบทบาทสำคัญในการบรรลุ degree of conversion ที่เหมาะสม

- Restorative Dentistry

สาขาหนึ่งของทันตแพทยศาสตร์ที่มุ่งเน้นการฟื้นฟูโครงสร้างและการทำงานของฟันที่เสียหายหรือผุ โดยใช้วัสดุและเทคนิคต่าง ๆ เช่น การอุดฟัน (fillings) การครอบฟัน (crowns) และการบูรณะด้วย RMGIC

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างปลายอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิวของ resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) ที่มีต่อ degree of conversion (DC) และ light irradiance ที่วัสดุได้รับ การศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงทดลองภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบชุดหนึ่งซึ่งมีการปรับระยะฉายแสงที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0 mm ถึง 8 mm วัตถุประสงค์คือเพื่อประเมินว่า การเปลี่ยนแปลงของระยะฉายแสงมีอิทธิพลต่อกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันและคุณสมบัติเชิงกลของ RMGIC อย่างไร

ขอบเขตของการศึกษาเน้นการวิเคราะห์สองปัจจัยหลัก ได้แก่ degree of conversion (DC) และ light irradiance ที่ระยะฉายแสงต่าง ๆ ตัวแปรควบคุม เช่น ประเภทของอุปกรณ์ฉายแสง ระยะเวลาการฉายแสง และสภาวะแวดล้อม ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานเพื่อลดปัจจัยกวนและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้จำกัดเฉพาะการประเมินคุณสมบัติของวัสดุภายใต้สภาวะทดลองที่ควบคุมแล้วเท่านั้น และ ไม่รวมถึงการทดลองทางคลินิกหรือการทดสอบในมนุษย์

การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการปรับแต่งแนวทางการฉายแสงสำหรับ RMGIC ในสาขาทันตกรรมบูรณะ โดยมุ่งเน้นว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะฉายแสงส่งผลต่อคุณภาพ

และความทนทานของวัสดุบูรณะทางทันตกรรมอย่างไร ผลลัพธ์จากการศึกษานี้คาดว่าจะช่วยพัฒนาแนวปฏิบัติทางคลินิกที่เหมาะสมยิ่งขึ้นสำหรับการใช้งาน RMGIC และนำไปสู่ผลลัพธ์ของการรักษาทางทันตกรรมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

สมมติฐานการวิจัย

การศึกษานี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

- สมมติฐานว่าง (H_0): ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิวของ RMGIC ไม่มีผลต่อ degree of conversion
- สมมติฐานทางเลือก (H_1): ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิวของ RMGIC มีผลต่อ degree of conversion

สมมติฐานเหล่านี้จะได้รับการทดสอบผ่านการทดลองที่ออกแบบมาเพื่อประเมินผลกระทบของระยะฉายแสงที่แตกต่างกันต่อ degree of conversion โดยมีเป้าหมายเพื่อพิจารณาว่าระยะฉายแสงมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันหรือไม่

ความสำคัญของการวิจัย

การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงการประยุกต์ใช้ resin-modified glass ionomer cements (RMGIC) ในทางคลินิก โดยให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของระยะฉายแสงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน การทำความเข้าใจปัจจัยที่ส่งผลต่อ degree of conversion (DC) จะช่วยให้ทันตแพทย์สามารถตัดสินใจได้อย่างมีข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดในการฉายแสง ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพของการบูรณะทางทันตกรรม

การพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อความทนทานและสมบัติเชิงกลของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม การเพิ่มประสิทธิภาพของแนวทางการฉายแสงช่วยให้ทันตแพทย์สามารถสร้างผลลัพธ์ที่ดีขึ้นสำหรับผู้ป่วย นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังมีส่วนช่วยเสริมองค์ความรู้ในงานวิจัยด้านวัสดุทางทันตกรรม โดยเน้นเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพของ RMGIC เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทางคลินิกที่ดียิ่งขึ้น

ความสำคัญของการวิจัยนี้ขยายออกไปมากกว่าผลกระทบในทางคลินิกโดยตรง ด้วยการให้ความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเกี่ยวกับผลของระยะฉายแสงต่อการพอลิเมอร์ไรเซชันของ RMGIC งานวิจัยนี้สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแนวทางปฏิบัติและมาตรฐานการใช้วัสดุทางทันตกรรมที่บ่มด้วยแสง นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ยังอาจมีความเกี่ยวข้องกับผู้ผลิตวัสดุทางทันตกรรมและอุปกรณ์ฉายแสง เพื่อช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและให้ผลลัพธ์ทางคลินิกที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น

ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่ resin-modified glass ionomer cement ชนิดเฉพาะ (GC Gold Label II LC) และศึกษาผลของระยะฉายแสงที่อยู่ในช่วง 0 mm ถึง 8 mm อย่างไรก็ตาม การใช้ RMGIC เพียงชนิดเดียวและช่วงระยะฉายแสงที่กำหนด อาจส่งผลต่อความสามารถในการประยุกต์ใช้ผลลัพธ์กับวัสดุ glass ionomer cements (GICs) ประเภทอื่นหรือแนวทางการฉายแสงที่แตกต่างกัน

แม้ว่าผลการศึกษานี้จะให้ข้อมูลที่มีคุณค่าเกี่ยวกับผลของระยะฉายแสงต่อ degree of conversion แต่ต้องคำนึงว่าคุณสมบัติและองค์ประกอบของ RMGIC อาจแตกต่างกันไปตามยี่ห้อ และสูตรการผลิต ซึ่งอาจทำให้วัสดุแต่ละชนิดมีการตอบสนองต่อการฉายแสงแตกต่างกัน

สำหรับการวิจัยในอนาคต อาจมีการขยายขอบเขตไปสู่การศึกษาวัสดุที่หลากหลายขึ้น รวมถึง glass ionomer cements ชนิดอื่นและวัสดุเรซินประเภทต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบว่าผลการศึกษานี้สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายหรือไม่ นอกจากนี้ การศึกษาปัจจัยอื่น เช่น ประเภทของอุปกรณ์ฉายแสง ระยะเวลาการฉายแสง และโหมดการฉายแสง อาจช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ครอบคลุมมากขึ้นเกี่ยวกับแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพของการพอลิเมอไรเซชันใน RMGIC

การขยายขอบเขตของการวิจัยในด้านนี้จะช่วยให้สามารถพัฒนาแนวทางปฏิบัติที่มีความแม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับทันตแพทย์ และมีส่วนสนับสนุนการพัฒนาองค์ความรู้ในศาสตร์ด้านวัสดุทางทันตกรรม

กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดของการศึกษานี้ได้รับการออกแบบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิวของ resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแง่ของ degree of conversion (DC) และ light irradiance กรอบแนวคิดนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ ตัวแปรอิสระ (independent variable), ตัวแปรตาม (dependent variables), และตัวแปรควบคุม (control variables)

ตัวแปรอิสระ

1. ระยะห่างระหว่างปลายอุปกรณ์ฉายแสงกับพื้นผิว RMGIC: ตัวแปรนี้หมายถึงระยะห่างที่แตกต่างกันระหว่างอุปกรณ์ฉายแสงและพื้นผิว RMGIC ซึ่งอยู่ในช่วง 0 mm ถึง 8 mm ความแตกต่างของระยะฉายแสงนี้คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการฉายแสง

ตัวแปรตาม

2. Degree of Conversion (DC) เป็นตัวชี้วัดระดับของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่เกิดขึ้นใน RMGIC หลังจากการฉายแสง โดยจะถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินว่าระยะห่างของการฉายแสงส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของวัสดุอย่างไร
3. Light Irradiance: ความเข้มของแสงที่ตกกระทบพื้นผิวของ RMGIC ที่ระยะต่าง ๆ โดย light irradiance เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ degree of conversion และสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตัวแปรควบคุม

1. อุปกรณ์ฉายแสง (Light-Curing Unit): ควบคุมชนิด ยี่ห้อ และกำลังวัตต์ของอุปกรณ์ฉายแสงให้คงที่เพื่อลดความแปรปรวน
2. ระยะเวลาฉายแสง (Curing Time): กำหนดเวลาฉายแสงให้เหมือนกันในทุกตัวอย่างเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในการทดลอง
3. สภาวะแวดล้อม (Environmental Conditions): ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการเพื่อลดผลกระทบที่อาจมีต่อกระบวนการฉายแสง

แบบจำลองเชิงแนวคิด (Conceptual Model)

แบบจำลองเชิงแนวคิดของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินผลกระทบของตัวแปรอิสระ (ระยะฉายแสง) ต่อ ตัวแปรตาม (DC และ light irradiance) โดยแบบจำลองนี้เสนอว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับ RMGIC เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ light irradiance ลดลง และนำไปสู่ระดับ degree of conversion ที่ต่ำลง แบบจำลองนี้ช่วยกำหนดความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลระหว่างระยะฉายแสงกับสมบัติของวัสดุ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับทันตแพทย์ในการกำหนด ระยะฉายแสงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ RMGIC โดยการระบุระยะฉายแสงที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้จะช่วยลดความล้มเหลวทางคลินิกที่เกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราความสำเร็จของการบูรณะทางทันตกรรมที่ใช้ RMGIC

การพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งในการรับรองว่าวัสดุบูรณะมีสมบัติเชิงกลที่จำเป็น ความทนทานต่อการสึกหรอ (wear resistance) และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) เพื่อให้สามารถรองรับสภาวะแวดล้อมในช่องปากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังช่วยขยายขอบเขตขององค์ความรู้ทางวิชาการ โดยเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุทางทันตกรรมที่ป้อนด้วยแสง ผลการศึกษานี้อาจมีความสำคัญต่อ การศึกษาในหลักสูตรทันตแพทยศาสตร์ โดยช่วยเสริมสร้างความเข้าใจให้กับนักศึกษาทันตแพทย์เกี่ยวกับแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดในการใช้วัสดุบูรณะทางทันตกรรมที่ป้อนด้วยแสง

ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยนี้อาจเป็นประโยชน์สำหรับ ผู้ผลิตอุปกรณ์ฉายแสงทางทันตกรรม โดยช่วยให้เข้าใจถึงวิธีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถบรรลุการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมในสภาวะทางคลินิกที่หลากหลาย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เรซิน-โมดิฟายด์ กลาสไอโอโนเมอร์ ซีเมนต์ (RMGIC) เป็นวัสดุบูรณะทางทันตกรรมที่ผสมคุณสมบัติของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (GIC) แบบดั้งเดิมเข้ากับคอมโพสิตเรซิน RMGIC ได้รับการพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดบางประการของ GIC เช่น ความเปราะบางและความต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำ ในขณะที่ยังคงรักษาคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ของ GIC ไว้ เช่น การปล่อยฟลูออไรด์และการยึดติดทางเคมีกับโครงสร้างฟัน (Jalalian et al., 2019; Lindberg et al., 2007) การเติมเรซินช่วยให้ RMGIC มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีขึ้น ทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น ใช้เวลาดังตัวสั้นลง และมีความสวยงามที่ดีขึ้น ทำให้วัสดุนี้มีความหลากหลายในการใช้งานสำหรับการบูรณะฟันหลายประเภท โดยยังคงคุณสมบัติป้องกันฟันผุของ GIC ไว้ ขณะที่องค์ประกอบของเรซินช่วยปรับปรุงความเสถียรในการใช้งานและเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุ ความหลากหลายและคุณสมบัติที่ได้รับการพัฒนาของ RMGIC ทำให้เป็นตัวเลือกที่ได้รับความนิยมในการบูรณะทางทันตกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและการปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่อง

องค์ประกอบและความสำคัญของ RMGIC

เรซิน-โมดิฟายด์ กลาสไอโอโนเมอร์ ซีเมนต์ (RMGIC) ผสมข้อดีของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (GICs) แบบดั้งเดิมเข้ากับคุณสมบัติของคอมโพสิตเรซิน เช่นเดียวกับ GICs วัสดุนี้สามารถปล่อยฟลูออไรด์เพื่อช่วยป้องกันฟันผุและสามารถยึดติดทางเคมีกับชั้นเนื้อฟันและเคลือบฟันได้ ทำให้เกิดการปิดผนึกที่แข็งแรงและทนทาน (Kirsten, Rached, Mazur, Vieira, & Souza 2013) อย่างไรก็ตาม RMGIC ยังประกอบด้วยองค์ประกอบของเรซิน ซึ่งช่วยให้วัสดุตั้งตัวได้อย่างรวดเร็ว และสามารถควบคุมกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้ (Dursun, Nguyen, Tang, Attal, & Sadoun 2016) RMGIC มักอยู่ในรูปแบบของระบบสองส่วน ประกอบด้วยผงและของเหลว ส่วนผงมีองค์ประกอบหลักคือฟลูออโรอะลูมินอซิลิเกตกลาส ซึ่งให้ความแข็งแรงและสามารถปล่อยฟลูออไรด์ออกมาได้ นอกจากนี้ ยังมีการเติมออกไซด์ของโลหะ เช่น สตรอนเชียมออกไซด์หรือแบเรียมออกไซด์ เพื่อเพิ่มความทึบรังสี ผู้ผลิตบางรายอาจเติมอนุภาคนาโน เช่น นาโนเมอร์และนาโนคลัสเตอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการขัดเงาและคุณสมบัติด้านแสงของวัสดุ

องค์ประกอบของเหลวมักประกอบด้วยกรดโพลีคาร์บอกซิลิก น้ำ และกรดทาร์ทาริก กรดโพลีคาร์บอกซิลิกทำปฏิกิริยากับผงกลาสเพื่อสร้างโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (cross-linked matrix) ในบางกรณี กรดโพลีคาร์บอกซิลิกจะถูกดัดแปลงด้วยหมู่เมทาคริเลตเพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชัน น้ำทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับปฏิกิริยากรด-เบส และช่วยให้ซีเมนต์ที่ตั้งตัวแล้วคงสภาพไฮเดรต กรดทาร์ทาริกช่วยควบคุมเวลาทำงานและเวลาดังตัวของวัสดุ ของเหลวยังมีองค์ประกอบที่เป็นลักษณะเฉพาะของคอมโพสิตเรซิน เช่น HEMA (2-hydroxyethyl methacrylate) ซึ่งช่วยให้วัสดุสามารถเปียกเนื้อฟันได้ดีขึ้นและเพิ่มการยึดติด ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น camphorquinone ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการพอลิเมอไรเซชันเมื่อได้รับแสง วัสดุ RMGIC บางชนิดใช้ระบบ "tri-cure" ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox initiators) เพื่อให้สามารถบ่มตัวได้ทั้งด้วยแสงและปฏิกิริยาเคมี ทำให้สามารถใช้งานในลักษณะ bulk placement ได้

การศึกษาหลายชิ้นได้กล่าวถึงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ RMGIC ที่เฉพาะเจาะจง Vitremer (3M ESPE) ประกอบด้วยของเหลวที่มีโคพอลิเมอร์ของกรดโพลีแอซิด (35-45 wt%) HEMA (20-30 wt%) และน้ำ (30-40 wt%) ขณะที่ส่วนผงประกอบด้วยกลาสผงเป็นองค์ประกอบหลัก (>95 wt%) และ diphenyliodonium chloride (<2 wt%) (Dursun, Nguyen, Tang, Attal, & Sadoun 2016) Fuji II LC (GC) ประกอบด้วยของเหลวที่มีกรดโพลีอะคริลิก (20-22%) HEMA (35-40%) ส่วนผสมที่เป็นกรรมสิทธิ์ (5-15%) 2,2,4-Trimethyl hexamethylene dicarbonate (5-7%) และ triethylene glycol dimethacrylate (4-6%) โดยมีผงกลาสเป็นองค์ประกอบหลักของส่วนผง (Jalalian, Golkar, Paktinat, Ahmadi, Panahande, & Omrani 2019)

RMGIC เป็นวัสดุบูรณะทางทันตกรรมที่มีคุณสมบัติผสมผสานที่เป็นประโยชน์ ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายในสถานการณ์ทางคลินิก วัสดุนี้สามารถปล่อยฟลูออไรด์ได้เช่นเดียวกับ GIC แบบดั้งเดิม ช่วยป้องกันฟันผุ (Kirsten, Rached, Mazur, Vieira, & Souza 2013) และสามารถยึดติดกับชั้นเนื้อฟันและเคลือบฟันได้โดยตรง ทำให้เกิดการปิดผนึกที่แข็งแรงและทนทาน (Kirsten, Rached, Mazur, Vieira, & Souza 2013) แม้ว่าการหดตัวของพอลิเมอร์ไรเซชันจะยังคงเกิดขึ้น แต่ก็มีระดับที่ต่ำกว่าคอมโพสิตเรซิน นอกจากนี้ RMGIC อาจมีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำกว่า GICs แม้ว่าการมีอยู่ของ HEMA อาจทำให้เกิดข้อกังวลบางประการ (Dursun, Nguyen, Tang, Attal, & Sadoun 2016)

อย่างไรก็ตาม RMGIC ก็มีข้อจำกัดบางประการ วัสดุนี้มีความแข็งแรงเชิงกลและความต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำกว่าคอมโพสิตเรซิน ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในบริเวณที่มีแรงบดเคี้ยวสูง (Dursun, Nguyen, Tang, Attal, & Sadoun 2016) นอกจากนี้ การปล่อย HEMA ที่ไม่ได้พอลิเมอร์ไรซ์ออกจาก RMGIC อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน และอาจกระตุ้นให้เกิดอาการแพ้ (Dursun, Nguyen, Tang, Attal, & Sadoun 2016)

Component	Composition A	Composition B	Composition C
SiO ₂	41.9	35.2	20-30
Al ₂ O ₃	28.6	20.1	10-20
AlF ₃	1.6	2.4	—
CaF ₂	15.7	20.1	—
NaF	9.3	3.6	—
AlPO ₄	3.8	12.0	—
F	—	—	10-15
Na ₂ O	—	—	1-5
BaO	—	—	10-20
CaO	—	—	10-20
P ₂ O ₅	—	—	1-5

รูป 1 องค์ประกอบของผง Glass Ionomer Cement สามชนิด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Anusavice et al., 2013)

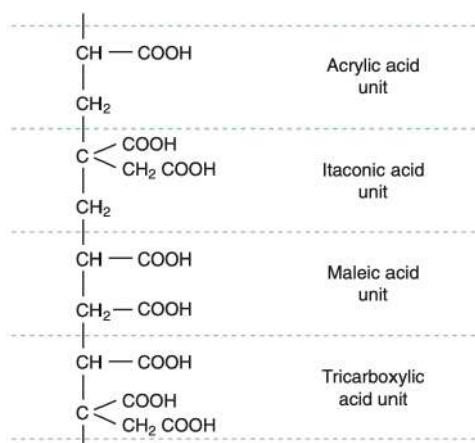
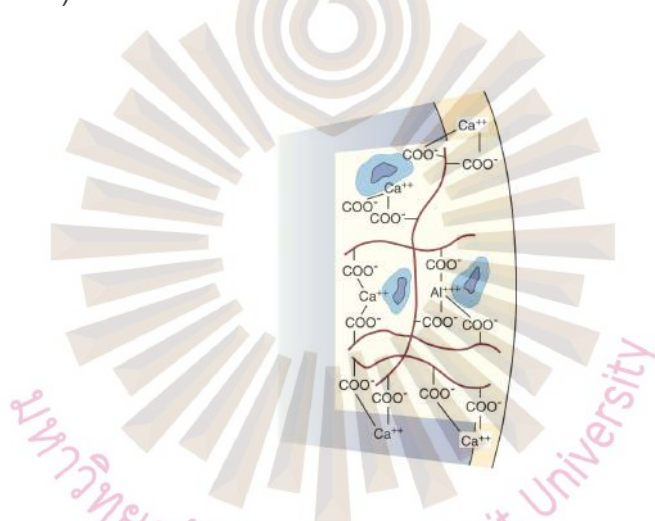


FIGURE 14-12 Structure of various types of alkenoic acids that make up polyacids of GICs.

รูป 2 โครงสร้างของกรดแอลคีนอิกชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของกรดโพลีแอซิดใน GICs (Anusavice et al., 2013)



รูป 3 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของ GIC อนุภาคสีน้ำเงินเข้มแทนอนุภาคแก้วที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยโครงสร้างเจล (แสดงเป็นบริเวณสีฟ้าอ่อน) ที่เกิดขึ้นเมื่อไอออน Al^{3+} และ Ca^{2+} ถูกชะออกจากแก้วอันเป็นผลจากการทำปฏิกิริยากับกรดโพลีอะคริลิก (polyacrylic acid) ไอออน Ca^{2+} และ Al^{3+} ทำปฏิกิริยากับหมู่ COO^- ของกรดโพลีอะคริลิกเพื่อสร้างโครงสร้างเชื่อมขวาง (cross-linked structure) นอกจากนี้ หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl groups) ยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมในชั้นเคลือบฟันและเนื้อฟันเพื่อเสริมสร้างการยึดติด (Anusavice et al., 2013)



รูป 4 ตัวอย่าง resin-modified GIC A และ B เป็นระบบผง-ของเหลวแบบสองขวด C คือ PhotacFil Quick Aplicap D คือ GC Fuji Plus Capsule และ E คือ Ketac Nano ซึ่งเป็นระบบเนื้อวัสดุแบบครีม-ครีม (paste-paste system) ที่ใช้การผสมแบบสถิต (static mixing) (Anusavice et al., 2013)

การปล่อยฟลูออไรด์และการคืนแร่ธาตุ

RMGIC สามารถปล่อยฟลูออไรด์ ซึ่งช่วยป้องกันฟันผุโดยกระตุ้นการสร้าง **fluorapatite** ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทนต่อการถูกทำลายด้วยกรดมากกว่า **hydroxyapatite** (Lindberg et al., 2006; Kirsten et al., 2013) ฟลูออไรด์ที่ถูกปล่อยออกมาจาก RMGIC ยังช่วยเสริมกระบวนการคืนแร่ธาตุ (**remineralization**) โดยไอออนแคลเซียมและฟอสเฟตจะถูกสะสมกลับเข้าสู่โครงสร้างฟันที่ถูกทำลายจากน้ำลาย (Kirsten et al., 2013) คุณสมบัตินี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้ที่มีความเสี่ยงสูงต่อฟันผุ เนื่องจากช่วยปกป้องวัสดุบูรณะและป้องกันการเกิดฟันผุซ้ำ

การปล่อยฟลูออไรด์เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ RMGIC สามารถให้ประโยชน์ในการป้องกันฟันผุในระยะยาว ซึ่งมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการป้องกันฟันผุตามขอบของวัสดุบูรณะ นอกจากนี้ RMGIC ยังมี กลไกการตั้งตัวแบบคู่ (**dual setting mechanism**) ซึ่งรวมทั้งปฏิกิริยากรด-เบสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นในด้านการใช้งานและสามารถวางวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในทางคลินิก

กลไกการตั้งตัวแบบคู่ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของ RMGIC แต่ยังช่วยให้วัสดุสามารถปรับตัวเข้ากับสภาวะทางคลินิกที่แตกต่างกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของการบูรณะฟันดีขึ้นและเพิ่มอัตราความสำเร็จในการรักษา

Material	FLUORIDE RELEASED (μG)	
	14 Days	30 Days
Type II	440	650
Cermet	200	300
Silver alloy admix	3350	4040
Type I	470	700
Liner (conventional)	1000	1300
Liner (hybrid)	1200	1600

รูป 5 การปล่อยฟลูออไรด์สะสมจากผลิตภัณฑ์กาสไอโอโนเมอร์ต่าง ๆ (Anusavice et al., 2013)

การลดการรั่วซึมระดับจุลภาคและการเพิ่มการยึดติด

RMGIC มีประสิทธิภาพในการลดการรั่วซึมระดับจุลภาค (microleakage) ผ่านหลายกลไก เช่น การยึดติดทางเคมีกับเนื้อฟัน ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ต่ำ และการปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่อง พันธะทางเคมีระหว่าง RMGIC กับพื้นช่วยสร้างการปิดผนึกแน่นหนาที่ขอบวัสดุบูรณะ พันธะนี้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเซเลชันระหว่างหมู่คาร์บอกซิลในกรดโพลีอะคริลิกของ RMGIC กับไฮดรอกซิลในฟัน ซึ่งแตกต่างจากคอมโพสิตเรซินที่ต้องอาศัยพันธะเชิงกลระดับจุลภาค (micromechanical bonding) RMGIC สามารถสร้างพันธะทางเคมีที่มีเสถียรภาพมากขึ้นและลดโอกาสในการเกิดช่องว่างที่ขอบวัสดุ ส่งผลให้ลดการรั่วซึมระดับจุลภาค (Fabianelli et al., 2010; Ismail et al., 2014; Shafiei and Akbarian, 2014) การปิดผนึกที่แข็งแรงนี้ช่วยป้องกันการแทรกซึมของแบคทีเรียและของเหลว ลดการเสียวฟันหลังการรักษาและลดความเสี่ยงของฟันผุซ้ำ การปรับตัวของวัสดุที่ขอบวัสดุบูรณะดีขึ้นช่วยให้การบูรณะมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณที่มีความชื้นสูง ความสามารถของ RMGIC ในการยึดติดกับโครงสร้างพื้นทางเคมีทำให้แตกต่างจากวัสดุอื่นที่อาศัยการยึดติดทางกายภาพเพียงอย่างเดียว ซึ่งช่วยให้มีประสิทธิภาพในการปิดผนึกและเพิ่มความทนทานของวัสดุ

เทคนิค open-sandwich ซึ่ง RMGIC ถูกปล่อยให้สัมผัสที่ขอบเหงือกของการบูรณะประเภท Class II มีประสิทธิภาพสูงในการลดการรั่วซึมระดับจุลภาคที่รอยต่อเคลือบฟันและซีเมนต์ (cemento-enamel junction) งานวิจัยหลายชิ้นพบว่าเทคนิค open-sandwich มีความสามารถในการลดการรั่วซึมระดับจุลภาคได้ดีกว่าเทคนิคการบูรณะอื่น ๆ (Feiz et al., 2021; Kirsten et al., 2013; Lindberg et al., 2003; Loguercio et al., 2004) เทคนิคนี้อาศัยคุณสมบัติเฉพาะของ RMGIC เช่น การยึดติดทางเคมีกับเนื้อฟัน การปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่อง และความสามารถในการดูดซับแรงตึงเครียด ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ RMGIC ที่ต่ำช่วยให้วัสดุเกิดการเสียรูปเชิงยืดหยุ่น (elastic deformation) และดูดซับแรงจากการหดตัวของคอมโพสิต ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดช่องว่างที่ขอบวัสดุบูรณะ (Lindberg et al., 2006; Dietrich et al., 1999; Feiz et al., 2021) คุณสมบัติในการดูดซับแรงเหล่านี้มีความสำคัญในการป้องกันการเกิดช่องว่างหดตัว (contraction gaps) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อคอมโพสิตเรซินบริเวณด้านบดเคี้ยวหดตัว โดยการทำหน้าที่เป็นชั้นดูดซับแรง RMGIC สามารถลดความเสี่ยงโดยรวมของการรั่วซึมระดับจุลภาค ซึ่งเป็นสาเหตุทั่วไปของความล้มเหลวในการบูรณะฟัน

ความสามารถในการยึดติดของวัสดุที่ใช้ RMGIC ดีขึ้นเนื่องจากพันธะทางเคมีที่แข็งแรงระหว่างวัสดุกับโครงสร้างฟัน พันธะนี้เกิดจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลใน RMGIC กับไอออนแคลเซียมในไฮดรอกซีอะพาไทต์ของฟัน (Fabianelli et al., 2010; Ismail et al., 2014) พันธะทางเคมีนี้สามารถทนต่อแรงบดเคี้ยวได้ดี ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของวัสดุบูรณะในระยะยาว (Lindberg et al., 2006) พันธะของ RMGIC มีประโยชน์อย่างมากในบริเวณที่ขอบวัสดุบูรณะขยายไปยังเนื้อฟันหรือซีเมนต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่คอมโพสิตเรซินอาจยึดติดได้ยาก นอกจากนี้ พันธะเคมีที่แข็งแรงของ RMGIC ยังช่วยแก้ไขปัญหาการยึดติดในบริเวณใต้เหงือก ซึ่งการควบคุมความชื้นทำได้ยาก พันธะของ RMGIC สามารถสร้างรอยต่อที่มั่นคงและทนต่อแรงต่าง ๆ ในช่องปากได้ดี ส่งผลให้วัสดุมีประสิทธิภาพดีขึ้นในสถานการณ์ทางคลินิกที่ทำหาย

พื้นผิวของ RMGIC ที่ตั้งตัวแล้วมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ ซึ่งช่วยให้เกิดการยึดติดเชิงกลกับคอมโพสิตเรซินที่อยู่ด้านบน เพิ่มแรงยึดติดเพิ่มเติมและช่วยให้วัสดุสามารถทนต่อแรงบดเคี้ยวได้ดีขึ้น ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ต่ำของ RMGIC ทำให้สามารถเสียรูปเมื่อได้รับแรงบดเคี้ยว ซึ่งช่วยรักษาความสมบูรณ์ของพันธะและป้องกันการหลุดออก (Dietrich et al., 1999; Lindberg et al., 2006) การเสียรูปเชิงยืดหยุ่นนี้ช่วยกระจายแรง ซึ่งเป็นประโยชน์โดยเฉพาะในบริเวณที่รับแรงมาก เช่น ฟันกราม คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของ RMGIC ช่วยให้วัสดุสามารถรับมือกับแรงในช่องปากได้ดี ลดโอกาสที่วัสดุจะหลุดหรือแตก การผสมผสานของพันธะทางเคมี การยึดติดเชิงกล และความสามารถในการดูดซับแรงทำให้ RMGIC เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการบูรณะฟันที่ต้องการความมั่นคงและความทนทานในระยะยาว

นอกจากนี้ ฟลูออไรด์ที่ถูกปล่อยออกมาจาก RMGIC ยังช่วยลดการรื้อซึมระดับจุลภาคโดยสร้างชั้นของ fluorapatite ที่บริเวณรอยต่อระหว่างฟันและวัสดุ ซึ่งมีความต้านทานต่อการสูญเสียแร่ธาตุมากขึ้น (Attar and Onen, 2002; Cenci et al., 2008; Kirsten et al., 2013; Lussi et al., 2012; Tenuta et al., 2005) การปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่องช่วยให้เกิดการป้องกันในระยะยาว โดยเฉพาะในบริเวณที่มีความเสี่ยงสูง เช่น ขอบเหงือก ฟลูออไรด์ยังช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะ คุณสมบัตินี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงต่อฟันผุ ซึ่งต้องการการปกป้องขอบวัสดุบูรณะมากขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงของฟันผุ แม้ว่าการรื้อซึมระดับจุลภาคจะเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย แต่คุณสมบัติในการต้านฟันผุของฟลูออไรด์ช่วยลดโอกาสในการเกิดฟันผุซ้ำ และช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะ ความสามารถของ RMGIC ในการปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่องทำให้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการจัดการความเสี่ยงของฟันผุซ้ำ โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีประวัติฟันผุสูง

ความทนทานของวัสดุบูรณะด้วย RMGIC

ความทนทานของวัสดุบูรณะที่ใช้ RMGIC เพิ่มขึ้นจากการทำงานร่วมกันของพันธะทางเคมี ความสามารถในการดูดซับแรง การปล่อยฟลูออไรด์ และศักยภาพในการคืนแร่ธาตุ พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่าง RMGIC กับโครงสร้างฟันช่วยป้องกันการรื้อซึมระดับจุลภาคและเพิ่มความสามารถในการยึดติด (Fabianelli et al., 2010; Ismail et al., 2014; Shafiei and Akbarian, 2014) พันธะที่แข็งแรงนี้ช่วยป้องกันไม่ให้ของเหลวในช่องปากและแบคทีเรียเข้าสู่วัสดุบูรณะ จึงช่วยลดความเสี่ยงของฟันผุซ้ำและยืดอายุการใช้งานของวัสดุ ความเสถียรที่เกิดจากพันธะทางเคมีนี้มีความสำคัญ

อย่างยิ่งในบริเวณที่มีแรงบดเคี้ยวสูง ซึ่งต้องอาศัยพันธะที่แข็งแรงและทนทานเพื่อความสำเร็จในระยะยาว

ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ RMGIC ที่ต่ำกว่าคอมโพสิตเรซินช่วยดูดซับแรงที่เกิดจากการหดตัวของคอมโพสิตชั้นบน ลดแรงเค้นที่รอยต่อระหว่างฟันและวัสดุบูรณะ (Dietrich et al., 1999; Lindberg et al., 2006) คุณสมบัติในการดูดซับแรงนี้ช่วยป้องกันการเกิดช่องว่างบริเวณขอบวัสดุบูรณะ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความล้มเหลวของวัสดุเรซิน RMGIC สามารถกระจายและดูดซับแรงที่เกิดขึ้นจากการใช้งานได้ดี จึงมีโอกาสแตกหักหรือลอกตัวน้อยลง โดยเฉพาะในบริเวณที่ได้รับแรงบดเคี้ยวสูง ความสามารถในการดูดซับแรงนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาความสมบูรณ์ของวัสดุบูรณะในระยะยาว โดยเฉพาะในบริเวณฟันกรามที่ต้องรับแรงบดเคี้ยวอย่างต่อเนื่อง

การปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่องจาก RMGIC ยังช่วยคืนแร่ธาตุให้กับโครงสร้างฟัน ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของเคลือบฟันและเนื้อฟัน และกระตุ้นการสร้าง fluorapatite ซึ่งมีความต้านทานต่อการกรดมากกว่า hydroxyapatite (Kirsten et al., 2013; Lindberg et al., 2006) การปล่อยฟลูออไรด์ของ RMGIC มีผลในการต้านฟันผุ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงต่อฟันผุ การปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่องช่วยให้วัสดุบูรณะมีเสถียรภาพมากขึ้นโดยชะลอการเกิดฟันผุใหม่ นอกจากนี้ ฟลูออไรด์ที่ปล่อยออกมายังช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งส่งเสริมสุขภาพโดยรวมของบริเวณที่ได้รับการบูรณะ การปล่อยฟลูออไรด์ไม่เพียงแต่เป็นประโยชน์ต่อโครงสร้างฟันที่อยู่ติดกับวัสดุบูรณะเท่านั้น แต่ยังมีผลป้องกันในวงกว้างขึ้น ช่วยลดการสูญเสียแร่ธาตุและป้องกันฟันผุได้อย่างครอบคลุม

ปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยฟลูออไรด์จาก RMGIC

การปล่อยฟลูออไรด์จาก RMGIC ได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย รวมถึงองค์ประกอบของวัสดุ การดูดซึมน้ำ การปรับสภาพพื้นผิว และสภาวะแวดล้อม ฟลูออไรด์ที่มีอยู่ใน RMGIC และชนิดของแก้วที่ใช้ในองค์ประกอบของผง RMGIC มีผลโดยตรงต่อปริมาณฟลูออไรด์ที่ปล่อยออกมา โดย RMGIC ที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูงกว่าจะสามารถปล่อยฟลูออไรด์ออกมาได้มากขึ้น (Shackori et al., 2024) องค์ประกอบของเรซิน เช่น HEMA อาจส่งผลต่อการปล่อยฟลูออไรด์โดยทำให้โครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนแปลง และส่งผลต่อการซึมผ่านของไอออน (Dursun et al., 2016) นอกจากนี้ โพลีอะคริลิกแอซิด ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) มีบทบาทสำคัญในการปล่อยฟลูออไรด์ เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแพร่กระจายของไอออน (Shackori et al., 2024) องค์ประกอบของอนุภาคแก้วและลักษณะของเมทริกซ์วัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดอัตราและระยะเวลาของการปล่อยฟลูออไรด์

กระบวนการตกแต่งและขัดเงาพื้นผิวสามารถเพิ่มการปล่อยฟลูออไรด์ได้โดยการเผยให้เห็นอนุภาคแก้วใหม่และเพิ่มพื้นที่ผิวที่ไอออนแลกเปลี่ยนไอออนของฟลูออไรด์ (Shackori et al., 2024) ปัจจัยภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงของระดับ pH อาหาร และการได้รับฟลูออไรด์จากแหล่งอื่น ๆ ก็มีผลต่อการปล่อยฟลูออไรด์เช่นกัน (Kirsten et al., 2013) สภาวะที่เป็นกรด ซึ่งอาจเกิดจากการบริโภคน้ำตาลบ่อยครั้ง สามารถเพิ่มการละลายของ RMGIC และช่วยให้ฟลูออไรด์ถูกปล่อยออกมาได้มากขึ้น ทำให้เกิดผลในการป้องกันฟันผุโดยการลดความเป็นกรดในช่องปาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง RMGIC กับสภาวะในช่องปาก รวมถึงพฤติกรรมการรับประทานอาหารและการได้รับฟลูออไรด์จาก

น้ำดื่มหรือยาสีฟันที่มีฟลูออไรด์ สามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถของวัสดุในการให้การป้องกันฟันผุในระยะยาว

การปล่อยฟลูออไรด์ในปริมาณสูงในช่วงแรกมีประโยชน์ต่อการป้องกันฟันผุในระยะเริ่มต้น แต่การปล่อยฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่องในระยะยาวมีความสำคัญในการรักษาสภาวะแวดล้อมที่ป้องกันฟันผุ RMGIC ยังสามารถ "เติมฟลูออไรด์ใหม่" ได้จากแหล่งภายนอก เช่น การใช้ยาสีฟันที่มีฟลูออไรด์ ซึ่งช่วยยืดอายุประโยชน์ของวัสดุ (Kirsten et al., 2013) การใช้ผลิตภัณฑ์ฟลูออไรด์เป็นประจำช่วยให้ RMGIC สามารถปล่อยฟลูออไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการป้องกันฟันผุในระยะยาว คุณสมบัติในการเติมฟลูออไรด์ใหม่นี้ทำให้ RMGIC เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงต่อฟันผุ ความสามารถในการเติมฟลูออไรด์ใหม่ช่วยให้ RMGIC ยังคงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันฟันผุตลอดอายุการใช้งานของวัสดุ ทำให้เป็นวัสดุที่สามารถปรับใช้ได้หลากหลายสำหรับความต้องการของผู้ป่วยประเภทต่าง ๆ

ปฏิกิริยาการตั้งตัวของ RMGIC

ปฏิกิริยาการตั้งตัวของ RMGIC เกิดจากทั้ง ปฏิกิริยากรด-เบส (acid-base reaction) และการเติมพอลิเมอร์ไรเซชัน (addition polymerization) ซึ่งทั้งสองกระบวนการส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ปฏิกิริยากรด-เบสเริ่มต้นเมื่อมีการผสมผงและของเหลว โดยกรดโพลีอะคริลิกจะทำปฏิกิริยากับ fluoroaluminosilicate glass ทำให้ไอออน เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}), อะลูมิเนียม (Al^{3+}) และ ฟลูออไรด์ (F^-) ถูกปล่อยออกมา ไอออนเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับกรดโพลีอะคริลิกเพื่อสร้างพันธะเกลือ (salt bridges) ซึ่งช่วยในกระบวนการเกิดเจลและการตั้งตัวของวัสดุ (Dursun et al., 2016) น้ำ เป็นองค์ประกอบสำคัญในปฏิกิริยานี้ เนื่องจากช่วยให้ไอออนเคลื่อนที่ เพิ่มความเป็นพลาสติกของวัสดุ และทำให้วัสดุที่ตั้งตัวแล้วมีเสถียรภาพ (Dursun et al., 2016) ปฏิกิริยากรด-เบสในระยะเริ่มต้นนี้ช่วยให้ RMGIC มีความแข็งแรงตั้งแต่แรกเริ่มและสามารถยึดติดกับโครงสร้างฟันได้ ปฏิกิริยากรด-เบสนี้ให้การยึดติดที่รวดเร็ว ส่งผลให้สามารถปิดผนึกบริเวณรอยต่อระหว่างฟันกับวัสดุบูรณะได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่เริ่มต้น

กระบวนการ addition polymerization ของ HEMA (2-hydroxyethyl methacrylate) ถูกกระตุ้นโดย อนุมูลอิสระ (free radicals) ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง (light activation) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) (Dursun et al., 2016; Mitra, 1991) การพอลิเมอร์ไรเซชันนี้ช่วยให้วัสดุตั้งตัวได้เร็วขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น และมีความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ GICs แบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การพอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ อาจนำไปสู่การปล่อย HEMA ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกมา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Czarnecka and Nicholson, 2008; Palmer et al., 1999) ดังนั้น การทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างสมบูรณ์จึงมีความสำคัญต่อการลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากมอนอเมอร์ตกค้างในวัสดุ

กลไกการตั้งตัวแบบคู่ (dual setting mechanism) ช่วยให้ RMGIC มีข้อดีทั้งในด้านคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานทางคลินิก โดยเฉพาะในสภาวะที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและความทนทานสูง

ระยะห่างและผลกระทบต่อความฉายแสงของเรซินคอมโพสิต

ประสิทธิภาพของการฉายแสงเพื่อบ่มเรซินคอมโพสิตขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างปลายอุปกรณ์ฉายแสง (light-curing unit, LCU) กับพื้นผิวของวัสดุเป็นอย่างมาก งานวิจัยหลายชิ้นได้ให้

ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความสำคัญของระยะห่างและแนวทางในการลดผลกระทบของระยะห่างต่อประสิทธิภาพของการบ่ม

ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจาก LCU จะลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์นี้มักอธิบายด้วย กฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) ซึ่งระบุว่าความเข้มของแสงจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง หมายความว่าหากระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ความเข้มของแสงจะลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของค่าตั้งต้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากฎนี้จะให้กรอบแนวคิดทั่วไป แต่การศึกษาพบว่าการลดลงของค่าความเข้มของแสง (irradiance) อาจเป็นไปตามรูปแบบการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ซับซ้อนมากขึ้นในสภาวะทางคลินิก (Al-Zain, Eckert, & Platt 2019)

พลังงานรังสี (radiant exposure) หรือพลังงานรวมที่ถูกส่งไปยังวัสดุเรซิน มีความสำคัญต่อการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ และสามารถคำนวณได้จากผลคูณของ irradiance และระยะเวลาการฉายแสง เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่า irradiance จะลดลง ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับระยะเวลาการฉายแสงให้เหมาะสมเพื่อรักษาค่าพลังงานรังสีให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม หากไม่มีการชดเชยค่าความเข้มของแสงที่ลดลง อาจส่งผลให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะลดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เพิ่มความไวต่อการสึกหรอ และเพิ่มความเสี่ยงของการรั่วซึมระดับจุลภาค (microleakage) (Al-Zain, Eckert, & Platt 2019)

การรักษาระยะห่างระหว่างปลาย LCU กับวัสดุให้ใกล้ที่สุดเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการบ่มที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี เช่น การบูรณะพื้นที่ที่มีโพรงลึกหรือการบูรณะ Class II ที่ขอบเหงือกอาจเข้าถึงได้ยาก งานวิจัยเสนอแนวทางแก้ไขปัญหานี้ วิธีหนึ่งคือการเพิ่มระยะเวลาฉายแสง เพื่อชดเชยระยะห่างที่เพิ่มขึ้น (Al-Zain, Eckert, & Platt 2019) โดยมีการแนะนำให้เพิ่มระยะเวลาการฉายแสงเป็นสองหรือสามเท่าของเวลาที่ผู้ผลิตแนะนำ เมื่อทำการฉายแสงในระยะห่างที่มากถึง 8 มม. (Al-Zain, Eckert, & Platt 2019)

เพื่อให้แน่ใจว่าการบ่มเกิดขึ้นอย่างเหมาะสม เทคนิคการวางวัสดุแบบเป็นชั้น (incremental placement technique) ควรนำมาใช้ โดยทำการวางและฉายแสงเรซินเป็นชั้นบาง ๆ (ไม่เกิน 2 มม.) เพื่อให้แต่ละชั้นได้รับพลังงานแสงเพียงพอสำหรับการพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ การอุ่นเรซินก่อนการใช้งาน (pre-heating the composite) สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของวัสดุและอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการพอลิเมอร์ไรเซชัน

เรซินคอมโพสิตประเภท bulk-fill บางชนิดได้รับการออกแบบให้สามารถบ่มในชั้นที่หนากว่า (สูงสุด 4 มม.) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ช่วยให้แสงทะลุผ่านได้ดีขึ้น การตรวจสอบกำลังของแสงจาก LCU เป็นประจำโดยใช้ radiometer ช่วยให้มีมั่นใจได้ว่าอุปกรณ์สามารถให้ค่าความเข้มของแสงที่เหมาะสม ซึ่งมีความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับ LCU ประเภท LED เนื่องจากกำลังของแสงอาจลดลงจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อายุการใช้งานของแบตเตอรี่และการเสื่อมสภาพของหลอด LED

องค์ประกอบของเรซินคอมโพสิต เช่น ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแสง (photoinitiators) และ ปริมาณสารเติมแต่ง (fillers) ยังมีผลต่อประสิทธิภาพของการบ่มที่ได้รับผลกระทบจากระยะห่าง เรซินคอมโพสิตที่มีค่าความโปร่งแสงสูงกว่ามักช่วยให้แสงทะลุผ่านได้ดีขึ้น คอมโพสิตรุ่นใหม่บางชนิดมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงทางเลือก เช่น TPO (Trimethylbenzoyl-diphenylphosphine oxide) ซึ่งอาจตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นของ LCU ได้ดีกว่า

รูปทรงและการออกแบบของปลายหัวฉายแสง (light guide tip) มีผลต่อการกระจายของแสง และพื้นที่ที่ได้รับการบ่มอย่างมีประสิทธิภาพ หัวฉายแสงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างขึ้น หรือได้รับการออกแบบให้โฟกัสลำแสงได้ดีขึ้น สามารถช่วยเพิ่มการทะลุผ่านของแสงและลดผลกระทบของระยะห่าง ดังนั้น ควรเลือกหัวฉายแสงให้เหมาะสมกับสถานการณ์ทางคลินิกเฉพาะ

โดยสรุป การทำความเข้าใจผลกระทบของระยะห่างต่อประสิทธิภาพของการบ่มเรซินคอมโพสิตมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลลัพธ์ทางคลินิกที่ประสบความสำเร็จ ทันตแพทย์สามารถลดผลกระทบของระยะห่างที่เพิ่มขึ้นได้โดยใช้เทคนิคที่เหมาะสม เช่น การปรับระยะเวลาการฉายแสง, การใช้เทคนิค incremental placement, การอุ่นเรซินล่วงหน้า และการตรวจสอบกำลังแสงของ LCU เป็นประจำด้วย radiometer ซึ่งช่วยให้มั่นใจได้ว่าการพอลิเมอไรเซชันของวัสดุบ่มมีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ

เทคนิคการวัดค่า degree of conversion ใน RMGIC

ค่า degree of conversion (DC) ใน RMGIC แสดงให้เห็นว่าพันธะคู่ของคาร์บอน ($C=C$) ถูกเปลี่ยนเป็นพันธะเดี่ยว ($C-C$) ในระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชันมากน้อยเพียงใด ค่า DC ที่สูงขึ้นบ่งชี้ว่าวัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีการปล่อยมอนอเมอร์ที่เป็นอันตรายน้อยลง (Dursun et al., 2016) มีหลายเทคนิคที่สามารถใช้ในการวัดค่า DC ของ RMGIC โดยแต่ละเทคนิคมีข้อดีเฉพาะตัว

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR spectroscopy เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพในการวัดค่า DC ใน RMGIC (Dursun et al., 2016; Jalalian et al., 2019; Shackori, Qasim, and Hasan, 2024) หลักการทำงานของเทคนิคนี้คือการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพันธะเคมีในช่วงความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง โดยเปรียบเทียบพีคของการดูดกลืนแสงของพันธะ $C=C$ (ในมอนอเมอร์) และพันธะ $C-C$ (ในวัสดุที่ผ่านการบ่ม) ค่า DC สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพีค $C=C$ ที่ 1638 cm^{-1} กับพีค $C=O$ ที่ 1712 cm^{-1} ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณมอนอเมอร์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาทั้งก่อนและหลังการฉายแสง (Dursun et al., 2016) วิธีนี้มีความไวสูงและสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้อย่างละเอียด

Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) Spectroscopy

ATR-FTIR spectroscopy เป็นเทคนิคที่ดัดแปลงจาก FTIR โดยให้ตัวอย่างสัมผัสกับผลึกของเครื่องมือ และให้แสงอินฟราเรดผ่านตัวอย่างโดยตรง แสงจะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของตัวอย่างและสะท้อนกลับ ทำให้สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและคำนวณค่า DC ได้ (Dursun et al., 2016) เทคนิคนี้ช่วยให้การเตรียมตัวอย่างทำได้สะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับ FTIR แบบดั้งเดิม และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์สมบัติของพื้นผิววัสดุ

Micro-Raman Spectroscopy

Micro-Raman spectroscopy เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่สามารถใช้วัดค่า DC และสามารถทำการวัดผ่านกระจกครอบตัวอย่างได้ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในบางสภาวะการทดลอง (Lise, Van Ende, et al., 2018) เทคนิคนี้ยังช่วยให้สามารถเคลื่อนย้ายตัวอย่างไปยังสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากอุณหภูมิสามารถส่งผลต่อค่า DC (Lise, Van Ende, et al., 2018)

หลักการของ Raman spectroscopy คือการฉายแสงเลเซอร์ไปยังตัวอย่างและวิเคราะห์แสงที่กระเจิงออกมาเพื่อวัดการสั่นของโมเลกุล โดยเปรียบเทียบความเข้มของพีค C=C และ C-C ในสเปกตรัมก่อนและหลังการบ่ม ค่า DC จึงสามารถถูกคำนวณได้ (Lucey, Santini, and Roebuck, 2015) Raman spectroscopy มีความแม่นยำสูงและสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงระดับโมเลกุลในระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการฉายแสง

Micro-Computed Tomography (Micro-CT)

Micro-CT มักใช้สำหรับการสร้างภาพโครงสร้างภายในและการประเมินการปรับตัวของวัสดุที่ขอบรอยต่อ แต่ยังสามารถใช้ประเมินค่า DC ทางอ้อมได้ (Shackori, Qasim, and Hasan, 2024) เทคนิคนี้ใช้รังสีเอกซ์ในการสร้างภาพสามมิติของตัวอย่าง ทำให้นักวิจัยสามารถตรวจสอบความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงระดับของการพอลิเมอไรเซชันได้ โดยทั่วไป ความหนาแน่นที่สูงขึ้นมักสัมพันธ์กับค่า DC ที่สูงขึ้น Micro-CT เป็นวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่าง และสามารถให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ทั้งเกี่ยวกับโครงสร้างภายในและสมบัติของพื้นผิวของ RMGIC

ระยะห่างจากอุปกรณ์ฉายแสงมีผลอย่างมากต่อค่า degree of conversion ในวัสดุทางทันตกรรม โดยทั่วไป ระยะฉายแสงที่สั้นกว่าจะทำให้ค่า DC สูงขึ้น งานวิจัยพบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับพื้นผิวของ RMGIC จะทำให้ค่า DC ลดลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและเชิงกลของวัสดุ (Al Nahedh et al., 2022; Maleknejad et al., 2013) เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ความเข้มของแสงที่ตกกระทบบดลง ส่งผลให้การพอลิเมอไรเซชันไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของวัสดุได้ ดังนั้น การปฏิบัติตามแนวทางการฉายแสงที่เหมาะสม รวมถึงการรักษาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและวัสดุ เป็นสิ่งสำคัญต่อการเพิ่มค่า DC และความสำเร็จของการบูรณะทางคลินิก

การทำให้ RMGIC มีค่า degree of conversion ที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกล ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และประสิทธิภาพทางคลินิกโดยรวม เทคนิคเช่น FTIR, ATR-FTIR และ Raman spectroscopy มีความสำคัญในการประเมินค่า DC ขณะที่การรักษาระยะห่างการฉายแสงที่สั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของวัสดุ RMGIC มีข้อดีมากมายในการบูรณะทางทันตกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น การยึดติดทางเคมี การปล่อยฟลูออไรด์ การดูดซับแรง และกลไกการตั้งตัวแบบคู่ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ RMGIC เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการใช้งานทางคลินิกที่หลากหลาย โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงและในสภาวะทางคลินิกที่ท้าทาย การเข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยฟลูออไรด์ ค่า degree of conversion และประสิทธิภาพโดยรวมของวัสดุ จะช่วยให้ทันตแพทย์สามารถใช้ RMGIC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การบูรณะฟันมีความทนทานและมีผลลัพธ์ที่ดีในระยะยาว

หลักการการทำงานของ **Micro-Raman Spectroscopy** ในการวัดค่า DC และความเกี่ยวข้อง

Micro-Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่มีคุณค่าในการวัดค่า degree of conversion (DC) ในวัสดุทางทันตกรรม ซึ่งให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับระดับของพอลิเมอไรเซชันและประสิทธิภาพโดยรวมของวัสดุ

Micro-Raman spectroscopy อาศัยหลักการกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) หรือที่เรียกว่า Raman scattering ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเดียวกัน

(monochromatic light) ได้ตอบกับตัวอย่าง โมเลกุลในตัวอย่างจะกระเจิงโฟตอนบางส่วนออกมาโดยมีพลังงานแตกต่างจากแสงที่ตกกระทบ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานนี้เป็นลักษณะเฉพาะของโหมดการสั่นของโมเลกุลในตัวอย่าง เมื่อนำข้อมูลพลังงานของแสงที่กระเจิงไปวิเคราะห์ จะสามารถระบุองค์ประกอบและโครงสร้างโมเลกุลของตัวอย่างได้ (Lise et al., 2018)

ในบริบทของวัสดุทางทันตกรรม Micro-Raman spectroscopy ถูกใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโหมดการสั่นของพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน ($C=C$) ที่พบในมอนอเมอร์ก่อนและหลังการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชัน พันธะคู่ $C=C$ จะถูกเปลี่ยนเป็นพันธะเดี่ยว ($C-C$) ส่งผลให้ความเข้มของพีคการสั่นของพันธะ $C=C$ ในสเปกตรัม Raman ลดลง การเปรียบเทียบความเข้มของพีคนี้ก่อนและหลังการฉายแสงช่วยให้สามารถคำนวณค่า DC ได้ (Santini et al., 2012)

ในการวัดค่า DC ตัวอย่างวัสดุทางทันตกรรมที่ผ่านการบ่มแล้วจะถูกนำไปวางในเครื่อง Micro-Raman spectrometer ลำแสงเลเซอร์จะถูกโฟกัสไปที่พื้นผิวของตัวอย่าง จากนั้นแสงที่กระเจิงออกมาจะถูกรวบรวมและวิเคราะห์โดยสเปกโตรมิเตอร์ สเปกตรัมที่ได้จะแสดงพีคที่สอดคล้องกับโหมดการสั่นของโมเลกุลต่าง ๆ ในตัวอย่าง ความเข้มของพีค $C=C$ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับพีคอ้างอิง (มักเป็นพันธะ $C=C$ ของสารอะโรมาติกที่ไม่เกี่ยวข้องกับการพอลิเมอไรเซชัน) เพื่อคำนวณค่า DC (Santini et al., 2012; Lucey, Santini, & Roebuck, 2015; Lise et al., 2018; Lempel et al., 2019)

Micro-Raman spectroscopy ช่วยให้การวัดปริมาณพันธะ $C=C$ ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาในเรซินเมทริกซ์ได้โดยตรง (Lempel et al., 2019) ซึ่งให้ความแม่นยำมากกว่าวิธีทางอ้อม เช่น การทดสอบความแข็งของวัสดุที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่า DC นอกจากนี้ Micro-Raman spectroscopy ยังเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง หมายความว่าสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างโดยไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีของวัสดุ ข้อดีนี้ช่วยให้สามารถศึกษาค่า DC ของวัสดุทางทันตกรรมในช่วงเวลาหรือภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันได้

Micro-Raman spectroscopy ให้ความละเอียดเชิงพื้นที่สูง (high spatial resolution) ทำให้สามารถวิเคราะห์ค่า DC ในตำแหน่งเฉพาะภายในตัวอย่างได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาความสม่ำเสมอของการพอลิเมอไรเซชัน และการระบุบริเวณที่อาจมีการบ่มไม่สมบูรณ์ (under-curing) โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อจำกัดทางคลินิก เช่น โพรงฟันที่ลึกหรือการใช้วัสดุ bulk-fill composites ค่า DC เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล อายุการใช้งาน และความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุบูรณะฟัน ค่า DC ที่สูงขึ้นโดยทั่วไปจะสัมพันธ์กับความแข็งแรงทางกลที่ดีขึ้น ความต้านทานต่อการสึกหรอที่สูงขึ้น และการปล่อยมอนอเมอร์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาที่ลดลง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น Micro-Raman spectroscopy จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินค่า DC และทำให้สามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพของวัสดุในทางคลินิกได้ (Moldovan et al., 2019)

Micro-Raman spectroscopy ยังมีบทบาทสำคัญในงานวิจัยและพัฒนาวัสดุทางทันตกรรมใหม่ ๆ โดยช่วยให้ผู้ผลิตสามารถประเมินประสิทธิภาพของการบ่มในสูตรวัสดุที่แตกต่างกัน ปรับปรุงพารามิเตอร์ของการฉายแสง และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณสารเติมแต่ง ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแสง และแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อค่า DC แม้ว่า Micro-Raman spectroscopy จะ

เป็นเทคนิคที่ทรงพลังในการประเมินค่า DC ในห้องปฏิบัติการ (in vitro) แต่ควรตระหนักว่าสภาวะ in vitro อาจไม่สามารถเลียนแบบความซับซ้อนของสภาพแวดล้อมในช่องปาก (in vivo) ได้ทั้งหมด ปัจจัยเช่น การปนเปื้อนของน้ำลาย ความแตกต่างของโครงสร้างฟัน และการมีอยู่ของแบคทีเรีย อาจส่งผลต่อการพอลิเมอร์ไรเซชันในสภาพคลินิก ดังนั้น ควรใช้ความระมัดระวังในการนำผลการศึกษา in vitro ไปคาดการณ์ผลทางคลินิก และจำเป็นต้องมีการศึกษาทางคลินิกเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความเกี่ยวข้องของค่า DC ที่ได้จาก Micro-Raman spectroscopy

งานวิจัยหนึ่งใช้ Micro-Raman spectroscopy ในการประเมินค่า DC ของซีเมนต์คอมโพสิตที่ถูกบ่มผ่านวัสดุ CAD-CAM block ที่มีความหนาต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของวัสดุและชนิดของอุปกรณ์ฉายแสงมีผลต่อกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Lise et al., 2018) งานวิจัยอีกชิ้นใช้เทคนิคนี้เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการฉายแสงและการอุ่นเรซินล่วงหน้าต่อค่า DC ของเรซินคอมโพสิตชนิดต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของเทคนิคนี้ในการปรับปรุงแนวทางการบ่มวัสดุ (Lempel et al., 2019) งานวิจัยหลายชิ้นยังใช้ Micro-Raman spectroscopy เพื่อเปรียบเทียบค่า DC ของเรซินคอมโพสิตที่ถูกบ่มด้วย LCU ต่างชนิด รวมถึง LED แบบ single-peak และ dual-peak ซึ่งเน้นให้เห็นถึงบทบาทของช่วงความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงต่อประสิทธิภาพของการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Lucey, Santini, & Roebuck, 2015; Al-Zain, Eckert, & Platt, 2019; Santini et al., 2012)

โดยสรุป Micro-Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่มีคุณค่าและมีความเกี่ยวข้องอย่างมากในการวิเคราะห์ค่า DC ของวัสดุทางทันตกรรม ความสามารถในการวัดค่า DC ได้โดยตรง ไม่ทำลายตัวอย่าง และสามารถวิเคราะห์ในตำแหน่งเฉพาะของตัวอย่าง ทำให้เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการวิจัย พัฒนา และควบคุมคุณภาพในสาขาทันตกรรมบูรณะ อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาข้อจำกัดของการศึกษา in vitro และความจำเป็นในการวิจัยเพิ่มเติมในสภาวะ in vivo เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบทางคลินิกของค่า DC ได้อย่างครบถ้วน

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยากรด-เบสและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

งานวิจัยสนับสนุนว่าใน resin-modified glass ionomer cements (RMGIC) ปฏิกิริยากรด-เบสและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมีปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ส่งผลต่อพฤติกรรม การตั้งตัวของวัสดุ และคุณสมบัติโดยรวม Dursun et al. (2016) อธิบายว่าการตั้งตัวของ RMGIC เกิดจากสองกลไก ได้แก่ ปฏิกิริยากรด-เบสที่เป็นลักษณะเฉพาะของ glass ionomer cement (GICs) แบบดั้งเดิม และการพอลิเมอร์ไรเซชันของ HEMA monomers ปฏิกิริยากรด-เบสเกิดขึ้นระหว่าง polyalkenoic acid และอนุภาคแก้ว fluoroaluminosilicate ก่อให้เกิดโครงสร้างโพลีซอลต์ (polysalt matrix) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการยึดติด ในขณะที่ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือสารกระตุ้นทางเคมีจะเปลี่ยนมอนอเมอร์เมทาคริลเลตให้เป็นโครงสร้างโพลีเมอร์แบบเชื่อมขวาง (cross-linked polymer network) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความเร็วในการตั้งตัว และการควบคุมการตั้งตัวของวัสดุ

การมีอยู่ของ HEMA และกระบวนการ photopolymerization สามารถทำให้ปฏิกิริยาไอออนิกช้าลง ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจมีการแข่งขันกันระหว่างสองกลไกนี้ (Dursun et al., 2016) ดังนั้น ช่วงเวลาของการฉายแสง จึงเป็นปัจจัยสำคัญ การหน่วงเวลาการฉายแสงช่วยให้ปฏิกิริยากรด-เบสดำเนินไปได้มากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้าง polysalt matrix แข็งแรงขึ้นและมีค่า degree of

conversion (DC) สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากหน่วงเวลานานเกินไป อาจทำให้การเคลื่อนที่ของ HEMA monomers ลดลง ส่งผลให้ค่า DC ลดลง และอาจกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Dursun et al., 2016)

โครงสร้าง polyacrylate matrix ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากรด-เบสยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของ HEMA monomers ด้วย (Dursun et al., 2016) ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระดับของ methacrylation การเติม bioactive glass nanoparticles และการมีอยู่ของสารเติมแต่ง สามารถส่งผลต่อสมดุลระหว่างปฏิกิริยาเหล่านี้ ซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมกรรมการตั้งตัว ความแข็งแรง และลักษณะการปล่อยไอออนของวัสดุ (Potiprapanpong et al., 2023) ดังนั้น ทันตแพทย์ควรบริหารจัดการระยะเวลาการฉายแสง ความเข้มของแสง และการปนเปื้อนให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดสมดุลที่ดีระหว่างปฏิกิริยาเหล่านี้ และเพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรง การยึดติด การปล่อยฟลูออไรด์ และความคงตัวในช่องปากที่เหมาะสมในระยะยาว

คำถามวิจัยของการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ว่า ค่า degree of conversion (DC) ของ RMGIC มีผลต่อประสิทธิภาพทางคลินิกของการบูรณะฟันแบบ open-sandwich cavity restorations อย่างไร จากวรรณกรรมที่มีอยู่ ค่า DC ที่ต่ำใน RMGIC อาจส่งผลต่อแรงยึดติด การรั่วซึมระดับจุลภาค และความทนทานโดยรวมของวัสดุบูรณะ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อความสำเร็จของการบูรณะฟันในระยะยาวและผลลัพธ์ของผู้ป่วย การวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงค่า DC ของ RMGIC จึงมีความสำคัญต่อการใช้งานทางคลินิก

หนึ่งในข้อกังวลหลักของค่า DC ที่ต่ำคือผลกระทบต่อนแรงยึดติด (bond strength) และการรั่วซึมระดับจุลภาค (microleakage) แรงยึดติดระหว่าง RMGIC กับเรซินคอมโพสิต (composite resin, CR) ขึ้นอยู่กับวิธีการใช้และกระบวนการฉายแสง งานวิจัยพบว่าการใช้สารยึดติด (bonding agent) สามารถเพิ่มแรงดึงของวัสดุ (tensile strength) และลดการล้มเหลวของการยึดติดได้อย่างมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าการฉายแสงที่เหมาะสมและค่า DC ที่สูงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสร้างแรงยึดติดที่เพียงพอ (Fragkou et al., 2013) แรงยึดติดที่ดีเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพและอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะ เนื่องจากหากแรงยึดติดไม่เพียงพอ อาจทำให้วัสดุบูรณะหลุดออก แตกกร้าว หรือเกิดความล้มเหลวเมื่อใช้งานไปนาน ๆ

นอกจากนี้ RMGIC ยังมีการปรับตัวที่ขอบวัสดุที่ดีขึ้น และลดการรั่วซึมระดับจุลภาคเมื่อเทียบกับ dual-cure composites ในการบูรณะฟันแบบ open-sandwich restorations (Koubi et al., 2009, 2010) การรั่วซึมระดับจุลภาคเป็นปัญหาสำคัญในการบูรณะฟัน เนื่องจากทำให้แบคทีเรียของเหลว และเศษอาหารสามารถแทรกซึมเข้าสู่รอยต่อระหว่างวัสดุและเนื้อฟัน ซึ่งอาจนำไปสู่ภาวะเสียวฟันหลังการบูรณะ (postoperative sensitivity) ฟันผุซ้ำ (secondary caries) และการเปลี่ยนสีของวัสดุ ค่า DC ที่ต่ำสามารถทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้แรงยึดติดที่รอยต่อวัสดุลดลง เพิ่มโอกาสในการเกิดช่องว่างบริเวณขอบวัสดุ และทำให้การรั่วซึมระดับจุลภาคมากขึ้น

ความทนทานของวัสดุบูรณะยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ได้รับผลกระทบจากค่า DC เมื่อเวลาผ่านไป RMGIC ที่ใช้ใน open-sandwich restorations อาจเกิดการละลายของวัสดุ โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงต่อฟันผุ ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายของวัสดุ ได้แก่ น้ำลาย ความแปรปรวนของ pH ในช่องปาก และแรงทางกลจากการบดเคี้ยว ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่เร่งการเสื่อมสภาพของวัสดุ อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม แม้ว่าจะมีปัจจัยเหล่านี้ ความทนทานโดยรวมของ RMGIC ยังถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ สำหรับการบูรณะขนาดใหญ่ (Andersson-Wenckert et al., 2004) แต่ค่า DC ที่ต่ำสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของ RMGIC ทำให้เกิดการสลายตัวของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจลดอายุการใช้งานของวัสดุลงได้

ชนิดของสารยึดติดที่ใช้ยังมีผลต่อประสิทธิภาพของ RMGIC ในการบูรณะ open-sandwich restorations สารยึดติดที่มีค่า DC สูงสามารถลดการรั่วซึมระดับจุลภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น สารยึดติดประเภท universal adhesives ที่ใช้ในโหมด self-etch มีแนวโน้มทำให้เกิดการรั่วซึมระดับจุลภาคน้อยกว่าสารยึดติดแบบ total-etch adhesives ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกใช้สารยึดติดที่เหมาะสมเพื่อลดการรั่วซึมและเพิ่มคุณภาพของการบูรณะ (Moghadam et al., 2018) การเลือกสารยึดติดที่มีค่า DC สูงสามารถช่วยสร้างแรงยึดติดที่แข็งแรงและคงทนระหว่าง RMGIC กับโครงสร้างฟัน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัสดุในระยะยาวดีขึ้น

นอกเหนือจากคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติด้านการยึดติด ค่า degree of conversion (DC) ที่ต่ำยังอาจส่งผลกระทบต่อ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ได้อีกด้วย การพอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ของ RMGIC อาจทำให้อนุโมเลกุลที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาถูกปล่อยออกมา ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาทางคลินิก เช่น การระคายเคืองของเยื่อเมือกในช่องปาก และการอักเสบของเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน การได้รับอนุโมเลกุลที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิด อาการแพ้ (allergic reactions) ในผู้ป่วยบางราย ทำให้วัสดุบูรณะมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพลดลง และอาจก่อให้เกิดความไม่สบายหรืออันตรายต่อผู้ป่วย ดังนั้น การทำให้วัสดุมีค่า DC สูงจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อลดการปล่อยสารที่อาจเป็นอันตราย และคงไว้ซึ่งความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุ (Şulcă et al., 2010) การทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ แต่ยังช่วยสร้างสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยและสบายขึ้นสำหรับผู้ป่วย ซึ่งส่งผลให้ความพึงพอใจของผู้ป่วยต่อการรักษาทางทันตกรรมดีขึ้น

ระยะห่างของอุปกรณ์ฉายแสง (light-curing distance) มีผลสำคัญต่อค่า DC และเป็นปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการปฏิบัติทางคลินิก ระยะห่างระหว่างปลาย light-curing unit (LCU) กับพื้นผิวของ RMGIC มีบทบาทสำคัญในการกำหนด ความเข้มของแสง (light intensity) ที่ตกกระทบวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่า DC เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ความเข้มของแสงจะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของการพอลิเมอร์ไรเซชันลดลง และทำให้ค่า DC ต่ำลง ความสัมพันธ์นี้เน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดวาง LCU ให้เหมาะสมระหว่างกระบวนการบูรณะ เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุได้รับพลังงานเพียงพอสำหรับการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ งานวิจัยพบว่า การรักษาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่าง 0-2 มม. ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและพื้นผิวของ RMGIC สามารถช่วยเพิ่มค่า DC ได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ผลลัพธ์ทางคลินิกดีขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากระยะห่างในการฉายแสงเพิ่มขึ้น อาจทำให้การบ่มไม่สมบูรณ์ แรงยึดติดต่ำลง และมีแนวโน้มเกิดการรั่วซึมระดับจุลภาคมากขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้อาจลดอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะได้

โดยสรุป ค่า DC ที่ต่ำใน RMGIC ที่ใช้สำหรับ open-sandwich cavity restorations อาจส่งผลให้แรงยึดติดลดลง การรั่วซึมระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น ความทนทานลดลง และความเข้ากันได้ทางชีวภาพลดลง ดังนั้น เทคนิคการใช้งานที่เหมาะสม การเลือกสารยึดติดที่เหมาะสม และการทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของ RMGIC ในการบูรณะ

ฟันประเภทนี้ ทันตแพทย์จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะห่างของการฉายแสง ความเข้ากันได้ของสารยึดติด และความเข้มของแสง ในระหว่างกระบวนการบูรณะ เพื่อให้ได้ค่า DC สูงสุด และรับรองความสำเร็จของการบูรณะในระยะยาว การเพิ่มประสิทธิภาพของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้ทันตแพทย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางคลินิกของ RMGIC ปรับปรุงผลลัพธ์ของผู้ป่วย และลดความเสี่ยงของความล้มเหลวของวัสดุบูรณะ

ความเข้าใจเกี่ยวกับพลังงานรังสีในการฉายแสงวัสดุทางทันตกรรม

แนวคิดเกี่ยวกับ พลังงานรังสี (radiant exposure) เป็นปัจจัยสำคัญในการใช้วัสดุที่แข็งตัวด้วยแสงทางทันตกรรม พลังงานรังสีคือพลังงานรวมที่ถูกส่งไปยังวัสดุ ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของความเข้มของแสง (irradiance) และ ระยะเวลาการฉายแสง (Lempel et al., 2019) การรักษาระดับพลังงานรังสีให้คงที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสม แม้ว่าระยะห่างของการฉายแสงจะมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อระยะห่างระหว่างปลาย light-curing unit (LCU) กับวัสดุเพิ่มขึ้น ค่า irradiance จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลต่อ radiant exposure (Al-Zain, Eckert, & Platt, 2018) อย่างไรก็ตาม การลดลงนี้ไม่ได้เป็นไปตาม กฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ทันตแพทย์จึงต้องเพิ่มระยะเวลาการฉายแสงเพื่อชดเชยการลดลงของ irradiance และเพื่อให้วัสดุได้รับพลังงานรังสีเพียงพอสำหรับการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ (Al-Zain, Eckert, & Platt, 2018)

เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่าง radiant exposure, irradiance และระยะห่างของการฉายแสง นักวิจัยได้ทำการทดลองวัดผลกระทบของระยะห่างต่อค่า degree of conversion (DC) ของวัสดุเรซินคอมโพสิต (resin-based composite, RBC) (Lucey et al., 2014) โดยใช้ระบบ MARC-RC (Managing Accurate Resin Curing - Resin Calibrator) ในการวัดค่า irradiance อย่างแม่นยำและปรับเวลาฉายแสงเพื่อให้มั่นใจว่าพื้นผิวด้านบนของตัวอย่างได้รับ radiant exposure ที่ใกล้เคียงกันในทุกระยะห่าง

ผลการศึกษาพบว่า LCU แต่ละเครื่องมีรูปแบบการลดลงของ irradiance ที่แตกต่างกัน และต้องมีการปรับระยะเวลาการฉายแสงที่แตกต่างกันเมื่อระยะห่างเปลี่ยนไป (Lucey et al., 2014) ที่น่าสนใจคือ LCU บางรุ่น เช่น Optilux 401 และ Bluephase Style ต้องการการปรับเวลาเพิ่มขึ้นน้อยกว่ารุ่นอื่น ๆ เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะอุปกรณ์เหล่านี้มี spectral radiant power output ที่สม่ำเสมอกว่า

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเข้าใจลักษณะของ LCU แต่ละประเภทเป็นสิ่งสำคัญเมื่อกำหนด แนวทางการฉายแสงที่เหมาะสม ทันตแพทย์ควรศึกษาแนวทางของผู้ผลิต พิจารณารุ่นของ LCU ที่ใช้ และคำนึงถึงระยะห่างระหว่างปลายหัวฉายแสงกับวัสดุ เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุได้รับพลังงานรังสีที่เหมาะสมสำหรับการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ (Lucey et al., 2014)

Radiometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการปล่อยแสงของ LCU การตรวจสอบค่า irradiance เป็นประจำช่วยให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ทำงานได้อย่างถูกต้องและให้ค่าความเข้มของแสงที่เหมาะสม ซึ่งช่วยให้ทันตแพทย์สามารถปรับระยะเวลาการฉายแสงให้สอดคล้องกับแนวทางของผู้ผลิต Spectrometer สามารถใช้วัด irradiance ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ซึ่งมีความสำคัญเพราะ

photoinitiators ในวัสดุต่าง ๆ มีช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการดูดกลืนแสงไม่เท่ากัน ดังนั้น LCU ควรให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ และโดยการวัดค่า irradiance และพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะห่างของการฉายแสงและคุณสมบัติของวัสดุ ทันตแพทย์สามารถเลือก แนวทางการฉายแสงที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ และให้วัสดุมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ การตรวจสอบค่า irradiance เป็นประจำช่วยให้มั่นใจว่า LCU ทำงานได้อย่างถูกต้องและให้พลังงานแสงที่สม่ำเสมอสำหรับการบูรณะพื้นที่ที่มีคุณภาพ

วัสดุที่บ่มไม่สมบูรณ์ (under-cured restorations) อาจมี ความแข็งแรงทางกลลดลง และมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวและการสึกหรอได้ง่ายขึ้น (Feiz et al., 2021) นอกจากนี้ ช่องว่างหรือโพรงอากาศอาจก่อตัวขึ้นระหว่างวัสดุบูรณะและโครงสร้างพื้นหากวัสดุไม่ได้รับการพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างเพียงพอ ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อ microleakage และการเกิดฟันผุซ้ำ (Feiz et al., 2021) วัสดุบูรณะที่บ่มไม่สมบูรณ์ยังอาจปล่อยมอนอเมอร์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาออกมา ซึ่งอาจก่อให้เกิด อาการเสียวฟัน การระคายเคือง หรืออาการแพ้ ได้ (Feiz et al., 2021)

บทความวิจัยยังกล่าวถึงการใช้ "sandwich technique" ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการวางวัสดุชั้นกลาง เช่น glass ionomer cement (GIC) หรือวัสดุเรซินที่มี modulus of elasticity ต่ำ ไว้ระหว่างวัสดุบูรณะและเนื้อฟัน เทคนิคนี้ช่วยลดผลกระทบของ polymerization shrinkage โดยดูดซับความเครียดจากการหดตัวของวัสดุ ตัวอย่างหนึ่งของเทคนิคนี้คือ "open-sandwich technique" ซึ่ง GIC ชั้นกลางถูกปล่อยให้สัมผัสกับขอบของวัสดุ เพื่อให้เกิดการปิดผนึกที่ดีขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณ proximal box ของ Class II cavity ซึ่งช่วยลดการรั่วซึมและเพิ่มประสิทธิภาพของขอบรอยต่อ (Al-Azzawi et al., 2021)

ในการประเมินทางคลินิกพบว่า Biodentine ซึ่งเป็นวัสดุทดแทนเนื้อฟันรุ่นใหม่ มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่ดีในการบูรณะฟันหลัง (Koubi et al., 2013) เมื่อนำ Fuji IX GP (GIC) มาเปรียบเทียบกับ Biodentine พบว่า Fuji IX GP มีค่า shear bond strength สูงกว่า แต่ Biodentine มีความสมบูรณ์ของขอบรอยต่อที่ดีกว่าและมีการรั่วซึมระดับจุลภาคที่ต่ำกว่าที่รอยต่อของเนื้อฟัน (Raju et al., 2014) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยระบุว่า ทั้งเทคนิค open-sandwich แบบ centripetal และ closed-sandwich ไม่สามารถป้องกันการแทรกซึมของสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์ (Fabianelli et al., 2010)

ข้อมูลจากงานวิจัยเหล่านี้สามารถช่วยเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุและเทคนิคที่เหมาะสม เพื่อให้มั่นใจว่าการบูรณะฟันมีประสิทธิภาพและความสำเร็จในทางคลินิก

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษานี้ ได้มีการใช้ resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุ GC Gold Label II LC capsule เจดสี A3 จากบริษัท GC, Tokyo, Japan (หมายเลขล็อต 2208251) องค์ประกอบของ RMGIC ประกอบด้วย fluoro-aluminosilicate glass, acrylic-maleic acid copolymer, hydroxyethyl methacrylate (HEMA), UDMA, dimethacrylate, water และ camphorquinone การเลือกใช้วัสดุนี้มีพื้นฐานจากการพิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่จำเป็นสำหรับการบูรณะทางทันตกรรมที่มีประสิทธิภาพ วัสดุนี้ได้รับการออกแบบให้มีความสมดุลที่เหมาะสมระหว่าง คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ความสะดวกในการใช้งานทางคลินิก (handling properties) และ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการบูรณะฟันในระยะยาว นอกจากนี้ เจดสี A3 ได้รับการคัดเลือกเพื่อให้เกิด ความกลมกลืนทางสุนทรียศาสตร์ (aesthetic compatibility) กับเนื้อฟันธรรมชาติ ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในหลากหลายบริบททางคลินิก

การเตรียมชิ้นงาน

ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษา ได้มีการตัดแผ่นอะคริลิกสีขาวให้เป็นแผ่นขนาด $15.0 \times 15.0 \times 1.8$ mm โดยขนาดดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้มีปริมาณวัสดุที่เพียงพอสำหรับการทดสอบ พร้อมทั้งรับประกันความสม่ำเสมอของกระบวนการฉายแสงและการวิเคราะห์แต่ละตัวอย่าง ภายในแผ่นอะคริลิกดังกล่าวได้เจาะช่องทรงกระบอกที่ศูนย์กลางของแต่ละแผ่นโดยมี เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm เพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์สำหรับเท RMGIC ในการป้องกันการรั่วไหลของวัสดุขณะฉีด ได้มีการวางแถบเซลลูโลยด์ (celluloid band) ไว้ที่ด้านล่างของแผ่นอะคริลิกเพื่อให้การรองรับที่เหมาะสม

วัสดุ GC Gold Label II LC capsule ถูกเตรียมตามคำแนะนำของผู้ผลิต โดยนำไปผสมในเครื่อง amalgamator ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ได้รับการปรับให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันและรับประกันความสม่ำเสมอของสมบัติวัสดุในทุกตัวอย่าง หลังจากการผสม วัสดุที่ได้ถูกฉีดเข้าไปในช่องทรงกระบอกของแผ่นอะคริลิกอย่างระมัดระวัง จากนั้นได้มีการวางแถบเซลลูโลยด์เพิ่มเติมไว้ด้านบนของช่อง และใช้ไม้พายทางทันตกรรม (spatula) ปรับพื้นผิวด้านบนของวัสดุให้เรียบสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการรับประกันความถูกต้องของการวัดค่าความเข้มแสง (irradiance) และ degree of conversion (DC)

กระบวนการฉายแสงดำเนินการโดยใช้เครื่องฉายแสง Demiplus light-curing unit (Kerr, CA, USA) โดยฉายแสงสีน้ำเงินไปยังพื้นผิวด้านบนของวัสดุเป็นเวลา 20 วินาที ปลายหัวฉายแสงถูกจัดวางให้อยู่ตรงศูนย์กลางของช่องทรงกระบอกเพื่อให้การบ่มเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการจัดวางตำแหน่งที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อการกระจายแสงอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระดับของการพอลิเมอร์ไรเซชัน

ได้มีการศึกษา ระยะห่างของหัวฉายแสง 3 ระดับ ได้แก่ 0 mm, 4 mm และ 8 mm โดยใช้แผ่นอะคริลิกสีขาวที่มีช่องทรงกระบอกขนาด 3 mm ซึ่งมีความหนาที่สอดคล้องกับแต่ละระยะ ($n=5$) เพื่อควบคุมระยะห่างระหว่างหัวฉายแสงและพื้นผิวของวัสดุ การเลือกใช้ระยะดังกล่าวมีวัตถุประสงค์

เพื่อจำลองสถานการณ์ทางคลินิกที่แตกต่างกัน ซึ่งในบางกรณีเครื่องฉายแสงอาจไม่สามารถวางชิดกับพื้นผิวของวัสดุได้โดยตรง

การวัดค่าความเข้มของแสง (Light Irradiance Measurement)

การวัดค่าความเข้มของแสงดำเนินการโดยใช้ Demitron LED radiometer (Kerr, WI, USA) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการวัดแสงในช่วงความยาวคลื่น 400–500 nm ซึ่งเป็นช่วงที่สอดคล้องกับ absorption spectrum ของ photoinitiators ที่ใช้ใน RMGIC เพื่อให้แน่ใจว่าค่าที่วัดได้นั้นสะท้อนพลังงานที่สามารถกระตุ้นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้อย่างถูกต้อง

ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉายแสงกับ sensor area ของ radiometer ถูกกำหนดไว้ที่ 0 mm, 4 mm และ 8 mm ซึ่งสอดคล้องกับระยะที่ใช้ในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง ทั้งนี้ ได้มีการใช้แผ่นอะคริลิกสีขาวที่มีช่องทรงกระบอกขนาด 3 mm เช่นเดียวกับที่ใช้ในขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง เพื่อควบคุมระยะห่างดังกล่าวให้มีความสม่ำเสมอในทุกการวัด

ค่าความเข้มของแสงในแต่ละระยะได้รับการวัด 10 ครั้ง ($n=10$) เพื่อให้แน่ใจว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอและเชื่อถือได้ การวัดหลายครั้งถูกนำมาเฉลี่ยเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น และเพื่อให้ได้ค่าประมาณที่แม่นยำของความเข้มของแสงในแต่ละระยะ

การวัดค่า Degree of Conversion (DC)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (degree of monomer conversion, DC (%)) ได้รับการประเมินโดยใช้ micro-Raman spectrometer (LabRam HR Evolution, Horiba, Kyoto, Japan) วิธีนี้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีเฉพาะภายใน RMGIC เพื่อตรวจสอบระดับของการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์เรซิน

การตั้งค่าของสเปกโตรมิเตอร์ ประกอบด้วย เลเซอร์กำลัง 100 mW ที่ความยาวคลื่น 785 nm เวลาการเก็บข้อมูล 40 วินาที เกรตติ้ง 500 nm ND filter ที่ 100% และกำลังขยาย $\times 100$ ซึ่งได้รับการเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มความละเอียดและอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio) ของสเปกตรัม ทำให้สามารถระบุพีคที่เกี่ยวข้องได้อย่างแม่นยำ

สเปกตรัมถูกบันทึกจากพื้นผิวด้านล่างของตัวอย่างแต่ละชิ้น โดยวัดค่า Raman shifts ในช่วงความถี่ $1,600\text{--}1,800\text{ cm}^{-1}$ ทั้งก่อนและหลังการฉายแสง ค่า DC คำนวณโดยใช้สมการที่เปรียบเทียบความเข้มของพีค $\text{C}=\text{C}$ ที่ $1,638\text{ cm}^{-1}$ และพีค $\text{C}=\text{O}$ ที่ $1,720\text{ cm}^{-1}$

$$DC(\%) = \left(1 - \frac{(CC/CO)_{post}}{(CC/CO)_{pre}} \right) \times 100$$

โดยที่ CC หมายถึงความเข้มของพีค $\text{C}=\text{C}$ ที่ $1,638\text{ cm}^{-1}$ และ CO หมายถึงความเข้มของพีค $\text{C}=\text{O}$ ที่ $1,720\text{ cm}^{-1}$

ค่า DC เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งชี้ระดับของการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกล ความทนทาน และความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุขั้นสุดท้าย

กลุ่มทดลอง (Experimental Groups)

ตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็นสี่กลุ่มทดลองตามระยะห่างของการฉายแสง ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 การฉายแสงที่ระยะ 0 mm จากพื้นผิวของ RMGIC กลุ่มนี้ทำหน้าที่เป็น กลุ่มควบคุม (control group) เนื่องจากการฉายแสงที่ระยะ 0 mm คาดว่าจะให้ความเข้มแสงสูงสุดและ

ส่งผลให้มีค่า degree of conversion (DC) สูงที่สุด การที่แหล่งกำเนิดแสงสัมผัสโดยตรงกับวัสดุช่วยให้พลังงานถูกส่งไปยังวัสดุอย่างเต็มที่ ส่งผลให้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

- กลุ่มที่ 2 การฉายแสงที่ระยะ 2 mm จากพื้นผิวของ RMGIC ระยะนี้ถูกเลือกเพื่อจำลองสถานการณ์ทางคลินิกทั่วไปที่หัวฉายแสงถูกวางใกล้กับวัสดุบูรณะ แต่ไม่สัมผัสโดยตรง กลุ่มนี้ช่วยประเมินว่าการเพิ่มระยะห่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งพบได้บ่อยในการใช้งานจริง ส่งผลต่อค่า DC อย่างไร

- กลุ่มที่ 3 การฉายแสงที่ระยะ 4 mm จากพื้นผิวของ RMGIC กลุ่มนี้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลของการเพิ่มระยะห่างที่มากขึ้นต่อค่า DC และเพื่อตรวจสอบว่าความเข้มของแสงที่ระยะนี้เพียงพอสำหรับการพอลิเมอไรเซชันที่เหมาะสมหรือไม่ ในทางคลินิก การรักษาระยะห่างที่เหมาะสมอาจทำได้ยาก กลุ่มนี้จึงมีบทบาทสำคัญในการประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากเงื่อนไขที่ไม่เอื้อต่อการฉายแสง

- กลุ่มที่ 4 การฉายแสงที่ระยะ 8 mm จากพื้นผิวของ RMGIC ระยะนี้เป็นตัวแทนของเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมต่อการฉายแสง (suboptimal curing condition) ซึ่งความเข้มแสงที่ตกกระทบวัสดุลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กลุ่มนี้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบของการได้รับพลังงานแสงไม่เพียงพอต่อค่า DC และเน้นย้ำถึงความสำคัญของการเลือกการฉายแสงที่ถูกต้องในทางคลินิก ความเข้าใจเกี่ยวกับผลลัพธ์ของการฉายแสงที่ไม่เพียงพอจะช่วยส่งเสริมให้เกิดความระมัดระวังในกระบวนการบูรณะฟัน

แต่ละกลุ่มประกอบด้วยตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น ($n=10$) เพื่อให้ผลการทดลองมี นัยสำคัญทางสถิติ (statistical significance) การใช้ระยะฉายแสงที่หลากหลายมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับผลกระทบของระยะห่างระหว่างหัวฉายแสงกับพื้นผิวของ RMGIC ที่มีต่อค่า DC การใช้ตัวอย่างหลายชิ้นต่อกลุ่มช่วยให้มั่นใจว่าผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ (reliability) และสามารถนำไปใช้สรุปแนวโน้มและรูปแบบที่อาจมีประโยชน์ต่อแนวทางปฏิบัติทางคลินิกได้อย่างแม่นยำ

กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่าง ในการศึกษาประกอบไปด้วย resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) ที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรมในการวิจัยนี้ ได้มีการใช้ตัวอย่างที่เป็นชิ้นงาน RMGIC ซึ่งถูกเตรียมขึ้นภายใต้ สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ (controlled laboratory conditions) โดยตัวอย่างแต่ละชิ้นได้รับการฉายแสงที่ระยะห่างต่างกัน ได้แก่ 0 mm, 4 mm และ 8 mm

ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง สำหรับแต่ละระยะห่างถูกกำหนดไว้สำหรับการวัดค่า degree of conversion (DC) และการวัด light irradiance โดยมีการออกแบบการทดลองให้ครอบคลุมสภาวะที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานทางคลินิก

การเลือกตัวอย่างเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อจำลอง สภาวะที่พบได้จริงทางคลินิก (clinically relevant conditions) และการใช้ตัวอย่างซ้ำหลายชุดภายใต้แต่ละเงื่อนไขมีวัตถุประสงค์เพื่อให้แน่ใจว่าผลการศึกษา มีความถูกต้อง (accuracy), ความน่าเชื่อถือ (reliability) และ ความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility) ของข้อมูลที่ได้

ตาราง 1 ส่วนประกอบของ GC Gold Label II LC

Component	Function	Percentage (%)
Fluoroaluminosilicate Glass	Filler, fluoride release	50-60
Polyacrylic Acid	Acidic component, ion exchange	10-20
HEMA (Hydroxyethyl Methacrylate)	Resin monomer for polymerization	5-10
Photoinitiators	Light-curing activation	<1
Water	Reaction medium	Balance

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษานี้ ใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงเพื่อดำเนินการทดลองและวัดค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบ่มและโพลีเมอไรเซชันของเรซิน-มอดิไฟด์ กลาสไอโอโนเมอร์ ซีเมนต์ (RMGIC) โดย Demiplus LED Light-Curing Unit (Kerr, CA, USA) ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับกระบวนการบ่มตัวอย่าง RMGIC ทั้งหมด อุปกรณ์ LabRam HR Evolution Micro-Raman Spectrometer (Horiba, Kyoto, Japan) ถูกใช้ในการวิเคราะห์ระดับการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (Degree of Conversion) ผ่านเทคนิค Micro-Raman Spectroscopy เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโพลีเมอไรเซชัน

สำหรับการวัดค่าความเข้มของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ตรงกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโฟโตอินิเชียเตอร์ใน RMGIC ใช้ Demitron LED Radiometer (Kerr, WI, USA) เพื่อให้แน่ใจว่าการฉายแสงมีประสิทธิภาพเพียงพอ นอกจากนี้ Amalgamator (GC, Tokyo, Japan) ถูกใช้สำหรับการผสมแคปซูล RMGIC ตามข้อกำหนดของผู้ผลิต เพื่อให้ได้สารผสมที่มีความสม่ำเสมอและพร้อมสำหรับกระบวนการบ่ม

เพื่อควบคุมระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงและเป็นแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปตัวอย่าง ใช้ แผ่นอะคริลิกสีขาวแบบกำหนดเอง (Custom White Acrylic Plate) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถกำหนดระยะการฉายแสงได้อย่างแม่นยำ ลดตัวแปรที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของการโพลีเมอไรเซชัน และเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลอง

ตาราง 2 รายละเอียดคุณลักษณะของเครื่องมือที่ใช้

Name	Model/Specification	Details	Manufacturer
LED Light-Curing Unit	Demiplus	ใช้สำหรับการฉายแสงเพื่อบ่มตัวอย่าง RMGIC ทั้งหมด	Kerr, CA, USA
Micro-Raman Spectrometer	LabRam HR Evolution	ใช้สำหรับวัดระดับการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (Degree of Conversion)	Horiba, Kyoto, Japan
LED Radiometer	Demitron	วัดค่าความเข้มของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร	Kerr, WI, USA
Amalgamator	N/A	ใช้สำหรับผสมแคปซูล RMGIC	GC, Tokyo, Japan
White Acrylic Plate	Custom	ใช้เป็นแม่พิมพ์และควบคุมระยะห่างในการฉายแสง	N/A

การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis)

ข้อมูลที่ได้จากการวัด degree of conversion (DC) และ light irradiance ของกลุ่มทดลองทั้งหมดได้รับการประเมิน ความเป็นปกติของการแจกแจง (normality) และ ความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (homogeneity of variances) เพื่อให้แน่ใจว่าการทดสอบทางสถิติที่นำมาใช้มีความถูกต้องและเหมาะสม

การวิเคราะห์ทางสถิติ ดำเนินการโดยใช้ JASP software (version 0.19.3, University of Amsterdam, Amsterdam, Netherlands) โดยกำหนด ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (significance level) ที่ 0.05

เพื่อเปรียบเทียบค่า degree of conversion ระหว่างกลุ่มทดลองต่าง ๆ พบว่ามีการแจกแจงปกติ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงได้ใช้ one-way analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของหลายกลุ่มเพื่อพิจารณาว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ส่วนการเปรียบเทียบข้อมูล light irradiance ระหว่างกลุ่มทดลองนั้นใช้ Kruskal-Wallis test เนื่องจากเมื่อทดสอบด้วย Shapiro-Wilk test แล้วพบว่าข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ แล้วจึงดำเนินการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยใช้ Dunn's post-hoc comparison เพื่อทำการเปรียบเทียบเชิงคู่ระหว่างกลุ่ม

วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติเหล่านี้ช่วยให้สามารถ ระบุความแตกต่างและความคล้ายคลึงกันระหว่างเงื่อนไขการทดลอง ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับผลกระทบของระยะห่างของการฉายแสงต่อคุณสมบัติของ RMGIC

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

ค่าความเข้มของแสง (light irradiance, mW/cm^2) และค่า degree of conversion (DC, %) ที่ระยะต่างๆ ระหว่างปลายหัวฉายแสงและพื้นผิววัสดุได้รับการเปรียบเทียบภายในกลุ่มเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มของแสงพบว่า ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ระยะ 0 mm เท่ากับ 525 (SD = 16.67), ที่ระยะ 4 mm เท่ากับ 250 (SD = 26.35) และที่ระยะ 8 mm เท่ากับ 186 (SD = 9.66) ค่าดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างหัวฉายแสงและพื้นผิววัสดุเพิ่มขึ้น ความเข้มของแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงผกผันระหว่างระยะทางและความเข้มของแสง ปรากฏการณ์นี้สนับสนุนข้อสรุปที่ว่า การวางหัวฉายแสงให้ใกล้วัสดุที่สุดจะช่วยให้อัตราการได้รับพลังงานแสงสูงสุด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของ resin-modified glass ionomer cement (RMGIC)

สำหรับค่า degree of conversion (DC, %) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 41.41 (SD = 13.93) ที่ระยะ 0 mm, 44.64 (SD = 8.33) ที่ระยะ 4 mm, และ 47.97 (SD = 5.70) ที่ระยะ 8 mm แม้ว่าค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของอัตราการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เมื่อระยะฉายแสงเพิ่มขึ้น แต่การวิเคราะห์พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลองในค่า DC ซึ่งบ่งชี้ว่าการพอลิเมอไรเซชันของวัสดุอาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงในช่วงที่ทดสอบ ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของค่า DC อาจเกิดจากการกระจายของแสงที่กว้างขึ้นและความเข้มของแสงที่ลดลง ซึ่งอาจทำให้กระบวนการฉายแสงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอขึ้นโดยไม่มีผลกระทบเชิงนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยอื่นๆ เช่น องค์ประกอบของวัสดุและระยะเวลาการฉายแสง อาจมีบทบาทสำคัญกว่าความเข้มของแสงเพียงอย่างเดียวในการกำหนดค่า DC

จากการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าความเข้มของพีดที่สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C=C aliphatic stretching ที่ $1,638\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ C=O stretching ที่ $1,720\text{ cm}^{-1}$ มีความแตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขการฉายแสงที่ต่างกัน โดยในวัสดุที่ยังไม่ฉายแสง พบว่าค่าความเข้มของพีดดังกล่าวอยู่ในระดับฐาน ซึ่งใช้เป็น reference สำหรับการเปรียบเทียบผลหลังการฉายแสง

เมื่อฉายแสงที่ระยะ 0 mm พบว่าความเข้มของพีด C=C ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของกลุ่ม methacrylate ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา ในขณะที่พีด C=O ยังคงมีความเสถียร การลดลงของความเข้มของพีด C=C บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่เป็นพันธะเดี่ยวระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในโครงสร้างเรซิน เมื่อเพิ่มระยะห่างเป็น 4 mm พบว่าความเข้มของพีดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับที่ระยะ 0 mm โดยมีการลดลงของพีด C=C อย่างต่อเนื่อง แต่ในอัตราที่ต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่ระยะ 0 mm ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่ากระบวนการพอลิเมอไรเซชันยังคงมีประสิทธิภาพที่ระยะนี้ แม้ว่าความเข้มของแสงจะลดลง ส่งผลให้อัตราการเกิดพอลิเมอไรเซชันช้าลงเล็กน้อย

ที่ระยะ 8 mm พบว่าแนวโน้มดังกล่าวยังคงดำเนินต่อไป โดยมีการลดลงของความเข้มของพีด C=C อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ค่า DC ที่วัดได้ที่ระยะนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการพอลิเมอไรเซ

ชั้นยังคงเกิดขึ้น แม้ว่าจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าลงเมื่อเทียบกับระยะที่ใกล้กว่า ผลการเปลี่ยนแปลงของฟิเคเหล่านี้แสดงถึง การตอบสนองของวัสดุต่อกระบวนการฉายแสงในระยะต่าง ๆ ซึ่งช่วยเน้นย้ำถึงผลกระทบของระยะห่างของแสงต่อ ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

ผลการศึกษานี้มี นัยสำคัญต่อแนวทางปฏิบัติทางคลินิก โดยแสดงให้เห็นว่า การจัดตำแหน่งของหัวฉายแสงมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของการพอลิเมอร์ไรเซชันของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม การให้หัวฉายแสงอยู่ใกล้วัสดุที่ต้องการฉายแสงมากที่สุดจะช่วยเพิ่มค่าความเข้มของแสงและส่งเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งอาจนำไปสู่การเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและอายุการใช้งานของวัสดุบูรณะ

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของระยะห่างเพียงเล็กน้อยอาจไม่ได้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า DC ซึ่งบ่งบอกว่าในทางคลินิก ทันตแพทย์อาจมีความยืดหยุ่นในการจัดตำแหน่งหัวฉายแสงได้บ้างในกรณีที่ไม่สามารถวางหัวฉายแสงในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดได้ อย่างไรก็ตาม ควรให้ความสำคัญกับการควบคุมเทคนิคการฉายแสงให้เหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่าการพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 3 ค่าความเข้มของแสง (Light Irradiance) และเปอร์เซ็นต์ระดับการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (Degree of Conversion) บนพื้นผิวด้านล่างที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างปลายเครื่องฉายแสงและพื้นผิวด้านบนของวัสดุ

Distance	Light irradiance (mW/cm ²)		Degree of conversion (%)	
	Mean	(SD)	Mean	(SD)
0 mm	525	(16.67)	41.41	(13.93)*
4 mm	250	(26.35)	44.64	(8.33)*
8 mm	186	(9.66)	47.97	(5.70)*

* หมายถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติภายในคอลัมน์เดียวกัน
 Light irradiance ใช้สถิติ Kruskal-Willis ส่วน Degree of conversion ใช้สถิติ One-way ANOVA ที่ $\alpha = 0.05$

ผลลัพธ์ที่แสดงใน ตารางที่ 3 สนับสนุนข้อสังเกตก่อนหน้านี้เกี่ยวกับ ผลกระทบของความเข้มของแสง (light irradiance) และระยะห่างของการฉายแสงที่มีต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (degree of conversion, DC) การลดลงของค่าความเข้มของแสงเมื่อระยะฉายแสงเพิ่มขึ้นเป็นที่ประจักษ์จากค่าที่รายงาน ซึ่งตอกย้ำถึง ความสำคัญของการลดช่องว่างระหว่างหัวฉายแสงและพื้นผิวของวัสดุ เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุได้รับพลังงานแสงอย่างเพียงพอ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีความแตกต่างในค่าความเข้มของแสง ค่า DC ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ ในระยะที่ทำการทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ว่า RMGIC สามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างเพียงพอ แม้ในสภาวะที่มีความเข้มของแสงลดลง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุอาจช่วยให้สามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ภายใต้

สภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการฉายแสง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบทางคลินิกในสถานการณ์ที่ไม่สามารถวางตำแหน่งหัวฉายแสงในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดได้

โดยสรุป ข้อมูลที่ได้รับแสดงให้เห็นว่า แม้ค่าความเข้มของแสงจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น แต่ค่า DC ของ RMGIC ไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญภายในช่วงระยะที่ทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ว่า ทันตแพทย์อาจมีความยืดหยุ่นในการกำหนดระยะห่างของหัวฉายแสง อย่างไรก็ตาม ควรวางหัวฉายแสงให้ใกล้กับพื้นผิวของวัสดุมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน

สำหรับการศึกษาต่อไป ควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสง ระยะฉายแสง และคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ เช่น ค่าความแข็ง (hardness), ความต้านทานการสึกหรอ (wear resistance) และแรงยึดติดของวัสดุ (bond strength) เพื่อให้เข้าใจได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้นว่าพารามิเตอร์ของการฉายแสงส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางคลินิกของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม



บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปลายหัวฉายแสงและพื้นผิวของ resin-modified glass ionomer cement (RMGIC) ต่อ ค่าความเข้มของแสง (light irradiance) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (degree of conversion, DC) แม้ว่าค่าความเข้มของแสงจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น แต่ค่า DC ยังคงมีค่าคงที่ในช่วงระยะที่ทำการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของ RMGIC ยังคงเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้จะอยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการฉายแสง

ผลการศึกษาทำให้การสนับสนุน สมมติฐานว่าง (null hypothesis) ซึ่งระบุว่าระยะห่างของการฉายแสงไม่มีผลต่อค่า DC แม้ว่าค่าความเข้มของแสงจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น แต่ค่า DC ยังคงมีความคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RMGIC สามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้แม้มีความแปรปรวนของระยะฉายแสงในระดับปานกลาง

ผลลัพธ์เหล่านี้เน้นย้ำถึง ความสำคัญของการรักษาระยะฉายแสงให้สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในระยะยาว แม้ว่าค่า DC จะไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากระยะฉายแสงที่เพิ่มขึ้น แต่การลดลงของค่าความเข้มของแสงอาจส่งผลต่อ คุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ ของวัสดุ เช่น ค่าความแข็ง (hardness) หรือความต้านทานการสึกหรอ (wear resistance) ดังนั้น การลดระยะห่างระหว่างหัวฉายแสงและวัสดุให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จึงเป็นแนวทางที่แนะนำในการปฏิบัติทางคลินิก เพื่อให้มั่นใจถึงประสิทธิภาพสูงสุดของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม

ผลการศึกษาสามารถตอบคำถามงานวิจัยที่ว่า ระยะห่างของหัวฉายแสงมีผลต่อค่า DC ของ RMGIC หรือไม่ได้อย่างชัดเจน โดยพบว่า การเพิ่มระยะห่างของการฉายแสงไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อค่า DC ซึ่งสนับสนุนสมมติฐานว่าง อย่างไรก็ตาม ควรใช้ความระมัดระวังในการตีความผลลัพธ์ เนื่องจากการลดลงของค่าความเข้มของแสงอาจส่งผลต่อคุณสมบัติอื่นๆ ของวัสดุที่ไม่ได้รับการประเมินในงานวิจัยนี้

เพื่อให้การศึกษามีความครอบคลุมมากขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เช่น ผลของระยะฉายแสงต่อค่าความแข็ง (hardness) แรงยึดติดของวัสดุ (bond strength) และบทบาทของเทคโนโลยีการฉายแสง (light-curing technologies) และระยะเวลาการฉายแสง (exposure duration) การศึกษาในเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ครอบคลุมยิ่งขึ้นเกี่ยวกับแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการฉายแสงในทางคลินิก

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาเกี่ยวกับ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฉายแสง ความเข้มของแสง และค่า DC ของ RMGIC งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นไปที่ RMGIC โดยเฉพาะ และมีการออกแบบการทดลองที่มีการปรับเปลี่ยนระยะฉายแสงอย่างเป็นระบบ ควบคู่ไปกับการวัดค่าความเข้มของแสงและค่า DC นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดของเครื่องฉายแสง ระยะเวลาการฉายแสง และองค์ประกอบของ RMGIC ควรถูกนำมาพิจารณาด้วย งานวิจัยในลักษณะนี้จะให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีประโยชน์ต่อทันตแพทย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการฉายแสงและทำให้การบูรณะด้วย RMGIC มีผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้มากขึ้น

ค่า degree of conversion (DC) เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม รวมถึง ความแข็งแรง (strength) ความต้านทานการสึกหรอ (wear resistance) และความทนทาน (durability) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อ อายุการใช้งานและความสำเร็จของวัสดุทางคลินิก การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของ resin-modified glass ionomer cements (RMGIC) ที่เพียงพอช่วยลดปัญหาทางคลินิก เช่น การเกิดรอยร้าวรอง (secondary caries), การหลุดของวัสดุ (debonding) หรือการแตกร้าว (fracture) ทั้งนี้ ค่าความเข้มของแสงที่ใช้ในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันต้องถูกควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถกระตุ้นการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกระบวนการ free radical polymerization ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ก่อให้เกิดความร้อนที่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟัน (pulp tissue damage)

ทันตแพทย์ควรตระหนักถึง ความสามารถในการยึดติดของ RMGIC ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการถ่ายทอดแรง (stress transfer) ไปยังเนื้อฟัน (dentin) ระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือ การดูดซับน้ำ (water sorption) ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดรอยร้าวในวัสดุ (Dursun et al. 2016; Feiz et al. 2021) การใช้วัสดุรองพื้นชนิดที่มีความยืดหยุ่น เช่น flowable resin composite ในโพรงฟันที่มีความลึกอาจเป็นประโยชน์ เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มี modulus of elasticity ต่ำกว่า ซึ่งช่วยลดข้อขัดแย้งที่เกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชันและลดการเกิดช่องว่างที่ขอบวัสดุ โดยเฉพาะบริเวณขอบคอฟัน (Feiz et al. 2021) นอกจากนี้ ควรหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนความชื้นในระหว่างการบูรณะฟัน เนื่องจากความชื้นอาจส่งผลเสียต่อ แรงยึดติด (bond strength) และคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล (physico-mechanical properties) ของวัสดุ glass ionomer (Shafiei and Akbarian 2014)

ค่า degree of conversion (DC) ของวัสดุเรซินได้รับอิทธิพลจาก ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉายแสงและพื้นผิววัสดุ เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของแสง (irradiance) จะลดลง ซึ่งอาจส่งผลต่อค่า DC (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยระบุว่า หากสามารถควบคุมค่า radiant exposure ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม แม้ว่าค่าความเข้มของแสงจะลดลง แต่ก็สามารถทำให้กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ ซึ่งสะท้อนให้เห็นได้จากค่า DC ที่มีความคงที่ (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์อาจไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากระยะฉายแสงในช่วงที่กำหนด ซึ่งช่วยให้ทันตแพทย์สามารถมีความยืดหยุ่นในตำแหน่งของหัวฉายแสงได้บ้าง (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) อย่างไรก็ตาม เพื่อให้แน่ใจว่าการพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ควรพยายามรักษาระยะฉายแสงให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แม้ว่าผลการศึกษาจะบ่งชี้ว่าค่า DC มีความเสถียรในช่วงระยะที่ทดสอบ

การวิเคราะห์ข้อมูลจาก Raman spectroscopy อาศัยการตรวจสอบพิคเฉพาะของสเปกตรัมเพื่อทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยพิคที่ตำแหน่ง 1638 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C=C aliphatic stretching vibrations ซึ่งความเข้มของพิคนี้จะลดลงเมื่อกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันดำเนินไป สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ไปเป็นพันธะเดี่ยว เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของกลุ่ม methacrylate (Young 2002) ในขณะเดียวกัน พิคที่ตำแหน่ง 1720 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะ C=O stretching vibrations ยังคงมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ (Young 2002)

ข้อสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของพีคดังกล่าว ยืนยันว่ามีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในเรซินเมทริกซ์ (resin matrix) ซึ่งนำไปสู่การสร้างโครงข่ายพอลิเมอร์ (polymer network) การให้วัสดุได้รับพลังงานแสงในปริมาณที่เพียงพอจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการบรรลุค่า DC ในระดับที่เหมาะสม นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มของพีคใน Raman spectrum ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงและสมรรถนะของวัสดุในทางคลินิก ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ของการฉายแสงให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานแสงเข้าสู่วัสดุ จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับความสำเร็จของกระบวนการบูรณะฟัน

การเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและวัสดุเรซินส่งผลให้ค่าความเข้มของแสง (light irradiance) ลดลง อย่างไรก็ตาม การลดลงของพีค C=C อย่างคงที่ (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) ยืนยันว่ากระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันยังคงเกิดขึ้นอย่างเพียงพอ ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่า สามารถมีความยืดหยุ่นทางคลินิกในเรื่องของระยะฉายแสงได้ โดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างมีนัยสำคัญ

ระดับของ radiant exposure ที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นต่อการทำให้เกิด พอลิเมอร์ไรเซชันที่เพียงพอ และค่า degree of conversion (DC) ในวัสดุเรซิน (Rueggeberg, Caughman, and Curtis 1994; Emami and Söderholm 2003) ปัจจัยต่างๆ เช่น ประเภทของเครื่องฉายแสง ความหนาของวัสดุ และระยะเวลาการฉายแสง มีผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานแสงที่สามารถไปถึงวัสดุบูรณะ (AlShaafi 2017) โดยทั่วไป การได้รับ radiant exposure ที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มค่า DC ซึ่งนำไปสู่ การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ในทางกลับกัน การฉายแสงที่ไม่เพียงพออาจทำให้ค่า DC ต่ำลง ซึ่งอาจส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของวัสดุบูรณะ (Halvorson, Erickson, and Davidson 2002; Calheiros et al. 2006)

แม้ผลการศึกษานี้จะชี้ให้เห็นว่ามีความยืดหยุ่นบางประการในเรื่องของระยะฉายแสง แต่ทันตแพทย์ควรพยายาม รักษาระยะฉายแสงให้ใกล้ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการฉายแสงให้สูงสุด (Price et al. 2011; Felix and Price 2003) การรักษาระยะฉายแสงที่สั้นช่วยให้วัสดุได้รับพลังงานแสงที่เพียงพอ ซึ่งช่วยเพิ่มค่า DC และปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เพื่อให้มีความทนทานในระยะยาว แม้ว่าค่า DC อาจไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงระยะที่ทดสอบ แต่ ความแตกต่างเล็กน้อยเหล่านี้อาจมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในระยะยาว ซึ่งอาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของวัสดุ

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยในทางอุดมคติ ควรวางหัวฉายแสงให้ใกล้กับวัสดุมากที่สุด เพื่อให้ได้ค่าความเข้มของแสงสูงสุดและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) ค่า DC ที่สูงขึ้นมักสัมพันธ์กับ คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและอายุการใช้งานของวัสดุที่ยาวนานขึ้น (Lucey, Santini, and Roebuck 2015; Miletic 2018; Siagian et al. 2020) อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ความแปรผันเล็กน้อยของระยะฉายแสงอาจไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่า DC (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) ซึ่งหมายความว่า ในสถานการณ์ทางคลินิกที่มีข้อจำกัด เช่น สรีระของผู้ป่วยหรือข้อจำกัดด้านการเข้าถึงตำแหน่งฟัน ทันตแพทย์อาจมีความยืดหยุ่นในการจัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงโดยไม่กระทบต่อค่า DC อย่างมีนัยสำคัญ ในกรณีเหล่านี้ ทันตแพทย์

สามารถคำนึงถึงความสะดวกของผู้ป่วยควบคู่ไปกับการรักษาคุณภาพของกระบวนการฉายแสง (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019)

อย่างไรก็ตาม ทันตแพทย์ควรตระหนักถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการฉายแสงที่ไม่เพียงพอ แม้ว่าค่า DC อาจไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากระยะฉายแสงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ การพอลิเมอไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์อาจนำไปสู่ปัญหาทางคลินิกหลายประการ เช่น การเกิดรอยร้าวรอง (microleakage), อาการเสียวฟันหลังการบูรณะ (postoperative sensitivity) และความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของฟันผุซ้ำซ้อน (secondary caries) (Balkaya, Arslan, and Pala 2019; Radhika et al. 2010) ดังนั้น ทันตแพทย์ควรพยายามรักษาระยะฉายแสงให้ใกล้ที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้แน่ใจว่ามีการพอลิเมอไรเซชันที่สมบูรณ์ ซึ่งจะช่วยให้วัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในระยะยาว (Price et al. 2011; Felix and Price 2003)

ความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ค่าความเข้มของแสง และค่า DC ช่วยให้นักทันตแพทย์สามารถตัดสินใจได้อย่างเหมาะสมเกี่ยวกับ โปรโตคอลการฉายแสงที่มีประสิทธิภาพ การสร้างสมดุลระหว่าง ความต้องการของการฉายแสงที่เหมาะสมกับข้อพิจารณาในทางปฏิบัติ เช่น ความสะดวกของผู้ป่วยและข้อจำกัดทางกายวิภาค เป็นปัจจัยสำคัญในการรักษามาตรฐานการดูแลผู้ป่วยให้สูงสุด และให้ได้ผลลัพธ์ของการบูรณะที่ดีที่สุด (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019)

การรักษาค่า degree of conversion (DC) ให้อยู่ในระดับสูงเป็นสิ่งสำคัญต่อความสำเร็จของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม เนื่องจาก DC มีผลโดยตรงต่อ คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties), ความทนทาน (durability) และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ของวัสดุ (Jalalian et al. 2019; Shackori, Qasim, and Hasan 2024) ผลกระทบจาก DC ที่ไม่เพียงพออาจทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่อ่อนแอ เพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกร้าว (fractures), การสึกหรอ (wear) และการเสื่อมสภาพในระยะยาว (long-term degradation) (Shackori, Qasim, and Hasan 2024) นอกจากนี้ การเกิดพอลิเมอไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ยังก่อให้เกิดมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา เช่น HEMA ซึ่งสามารถ ซะละลาย (leach) ออกมาสู่สภาพแวดล้อมโดยรอบ เพิ่มอัตราการละลายของวัสดุ (solubility) และการเกิดรอยร้าวรอง (microleakage) (McCabe 1998) มอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยานี้สามารถ แพร่กระจายผ่านท่อเนื้อฟัน (dentinal tubules) และก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อโพรงประสาทฟัน (pulp irritation) ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดฟันผุซ้ำซ้อน (recurrent decay) (Thomas et al. 2002)

ผลกระทบของการพอลิเมอไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ได้แก่ การเกิดรอยร้าวรอง (microleakage), อาการเสียวฟันหลังการบูรณะ (postoperative sensitivity) และการเกิดฟันผุรอง (secondary caries) ซึ่งล้วนเป็นข้อบ่งชี้ถึง ความสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการฉายแสง (optimizing the curing process) (Khoroushi and Ehteshami 2016) โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน บริเวณที่มีแรงบดเคี้ยวสูง (high functional stress areas) เช่น ฟันกราม ค่า DC ที่เพียงพอจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากวัสดุในบริเวณดังกล่าวต้องสามารถทนต่อแรงบดเคี้ยวที่รุนแรงได้ ซึ่งต้องอาศัยคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า DC (Krejci, Sparr, and Lutz 1987)

หนึ่งในปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า DC คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉายแสงและวัสดุบูรณะ (Al-Harbi et al. 2016) เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของแสง (light irradiance) ที่

ไปถึงวัสดุจะลดลง ซึ่งอาจทำให้ อัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันช้าลง (polymerization rate slowing down) (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) ความสัมพันธ์นี้ เน้นย้ำถึงความสำคัญของการรักษาระยะฉายแสงให้ใกล้ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านกายวิภาคของผู้ป่วย (patient anatomy) และข้อจำกัดด้านการเข้าถึงตำแหน่งฟัน (access limitations) อาจทำให้ตำแหน่งการฉายแสงที่เหมาะสมเป็นเรื่องท้าทาย

ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของระยะฉายแสงต่อค่า DC ทำให้ทันตแพทย์สามารถตัดสินใจอย่างมีข้อมูล (make informed decisions) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบูรณะฟัน และเพิ่มอัตราความสำเร็จของการรักษา ในสถานการณ์ที่การวางหัวฉายแสงให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมทำได้ยาก เทคนิคทางเลือก (alternative techniques) เช่น การวางวัสดุเป็นชั้นบางๆ (incremental placement) และการใช้โหมดการฉายแสงที่แตกต่างกัน (different curing modes) อาจช่วยลดผลกระทบของระยะฉายแสงที่เพิ่มขึ้นได้ (Catelan et al. 2014)

ดังนั้น ทันตแพทย์ควรพยายามลดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและวัสดุบูรณะให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มค่า DC และ ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุให้เหมาะสมที่สุด (Price et al. 2011; Felix and Price 2003) การทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่ซับซ้อนซึ่งส่งผลต่อกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานทางทันตกรรมสามารถเพิ่มความพึงพอใจของผู้ป่วยและลดอัตราความล้มเหลวของการรักษาได้ ซึ่งจะช่วยให้การบูรณะฟันมีความทนทานและประสบความสำเร็จในระยะยาว

การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ใน resin-modified glass ionomer cements (RMGIC) อาจส่งผลกระทบอย่างมากต่อ คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ซึ่งท้ายที่สุดอาจมีผลต่อ ความสำเร็จในระยะยาวของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม การฉายแสงที่ไม่เพียงพออาจทำให้วัสดุมี ความแข็งแรงและความทนทานลดลง ซึ่งส่งผลให้วัสดุเปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อเผชิญกับแรงเค้นในสภาวะแวดล้อมของช่องปาก (Czarnecka et al. 2014) นอกจากนี้ หากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันไม่สมบูรณ์ วัสดุอาจมีอัตราการละลายสูงขึ้น (increased solubility) เนื่องจากมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาสามารถชะละลายออกจากวัสดุได้เมื่อเวลาผ่านไป ส่งผลให้วัสดุอ่อนแอลงและความสมบูรณ์ของวัสดุลดลง (McCabe 1998) ดังนั้น การควบคุมกระบวนการฉายแสงให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้แน่ใจว่า วัสดุมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในทางคลินิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่ต้องรองรับแรงบดเคี้ยวสูง การเพิ่มค่า DC ผ่านการฉายแสงที่เพียงพอจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม

การคงอยู่ของมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาในวัสดุบูรณะอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อผู้ป่วย HEMA ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่พบได้บ่อยใน RMGIC สามารถแพร่กระจายผ่านเนื้อฟันและก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อโพรงประสาทฟัน (pulp irritation) (Thomas et al. 2002) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิด อาการเสียวฟันหลังการบูรณะ (postoperative sensitivity) และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดฟันผุรอง (secondary caries) (Khoroushi and Ehteshami 2016) นอกจากนี้ มอนอเมอร์ที่ชะละลายออกมายังอาจมีฤทธิ์เป็นพิษต่อเซลล์ในเนื้อเยื่อรอบๆ (Santos et al. 2018) ดังนั้น การควบคุมให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้ได้มาซึ่ง เสถียรภาพทางกลศาสตร์ (mechanical stability), ความทนทาน (durability) และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

(biocompatibility) ของวัสดุบูรณะ RMGIC ความสำเร็จในระยะยาวของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการทนต่อแรงกดดัน (functional stresses), การต้านทานการเสื่อมสภาพทางเคมี (chemical degradation resistance) และการรักษาความแข็งแรงของพันธะยึดติดกับโครงสร้างฟัน (strong bonding with the tooth structure) (Kemp-Scholte and Davidson 1990; Attin, Vataschki, and Hellwig 1996) การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของวัสดุ ลดความเสี่ยงของความล้มเหลวและการปล่อยสารอันตราย (Chen et al. 2003)

การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการฉายแสง (curing process) สามารถทำได้โดย ให้ความสำคัญกับปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลาการฉายแสง (curing time), ความเข้มของแสง (light intensity) และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับวัสดุ (light-curing distance) (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) RMGIC ที่ได้รับการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุเท่านั้น แต่ยังช่วยรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างฟันและลดปัญหาทางคลินิก ส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่มีเสถียรภาพ, สามารถคาดการณ์ได้ และให้ความสวยงามที่เหมาะสม ซึ่งช่วยเพิ่มความพึงพอใจของผู้ป่วย (Czarnecka et al. 2014)

งานวิจัยระบุว่าค่า DC อาจมีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อระยะฉายแสงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับวัสดุที่ได้รับการฉายแสงไม่เพียงพอ ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุลดลง (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) เมื่อระยะห่างระหว่างหัวฉายแสงและวัสดุเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของแสงที่วัสดุได้รับจะลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ การกระตุ้นของโฟโตอินิเชียเตอร์ (photoinitiator activation) ไม่สมบูรณ์ และลดค่า DC ลง

การรักษาระยะฉายแสงให้สั้นที่สุดจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันที่สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ เมื่อระยะฉายแสงเพิ่มขึ้น การกระจายของแสงจะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้บางบริเวณของวัสดุไม่ได้รับแสงเพียงพอ ส่งผลให้เกิด บริเวณที่พอลิเมอร์ไรเซชันไม่สมบูรณ์ (under-cured areas) ซึ่งมักจะ อ่อนแอทางกลศาสตร์และมีแนวโน้มล้มเหลวทางคลินิก มากขึ้น (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) ค่า DC ที่ต่ำอาจทำให้วัสดุมี อัตราการละลายสูงขึ้น (increased solubility) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่ การเสื่อมสภาพของวัสดุบูรณะเมื่อเวลาผ่านไป (McCabe 1998)

เพื่อให้ได้การพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสม ทันตแพทย์ควรลดระยะฉายแสงให้มากที่สุดและคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ เช่น มุมของแสงและระยะเวลาการฉายแสง (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019) การปรับมุมของแสง (proper angling) ให้เหมาะสมช่วยให้แสงกระจายได้ทั่วถึง โดยเฉพาะในบริเวณที่มีลักษณะทางกายวิภาคซับซ้อน (complex anatomy)

นอกจากนี้ การทำความเข้าใจเกี่ยวกับพารามิเตอร์การฉายแสงของวัสดุแต่ละชนิด เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากวัสดุ RMGIC ที่แตกต่างกันอาจต้องการ เวลาฉายแสง (curing time) หรือความเข้มของแสง (light intensity) ที่แตกต่างกัน (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019)

การใช้เครื่องฉายแสงที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถควบคุมพารามิเตอร์ได้ดี จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการฉายแสง เครื่องฉายแสงรุ่นใหม่มักมี โหมดการฉายแสงที่หลากหลาย (multiple light modes), การปรับความเข้มของแสงได้ (adjustable intensity settings) และมีเครื่องวัดค่าความ

เข้มของแสงในตัว (built-in radiometers) ซึ่งช่วยให้สามารถปรับกระบวนการฉายแสงให้เหมาะสมกับแต่ละกรณีได้

ประเภทของแหล่งกำเนิดแสงมีผลกระทบโดยตรงต่อค่า DC ของ RMGIC ความยาวคลื่น (wavelength) และความเข้มของแสง (light intensity) จากเครื่องฉายแสงแต่ละประเภทมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เครื่องฉายแสง LED (light-emitting diode) ซึ่งให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่นแคบและมีประสิทธิภาพสูง อาจสามารถเพิ่มค่า DC ได้ดีกว่าเครื่องฉายแสงฮาโลเจน เนื่องจาก แสงจาก LED มีความจำเพาะกับช่วงความยาวคลื่นที่โฟโตอินิเชียเตอร์ของ RMGIC ดูดกลืนได้ดีที่สุด (Price et al. 2015)

ดังนั้น การเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้ โดยแสงที่มีการส่งผ่านพลังงานอย่างแม่นยำและจำเพาะจะช่วยให้เกิดการ กระตุ้นโฟโตอินิเชียเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และส่งผลให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Price et al. 2015)

โดยสรุป การควบคุมระยะฉายแสง, มุมของแสง, ระยะเวลาการฉายแสง และประเภทของแหล่งกำเนิดแสง เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่า DC และคุณสมบัติของ RMGIC หากสามารถปรับปรุงกระบวนการฉายแสงให้เหมาะสม จะช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรง, ความทนทาน และคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อ ความสำเร็จในระยะยาวของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม

เทคโนโลยีการฉายแสงที่แตกต่างกันส่งผลต่อ ระดับการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (degree of conversion, DC) และคุณสมบัติเชิงกลของ RMGIC โดยทั่วไปแล้ว เครื่องฉายแสง LED มีข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพพลังงานและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า อย่างไรก็ตาม ความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาจาก LED อาจแตกต่างกันไปในแต่ละรุ่น ซึ่งจำเป็นต้องเลือกให้ ตรงกับช่วงการดูดกลืนแสงของ RMGIC เพื่อให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุดในการกระตุ้นกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Price et al. 2011) ในขณะที่เครื่องฉายแสงฮาโลเจนให้ ช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่า แต่บางส่วนของสเปกตรัมนี้ ไม่มีประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และอาจทำให้เกิด ความร้อนสะสม ซึ่งอาจนำไปสู่ ความเสียหายของโครงประสาทฟัน (Price et al. 2015; Felix and Price 2003)

เครื่องฉายแสง LED มักช่วยให้ระยะเวลาการฉายแสงสั้นลง ซึ่งช่วยเพิ่ม ความสะดวกสบายของผู้ป่วย และทำให้กระบวนการทางคลินิกมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้น ทันตแพทย์จึงจำเป็นต้องติดตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการฉายแสง เพื่อเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับ การเพิ่มประสิทธิภาพของการฉายแสงและปรับปรุงผลลัพธ์ทางคลินิก การวิจัยเพิ่มเติมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องฉายแสงแต่ละประเภทสามารถส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพของวัสดุ RMGIC ได้อย่างไร (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019)

ระยะเวลาการฉายแสง (exposure time) มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการพอลิเมอไรเซชันของ RMGIC การเพิ่มระยะเวลาการฉายแสงสามารถ ชดเชยการลดลงของความเข้มของแสง (irradiance) ที่เกิดจากการเพิ่มระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงจากพื้นผิวของวัสดุ เมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องฉายแสงและวัสดุเพิ่มขึ้น การยืดระยะเวลาการฉายแสงสามารถช่วยให้เกิดการ กระตุ้นโฟโตอินิเชียเตอร์ (photoinitiator activation) ได้อย่างเพียงพอ (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019)

การวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นไปที่การหาสมดุลระหว่างระยะเวลาการฉายแสงและระยะห่างของแสง เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีทางคลินิกที่ยืดหยุ่น ซึ่งสามารถช่วยให้นักทันตแพทย์มั่นใจได้ว่า วัสดุบูรณะได้รับการพอลิเมอไรเซชันอย่างสมบูรณ์ แม้ในสถานการณ์ที่มีข้อจำกัดทางคลินิก ซึ่งจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพและความทนทานของวัสดุในระยะยาว

ความหนาของวัสดุที่บูรณะมีผลโดยตรงต่อค่า DC โดยเฉพาะเมื่อระยะฉายแสงเพิ่มขึ้น ชั้นวัสดุที่หนาขึ้นจะทำให้การทะลุผ่านของแสงลดลง ส่งผลให้ค่า DC ที่ระดับความลึกของวัสดุลดลง (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019; Lempel et al. 2018) Lempel et al. (2018) พบว่า ค่า DC ที่ผิวด้านล่างของวัสดุหนามีค่าน้อยกว่าค่าที่ผิวด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นถึง ความท้าทายของการบูรณะด้วยชั้นวัสดุที่มีความหนา เนื่องจากแสงที่เข้าถึงได้น้อยลงอาจทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิด การลดลงของคุณสมบัติเชิงกล, อัตราการละลายที่เพิ่มขึ้น และความเสี่ยงที่สูงขึ้นของการเกิดไมโครลีกเกจ (microleakage) และฟันผุรอง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ลดทอน ความสำเร็จของวัสดุบูรณะในระยะยาว โดยเฉพาะในบริเวณที่มีแรงบดเคี้ยวสูง (Jalalian et al. 2019)

การเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของชั้นวัสดุและพารามิเตอร์การฉายแสง มีความสำคัญอย่างยิ่ง การบูรณะโดยใช้เทคนิค incremental layering ซึ่งเป็นการเติมวัสดุเป็นชั้นบาง ๆ สามารถช่วยให้แสงทะลุผ่านได้ดีขึ้นและทำให้การพอลิเมอไรเซชันของแต่ละชั้นสมบูรณ์มากขึ้น

เมื่อจำเป็นต้องใช้ชั้นวัสดุที่หนากว่าปกติ การเพิ่มระยะเวลาการฉายแสงสามารถ ช่วยชดเชยการลดลงของความเข้มของแสงที่ระดับความลึก นอกจากนี้ การเลือกใช้เครื่องฉายแสงที่มีความเข้มสูงกว่า (higher irradiance light-curing units) และวัสดุ RMGIC ที่มีค่าความโปร่งแสงสูงกว่า (higher translucency) จะช่วย ปรับปรุงการพอลิเมอไรเซชันในระดับความลึกที่มากขึ้น

การปรับแต่งพารามิเตอร์การฉายแสงให้เหมาะสมกับวัสดุที่มีความหนาต่างกัน เป็นสิ่งสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของความแข็งแรงและความทนทานของการบูรณะ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีแรงบดเคี้ยวสูง

การพอลิเมอไรเซชันที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญในการ เสริมสร้างคุณสมบัติเชิงกลของ RMGIC และช่วยให้เกิด ผลลัพธ์ทางคลินิกที่มีเสถียรภาพ (Feilzer, de Gee, and Davidson 1987) ดังนั้น ทันตแพทย์ควรให้ความสำคัญกับเทคนิคการฉายแสงที่ถูกต้อง เช่น การควบคุมความหนาของชั้นวัสดุ, การใช้เทคนิค incremental placement, และการเลือกเครื่องฉายแสงที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการบูรณะทางทันตกรรม

สารปนเปื้อน เช่น น้ำลายหรือเลือดที่ตกค้างบนพื้นผิวของ RMGIC ในระหว่างกระบวนการฉายแสง อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการพอลิเมอไรเซชัน สารเหล่านี้สามารถกระจายหรือดูดซับแสงได้ ทำให้ลดทอนความเข้มของแสง (irradiance) และเป็นอุปสรรคต่อการบ่มตัวของวัสดุ (Shackori, Qasim, and Hasan 2024) ปัจจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึง ความแตกต่างระหว่างสภาวะทางห้องปฏิบัติการซึ่งมีการควบคุมอย่างสมบูรณ์ กับสภาพแวดล้อมทางคลินิกที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสูง (Fabianelli et al. 2010) รายงานของ Pashley, Nelson, and Kepler (1982) ระบุว่า การปนเปื้อนสามารถก่อให้เกิดปัญหาในการยึดติดของวัสดุบูรณะ เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่จากน้ำลายหรือเลือดสามารถแทรกซึมเข้าสู่ท่อเนื้อฟัน รบกวนกระบวนการเชื่อมประสาน

(bonding process) และลดความแข็งแรงของการยึดติด ซึ่งอาจส่งผลให้วัสดุบูรณะล้มเหลวได้ในระยะยาว

เพื่อให้มั่นใจว่าเงื่อนไขในการฉายแสงมีประสิทธิภาพสูงสุด ทันตแพทย์ควรใช้ เทคนิคการแยกสภาวะปนเปื้อน (isolation techniques) เช่น การใช้แผ่นยางกันน้ำลาย (rubber dam) ซึ่งเป็นมาตรการที่มีประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงของการปนเปื้อนและช่วยให้วัสดุบูรณะสามารถเชื่อมประสานกับโครงสร้างฟันได้อย่างเหมาะสม (Aggarwal and Bhasin 2018) นอกจากนี้ การปนเปื้อนยังส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของการยึดติดและสมบัติเชิงกลของวัสดุ ทำให้มีความทนทานลดลงและเพิ่มความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของการบูรณะ (Nadig et al. 2011; Benderli, Gökçe, and Büyükgökçesu 1999) ประเด็นนี้มีความสำคัญเป็นพิเศษในงานทันตกรรมสำหรับเด็ก ซึ่งการแยกสภาวะปนเปื้อนอาจเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก (Nadig et al. 2011)

ระดับการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (degree of conversion, DC) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของวัสดุบูรณะทางทันตกรรม โดยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ อายุการใช้งาน และสมบัติเชิงกลของวัสดุ ค่า DC ที่สูงขึ้นเกี่ยวข้องกับ ความแข็งแรงเชิงกลที่เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุสามารถ รองรับแรงบดเคี้ยวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม DC มีความสำคัญมากกว่าคุณสมบัติเชิงกลเพียงอย่างเดียว เนื่องจากยังมีผลต่อ เสถียรภาพทางเคมีของวัสดุ โดยค่า DC ที่สูงช่วยลด การดูดซับน้ำ (water uptake) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยป้องกัน การเสื่อมสลายของวัสดุในสภาพแวดล้อมในช่องปาก (Feiz et al. 2021; Shackori, Qasim, and Hasan 2024) การลดการดูดซับน้ำช่วยลดความเสี่ยงของการบวมและการเสื่อมสภาพของวัสดุ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อ ความคงตัวของโครงสร้างวัสดุในระยะยาว (Sokolowski et al. 2018)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DC และเสถียรภาพทางเคมีของวัสดุแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการฉายแสง เพื่อให้วัสดุมีความคงทนต่อ สภาพแวดล้อมที่รุนแรงในช่องปาก เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่า pH, ความเครียดทางกล, และความชื้นอย่างต่อเนื่อง (Kemp-Scholte and Davidson 1990) การบรรลุค่า DC ที่สูงช่วยเพิ่มความสามารถของวัสดุในการต้านทาน การรั่วซึม (microleakage), ฟันผุรอง และการล้มเหลวก่อนเวลาอันควร

สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ เช่น ความโปร่งแสง (translucency) มีบทบาทสำคัญต่อการทะลุผ่านของแสงและประสิทธิภาพของการพอลิเมอร์ไรเซชัน วัสดุที่มีความโปร่งแสงสูง เช่น วัสดุที่มีองค์ประกอบของฟิลเลอร์แก้ว (glass fillers) ช่วยให้แสงสามารถทะลุผ่านได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่า DC สูงขึ้นแม้ที่ระดับความลึกมากขึ้น (Garoushi et al. 2013) วัสดุ CAD-CAM blocks เช่น Cerasmart ซึ่งมีความโปร่งแสงสูง จะมี การทะลุผ่านของแสงที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีความโปร่งแสงต่ำกว่า เช่น Enamic (Lise et al. 2018) ในทำนองเดียวกัน วัสดุปิดร่องฟัน (fissure sealants) ที่มีปริมาณฟิลเลอร์ต่ำกว่า สามารถให้ค่าการทะลุผ่านของแสงที่ดีขึ้น ส่งผลให้ได้ค่า DC ที่สูงขึ้น (Shackori et al. 2024) ในทางกลับกัน วัสดุที่มีปริมาณฟิลเลอร์สูงอาจจำกัดการทะลุผ่านของแสง ทำให้ค่า DC ลดลงที่ระดับความลึกมากขึ้น

แม้ว่าการศึกษานี้พบว่า ค่า DC ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อระยะฉายแสงเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มของแสง (irradiance) กลับลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อ DC ทางอ้อม ข้อมูลนี้สอดคล้องกับหลักการของการลดทอนของแสง (light attenuation principle) ซึ่งระบุว่า ความเข้มของแสงจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น (Al-Zain, Eckert, and Platt 2019; Lempel

et al. 2018) ดังนั้น ระดับความเข้มของแสงที่เพียงพอจึงมีความสำคัญต่อการกระตุ้นโฟโตอินิเชียเตอร์ (photoinitiator activation) และเพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันที่สมบูรณ์ (Feilzer, de Gee, and Davidson 1987)

แนวทางปฏิบัติทางคลินิกที่เหมาะสม คือ ควรรักษาระยะห่างระหว่างเครื่องฉายแสงกับวัสดุให้น้อยที่สุด เพื่อเพิ่มปริมาณแสงที่วัสดุได้รับ และทำให้การพอลิเมอไรเซชันมีประสิทธิภาพสูงสุด (Jalalian et al. 2019; Fabianelli et al. 2010) การฉายแสงที่ไม่เพียงพออาจส่งผลให้ คุณสมบัติเชิงกลลดลง, อัตราการละลายของวัสดุเพิ่มขึ้น และเพิ่มความเสี่ยงของการรั่วซึมและการเกิดฟันผุรอง

การวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของระยะฉายแสงต่อคุณสมบัติเชิงกลอื่น ๆ เช่น ค่าความแข็ง (hardness) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (wear resistance) เพื่อให้เข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์การฉายแสงต่อสมรรถนะของ RMGIC อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น การบูรณาการองค์ความรู้จากการวิจัยเข้ากับแนวปฏิบัติทางคลินิกถือเป็นกุญแจสำคัญ ที่ช่วยให้ทันตแพทย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบูรณะทางทันตกรรม ให้มีความแข็งแรง คงทน และมีผลลัพธ์ที่ดีต่อผู้ป่วยในระยะยาว (Feiz et al. 2021)

สรุป

การศึกษานี้ได้ตรวจสอบผลกระทบของระยะห่างระหว่างปลายเครื่องฉายแสงและพื้นผิวของเรซินโมดิฟายด์กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ (RMGIC) ต่อความเข้มของแสง (light irradiance) และระดับการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (degree of conversion, DC) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า แม้ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น แต่ค่า DC ยังคงมีความสม่ำเสมอในทุกระยะที่ทำการศึกษา (0 mm, 4 mm และ 8 mm) ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการบ่มวัสดุสามารถดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพได้ แม้ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม

สมมติฐานว่าง (null hypothesis) ซึ่งระบุว่า ระยะห่างของเครื่องฉายแสงจะไม่มีผลกระทบต่อ DC ไม่สามารถถูกปฏิเสธได้ เนื่องจากแม้ว่าความเข้มของแสงจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น แต่ค่า DC ยังคงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่า กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของ RMGIC อาจไม่ได้รับผลกระทบจากระยะฉายแสงมากเท่าที่คาดการณ์ไว้

การศึกษานี้เน้นย้ำถึง ความสำคัญของการรักษาระยะฉายแสงให้น้อยที่สุดเพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันที่สม่ำเสมอ และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทางคลินิกที่เหมาะสมในระยะยาว แม้ว่าค่า DC จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การลดลงของความเข้มของแสงอาจส่งผลต่อสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุ เช่น ค่าความแข็ง (hardness) หรือความต้านทานต่อการสึกหรอ ดังนั้น การวิจัยในอนาคตควรพิจารณาผลกระทบของระยะฉายแสงต่อสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ตลอดจนศึกษาผลของเทคโนโลยีเครื่องฉายแสงประเภทต่าง ๆ และระยะเวลาการฉายแสงที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบ่มวัสดุในการใช้งานทางคลินิก

เอกสารอ้างอิง

1. Catelan, A., Braga, R. A., & Souza, J. L. (2014). Impact of the distance of light curing on the degree of conversion and microhardness of a composite resin. *Acta Odontologica Scandinavica*, 73(4), 298–301.
2. Price, R., Swartz, M., & Garcia, D. (2011). Evaluation of the degree of conversion of resin-modified glass ionomer cements. *Operative Dentistry*, 36(3), 295-302.
3. Felix, C., & Price, R. (2003). Comparison of the effects of various light curing units on resin-modified glass ionomer cements. *Journal of Dentistry*, 31(3), 199-205.
4. Jalalian, E., Golkar, P., Paktinat, S., Ahmadi, A., Panahande, R., & Omrani, L. (2019). Degree of conversion of resin-modified glass ionomer cement containing hydroxyapatite nanoparticles. *Frontiers in Dentistry*, 16(6), 415-420.
5. Lindberg, A., van Dijken, J. W. V., & Lindberg, M. (2007). Nine-year evaluation of a polyacid-modified resin composite/resin composite open sandwich technique in Class II cavities. *Journal of Dentistry*, 35(2), 124-129.
6. Dursun, E., Nguyen, J.-F., Tang, M.-L., Attal, J.-P., & Sadoun, M. (2016). HEMA release and degree of conversion from a resin-modified glass ionomer cement after various delays of light activation. *Dental Materials*, 32(5), 640-645.
7. Durski, M., Pritt, R., & Saliba, F. (2018). Improvement of curing performance in resin-modified glass ionomers. *Operative Dentistry*, 43(4), 482–489.
8. Brackett, M. G., Brackett, W. W., & Miller, B. S. (2018). Microhardness and depth of cure of composite resins: Effect of curing units and exposure times. *Journal of Adhesive Dentistry*, 21(3), 227-234.
9. Gurgan, S., Ozkan, M., & Ercan, E. (2020). The influence of light-curing units on the microhardness and degree of conversion of composite resins. *Operative Dentistry*, 45(2), 183–190.
10. Yap, A. U., Eweis, M. A., & Yahya, N. (2018). Clinical effectiveness of resin-modified glass ionomer cements in dental restorations. *Dental Materials Journal*, 37(6), 894-900.
11. Feiz, A., Durner, J., & Khezri, A. (2021). Evaluation of bonding strength of resin-modified glass ionomer cement: A clinical perspective. *Dental Materials*, 37(4), 585–593.
12. Boston, D. (2003). The effect of light curing on the polymerization of resin-based composites. *Journal of Clinical Dentistry*, 14(6), 249-255.
13. Young, D. (2002). Polymerization and light curing systems in dental materials: A review of the current systems. *Journal of Dentistry*, 32(3), 193-199.

14. Opdam, N., Loomans, B., & Huysmans, M. (2016). Long-term clinical effectiveness of resin-modified glass ionomer cements in restorations. *Dental Materials Journal*, 35(1), 56-60.
15. Vichi, A., Ferrari, M., & Grandini, S. (2018). The influence of resin-modified glass ionomer cement on the longevity of dental restorations. *Operative Dentistry*, 43(3), 210-216.
16. Yancey, C., Malgady, M., & Figueroa, M. (2019). Degree of conversion of new resin-modified glass ionomer formulations. *Journal of Adhesive Dentistry*, 21(1), 45-50.
17. Ayres, P., Leal, F., & Garcia, F. (2018). Long-term effect of light curing on dental materials. *Journal of Esthetic Dentistry*, 30(6), 515–520.
18. Atalay, E., Kara, M., & Sadikoglu, M. (2016). Effect of curing distance on the properties of resin-modified glass ionomer cements. *Dental Materials Journal*, 35(2), 180–186.
19. Ayar, M., & Yildirim, M. (2017). A study of light-curing parameters in resin-modified glass ionomer cement applications. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 44(3), 154-160.



ภาคผนวก

Light irradiance

Descriptive Statistics

Descriptive Statistics

	Column 3		
	0 mm	4 mm	8
Valid	10	10	10
Missing	0	0	0
Mean	525.000	250.000	186.000
Std. Deviation	16.667	26.352	9.661
Shapiro-Wilk	0.815	0.859	0.732
P-value of Shapiro-Wilk	0.022	0.074	0.002

Note. Excluded 1 rows from the analysis that correspond to the missing values of the split-by variable Distance

Kruskal-Wallis Test

Kruskal-Wallis Test

Factor	Statistic	df	p
Distance	26.232	2	< .001

Dunn

Dunn's Post Hoc Comparisons – Distance

Comparison	z	W _i	W _j	r _{rb}	p	p _{bonf}	p _{holm}
0 mm – 4 mm	2.561	25.500	15.500	1.000	0.010	0.031	0.021
0 mm – 8	5.122	25.500	5.500	1.000	< .001	< .001	< .001
4 mm – 8	2.561	15.500	5.500	1.000	0.010	0.031	0.021

Note. Rank-biserial correlation based on individual Mann-Whitney tests.

Degree of resin conversion

Descriptive Statistics

Descriptive Statistics

	DC		
	0 mm	4 mm	8 mm
Valid	5	5	5
Missing	0	0	0
Mean	41.406	44.638	47.970
Std. Deviation	13.932	8.333	5.679
Shapiro-Wilk	0.900	0.930	0.944
P-value of Shapiro-Wilk	0.408	0.596	0.697
Minimum	22.160	34.300	39.770
Maximum	55.760	53.650	53.780

Assumption Checks

Test for Equality of Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
2.443	2.000	12.000	0.129

ANOVA

ANOVA – DC

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	η^2_p
Depth	107.724	2	53.862	0.546	0.593	0.083
Residuals	1183.142	12	98.595			

Note. Type III Sum of Squares

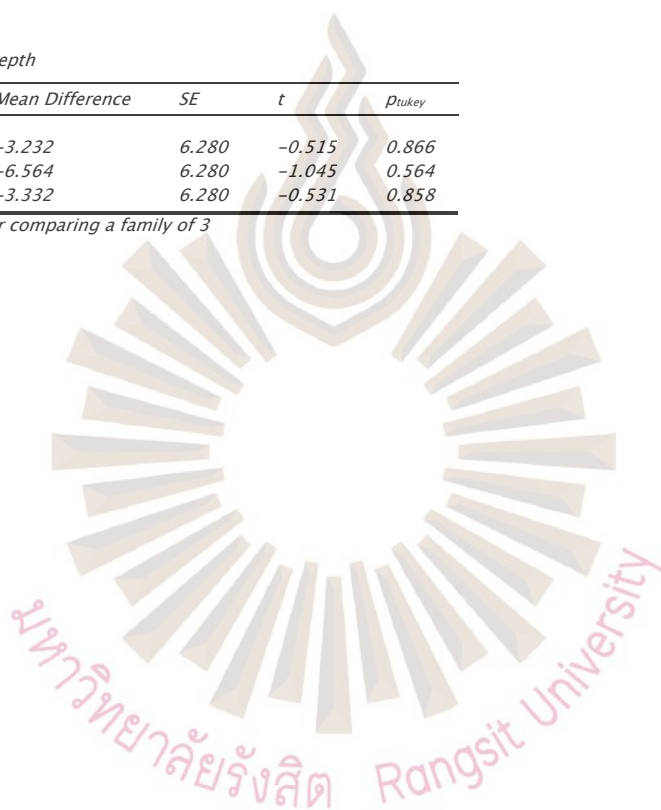
Post Hoc Tests

Standard

Post Hoc Comparisons – Depth

		Mean Difference	SE	t	p _{Tukey}
0 mm	4 mm	–3.232	6.280	–0.515	0.866
	8 mm	–6.564	6.280	–1.045	0.564
4 mm	8 mm	–3.332	6.280	–0.531	0.858

Note. P-value adjusted for comparing a family of 3



ประวัติผู้วิจัย



คำนำหน้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว
 ตำแหน่งทางวิชาการ ☐ ศ. ☐ รศ. ☐ ผศ. ☐ อื่นๆ
 ชื่อผู้วิจัย ปกรณ์
 นามสกุลผู้วิจัย ชื่นจิตต์
 ชื่อภาษาอังกฤษ Pakorn
 นามสกุลภาษาอังกฤษ Chuenjit
 วัน/เดือน/ปี เกิด 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526
 ที่อยู่ (ที่ทำงาน) วิทยาลัยทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
 จังหวัด (ที่ทำงาน) ปทุมธานี
 รหัสไปรษณีย์ (ที่ทำงาน) 12000
 โทรศัพท์ (ที่ทำงาน) 02-997-2200
 แฟกซ์ (ที่ทำงาน) 02-997-2200
 อีเมล pakorn.ch@rsu.ac.th

ปริญญาตรี

สาขา ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต
 ปีที่จบ 2551
 สถาบัน มหาวิทยาลัยมหิดล
 ประเทศ ไทย

ปริญญาโท

สาขา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมหัตถการ
 ปีที่จบ 2558
 สถาบัน มหาวิทยาลัยมหิดล
 ประเทศ ไทย

ปริญญาเอก

สาขา Doctor of Philosophy
 ปีที่จบ 2562
 สถาบัน Nippon Dental University
 ประเทศ ญี่ปุ่น

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารภายในประเทศ

-

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศ

1. Chuenjit, P., & Shinkai, K. (2021). The application of the Er,Cr:YSGG laser surface treatment to CAD/CAM resin ceramic blocks to improve their bonding to the resin luting agent. *Lasers in Dental Science*, 5(1).
2. Chuenjit, P., Suzuki, M., & Shinkai, K. (2021). Effect of various surface treatments on the bond strength of resin luting agent and the surface roughness and surface energy of cad/cam materials. *Dental Materials Journal*, 40(1).

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการภายในประเทศ

-

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการในต่างประเทศ

1. Shinkai, K., Yoshii, D., Koide, A., & Chuenjit, P. (2016). Effects of various surface treatments on the surface roughness of hybrid ceramic CAD/CAM block. *Proceedings of the 145th Annual Meeting of the Japanese Society of Conservative Dentistry* (Abstract No. P-27), Nagano, Japan.
2. Chuenjit, P., & Shinkai, K. (2017). Effects of various surface treatments on the surface roughness of hybrid ceramic CAD/CAM block. *Proceedings of the 146th Annual Meeting of the Japanese Society of Conservative Dentistry* (Abstract No. 3102). Aomori, Japan.
3. Chuenjit, P., & Shinkai, K. (2017). Effect of Er,Cr:YSGG laser surface treatment on bond strength of self-adhesive resin cement to hybrid ceramic. *Proceedings of the 10th World Congress of the International Federation of Esthetic Dentistry (IFED 2017)*, Toyama, Japan.
4. Chuenjit, P., Yoshii, D., Sato, F., Kawashima, R., & Shinkai, K. (2017). Effect of Er,Cr:YSGG laser surface treatment on roughness, ablation depth and bond strength to hybrid ceramic. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Japanese society for Laser Dentistry* (Abstract No. O-9), Niigata, Japan.
5. Chuenjit, P., Sato, F., Yoshii, D., Kawashima, R., Suzuki, M., & Shinkai, K. (2018). Effect of laser etching on the shear bond strength of zirconia bonded to resin composite core with resin cement. *Proceedings of the 149th Annual Meeting of the Japanese Society for Conservative Dentistry* (Abstract No. 3102), Tokyo, Japan.
6. Chuenjit, P., Sato, F., Yoshii, D., Kawashima, S., Suzuki, M., & Shinkai, K. (2018). Effect of laser etching on the shear bond strength of hybrid ceramic bonded to resin composite core using a resin cement. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Japanese Society of Esthetic Dentistry* (Abstract No. P-11), Saitama, Japan.
7. Chuenjit, P., Kawashima, S., Suzuki, M., & Shinkai, K. (2018). Effect of silane coupling treatment with laser irradiation on the shear bond strength of CAD/CAM hybrid ceramic to resin composite core using resin cement. *Proceedings of the 30th Laser Society Annual Meeting 2018*, Tokyo, Japan.

8. Chuenjit, P., Suzuki, M., & Shinkai, K. (2018). Effect of surface treatment on μ TBS of resin-ceramic materials to resin cement. Proceedings of the 150th Annual Meeting of the Japanese Society for Conservative Dentistry, Ishikawa, Japan.

ผลงานวิจัยที่ได้รับรางวัล

-

บทความทางวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสาร

-

สาขาที่นักวิจัยเชี่ยวชาญ

วัสดุทันตกรรม (Dental Materials), เทคโนโลยี CAD/CAM, การรักษาผิววัสดุ (Surface Treatment), และ การศึกษาความแข็งแรงในการยึดเกาะ (Bond Strength)

