



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเพิ่มประสบการณ์

ชื่อโครงการ	การเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ Preparation of Dense Sintered Zirconia Ceramics by 3D Printing Technique	
ชื่อนิสิต	นางสาวชญานิน นิสัยมัน	รหัสประจำตัวนิสิต 5833209523
	นายปกรณ์ เสี่ยงมรัตน์	รหัสประจำตัวนิสิต 5833239323
ภาควิชา	วัสดุศาสตร์ แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์	
ปีการศึกษา	2561	

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ
(Preparation of Dense Sintered Zirconia Ceramics
by 3D Printing Technique)

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

โดย

นางสาวชญานิน นิสัยมัน รหัสประจำตัวนิสิต 5833209523
นายปกรณ เสจี่ยมรัตน์ รหัสประจำตัวนิสิต 5833239323

อนุมัติโดย



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ
โดย	นางสาวชญาสิน นิสัยมัน รหัสนประจำตัวนิสิต 5833209523 นายปกรณม์ เสี่ยงมรัตน์ รหัสนประจำตัวนิสิต 5833239323
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์
ปีการศึกษา	2561

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการสร้างชิ้นงานเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด Fuse Deposition Modeling (FDM) โดยใช้ตัวเชื่อมประสานร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิไวนิลบิวไทรออล วัตถุประสงค์ตั้งต้นคือผงเซอร์โคเนีย และใช้กรดสเตียริกเป็นสารเติมแต่ง งานวิจัยนี้แบ่งการผสมวัตถุดิบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการผสมแบบแห้ง โดยการผสมผงวัตถุดิบทั้งหมดเข้าด้วยกันตามอัตราส่วน ส่วนที่สองคือการผสมแบบเปียก โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ช่วยในการผสม จากนั้นนำไปฉีดด้วยเครื่องอัดรีดร้อนด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และนำไปขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ขั้นตอนการกำจัดตัวเชื่อมประสานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2.5 ชั่วโมง ส่วนที่สองคือการกำจัดตัวเชื่อมประสานโดยการให้ความร้อน จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะสมบัติของฟิลาเมนต์ ชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ชิ้นงานหลังการกำจัดตัวเชื่อมประสาน ด้วยวิธีการแช่น้ำและชิ้นงานหลังการเผาผนึก ได้แก่ ความหนาแน่น รูพรุนปรากฏ การดูดซึมน้ำ ความต้านทานการดัดโค้ง และโครงสร้างจุลภาค ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผงเซอร์โคเนียต่อตัวเชื่อมประสาน 25:75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรสามารถขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ดีที่สุด การผสมแบบเปียกสามารถผสมผงวัตถุดิบให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าการผสมแบบแห้ง ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ผิวด้านข้างมีลักษณะเป็นขั้นๆ ไม่เรียบเนียน ทำให้การเชื่อมติดกันของแต่ละชั้นยังไม่ดีพอ การกำจัดตัวเชื่อมประสานโดยไม่ผ่านการแช่น้ำไม่สามารถคงรูปชิ้นงานได้ ซึ่งการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการแช่น้ำก่อนการให้ความร้อนสามารถคงรูปชิ้นงานได้มากกว่า หลังการเผาผนึกพบว่าสมบัติต่างๆของชิ้นงานยังคงต้องมีการพัฒนาต่อไปรวมถึงปัจจัยต่างๆมากมายที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Title	Preparation of Dense Sintered Zirconia Ceramics by 3D Printing Technique	
Authors	Miss.Chayanin Nisaimun	student ID 5833209523
	Mr.Pakorn Sangiamrat	student ID 5833239323
Department	Materials Science	
Advisor	Asst. Prof. Dr.Thanakorn Wasanapiarnpong	
Academic Year	2018	

This study focuses on Preparation of Dense Sintered Zirconia Ceramics by 3D Printing Technique Fuse Deposition Modeling (FDM) type using PEG, PVA and PVB co-binders. The starting powder is zirconia and the stearic acid is used as an additive. The mixing step of this study consists of 2 parts. The first part is dry mixing that mixed all raw materials with different ratio. The second part is wet mixing that used the ethyl alcohol. Both powder and binders were formed the filaments through the extruder at 190 degree Celsius for using with 3D printer FDM type and then formed the sample by 3D printer FDM type. Double debinding steps were carried out using water leaching in the first part at 60 degree Celsius for 2.5 hours. The second part of debinding step was thermal debinding. Then the samples were sintered at 1450 degree Celsius for 2 hours. Characterisation of the filaments, the as-printed, the as-leached and the as-sintered including density, apparent porosity, water absorption, flexural strength and microstructure found that the zirconia powder/binder ratio at 25:75 percent by volume is the best forming of the sample by 3D printer FDM type, the wet mixing can be more homogenous than dry mixing, the side surface of the sample has the layers from FDM technique that each layer is not joint with another as well, the debinding step that include water leaching can hold the sample structure better than the debinding step that not include water leaching, and the characterisation of the samples should improve in the future also as factors about 3D printing.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความรู้ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและเรื่องต่างๆตลอดมา

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความรู้และคำชี้แนะ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือ SEM คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนในการทำโครงการวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่สนับสนุนให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้จัดทำตลอดการเรียนรู้

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เซอร์โคเนีย.....	3
2.1.1 ประวัติความเป็นมาของเซอร์โคเนีย ⁽¹⁾	3
2.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ⁽¹⁾	3
2.2 สมบัติของเซอร์โคเนีย ⁽¹⁾	6
2.2.1 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility)	6
2.2.2 ความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Inertness)	6
2.2.3 สมบัติเชิงกล	7
2.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Fused Deposition Modeling (FDM) ^(6,7)	7
2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์.....	7
2.3.2 ส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM	7
2.3.3 วัสดุพิมพ์	8
2.3.4 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ	8
2.4 ตัวเชื่อมประสาน	8
2.4.1 พอลิเอทิลีนไกลคอล ^(4,9)	9
2.4.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ⁽¹⁰⁾	9
2.4.3 พอลิไวนิลบิวไทรอล ⁽⁹⁾	9

2.5 การกำจัดตัวเชื่อมประสาน ⁽¹⁸⁾	9
2.5.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ตัวทำละลาย	9
2.5.2 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ความร้อน	10
2.6 กระบวนการขึ้นฟิลาเมนต์ ⁽¹⁹⁾	10
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	19
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 ตัวแปรในการทดลอง	19
3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	19
3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	21
3.2.3 การขึ้นฟิลาเมนต์ และฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	21
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง	24
3.3.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่น.....	24
3.3.2 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุนปรากฏ และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา	24
3.3.3 ความต้านทานต่อการตัดโค้ง	25
3.3.4 การหดตัวของชิ้นงาน.....	25
3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	25
3.4 ตารางการดำเนินงานวิจัย.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	27
4.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุประสงค์	27
4.1.1 สัณฐานวิทยา.....	27
4.1.2 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลปิวิไทรอลด้วยความร้อน	28
4.1.2 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อน	29
4.1.3 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อน	30
4.1.4 อุณหภูมิต่างๆของวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง	31
4.2 การศึกษาการขึ้นรูปฟิลาเมนต์.....	31
4.2.1 โครงสร้างทางจุลภาค.....	31
4.3 การศึกษาผลการขึ้นรูปชิ้นงาน	32
4.3 ผลการทดลองของชิ้นงาน.....	34
4.3.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นโดยไม่ผ่านการแช่น้ำ.....	34
4.3.2 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นโดยผ่านการแช่น้ำ.....	35
4.3.3 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุนปรากฏ และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา	36

4.3.4 ความต้านทานต่อการตัดโค้ง	37
4.3.5 การหดตัวของชิ้นงาน	37
4.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคส่วนของผิวหน้าชิ้นงานบริเวณเส้นที่ฉีกออกมาหัวฉีด ...	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 อุปสรรค	39
5.3 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก ปัญหาและอุปสรรคที่พบในขั้นตอนการวิจัย	44
ภาคผนวก ข สูตรอัตราส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	45

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นและความแข็งของ ZTA ที่ 48-52 vol% ⁽¹¹⁾	12
ตารางที่ 2 ความแข็งแรงของ ZTA ที่ 48-52 vol% ในช่วงต่างๆ ⁽¹¹⁾	12
ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของ PEG ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา ต่าง ๆ กัน ⁽¹²⁾	13
ตารางที่ 4 แสดงการตั้งค่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	22
ตารางที่ 5 ตารางแสดงอุณหภูมิ T_g , T_m และ T_d	31
ตารางที่ 6 แสดงอัตราส่วนผสมของส่วนผสมที่ใช้ทำการวิจัยนี้.....	33
ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการศึกษาสมบัติชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก.....	37

สารบัญรูป

รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของผลึกคริสตัลของเซอร์โคเนียแต่ละชนิด เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ⁽⁵⁾	4
รูปที่ 2 กระบวนการเพิ่มกำลังความแข็งแรง จากการเปลี่ยนรูปร่าง (Transformation toughening) ⁽¹⁶⁾	5
รูปที่ 3 เฟสไดอะแกรมของระบบยิทเทรียม-เซอร์โคเนีย ⁽¹⁷⁾	6
รูปที่ 4 กระบวนการขึ้นรูปขึ้นงาน 3 มิติ ⁽⁷⁾	8
รูปที่ 5 กระบวนการขึ้นรูปฟิลาเมนต์ ⁽¹⁹⁾	10
รูปที่ 6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอล ในระยะเวลาต่างๆกัน ใน ZTA ที่ 50vol% ⁽¹¹⁾	11
รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของขึ้นงาน (a) ไม่เติมตัวเชื่อมประสาน (b) เติมตัวเชื่อมประสาน ⁽¹³⁾ ...	13
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิของการกำจัดตัวเชื่อมประสานต่อการกำจัดตัวเชื่อมประสาน ชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยวิธีการแช่น้ำ ณ เวลาต่างๆ ⁽¹⁴⁾	14
รูปที่ 9 โครงสร้างรอยหักขึ้นงานอลูมินา (a) ผิวหน้าขึ้นงาน (b) ภายในขึ้นงาน	15
รูปที่ 10 ขนาดความหนาของขึ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป	17
รูปที่ 11 ขึ้นงานที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Fused Filament Fabrication (FFF) (a) ทรงแท่งสี่เหลี่ยม (b) เคสนาฬิกาข้อมือ (c) ตัวคะตะลิสต์ (d) ที่ยึด	18
รูปที่ 12 ตารางการเผา	20
รูปที่ 13 แผนผังงานวิจัยการเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูง ด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ (a) ขั้นตอนการผสมส่วนผสม (b) ขั้นตอนหลังจากการผสมส่วนผสม	21
รูปที่ 14 ขึ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM	23
รูปที่ 15 เครื่องฉีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์	23
รูปที่ 16 เครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM	24
รูปที่ 17 ลักษณะสัญญาณวิทยาของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	27
รูปที่ 18 กราฟแสดงการสลายตัวพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อน (a) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (b) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	28
รูปที่ 19 กราฟแสดงการสลายตัวพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อน (a) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (b) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	29

รูปที่ 20	กราฟแสดงการสลายตัวพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อน (a) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (b) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	30
รูปที่ 21	โครงสร้างจุลภาคของฟิลาเมนต์ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดเส้น สูตร Z13 ที่กำลังขยายต่างกัน (a) กำลังขยาย 100 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า (c) กำลังขยาย 2000 เท่า.....	32
รูปที่ 22	Z13 ผสมแห้ง ชั้นล่างที่ออกมาแล้วแข็งตัว ไม่เชื่อมต่อกับชั้นบนที่ออกมาใหม่.....	33
รูปที่ 23	ตัวอย่างชิ้นงานสูตร Z13 ผสมเปียก ที่พิมพ์ได้.....	33
รูปที่ 24	ชิ้นงานหลังเผาที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ.....	34
รูปที่ 25	ชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการแช่น้ำ.....	35
รูปที่ 26	ชิ้นงานที่กำลังทำการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง.....	36
รูปที่ 27	ลักษณะการเกิดการแยกชั้นของชิ้นงาน	36
รูปที่ 28	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก ส่วนของผิวหน้าชิ้นงานบริเวณเส้นที่ฉีดออกมาหัวฉีด ที่กำลังขยายต่างกัน (a)-(c) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการขึ้นรูป ที่กำลังขยาย 100 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ (d)-(f) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีแช่น้ำ ที่กำลังขยาย 100 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ	38
รูปที่ 29	สกรูภายในเครื่องรีดเส้นฟิลาเมนต์ที่เกิดการอุดตัน	44
รูปที่ 30	บริเวณภายในหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่เกิดการอุดตัน	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการพัฒนาสมบัติของวัสดุทางทันตกรรมต่างๆ เช่น โลหะไทเทเนียมเจือ ปอร์ซเลน เซอร์โคเนีย เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ทองคำ เป็นต้น เพื่อตอบสนองตามความต้องการของทันตแพทย์และผู้ป่วย ซึ่งเซอร์โคเนียเริ่มจะเป็นที่นิยมและได้รับการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสมบัติในด้านความสวยงามที่ใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติมากกว่าวัสดุอื่นๆ อีกทั้งยังมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility) มีความแข็งแรงทนทาน และมีความเฉื่อยทางปฏิกิริยาเคมี จึงไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีปกติทั่วไปได้ จึงต้องมีการนำเทคโนโลยีการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งระบบ (Dental CAD/CAM/CNC) ⁽³⁾ เข้ามาช่วยในการผลิตขึ้นงาน ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ฝีมือและประสบการณ์ของช่างในการผลิตมากนัก ซึ่งวิธีการขึ้นรูปที่น่าสนใจ คือ เทคโนโลยีสร้างต้นแบบด้วยความรวดเร็ว (Rapid Prototype : RP) โดยใช้ร่วมกับการออกแบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printer) สร้างขึ้นงานขึ้นทีละชั้น ออกมาเป็นชิ้นงานสามมิติที่มีขนาด รูปทรงเป็นไปตามที่ออกแบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ มักใช้วัสดุเป็นพลาสติกเพราะง่ายต่อการขึ้นรูป แบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ด้วยกันคือการใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสงในการขึ้นรูปขึ้นงาน (Photopolymerization) การใช้เลเซอร์หรือกาวในการเชื่อมติดผงวัสดุเข้าด้วยกัน (Bonding) การตัดและติดแผ่นวัสดุทีละชั้น (Layer laminate manufacturing) และการใช้พลาสติกร้อนเรียงตัวขึ้นเป็นขึ้นงาน (Extrusion process)

1. การใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสงในการขึ้นรูปขึ้นงาน (Photopolymerization) เทคนิคที่ถือเป็นพื้นฐานดั้งเดิมของการขึ้นรูปแบบนี้คือ Stereolithography Apparatus (SLA) หลักการคือการใช้วัสดุประเภทเรซินที่สามารถแข็งตัวได้เมื่อฉายด้วยแสงUltraviolet (UV)

2. การใช้เลเซอร์หรือกาวในการเชื่อมติดผงวัสดุเข้าด้วยกัน (bonding) วิธีนี้ต่างจากวิธี Photopolymerization ตรงที่สถานะของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุผง และผิวงานที่ได้จะค่อนข้างหยาบและความแข็งแรงที่ได้จะต่ำกว่าวิธี Stereolithography ซึ่งจะให้ผิวขึ้นงานที่เรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า เทคนิคที่เป็นที่รู้จักสำหรับการขึ้นรูปแบบนี้คือ Selective Laser Sintering (SLS)

3. การตัดและติดแผ่นวัสดุทีละชั้น (Layer laminate manufacturing) ถือว่าหลักการมีความง่ายมากที่สุดคือการการตัดแผ่นวัสดุที่มักทำจากกระดาษ โดยที่ด้านหนึ่งมักเคลือบด้วยกาวที่จะติดเมื่อได้รับความร้อนจากการตัดแผ่นวัสดุด้วยเลเซอร์ แผ่นวัสดุแต่ละแผ่นจะซ้อนติดกันเป็นชั้นๆ

4. การใช้พลาสติกร้อนเรียงตัวขึ้นเป็นชิ้นงาน (Extrusion process) หลักการคือการใช้พลาสติกที่ถูกทำให้ร้อนมาเรียงเป็นโครงสร้างชั้นทีละชั้น เทคนิคหนึ่งที่น่าิยมใช้ในกระบวนการขึ้นรูปนี้คือ Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นเครื่องพิมพ์สามมิติที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน มีหลักการทำงานง่ายไม่ซับซ้อนและราคาเครื่องมือถูกกว่าเครื่องมือขึ้นรูปชนิดอื่นๆ⁽²⁾

การผลิตชิ้นส่วนทางทันตกรรมด้วยเทคโนโลยีพิมพ์ภาพสามมิติได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นิยมนำมาปรับใช้กับเทคนิค Selective Laser Sintering (SLS) ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุผงในปริมาณที่มากเกินพอและที่สำคัญต้นทุนในการขึ้นรูปชิ้นงานมีราคาค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะใช้กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเซอโรโคเนียด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM เพื่อปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทางทันตกรรมให้มีความรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยการขึ้นรูปเซอโรโคเนียจำเป็นต้องอาศัยตัวเชื่อมประสาน ช่วยในการขึ้นรูป ประกอบด้วยสาร 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลบิวไทรอล เป็นหลัก รวมถึงสารหล่อลื่นที่ใช้ คือ กรดสเตียริก โดยตัวเชื่อมประสาน จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีการละลายแตกต่างกัน สองตัวแรกเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำสูง ละลายได้ง่ายในน้ำ ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่นๆ ให้เพิ่มความชอบน้ำได้ ส่วนตัวที่สามจะละลายตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติยึดเกาะติดผิววัสดุได้ดีโดยเฉพาะโลหะและเซรามิก มีความเหนียว ยืดหยุ่น และแข็งแรง โปร่งแสง จึงทำให้เซอโรโคเนียสามารถคงรูปอยู่ได้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการสร้างชิ้นงานเซรามิกเซอโรโคเนียความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด FDM

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาวิธีการเตรียมและขึ้นรูปฟิลาเมนต์วัสดุผสมระหว่างผงเซอโรโคเนียและตัวเชื่อมประสานชนิด พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลบิวไทรอล ด้วยการฉีดเป็นเส้นด้วยเครื่องอัดรีดร้อน สำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิดฉีดเส้นพลาสติกหลอมเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถสร้างชิ้นงานเซอโรโคเนียด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM ได้
- 1.4.2 สามารถลดต้นทุนการผลิตเซอโรโคเนียที่นำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้
- 1.4.3 เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษาในอนาคตต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเรื่อง การเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวม แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยนำเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 เซอร์โคเนีย

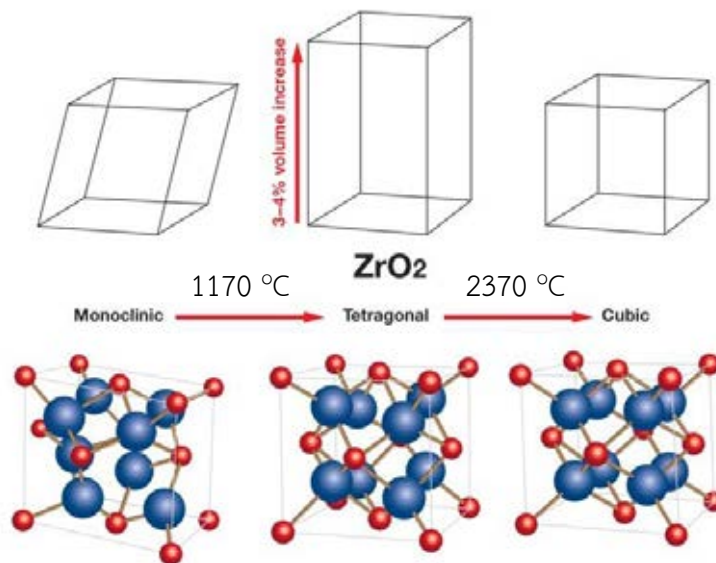
2.1.1 ประวัติความเป็นมาของเซอร์โคเนีย⁽¹⁾

เซอร์โคเนีย (Zirconia) หรือเซอร์โคเนียไดออกไซด์ (ZrO_2) เป็นโลหะออกไซด์ที่ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1789 โดยนักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อว่า Martin Heinrich Klaproth ปกติแล้วเซอร์โคเนียที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะไม่พบในลักษณะบริสุทธิ์ แต่จะพบในรูปของแร่เซอร์คอน ($ZrSiO_4$) กระจายอยู่ในหินแกรนิต โดยมีเซอร์โคเนียในปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการผลิตผงเซอร์โคเนียจะต้องผ่านกระบวนการแยกแต่ละแร่ธาตุอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้เกิดความบริสุทธิ์ของผงเซอร์โคเนีย ก่อนที่จะนำมาผ่านกระบวนการผลิตเป็นเซรามิกล้วนสำหรับงานด้านทันตกรรม

จากสมบัติที่ดีของเซอร์โคเนีย ทำให้เซอร์โคเนียเซรามิกเป็นที่น่าสนใจในการนำมาใช้ทางการแพทย์ ในปี ค.ศ.1969 Helmer และ Driskell รายงานครั้งแรกถึงการนำเซอร์โคเนียเซรามิกมาทำเป็นข้อต่อกระดูกเทียมระหว่างกระดูกโคนขากับกระดูกสะโพก ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ.1993 Luethy และคณะ ได้พัฒนานำมาใช้ในทางทันตกรรมเป็นครั้งแรกโดยนำมาใช้เป็นเดือยฟัน ส่วนการสร้างเป็นหลักยึดของรากเทียมถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดย Wohlwend และคณะ ในปี ค.ศ.1997 จากนั้นจึงพัฒนานำมาใช้ในงานครอบฟันและฟันปลอมชนิดติดแน่น

2.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค⁽¹⁾

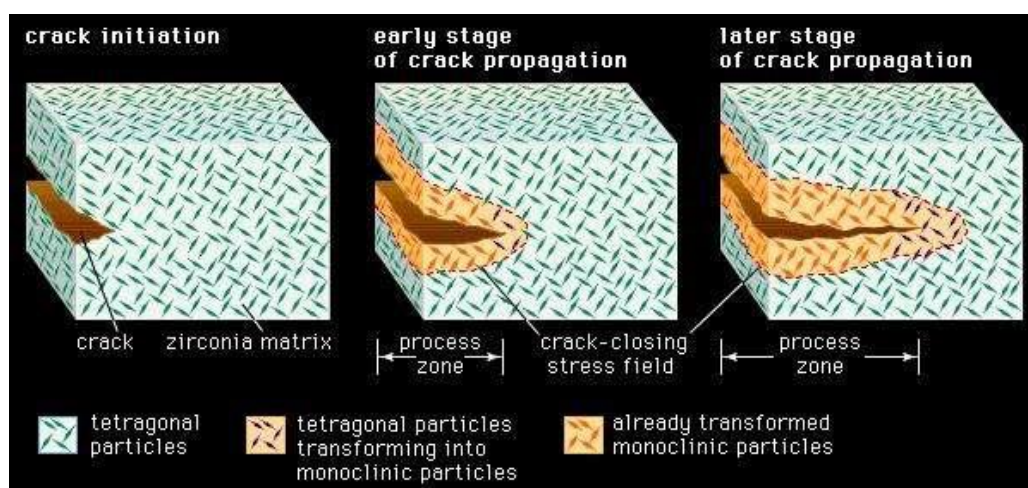
เซอร์โคเนียประกอบด้วยอะตอมของเซอร์โคเนียมและอะตอมของซิเจนซึ่ง Zr^{4+} ไอออนมีขนาดเล็ก ออกซิเจนไอออนอยู่ล้อมรอบ Zr^{4+} แต่ละไอออนมีการเรียงตัวของอะตอมเป็น พอลิคริสตัลออกไซด์ โดยรูปร่างโครงสร้างของผลึกคริสตัลมี 3 เฟส คือ มอนอคลินิก เตตราโกนอล และคิวบิก



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของผลึกคริสตัลของเซอร์โคเนียแต่ละชนิด
เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ⁽⁵⁾

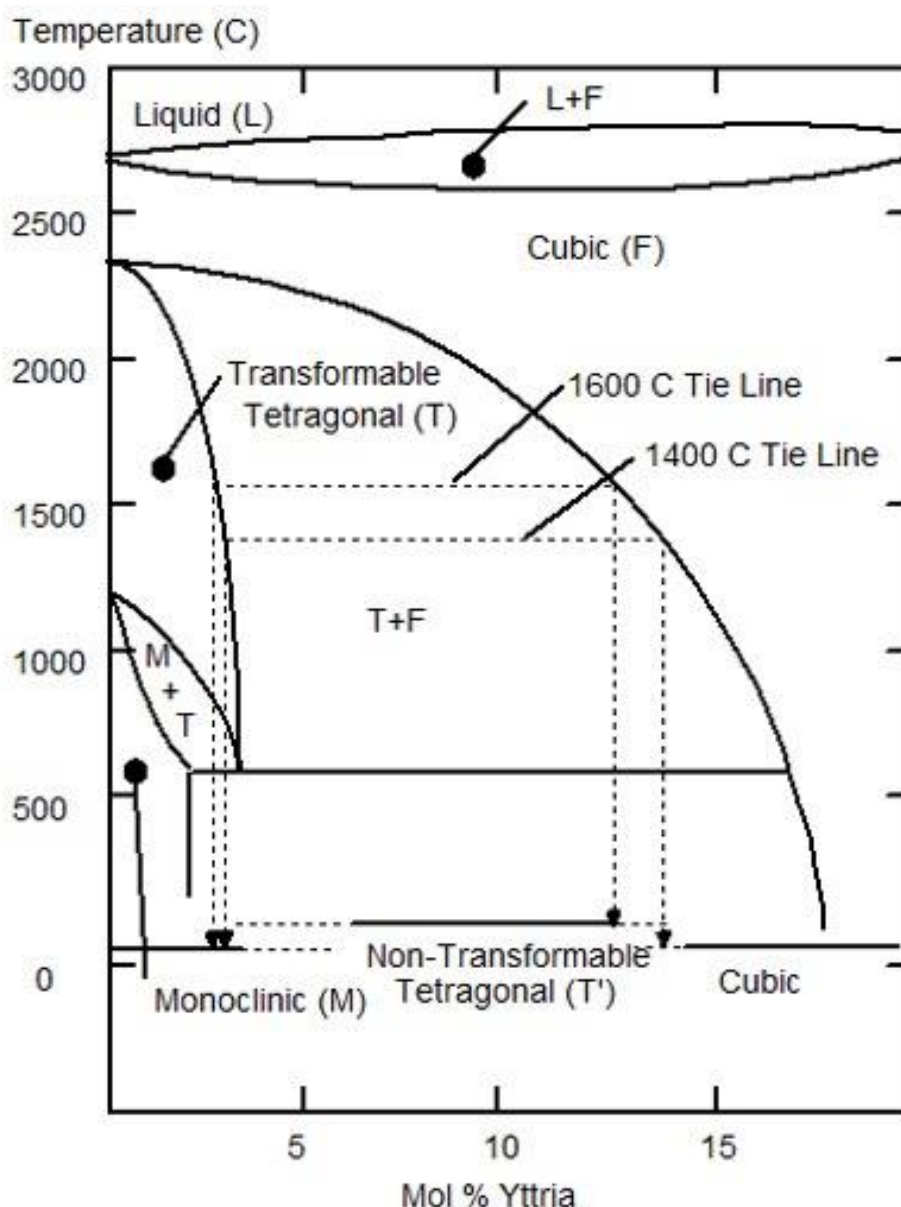
เซอร์โคเนียบริสุทธิ์เป็นผลึกรูปร่างมอนอกลิคที่อุณหภูมิห้อง และเสถียรไปจนถึง 1170 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเปลี่ยนรูปผลึกเป็นเตตราโกนอล และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2370 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นผลึกรูปคิวบิก จนถึงจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 2680 องศาเซลเซียส และในระหว่างการลดลงของอุณหภูมิจนอุณหภูมิต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนกลับมาเป็นมอนอกลิค อีกครั้ง ซึ่งส่งผลให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น 3-4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดแรงเค้นจากการขยายปริมาตรของผลึกคริสตัล ทำให้เกิดรอยร้าวและเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ

จากปัญหาดังกล่าวมีการศึกษาที่พบว่า สามารถทำให้เกิดความเสถียรของเซอร์โคเนียที่อุณหภูมิห้องได้โดยการเติมออกไซด์บางชนิด เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ซีเซียมออกไซด์ (CeO₂) และยิทเทรียมออกไซด์ (Y₂O₃) เข้าไปเป็นส่วนผสมในเซอร์โคเนีย ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดย Ruff และคณะ ในปี ค.ศ.1929 โดยเซอร์โคเนียที่ถูกพัฒนาในช่วงแรกๆ มีผลึกหลายเฟสอยู่ร่วมกัน เรียกว่า Partially Stabilized Zirconia (PSZ) ต่อมาในปี ค.ศ.1975 Garvie และคณะศึกษาพบว่า ผลึกเตตราโกนอล มีการเปลี่ยนเป็นมอนอกลิค ในบริเวณปลายรอยร้าวเมื่อมีแรงมากระทำ ประกอบกับผลึกมอนอกลิค มีปริมาตรมากกว่าผลึกเตตราโกนอล 3-5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดแรงบีบอัดที่ปลายของรอยร้าว ส่งผลให้ต้านการขยายตัวของรอยร้าวได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างผลึก ต้องมีการใช้พลังงานไปส่วนหนึ่ง ทำให้พลังงานที่ใช้ในการขยายรอยร้าวลดลง จึงเรียกสมบัตินี้ว่า การเพิ่มกำลังความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปร่าง (Transformation toughening)



รูปที่ 2 กระบวนการการเพิ่มกำลังความแข็งแรง
จากการเปลี่ยนรูปร่าง (Transformation toughening)⁽¹⁶⁾

ระบบ PSZ ที่ได้รับความนิยม คือ ระบบที่มีการเติมยิบเทรียมออกไซด์เป็นส่วนผสมในเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ เพราะพัฒนาให้เกิดเฉพาะผลึกเตตราโกนอล ขณะที่อยู่อุณหภูมิห้องได้ เรียกว่า Tetragonal Zirconia Polycrystals (TZP)



รูปที่ 3 เฟสไดอะแกรมของระบบยิทเรียม-เซอร์โคเนีย⁽¹⁷⁾

2.2 สมบัติของเซอร์โคเนีย⁽¹⁾

2.2.1 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility)

Ichikawa และคณะ ในปี ค.ศ.1992 ทำการศึกษาโดยการฝังแท่งเซอร์โคเนียเซรามิกรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และความยาว 10 มิลลิเมตร ในหนูทดลอง ภายหลังจาก 3 เดือนพบว่า ไม่มีปฏิกิริยาต่อต้านใดๆ จากนั้นนำแท่งเซรามิกที่เอาออกมาจากหนูทดลอง มาทดสอบสมบัติกำลังแรงดัด พบว่าไม่มีการเปลี่ยนสมบัติทางกลเมื่ออยู่ในร่างกายสิ่งมีชีวิต

2.2.2 ความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Inertness)

ที่มีขนาดตามกำหนดของ ISO:1995 สำหรับวัสดุทางทันตกรรม มาแช่ในกรดแอสติริก ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง แล้วดูการละลายของ

เซอโรโคเนียเซรามิก พบว่ามีการละลายของเซอโรโคเนียต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด จึงสรุปได้ว่า เซอโรโคเนีย มีคุณสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี

2.2.3 สมบัติเชิงกล

Takagi และคณะ ในปี ค.ศ.1985 ทำการศึกษาสมบัติของเซอโรโคเนียเซรามิกชนิดที่ประกอบด้วยปริมาณยิบเบอเรียมออกไซด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 0.8 ไมครอน พบว่ามีค่าความเหนียวของการแตกหัก 8.4 เมกะปาสคาล ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น 200 จิกะปาสคาล และกำลังแรงดัด 1,000 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าอะลูมินาเซรามิก 2 เท่า แต่ถ้าปริมาณยิบเบอเรียมออกไซด์มากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลง

2.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Fused Deposition Modeling (FDM) ^(6,7)

2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์

Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติชนิดหนึ่ง ริเริ่มในปี ค.ศ. 1990 โดยบริษัท stratays และยังเป็นผู้นำทางด้านการผลิตเครื่องพิมพ์สามมิติในโลก เครื่องพิมพ์สามมิติที่มีพื้นฐานทางเทคโนโลยีเดียวกันสามารถเรียกได้อีกหลายแบบ เช่น fused filament fabrication (FFF), plastic jet printing (PJP), material extruding printer, Fused Deposition Ceramics (FDC) เป็นต้น

2.3.2 ส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM

เครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมการฉีดกับระบบควบคุมตำแหน่งที่ฐานวางชิ้นงานและระบบเชิงกลที่ช่วยในการเคลื่อนที่ของฐานวางชิ้นงาน ประกอบไปด้วย ฐานรองชิ้นงาน หัวฉีด (nozzle หรือ printer head) และวัตถุดิบในรูปของเส้นใย

2.3.2.1 ฐานรองชิ้นงาน (printer bed)

เป็นส่วนที่รองรับวัสดุที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 120 องศาเซลเซียส

2.3.2.2 หัวฉีด (nozzle/printer head)

เป็นส่วนที่ให้ความร้อนกับเส้นวัสดุที่ป้อนเข้ามาจากส่วนควบคุมการป้อนวัสดุ หรือ Extruder โดยอุณหภูมิที่หัวฉีดนี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 190 ถึง 250 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับวัสดุของหัวฉีดมีขนาดอยู่ที่ 0.2 ถึง 0.8 มิลลิเมตร รูที่มีขนาดเล็กจะทำให้ฉีดวัสดุออกมาได้ละเอียด ทำให้ได้ชิ้นงานที่เรียบเนียนยิ่งขึ้น โดยเครื่องที่ใช้มีขนาด 0.4 มิลลิเมตร หัวฉีดของ FDM เคลื่อนที่ด้วยระบบทางกลที่ใช้สายพานหรือระบบสกรู ส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์สามมิติสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนว X Y และ Z

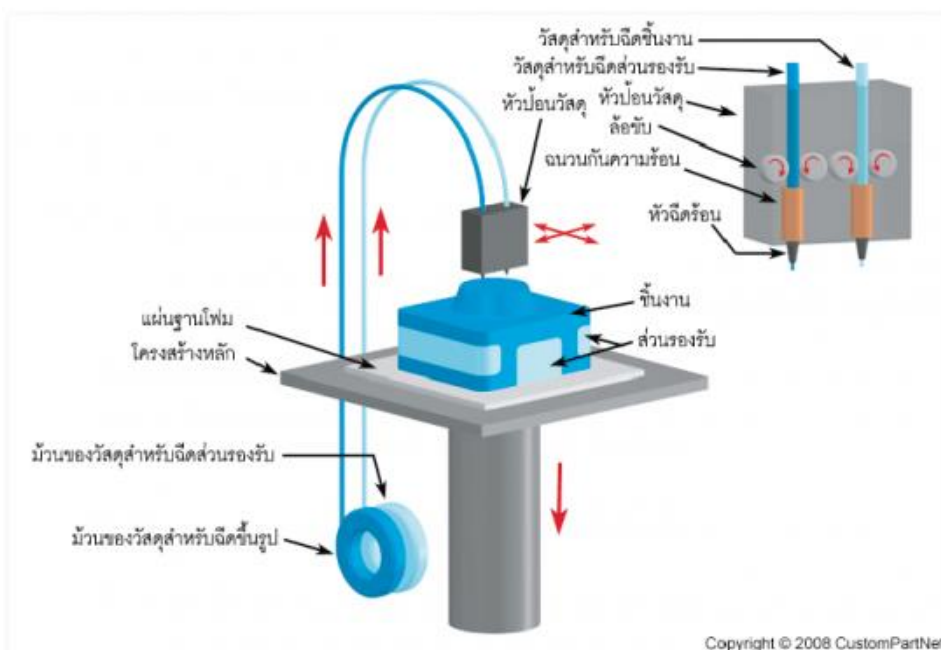
โดยระบบมอเตอร์เรียกว่าสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) การเคลื่อนที่ทั้งหมดของหัวฉีดและมอเตอร์ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

2.3.3 วัสดุพิมพ์

วัสดุพิมพ์ส่วนใหญ่ใช้เทอร์โมพลาสติกซึ่งจะหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและจะแข็งตัวเมื่อถูกทำให้เย็นลง เส้นใยเทอร์โมพลาสติกบนชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นรอยคล้ายขดลวด ไม่เรียบเนียน

2.3.4 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ

เมื่อเครื่องพิมพ์ 3 มิติเริ่มทำงาน วัสดุพิมพ์ที่อยู่ในลักษณะเส้นใยบางๆจะถูกอัดฉีดผ่านหัวฉีดร้อนและหลอมเหลวไปอยู่ที่ด้านล่างของฐานรองชิ้นงานจากนั้นแข็งตัว และชั้นถัดไปที่ถูกอัดฉีดจะหลอมติดกับชั้นล่างขณะยังร้อนอยู่และจะแข็งตัว สร้างเป็นชั้นขึ้นไปจนเสร็จกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ⁽⁷⁾

2.4 ตัวเชื่อมประสาน

การใส่ตัวเชื่อมประสานลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียรในขั้นตอนระหว่างการผสมวัสดุพิมพ์และการขึ้นรูป โดยลักษณะตัวเชื่อมประสานที่ดีควรมีความยืดหยุ่น เป็นวัสดุที่กำจัดได้ง่าย ไม่เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ควรถูกส่งผลกระทบต่อรูปร่างและสมบัติของชิ้นงานหลังกำจัดออกไป โดยการวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวเชื่อมประสาน 3 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลบิวไทรอล

2.4.1 พอลิเอทิลีนไกลคอล^(4,9)

สารประกอบพอลิเอเทอร์ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยา มีจุดหลอมเหลวประมาณ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนไกลคอล อาจถูกเรียกว่า พอลิเอทิลีนออกไซด์ หรือ พอลิออกซีเอทิลีน ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล โดยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนไกลคอลยังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่บอกสถานะ หน้าที่ และการนำไปใช้

ตาม USPNF 23 ได้ระบุไว้ว่า พอลิเอทิลีนไกลคอล เกรด 200-600 จะอยู่ในสถานะของเหลว มีลักษณะขุ่น หนืด สีเหลืองอ่อนหรือใส มีกลิ่นเฉพาะตัวและขมปนรสเผ็ดร้อนเล็กน้อย ในขณะที่เกรด 1,000 ขึ้นไปจะอยู่ในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวหรือสีขาวนวล การนำไปใช้งาน คือ สารพื้นฐานในยาที่มีส่วนผสมขี้ผึ้ง สารเพิ่มความยืดหยุ่น ตัวทำละลาย สารพื้นฐานในยาเหน็บ สารหล่อลื่นในยาเม็ดหรือแคปซูล เป็นต้น

2.4.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์⁽¹⁰⁾

เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือ สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพ และติดไฟได้คล้ายกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ การใช้งานของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

2.4.3.1 อาศัยคุณสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และแขวนลอยต่างๆ ข้นขึ้น (คือใช้ เป็น thickening agent) และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วน

2.4.3.2 นำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่สามารถละลายแล้วจึงนำมาใช้ งาน ซึ่งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็น อย่างดี (ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์นี้สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสีกรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี

2.4.3 พอลิไวนิลพิวไทรอล⁽⁹⁾

เป็นโพลิเมอร์ที่ไม่มีสี เสถียรต่อแสง และมีหมู่ไฮดรอกซิล (ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติด) มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110 องศาเซลเซียส มักถูกนำไปใช้ทำกระจกปลอดภัย ใ้ เป็นสารเติมแต่งในการทำให้เหนียว และยืดหยุ่นได้โดยเฉพาะกาวที่ใช้ในการประกอบเครื่องบิน

2.5 การกำจัดตัวเชื่อมประสาน⁽¹⁸⁾

การกำจัดตัวเชื่อมประสานพบได้ 2 วิธี คือ การใช้ตัวทำละลาย และ การใช้ความร้อน

2.5.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ตัวทำละลาย

ของเหลวที่ใช้กำจัดตัวประสาน เช่น ตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำ เป็นต้น องค์ประกอบของตัวเชื่อมประสานจะมีทั้งละลายได้และไม่เกิดการละลาย ตัวเชื่อมประสานที่ไม่ละลายจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดของผงวัสดุให้คงรูปร่างอยู่ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถกำจัดตัวเชื่อมประสานได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

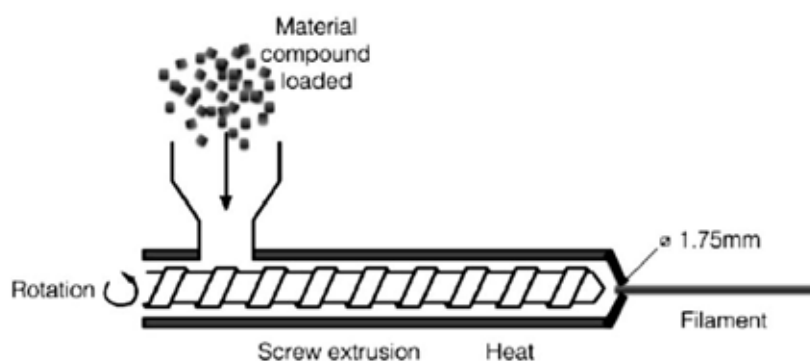
ของตัวเชื่อมประสานที่อยู่ในงานด้วยวิธีการแพร่ โดยมีปัจจัยที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการแพร่ของโมเลกุลตัวเชื่อมประสานเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น

2.5.2 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ความร้อน

ตัวเชื่อมประสานถูกกำจัดโดยความร้อนด้วยการเพิ่ม พอลิเมอร์จะย่อยสลายด้วยการระเหยแพร่กระจายออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยจะต้องกำจัดตัวเชื่อมประสานออกให้หมดก่อนถึงจะสามารถนำไปในกระบวนการเผาผนึกต่อไปได้

2.6 กระบวนการขึ้นฟิลาเมนต์⁽¹⁹⁾

เมื่อผสมส่วนผสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำส่วนผสมมาขึ้นฟิลาเมนต์เพื่อที่จะนำไปใช้สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยจะใช้เครื่องรีดที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ถึง 1200 องศาเซลเซียส และขนาดหัวรีด 1.75 มิลลิเมตร

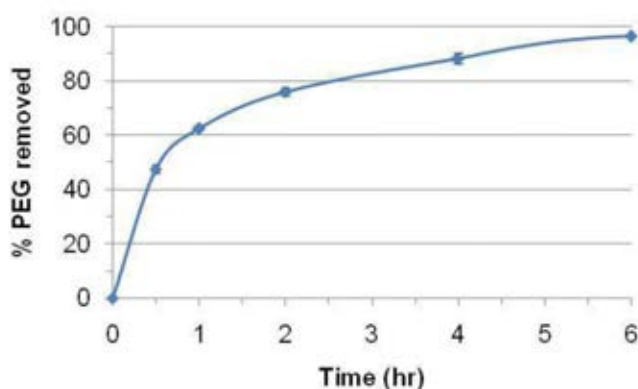


รูปที่ 5 กระบวนการขึ้นฟิลาเมนต์⁽¹⁹⁾

เนื่องจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM ค่อนข้างที่จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของฟิลาเมนต์ ซึ่งควรมีขนาดเส้นประมาณ 1.75 มิลลิเมตร ดังนั้นการขึ้นเส้นฟิลาเมนต์จะต้องมีความแม่นยำของขนาดที่ค่อนข้างแน่นอน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nutthita Chuankrerkkul และคณะ⁽¹¹⁾ ได้ศึกษาสมบัติและโครงสร้างของ Zirconia Toughened Alumina (ZTA) จากการขึ้นรูปด้วยวิธี Powder Injection Moulding พบว่า การขึ้นรูป ZTA ด้วยวิธีนี้ต้องอาศัย ตัวเชื่อมประสานช่วยในการขึ้นรูปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของ green body และ leaching body โดยพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นตัวเชื่อมประสานที่ละลายในน้ำได้ สามารถกำจัดออกจากชิ้นงานได้ด้วยการชะล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชิ้นงานสามารถคงรูปอยู่ได้ด้วย พอลิไวนิลพิวโรลซึ่งสามารถกำจัดออกด้วยกระบวนการกำจัดตัวเชื่อมประสานที่ 450 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปเผาผนึก นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่า เซอร์โคเนียใน ZTA ยับยั้งการโตของเกรนอะลูมินาที่ผิดปกติและช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และความทนทานต่อการแตกหัก ซึ่งสมบัติเชิงกลเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอล ในระยะเวลาต่างๆกัน ใน ZTA ที่ 50vol%⁽¹¹⁾

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นและความแข็งของ ZTA ที่ 48-52 vol% ⁽¹¹⁾

Powder loading	Density (g/cm ³)	Theoretical density (%)	Hardness (kg/mm ²)
48 vol%	4.05 ± 0.05	95.2	2116 ± 111
50 vol%	4.08 ± 0.07	96.1	1999 ± 179
52 vol%	4.12 ± 0.03	97.0	2093 ± 155

ตารางที่ 2 ความแข็งแรงของ ZTA ที่ 48-52 vol% ในช่วงต่างๆ ⁽¹¹⁾

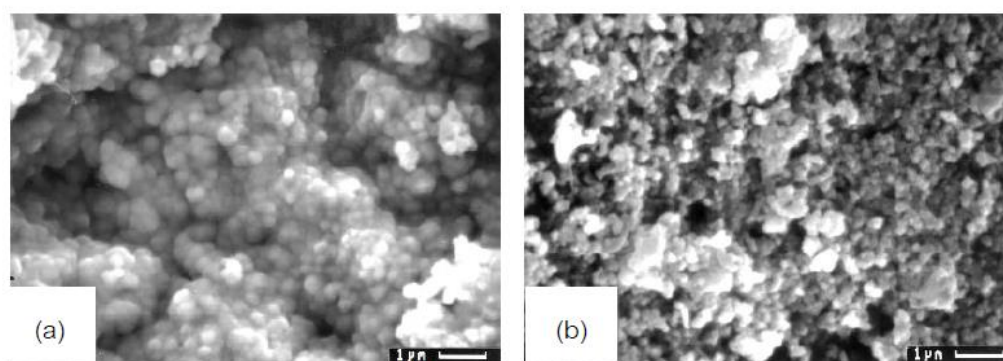
Powder loading	Green strength (MPa)	Brown strength (MPa)	Sintered strength (MPa)
48 vol%	5.98 ± 0.66	8.36 ± 0.90	261.3 ± 87.5
50 vol%	6.90 ± 0.90	10.00 ± 0.86	262.7 ± 41.9
52 vol%	9.90 ± 1.34	13.35 ± 0.90	334.1 ± 90.4

Wantanee Buggakupta และคณะ⁽¹²⁾ ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำในการกำจัดตัวเชื่อมประสานชนิดละลายน้ำได้ จากการขึ้นรูปด้วยวิธี Powder Injection Moulding พบว่า ส่วนผสมของอะลูมินา และ อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ที่ถูกขึ้นรูปด้วยวิธี Powder Injection Moulding และนำมาผสมกับตัวเชื่อมประสาน คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล และพอลิไวนิลบิวไทรอล ในการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เพื่อกำจัดพอลิเอทิลีนไกลคอลออกไปก่อน และต่อมากำจัดพอลิไวนิลบิวไทรอล ด้วยการใช้ความร้อน ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการสลายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยที่อุณหภูมิของน้ำที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนไกลคอล จะเห็นได้ชัด และสามารถกำจัดออกจากชิ้นงานโดยใช้เวลาเพียง 5 ชั่วโมง ในทางกลับกันพอลิไวนิลบิวไทรอล ยังคงอยู่ภายในชิ้นงาน และจะพบว่า อัตราในการกำจัดพอลิเอทิลีนไกลคอล ในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Powder Injection Moulding ไม่ค่อยแตกต่างกันมาก ถ้าหากใช้ผงวัสดุ และขนาดของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของ PEG ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่าง ๆ กัน⁽¹²⁾

debinding time (hours)	water temperature used for PEG removal					
	30 °C		45 °C		60 °C	
	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /WC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /WC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /WC
0.5	30.93 ± 1.31	30.12 ± 1.01	46.05 ± 0.75	46.49 ± 1.34	50.51 ± 0.82	52.58 ± 1.85
1	40.45 ± 1.16	40.49 ± 0.66	62.43 ± 1.40	61.81 ± 2.11	64.73 ± 1.22	65.79 ± 0.80
2	49.42 ± 0.92	50.13 ± 0.52	78.73 ± 1.14	79.44 ± 1.67	82.35 ± 1.11	83.26 ± 2.42
3	60.79 ± 1.06	59.87 ± 0.22	91.25 ± 0.99	86.88 ± 2.18	92.01 ± 0.63	89.30 ± 0.87
4	65.07 ± 1.09	64.49 ± 0.64	93.75 ± 0.66	94.04 ± 1.13	94.14 ± 0.61	96.02 ± 0.53
5	70.67 ± 0.99	69.42 ± 0.17	98.72 ± 0.71	99.05 ± 0.57	99.43 ± 0.44	99.81 ± 0.04

J. Tseng และคณะ⁽¹³⁾ ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเซอร์โคเนีย เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผงวัสดุเพียงอย่างเดียวกับการเติมตัวเชื่อมประสานหลังจากการเติมตัวเชื่อมประสาน โดยเตรียมผงเซอร์โคเนียที่ประกอบด้วยยิทเทรียมออกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ขนาดผงอนุภาคเท่ากับ 0.25 ไมครอน ตัวประสานที่ใช้ได้แก่ พาราฟิน ไวนิลอะซิเตตและกรดสเตียริก โดยปริมาณของผงวัสดุมีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมเข้ากันด้วยวิธีบดผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นฉีดขึ้นรูปขึ้นงานเป็นแท่งกระบอกขนาด 4 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร x 60 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันในการฉีด 100 เมกะปาสคาล จากการศึกษาพบว่า หลังผ่านวิธีการกำจัดตัวเชื่อมประสานขึ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุผงเซอร์โคเนียเพียงอย่างเดียวเทียบกับการใส่ตัวเชื่อมประสานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวที่มีตัวเชื่อมประสานเกิดเป็นรูพรุนของขึ้นงาน ส่วนขึ้นงานที่มีเพียงผงวัสดุเซอร์โคเนียเพียงอย่างเดียวมีอนุภาคผงเรียงชิดติดกัน

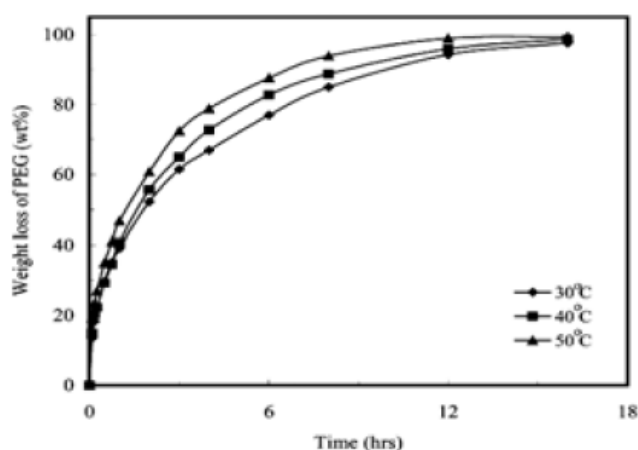


รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของขึ้นงาน

(a) ไม่เติมตัวเชื่อมประสาน (b) เติมตัวเชื่อมประสาน⁽¹³⁾

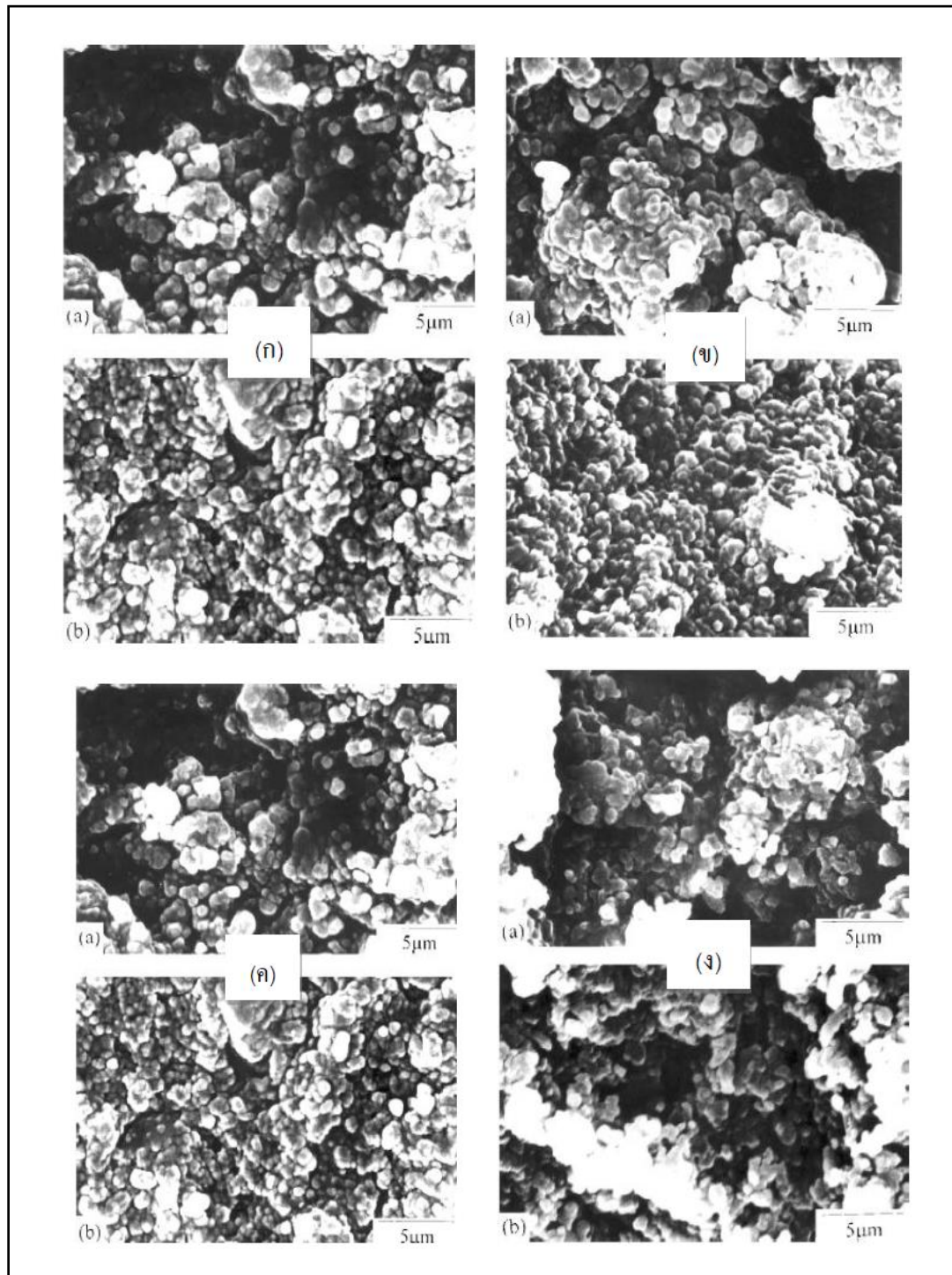
W. Yang และคณะ⁽¹⁴⁾ ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อน้ำของการกำจัดตัวประสานที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยเตรียมผงอะลูมินาและตัวประสาน และกำจัดตัวประสานด้วยการละลายน้ำ ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พาราฟินไซ และกรดสเตียริก อัตราส่วนของอะลูมินาและตัวประสานเท่ากับ 55 และ 45 ใน

อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยปริมาณ ผิดขึ้นรูปให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาด 75 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร x 4 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำไปแช่น้ำที่มีอุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 นาทีถึง 8 ชั่วโมง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า การแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พอลิเอทิลีนไกลคอลละลายออกจากชิ้นงานได้เร็วกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะที่เดียวกันอัตราปฏิกิริยาของการกำจัดตัวประสานสามารถเกิดได้สูงในช่วงเวลาเริ่มต้นและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและในเนื้อของอะลูมินามีแนวโน้มที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกำจัดตัวประสาน กลไกในการกำจัดตัวประสานเกี่ยวข้องกับวิธีการแพร่จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ และจะเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3.5 ชั่วโมง และสิ้นสุดปฏิกิริยาของการกำจัดตัวประสาน



รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิของการกำจัดตัวเชื่อมประสานต่อการกำจัดตัวเชื่อมประสาน ชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยวิธีการแช่น้ำ ณ เวลาต่างๆ⁽¹⁴⁾

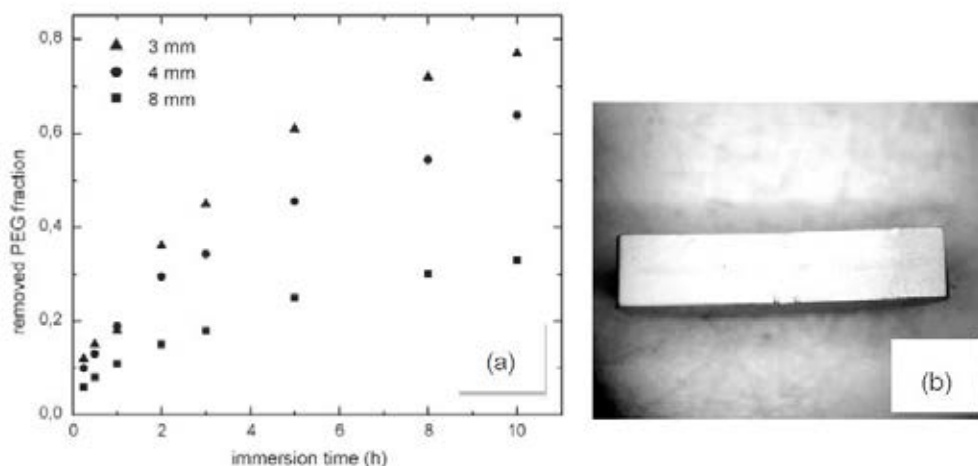
จากรูปที่ 8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมินา เห็นได้ว่า รูป (ก) คือ ชิ้นงานหลังขึ้นรูป (a) ผิวหน้าของชิ้นงานมีการเกาะรวมตัวกันของผงวัสดุกับตัวเชื่อมประสานชนิด PEG อย่างหนาแน่น ส่วน (b) ภายในเนื้อชิ้นงานมีลักษณะเช่นเดียวกับผิวหน้าของชิ้นงานแต่มีลักษณะการเกาะกันของผงวัสดุกับตัวเชื่อมประสานที่หนาแน่นกว่าชัดเจน รูป (ข) เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 นาที (a) ผิวหน้าของชิ้นงานเริ่มเกิดช่องว่างเมื่อตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ถูกละลายในจำนวนเล็กน้อย ส่วน (b) ภายในชิ้นงานเกิดการละลายของตัวเชื่อมประสานเช่นเดียวกับผิวหน้าแต่เกิดได้น้อยกว่า รูป (ง) เมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง (a) ผิวหน้าของชิ้นงานเริ่มเกิดช่องว่างมากเมื่อตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลถูกละลาย และอัตราการละลายเริ่มลดลง ส่วน (b) ภายในชิ้นงานเกิดช่องว่างอย่างชัดเจน



รูปที่ 9 โครงสร้างรอยหักชิ้นงานอลูมินา (a) ผิวหน้าชิ้นงาน (b) ภายในชิ้นงาน โดย (ก) หลังจากฉีดยื่นรูป (ข) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (ค) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ง) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง⁽¹⁴⁾

จุฬาทพ สุรวัดนา⁽¹⁸⁾ ศึกษาผลของการฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้ตัวประสานร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลบิวไทรอล ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยการแช่น้ำและให้ความร้อนตามลำดับ ประกอบด้วยการทดลอง 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองหาปริมาณผงวัสดุต่อตัวประสานที่สามารถฉีดขึ้นรูปด้วยผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีอัตราส่วน 90 : 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีอัตราส่วนของตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลต่อพอลิไวนิลบิวไทรอล คือ 85 : 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนของตัวประสานครั้งที่ ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของตัวประสานที่เหมาะสม อัตราส่วนตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 90 85 80 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนตัวประสานชนิด พอลิไวนิลบิวไทรอล ร้อยละ 10 15 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวประสานชนิดพอลิไวนิลบิวไทรอล เริ่มการสลายพันธะตั้งแต่อุณหภูมิ 100 จนถึง 470 องศาเซลเซียส และ ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล กำจัดโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามวัสดุผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 44 46 48 50 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนปริมาณรูพรุนที่ปรากฏจะให้ผลตรงข้าม ความแข็งของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามวัสดุผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น สมบัติที่กล่าวมามีความสอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

V.A. Krauss และคณะ⁽¹⁵⁾ ศึกษาการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยการแช่น้ำ โดยเตรียมผงอะลูมินากับตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลบิวไทรอลโดยปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลบิวไทรอลในอัตราส่วน 2:1 ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ลักษณะชิ้นงานเป็นแท่งทรงกลมความยาว 165 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 24 - 28 มิลลิเมตร และมีความหนาต่างๆกันคือ 3 4 และ 8 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่าขนาดความหนาของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปของผงอะลูมินากับตัวประสานมีผลต่อการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลถูกกำจัดออกจากชิ้นงานได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 8 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป หลังการผ่านการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลชิ้นงานยังสามารถคงรูปอยู่ได้

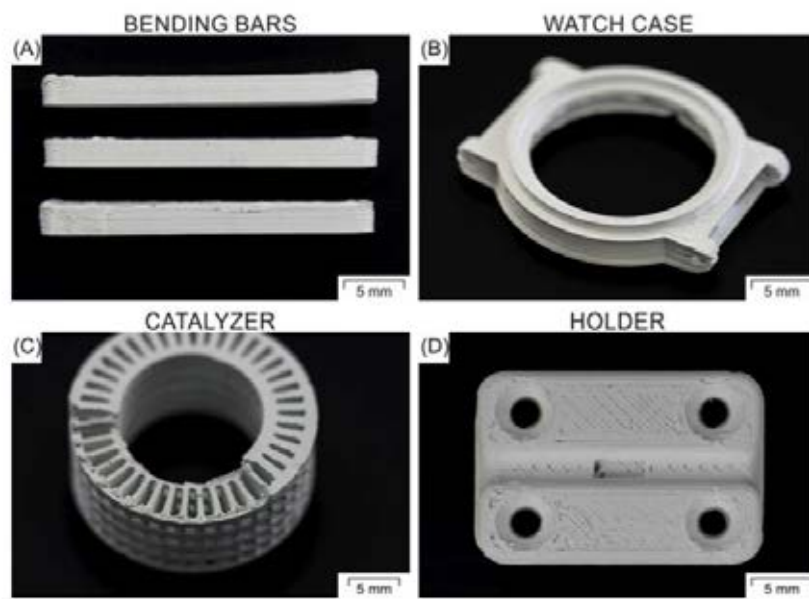


รูปที่ 10 ขนาดความหนาของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป

(a) สัดส่วนของตัวเชื่อมประสานที่ถูกกำจัดออกเปรียบเทียบกับความหนา

(b) ภายถ่ายชิ้นงานหลังจากกำจัดตัวเชื่อมประสานที่เวลา 3 ชั่วโมง⁽¹⁵⁾

Santiago Cano และคณะ⁽²⁰⁾ ได้ศึกษาการขึ้นรูปชิ้นส่วนเซอร์โคเนียด้วยเทคนิค Fused Filament Fabrication (FFF) และการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยสารละลาย โดยงานวิจัยนี้ใช้สารตั้งต้นเป็นผงเซอร์โคเนีย ตัวเชื่อมประสาน 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น backbone คือ AA-HDPE ส่วนที่เป็น surfactant คือ กรดสเตียริก ป้องกันการจับตัวเป็นก้อน ส่วนที่เป็นตัวเชื่อมประสานตัวหลักที่ละลายในสารละลาย แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นตัวเชื่อมประสานที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความแข็งแรง ความหนืดต่ำพอประมาณและสามารถละลายได้ดีในไซโคลเฮกเซน คือ amorphous polyolefin aerafin 180 (APO) และ styrene-ethylene/butylene-styrene copolymer MD1625 (SEBS) ส่วนที่ 2 เป็นตัวเชื่อมประสานที่มีความหนืดต่ำและการบวมพองต่ำขณะกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยสารละลาย คือ parafin wax (PW) และ extender oil (EO) จากนั้นนำมาผสมกันตามอัตราส่วน โดยอัตราส่วนของผงเซอร์โคเนีย 47 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์ กำจัดตัวเชื่อมประสานโดยใช้สารละลาย ผลคือ สามารถกำจัดตัวเชื่อมประสาน 55.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ออกไปได้ พบรูพรุนภายในเชื่อมกัน 29 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่งานวิจัยนี้ยังไม่สามารถเผาผนึกให้มีความหนาแน่นสูงได้



รูปที่ 11 ชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Fused Filament Fabrication (FFF)

(a) ทรงแท่งสี่เหลี่ยม (b) เคสนาฬิกาข้อมือ (c) ตัวคะตะลิสต์ (d) ที่ยึด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงให้เป็นเส้นยาวๆ ที่เรียกว่าฟิลาเมนต์ เพื่อนำไปใช้ในการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM โดยใช้ตัวประสานที่ประกอบไปด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลบิวไทรอล เป็นหลัก รวมถึงสารหล่อลื่นที่ใช้ คือ กรดสเตียริก เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วจะกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีการใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ซึ่งบทนี้ได้กล่าวถึง วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ตัวแปรในการทดลอง การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง ตารางการดำเนินงานวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุประสงค์หลักที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ผงเซอร์โคเนีย (3% Y_2O_3 Stabilized ZrO_2 จากบริษัท Inframat Advanced Materials)

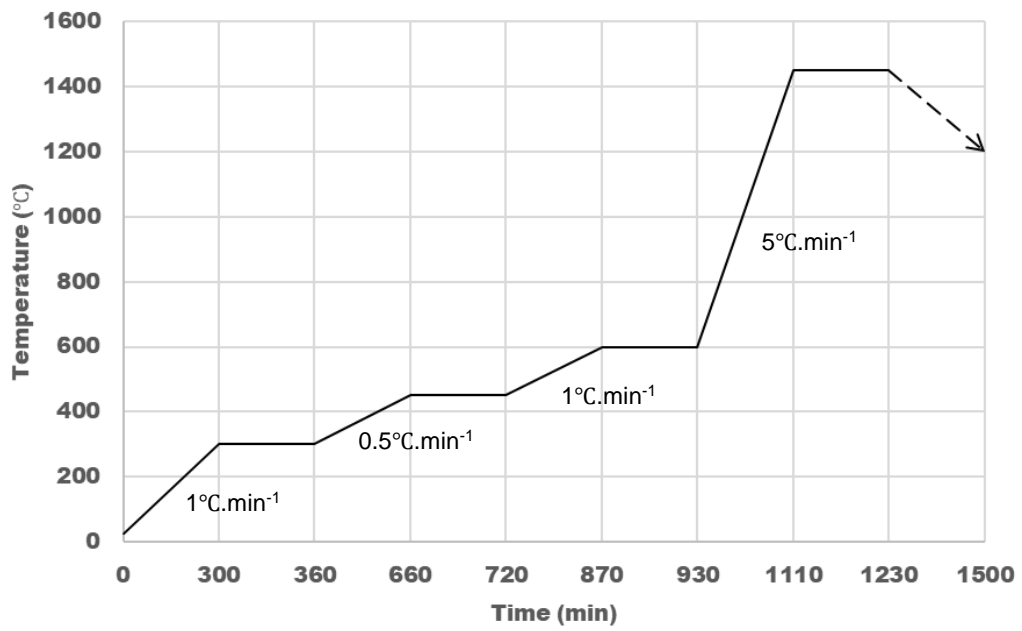
สำหรับตัวประสานที่แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล โมเลกุลเฉลี่ย 6000 จากบริษัท Ajax Finechem, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โมเลกุลเฉลี่ย 9000 จากบริษัท Aldrich และพอลิไวนิลบิวไทรอล จากบริษัท Sekisui

สารหล่อลื่น คือ กรดสเตียริก จากบริษัท Panreac

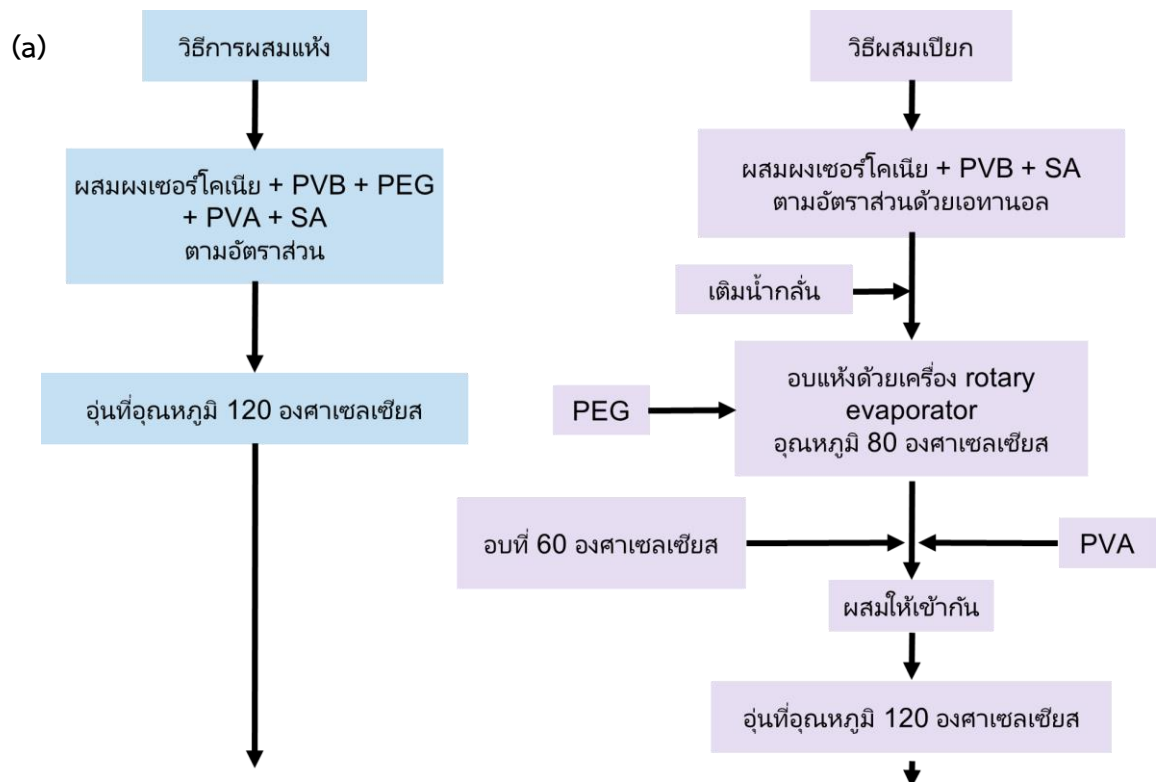
3.2 ตัวแปรในการทดลอง

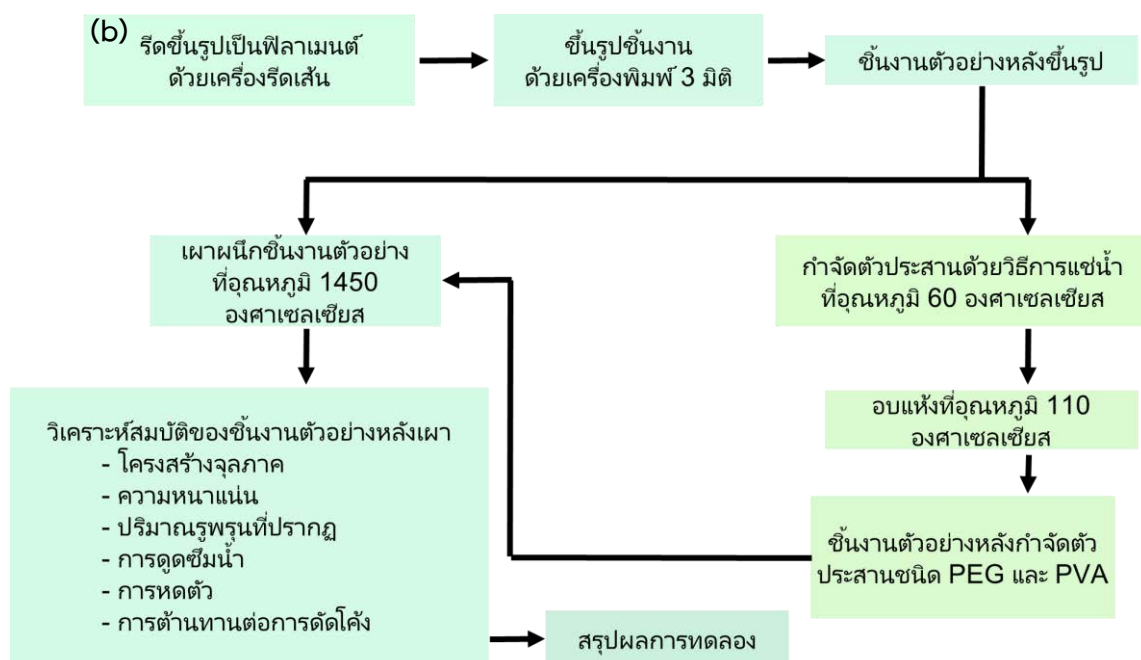
3.2.1 การออกแบบการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมของตัวเชื่อมประสานชนิด พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลบิวไทรอล ในชิ้นงานเซอร์โคเนียชนิดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์โดยการแปรผันอัตราส่วนของตัวประสาน เพื่อเป็นวัตถุประสงค์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมากำจัดตัวประสานด้วยวิธีแช่น้ำและเผาผนึกตามตารางการเผา ดังแสดงในรูปที่ 11 รวมไปถึงนำชิ้นงานไปเผาผนึกโดยไม่ได้ผ่านกระบวนการแช่น้ำเพื่อกำจัดตัวประสาน ซึ่งรูปแบบการทดลองเป็นไปตามขั้นตอนในแผนผังงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ตารางการเผา





รูปที่ 13 แผนผังงานวิจัยการเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูง

ด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ (a) ขั้นตอนการผสมส่วนผสม (b) ขั้นตอนหลังจากการผสมส่วนผสม

3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

3.2.2.1 ละลายส่วนผสมพอลิไวนิลบิวไทรอล และกรดสเตียริกในสารละลายแอลกอฮอล์เอทานอล 200 ml

3.2.2.2 เติมผงเซอร์โคเนียลงไปผสม และเติมน้ำกลั่น 100 ml

3.2.2.3 นำไปอบแห้งด้วยเครื่อง rotary evaporator

3.2.2.4 ละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และนำผงแห้งมาผสมให้เข้ากัน

3.2.2.5 เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปผสม และนำไปอุ่นที่ 120 องศาเซลเซียส

3.2.3 การขึ้นฟิลาเมนต์ และฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

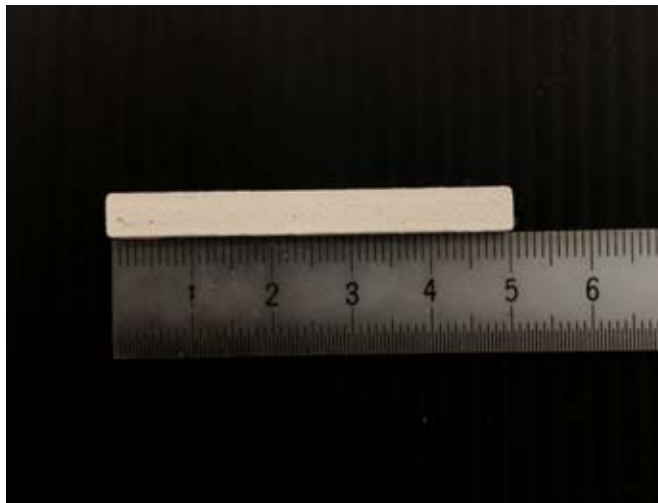
3.2.3.1 นำผงส่วนผสมมาฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 14

3.2.3.2 นำตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์แล้วไปเป็นวัตถุดิบสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ดังแสดงในรูปที่ 15

3.2.3.3 ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยตั้งค่าเครื่องพิมพ์ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงการตั้งค่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

	แท่งสี่เหลี่ยม
ขนาด (mm)	50 x 5 x 3
หัวฉีด (mm)	0.4
ความหนาชั้น (mm)	0.12
อุณหภูมิ (°C)	
- หัวฉีด	220-235
- ฐานรองชิ้นงาน	100
Infill	
- ความหนาแน่นชิ้นงาน	100%
- รูปแบบ	เส้นตรง
ความเร็ว (mm/s)	
- ความเร็วที่พิมพ์	35
- ความเร็วที่เคลื่อนที่	50



รูปที่ 14 ชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM



รูปที่ 15 เครื่องฉีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์



รูปที่ 16 เครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM

3.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

3.3.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่น

การกำจัดตัวเชื่อมประสาน และสารหล่อลื่น ทำได้โดยการแช่น้ำ และการเผาให้ความร้อน ก่อนกำจัดตัวประสานนำชิ้นงานตัวอย่างชั่งน้ำหนักแล้วจดบันทึกค่าน้ำหนัก (W_1) เอาไว้ ต่อจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปเผาผืนิก จากนั้นนำชิ้นงานชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง (W_2) โดยวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ตัวเชื่อมประสาน กับ กรดสเตียริกที่ถูกกำจัด ดังนี้

$$3.4.2.1 \text{ น้ำหนักตัวเชื่อมประสาน กับ กรดสเตียริกที่หายไป} = W_1 - W_2$$

$$3.4.2.2 \text{ การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่น} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

3.3.2 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุนปรากฏ และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา

ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาหรือความหนาแน่นรวม โดยใช้หลักอาร์คิมิดีสทำได้โดยนำชิ้นงานเข้าเครื่องสุญญากาศ เพื่อดูดอากาศที่อยู่ภายในออกให้หมด ทิ้งไว้ 30 นาที เทน้ำให้ท่วมชิ้นงานแล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างชิ้นงานชั่งน้ำหนักเปียก (W_{sat}) น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในน้ำ (W_{sus}) นำชิ้นงานอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (W_{dry}) คำนวณความหนาแน่นรวม (W_{total}) และปริมาณรูพรุนจริงที่ปรากฏ โดยวิธีการคำนวณหา มีดังนี้

$$\begin{aligned}
 3.3.2.1 \text{ ความหนาแน่นรวม} &= \left(\frac{W_{dry}}{W_{sat}-W_{sus}} \right) \times \rho_{water} \\
 3.3.2.2 \text{ ปริมาตรรูพรุนปรากฏ} &= \left(\frac{W_{sat}-W_{dry}}{W_{sat}-W_{sus}} \right) \times 100 \\
 3.3.2.3 \text{ การดูดซึมน้ำ} &= \left(\frac{W_{sat}-W_{dry}}{W_{dry}} \right) \times 100
 \end{aligned}$$

3.3.3 ความต้านทานต่อการตัดโค้ง

ความต้านทานต่อการตัดโค้งของวัสดุด้วยวิธีการทดสอบแรงตัดโค้งแบบ 3 จุด โดยใช้เครื่องทดสอบรุ่น Hungta-HT-8116 นำชิ้นงานขนาดความกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และสูง 3 มิลลิเมตร มาเผาผนึกแล้วบันทึกค่าความกว้าง ยาว และสูงหลังการเผา จากนั้นนำมาทดสอบแรงตัดโค้ง โดยกำหนดตัวแปร $L=2.4$ เซนติเมตร โดยวิธีการคำนวณหา มีดังนี้

$$3.3.3.1 \text{ ความต้านทานต่อการตัดโค้ง} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

3.3.4 การหัดตัวของชิ้นงาน

การวัดการหัดตัวของชิ้นงานเชิงเส้น ทำได้โดยขึ้นชิ้นงาน ขนาดความกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และสูง 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวัดขนาดเฉลี่ยชิ้นงาน (L) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหัดตัวหลังการเผาผนึก โดยวิธีการคำนวณหา มีดังนี้

$$3.3.4.1 \text{ การหัดตัวชิ้นงานหลังเผา} = \frac{L-L_f}{L} \times 100$$

3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานก่อนเผา ส่วนที่ 2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล และส่วนที่ 3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการเผาผนึก

3.4 ตารางการดำเนินงานวิจัย

การปฏิบัติ	สิงหาคม 2561	กันยายน - ตุลาคม 2561	พฤศจิกายน 2561	ธันวาคม 2561	มกราคม - เมษายน 2562	พฤษภาคม 2562
เตรียมสารและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	✓					
ขึ้นรูปฟิลาเมนต์				✓		
ขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM และนำไปกำจัดตัวประสาน				✓		
เผาตัวอย่างชิ้นงาน						✓
วิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างชิ้นงาน						✓
สรุปผลการวิจัย จัดทำรูปเล่ม						✓

บทที่ 4

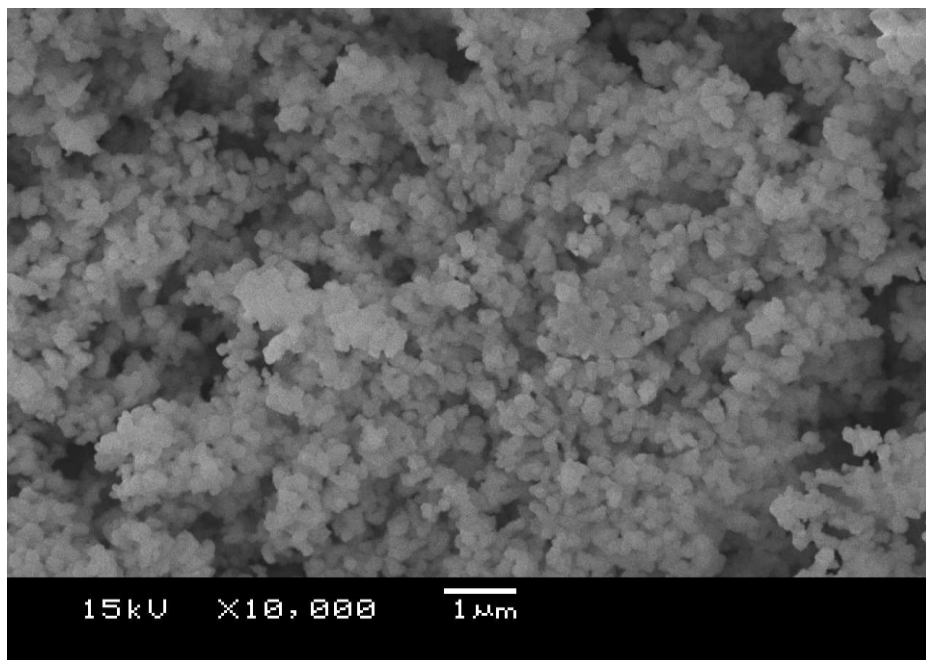
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตุดิบ การศึกษาผลการขึ้นฟิลาเมนต์ และการศึกษาสมบัติของชิ้นงาน ประกอบด้วย การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่น ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุนที่ปรากฏ และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา ความต้านทานต่อการดัดโค้ง การหดตัวของชิ้นงาน และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตุดิบ

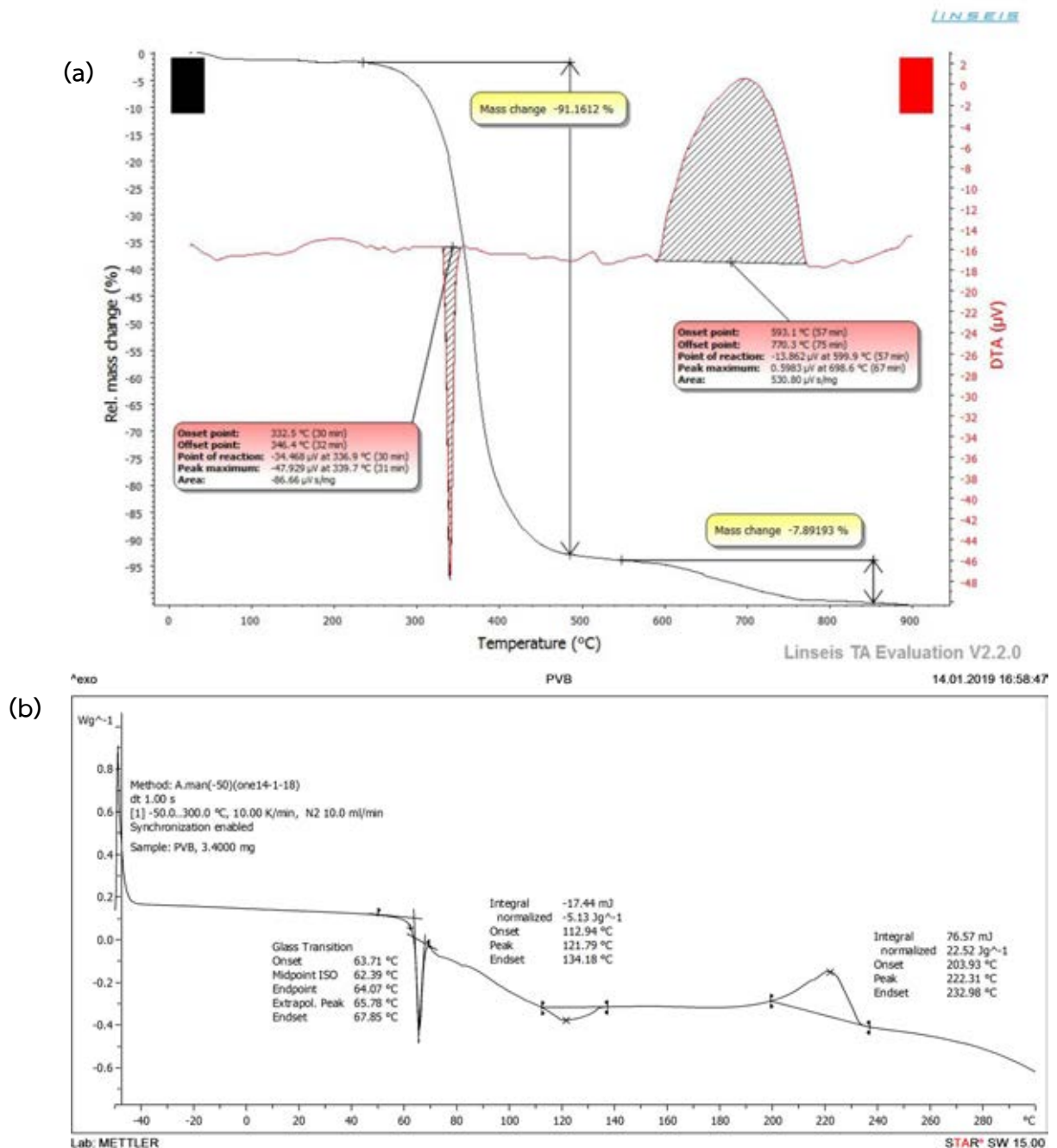
4.1.1 สัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเซอร์โคเนียสังเกตได้จากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่า ผงเซอร์โคเนียมีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดประมาณ 0.2-0.3 ไมครอน อนุภาคเกาะกลุ่มกัน



รูปที่ 17 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

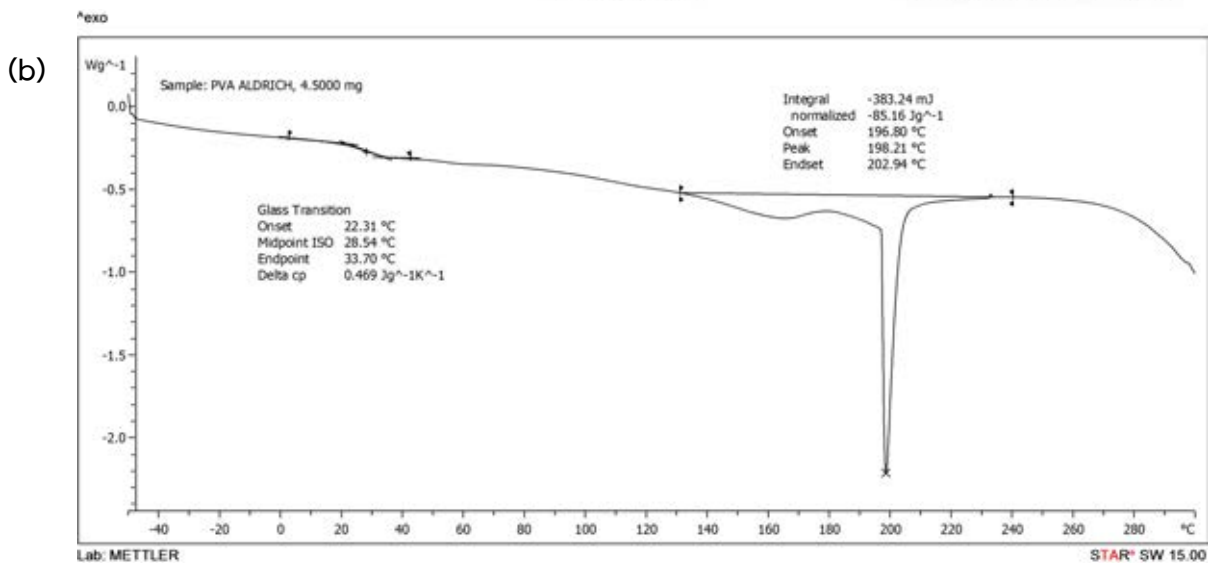
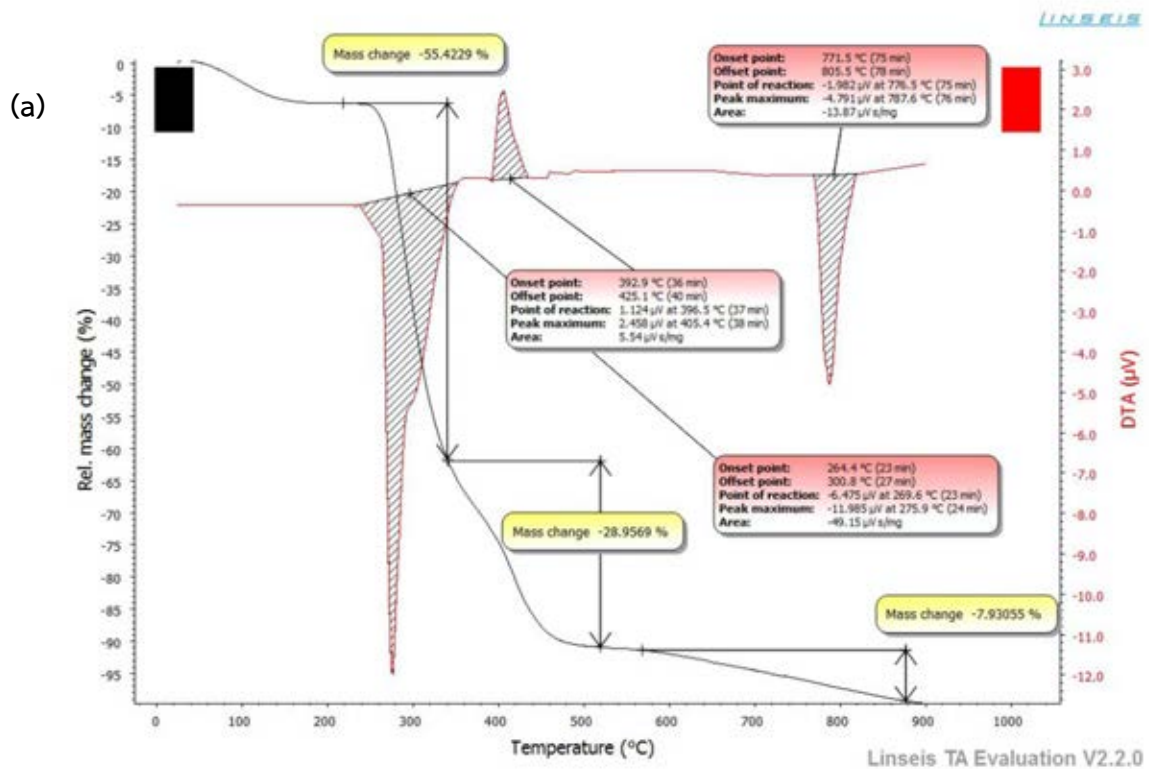
4.1.2 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อน



รูปที่ 18 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อน (a) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (b) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

จากกราฟรูปที่ 17 พบว่า พอลิไวนิลบิวไทรอลเริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิประมาณ 62 องศาเซลเซียส จากนั้นหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 121 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 17a เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 339 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 17b

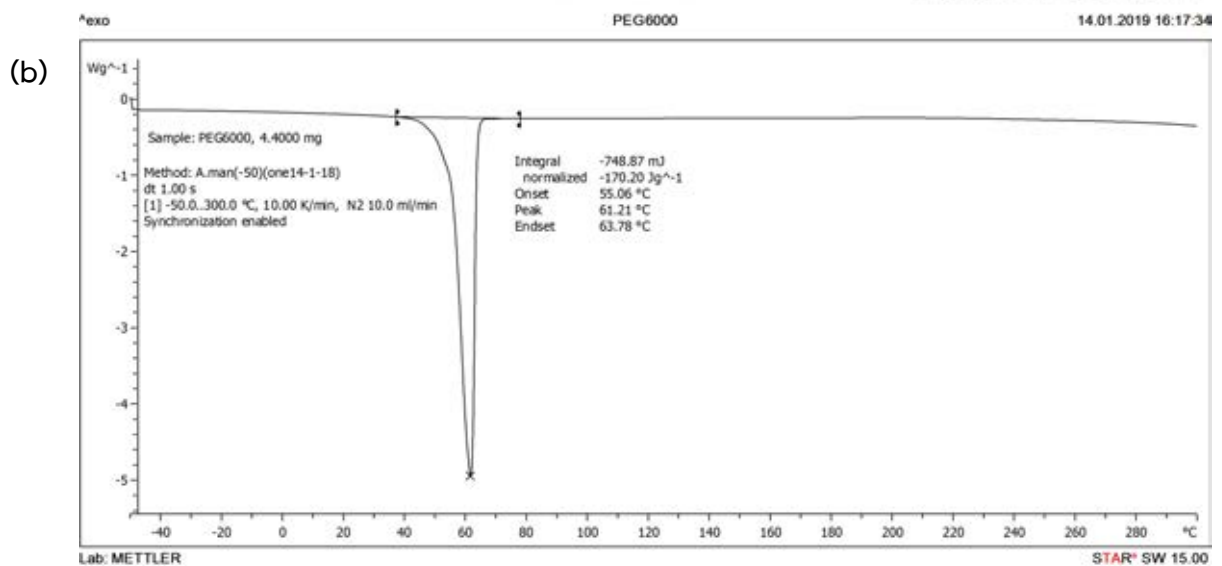
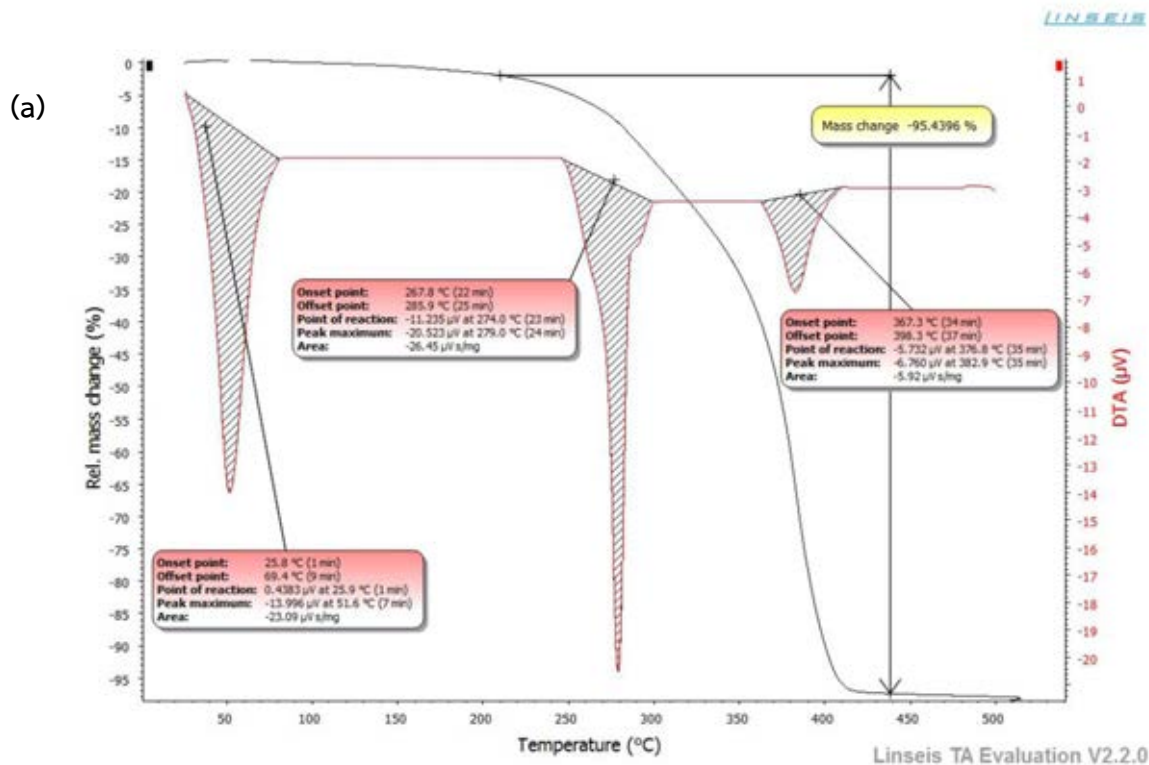
4.1.2 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อน



รูปที่ 19 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อน (a) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (b) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

จากกราฟรูปที่ 18 พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็น ยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิประมาณ 28 องศาเซลเซียส จากนั้นหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 198 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 18a เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 275 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 18b

4.1.3 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อน



รูปที่ 20 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อน (a) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (b) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

จากกราฟรูปที่ 19 พบว่า พอลิเอทิลีนไกลคอลเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 61 องศาเซลเซียส เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 279 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 19a และจากข้อมูลที่ได้จากกราฟ ไม่ทราบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ดังแสดงในรูปที่ 19b

4.1.4 อุณหภูมิต่างๆของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

จากการตรวจสอบการสลายตัวด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ทำให้สรุปอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature : T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature : T_m) และอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature : T_d) ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางแสดงอุณหภูมิ T_g , T_m และ T_d

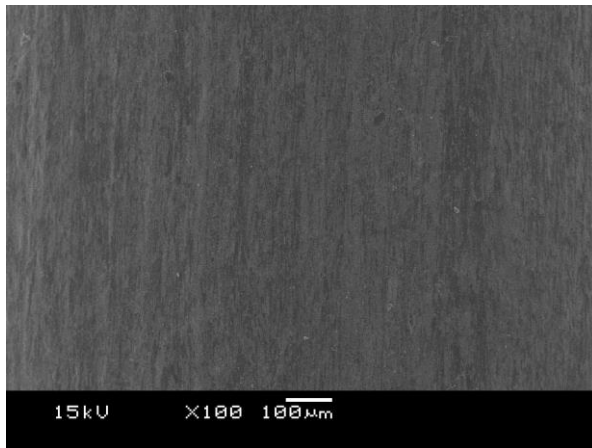
	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_d ($^{\circ}\text{C}$)
PVB	62.39	121.79	339.7
PEG 6000	-	61.21	279
PVA 9000	28.54	198.21	275.9

หมายเหตุ ข้อมูลค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของ PEG 6000 ไม่ปรากฏในรูปที่ 19b

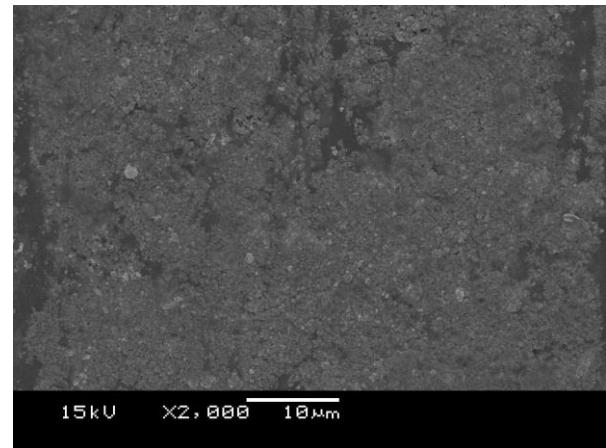
4.2 การศึกษาการขึ้นรูปฟิลาเมนต์

4.2.1 โครงสร้างทางจุลภาค

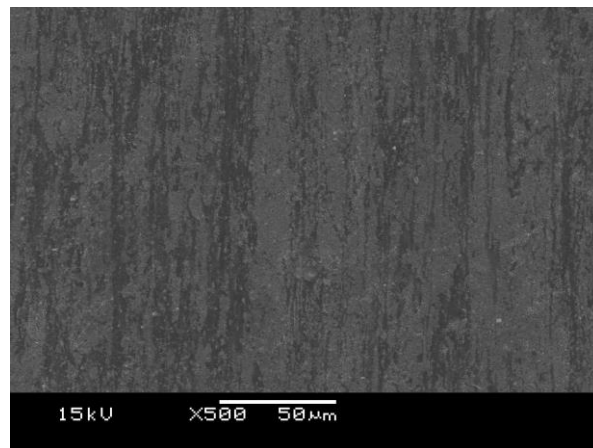
จากโครงสร้างจุลภาคของฟิลาเมนต์ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดเส้น สูตร Z13 ผสมเปียก ฉีดขึ้นเส้นด้วยความร้อน 190 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 21 พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเป็นริ้วตามทิศทางการฉีดขึ้นฟิลาเมนต์



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 21 โครงสร้างจุลภาคของฟิลาเมนต์ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดเส้น สูตร Z13 ที่กำลังขยายต่างกัน (a) กำลังขยาย 100 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า (c) กำลังขยาย 2000 เท่า

4.3 การศึกษาผลการขึ้นรูปชิ้นงาน

จากการทดลองผสมส่วนผสมในอัตราส่วนต่างๆ สูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM ได้ คือ สูตรส่วนผสม Z13 ผสมเปือก ดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจากขั้นตอนในการผสมแห้งไม่สามารถทำให้ฟิลาเมนต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ทำให้ไม่สามารถนำไปพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 22

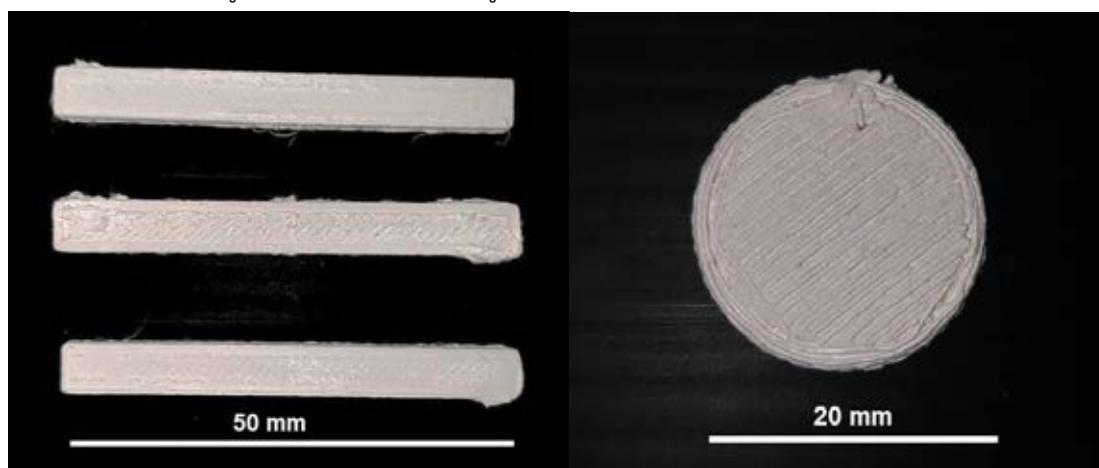


รูปที่ 22 Z13 ผสมแห้ง ชั้นล่างที่ออกมาแล้วแข็งตัว ไม่เชื่อมต่อกับชั้นบนที่ออกมาใหม่

ตารางที่ 6 แสดงอัตราส่วนผสมของส่วนผสมที่ใช้ทำการวิจัยนี้

ส่วนผสม Z13 ผสมเปียก	Vol%
PVB BL-10 Sekisui	10
PEG 6000 Ajak Finechem	18
SA Panreac	2
PVA 9000 Aldrich	45
3% Y ₂ O ₃ Stabilized ZrO ₂ Inframat Advanced Materials	25

จากการนำฟิลาเมนต์ สูตร Z13 ผสมเปียกมาขึ้นเป็นชิ้นงาน 3 มิติด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ได้ชิ้นงานเป็นรูปร่างต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 ตัวอย่างชิ้นงานสูตร Z13 ผสมเปียก ที่พิมพ์ได้

4.3 ผลการทดลองของชิ้นงาน

4.3.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นโดยไม่ผ่านการแช่น้ำ

การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นของชิ้นงานตัวอย่างของเซอรโคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก โดยไม่ผ่านการแช่น้ำ พบว่า สามารถกำจัดตัวเชื่อมประสานออกไปได้ทั้งหมดโดยวิธีการให้ความร้อน แต่ลักษณะชิ้นงานเกิดการโค้งงอ และมีการบวมพอง ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 ชิ้นงานหลังเผาที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ

4.3.2 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นโดยผ่านการแช่น้ำ

การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นของชิ้นงานตัวอย่างของเซอโรโคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก โดยผ่านการแช่น้ำ พบว่า สามารถกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นออกไปจากชิ้นงานได้หมดจากการให้ความร้อน ชิ้นงานสามารถคงรูปได้มากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 25 น้ำหนักชิ้นงานที่หายไปหลังการเผาผนึกคือน้ำหนักของตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นที่ออกไปจากชิ้นงาน ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปมีค่าเท่ากับ 40.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าที่ควรจะได้ไม่ควรเกิน 32.48 เปอร์เซ็นต์โดยทฤษฎี คำนวณจากสูตร Z13 ผสมเปียก จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีข้อบกพร่องมากมายเกิดขึ้นในการทดลองนี้ เช่น หลังจากการแช่น้ำเพื่อกำจัดตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2.5 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นงานขึ้นจากน้ำ จากนั้นทิ้งให้แห้ง พบว่าชิ้นงานติดกับภาชนะเนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ยังกำจัดไม่หมดละลายออกมากับน้ำที่ติดผิวชิ้นงาน ทำหน้าที่เสมือนกาวติดชิ้นงานกับภาชนะ ทำให้มีผิวชิ้นงานบางส่วนหลุดลอกไปเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 26 เป็นผลทำให้ค่าน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อน และเนื่องจากในขั้นตอนการพิมพ์ของชิ้นงาน ชิ้นงานแต่ละชิ้นยังไม่เชื่อมติดกันได้ดีพอ เมื่อถึงขั้นตอนในการแช่น้ำทำให้ชิ้นงานเกิดการแยกชั้น ดังแสดงในรูปที่ 27 ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ยังต้องมีการปรับปรุงในอนาคต



รูปที่ 25 ชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการแช่น้ำ



รูปที่ 26 ชิ้นงานที่กำลังทำการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง



รูปที่ 27 ลักษณะการเกิดการแยกชั้นของชิ้นงาน

4.3.3 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุนปรากฏ และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา

ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก หลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก มีความหนาแน่นต่ำมาก ความหนาแน่นเฉลี่ย 4.08 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ในขณะที่วัณโรพรุนปรากฏในชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก เกิดจากการกำจัดตัวประสานชนิดที่สามารถละลายในน้ำได้ คือ พอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยวิธีการแช่น้ำ มีค่า 31.33 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาตรรูพรุนปรากฏสูง นอกจากนี้การดูดซึมน้ำของชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก มีค่า 7.88 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 7 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก ยังมีข้อบกพร่องอีกมาก ทั้งในด้านความหนาแน่น รูพรุนปรากฏและการดูดซึมน้ำ ซึ่งยังต้องมีการพัฒนาต่อไป

4.3.4 ความต้านทานต่อการตัดโค้ง

ความต้านทานการตัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก ที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณตัวเชื่อมประสานเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังตารางที่ 6 การทดสอบความต้านทานการตัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความต้านทานการตัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากเผาผนึกมีค่าเท่ากับ 2.20 เมกะปาสคาล ดังแสดงในตารางที่ 7

4.3.5 การหดตัวของชิ้นงาน

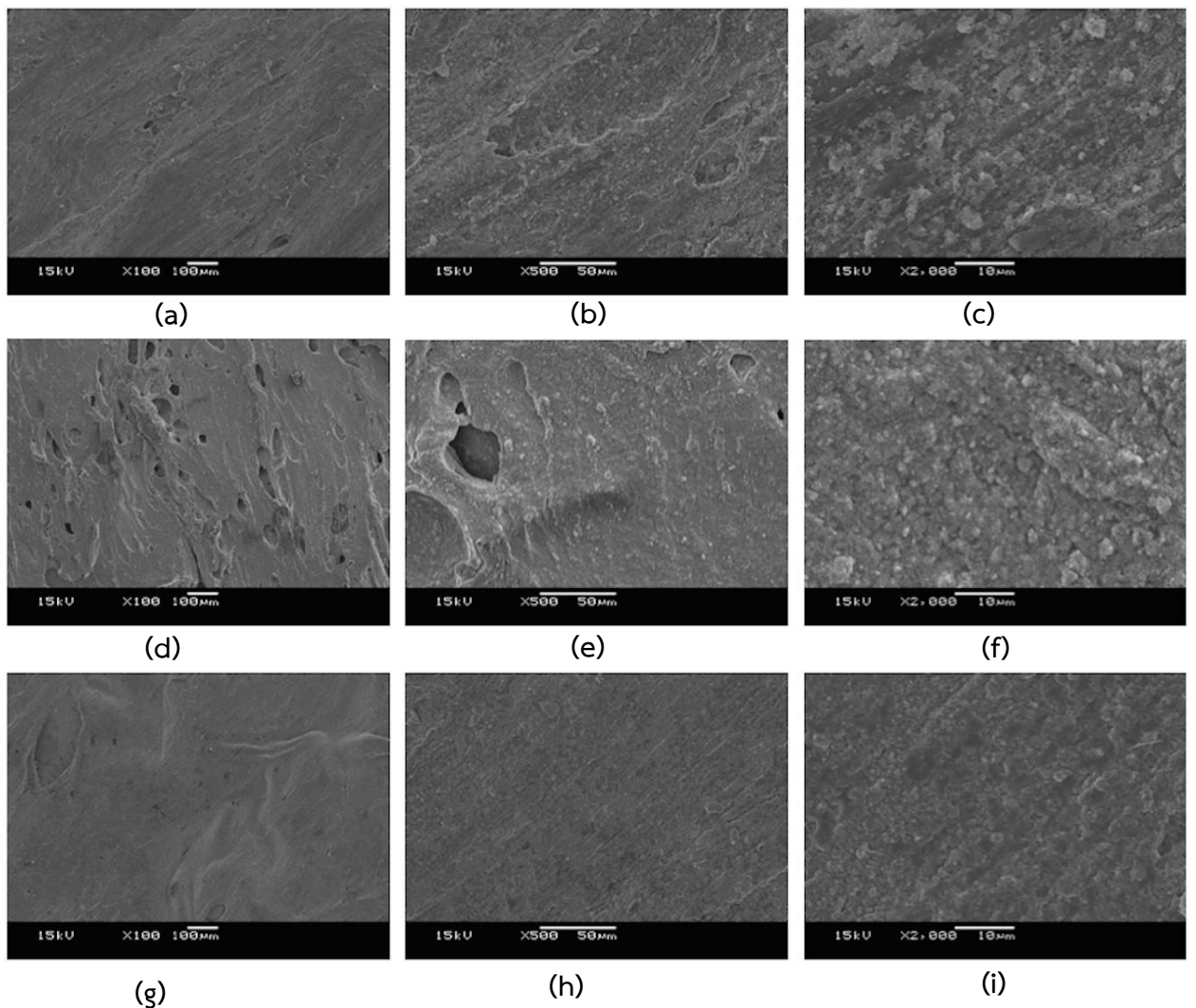
การหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก หลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานตัวอย่างมีค่าการหดตัวเฉลี่ย 25.91 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานหลังขึ้นรูป ดังแสดงในตารางที่ 7

4.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคส่วนของผิวหน้าชิ้นงานบริเวณเส้นที่ฉีดยกมาหัวฉีด

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก ส่วนของผิวหน้าชิ้นงานบริเวณเส้นที่ฉีดยกมาหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 20 พบว่า โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 21 (a-c) พื้นผิวมีลักษณะเป็นริ้วตามการฉีดยกของหัวพิมพ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังกำจัดตัวประสานด้วยวิธีการแช่น้ำ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2.5 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 21 (d-f) จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีรูพรุนและช่องว่างแทรกอยู่ เนื่องจากตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ถูกกำจัดออกไปจากชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 21 (g-i) พบว่า ปริมาณรูพรุนของชิ้นงานมีปริมาณลดลงหลังจากที่เผาผนึก

ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการศึกษาสมบัติชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก

สมบัติที่ศึกษา	
ความต้านทานการตัดโค้ง (MPa)	2.20 ± 0.49
ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	4.08 ± 0.42
ปริมาณรูพรุนปรากฏ (%)	31.33 ± 6.01
การดูดซึมน้ำ (%)	7.88 ± 2.20
น้ำหนักที่หายไปหลังเผา (%)	40.60 ± 0.71
การหดตัวของชิ้นงาน (%)	25.91 ± 5.92



รูปที่ 28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก ส่วนของผิวหน้าชิ้นงานบริเวณเส้นที่ฉีกออกมาหัวฉีดที่กำลังขยายต่างกัน

(a)-(c) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการขึ้นรูป

ที่กำลังขยาย 100 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

(d)-(f) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีแช่น้ำ

ที่กำลังขยาย 100 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

(g)-(i) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังการเผาผืนิก

ที่กำลังขยาย 100 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

แม้ว่าการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด FDM จะมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้และยังมีความรวดเร็ว แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องบางประการ อาทิเช่น การที่นำผงเซรามิก, ตัวเชื่อมประสาน และสารหล่อลื่นมาผสมเข้าด้วยกัน มีความยากที่จะทำให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ส่วนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปชิ้นงานผ่านหัวฉีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้เกิดรอยแตกบนชิ้นงาน รวมไปถึงความยากต่อการกำจัดรูพรุนออกจากชิ้นงานเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยวิธี FDM ซึ่งรูพรุนเหล่านั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน การเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นของชิ้นงานยังไม่เชื่อมติดกันได้ดีพอ อีกทั้งขั้นตอนในการกำจัดตัวเชื่อมประสานใช้เวลานาน และยังทำให้ชิ้นงานเสียรูปไปเล็กน้อย

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 วิธีการผสมเปื่อยสามารถขึ้นรูปฟิลาเมนต์ให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมมากกว่าการผสมแห้ง

5.1.2 สูตร Z13 ผสมเปื่อย สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ดีที่สุด

5.1.3 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยการให้ความร้อนโดยไม่ผ่านการแช่น้ำ ไม่สามารถคงรูปชิ้นงานหลังเผาได้

5.1.4 การกำจัดตัวเชื่อมประสานที่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการแช่น้ำและการให้ความร้อน ซึ่งการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการแช่น้ำช่วยคงรูปร่างของชิ้นงานหลังเผาได้ โดยไม่ทำให้ชิ้นงานพองตัวหลังเผา

5.1.5 ผิวด้านข้างของชิ้นงานมีลักษณะเป็นชั้นๆ เนื่องจากการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM

5.1.6 ผลการศึกษาสมบัติชิ้นงานหลังเผาสูตร Z13 ผสมเปื่อย พบว่า ชิ้นงานมีสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ ความต้านทานการดัดโค้ง (MPa) มีค่า 2.20 ± 0.49 MPa ความหนาแน่นรวม มีค่า 4.08 ± 0.42 g/cm³ ปริมาณรูพรุนที่ปรากฏ มีค่า 31.33 ± 6.01 % การดูดซึมน้ำ 7.88 ± 2.20 % น้ำหนักที่หายไปหลังเผา 40.60 ± 0.71 % และการหดตัวของชิ้นงาน 25.91 ± 5.92 %

5.2 อุปสรรค

5.2.1 สูตรการขึ้นเส้นและการปรับอุณหภูมิการรีดที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องรีดเส้นฟิลาเมนต์ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้และใช้ระยะเวลาในการช่อมานาน

5.2.2 ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเส้นฟิลาเมนต์ เมื่อนำมารีดผ่านหัวรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติทำให้หัวรีดอุดตัน ไม่สามารถพิมพ์ต่อได้

5.2.3 ตารางการเผายังไม่คงที่ จึงทำให้ชิ้นงานหลังเผาพองและโค้งงอ

5.3 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จตามที่คาดหวังไว้ได้ แต่ทว่าในการศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด FDM สามารถนำไปต่อยอดได้ในอนาคต จึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.1 การศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถพิสูจน์ได้ว่า ตัวเชื่อมประสานชนิด PEG, PVB และ PVA สามารถนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด FDM ได้

5.3.2 การผสมส่วนผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมีความสำคัญต่อการรีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์และขึ้นรูปชิ้นงาน

5.3.3 ควรมีการควบคุมความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงาน ความหนาของแต่ละชั้นของชิ้นงาน และอุณหภูมิของฐานรองชิ้นงานให้เหมาะสมกับรูปร่างของชิ้นงาน

5.3.4 หลังจากการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการแช่น้ำ จะต้องปล่อยให้แห้งค่อยๆ ระบายไปอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวเชื่อมประสานที่ออกไม่หมดมาทำหน้าที่เสมือนกาวติดชิ้นงานกับภาชนะ

5.3.5 เนื่องจากฟิลาเมนต์มีความแข็งและยาวจนไม่สามารถปิดฝาครอบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อควบคุมอุณหภูมิได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่หัวฉีดเส้นจึงไม่คงที่

เอกสารอ้างอิง

- (1) เทพรัตน์ เขมาลีลากุล, กัญญณ์ช์ สุพรรณการ. การบูรณะฟันด้วยเซอรโคเนียเซรามิก. (ม.ป.ป.).
- (2) วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมานุกุล. (2554). เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบเร็ว (rapid prototyping technologies). Technology promotion. 38(216): 071-076. สืบค้นจาก <https://www.scribd.com/document/62618331/เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบเร็ว>
- (3) MTECH. (2011). การพัฒนาระบบการผลิตรอบฟันและสะพานฟันเซอรโคเนียด้วยเทคโนโลยี Dental CAD/CAM/CNC. สืบค้นจาก <https://www.mtec.or.th/prnews/new-research/การพัฒนาระบบการผลิตรอบฟันและสะพานฟันเซอรโคเนียด้วยเทคโนโลยี-dental-cadcamcnc-0>
- (4) พิชญ์ ดิลกพัฒน์มงคล. (2553). โพลีเอธิลีนไคคอลมีประโยชน์หรือโทษอย่างไรกับร่างกายถ้ารับประทานเข้าไป. สืบค้นจาก http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/dic/QA_full.php?id=2234
- (5) BruxZir Full-strength vs. BruxZir Anterior - Choosing Between Transformation Toughening and Light Transmission. (n.d.). Chairside Magazine. 3(11). Retrieved from <http://glidewell.com/education/chairside-dental-magazine/volume-11-issue-3/bruxzir-full-strength-vs-anterior>
- (6) DesignTech. (n.d.). How Fused Deposition Modeling (FDM) Printers Work. Retrieved from <http://www.designtechsys.com/articles/working-fdm-3d-printers>
- (7) Admin. (22 ตุลาคม 2559). 3D printer Introduction. สืบค้นจาก <http://www.inventor-3d.com/3d-printer-introduction/>
- (8) ชมพูนุท บัวพรหมมี. (2560). ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิพรอพิลีนสำหรับเทคนิคการพิมพ์สามมิติแบบฟิวส์ดีโพลีชันโมเดอลิ่ง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, สาขาวิศวกรรมเคมี.
- (9) กัมปนาท หวลบุตตา. (28 มีนาคม 2560). พอลิเมอร์ที่ใช้ทางเภสัชกรรม (Pharmaceutical polymer). สืบค้นจาก <https://goo.gl/bKxEkd>
- (10) NT TECH ENGINEERING CO., LTD. (ม.ป.ป.). ENGINEERING PLASTICS. สืบค้นจาก <https://www.พลาสติกวิศวกรรม.com/>

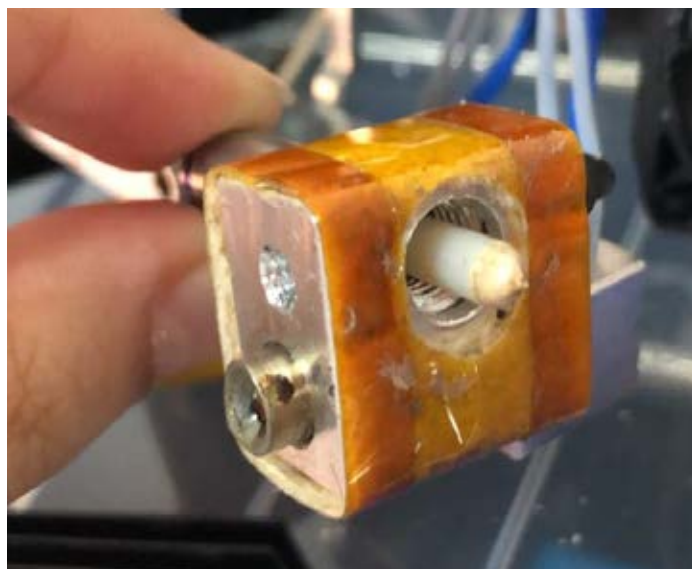
- (11) Nutthita Chuankrerkkul, Rattanaporn Charoenkijmongkol, Punnapa Somboonthanasarn, Chiraporn Auechalitanukul, & Ryan C. McCuiston. (2015). Microstructure and Properties of Zirconia Toughened Alumina Fabricated by Powder Injection Moulding. *Key Engineering Materials*, 659, 116-120.
- (12) Wantanee Buggakupta, Nutthita Cuankrerkkul, & Juthathep Surawattana. (2015). Effects of Water Temperatures on Water-Soluble Binder Removal in Ceramics Materials Fabricated by Power Injection Moulding. *Key Engineering Materials*, 659, 90-95.
- (13) Tseng, W. J. & Hsu, C.-K. (1999). Cracking defect and porosity evolution during thermal debinding in ceramic injection molding. *Ceramics International*, 25, 461-466.
- (14) Yang, W.-W., Yang, K.-Y., Wang, M.-C. & Hon, M.-H. (2003). Solvent debinding mechanism for alumina injection molded compacts with water-soluble binders. *Ceramics International*. 29, 745-756.
- (15) Krauss, V. A., Oliveira, A. A. M., Klein, A. N., Al-Qurashi, H.A. & Fredel, M. C. (2007). model for PEG removal from alumina injection molded parts by solvent debinding. *Journal of Materials Processing Technology*. 182, 268-273.
- (16) Encyclopaedia Britannica. (n.d.). Transformation toughening. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/transformation-toughening>
- (17) INSACO. (2011, Aug 24). The Forms and Phases of Zirconia Engineering Ceramics that Lead to High Strength and Toughness. Retrieved from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5780>
- (18) จุฬาทศ สรวิวัฒนา. (2554). การฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/พ้งสเดนคาร์ไบด์.(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์, สาขาวิชาเซรามิก
- (19) Lindsay V. Page. (June 2016). FEASIBILITY OF FUSED DEPOSITION OF CERAMICS WITH ZIRCONIA AND ACRYLIC BINDER. the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo
- (20) Santiago Cano et al. (2019). Additive manufacturing of zirconia parts by fused filament fabrication and solvent debinding: Selection of binder formulation. *Additive Manufacturing*, Volume 26, 117-128.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ปัญหาและอุปสรรคที่พบในขั้นตอนการวิจัย



รูปที่ 29 สกรูภายในเครื่องรีดเส้นฟิลาเมนต์ที่เกิดการหลุดตัน



รูปที่ 30 บริเวณภายในหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่เกิดการหลุดตัน

ภาคผนวก ข
สูตรอัตราส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

Raw Materials	A0			A1		
	Vol%	Mass%	Batch 25g	Vol%	Mass%	Batch 25g
PVB BL-10 Sekisui	10	4.32	1.39	15	6.49	1.39
PEG 6000 Ajak Finechem	40	18.07	5.82	35	15.83	5.82
Alumina	50	77.60	25.00	50	77.68	25.00
Sum	100	100.00	32.22	100	100.00	32.18
Polymer (vol%)	50			50		
Ceramic (vol%)	50			50		
PVB/(Cer+PVB) (vol%)	16.67			23.08		
PVB/(PVB+PEG) (Vol%)	20.00			30.00		

Raw Materials	A2			A3		
	Vol%	Mass%	Batch 25g	Vol%	Mass%	Batch 25g
PVB BL-10 Sekisui	18	8.76	3.13	20	8.66	2.78
PEG 6000 Ajak Finechem	42	21.36	7.64	30	13.58	4.37
Alumina	40	69.88	25.00	50	77.60	25.00
Sum	100	100.00	35.78	100	100.00	32.15
Polymer (vol%)	60			50		
Ceramic (vol%)	40			50		
PVB/(Cer+PVB) (vol%)	31.03			28.57		
PVB/(PVB+PEG) (Vol%)	30.00			40.00		

Raw Materials	A4			A5		
	Vol%	Mass%	Batch 25g	Vol%	Mass%	Batch 25g
PVB BL-10 Sekisui	30	13.02	4.18	50	21.78	6.96
PEG 6000 Ajak Finechem	20	9.07	2.91	0	0.00	0.00
Alumina	50	77.91	25.00	50	78.22	25.00
Sum	100	100.00	32.09	100	100.00	31.96
Polymer (vol%)	50			50		
Ceramic (vol%)	50			50		
PVB/(Cer+PVB) (vol%)	37.50			50.00		
PVB/(PVB+PEG) (Vol%)	60.00			100.00		

Raw Materials	C7			C8		
	Vol%	Mass%	Batch 25g	Vol%	Mass%	Batch 25g
PVB BL-10 Sekisui	10	5.51	1.86	10	5.50	1.39
PEG 6000 Ajak Finechem	28	16.13	5.43	18	103.5	2.62
SA	2	0.94	0.32	2	0.94	0.24
PVA 9000 Aldrich	30	18.04	6.08	40	23.99	6.08
Alumina	30	59.37	20.00	50	59.23	15.00
Sum	100	100.00	33.68	100	100.00	25.33
Polymer (vol%)	70			50		
Ceramic (vol%)	30			50		

Raw Materials	C9		
	Vol%	Mass%	Batch 25g
PVB BL-10 Sekisui	10	5.90	1.67
PEG 6000 Ajak Finechem	18	11.11	3.14
SA	2	1.01	0.29
PVA 9000 Aldrich	45	28.98	8.20
Alumina	25	53.00	15.00
Sum	100	100.00	28.30
Polymer (vol%)	75		
Ceramic (vol%)	25		