

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างคอมโพสิต แกนฟันชนิดเหลวกับเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ปรับสภาพ พื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและเจ็ทพลาสมา

Comparison of Bonding Efficiency between Flowable Composite Core and Fiber-Reinforced Composite Post which Surface Treatment with Silane Coupling Agent and Plasma Jet

ปริยะ ยาวีราช¹, พิไลย์ชัยภูมิ ชัยจรีนนท์¹, สรชนันท์ ชินสวนานนท์¹, พิมพ์เดือน รังสิยากุล¹, พัชรารวรรณ ศีลธรรมพิทักษ์¹, ชีววรรณ บุญญาวรณ²

¹คณะทันตแพทยศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

²คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Piriya Yavirach¹, Pisaisit Chaijareenont¹, Sonchanin Chinsawanon¹, Pimduen Rungsiyakul¹,
Patcharawan Silthampitag¹, Dheerawan Boonyawan²

¹Faculty of Dentistry, Chiang Mai University

²Faculty of Science, Chiang Mai University

ชม.ทันตสาร 2556; 34(1) : 91-106

CM Dent J 2013; 34(1) : 91-106

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เพื่อประเมินประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลว เดือยดีทีไลท์จำนวน 56 แท่งแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามสภาวะการปรับสภาพพื้นผิวคือ 1. กลุ่มที่ไม่ปรับสภาพพื้นผิว (กลุ่มควบคุม) 2. กลุ่มที่ปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลน 3. กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของ

Abstract

The purpose of this study was to investigate the bond strength of fiber-reinforced composite post to flowable composite core build-up material after air plasma jet surface treatment. Fifty six DT Light-Post[®] were divided into 4 groups according to surface treatment: i. untreated surface group (control), ii. silane coupling agent treated surface group, iii. air

Corresponding Author:

ปริยะ ยาวีราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

Piriya Yavirach

Assist. Prof. Dr., Department of Prosthodontics,
Faculty of Dentistry, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand.

E-mail: piriya@chiangmai.ac.th, piriya.ya@cmu.ac.th

อากาศผสมก๊าซฮีเลียม และ 4. กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน โดยส่วนบนของเดือยเสริมเส้นใยหุ้มโดยรอบด้วยคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวแล้วเก็บไว้ในน้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขึ้นทดสอบแต่ละชั้นในทุกกลุ่มถูกทดสอบกำลังดึงเฉือนด้วยวิธีการดึงโดยใช้เครื่องทดสอบสากล (กลุ่มละ 8 ชิ้น) เดือยที่เหลือในทุกกลุ่มที่ไม่ถูกหุ้มด้วยคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลว ถูกนำมาทดสอบความขรุขระของผิวเดือย (กลุ่มละ 2 ชิ้น) ด้วยเครื่องพรอไฟโลมิเตอร์ และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเดือยก่อนและหลังทดสอบกำลังดึงเฉือนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (กลุ่มละ 2 ชิ้น) โดยกลุ่มฟังก์ชันนอลที่เกิดขึ้นถูกวิเคราะห์โดยใช้ฟอร์เรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (กลุ่มละ 2 ชิ้น) การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวและการทดสอบเชิงซ้อนด้วยวิธีแทมแฮนพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของกำลังดึงเฉือนในแต่ละกลุ่มที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากการทดสอบด้วยวิธีที่ไม่พบความแตกต่างของความขรุขระบนผิวเดือยในทุกกลุ่มที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

คำสำคัญ: เดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย กำลังดึงเฉือน การปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมา

mixed with helium plasma jet treated surface group, and iv. air mixed with argon plasma jet treated surface group. The coronal parts of the fiber posts were encapsulated with flowable composite core build-up material. The specimens were immersed in distilled water at 37°C for 24 hours. All specimens were pull-out tests by using a universal testing machine to evaluate the tensile-shear bond strength of the specimens in each group (n = 8). Profilometer and scanning electron microscope were used to examine the surface roughness and surface morphology in the non-encapsulated flowable composite posts (n= 2). Fourier transform infrared spectroscopy was used to measure the functional group in the posts after surface treatments (n=2). One-way ANOVA and Tamhane's multiple comparisons test revealed that there were no significant differences in tensile-shear bond strengths among each group (p=0.05). No significant differences were found in the surface roughness of all post specimens with Tukey's test (p = 0.05).

Keywords: Fiber-reinforce composite post, tensile-shear bond strength, plasma jet treatment

บทนำ

ปัจจุบันนิยมใช้เดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย (fiber-reinforced composite post) นูรณะฟันที่ผ่านการรักษาคลองรากฟัน เนื่องจากเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีข้อดีหลายๆ ประการ เช่น มีโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ใกล้เคียงกับเนื้อฟันช่วยลดปัญหาการแตกของรากฟัน⁽¹⁾ ให้ความสวยงามเมื่อใช้กับครอบฟันเซรามิกล้วน⁽²⁾ ฯลฯ แต่ยังคงพบว่าการหลุดของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยจากคลองรากฟัน ซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของการยึดติดระหว่างเรซินซีเมนต์กับเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย^(3,4) หรือคอมโพสิตแกนฟัน (composite core

build-up material) และครอบฟันหลุดจากเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย⁽⁵⁾ สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเรซินเมทริกซ์ของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกับเรซินคอมโพสิตที่มีเมทาคริเลตเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (methacrylate-base resin composite)⁽⁶⁾ จึงมีความพยายามปรับสภาพพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดติดหลายวิธีได้แก่ วิธีเชิงกล เช่นการเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวด้วยการพ่นผงอลูมินา (sandblasting)⁽⁷⁾ วิธีการใช้สารเคมี เช่นการทาผิวเดือยด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent)⁽⁸⁾ หรือใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กัดกร่อนผิว

เดือย⁽⁹⁾ วิธีเชิงกลร่วมกับการใช้สารเคมี เช่น การพ่นผงอลูมินาที่ผิวเดือยแล้วทาด้วยสารคู่ควบไฮเลน⁽¹⁰⁾ และวิธีฉีดพื้นผิวเดือยด้วยพลาสมา (plasma treatment)⁽¹¹⁾ ให้ผลการยึดติดดีขึ้น ในคลินิกสารเคมีที่นิยมใช้เพื่อปรับสภาพพื้นผิวของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยคือการใช้สารคู่ควบไฮเลน ทาที่ผิวเดือยก่อนการยึดติด⁽¹²⁾ สารคู่ควบไฮเลนเป็นสารผสมระหว่างสารประกอบอินทรีย์ (organic compound) และ อนินทรีย์ (inorganic compound) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางช่วยในการยึดติดระหว่างวัสดุต่างชนิดกันซึ่งได้แก่สารอินทรีย์และอนินทรีย์โดยผ่านปฏิกิริยาคู่ควบ (dual reaction)⁽¹³⁾ โดยหมู่ฟังก์ชันนอล (functional group) อินทรีย์ของสารคู่ควบไฮเลน เช่น ไวนิล (vinyl) อัลลิล (allyl) อะมิโน (amino) สามารถทำปฏิกิริยากับเมทริกซ์อินทรีย์ (organic matrix) ในขณะที่กลุ่มอัลคอกซี (alkoxy group) ของสารคู่ควบไฮเลน เช่น เมทอกซี (methoxy) สามารถทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ ก่อให้เกิดแรงยึดระหว่างวัสดุต่างชนิดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond)⁽¹⁴⁾ ส่วนการใช้พลาสมาเพื่อปรับสภาพพื้นผิวมักใช้ในวงการอุตสาหกรรมได้มีการใช้พลาสมาเพื่อปรับสภาพผิวของพอลิเมอร์ (polymer) อย่างแพร่หลาย⁽¹⁵⁾ เพื่อทำให้คุณสมบัติการยึดติดดีขึ้น โดยพลาสมาเป็นตัวกลางที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เป็นก๊าซที่มีประจุ โดยทั่วไปแล้วพลาสมาประกอบด้วยประจุบวกและประจุลบที่มีความหนาแน่นเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าเป็นกลุ่มของ อิเลคตรอน (electron) ไอออน (ion) โมเลกุล (molecule) อนุมูลอิสระ (free radical) และอะตอม (atom) ในสถานะกระตุ้น⁽¹⁶⁾ ซึ่งเรียกว่า สปีชีส์ที่มีพลังงาน (energetic species) การทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ (ionize) เป็นพลาสมาทำได้โดยสูญญากาศด้วยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง⁽¹⁷⁾ เมื่อก๊าซถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเพียงพอ อะตอมและโมเลกุลของก๊าซเกิดการไอออไนซ์และอิเล็กตรอนมีการหลุดออกมาเนื่องจากการชนกันอย่างรุนแรงของอะตอมและโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นเหล่านั้น เมื่อสปีชีส์ที่มีพลังงานเหล่านี้กระทบผิวของพอลิเมอร์ก่อให้เกิดการถ่ายทอดพลังงานจากพลาสมาไปสู่พื้นผิวพอลิเมอร์ พลังงานเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางฟิสิกส์แก่พื้นผิวพอลิเมอร์ดังนี้คือ 1) กำจัดสารปนเปื้อนที่ตกค้าง

บนพื้นผิวพอลิเมอร์ 2) เหนี่ยวนำให้เกิด หมู่ฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งพร้อมทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ⁽¹⁸⁾ ตัวอย่างเช่น เหนี่ยวนำให้เกิดกลุ่มที่ประกอบด้วยออกซิเจน (oxygen-containing group) (-OH, -OOH) ที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์มีความชอบน้ำ (hydrophilicity) มากขึ้น⁽¹⁹⁾ และ 3) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างพื้นผิว (surface topography) โดยการกัดกร่อน (etching) หรือการเปลี่ยนองค์ประกอบพื้นผิว (decomposition) ด้วยการเคลือบผิว⁽²⁰⁾ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติการยึดติดของพอลิเมอร์ดีขึ้น และที่สำคัญคือการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะพื้นผิวบนสุดเท่านั้น ไม่มีผลต่อคุณสมบัติวัสดุด้านใน⁽²¹⁾ แต่ข้อด้อยที่สำคัญของการใช้พลาสมาคือ ใช้เวลานานในการปรับสภาพ⁽²²⁾ เนื่องจากพลาสมาต้องทำในระบบปิดภายใต้ภาวะสุญญากาศ จึงมีแนวคิดนำพลาสมาปรับสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure plasma) ที่ใช้เวลาในการปรับสภาพพื้นผิวเร็วขึ้น ประหยัดค่าใช้จ่าย และเพิ่มคุณสมบัติการยึดติดของพื้นผิวให้ดีขึ้น^(23,24) มาใช้ในการปรับสภาพเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยซึ่งพื้นผิวด้านนอกห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ โดยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศชนิดพิเศษที่สามารถควบคุมลำของพลาสมาให้ออกมาจากปลายกระบอกรีดเครื่องมือขนาดเล็กเรียกว่า เจ็ตพลาสมา (plasma jet)⁽²⁴⁾ สามารถปรับสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์ในบริเวณที่เฉพาะเจาะจงได้ จึงเหมาะกับการนำมาปรับสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ใช้ในทางทันตกรรม ซึ่งเจ็ตพลาสมาเกิดจากก๊าซถูกดันให้ผ่านท่ออิเล็กโทรด (electrode tube) ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่คลื่นความถี่วิทยุค่าหนึ่ง ทำให้โมเลกุลก๊าซที่ป้อนเกิดการแตกตัวอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น มีพลังงานสูง และถูกเป่าออกมาทางรูเปิดที่แคบด้วยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและการไหลของอากาศ (air flow) ให้มีรูปร่างเป็นลำเจ็ต หรือรูปร่างคล้ายเข็ม ซึ่งไอออนและอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมามีอายุสั้น โดยการสลายตัวผ่านกระบวนการรวมตัวกันใหม่ (recombination)⁽²⁵⁾ จากการศึกษาของ Noeske และคณะ⁽²⁴⁾ พบว่าการใช้เจ็ตพลาสมาช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการยึดติดของ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (polyethylene

terephthalate) พอลิเอไมด์ หก (polyamide 6) พอลิไวนิล ดีนิฟลูออไรด์ (polyvinyl denefluoride) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density-polyethylene) ให้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในทางทันตกรรมใช้พลาสติกที่มีความดันบรรยากาศปรับปรุงสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์ โดย Nishigawa และคณะ⁽²⁶⁾ พบว่าพลาสติกที่มีความดันบรรยากาศสามารถเพิ่ม กำลังดึงเฉือน (tensile-shear bond strength) ระหว่างเรซินอะคริลิก (acrylic resin) ที่บ่มตัวด้วยความร้อนชนิดเมทิลเมทาคริเลต (heat-cured polymethylmethacrylate acrylic resin) กับ เรซินอะคริลิกที่บ่มด้วยตัวเอง (self-curing acrylic resin) โดยพลาสติกเข้าไปทำความสะอาดพื้นผิวของเรซินอะคริลิกตลอดจนเหนี่ยวนำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวของเรซินอะคริลิกจึงเพิ่มคุณสมบัติการเปียกน้ำ (wettability) ของพื้นผิวเรซินอะคริลิก

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจใช้เจ็ทพลาสมาของอากาศปรับปรุงสภาพพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างเดือยชนิดนี้กับคอมโพสิตแกนฟัน ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นวิธีการที่รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย และไม่ต้องนำเข้าสู่สารเคมีจากต่างประเทศ โดยมีสมมุติฐานว่าการศึกษานี้คือการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศไม่เพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลว (flowable composite core build-up material) เมื่อเทียบกับการใช้สารเคลือบไซเลน

วัตถุประสงค์

1. ประเมินประสิทธิภาพการยึดติดของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวด้วยการทดสอบกำลังดึงเฉือน
2. ประเมินประสิทธิภาพการยึดติดของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารเคลือบไซเลนกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวด้วยการทดสอบกำลังดึงเฉือน

3. เปรียบเทียบกำลังดึงเฉือน ระหว่างคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวกับเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเคลือบไซเลนกับเจ็ทพลาสมาของอากาศ

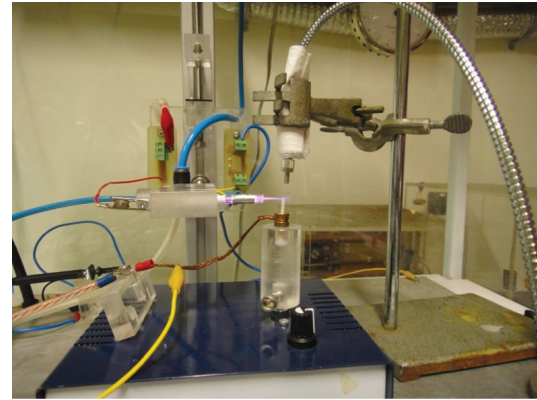
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยทั้งทางเคมีและทางฟิสิกส์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเคลือบไซเลนและเจ็ทพลาสมาของอากาศ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

นำเดือยดีทีไลท์ (DT Light posts[®], RTD, St. Egrevé, France, Batch number 159801103) ซึ่งเป็นเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยควอตซ์ชนิดปลายสอบ (taper post) ที่มีส่วนประกอบพื้นฐานของเมทริกซ์เป็นเรซิน อีพอกซี (epoxy resin) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตรจำนวน 56 แท่งมาแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 14 แท่ง ด้วยวิธีสุ่ม (simple random sampling without replacement) กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มที่เดือยไม่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวใดๆ ก่อนยึดกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมัลติคอร์โฟลว์ (MultiCore Flow[®], Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ซึ่งเป็นกลุ่มควบคุม กลุ่มที่ 2 คือกลุ่มเดือยที่ถูกปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเคลือบไซเลน กลุ่มที่ 3 และ 4 คือกลุ่มเดือยที่ถูกปรับปรุงสภาพด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมกับก๊าซฮีเลียม และ เจ็ทพลาสมาของอากาศผสมกับก๊าซอาร์กอน ตามลำดับ สำหรับเดือยในกลุ่มที่ 2 ก่อนยึดกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมัลติคอร์โฟลว์นั้นส่วนบนสุดของเดือยยาวประมาณ 2 มิลลิเมตรถูกหาคด้วยสารเคลือบไซเลนโมโนบอนด์ เอส (Monobond-S, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) โดยรอบแล้วทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่วนเดือยในกลุ่มที่ 3 ก่อนยึดกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมัลติคอร์โฟลว์ เดือยส่วนบนถูกปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมกับก๊าซฮีเลียมโดยใช้อัตราส่วนอากาศ ต่อ ก๊าซฮีเลียมคือ 1: 160 และปริมาณก๊าซที่ป้อนสู่ระบบเจ็ทพลาสมาคือ 8,050 มล. ต่อ 1 นาที และเดือยในกลุ่มที่ 4 ก่อนยึดกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมัลติคอร์โฟลว์ เดือยส่วนบนถูก

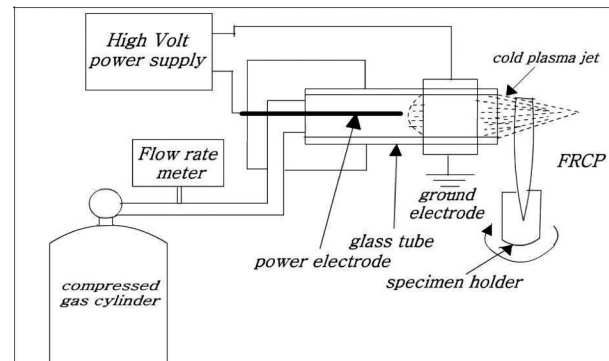
ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมกับ ก๊าซอาร์กอนโดยใช้อัตราส่วนอากาศ ต่อ ก๊าซอาร์กอน คือ 1: 300 และปริมาณก๊าซที่ป้อนสู่ระบบเจ็ทพลาสมา คือ 9,030 มล. ต่อ 1 นาที เนื่องจากระบบเจ็ทพลาสมาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นระบบที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (low voltage) ซึ่งมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้อากาศเกิดการ ไอออนไนซ์เป็นพลาสมาได้ จึงต้องผสมก๊าซเฉื่อยกับ อากาศเป็นก๊าซป้อน (feed gas) และให้อากาศเป็นก๊าซ ทำปฏิกิริยา (reactive gas)^(20,27) ซึ่งวิธีการปรับสภาพพื้น ผิวเดือยในกลุ่มที่ 3 และ 4 คือนำเดือยมาเสียบบนแท่น จับเดือยที่หมุนด้วยความเร็ว 4 รอบต่อวินาที เพื่อให้ส่วน ปลายบนสุดของเดือยยาว 2 มิลลิเมตร สัมผัสกับลำ พลาสมาโดยรอบเป็นเวลา 120 วินาที และมีระยะ ระหว่างปลายกระบอกเจ็ทกับเดือยคือ 4 มิลลิเมตร (รูปที่ 1) ซึ่งเครื่องเจ็ทพลาสมาเป็นเครื่องที่ประดิษฐ์โดยศูนย์ วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยส่วนกระ บอกระเบิดประกอบด้วยแท่งอิเล็กโตรดที่ห่อหุ้มด้วยท่อแก้ว (glass tube) ซึ่งตั้งอยู่ในแนวแกนกลางของท่อแก้วที่ถูก ต่อสายดินไว้ (grounded) ส่วนแท่งเพาเวอร์อิเล็กโตรด ด้านในถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 35 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 0.6 แอมแปร์และความถี่ 330 กิโลเฮิร์ตซ์ (รูป ที่ 2) จากนั้นนำเดือยจำนวน 8 แท่งในแต่ละกลุ่มมายึด ด้วย เรซิน คอมโพสิตแกนพื้นชนิดเหลวมาลติคอร์โพลาร์ ตามวิธีของ Yavirach และคณะ (2009)⁽¹¹⁾ ได้ขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 3

นำขึ้นทดสอบเดือยฟันที่ยึดด้วยเรซินคอมโพสิตแกน พื้นชนิดเหลวมาลติคอร์โพลาร์ จำนวน 8 ชิ้นในแต่ละกลุ่ม ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทดสอบด้วยการดึงโดยขึ้นทดสอบถูกจับด้วยตัว ยึดที่ทำมาพิเศษซึ่งติดกับแท่นส่วนล่างของเครื่องทดสอบ สากล (Instron 5566, Instron Inc., MA, US) ในขณะที่ ตัวจับคอมโพสิตแกนฟันถูกดึงมาให้พอดีกับเดือยและ รองรับส่วนล่างของแหวนโลหะใต้ต่อคอมโพสิตแกนพื้น ชนิดเหลวมาลติคอร์โพลาร์อย่างพอดีซึ่งส่วนนี้ติดกับส่วน เคลื่อนที่ของเครื่องทดสอบสากล (รูปที่ 4) โดยกำหนดน้ำ หนักหัวดึง 500 นิวตัน ความเร็วหัวดึง 1 มิลลิเมตร ต่อ นาที จากนั้นรวบรวมค่ากำลังดึงเฉลี่ยที่ได้ในหน่วย เมกะ



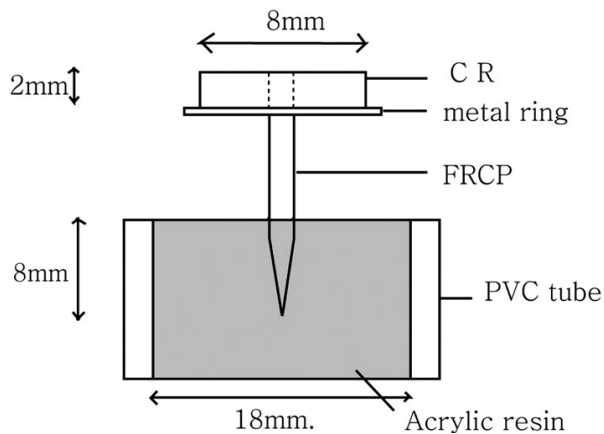
รูปที่ 1 การปรับสภาพพื้นผิวส่วนปลายด้านบนของเดือย คอมโพสิตเสริมเส้นใยด้วยเจ็ทพลาสมา โดยปลาย กระบอกเจ็ทห่างจากเดือยประมาณ 4 มิลลิเมตร

Figure 1 The coronal part of the fiber-reinforced composite post was treated with plasma jet. The distance between the post and the jet tube was 4 mm.



รูปที่ 2 ภาพร่างแสดงระบบเจ็ทพลาสมาที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยกระบอกเจ็ทประกอบด้วยแท่งเพาเวอร์อิเล็กโตรดที่อยู่กึ่งกลางท่อแก้วที่หุ้มด้วยอิเล็กโตรดที่ต่อสายดิน

Figure 2 Schematic illustration of a self-made plasma jet system. The power electrode was located at the center of the glass tube, which was connected to the ground electrode.



รูปที่ 3 แบบร่างแสดงชิ้นทดสอบที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยมีเรซินคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพลาร์ (CR) ยึดส่วนบนของเดือยและมีแผ่นแหวนโลหะบางรองด้านใต้ ส่วนปลายด้านสอบของเดือยฝังอยู่ในเรซินอะคริลิกที่มีท่อพีวีซี (PVC) ห่อหุ้ม (นำภาพมาจาก ปิริยะ และคณะ⁽²¹⁾)

Figure 3 Schematic illustration of the complete specimens. The coronal end of the fiber-reinforced composite post was encapsulated by flowable composite core (CR) with the support of a thin metal ring, while the taper apical end of the post was embedded into acrylic resin in the PVC tube. (Piriya et al.⁽²¹⁾)

พลาสติก (MPa) แล้ววิเคราะห์ทางสถิติด้วย การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ส่วนเดือยที่เหลือที่ยังไม่ได้หุ้มด้วยเรซินคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพลาร์ในแต่ละกลุ่มถูกสุ่มเพื่อทดสอบดังนี้ เดือย 2 แห่งถูกทดสอบความขรุขระพื้นผิวด้วยเครื่องพรอไฟโลมิเตอร์ (Profilometer, Tylyscaan 150, Taylor Hobson, Leicester, UK) โดยสแกน 3 ตำแหน่งในแต่ละแห่งในแต่ละกลุ่ม เพื่อหาค่าเฉลี่ยความขรุขระโดยมีพื้นที่ของการสแกนคือ 2x0.5 ตารางมิลลิเมตร อีก 2 แห่งถูกตรวจการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JSM-5410LV, JEOL, Tokyo, Japan) ส่วนเดือยที่เหลืออีก 2



รูปที่ 4 ภาพถ่ายแสดงการจับชิ้นทดสอบด้วยตัวยึดที่ติดกับเครื่องทดสอบสากล

Figure 4 The picture shows the specimen was attached to the Universal testing machine with the specimen holder.

แห่งนำไปทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นผิวด้วยเครื่องฟอเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, (FTIR), Nicolet 6700, Bruker, Germany) ในรูปแบบเอทีอาร์ (ATR mode)

ตรวจสอบพื้นผิวของเดือยภายหลังจากการทดสอบกำลังดึงเฉือน โดยนำเดือย 2 แห่งในแต่ละกลุ่มมาตรวจการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวภายหลังจากการทดสอบกำลังดึงเฉือนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ผลการทดลอง

ค่าเฉลี่ยกำลังดึงเฉือนระหว่างเดือยกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพลาร์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่มแสดงในตารางที่ 1 และกราฟแสดงกำลังดึงเฉือนของเดือยแต่ละกลุ่มแสดงในรูปที่ 5 จากการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว และการทดสอบเชิงซ้อนด้วยวิธีแทมแฮน (Tamhane's multiple comparison test) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) พบว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือนของทุกกลุ่มไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ค่าเฉลี่ยความขรุขระพื้นผิวของเดือยกลุ่มควบคุมกลุ่มที่ทำด้วยสารคู่ควบไซเลน กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม และ กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซ

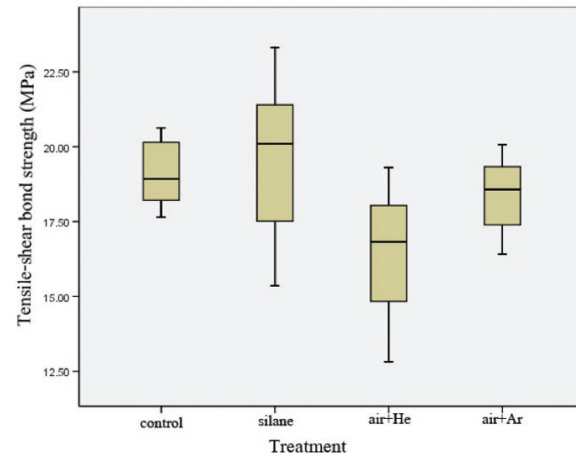
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยกำลังดึงเหนือน (เมกะปาสกาล) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเดือยแต่ละกลุ่ม

Table 1 Means and standard deviations of tensile-shear bond strength values of post specimens (MPa)

วิธีการปรับสภาพพื้นผิว	ค่าเฉลี่ยกำลังดึงเหนือน (MPa)
กลุ่มควบคุม	19.10±1.11
กลุ่มที่ทาสารคู่ควบไซเลน	19.59±1.11
กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม	16.44±2.25
กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน	18.49±1.26

อาร์กอน มีค่า 1.91 ± 0.53 , 1.96 ± 0.65 , 1.81 ± 0.57 , และ 2.16 ± 0.38 ไม่ไครเมตรตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว และการทดสอบเชิงซ้อนด้วยวิธีทูกี (Tukey's multiple comparison test) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยความขรุขระพื้นผิวของเดือยทุกกลุ่ม จากการทดสอบด้วยเครื่องฟอร์เรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีได้ค่าสเปกตรัมเอฟ ที ไอ อาร์ (FTIR spectra) เปรียบเทียบระหว่างกลุ่มควบคุมกับกลุ่มทดลองในแต่ละกลุ่มดังแสดงในรูปที่ 6, 7 และ 8 ส่วนรูปที่ 9 เป็นรูปสเปกตรัมเปรียบเทียบกลุ่มควบคุมกับกลุ่มทดลองทุกกลุ่ม

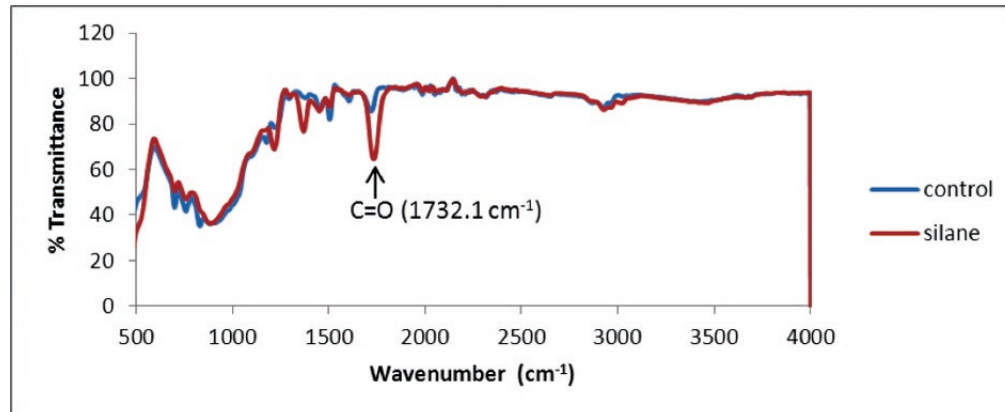
ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 400 เท่า ของพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ไม่ถูกหุ้มด้วยเรซินคอมโพสิตแกนพื้นชนิดเหลวมีลติคอร์โพล์ ในกลุ่มควบคุม กลุ่มที่ทาด้วยสารคู่ควบไซเลน กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียมและกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอนแสดงในรูปที่ 10 (a, b, c และ d ตามลำดับ) จากภาพไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนบนพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเทียบกับพื้นผิวเดือยคอมโพสิต



รูปที่ 5 กราฟแสดงกำลังดึงเหนือน (เมกะปาสกาล) ของทุกกลุ่มในรูปแบบกล่องและวิสเกอร์โดยกล่องนำเสนอค่ามัธยฐาน และ อินเตอร์ควอไทล์ในขณะที่วิสเกอร์นำเสนอ ร้อยละสิบและเก้าสิบของเปอร์เซ็นต์ไทล์ (control = กลุ่มควบคุม, silane = กลุ่มทาสารคู่ควบไซเลน, air+He = กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม, และ air+Ar = กลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน)

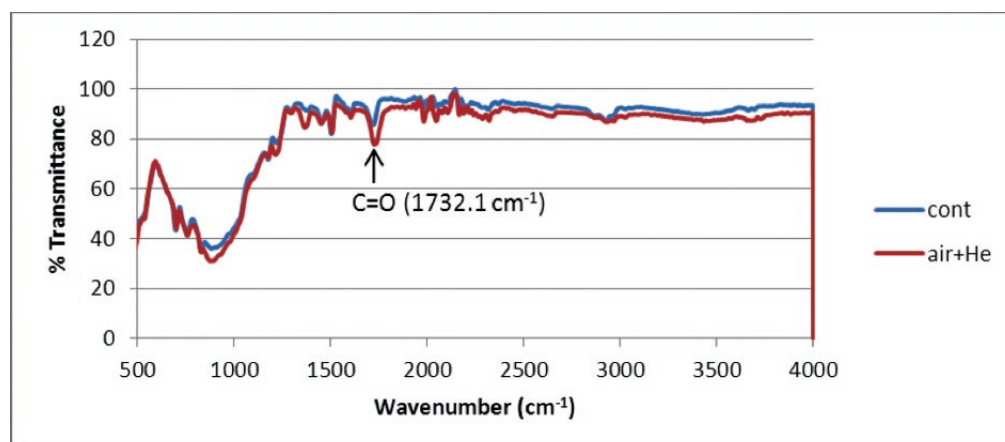
Figure 5 Graphs show tensile-shear bond strengths (MPa) for all groups displayed in a box and whisker plot. The boxes specify the median and the inter-quartile; the whiskers specify the 10 and 90 % percentiles. (control = control group, silane = silane coupling agent treated group, air+He = group of the plasma jet of the mixture of air and helium gas, and air+Ar = group of the plasma jet of the mixture of air and argon gas)

เสริมเส้นใยกลุ่มควบคุม และภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 400 เท่า ของผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยทุกกลุ่มหลังจากทดสอบกำลังดึงเหนือน แสดงดังรูปที่ 11 (a, b, c และ d) พบว่าการหลุดของเส้นใยแก้วที่พื้นผิวของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกลุ่มที่สารคู่ควบไซเลนมีมากกว่ากลุ่มอื่นๆ ในขณะที่การหลุดของพอลิเมอร์และเส้นใยแก้วที่พื้นผิว



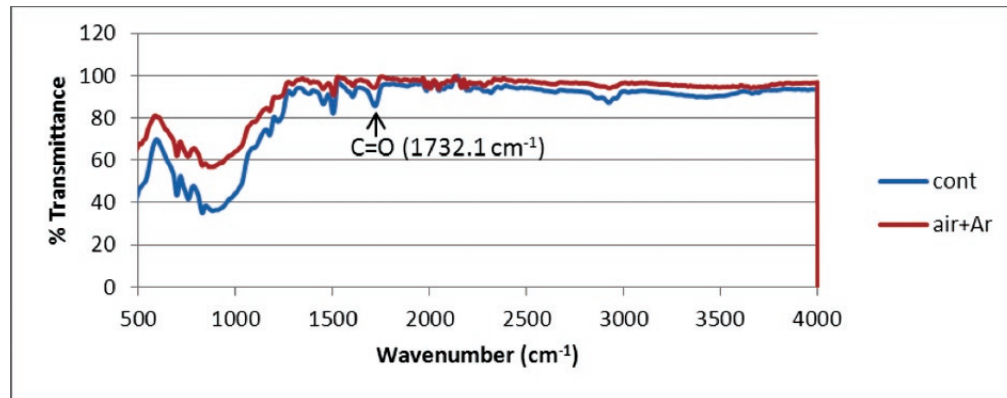
รูปที่ 6 แสดงสเปกตรัม เอฟ ที ไอ อาร์ของตัวอย่างกลุ่มควบคุมกับกลุ่มทาสารคู่ควบไซเลน ที่เลขคลื่นประมาณ 1732.1 cm^{-1} พบว่าตัวอย่างทาสารคู่ควบไซเลนมีสเปกตรัมที่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างชัดเจน ซึ่งเลขคลื่นนี้แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างทาสารคู่ควบไซเลน

Figure 6 Illustration of FTIR spectra of the post specimens of the control and the silane coupling agent surface treated group showed that there was a significant difference of the spectra between the silane surface treated group and the control group at the 1732.1 cm^{-1} wavenumber. The result indicated that carbonyl functional group was increased in the silane coupling agent surface treated group.



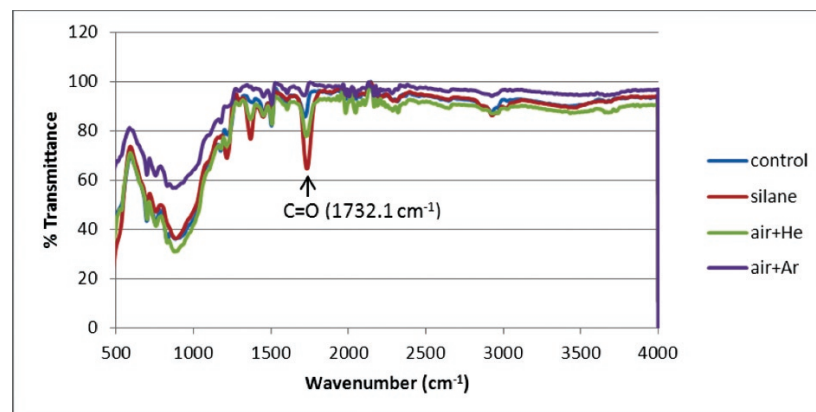
รูปที่ 7 แสดงสเปกตรัม เอฟ ที ไอ อาร์ของตัวอย่างกลุ่มควบคุมกับกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม (air+He) ที่เลขคลื่นประมาณ 1732.1 cm^{-1} พบว่าตัวอย่างที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียมมีสเปกตรัมที่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมเล็กน้อย ซึ่งเลขคลื่นนี้แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิล ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในตัวอย่างที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม

Figure 7 Illustration of FTIR spectra of the post specimens of the control and the plasma jet of the mixture of air and helium gas treatment group (air+He) showed that there was a slightly difference of the spectra between the plasma jet of the mixture of air and helium gas treatment group and the control group at the 1732.1 cm^{-1} wavenumber. The result indicated that carbonyl functional group was slightly increased in the plasma jet of the mixture of air and helium gas treatment group.



รูปที่ 8 แสดงสเปกตรัม เอฟ ที ไอ อาร์ของเดือยกลุ่มควบคุมกับกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน (air+Ar) ที่เลขคลื่นประมาณ 1732.1 cm^{-1} ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนของสเปกตราระหว่างเดือยกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอนกับกลุ่มควบคุม แสดงว่าไม่มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลในเดือยกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน

Figure 8 Illustration of FTIR spectra of the post specimens of the control and the plasma jet of the mixture of air and argon gas treatment group (air+Ar) showed that there was no significant difference of the spectra between the plasma jet of the mixture of air and argon gas treatment group and the control group at the 1732.1 cm^{-1} wavenumber. The result indicated that carbonyl functional group was not increased in the plasma jet of the mixture of air and argon gas treatment group.



รูปที่ 9 แสดงสเปกตรัม เอฟ ที ไอ อาร์ของเดือยกลุ่มควบคุมกับกลุ่มทดลองทุกกลุ่ม ที่เลขคลื่นประมาณ 1732.1 cm^{-1} พบว่าเดือยกลุ่มทาสารคู่ควบไซเลนมีหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เดือยกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียมมีหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลที่เพิ่มเล็กน้อย ในขณะที่เดือยกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอนไม่มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม

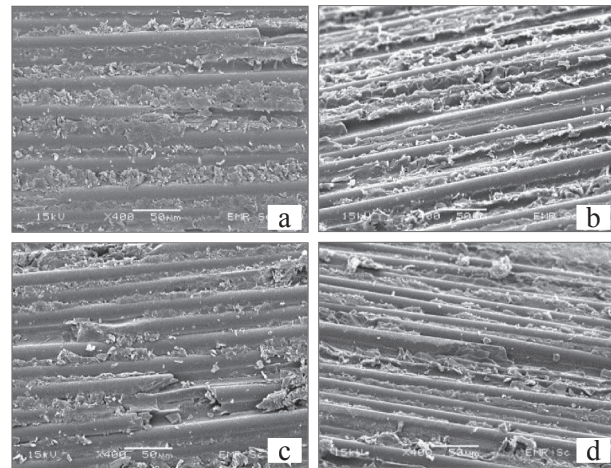
Figure 9 Illustration of FTIR spectra of the post specimens of all tested groups. When compared to the control group, an increase of carbonyl functional group was significantly found in the silane coupling agent treated surface group, followed by the plasma jet of the mixture of air and helium gas treatment group. No carbonyl functional group was found in the plasma jet of the mixture of air and argon gas treatment group.

ของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม และเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอนไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่ากำลังดึงเฉือนของเดือยกลุ่มที่ทำสารคู่ควบไซเลนมีค่าสูงสุด (19.59 MPa) แต่ไม่ต่างจากกลุ่มควบคุม (19.10 MPa) อย่างมีนัยสำคัญจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดในการทดลองครั้งนี้พบการเผยตัวของเส้นใยแก้วบางส่วนบนพื้นผิวของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยในกลุ่มควบคุม (รูปที่ 10a) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนได้โดยสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ สารเมทาคริลอกซิลโปรปีลไตรเมทอกซีไซเลน (3-methacryloxypropyltrimethoxysilane) (MPS) ซึ่งกลุ่มเมทอกซี (methoxy groups) ($-\text{Si}-\text{OCH}_3$) ของ MPS สามารถเปลี่ยนเป็นกลุ่มอันตรกริยาซิลานอล (reactive silanol groups) ($=\text{Si}-\text{OH}$) ภายใต้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) ในขณะที่มีการกระตุ้นสภาวะระหว่างการเตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4-5 (รูปที่ 12) และหมู่ซิลานอลนี้ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิกาในเส้นใยแก้ว ในขณะที่หมู่อร์แกนอฟังก์ชันนอล (organofunctional group) ของสารคู่ควบไซเลนทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ของคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพล์ ($-\text{COO}-$, $-\text{CH}_3$) เกิดพันธะทางเคมีขึ้น และผลจากการศึกษาด้วยเครื่องฟอเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีของเดือยที่ได้ทำสารคู่ควบไซเลนที่เลขคลื่นประมาณ 1732.1 cm^{-1} พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (รูปที่ 6) ซึ่งหมู่ดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของหมู่อร์แกนอฟังก์ชันนอลของสารคู่ควบไซเลน

จากการศึกษาพื้นผิวของเดือยที่ทำด้วยสารคู่ควบไซเลนภายหลังจากดึงคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพล์ออก พบว่า ความล้มเหลวของการยึดติดเป็นชนิดผสม (mixed failure mode) (รูปที่ 11b) คือมีพอลิเมอร์บางส่วนบริเวณพื้นผิวเดือยและเส้นใยแก้วบางส่วน

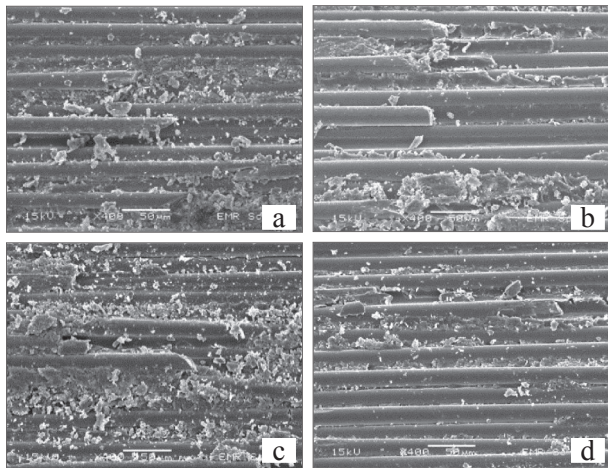


รูปที่ 10

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกลุ่มควบคุม (b) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ทำด้วยสารคู่ควบไซเลน (c) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม (d) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน

Figure 10 SEM images at 400-X magnification of the surface of the fiber-reinforced composite posts with different surface treatments (a) control group (b) silane coupling agent surface treated group (c) plasma jet of the mixture of air and helium gas surface treated group (d) plasma jet of the mixture of air and argon gas surface treated group.

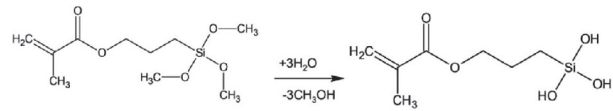
เหลวมาลติคอร์โพล์ ซึ่งค่ากำลังดึงเฉือนที่สูงที่สุดในกลุ่มนี้เกิดจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างผิวพอลิเมอร์ที่เผยเส้นใยแก้วกับสารคู่ควบไซเลนและความขรุขระของพื้นผิวพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการยึดติดเชิงกลระหว่างพอลิเมอร์กับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพล์ได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเส้นใยแก้วที่หลุดภายหลังจากดึงคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมาลติคอร์โพล์ออกระหว่างเดือยในกลุ่มที่ผ่านการทำสารคู่ควบไซเลนกับกลุ่มควบคุม (รูปที่ 11b กับ 11a) พบว่า เดือยที่ทำสารคู่



รูปที่ 11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 400 เท่า ของพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยภายหลังจากดิงคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมีลติคอร์โฟลว์ (a) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกลุ่มควบคุม (b) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ทำด้วยสารคู่ควบไซเลน (c) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียม (d) พื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมาของอากาศผสมก๊าซอาร์กอน

Figure 11 SEM images at 400-X magnification of the fiber-reinforced composite posts with different surface treatments following the MultiCore Flow[®] pull-out (a) control group (b) silane coupling agent surface treated group (c) plasma jet of the mixture of air and helium gas surface treated group (d) plasma jet of the mixture of air and argon gas surface treated group.

ควบไซเลนมีการหลุดของเส้นใยแก้วที่มากกว่า ซึ่งเป็นไปได้ว่าสารคู่ควบไซเลนทำปฏิกิริยากับเส้นใยแก้วดังที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามการดึงเดือยก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจากปริมาณเส้นใยแก้วที่เผยพื้นที่ผิวเดือยมีจำนวนน้อย หรือเกิดจากสารคู่ควบไซเลนที่ทาบนพื้นผิวเดือยมีความหนาแน่นกว่าหนึ่งชั้น จากการ



รูปที่ 12 แสดงปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนระหว่างถูกกระตุ้นในสารละลายของน้ำและกรดอะซิติก (acetic acid) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 (pH = 4) โดยกลุ่มเมทอกซีที่ถูกเปลี่ยนเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล (ดัดแปลงมาจาก Matinlinna et al.⁽¹²⁾)

Figure 12 Illustration of silane reactions during activation in water mixed with acetic acid solution at pH 4 with its methoxy groups turns to reactive silanol. (Modified from Matinlinna et al.⁽¹²⁾)

ศึกษาของ Debnath และคณะ⁽²⁸⁾ พบว่าสารคู่ควบไซเลนที่มีความหนาแน่นกว่าหนึ่งชั้น จะทำให้ประสิทธิภาพการยึดติดลดลงเนื่องจากจำนวนเมทอกซีเลดอิสระมีการลดลงจึงเกิดความล้มเหลวชนิดโคฮีซีฟในตัวสารคู่ควบไซเลนเอง

สำหรับกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ตพลาสมานั้น ในการทดลองนี้เลือกใช้อากาศเป็นก๊าซทำปฏิกิริยาเนื่องจากในอากาศมีก๊าซไนโตรเจนจำนวนมาก กรณีที่สามารถไอออนไนซ์ก๊าซไนโตรเจนในอากาศให้เกิดเป็นพลาสมาได้ จะช่วยปรับปรุงการยึดติดของผิวพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น จากการศึกษาของ Lommatzsch และคณะ⁽²⁹⁾ พบว่าพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนช่วยเพิ่มความตึงผิว (surface tension) และเพิ่มหมู่ฟังก์ชันนอลของออกซิเจนและไนโตรเจนที่พื้นผิวพอลิเมอร์ ซึ่งไนโตรเจนสปีชีส์ (nitrogen species) เหล่านี้ได้แก่ NH₂ และไนไตรด์ (nitrile) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนอลเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับแขนคาร์บอน (-C-) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเดือยที่ถูกพลาสมาทำปฏิกิริยาทำให้พื้นผิวเดือยเกิดปฏิกิริยาการแตกแขนคาร์บอนอีกครั้ง และเกิดการเชื่อมกับหมู่ฟังก์ชันนอลในคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมีลติคอร์โฟลว์ทำให้การยึดติดดีขึ้น ตลอดจนเจ็ตพลาสมาของอากาศยังช่วยเหนี่ยวนำให้เกิด อะตอมออกซิเจนของออกซิเจน (reactive oxygen atom) ซึ่งมีคุณสมบัติเหนี่ยวนำให้เกิดการมีขั้ว (polarity) ของผิวพอลิเมอร์ และทำให้คุณสมบัติการ

เป็ยกน้ำบนพื้นผิวดีขึ้น⁽¹⁸⁾ และยังช่วยกัดกร่อน (etching) พื้นผิวพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้การใช้อากาศยังช่วยลดค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สฮีเลียมหรืออาร์กอนเดี่ยวๆ⁽³⁰⁾ รวมทั้งเจ็ทพลาสมาของอากาศสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกลุ่มอนุมูลบนพื้นผิวพอลิเมอร์โดยการตัดสายพอลิเมอร์หรือจากการดึงไฮโดรเจนออกไป (hydrogen abstraction)⁽³¹⁾ ในการทดลองนี้เมื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวด้วยเครื่องฟอร์เรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าเดือยที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียมมีหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (รูปที่ 7) สอดคล้องกับการศึกษาของ Boeing⁽³²⁾ ที่พบว่าเจ็ทพลาสมาของก๊าซเฉื่อยโดยเฉพาะฮีเลียมมักก่อให้เกิดอนุมูลอิสระจากการระดมยิงของไอออนและจากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลต แต่ในการทดลองนี้กลับไม่พบหมู่ฟังก์ชันนอลของไนโตรเจนตามที่คาดไว้ เป็นไปได้ว่าอนุมูลหรือโมเลกุลของไนโตรเจนที่อยู่ในภาวะกระตุ้นทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศทันทีหรือหลังจากการปรับสภาพพื้นผิว และมีการแทนที่กลุ่มไอมายน์ (imine group) ด้วยออกซิเจนจากการไฮโดรไลซิสของน้ำในบรรยากาศ⁽²⁹⁾ สอดคล้องกับการศึกษาของ Grace และ Gerenser⁽²⁰⁾ ที่พบว่าพอลิเอทิลีนที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนเมื่อสัมผัสกับอากาศจะดูดออกซิเจนและคาร์บอน แต่มีการสูญเสียไนโตรเจนที่เหนี่ยวนำด้วยพลาสมาถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลน่าจะเป็นกลุ่มหลักในการทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันนอลของคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลววัลติคอร์โพล์ ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นมักได้แก่พันธะไฮโดรเจนที่มีพลังงานต่ำ แม้ว่าหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลที่เกิดขึ้นทำให้ผิวพอลิเมอร์มีความชอบน้ำเพิ่มขึ้นแต่ไม่พบว่าการกัดล้างเดือยของเดือยกลุ่มนี้ดีกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Lommatzsch และคณะ⁽²⁹⁾ ที่กล่าวว่ากาโรไลต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้สัมพันธ์กับแรงยึดติดที่เกิดขึ้น แม้ว่าเจ็ทพลาสมาของอากาศจะประกอบด้วยพลาสมาของก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดความขรุขระที่ผิวของพอลิเมอร์^(15,33) ซึ่งทำให้การยึดติดเชิงกลดีขึ้น แต่การทดลองนี้กลับไม่พบว่าการขรุขระของพื้นผิวเดือยในกลุ่มนี้เพิ่มขึ้น และลักษณะทางกายภาพของพื้น

ผิวก็ไม่ได้แตกต่างไปจากกลุ่มควบคุม (รูปที่ 10c กับ 10a) อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณออกซิเจนที่ถูกไอออนไนซ์เป็นพลาสมามีน้อยเกินไป

ในทางตรงกันข้ามเดือยกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมกับก๊าซอาร์กอนกลับไม่พบหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลแต่พบว่าการกัดล้างเดือยของเดือยในกลุ่มนี้มีค่ามากกว่ากลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศผสมก๊าซฮีเลียมแต่ก็ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งๆ ที่หมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลของเดือยกลุ่มนี้ไม่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (รูปที่ 8) และเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มปรากฏว่าหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลของกลุ่มนี้มีน้อยที่สุด (รูปที่ 9) ทำให้ยืนยันได้ว่าหมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลที่ตรวจพบบนผิวเดือยมีผลน้อยมากต่อการกัดล้างเดือยที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วพลาสมาของก๊าซอาร์กอนนิยมใช้ทำความสะอาดพื้นผิวและปรับปรุงคุณสมบัติเกี่ยวกับการยึดติดของพอลิเมอร์ของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากพลาสมาของก๊าซเฉื่อยสามารถทำหน้าที่คล้ายสารละลาย (diluent) หรือ ทำให้เกิดการไขว้สายพอลิเมอร์ (crosslink) ได้⁽³⁴⁾ จึงช่วยให้การยึดติดดีขึ้น แต่ในการทดลองนี้เจ็ทพลาสมาของก๊าซอาร์กอนกลับไม่ให้ผลตามที่กล่าวมา สาเหตุอาจเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวนานเกินไป พลังงานที่ให้ต่อเนื่องสู่ระบบก่อให้เกิดการตัดสายพอลิเมอร์ (chain scission) เพิ่มขึ้น และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีการแพร่กระจายมาสู่พื้นผิวมากขึ้น โดยปกติสายพอลิเมอร์เปรียบเสมือนเป็นแกนปฐมภูมิ (primary nucleus) สำหรับการเกาะเกี่ยวระหว่างมอนอเมอร์ มีคุณสมบัติหลอมละลาย (dissolve) แล้วสร้างขึ้นใหม่ (reform) แต่ในกรณีที่สายพอลิเมอร์ตัดสั้นเกินไป จะเกิดเฉพาะการหลอมละลายอย่างเดียว⁽³⁵⁾ ประกอบกับการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระที่อยู่บริเวณพื้นผิวไปสู่ด้านในของพอลิเมอร์⁽¹⁸⁾ ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมสภาพ (aging) ของผิวพอลิเมอร์ ทำให้การไขว้สายพอลิเมอร์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันนอลที่ผิวพอลิเมอร์กับหมู่ฟังก์ชันนอลในมอนอเมอร์ของคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลววัลติคอร์โพล์ลดลง การศึกษานี้สอดคล้องกับการทดลองของ Rusu และคณะ⁽³⁵⁾ ที่ใช้พลาสมาของก๊าซอาร์กอน

ปรับสภาพพื้นผิวพอลิเอททิลินเทรฟทาเลต และพบว่าการปรับสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์ด้วยพลาสมาที่พลังงานระดับต่ำ (mild plasma treatment) ทั้งในแง่กำลังคลื่นวิทยุ ความดันก๊าซ และระยะเวลาในการปรับสภาพพื้นผิว ทำให้มีการออกซิเดชัน (oxidation) ที่ผิวอย่างเหมาะสม แต่เมื่อเวลานานขึ้นกลับทำให้เกิดผลตรงกันข้ามของการออกซิเดชันก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ได้ อย่างไรก็ตามพลาสมาของก๊าซอาร์กอนซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่ออนุภาคและไอออนที่มีพลังงาน (energetic ion) เหล่านี้ระดมยิงที่ผิวพอลิเมอร์ สามารถกัดกร่อนบริเวณผิว⁽³⁶⁾ และเกิดความขรุขระขนาดเล็กที่พื้นผิวซึ่งช่วยการยึดติดเชิงกลกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมีลติคอร์โพล์ได้

อย่างไรก็ดีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมานั้นเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะผิวนอกสุดหนาเพียง 1-10 นาโนเมตร⁽²¹⁾ ซึ่งการวัดเชิงสัญญาณ (morphology) ด้วยเครื่องพรอไฟโลมิเตอร์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Riccardi และคณะ⁽³¹⁾ ที่กล่าวว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดไม่สามารถบอกความแตกต่างระหว่างผิวที่ได้รับการปรับและไม่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมา เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดมีข้อจำกัดเรื่องความลึกของมิติ (depth resolution) จึงทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่แตกต่างน้อยกว่าหน่วยไมโครเมตรได้ ซึ่งหมายความว่า แม้ความขรุขระที่วัดได้จะไม่ต่างกันแต่สัญญาณอาจต่างกันก็ได้ ซึ่งมีผลต่อการยึดติดเชิงกลได้ Riccardi และคณะ⁽³¹⁾ ได้แนะนำว่า เครื่องมือที่เหมาะสมคือ อะตอมมิกฟอร์ส ไมโครสโคปี (atomic force microscopy) ดังนั้นในการทดลองนี้ ความขรุขระพื้นผิวของเดือยในกลุ่มที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาอาจไม่สอดคล้องกับลักษณะที่ปรากฏในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดซึ่งใช้กำลังขยายเพียง 400 เท่า เป็นไปได้ว่าสัญญาณของความขรุขระที่ต่างกันมีผลต่อกำลังดึงเฉือน แต่อาจไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งผลของการทดสอบหมู่ฟังก์ชันนอลที่ผิวของพอลิเมอร์ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาโดยการใช้เครื่องฟอร์เรียทรานสฟอร์มอินฟรา-

เรดสเปคโตรสโคปี อาจเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลที่อยู่ในชั้นที่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาพร้อมกับชั้นที่ลึกกว่า เนื่องจากเครื่องฟอร์เรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปีสามารถตรวจการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระดับไมโครเมตรจากพื้นผิว^(37,38) ในขณะที่พลาสมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับนาโนเมตรจึงทำให้การแปลผลเรื่องหมู่ฟังก์ชันนอลที่ตรวจพบผิดพลาดได้ซึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมในการตรวจและวัดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่พื้นผิวคือ เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอน สเปกโตรสโคปี (x-ray photoelectron spectroscopy)⁽²⁰⁾ ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไปเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางฟิสิกส์ของพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาควรใช้เครื่องมือที่กล่าวมาข้างต้นจึงจะได้ผลที่ชัดเจน จากผลการทดลองนี้จึงยอมรับสมมุติฐานว่างที่ว่า การปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศไม่เพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมีลติคอร์โพล์เมื่อเทียบกับการใช้สารคู่ควบไซเลน

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้เจ็ทพลาสมาปรับสภาพพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีข้อดีในแง่ของการรักษาสภาพแวดล้อมเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด แต่เครื่องเจ็ทพลาสมามีได้มีใช้อย่างแพร่หลาย มักใช้เพื่อการวิจัยในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ และจากการศึกษาของ Ye และคณะ⁽³⁹⁾ พบว่ากำลังดึงระดับจุลภาค (micro-tensile bond strength) ระหว่างเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศหรือเจ็ทพลาสมาของก๊าซฮีเลียมผสมก๊าซออกซิเจน กับเรซินซีเมนต์มีค่าลดลงเมื่อพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยสัมผัสกับอากาศหลังการปรับสภาพด้วยเจ็ทพลาสมานานมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ชั่วโมงก่อนนำไปยึดกับเรซินซีเมนต์ เนื่องจากผลของการเสื่อมสภาพของพื้นผิวที่ปรับสภาพด้วยเจ็ทพลาสมา ซึ่งการติดตั้งเครื่องเจ็ทพลาสมาในคลินิกยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ยาก ราคาค่อนข้างสูง และเครื่องเจ็ทพลาสมามีขนาดใหญ่ จึงเป็นไปได้ยากที่จะยึดคอมโพสิตแกนฟันกับเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาทันทีหลังการปรับสภาพเพื่อได้ประสิทธิภาพการยึดติดสูงสุด⁽³⁹⁾ ทำให้การใช้เจ็ทพลาสมาในคลินิก

เพื่อปรับปรุงสภาพพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย หรือพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ใช้ทางทันตกรรมยังไม่ได้ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

บทสรุป

ภายใต้ข้อจำกัดของการทดลองครั้งนี้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

การปรับปรุงสภาพพื้นผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย ด้วยการใช้สารคู่ควบไฮโดรเจนหรือเจ็ทพลาสมาของอากาศ ไม่เพิ่มการยึดติดกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมันติคอร์โพล์ กำลังดึงเฉือนระหว่างคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมันติคอร์โพล์กับเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน หรือด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการไม่ปรับปรุงสภาพพื้นผิว

การปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศ ผสมกับก๊าซเฉื่อยไม่ทำให้ความขรุขระพื้นผิวของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยแตกต่างจากเดือยกลุ่มควบคุม และพบว่ากลุ่มฟังก์ชันนอลคาร์บอนิลที่เกิดจากการทำสารคู่ควบไฮโดรเจน และจากการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยเจ็ทพลาสมาของอากาศมีผลน้อยมากต่อกำลังดึงเฉือนระหว่างเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลวมันติคอร์โพล์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณชาญชัย อุโมงโน ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการใช้เครื่องกำเนิดเจ็ทพลาสมา ขอขอบคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ทุนวิจัยในการทดลองนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Duret B, Duret F, Reynaud M. Long-life physical property preservation and postendodontic rehabilitation with the composipost. *Compend Contin Educ Dent* 1996; suppl. No 20: s50-56.

2. Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M. Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-years prospective study. *Int J Prosthodont* 2003; 16: 593-596.
3. Baldissara P, Zicari F, Valandro LF, Scotti R. Effect of root canal treatments on quartz fiber posts bonding to root dentin. *J Endod* 2006; 32: 985-988.
4. Perdigao J, Gomes G, Lee IK. The effect of silane on the bond strengths of fiber posts. *Dent Mater* 2006; 22: 752-758.
5. Aksornmuang J, Foxton RM, Nakajima M, Tagami J. Microtensile bond strength of a dual-cure resin core material to glass and quartz fiber posts. *J Dent* 2004; 32: 433-450.
6. Ozcan M, Vallittu PK. Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cements to ceramics. *Dent Mater* 2003; 19: 725-731.
7. Sahafi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K. Effect of surface treatment of prefabricated posts on bonding of resin cement. *Oper Dent* 2004; 29: 60-68.
8. Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M. The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization. *Dent Mater* 2005; 21: 437-444.
9. Vano M, Goracci C, Monticelli F, Tognini F, Tay FR, Ferrari M. The adhesion between fiber posts and composite resin cores: the evaluation of microtensile bond strength following various surface chemical treatments to posts. *Int Endod J* 2006; 39: 31-39.
10. Sahifi A, Peutzfeldt A, Asmussen E, Gotfredsen K. Bond strength of resin cement to surface-treated posts of titanium alloy, glass

- fiber, and zirconia, and to dentin. *J Adhes Dent* 2003; 5: 153-162.
11. Yavirach P, Chaijareenont P, Boonyawan D, et al. Effects of plasma treatment on the shear bond strength between fiber-reinforced composite posts and resin composite for core build-up. *Dent Mater* 2009; 28: 686-692.
12. Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, et al. The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci* 2004; 112: 353-361.
13. Matinlinna JP, Lassila LV, Vallittu PK. Evaluation of five silanes on bonding a luting cement onto silica-coated titanium. *J Dent* 2006; 34: 721-726.
14. Matinlinna JP, Lassila LVJ, Ozcan M, Yli-Urpo A, Vallittu PK. An introduction to silanes and their clinical applications in Dentistry. *Int J Prosthodont* 2004; 17: 155-164.
15. Cvelbar U, Pejovnik S, Mozetie M, Zalar A. Increased surface roughness by oxygen plasma treatment of graphite/polymer composite. *Appl Surf Sci* 2003; 210: 255-261.
16. ศรีเพ็ญ ท้าวตก กระบวนการผลิตพลาสติกมาเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของสิ่งทอ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547
17. Derand T, Molin M, Kvam K. Bond strength of composite luting cement to zirconia ceramic surfaces. *Dent Mater* 2005; 21: 1158-1162.
18. Liston EM, Martinu L, Wertheimer MR. Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review. *J Adhesion Sci Technol* 1993; 7: 1091-1127.
19. Lai J, Sunderland B, Xue J, et al. Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment. *Appl Surf Sci* 2006; 252: 3375-3379.
20. Grace JM, Gerenser LJ. Plasma treatment of polymers. *J Dispersion Sci Technol* 2003; 24: 305-341.
21. Inagaki N. Plasma surface modification and polymer chain ends. *J Vac Soc Jpn* 2007; 50: 625-628.
22. พิริยะ ยาวีราช, สุดาพร ดวงสุริยะ, อุบลวรรณ เสริมชัยวงศ์. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยความร้อนที่ปรับสภาพพื้นผิวแบบต่างๆ กับเรซินอะคริลิกชนิดบ่มด้วยตัวเอง. ชม.ทันตสาร 2554; 32 : 93-101.
23. Kanazawa S, Kogoma M, Moriwaki T, Okazaki S. Stable glow plasma at atmospheric pressure. *J Phys Appl Phys* 1988; 21: 838-840.
24. Noeske M, Degenhardt J, Struthoff S, Lommatzsch U. Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. *Int J Adhes Adhes* 2004; 24: 171-177.
25. Hicks RF. *Atmospheric-pressure plasma cleaning of contaminated surfaces*. University of California, Los Angeles; 1999: 1-131.
26. Nishigawa G, Maruo Y, Oka M, Oki K, Minagi S, Okamoto M. Plasma treatment increased shear bond strength between heat-cured acrylic resin and self-curing acrylic resin. *J Oral Rehabil* 2003; 30: 1081-1084.
27. Walsh JL, Shi JJ, Kong MG. Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets. *Appl Phys Lett* 2006; 88: 171501-171503.
28. Debnath S, Wunder SL, McCool JL, Baran GR. Silane treatment effects on glass resin interfacial shear strength. *Dent Mater* 2003; 19: 441-448.
29. Lommatzsch U, Pasedag D, Baalman A, Ellinghorst G, Wagner H-E. Atmospheric pressure plasma jet treatment of polyethylene

- surfaces for adhesion improvement. *Plasma Process and Polymer* 2007; 4: s1041-s1045.
30. Hong YC, Uhm HS. Air plasma jet with hollow electrodes at atmospheric pressure. *Phys Plasma* 2007; 14: 053503-053505.
31. Riccardi C, Barni R, Selli E, et al. Surface modification of poly (ethylene terephthalate) fibers induced by radio frequency air plasma treatment. *Appl Surf Sci* 2003; 211: 386-397.
32. Boenig HV. *Plasma Science and Technology*. New York: Cornell Press: Ithaca; 1982.
33. Wei QF, Gao WD, Hou DY, Wang XQ. Surface modification of polymer nanofibers by plasma treatment. *Appl Surf Sci* 2005; 245: 16-20.
34. Castro Vidaurre EF, Achete CA, Gallo F, Garcia D, Simao R, Habert AC. Surface modification of polymeric materials by plasma treatment. *Materials Research* 2001; 5: 37-41.
35. Rusu IA, Borcia G, Sayed SO, Sullivan JL. *Arf plasma effect on polymer surface*. Paper read at 28th ICPIG. 15-20 July 2007, at Prague, Czech Republic.
36. Arefi-Khonsari F, Tatoulian M. Plasma processing of polymers by a low-frequency discharge with asymmetrical configuration of electrodes. In: *Advanced plasma technology*, Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany; 2008: 137-174.
37. Cheng C, Liye Z, Zhan RJ. Surface modification of polymer fiber by the new atmospheric pressure cold plasma jet. *Surf Coat Technol* 2006; 200: 6659-6665.
38. Loyaga-Rendon PG, Takahashi H, Iwasaki N, Reza F. Effect of ultraviolet light irradiation on bonding of experimental composite resin artificial teeth. *Dent Mater* 2007; 26: 805-813.
39. Ye H, Zhang Q, Sun K, Zhang J, Jiao Y, Zhou Y. Aging effect of fiber post surface treatment with nonthermal plasma. *Int J Prosthodont* 2012; 25: 509-511.