

การพัฒนาเซอร์โคเนียเซรามิกสำหรับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติ

จิตรวดี สุขวรรณ* ธนากร วาสนาเพียรพงศ์** กาวิณีย์ ปฏิพัทธ์วุฒิกุล ดิครอน*

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อพัฒนาและศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุเซอร์โคเนียสำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิดฟิวส์เดพโพลีชันโมเดลลิ่ง (FDM)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ: เตรียมผงเซอร์โคเนียและตัวประสานผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนของผงเซอร์โคเนียต่อตัวประสานคือ 25:75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และเตรียมเส้นฟิลาเมนต์ที่ขึ้นรูปแล้วเป็นวัตถุดิบสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติแล้วนำมากำจัดตัวประสานทั้งหมดด้วยความร้อนโดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ศึกษาสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย น้ำหนักที่หายไปหลังเผา ความหนาแน่นรวม ปริมาณรูพรุนปรากฏ การดูดซึมน้ำ การหดตัวเชิงเส้น โครงสร้างทางจุลภาค และความต้านทานการตัดโค้งของชิ้นงาน

ผลการทดลอง: น้ำหนักที่หายไปหลังเผาเท่ากับ 40.60 ± 0.71 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นเฉลี่ย 4.08 ± 0.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณรูพรุนมีค่า 31.33 ± 6.01 เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ 7.88 ± 2.20 เปอร์เซ็นต์ การหดตัวเชิงเส้นเฉลี่ย 25.91 ± 5.92 เปอร์เซ็นต์ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคมีรูพรุนหลังจากที่กำจัดตัวประสานและความต้านทานต่อการตัดโค้ง มีค่า 31.77 ± 1.3 เมกะพาสคาล

สรุป: ภายใต้ข้อจำกัดของการศึกษานี้ สมบัติทางกายภาพและความต้านทานต่อการตัดโค้งของเซอร์โคเนียที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ยังมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน ISO สำหรับวัสดุเซอร์โคเนียที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรม โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ชนิดของเครื่องพิมพ์และอัตราส่วนของผงเซอร์โคเนียต่อตัวประสาน ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ ต่อไป

คำสำคัญ: การพิมพ์สามมิติ เซอร์โคเนีย เซรามิก ฟิวส์เดพโพลีชันโมเดลลิ่ง

*ภาควิชาทันตกรรมทั่วไป คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เลขที่ 114 สุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10110.

** ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่ 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Development of 3D-Printed Zirconia Ceramic

Jitwadee Sukhawan* Thanakorn Wasanapiarnpong** Pavinee Padipatvuthikul Didron*

Abstract

Objective: This study focuses on developing and studying physical and mechanical properties of sintered zirconia ceramic using 3D printing FDM technique.

Materials and Methods: 3Y-TZP zirconia and binders with 25:75 percent by volume were wet mixed. Both zirconia powder and binders were compressed into filament through the extruder at 190 °C. Polymer debinding step was carried out using thermal debinding technique Samples were subsequently sintered at 1510 °C for 2 hours in a box electrical furnace. Characterization of zirconia filament, the as-printed and the as-sintered including density, porosity, water absorption, linear shrinkage, flexural strength and microstructure were investigated following ISO standard.

Results: Physical and mechanical properties were found as follow; the weight loss of the fired specimen $40.60 \pm 0.71\%$ the density $4.08 \pm 0.42 \text{ g/cm}^3$, the porosity $31.33 \pm 6.01\%$, the water absorption $7.88 \pm 2.2\%$, the linear shrinkage of specimen after firing was $25.91 \pm 5.92\%$. The flexural strength of the bars was $31.77 \pm 1.3 \text{ MPa}$. SEM micrographs of the printed specimens revealed a rather homogeneous microstructure, with some submicron-sized pore.

Conclusions: Within the limitations of this study, it was found that both physical properties and a mechanical property of the experimented zirconia were still less than the ISO standards for zirconia restoration. The relevant factors that should be improved are the type of printer and the mixture ratio.

Keywords: 3D Printing, Zirconia, Ceramic, Fused deposition modeling

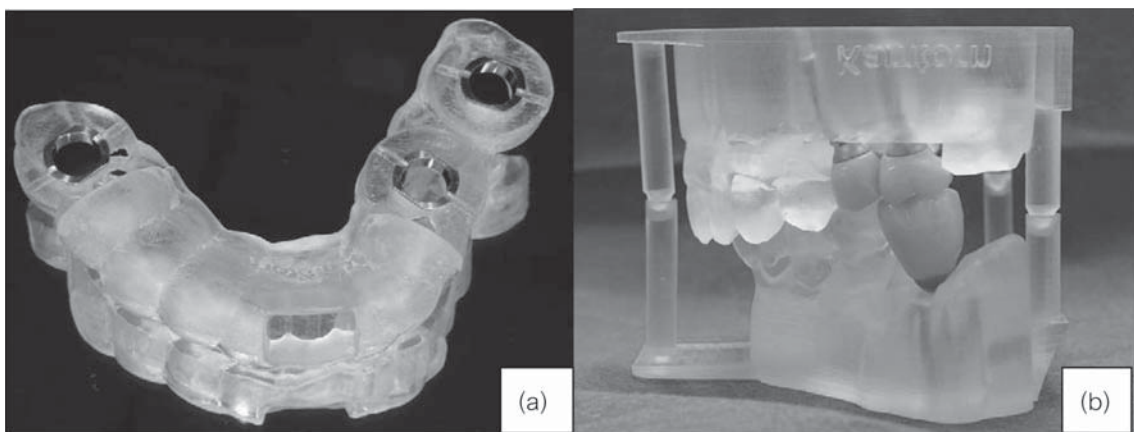
* Department of General Dentistry, Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University, 114 Sukhumvit 23 Rd, Wattana, Bangkok 10110, Thailand.

** Department of Materials, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand.

บทนำ (Introduction)

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีดิจิทัลและการผลิตที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในวงการทันตกรรมมากมาย การพิมพ์ 3 มิติ (3D, three dimensional printing) เป็นเทคโนโลยีที่เจริญเติบโตและสร้างรายได้มากในอุตสาหกรรมการผลิต (1) เนื่องจากช่วยลดระยะเวลาในการผลิตให้สั้นลง ช่วยลดการใช้วัสดุดิบและค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น (2) นอกจากนี้ผลผลิตที่ได้ยังสามารถเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน (3) ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ในงานทันตกรรมหลายประเภท (รูปที่ 1) เช่น แบบจำลองฟัน (Dental model) สเตนต์คัลยกรรม (Surgical stent) เครื่องมือจัดฟันแบบถอดได้ (Orthodontic removable) ครอบฟันชั่วคราว (Temporary crown) (4) เป็นต้น เครื่องพิมพ์ 3 มิติจะสร้างโครงสร้างที่เป็น 3 มิติ จากไฟล์ที่ได้ออกแบบโดยซอฟต์แวร์การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์หรือแคด (Computer Aided Design/CAD) และทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเติมเนื้อวัสดุทีละชั้น จนได้ออกมาเป็นวัตถุที่ต้องการ การผลิตนี้เรียกว่า แอดดิทีฟแมนูแฟกเจอร์ริง (Additive Manufacturing) (5) ซึ่งกระบวนการผลิตชนิดนี้ต่างจากวิธีการแบบเดิมที่เรียกว่าซับแทรคทีฟแมนูแฟกเจอร์ริง (Subtractive

Manufacturing) เป็นการผลิตที่สกัดเนื้อวัสดุออกจนได้เป็นรูปร่างของวัตถุที่ต้องการผลิตโดยวิธีการตัดกลึงไส เจาะ เจียรระโน เป็นต้น (6) เครื่องพิมพ์ 3 มิติมีอยู่หลายประเภทด้วยกันโดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ระบบคือการพิมพ์แบบฉีดอัดขึ้นรูป (Extrusion-based methods) เช่น เทคนิคฟิวส์เดโพสิชันโมเดลลิง (Fused Deposition Modeling, FDM) การพิมพ์แบบรวมอนุภาค (Particle fusion-based methods) เช่น เทคนิคซีเลกทีฟเลเซอร์ ซินเทอริง (Selective laser sintering, SLS) การพิมพ์โดยใช้แสงทำปฏิกิริยา (Light induced polymerization methods) เช่น เทคนิคสเตอริโอลิโทกราฟี (Stereolithography, SLA) และการพิมพ์แบบอิงก์เจ็ท (Inkjet printing) (7) แต่ละประเภทจะมีขั้นตอนการทำงานที่แตกต่างกัน แต่หลักการพื้นฐานเหมือนกันคือการพิมพ์ชั้นของวัตถุซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น จนกลายเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์ เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติที่แพร่หลายที่สุดคือ ฟิวส์เดโพสิชันโมเดลลิง (Fused Deposition Modeling, FDM) ซึ่งใช้วิธีให้ความร้อนหลอมละลายเส้นใยและฉีดวัสดุขึ้นรูปเป็นวัตถุที่ออกแบบไว้ วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโพลีเมอร์และข้อดีของเทคนิคนี้คือเครื่องพิมพ์และวัสดุที่ราคาไม่แพงสามารถใช้ในสำนักงานหรือห้องปฏิบัติการได้ (8)



รูปที่ 1 ชิ้นงานจากการพิมพ์ 3 มิติ (a) แม่แบบนำทางผ่าตัดฝังรากเทียม (b) แบบจำลองฟัน

Fig 1. Products by 3D printer (a) Surgical stent (b) Dental model.

จุดเด่นของการพิมพ์ 3 มิติ คือความสามารถในการสร้างรูปร่างวัตถุตามต้องการ และเวลาการผลิตที่รวดเร็ว ข้อดีที่โดดเด่นอีกประการหนึ่งคือการสูญเสียวัสดุน้อยลง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องจักรกลและกระบวนการกลึงแบบเดิม ทำให้มีการสูญเสียวัสดุจากมากถึง 96 เปอร์เซ็นต์และไม่สามารถนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้ (9) วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติมีอยู่หลายชนิด ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องพิมพ์และวัตถุประสงค์ในการผลิตชิ้นงาน เช่น พอลิเมอร์ โลหะ เป็นต้น (10) ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามแม้จะมีข้อดีมากมาย แต่การพิมพ์ 3 มิติยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ วัสดุบางประเภทยังไม่สามารถประมวลผลและใช้ในกระบวนการพิมพ์หรือขึ้นรูปโดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ เช่น วัสดุเซรามิกที่มีความแข็งแรงแต่เปราะและไม่สามารถทำให้อ่อนนุ่มเพื่อฉีดขึ้นรูปได้ การมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่สูงของวัสดุเซรามิก หรือการที่วัสดุเซรามิกไม่ตอบสนองต่อแสงเลเซอร์ซึ่งต่างจากวัสดุจำพวกเรซิน เป็นต้น (11)

วัสดุเซรามิกได้รับความนิยมมากในงานทันตกรรมในปัจจุบัน ด้วยคุณสมบัติของความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible) และความสวยงามที่ใกล้เคียงฟันธรรมชาติมากที่สุด (12) เซรามิกในงานทันตกรรมมีหลายประเภท อาทิเช่น ลิเทียมไดซิลิเกต (lithium disilicate) กลาสเซรามิกชนิดเสริมความแข็งแรงด้วยลูไซต์ (leucite-reinforced glass ceramics) กลาสเซรามิกชนิดเฟลด์สปาร์ติก (feldspathic glass ceramics) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเซรามิกที่มีเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (zirconia based ceramic) มีผลึกที่เสถียรมากและมีความแข็งแรงสูง เป็นต้น ในปัจจุบันแนวโน้มการบูรณะฟันเพื่อความสวยงามมีความนิยมมากขึ้น วัสดุประเภทเซรามิกจึงเป็นตัวเลือกที่ได้รับความนิยม (13)

ในปัจจุบันมีการพัฒนาสมบัติของวัสดุทางทันตกรรมโดยใช้เทคโนโลยีต่างๆเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ตอบสนองตามความต้องการของผู้ป่วย เซอร์โคเนียเซรามิกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและได้รับการพัฒนาทางทันตกรรมบูรณะมาอย่างต่อเนื่อง การผลิตชิ้นงาน

จากเซอร์โคเนียในปัจจุบันที่แพร่หลาย คือการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยระบบแคดแคม ซึ่งช่วยสามารถลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการขึ้นตอนแลบที่ใช้แรงงานของช่างฝีมือ (14) แต่ยังมีข้อบกพร่อง เช่น การสึกของเครื่องมือกลึง การสูญเสียเนื้อวัสดุจากบล็อกเซอร์โคเนีย หรือการเกิดรอยร้าวในเนื้อวัสดุ (15) การพัฒนาเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติให้สามารถใช้ได้กับวัสดุเซอร์โคเนียเซรามิกจะช่วยลดข้อจำกัดที่เกิดจากการผลิตแบบเดิมได้

การศึกษาในปัจจุบันพบว่า มีงานวิจัยที่สามารถขึ้นรูปเซอร์โคเนียโดยการพิมพ์ 3 มิติ โดยเทคนิคการพิมพ์ไจโรอิงก์เจ็ต (Direct Inkjet Printing) แต่พบว่ายังมีความยุ่งยากสำหรับขั้นตอนการผลิตและมีข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เห็นได้ชัด (16) การเผยแพร่การศึกษาที่เกี่ยวกับการขึ้นรูปเซอร์โคเนียด้วยการพิมพ์ 3 มิติ มีจำนวนน้อยและยังอยู่ในขั้นตอนของการศึกษาวิจัย แต่พบว่ามีงานนำวัสดุเซรามิกชนิดอื่น ๆ มาขึ้นรูปโดยการพิมพ์ 3 มิติ วัสดุเซรามิกที่นิยมนำมาใช้มีหลายชนิดเช่น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) แคลเซียมซิลิเกต ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) โดยนิยมขึ้นรูปเป็นโครงค้ำยัน (Scaffold) วัสดุเซรามิกถูกเลือกมาสร้างโครงค้ำยันเนื่องจากมีคุณสมบัติความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อ (Biocompatibility) และมีเสถียรภาพสูงต่อสารเคมีในร่างกาย (17) ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการพิมพ์ 3 มิติกับวัสดุเซรามิกชนิดต่าง ๆ เพื่อสร้างโครงค้ำยันโดยใช้เทคนิคการพิมพ์ที่แตกต่างกัน การศึกษาของ Elomaa และคณะ (18) สังเคราะห์โครงค้ำยันโดยผ่านเทคนิคการพิมพ์สเตอริโอลิโทกราฟี (SLA) ด้วยไบโอแอคทีฟกลาส (bioactive glass) เพื่อสร้างโครงสร้างที่มีรูพรุน พบว่า สามารถขึ้นรูปโครงค้ำยันด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติชนิดนี้ได้สำเร็จ และโครงค้ำยันที่ได้มีสมบัติออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สามารถส่งเสริมให้เกิดการยึดเกาะของเซลล์ไฟโบรบลาสต์ เทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุหลายชนิด เช่นทางทันตกรรมนำมาขึ้นรูปแบบจำลองฟัน แต่เครื่องพิมพ์ที่ใช้กับเทคนิคนี้มีราคาที่สูง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะใช้กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเซอร์โคเนียด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM ซึ่งเป็นที่นิยมแพร่หลายในปัจจุบัน หาซื้อได้ทั่วไป

และราคาไม่แพงมาก เพื่อปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทางทันตกรรมให้มีความรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Methods)

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองโดยทำการเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียให้เป็นเส้นยาว เรียกว่าฟิลาเมนต์ เพื่อนำไปใช้ในการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM จำนวน 10 ชิ้น โดยใช้ตัวประสานที่ประกอบไปด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และพอลิไวนิลบิวไทรอล (PVB) เป็นหลัก รวมถึงสารหล่อลื่นที่ใช้ คือ กรดสเตียริก เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วจะกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งบทนี้ได้กล่าวถึงวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ตัวแปรในการทดลอง การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการทดลองนี้คือ พงเซอร์โคเนีย (3mol% Y_2O_3 Stabilized ZrO_2) (บริษัท Inframat Advanced Materials คอนเนตทิคัต ประเทศสหรัฐอเมริกา) สำหรับตัวประสานที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล มวลโมเลกุล 6000 (บริษัท Ajax Finechem นิวเจอร์ซีย์ ออสเตรเลีย) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มวลโมเลกุล 9000 (บริษัท Aldrich คาร์มชัตท เยอรมนี) พอลิไวนิลบิวไทรอล มวลโมเลกุล 15000 (บริษัท Sekisui ไตเกียว ญี่ปุ่น) และสารหล่อลื่นคือ กรดสเตียริก (บริษัท Panreac บาร์เซโลนา สเปน)

2. ตัวแปรในการทดลอง

การออกแบบการทดลอง

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเซอร์โคเนียเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM ประกอบด้วย น้ำหนักที่หายไปหลังเผา ความหนาแน่นรวม ปริมาณรูพรุนปรากฏ การดูดซึมน้ำ และการหดตัว

เชิงเส้นของชิ้นงาน และโครงสร้างทางจุลภาค และคุณสมบัติทางกลเพื่อศึกษาความต้านทานการตัดโค้ง (Flexural strength) ของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบฟิวส์เดฟโพสิชันโมเดลลิง

การเตรียมตัวอย่าง

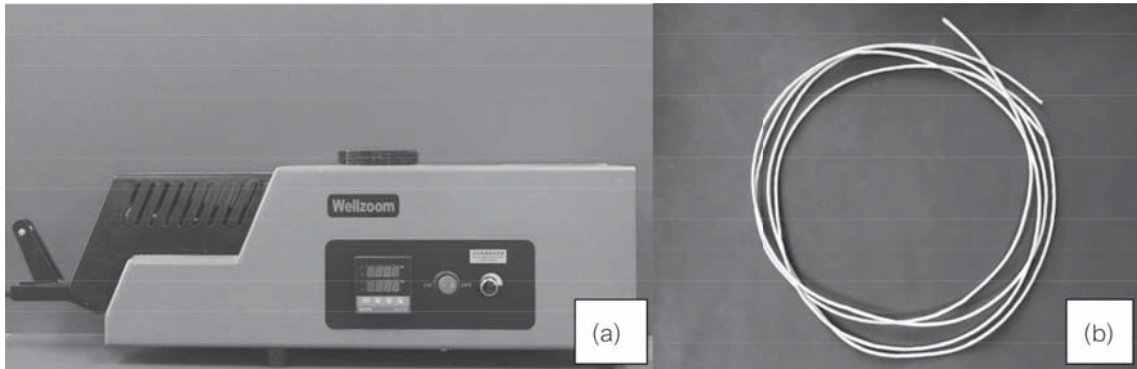
เริ่มเตรียมฟิลาเมนต์จากการละลายส่วนผสมพอลิไวนิลบิวไทรอล และกรดสเตียริกในสารละลายเอทานอล 200 มิลลิลิตร จากนั้นเติมผงเซอร์โคเนียลงไปผสม และเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบแห้งด้วยเครื่องระเหยแห้ง (rotary evaporator) และละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และนำผงแห้งที่ได้จากการอบมาผสมให้เข้ากัน แล้วเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปผสม และนำไปอุ่นที่ 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้ผงเซอร์โคเนียและตัวประสานทั้งหมดผสมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด ก่อนจะนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากคิดค้นหาสูตรสัดส่วนของผงเซอร์โคเนียและตัวประสานพบว่า เมื่อใช้สัดส่วนผงเซอร์โคเนียต่อตัวประสาน 50 ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ เส้นฟิลาเมนต์มีความเปราะเกินไป ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดลองได้ จึงมีการปรับสัดส่วนและค้นคืนสูตรใหม่พร้อมทั้งทำการทดลองซ้ำ ๆ และพบว่าสูตร Z13 มีอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดการอุดตันของหัวฉีดและมีการเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นแต่ละชั้นโดยสัดส่วนของสูตร Z13 คือ พงเซอร์โคเนียต่อตัวประสานเท่ากับ 25 ต่อ 75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งอัตราส่วนนี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ebert และคณะ (16) ที่มีสัดส่วนส่วนของเซอร์โคเนีย 27 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

การขึ้นรูปฟิลาเมนต์และชิ้นงานตัวอย่าง

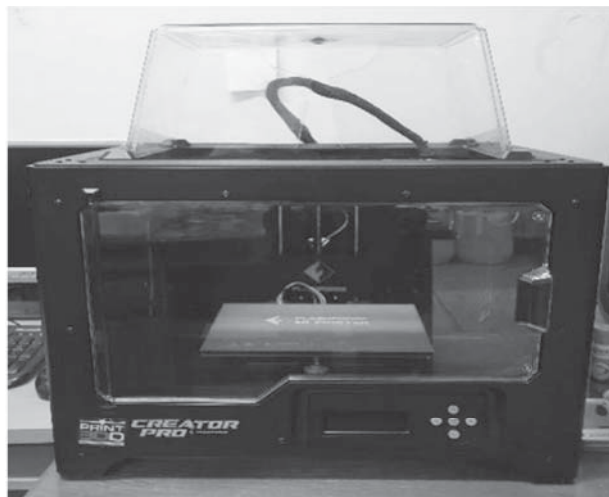
ฉีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์ เริ่มต้นนำส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันมาฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2 นำเส้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์แล้วไปเป็นวัตถุดิบสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ดังแสดง

ในรูปที่ 3 ตั้งค่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM เพื่อพิมพ์ ตัวอย่างขนาด 50 x 5 x 3 มิลลิเมตร ขนาดของหัวฉีด 0.4 มิลลิเมตร ความหนาชั้นแต่ละชั้น 0.12 มิลลิเมตร อุณหภูมิของหัวฉีด 220 -235 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ ของฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น

ของชิ้นงาน 100 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบการพิมพ์เป็น เส้นตรง และความเร็วในการพิมพ์ 35 มิลลิเมตรต่อ วินาที จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM จำนวน 10 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 (a) เครื่องฉีดขึ้นรูป (b) เส้นฟิลาเมนต์ที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป
Fig 2. (a) Filament extruder (b) Filament prepared by the extruder.



รูปที่ 3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM
Fig 3. 3D Printer FDM type.



รูปที่ 4 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Fig 4. Specimens prepared by 3D printer.

3. การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่น

การกำจัดตัวเชื่อมประสาน และสารหล่อลื่นทำได้

โดยการเผาให้ความร้อน ก่อนกำจัดตัวประสานนำชิ้นงาน ตัวอย่างชั่งน้ำหนักแล้วจดบันทึกน้ำหนัก (W_1) เอาไว้

ต่อจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปเผาฟนิก จากนั้นนำชิ้นงาน ชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง (W_2) โดยวิธีการคำนวณหา เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ตัวเชื่อมประสาน กับ กรดสเดียริก ที่ถูกกำจัด ดังนี้

$$\text{น้ำหนักตัวเชื่อมประสาน กับ กรดสเดียริกที่หายไป} = W_1 - W_2$$

$$\text{การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่น} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุนปรากฏ และการ ดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา

ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาหรือความ หนาแน่นรวม โดยใช้หลักอาร์คิมิดีสทำได้โดยนำชิ้นงาน เข้าเครื่องสูญญากาศ เพื่อดูดอากาศที่อยู่ภายในออก ให้หมด ทิ้งไว้ 30 นาที เทน้ำให้ท่วมชิ้นงาน แล้วทิ้งไว้

1 ชั่วโมง นำตัวอย่างชิ้นงานชั่งน้ำหนักเปียก (W_{sat}) น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในน้ำ (W_{sus}) นำชิ้นงาน ออบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนัก แห้งของชิ้นงาน (W_{dry}) คำนวณความหนาแน่นรวม (W_{total}) และปริมาณรูพรุนจริงที่ปรากฏ โดยวิธีการ คำนวณหามีดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \left(\frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \right) \times \rho_{water}$$

$$\text{ปริมาณรูพรุนปรากฏ} = \left(\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \right) \times 100$$

$$\text{การดูดซึมน้ำ} = \left(\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}} \right) \times 100$$

การหดตัวของชิ้นงาน
การวัดการหดตัวของชิ้นงานเชิงเส้น ทำได้โดยชิ้น
ชิ้นงาน ขนาดความกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร

$$\text{การหดตัวชิ้นงานหลังเผา} = \frac{L - L_f}{L} \times 100$$

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning
Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ FEI, QUANTA
250, USA) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ตรวจสอบโครงสร้าง
จุลภาคชิ้นงานก่อนเผา และส่วนที่ 2 ตรวจสอบโครงสร้าง
จุลภาคชิ้นงานหลังการเผาพูนึก

การตรวจสอบความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural
strenght)

ทำการตรวจสอบชิ้นงานหลังเผาว่าไม่มีการบวมตัว
ไม่มีรอยแตกร้าวและไม่มีการโก่งงอ แล้วจึงนำไปทดสอบ
ความต้านทานการดัดโค้งโดยไม่ผ่านกระบวนการ
ตกแต่งผิว ด้วยการทดสอบแบบ 3 point bending
ตามมาตรฐาน ISO 6872 ด้วยเครื่อง Universal testing
machine (Instron, รุ่น 8872, England)

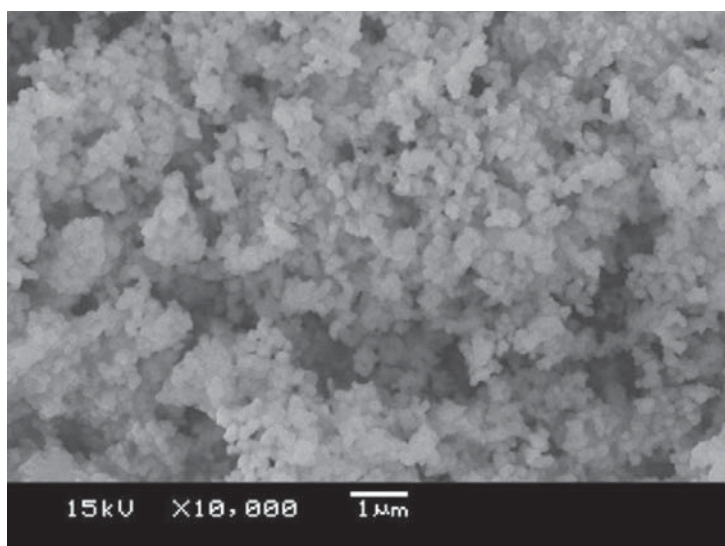
และสูง 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวัดขนาดเฉลี่ยชิ้นงาน
(L) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังการเผาพูนึก
โดยวิธีการคำนวณหา มีดังนี้

ผลการทดลอง (Results)

สำหรับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น
3 ส่วน ได้แก่ การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผง
วัตถุดิบ การศึกษาผลการขึ้นฟิลาเมนต์ และการศึกษา
สมบัติของชิ้นงาน ประกอบด้วย การกำจัดตัวเชื่อม
ประสานและสารหล่อลื่น ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน
ที่ปรากฏ และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา ความ
ต้านทานต่อการดัดโค้ง การหดตัวของชิ้นงาน และการ
ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1. การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเซอร์โคเนียและ
ตัวประสานสังเกตุได้จากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า
ผงเซอร์โคเนียมีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดประมาณ
0.2-0.3 ไมครอน อนุภาคเกาะกลุ่มกัน

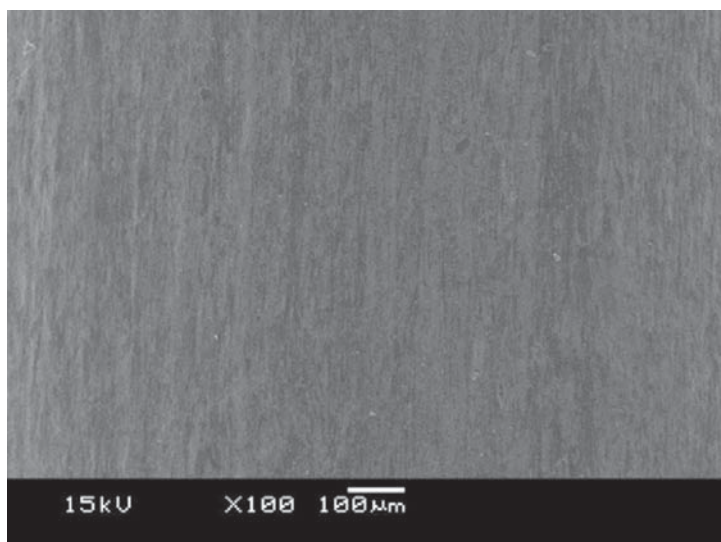


รูปที่ 5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเซอร์โคเนียและตัวประสานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Fig 5. SEM micrograph of zirconia powder and binders.

2. การศึกษาการขึ้นรูปฟิลาเมนต์โครงสร้างทางจุลภาค
จากโครงสร้างจุลภาคของฟิลาเมนต์ตัวอย่าง
ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปด้วยความร้อน 190 องศา

เซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า พื้นผิวมีลักษณะ
เป็นริ้วตามทิศทางการฉีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของฟิลาเมนต์ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป
Fig 6. Microstructure of filament through the extruder.

3. ผลการทดลองของชิ้นงาน

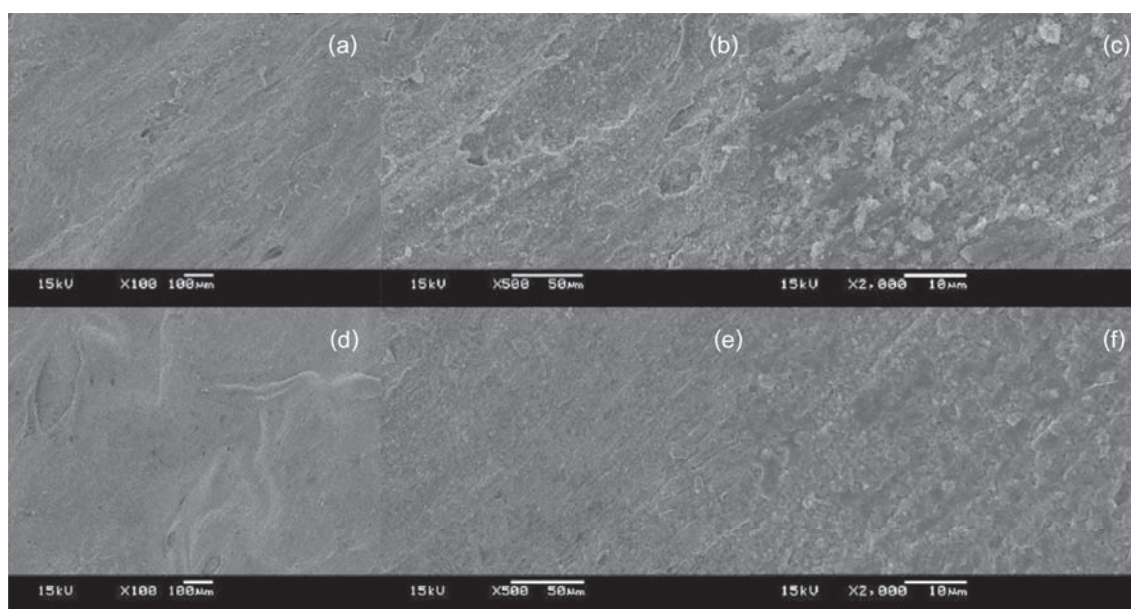
การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นของ
ชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์
3 มิติ ชนิด FDM พบว่า สามารถกำจัดตัวเชื่อมประสาน
ออกไปได้ทั้งหมดโดยวิธีการให้ความร้อน น้ำหนักชิ้นงาน
ที่หายไปหลังการเผาผนึกคือน้ำหนักของตัวเชื่อม
ประสานและสารหล่อลื่นที่ออกไปจากชิ้นงาน ดังนั้น
น้ำหนักที่หายไปมีค่าเท่ากับ 40.60 ± 0.71 เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างหลังการเผาผนึกที่
อุณหภูมิ 1510 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานตัวอย่าง
มีความหนาแน่นเฉลี่ย 4.08 ± 0.42 กรัมต่อลูกบาศก์
เซนติเมตร ในขณะที่เดียวกันมีรูพรุนปรากฏในชิ้นงาน
ตัวอย่าง ซึ่งเกิดจากการกำจัดตัวประสาน มีค่า $31.33 \pm$
 6.01 เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ 7.88 ± 2.20 เปอร์เซ็นต์

การหดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง หลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ
1510 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการหดตัวเชิงเส้นเฉลี่ย
 25.91 ± 5.92 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานหลัง
ขึ้นรูป และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคส่วนของ
ผิวหน้าชิ้นงานบริเวณเส้นที่ฉีดออกมาหัวฉีดจากโครงสร้าง
จุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่าส่วนของผิวหน้าชิ้นงาน
บริเวณเส้นที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด พื้นผิวมีลักษณะ
เป็นริ้วตามการฉีดขึ้นรูปของหัวพิมพ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ
แสดงในรูปที่ 7 (a-c) และ พบว่าโครงสร้างจุลภาค
ของชิ้นงานตัวอย่างหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1510
องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 7 (d-f) มีรูพรุน
หลังจากที่กำจัดตัวประสานหลังจากที่เผาผนึก และ
การทดสอบความต้านทานต่อการตัดโค้งมีค่า 31.77 ± 1.3
เมกะพาสคาล ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการศึกษาสมบัติชิ้นงานเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM

Table 1. Properties of zirconia specimen prepared by 3D printer FDM type.

สมบัติที่ศึกษา	ค่าที่วัดได้
น้ำหนักที่หายไปหลังเผา (%)	40.60 ± 0.71
ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	4.08 ± 0.42
ปริมาณรูพรุนปรากฏ (%)	31.33 ± 6.01
การดูดซึมน้ำ (%)	7.88 ± 2.20
การหดตัวของชิ้นงาน (%)	25.91 ± 5.92
ความต้านทานต่อการดัดโค้ง (MPa)	31.77 ± 1.3



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (a)-(c) และโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการเผาผนึก (d)-(f) ที่กำลังขยาย 100 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

Fig 7. Microstructure of 3D-Printed specimen (a)-(c) and microstructure of sintered zirconia specimen at 100x, 500x, 2000x magnification, respectively.

บทวิจารณ์ (Discussion)

จากการศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด FDM สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้สำเร็จ อีกทั้งยังมีความรวดเร็ว แต่พบข้อจำกัดบางประการ อาทิเช่น การที่นำผงเซรามิก ตัวเชื่อมประสาน และสารหล่อลื่น มาผสมเข้าด้วยกัน มีความยากที่จะทำให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ส่งผลให้เกิดฟิลาเมนต์ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปชิ้นงานผ่านหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีขนาดเล็กและเกิดรอยแตกบนชิ้นงาน การเชื่อมต่องันระหว่างชั้นในกระบวนการพิมพ์ของชิ้นงานยังไม่เชื่อมติดกันได้ดีพอซึ่งอาจเกิดจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ที่มีลักษณะการทำงานแบบฉีดเนื้อวัสดุผ่านหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ ถ้าเส้นฟิลาเมนต์ไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือเกิดการอุดตันของหัวฉีดขณะพิมพ์ จะทำให้ขาดความต่อเนื่องของชั้นแต่ละชั้น ทำให้เกิดช่องว่างเล็ก ๆ ในแต่ละชั้นได้ นอกจากนี้แล้วพื้นผิวภายนอกของชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติ มักจะเกิดลักษณะของการพิมพ์เป็นขั้นบันไดหรือ Staircase effect (19) มีลักษณะปรากฏเป็นขั้น ๆ บนผิววัตถุ เกิดเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะไม่เรียบ นอกจากนี้การให้ความร้อนจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติในอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการเชื่อมต่อช่องว่างระหว่างชั้นทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นไม่มีรูพรุน การพิมพ์วัสดุเซรามิกที่มีจุดหลอมเหลวสูงไม่สามารถทำได้โดยตรงโดยการผ่านเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM จึงจำเป็นต้องมีการผสมเข้ากับตัวประสานพอลิเมอร์เพื่อให้สามารถฉีดขึ้นรูปได้ การเลือกชนิดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการพัฒนาสมบัติของชิ้นงาน

สัดส่วนที่ใช้ในการศึกษานี้คือผงเซรามิกต่อตัวประสาน 25 ต่อ 75 ส่วน ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สามารถขึ้นรูปโดยที่ไม่เกิดการอุดตันของหัวฉีด และฟิลาเมนต์มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากเพียงพอในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM โดยสามารถพิมพ์ชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง อาจจะมีสัดส่วนของปริมาณของเซรามิกน้อยเกินไป ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีช่องว่างในชิ้นงาน เพราะพบว่าเมื่อมีการกำจัดตัวประสานออกทั้งหมด จะเหลือปริมาณของเซรามิก

เพียง 25 เปอร์เซ็นต์ ในปี 2008 Iyer และ McIntosh (20) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซิลิกอนไนไตรด์ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติพบว่า ชิ้นงานดิบ (green body) ที่ขึ้นรูปและยังไม่ผ่านการเผา ที่มีสัดส่วนของอนุภาคเซรามิก 55-60 เปอร์เซ็นต์ จะมีความหนาแน่นของชิ้นงานสูงเพียงพอ ไม่มีช่องว่างทั้งก่อนเผาและหลังเผา มีการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างชั้นแต่ละชั้น เทียบเท่ากับตัวอย่างที่ทำโดยกระบวนการผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิม แม้จะมีการศึกษาเกี่ยวกับสัดส่วนของฟิลเลอร์ต่อเมทริกซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของผงเซรามิกมากขึ้น จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานได้ (21) แต่การศึกษาของ Abdullah และคณะ (22) พบว่า การใส่ปริมาณของผงฟิลเลอร์มากเกินไปจะทำให้การยึดกันของตัวประสานและฟิลเลอร์ทำได้ไม่ดีนัก อีกทั้งยังเกิดเป็นการเกาะกลุ่มของฟิลเลอร์เป็นจุด ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยในส่วนของสัณฐานวิทยาของผงเซรามิกและตัวประสาน ดังเห็นได้จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตั้งแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งการไม่กระจายตัวและการเกาะกลุ่มกันของฟิลเลอร์จะส่งผลต่อความแข็งแรงได้

ดังนั้นปริมาณสัดส่วนฟิลเลอร์และตัวประสานชนิดของตัวประสาน รวมทั้งการผสมเข้ากันของตัวประสานและผงฟิลเลอร์จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการส่งเสริมคุณสมบัติทางกล (23) หากมีปริมาณฟิลเลอร์น้อย เมื่อมีการกำจัดตัวประสานออก ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากในชิ้นงานและยากต่อการกำจัดรูพรุนออกจากชิ้นงานเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยวิธี FDM ได้ นอกจากนี้รูพรุนเหล่านั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่พิมพ์ออกมา และส่งผลต่อการหดตัว เพราะการหดตัวหลังการเผาของเซรามิกเกิดจากการดึงอนุภาคเซรามิกเข้าแทนที่ช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อเซรามิกจากการสลายตัวของอากาศ น้ำ และตัวประสานในขณะที่เผา ดังนั้นปริมาตรการหดตัวของเซรามิกขึ้นอยู่กับปริมาตรของช่องว่างที่มีอยู่ในขณะที่ขึ้นรูปชิ้นงานเช่นกัน

ในปัจจุบันการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติยังอยู่ในขั้นการทดลอง จากงานวิจัยของ Ebert ในปี 2009 (16) พบว่า เมื่อใช้เทคนิคการพิมพ์อิงก์เจ็ตชิ้นงานที่ได้มีค่าความแข็งแรง 763 เมกะพาสคาล

ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยการบิอัดด้วยแรงกดวิธีดั้งเดิมได้ แต่ยังมี ความบกพร่องของชิ้นงานที่ชัดเจนซึ่งเห็นได้จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค สาเหตุเกิดจากการอุดตันของหัวเครื่องพิมพ์ในขณะที่พิมพ์ชิ้นงาน งานวิจัยของ Bertrand และคณะ (24) พบว่าการพิมพ์วัสดุเซอร์โคเนียด้วยเทคนิคซีเลกทีฟเลเซอร์ซินเทอริง (SLS) ยังมีข้อบกพร่องในเรื่องของความหนาแน่น โดยพบว่าวัสดุมีความหนาแน่นเพียง 56 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเผาด้วยเตาเผาทั่วไปไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุได้ นอกจากนี้แสงเลเซอร์สามารถหลอมละลายผงเซรามิกได้เพียงบางส่วนเท่านั้น การที่จะสามารถเพิ่มความหนาแน่นของเซอร์โคเนียที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ แนะนำให้เพิ่มปริมาณสัดส่วนความหนาแน่นของผงเซอร์โคเนียให้มากขึ้น นอกจากนี้แล้ว การใช้งานเครื่องพิมพ์สามมิติเพื่อพิมพ์วัสดุเซรามิกที่นิยมในปัจจุบันคือ การพิมพ์โครงค้ำยัน (scaffold) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน สามารถกำหนดขนาดรูพรุนได้ (25) จากการศึกษาของ Seitz และคณะ (26) พบว่าความแข็งแรงของโครงค้ำยันที่ได้จากการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่าประมาณ 22 เมกะพาสคาล ซึ่งมีเสถียรภาพมากพอที่จะเป็นโครงค้ำยันให้เซลล์ต่าง ๆ มาสร้างเนื้อเยื่อได้ แต่ยังไม่เหมาะสมในบริเวณที่ต้องรับแรงมาก เช่น ข้อต่อต่าง ๆ การขึ้นรูปวัสดุเซอร์โคเนียด้วยการพิมพ์สามมิติ ชนิด FDM ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความเหมาะสมเพียงพอในเรื่องของความแข็งแรงสำหรับนำมาใช้ในการพิมพ์โครงค้ำยันแต่สำหรับการพิมพ์โครงสร้างที่หนาแน่นและแข็งแรงจนสามารถใช้เป็นชิ้นงานบูรณะทางทันตกรรม เช่น อินเลย์ ออนเลย์ ครอบฟันเซอร์โคเนีย จะต้องมีการพัฒนาสมบัติทางกายภาพและทางกลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

บทสรุป (Conclusion)

ด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ และผลจากการศึกษาที่พบว่าคุณสมบัติของเซอร์โคเนียที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเครื่องพิมพ์ชนิด FDM ยังมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน ISO สำหรับวัสดุเซอร์โคเนียที่ใช้ในการบูรณะทางทันตกรรม

โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ชนิดของเครื่องพิมพ์ อัตราส่วนของผงเซอร์โคเนียต่อตัวประสาน อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานเซอร์โคเนียที่พิมพ์ได้ มีคุณสมบัติที่ดีเพียงพอในการใช้เป็นโครงค้ำยันสำหรับให้เซลล์ต่าง ๆ มาสร้างเนื้อเยื่อได้ ทั้งนี้ควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในแง่ของขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมและคุณสมบัติทางกลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อต่าง ๆ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้ความช่วยเหลือ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง (References)

1. Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. Dent Mater. 2016;32(1):54-64.
2. Bhargav A, Sanjairaj V, Rosa V, Feng LW, Fuh Yh J. Applications of additive manufacturing in dentistry: A review. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. 2018;106(5):2058-64.
3. Sykes LM, Parrott AM, Owen CP, Snaddon DR. Applications of rapid prototyping technology in maxillofacial prosthetics. Int J Prosthodont. 2004;17(4):454-9.
4. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. Br Dent J. 2015;219(11):521-9.
5. ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

6. Torabi K, Farjood E, Hamedani S. Rapid Prototyping Technologies and their Applications in Prosthodontics, a Review of Literature. *J Dent (Shiraz)*. 2015;16(1):1-9.
7. Guvendiren M, Molde J, Soares RM, Kohn J. Designing Biomaterials for 3D Printing. *ACS Biomater Sci Eng*. 2016;2(10):1679-93.
8. Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Mulhaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem Rev*. 2017;117(15):10212-90.
9. Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *BUS HORIZ*. 2012;55(2):155-62.
10. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*. 2015;219(11):521-9.
11. Travitzky N, Bonet A, Dermeik B, Fey T, Filbert-Demut I, Schlier L, et al. Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials. *Adv Eng Mater*. 2014;16(6):729-54
12. Zhang Y, Kelly JR. Dental Ceramics for Restoration and Metal Veneering. *Dent Clin North Am*. 2017;61(4):797-819.
13. Helvey GA. Classifying dental ceramics: numerous materials and formulations available for indirect restorations. *Compend Contin Educ Dent*. 2014;35(1):38-43.
14. Venkatesh KV, Nandini VV. Direct metal laser sintering: a digitised metal casting technology. *J Indian Prosthodont Soc*. 2013;13(4):389-92.
15. Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in computer-aided manufacturing in prosthodontics: a review of the available streams. *Int. J. Dent*. 2014, 2014, 1-15.
16. Ebert J, Ozkol E, Zeichner A, Uibel K, Weiss O, Koops U, et al. Direct inkjet printing of dental prostheses made of zirconia. *J Dent Res*. 2009 Jul;88(7):673-6.
17. Ebrahimi M, Botelho MG, Dorozhkin SV. Biphasic calcium phosphates bioceramics (HA/TCP): Concept, physicochemical properties and the impact of standardization of study protocols in biomaterials research. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2017;71:1293-1312.
18. Elomaa L, Kokkari A, Narhi T, Seppälä J. Porous 3D modeled scaffolds of bioactive glass and photocrosslinkable poly(ϵ -caprolactone) by stereolithography. *Compos Sci Technol*. 2013;74: 99-106.
19. Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *J Prosthodont*. 2017;26(2):156-163.
20. Iyer S, McIntosh J, Bandyopadhyay A, Langrana N, Safari A, Danforth SC, et al. Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Si₃N₄ Formed by Fused Deposition of Ceramics. *Int J Appl Ceram Technol*. 2008; 5(2):127-37.
21. Ginebra MP, Albuixech L, Fernández-Barragán E, Aparicio C, Gil FJ, San RJ, et al. Mechanical performance of acrylic bone cements containing different radiopacifying agents. *Biomaterials*. 2002;23(8):1873-82.
22. Abdullah AM, Rahim TNAT, Hamad WNF, Mohamad D, Akil HM, Rajion ZA. Mechanical and cytotoxicity properties of hybrid ceramics filled polyamide 12 filament feedstock for craniofacial bone reconstruction via fused deposition modelling. *J Dent Mater*. 2018;34(11): e309-e16.
23. Fu S-Y, Feng X-Q, Lauke B, Mai Y-W. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Compos B Eng*. 2008;39(6):933-61.

24. Bertrand P, Bayle F, Combe C, Goeriot P, Smurov I. Ceramic components manufacturing by selective laser sintering. *Appl Surf Sci.* 2007; 254(4):989-92.

25. Denry I, Kelly JR. Emerging ceramic-based materials for dentistry. *J Dent Res.* 2014; 93(12):1235-42.

26. Seitz H, Rieder W, Irsen S, Leukers B, Tille C. Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2005; 74(2):782-8.

ติดต่อขอความ

รศ.ดร.ทพญ.ภาวิณีย์ ปฏิพัทธ์วุฒิกุล ดิดรอน
คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เลขที่ 114 สุขุมวิท 23 คลองเตยเหนือ เขตวัฒนา
กรุงเทพมหานคร 10110
โทรศัพท์ 02-649-5000 ต่อ 15092, 15093
จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ pavinee.didron@gmail.com

Corresponding author:

Assoc.Prof.Dr.Pavinee Padipatvuthikul Didron
Department of General Dentistry, Faculty of
Dentistry, Srinakharinwirot University, 114
Sukhumvit 23, Klongtoei-Nua, Wattana,
Bangkok, Thailand 10110
Tel: 02-649-5000 ext. 15092, 15093
E-mail: pavinee.didron@gmail.com

Received Date: Oct 02, 2019

Revised Date: Oct 10, 2019

Accepted Date: Nov 25, 2019