



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเพิ่มประสบการณ์

ชื่อโครงการ การขึ้นรูปเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์โครงสร้างพรุนตัว
ด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ

Fabrication of Porous Structured Hydroxyapatite Ceramics
by 3D Printing Technique

ชื่อนิสิต 1. นางสาวชญาณิชฐ์ ศรีประดิษฐ์ เลขประจำตัว 5833210023
2. นางสาวพิมพ์ภาภรณ์ ใจเพ็ชร์ เลขประจำตัว 5833248023

ภาควิชา วัสดุศาสตร์
แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการงานทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการงานทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

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

การขึ้นรูปเซรามิกไฮดรอกซิอะพาไทต์โครงสร้างพรุนด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

1. นางสาวชญาณิชฐ์ ศรีประดิษฐ์ เลขประจำตัว 5833210023
2. นางสาวพิมพ์ภาภรณ์ ใจเพชร เลขประจำตัว 5833248023

อนุมัติโดย



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย	การขึ้นรูปเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทด์โครงสร้างพรุนตัวด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ
โดย	นางสาว ชญานิษฐ์ ศรีประดิษฐ์ นางสาว พิมพ์ภรณ์ ใจเพชร
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาทดลองการทำวัสดุโครงสร้างพรุนตัวเพื่อใช้ทางการแพทย์ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modeling) ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันและมีราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภทอื่นๆ โดยเราจะเตรียมเส้นพลาสติกที่ใช้เซรามิกผสมกับเทอร์โมพลาสติกชนิดที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน 3 มิติ และชิ้นงานสามารถคงรูปได้ โดยการกำจัดวัสดุเชื่อมประสานที่ละลายน้ำได้ด้วยการละลายน้ำก่อน แล้วจึงนำไปเผากำจัดวัสดุเชื่อมประสานที่เหลือ เพื่อให้การยุบตัวน้อยลง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมเซรามิกพรุนไฮดรอกซีอะพาไทด์สำหรับงานขึ้นส่วนกระดูกด้วยการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติก และเพื่อลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนทางการแพทย์ ให้สามารถผลิตชิ้นส่วนกระดูกที่จำเพาะเจาะจงต่อผู้ป่วยแต่ละรายได้ โดยงานวิจัยนี้มีการทดลองโดยใช้อัตราส่วนในการทำเส้นใยสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้อัตราส่วนของไฮดรอกซีอะพาไทด์และวัสดุเชื่อมประสาน คือ 25 : 75 โดยปริมาตร จากผลการวิจัยพบว่าการผสมด้วยวิธีการผสมเปียกเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการทำเส้นใยเนื่องจากเส้นที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานหลังเผาคงรูปได้ดี ไม่เกิดการโก่งตัว โค้งงอ แต่ชิ้นงานไม่มีความแข็งแรงจึงไม่สามารถหาค่าได้ และมีความพรุนตัวแต่ยังไม่มากพอ จากผลทดสอบเหล่านี้พบว่ายังไม่สามารถนำไปใช้ในการขึ้นรูปวัสดุโครงสร้างพรุนตัวสำหรับการนำไปใช้เป็นโพรงเลี้ยงเซลล์ได้เนื่องจากต้องความพรุนตัวและความแข็งแรงที่สูงกว่านี้

Title Fabrication of Porous Structured Hydroxyapatite Ceramics by 3D Printing Technique

Authors Miss Chayanit Sripradit
Miss Pimpaporn Jaipetch

Department Materials Science

Advisor Asst Prof Dr. Thanakorn Wasanapiarnpong

Academic Year 2018

Abstract

This study is interested in studying and experimenting with making porous structural materials for medical with 3D printing technology, Fused Deposition Modeling, which is the most popular 3D printer currently available because it has very low price compared to other 3D printers. We will prepare filaments that use ceramics mixed with soluble thermoplastics and not soluble in water. Making it able to be molded into 3-dimensional workpieces and can be maintained by eliminating soluble welding materials. First dissolving the water and then sintering to eliminate the remaining welding materials to make the collapse less. The first objective of this research is to study the preparation of porous hydroxyapatite ceramics for bone parts by 3D printing, plastic injection molding system. The second is to reduce the cost of producing medical parts to be able to produce bone parts that are specific to each patients In this research, the experiment was conducted the forming with 3D printers using the ratio of hydroxyapatite and the welding material at 25 : 75 by volume. Found that wet mixing is the best way to make fibers because homogeneous and can be used with 3D printer. For testing the specimen properties, it was found that the work pieces have well shape stability but it not strong, cannot be obtained, and have not enough porosity. It is still not possible to be used in forming a porous structural material for use as a cell cavity due to the higher porosity and strength requirement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จจลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณความช่วยเหลือด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คอยชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานวิจัยครั้งนี้

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับคำแนะนำ และการตรวจแก้ไขรูปเล่ม วิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเคมีและเทคโนโลยีวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ โครงการส่งเสริมนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้แผนพัฒนาการวิชาการจุฬา 100 ปี ที่ให้งบประมาณและเงินทุนในการทำวิจัยและนำเสนอผลงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือ SEM จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยอบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจอีกทั้งมอบ โอกาสและประสบการณ์ที่มีคุณค่ามาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วรรณกรรม.....	3
2.1.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยา.....	3
2.1.2 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ.....	5
2.2 เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูป Fabrication of Porous Structured Ceramics.....	6
2.2.1 วัสดุเซรามิกพรุน.....	6
2.2.2 การขึ้นรูปเซรามิกพรุน.....	6
2.2.2.1 การขึ้นรูปเซรามิกที่มีรูพรุน.....	6
2.2.2.2 เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	7
2.3 สารที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูป 3D printing.....	10
2.3.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	10
2.3.2 พอลิเอทิลีนไกลคอล.....	12
2.3.3 พอลิไวนิลบิวทิลอล.....	13
2.3.4 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์.....	13
2.3.5 สเตียริก แอซิด.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	18

3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
3.1.1	อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....	18
3.1.2	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.2	ขั้นตอนการทดลอง.....	18
3.2.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	18
3.2.1.1	ขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	18
3.2.1.2	ขั้นตอนการเตรียมเส้น.....	19
3.2.1.3	ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วย Fused Deposition Modeling (FDM)....	22
3.2.1.4	ขั้นตอนการกำจัดตัวเชื่อมประสาน.....	23
3.2.2	แผนภาพการทดลอง.....	23
3.3	การทดสอบชิ้นงานเซรามิกพอร์น.....	24
3.3.1	การทดสอบสมบัติชิ้นงานทางกายภาพ.....	24
3.3.1.1	ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและปริมาณรูพอร์น	24
3.3.1.2	การหดตัวของวัสดุ (shrinkage)	24
3.3.2	การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	24
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	25
4.1	สมบัติเชิงความร้อน.....	25
4.1.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA.....	25
4.1.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	27
4.2	ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้.....	29
4.2.1	ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD)	29
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วย Particle size distribution.....	31
4.3	ผลการทดลองรีดเส้น.....	32
4.4	ผลการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	36
4.5	ตารางแสดงค่าทดสอบต่างๆของชิ้นงาน 3 มิติ.....	41
4.6	ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา.....	41
4.6.1	ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	41
4.6.2	เส้น.....	42
4.6.3	ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้.....	42
4.6.4	ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้หลังแช่น้ำ.....	43
4.6.5	ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้หลังเผา.....	43

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	44
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	11
ตารางที่ 2.2 เทคนิคและสมบัติที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติแต่ละแบบ.....	14
ตารางที่ 2.3 เทคนิคและการควบคุมต่างๆ ในการทดลอง.....	15
ตารางที่ 3.1 แสดงสูตรการเตรียมวัสดุดิบเส้นใยสูตรต่างๆ.....	19
ตารางที่ 3.2 แสดงการตั้งค่าการพิมพ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	21
ตารางที่ 3.3 แสดงสูตรการผสมเป็ยก HP13.....	21
ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลการทดสอบทางความร้อนของวัสดุเชื่อมประสาน.....	29
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าทดสอบต่างๆของชิ้นงาน 3 มิติ.....	41

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระจกแข็งพูนและกระจกแข็งทึบ.....	4
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไฟล์ 3 มิติ และโมเดลชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ออกมา.....	8
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เส้นวัสดุพลาสติกสำหรับฉีด และชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ออกมา...8	
รูปที่ 2.4 แบบจำลองการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกหลอมเหลว.....	9
รูปที่ 2.5 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์..	10
รูปที่ 2.6 phase diagram ของไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	12
รูปที่ 2.7 สรุปกระบวนการในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก.....	16
รูปที่ 3.1 ลักษณะของวัตถุดิบที่ผสมกันและนำไปหลอมที่ 110 °C.....	20
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการรีดเส้นใยผ่านเครื่องรีดร้อน.....	20
รูปที่ 3.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ FDM ที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ.....	20
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ SA.....	25
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ PEG.....	26
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิของ PVA.....	26
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิ ของ PVB.....	27
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของ DSC ของ PEG.....	27
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของ DSC ของ PVA.....	28
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของ DSC ของ PVB.....	28
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงผล XRD ไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังอบ.....	29
รูปที่ 4.9 ภาพแสดงผล XRD ไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังเผา.....	30
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการวัดขนาดอนุภาคโดยเครื่อง Particle size distribution.....	31
รูปที่ 4.11 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP9 อุณหภูมิในการรีด 190-210 °C.....	32
รูปที่ 4.12 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP9 อุณหภูมิในการรีด 205-210 °C.....	32
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 170-180 °C.....	33
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 175 °C.....	33
รูปที่ 4.15 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 175 °C.....	34
รูปที่ 4.16 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11ผสมSilicone oil อุณหภูมิในการรีด 175 °C.....	34
รูปที่ 4.17 เมื่อบริดด้วยเครื่อง extrudtion ที่อุณหภูมิ 220°.....	35

รูปที่ 4.18	เมื่อรีดซ้ำด้วยเครื่องรีดเส้น ที่อุณหภูมิ 180 °C.....	35
รูปที่ 4.19	เส้นที่ได้จากการผสมเปียกสูตร HP13.....	36
รูปที่ 4.20	ภาพแสดงเส้นใยไม่สามารถพิมพ์เป็นชิ้นงาน 3 มิติได้.....	36
รูปที่ 4.21	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมที่พิมพ์ได้โดยใช้สูตร HP13.....	37
รูปที่ 4.22	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญที่พิมพ์ได้โดยใช้สูตร HP13.....	37
รูปที่ 4.23	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง.....	37
รูปที่ 4.24	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง.....	38
รูปที่ 4.25	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมหลังอบ.....	38
รูปที่ 4.26	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญหลังอบ.....	39
รูปที่ 4.27	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมหลังเผา.....	39
รูปที่ 4.28	ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญหลังเผา.....	40
รูปที่ 4.29	ภาพชิ้นงาน 3 มิติหลังเผาโดยไม่แช่น้ำ.....	40
รูปที่ 4.30	ภาพ SEM ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่กำลังขยาย 500,2000 และ 10,000.....	41
รูปที่ 4.31	ภาพ SEM ของเส้นกำลังขยาย 100 และ 500.....	42
รูปที่ 4.32	ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติกำลังขยาย 100, 500 และ 2000.....	42
รูปที่ 4.33	ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังแช่น้ำกำลังขยาย 100, 500 และ 2000.....	43
รูปที่ 4.34	ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังเผากำลังขยาย 100, 500 และ 2000.....	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีวัสดุเซรามิกที่นำมาใช้ทางการแพทย์โดยเฉพาะในส่วนของ การซ่อมแซมกระดูกมีด้วยกันหลายเทคโนโลยี เช่น ฟันปลอมทำจากเซอรโคเนีย ข้อต่อสะโพกทำจากอะลูมินา โพรงเลี้ยงเซลล์กระดูกทำจากไฮดรอกซีอะพาไทต์พอร์นโดยเริ่มมีการใช้ฟองน้ำซูป จากนั้นใช้แรงงานคนในการเกลาเป็นชิ้นส่วนที่ต้องการ ซึ่งต้องใช้ฝีมือทางศิลปะ แต่ในปัจจุบันมีวิธีการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ที่สามารถผลิตชิ้นส่วนวัสดุสำหรับการรักษากระดูกของผู้ป่วยได้จำเพาะเจาะจงต่อความต้องการของผู้ป่วยในแต่ละคน ซึ่งมีขั้นตอนในการขึ้นรูปที่ง่ายกว่า โดยมีการนำเซรามิกมาขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติด้วยผงเซรามิก (Ceramic Powder 3D Printer) เครื่องจะมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับเครื่องพิมพ์ระบบ Inkjet โดยการฉีดน้ำกาวลงไปบนชั้นของผงเซรามิกทีละชั้นทีละชั้น ข้อเสียที่เกิดขึ้นคือ เมื่อฉีดกาวลงไปเพื่อให้ผงเซรามิกติดกันแล้วนำไปเผาไหม้ โพลีเมอร์ที่เป็นกาวทำหน้าที่เชื่อมติดกันจะเกิดการหลอมและเกิดการเสียรูปทรงได้ และผงเซรามิกส่วนใหญ่ที่ไม่ถูกฉีดด้วยกาวก็จะต้องถูกเป่าหรือกำจัดออกไป ทำให้ได้เนื้อชิ้นงานน้อย ต้องใช้ผงเซรามิกจำนวนมากในการทำชิ้นงาน แม้ว่าในระหว่างกระบวนการผลิตจะสามารถนำผงเซรามิกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนในวัสดุ เนื่องจากวัตถุดิบเป็นผง จำนวนฝุ่นมาก ยากต่อการทำความสะอาด ทั้งนี้เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้ในวงการผลิตวัสดุทางการแพทย์ในปัจจุบันยังมีราคาสูงมาก จึงอาจใช้เทคโนโลยีนี้ได้แค่กับผู้ป่วยเพียงบางกลุ่มเท่านั้น

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาทดลองการทำวัสดุทางการแพทย์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modeling) ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะมีราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภทอื่นๆ มีหลักการทำงานคือ การหลอมเส้นเทอร์โมพลาสติกให้กลายเป็นของเหลวแล้วฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีด (Nozzle) โดยเครื่องจะวาดเส้นพลาสติกที่ถูกฉีดออกมาเป็นรูปร่างในแนวแกนระนาบ เมื่อเสร็จชั้นหนึ่งๆ ก็จะพิมพ์ในชั้นต่อไป จึงได้ออกมาเป็นวัตถุรูปทรง 3 มิติ โดยเราจะเตรียมเส้นพลาสติกที่ใช้เซรามิกผสมกับเทอร์โมพลาสติกชนิดที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ ทำให้สามารถคงรูปไว้ชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติ มีการยุบตัวน้อยลง ถ้าสามารถใช้วิธีในการสร้างชิ้นส่วนกระดูกได้จะทำให้สามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำชิ้นส่วนวัสดุทางการแพทย์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการเตรียมเซรามิกพอร์ซไฮดรอกซีอะพาไทต์สำหรับงานขึ้นส่วนกระดูกด้วยการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติก
2. เพื่อลดต้นทุนในการผลิตขึ้นส่วนทางการแพทย์ ให้สามารถผลิตขึ้นส่วนกระดูกที่จำเพาะเจาะจงต่อผู้ป่วยแต่ละรายได้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาวิธีการเตรียมและขึ้นรูปฟิลาเมนต์วัสดุผสมระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์และตัวเชื่อมประสานชนิด PEG, SA, PVB และ PVA ด้วยการฉีดเป็นเส้นด้วยเครื่องอัดรีดร้อน สำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานโพรงเลี้ยงเซลล์กระดูกเทียมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิดฉีดเส้นพลาสติกหลอมเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตขึ้นส่วนโพรงเลี้ยงเซลล์กระดูกเทียมจากเซรามิกพอร์ซไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติก
2. เป็นแนวทางที่จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเรื่อง การขึ้นรูปเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์โครงสร้างพรุนด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ Fabrication of Porous Structured Ceramics by 3D Printing Technique ผู้ศึกษาได้ทำการรวบรวมข้อมูล แนวคิดทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 กระดูกมนุษย์

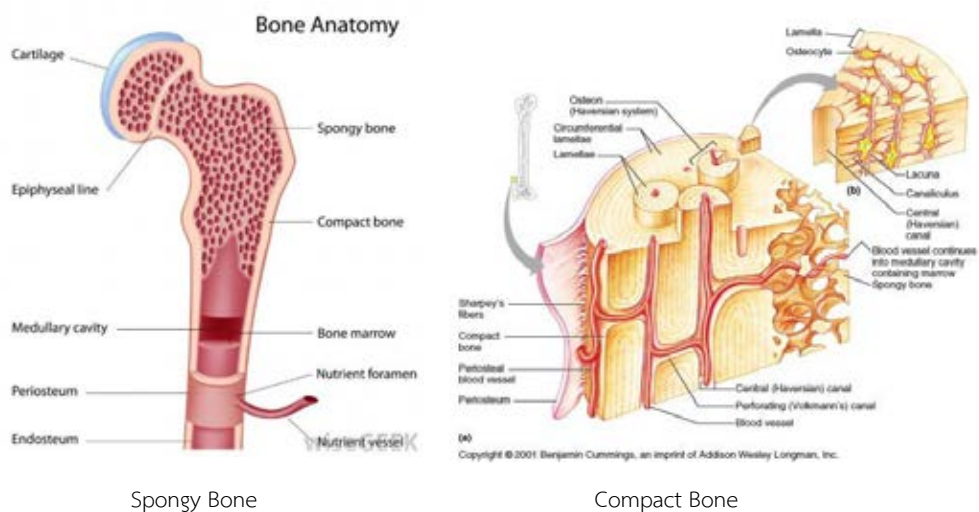
2.1.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยา

กระดูกทางธรรมชาติของมนุษย์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ สารอนินทรีย์ (แคลเซียมฟอสเฟต) และสารอินทรีย์ (โปรตีน คอลลาเจน และอื่นๆ) มีลักษณะเป็นช่องว่างภายในกระดูกและมีรูพรุนประมาณ 50-90% ดังนั้นการขึ้นรูปกระดูกทดแทนจึงควรเลียนแบบกระดูกทางธรรมชาติของมนุษย์ โดยมีการสร้างรูพรุนภายใน รูพรุนในกระดูกทดแทนจะทำหน้าที่สร้างกระดูกขึ้นใหม่ (bone regeneration) โดยเกิดการแทรกตัวของเนื้อเยื่อซึ่งสามารถช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อกับกระดูกทดแทน

กระดูกแข็ง (bone) เป็นเนื้อเยื่อประสานชนิดหนึ่ง มีความแข็งแรงและคงรูปร่างอยู่ได้แม้ร่างกายจะเสียชีวิตไปแล้ว กระดูกแข็งในผู้ใหญ่มีทั้งหมด 206 ชิ้น สามารถยืดหยุ่นได้บ้างแต่ไม่ดีเท่ากระดูกอ่อน หน้าที่ของกระดูกแข็งคือ ช่วยเป็นโครงสร้างให้กล้ามเนื้อ เอ็น และพังผืดต่างๆ มาเกาะป้องกันห่อหุ้มอวัยวะร่างกาย เช่น สมอง ปอด หัวใจ เก็บและปลอกเยื่อแคลเซียมให้ร่างกาย และสร้างเม็ดเลือดจากไขกระดูก (bone marrow) เมื่อมองด้วยตาเปล่า สามารถแบ่งกระดูกออกได้ 2 ชนิด คือ กระดูกแข็งพรุนและกระดูกแข็งทึบ

1. กระดูกแข็งพรุน (cancellous bone หรือ spongy bone) กระดูกชนิดนี้ลักษณะพรุนคล้ายฟองน้ำ ประกอบด้วยกระดูกแข็งชิ้นเล็กๆ เรียกว่า Trabeculae เรียงตัวกันเป็นร่างแห มีช่องว่างเล็กๆ บรรจุไขกระดูก
2. กระดูกแข็งทึบ (compact bone) กระดูกชนิดนี้มีลักษณะแข็งสีขาวคล้ายงาช้างมีการเรียงตัวของ Lamellae เป็นระเบียบ เรียกว่า Haversian System ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของกระดูกแข็ง ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสารอาหารไปเลี้ยงเซลล์ของกระดูกแข็ง โดย Lamellae เรียงตัวกันเป็นวงกลมซ้อนกันหลายชั้น ตรงกลางเป็นท่อยาว เรียกว่า Haversian Canal ซึ่งเป็นทางผ่านของหลอดเลือด หลอดน้ำเหลืองและเส้นประสาทที่มา

เลี้ยงเซลล์ของกระดูกแข็ง Haversian Canal แต่ละอันเชื่อมติดต่อกันผ่านทางท่อเรียกว่า Volkmann's Canal



รูปที่ 2.1 กระดูกแข็งพรุนและกระดูกแข็งทึบ

จะเห็นได้ว่า หน้าที่หลักของกระดูกคือ เป็นวัสดุที่เป็นโครงสร้างของร่างกายมนุษย์ ถ้าเกิดการผุพังหรือแตกหักของกระดูก วัสดุทดแทนจะต้องถูกจัดหามาเพื่อให้ร่างกายยังสามารถทำงานได้ตามปกติ จึงมีการเลือกใช้วัสดุในการทดแทนกระดูก วัสดุนั้นต้องมีความแข็งแรง ไม่อ่อนหรือดัดไปมาได้ และมีความทนทานต่อการขัดสี การเลือกใช้วัสดุในกลุ่มเซรามิกสามารถนำมาเป็นวัสดุทดแทนกระดูกได้ แต่วัสดุเหล่านี้มีความเปราะสูง ความแข็งแรงไม่เป็นเพียงแค่อำหนดที่สำคัญของวัสดุที่ใช้ทดแทนกระดูก ในความเป็นจริงแล้ว ความแข็งแรง สามารถส่งผลลบบต่อกระดูกเช่นเดียวกัน กระดูกมีการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมเหมือนวัสดุชีวภาพอื่นๆ เมื่อกระดูกได้รับแรง เซลล์สร้างกระดูกซึ่งเรียกกันว่า ออสติโอ-บลาส จะถูกกระตุ้นและสร้างกระดูกเพิ่มขึ้นมา ในการนี้ทำให้กระดูก มีความสามารถในการปรับตัวเอง ให้เข้ากับแรงที่กระดูกจะต้องรับ ถ้ากระดูกถูกแทนที่ด้วยโลหะ ซึ่งมีความแข็งแรงกว่ากระดูก โลหะจะรับแรงส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้กระดูกที่อยู่รอบโลหะ ไม่ได้รับแรงตามที่ควรจะเป็น โดยปกติแล้วจะมีการละลายของแร่ธาตุฟอสเฟตในกระดูกในร่างกายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในกรณีปกติออสติโอบลาสจะสร้างสังเคราะห์กระดูกใหม่ขึ้นมาทดแทนกระดูกที่เสียไป กระบวนการนี้จะช่วยทำให้กระดูกในร่างกายมนุษย์ไม่เสื่อมสภาพลงตามอายุ ซึ่งจะต้องขึ้นอยู่กับออสติโอบลาส จะต้องมีความสมบูรณ์แข็งแรงและทำงานได้ตามปกติ การที่เราไปป้องกันไม่ให้กระดูกได้รับแรงที่ควรจะเป็น จะทำให้กระบวนการนี้ไม่เกิดหรือเกิดอย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากกระดูกไม่มีความต้องการที่จะทำให้ตัวมันเองแข็งแรง ดังนั้นโลหะที่ใช้

ทดแทนกระดูก ที่ติดอยู่กับกระดูกบริเวณรอบข้างด้วยซีเมนต์ จะเริ่มหลวมเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่กระดูกมีการละลายในร่างกายตามธรรมชาติ เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วนี้ อายุการใช้งาน ของโลหะที่ใช้แทนกระดูก จึงไม่เกิน 20 ปี ซึ่งควรจะเพียงพอถ้าการผ่าตัดเกิดขึ้นกับบุคคลสูงอายุ แต่ไม่ใช่กับคนหนุ่มสาว ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการผลิตวัสดุ ให้มีโครงสร้างและส่วนประกอบใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ ซึ่งไฮดรอกซีอะพาไทต์จัดเป็นวัสดุที่เป็นส่วนประกอบหลักของมนุษย์และสามารถสังเคราะห์หรือสกัดมาจากกระดูกสัตว์ต่าง ๆ และจะมีโครงสร้างเหมือนไฮดรอกซีอะพาไทต์ในมนุษย์ โดยที่ร่างกายยอมรับได้ ซึ่งสามารถนำไฮดรอกซีอะพาไทต์มาประยุกต์ใช้เป็นกระดูกทดแทนชนิดแข็งแบบเนื้อแน่นหรือแบบเนื้อพรุน กระดูกทดแทนชนิดนุ่มแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุนได้ เพราะเป็นวัสดุที่มีความเข้ากันทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์

2.1.2 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

หลายปีที่ผ่านมาเซรามิกได้ถูกนำมาพัฒนาคุณลักษณะเพื่อใช้ในร่างกายมนุษย์ เซรามิกนั้นมีความก้าวหน้ามากในเรื่องของการออกแบบเพื่อซ่อมแซม เสริมสร้างและทดแทนที่ในส่วนที่ติดเชื้อโรคหรือเสียหายไปของร่างกายมนุษย์ เซรามิกประเภทนี้เรียกว่าหรือวัสดุเซรามิกทางชีวภาพ (bioceramics) โดยวัสดุเซรามิกทางชีวภาพนั้นสามารถเป็นรูพรุนสำหรับเนื้อเยื่อที่ใช้เจริญเติบโตได้ จึงเห็นได้ว่าเซรามิกนั้น กลายมาเป็นส่วนสำคัญและจำเป็นสำหรับระบบการรักษาสมัยใหม่ วัสดุเซรามิกทางชีวภาพเป็นที่ต้องการสำหรับการช่วยบรรเทาความเจ็บปวดและฟื้นฟูของส่วนที่เสียหายไปของร่างกายมนุษย์ เนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่อภายในร่างกายไปตามอายุ ในกระดูกของสิ่งมีชีวิตการลดลงของความหนาแน่นทำให้ความแข็งแรงของกระดูกพรุนเสื่อมไปด้วยนั้นเรียกว่า “trabecular” หรือ “cancellous bone” หรือการประสบอุบัติเหตุอันเป็นเหตุให้ต้องรักษาส่วนที่เสียหายไปของร่างกาย

วัสดุเซรามิกทางชีวภาพประเภทแรกคือ เซรามิกชีวภาพแบบ bioactive นั้นเมื่อเรานำเซรามิกชนิดนี้ไปปลูกถ่ายในร่างกายมนุษย์หรือนำไปเชื่อมต่อกับกระดูก หรือเนื้อเยื่ออ่อนร่างกายจะมีการสร้างเนื้อเยื่อเข้ามายึดติดกับเซรามิกชนิดนี้ บางครั้งอาจถูกนำไปใช้เป็นตัวกลางในการเชื่อมประสานระหว่างชั้นของเนื้อเยื่อมนุษย์และกระดูกเทียม เช่น Hydroxyapatite[Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂], glass ceramic และ bioglass เป็นต้น เซรามิกทางชีวภาพประเภทต่อมาคือ เซรามิกชีวภาพแบบ bioinert นั้นเมื่อเรานำเซรามิกชนิดนี้ไปปลูกถ่ายในร่างกายมนุษย์เซรามิกชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อรอบข้างน้อยมาก โดยทั่วไปแล้วร่างกายจะมีการสร้างพังผืดหรือเนื้อเยื่อบางๆ มาคลุมมันไว้ เช่น alumina, partially stabilized zirconia เป็นต้น

2.2 เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูป Fabrication of Porous Structured Ceramics

2.2.1 วัสดุเซรามิกพรุน

“รูพรุน” เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิก เนื่องจากรูพรุนเป็นตัวการสำคัญ ที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง อย่างไรก็ตาม เซรามิกที่มีรูพรุนอยู่ในเนื้อเป็นจำนวนมาก หรือที่เรียกว่า เซรามิกพรุน (porous ceramic) ก็มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายชนิดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ ทั้งในด้านการซึมผ่าน (permeability) พื้นที่ผิวมาก เป็นฉนวนความร้อนที่ดี รวมทั้งยังทนต่ออุณหภูมิสูงและสารเคมีต่างๆ อีกด้วย วัสดุเซรามิกที่มีรูพรุนจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น เป็นตัวกรอง (filler) โลหะหลอม ตัวเซ็นเซอร์ (sensor) พาทะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีในโรงงาน และในรถยนต์ (automobiles) สารเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูพรุน และรวมไปถึงการนำไปใช้งานทางด้านวัสดุเซรามิกทางชีวภาพในการใช้เป็นวัสดุปลูกฝังทดแทนกระดูกและฟัน

วัสดุปลูกฝังทดแทนกระดูกใช้เทคนิคของการขึ้นรูปเซรามิกพรุนมาใช้เนื่องจากรูปร่างกระดูกแต่ละชิ้นมีรูปร่างได้หลายแบบ ทั้งยาว สั้น แบน กลม ขรุขระ หรือมีรูปร่างแปลกๆ เฉพาะตัว โดยลักษณะเนื้อกระดูกเนื้อกระดูกส่วนใหญ่ที่อยู่ขอบนอกของชิ้นกระดูกจะเป็นกระดูกอัดแน่นจนแข็งเพื่อความแข็งแรง ในขณะที่ส่วนเนื้อในจะโปร่ง ดังนั้นวัสดุทดแทนที่นำมาใช้ในการรักษาซ่อมแซมกระดูกควรมีลักษณะพรุนเพื่อให้กระดูกทดแทนที่ได้มีน้ำหนักเบาไม่หนักจนเกินไป

2.2.2 การขึ้นรูปเซรามิกพรุน

วัสดุเซรามิกรูพรุนมี 2 ประเภทคือ คือ reticulate ceramic และ foam ceramic ซึ่งทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกันที่ลักษณะโครงสร้างและสมบัติ

- Reticulate ceramic คือวัสดุที่ประกอบด้วยช่องว่างที่ต่อเนื่องถูกล้อมรอบด้วยร่างแหของสารเซรามิก
- Foam ceramic คือวัสดุที่มีรูพรุนซึ่งมีโครงสร้างเป็นช่องว่างแบบปิดภายในเนื้อเซรามิกที่ต่อเนื่อง

2.2.2.1 การขึ้นรูปเซรามิกที่มีรูพรุน แบ่งออกได้เป็นวิธีใหญ่ๆโดยทั่วไป 2 วิธี

- วิธี Polymeric sponge เป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตวัสดุชนิดพรุนที่มีโครงสร้างเปิด (open cell) ต่อเนื่อง

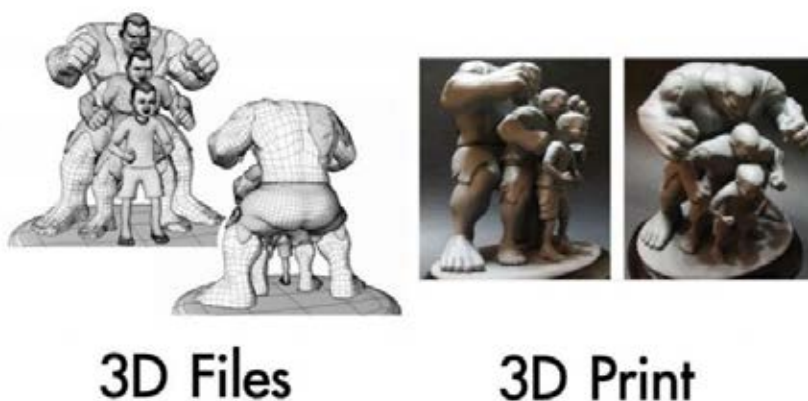
โดยเริ่มจากการจุ่มฟองน้ำซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดลงในสเลอรีของสารเซรามิกแล้วรีดส่วนเกินออกแล้วนำไปเผาไล่สารอินทรีย์ที่เติมอยู่ในสเลอรี ขั้นตอนสุดท้ายนำชิ้นงานไปเผาไล่ฟองน้ำและเผาซินเทอร์จะได้เป็นวัสดุเซรามิกที่มีรูพรุน ถ้านำวิธีนี้มาใช้ในการขึ้นรูปวัสดุทดแทนกระดูกต้องนำมาเคลือบเป็นรูปทรงกระดูกคนไข้ซึ่งอาจทำให้สูญเสียวัสดุดิบเซรามิก

- วิธี Foaming สามารถผลิตได้ทั้งโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดและปิด (close-cell) วิธีประกอบด้วยส่วนประกอบที่เป็นสารเซรามิกที่ต้องการผสมกับสารพอลิเมอร์หรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้ก๊าซหรือฟองอากาศทำให้เกิดเป็นโครงสร้าง foam เมื่อได้โครงสร้างที่เป็น foam แล้วนำไปอบและตามด้วยการเผาผนึกเพื่อให้ได้วัสดุเซรามิกที่ต้องการ

วัสดุเซรามิกชนิดพรุนที่ได้จากวิธี foaming มีข้อดีกว่าวิธี polymeric คือ ได้รูปร่างที่แน่นอนผลิตได้ทั้งรูพรุนเปิดและปิด และสามารถขึ้นรูปเป็นรูพรุนปิดขนาดเล็กมากได้และง่ายต่อการผลิต สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการ Foaming โดยการนำ Hydroxyapatite ซึ่งเป็นสารเซรามิกผสมกับสารพอลิเมอร์ 4 ชนิด คือ PVB, SA, PVA และ PEG โดยที่ PVB เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวมากและมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ และ PEG มีสมบัติในการละลายน้ำ เพื่อให้วัสดุที่ขึ้นรูปเมื่อเผาไล่สารพอลิเมอร์ออกมีความคงรูปมากที่สุด จึงมีการนำไปละลายน้ำเพื่อให้พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ออกมาส่วนหนึ่งเมื่อนำไปเผาไล่พอลิเมอร์ทั้งหมดออกจึงทำให้วัสดุที่ได้ไม่เกิดการยุบตัวมากหลังการเผา

2.2.2.2 เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่รุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว 3D printing หรือการพิมพ์แบบสามมิติ ถือเป็น อีกหนึ่งเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยม 3D Printer ส่วนใหญ่จะใช้หลักการทำงานเดียวกันคือ พิมพ์ 2 มิติแต่ละชั้นในแนวระนาบกับพื้นโลก XY ก่อน ส่วนที่พิมพ์ก็คือภาพตัดขวาง Cross Section ของวัตถุนั้นๆ เอง เมื่อพิมพ์ในด้าน 2 มิติเสร็จแล้ว เครื่อง 3D Printer จะเลื่อนฐานพิมพ์ไปพิมพ์ชั้นถัดไป จากนั้นจะพิมพ์ทับไปเรื่อยๆ หลายร้อยหลายพันชั้น จนออกมาเป็นรูปร่าง 3 มิติ การเลื่อนขึ้นหรือลง (เลื่อนในแนวแกน Z) ของฐานพิมพ์ทำให้เกิดมิติที่ 3 ซึ่งวัสดุ ที่นำมาใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานของ 3D Printer นั้นแตกต่างกันออกไปตามประเภทของเครื่องพิมพ์ โดยปกติแล้วความละเอียดในการพิมพ์ชิ้นงานของเครื่อง 3D Printer จะใช้หน่วยวัดเป็นไมครอน เช่น 100 Micron (0.1mm) ต่อชั้น ซึ่งหมายความว่า ในแต่ละชั้นนั้นจะพิมพ์ให้มีขนาดความสูงประมาณ 0.1mm ดังนั้นหากโมเดลมีความสูง 10mm เครื่องพิมพ์จะต้องพิมพ์ทั้งหมด 100 ชั้น หากพิมพ์ที่ความละเอียด 50 Micron เครื่องจะพิมพ์ทั้งหมด 200 ชั้น ซึ่งความละเอียด 50 Micron นั้นทำให้ได้ผลงานที่มีความละเอียด และความสวยงามมากกว่า แต่ต้องใช้ระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นประมาณเท่าตัว ไฟล์งานที่ใช้กับเครื่อง 3D Printer นั้นเป็นไฟล์ 3 มิติ แทนที่จะเป็นรูปภาพเหมือนในเครื่องพิมพ์บน กระดาษทั่วไป 3D File นี้้อาจสร้างจากโปรแกรม เช่น AutoCAD, Solid Work, 3Ds Max, Zbrush, Maya, SketchUp และ Adobe Photoshop



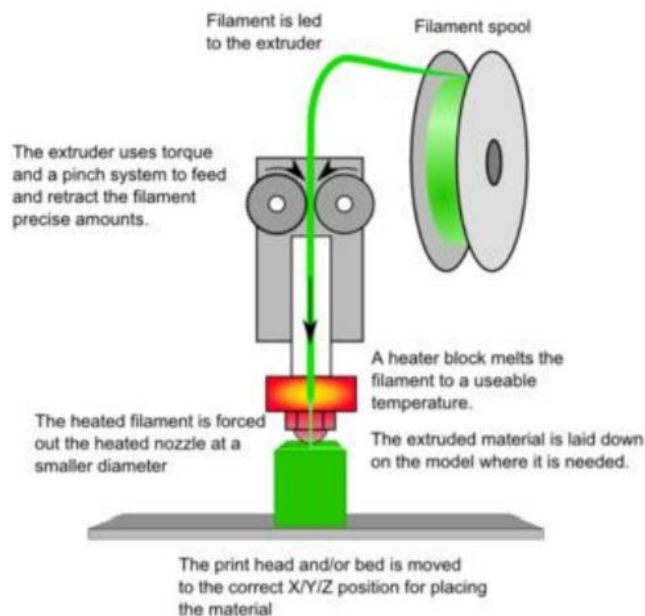
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไฟล์ 3 มิติ และโมเดลชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ออกมา

สำหรับงานวิจัยนี้เราสนใจเลือกใช้เทคโนโลยี 3D printing แบบระบบฉีดเส้นพลาสติก ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

ระบบฉีดเส้นพลาสติก (FDM หรือ FFF) FDM (Fused Deposition Modeling) หรือ FFF เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน ปัจจุบัน เนื่องจากมีจำหน่ายตามท้องตลาดและมีราคาถูก โดยมีหลักการทำงานคือ การหลอมเส้นพลาสติกให้ กลายเป็นของเหลวแล้วฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีด (Nozzle) คล้ายกับปืนกาวที่ใช้กันทั่วไป เครื่อง FDM 3D Printer จะวาดเส้นพลาสติกที่ถูกฉีดออกมา เป็นรูปร่างในแนวแกนระนาบก่อนเมื่อเสร็จชั้นหนึ่งแล้วก็จะพิมพ์ ในชั้นต่อ ๆ ไป จนครบหลายร้อย หรือ หลายพัน Layer ก็จะได้ชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบไว้ FDM Printer ใช้ได้กับงานทุกประเภท ชิ้นงานที่พิมพ์สามารถน มาขัด แต่ง หรือเจาะได้ และนำมาใช้งานได้จริง เช่น ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องจักร เครื่อง FDM Printerสามารถใช้วัสดุได้หลากหลาย และหาได้ง่ายตาม ท้องตลาด เช่น เส้น PLA, ABS, PET, Nylon, Wood (พลาสติกผสมไม้), Bronze (พลาสติกผสมทองเหลือง) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เส้นวัสดุพลาสติกสำหรับฉีด และชิ้นงานตัวอย่างที่พิมพ์ออกมา



มอเตอร์ขับเคลื่อนเส้นพลาสติก มายังหัวฉีด

รูปที่ 2.4 แบบจำลองการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกกลมเหลว

หลักการการทำงานของเครื่องระบบ FDM คือการ “ฉีดและวาดเส้นพลาสติกออกมาเป็นวัตถุ” ส่วนของหัวฉีดทำหน้าที่ฉีดเส้นพลาสติกออกมา โดยที่หัวฉีดจะมีฮีทเตอร์ทำความร้อนให้ถึงจุดที่เส้นพลาสติกละลาย เป็นน้ำแล้วจึงฉีดผ่านหัวฉีดออกมา โดยปกติหัวฉีดจะมีรูขนาด 0.4 mm และมีมอเตอร์สำหรับควบคุมหัวฉีด หรือฐานพิมพ์ให้เคลื่อนที่ และพิมพ์ไปที่ละชั้นจนออกมาเป็นชิ้นงานขึ้นรูป เครื่องพิมพ์มีความสามารถทำงาน ที่ซับซ้อนได้ เช่น ประแจเลื่อนที่พิมพ์เพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องมาประกอบอีกในภายหลัง เครื่องรับคำสั่ง GCode ซึ่งเป็นภาษาเดียวกับการสั่งงานเครื่อง CNC หรือ Milling ในโรงงาน อุตสาหกรรม โดยโปรแกรมสำหรับการสร้าง GCode นั้นมีให้เลือกใช้งานหลากหลาย เช่น Cura, Simplify3D, MakerWare, Sli3r, Repetier เป็นต้น เริ่มต้นเมื่อทำการเปิดโมเดลขึ้นมาและกำหนดค่าที่ต้องการพิมพ์ โปรแกรมจะทำการสไลด์วัตถุออกเป็นชั้น เครื่องจะพิมพ์ทีละชั้น ชั้นที่เครื่องพิมพ์ๆ นั้นเป็น Cross Section ของวัตถุนั้นเอง

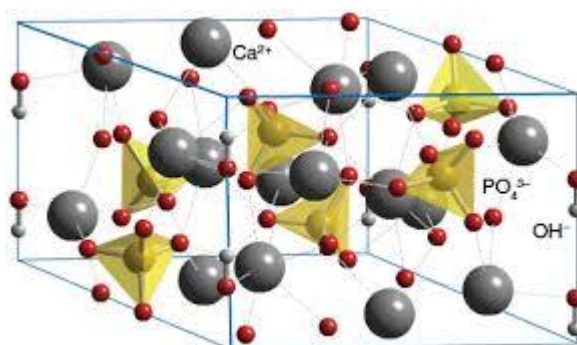
ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่สามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปวัสดุต่างๆ ได้ทั้ง โลหะ พอลิเมอร์ และเซรามิก จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการศึกษาเพื่อนำมาขึ้นรูปวัสดุเซรามิกพูนทดแทนกระดูกเนื่องจาก เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สามารถขึ้นรูปกระดูกทดแทนผู้ป่วยได้อย่าง

เฉพาะเจาะจง และทำให้สูญเสียวัตถุดิบในการขึ้นรูปน้อย จึงสนใจนำเทคโนโลยีการขึ้นรูปด้วยระบบฉีดเส้นพลาสติก (FDM หรือ FFF) FDM (Fused Deposition Modeling) ไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบ Foaming โดยนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นแทนเส้นพลาสติกที่ใช้ในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM

2.3 สารที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูป 3D printing

2.3.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์

โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์มีลักษณะตามแบบจำลองดังภาพที่ 2.5 มีการจัดเรียงตัวตามแนวแกน c ผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบ hexagonal rhombic prism ประกอบด้วย 44 อะตอม มีขนาดเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยคือ แกน a = 0.9432 นาโนเมตร แกน c = 0.6101 นาโนเมตร และ $V = 120$ องศาเซลเซียส จากโครงสร้างพบว่าแนว hydroxyl ion (OH^-) มีการเรียงตัวตั้งฉากกับระนาบหรือขนานกับแนวแกน c โดยแต่ละคู่ของ hydroxyl ion จะอยู่ตำแหน่งมุมของแต่ละเซลล์และมีระยะระหว่างกันเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของเซลล์



รูปที่ 2.5 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์

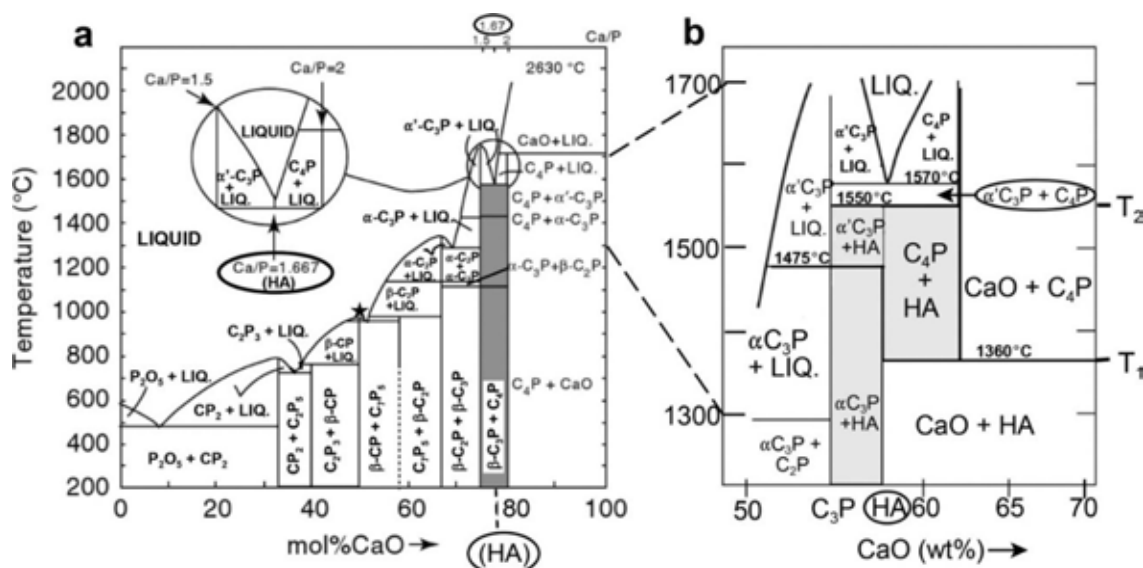
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ คือแร่ที่อยู่ในกลุ่มอะพาไทต์ สูตรทางเคมีคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ สามารถแทนด้วยตัวย่อ HA หรือ HAp มีค่า Ca/P เท่ากับ 1.67 มีความเสถียรที่อากาศแห้งและขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส นิยมนำไฮดรอกซีอะพาไทต์มาใช้งานทางการแพทย์เนื่องจากเป็นส่วนประกอบอินทรีย์หลักของกระดูกและฟัน มีความไวต่อชีวภาพที่ดีโดยสามารถสร้างพันธะทางเคมีระหว่างวัสดุกับเซลล์กระดูกหรือเนื้อเยื่อได้ดี

ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตและจัดเป็นสารทางเซรามิกที่มีลักษณะของผลึกเป็น polycrystalline จึงทำให้มีสมบัติคือ มีความแข็ง (hard) ทนต่อแรงกด (compressive strength) แต่เปราะ (brittle) และมีสมบัติในด้าน tensile และ fracture toughness ต่ำ (fracture

toughness ไม่เกิน $1.0 \text{ MPam}^{1/2}$ เมื่อเทียบกับกระดูกซึ่งมีค่า $2-12 \text{ MPam}^{1/2}$ ซึ่งเป็นข้อด้อยและเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูก สมบัติทั่วไปที่สำคัญของไฮดรอกซีอะพาไทต์ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของไฮดรอกซีอะพาไทต์

Property	Standard value	Remarks
Design density	3.16 g/cm^3	Ideal density, rarely achieved in practical application
Compressive strength	100-200 MPa	
Bending strength	10 MPa max.	For high-density material
Modulus of Elasticity(MOE)	100 GPa max.	For high-density material
Hardness	500 HV	(Rec. standard value)
Thermal expansion	$11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	
Melting point	1650 องศาเซลเซียส	Decomposition
Corrosion resistance		Best for Hydroxyapatite ceramic compared to other calcium phosphates when pH value increases



รูปที่ 2.6 phase diagram ของไฮดรอกซีอะพาไทต์

<https://www.degruyter.com/view/j/ammin.2016.101.issue-12/am-2016-5732/am-2016-5732.xml>

2.3.2 พอลิเอทิลีนไกลคอล

PEG หรือ Polyethylene glycol เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรเคมีคือ $C_2H_6O_2$ เป็นของเหลวไม่มีสี ไม่มีกลิ่น รสหวาน มีความเป็นพิษระดับกลาง นิยมใช้เป็นสารป้องกันน้ำแข็งตัว (antifreeze) และสารหล่อเย็น (coolant) และใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมพอลิเอสเตอร์

PEG เป็นสารเคมีสังเคราะห์ เนื่องจากสมบัติที่ดี เช่น มีความชอบน้ำสูง ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่นๆ ให้เพิ่มความชอบน้ำได้ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดจากสารประกอบดังกล่าว เช่น เครื่องสำอาง ครีม โลชั่น โดย PEG เองมีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามน้ำหนัก เช่น PEG200, PEG300, PEG400 และ PEG600 เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลน้อยทำให้ลักษณะของมันเป็นไข เปรียบเทียบกับ PEG3350, PEG4500 และ PEG8000 ซึ่งมีลักษณะขุ่นคล้ายแว็กซ์ น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลทำให้คุณสมบัติ เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การดูดความชื้น จุดเยือกแข็ง เปลี่ยนแปลงไปด้วย และด้วยความสามารถในการละลาย (solubility) และการเข้ากันได้ (compatibility) ที่หลากหลายทำให้มีการนำ PEG เข้ามาใช้ในการเตรียมยาและเครื่องสำอางในหลายๆสูตรตำรับ

พอลิเอทิลีนไกลคอลนั้นพบว่ามีความเป็นพิษต่ำ และมีการนำมาผลิตยาหลายชนิดในทางการแพทย์ เช่น มีการนำ PEG 3350 มาทำเป็นยาระบาย หรือมีการเพิ่ม electrolyte เข้าไปใน PEG เพื่อนำมาเตรียมคนไข้โดยการล้างลำไส้ก่อนเข้าผ่าตัด นอกจากนี้ยังนำมาใช้เพื่อทำให้ยาอยู่ในร่างกายนานขึ้น เช่น PEG-interferon alpha ที่นำมาใช้รักษา hepatitis C เป็นต้น

2.3.3 โพลีไวนิลบิวทียอล

Polyvinyl butyral (หรือ PVB) เป็นเรซินที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำที่ใช้เป็นส่วนใหญ่สำหรับการใช้งานที่ต้องการแรงยึดเกาะ ความโปร่งใสของแสงการยึดเกาะกับพื้นผิวต่างๆ ความเหนียวและความยืดหยุ่น มีการเตรียมจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) โดยทำปฏิกิริยากับบิวทิลดีไฮด์ (butyraldehyde) การใช้งานที่สำคัญคือกระจกนิรภัยสำหรับกระจกรถยนต์ โดยชื่อผลิตภัณฑ์สำหรับฟิล์มPVB ได้แก่ KB PVB, Saflex, GlasNovations, Butacite, WINLITE, S-Lec, Trosifol และ EVERLAM

2.3.4 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์(polyvinyl alcohol, PVA) มักนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน(binder) ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกชุดหน้า(advanced ceramics) เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ส่วนมากจะเป็นวัสดุที่ยากต่อการขึ้นรูปด้วยตัวเอง(low plasticity) ดังนั้นจึงต้องมีการเติมตัวประสาน(binder) เข้าไปด้วยเพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่คงรูปอยู่ได้ก่อนนำไปเผา โพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีจุดเด่นหลายประการคือ เพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะ มีความอ่อนตัว(plasticization) สูง ละลายน้ำได้ ขจัดออกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนโดยไม่สลายตัวแล้วให้ก๊าซที่เป็นอันตราย และยังมีราคาไม่แพงอีกด้วย

2.3.5 สเตียริก แอซิด




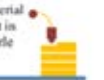

เป็นสารหล่อลื่นเพื่อช่วยให้ส่วนผสมมีความเข้ากันได้ดี

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยของ Lim Chin Hwa , Srihar Rajoo, Alias Mohd Noor , Norhayati Ahmad, M.B. Uday เรื่อง ความคืบหน้าล่าสุดของเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติในเซรามิกพอร์ซเลนได้มีการกล่าวถึงเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วสำหรับเซรามิกพอร์ซเลน มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและพัฒนาความเข้ากันได้กับวัสดุเซรามิกที่มีรูพรุนและความรวดเร็วซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเครื่องมือนี้เพื่อทำให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถพัฒนาปรับปรุงปัญหาในการผลิตเซรามิกพอร์ซเลน จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ใน surgical tools, scaffold, dental porcelain และการผลิตเซรามิกพอร์ซเลนต่างๆ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักกันในการผลิตแบบดิจิทัล ซึ่งใช้โปรแกรม CAD ในการผลิตโครงสร้างและพิมพ์วัตถุที่ได้จากการวัสดุที่ได้จากการผสมกันระหว่างผงเซรามิกและตัวเชื่อมประสาน หากเทียบกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเซรามิกพอร์ซเลนแบบอื่นๆ เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีความสะดวกและความเร็วสูง ช่วยลดการใช้เครื่องมือและต้นทุนต่ำผลผลิตออกมาอย่างแม่นยำและมีคุณภาพ กระบวนการขึ้นรูปโครงสร้าง 3 มิติจากของแข็ง โดยเราสร้างส่วนประกอบต่างๆ จนเสร็จสมบูรณ์ ด้วยโปรแกรม CAD แล้วบันทึกด้วยไฟล์นามสกุล STL จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไป

ยื่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ หลากหลายรูปแบบในการผลิตเซรามิกพอร์ซเลน ได้แก่ Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Fused Deposition Modeling (FDM) and Binder based 3D printing (3DP) แต่ละแบบจะมีเทคนิคในการผลิตที่แตกต่างกันและมีข้อดีข้อเสียในแต่ละเครื่องที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งานเห็นได้จากตารางที่ 1 สำหรับ ใน FDM เส้นใยสามารถทำได้จากการผสมระหว่างเซรามิกและวัสดุเชื่อมประสานและนำไปผ่านเครื่องรีดให้กลายเป็นเส้นใยเพื่อป้อนเข้าไปในหัวฉีดร้อนเพื่อใช้ในการผลิตรูปร่างที่ต้องการ เทคนิค Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากมีความง่ายต่อการใช้งานและมีต้นทุนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องพิมพ์ชนิดนี้ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิในการหลอมเซรามิกค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดปัญหาเมื่อผลิต

ตารางที่ 2.2 เทคนิคและสมบัติที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติแต่ละแบบ

Techniques	SLA	SLS	SLM	FDM	3DP
Technique schematic					
Operating principle	Photo polymerization	Powder sintering	Powder melting	Melt extrusion	Powder + binder deposition
Surface quality	Average	Good	Poor	Average	Good
Post-finish	Average	Good	Average	Average	Good
Accuracy	Excellent	Good	Poor	Average	Average
Resistance to impact	Average	Good	Good	Good	Low
Flexural strength	Low	Excellent	Excellent	Excellent	Low
Prototype cost	High	High	High	Low	Medium
Post cure	Yes	Yes	No	No	No

การสร้างเซรามิกพอร์ซเลนด้วยเทคโนโลยี FDM สามารถสร้างโดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งหาได้จากการสแกนเอกซเรย์, การสแกนภาพด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กหรือข้อมูลจากโปรแกรม CAD FDM ที่ใช้เทคนิคเส้นใยร้อนแล้วนำมาใส่หัวฉีด เครื่องจะฉีดตามแนวระนาบ x และ y ขึ้นไปเรื่อยๆทีละชั้นตามรูปแบบ 3 มิติจาก CAD สำหรับการประยุกต์ใช้เครื่อง FDM กับการขึ้นรูปเซรามิกพอร์ซเลนนั้น มีการวิจัยจาก Onagorowa et al ได้ทำการวิจัยเซรามิกพอร์ซเลนจากซิลิกาและมีการแทรก mullite ด้วยโลหะอะลูมินา เกิดเป็นวัสดุผสมโลหะ-เซรามิก จากการทำเซรามิกพอร์ซเลนนี้ถือได้ว่าได้รับการประสบความสำเร็จและมีความบกพร่องน้อยที่สุด ซึ่งตัวเชื่อมประสานที่ใช้ในการทดลองนี้คือ โพรพิลีน (PP) นอกจากนี้ตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นยังมีการใช้เทคนิคการตรวจเอกซเรย์ (CT) ในการขึ้นรูปด้วย FDM ซึ่งถูกใช้ในการผลิตพอลิโพรพิลคลอสทีน (PCL) / ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) และ PCL 3D ในการสร้างกระดูกเทียม ซึ่งนักวิจัยมีการเสนอถึงข้อดีหลายประการ ดังนี้ การสร้างกระดูกนี้ง่ายและดีต่อการผ่าตัดสำหรับศัลยแพทย์ นอกจากนี้พวกเขายังชี้ให้เห็นว่า 3D PCL / HA สามารถนำมาใช้เพื่อรักษาข้อบกพร่องกระดูกโคนขากรรไกรและมีประโยชน์ต่อผู้ป่วยที่ต้องรักษาซอมแซมกระดูก

วิจัยนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาวัสดุคืบและประดิษฐ์ชิ้นส่วนและเทคนิคเพื่อปรับปรุงคุณภาพระหว่างกระบวนการ FDC เพื่อผลิตชิ้นส่วนเซรามิกที่มีคุณภาพสูง มีด้วยกัน 2 ขั้นตอน 1.binder removal 2.sintering โดยใช้อัตราการเผาต่างกันเพื่อเลี่ยงการแตกของชิ้นงาน ขั้นตอนแรก binder removal จะเป็นการกำจัดของเหลวโดยใช้หลอด capillary ที่อุณหภูมิต่ำแล้วก็ตามด้วยการสลายตัวบวกกับการระเหยของตัวเชื่อมประสานที่อุณหภูมิสูง ขั้นที่ 2 คือการ sintering จะได้เส้นใยเซรามิกเหมือนกับพอลิเมอร์สำหรับไวไฟในเครื่อง FDM ต่อมาเป็นการทดลองของ Jatari ทดลองโดยใช้เซรามิกผลิตเส้นใยโดยตรง เช่น Si_3N_4 และ PZT (Partial Stabilized Zirconia) ปัญหาที่พบคือ การโก่งตัวบ่งทำให้การรีดหยุดชะงัก แต่สามารถแก้ไขโดยการ cooling เส้นใยระหว่างของเหลวกับลูกกลิ้งสามารถช่วยแก้ปัญหาได้

จากการศึกษางานวิจัยของ Ravinder Sharma และคณะ เรื่อง Investigations for mechanical properties of Hap, PVC and PP based 3D porous structures obtained through biocompatible FDM filament งานวิจัยนี้ทดลองสร้างโครงแข็งเซลล์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภท FDM โดยที่การเตรียมเส้นใย filament จะเตรียมจาก 4% Hydroxyapatite + 96% polymer matrix (PVC70% + PP30%) หลังจากนั้นนำไปรีดผ่านเครื่อง Twin screw extruder แล้วจึงนำเส้นใย filament ที่ได้ไปทำการพิมพ์ต่อไป โดยมีพารามิเตอร์ตารางที่ 2.3

ผลที่ได้คือ ชิ้นส่วนที่ได้จะมีลักษณะที่มีรูพรุนสม่ำเสมอและมีโครงสร้างเหมาะสมเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์

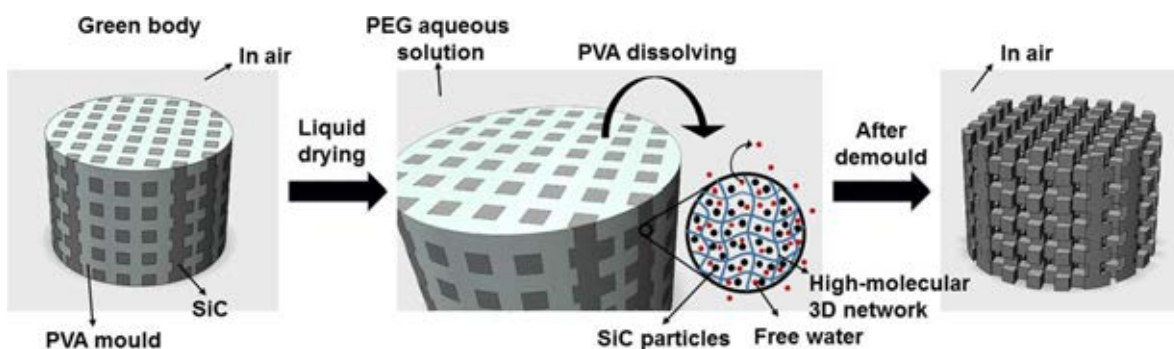
ตารางที่ 2.3 เทคนิคและการควบคุมต่างๆ ในการทดลอง

Exp. no.	Parameter(A) Infill percentage	Parameter(B) Layer thickness (mm)	Parameter(C) Deposition speed (mm/min)
1	20	0.25	33
2	20	0.30	35
3	20	0.35	37
4	60	0.25	35
5	60	0.30	37
6	60	0.35	33
7	100	0.25	37
8	100	0.30	33
9	100	0.35	35

จากงานวิจัยของ มินตรา พันติ และคณะ เรื่อง การศึกษาและประยุกต์ใช้ เทคนิคการขึ้นรูปต้นแบบรวดเร็วเพื่อการพัฒนาการ ผลิตกระดูกขาเทียมและชิ้นส่วนกะโหลกศีรษะ มีการพัฒนาเพื่อสร้างกระดูกขาเทียมและกะโหลกศีรษะด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปต้นแบบอย่างรวดเร็ว โดยแกลสนชิ้นส่วนกระดูกด้วยเครื่อง CT SCAN แล้วแปลงเป็นไฟล์ STL สร้างแม่แบบด้วยเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว จากเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็ว Projet HD3000 การขึ้นรูปกระดูกขาเทียม นำสูตรส่วนผสมที่ใช้สำหรับการอัดขึ้นรูปมา ประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปด้วยการหล่อโดยใช้ PVA (Polyvinyl Alcohol) 9

g (3%wt) และเอทานอล (C₂H₅OH) เข้มข้น 70% ปริมาณ 150 ml (50%wt) เข้าด้วยกัน เพื่อเป็นวัสดุประสานคนให้เข้ากัน จน PVA ละลายหมดผสมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ 300 g ลงใน สารละลาย วัสดุประสาน คนจนเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้เป็น น้ำหล่อ (Slip) เพื่อเทลงในแม่พิมพ์จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ เผาซินเตอร์ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1250°C เพื่อให้ชิ้นงาน แข็งตัวและกำจัดวัสดุประสานออกจากชิ้นงาน โครงการวิจัยการศึกษา และประยุกต์ใช้ เทคโนโลยี การสร้างต้นแบบรวดเร็ว เพื่อพัฒนาการผลิตกระดูกขา เทียมและกะโหลกศีรษะเทียมนี้ มีข้อดีคือสามารถ ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วเพื่อสร้าง แม่พิมพ์ที่นำไปใช้ในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะ และขนาดใกล้เคียงกับกระดูกต้นแบบได้ แต่ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง เนื่องจากข้อบกพร่องในด้านปัจจัยต่างๆ เช่นวิธีการขึ้นรูปด้วยการหล่อนั้นทำให้วัสดุไม่แข็งแรง ความไม่คงที่ในด้านอัตราส่วน และระยะเวลาให้ความร้อน

จากการศึกษางานวิจัยของ Tianzhe Tu และคณะเรื่อง SiC reticulated porous ceramics by 3D printing, gelcasting and liquid drying งานวิจัยนี้ทดลองสร้างชิ้นงานเซรามิก 3 มิติ ที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ 1) 3D printing process เพื่อทำโครงชิ้นงานโดยใช้พลาสติกชนิด PVA 2) Gelcasting process ใช้ผง Silicon carbide และ Yttrium oxide โดยใช้ผง Alumina เป็นตัวเติมในการเตรียม 3) liquid drying process ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับการอบแห้งของของเหลวเพื่อควบคุมการแตกร้าวและกำจัดโครงสร้างของพลาสติก PVA โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะดังรูป กระบวนการของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเตรียมชิ้นงานเซรามิกพอร์นแบบ 3 มิติ รวมไปถึงเซรามิกชั้นสูงอีกด้วย



รูปที่ 2.7 สรุประบวนการในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก

จากการศึกษางานวิจัยของ Wante kim และ Fumio Saito เรื่องการสังเคราะห์ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยอาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงอัลตราซาวด์จากกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) พบว่าสามารถเตรียมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ และมีการกระจายขนาดอนุภาคที่ดี อนุภาคมีขนาดเล็ก จึงนำมาเป็นแบบอย่างในการเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

แนวทางการวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน 1. เตรียมสูตรสำหรับขึ้นเส้นด้วยเครื่องอัดรีดเส้นใย เพื่อใช้สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ 2. การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติและเผาผนึก 3. การทดสอบชิ้นงานของชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

- 1) บีกเกอร์ขนาดต่างๆ
- 2) ช้อนตักสาร
- 3) เครื่องอัดรีดเส้นใยขนาด 1.75 มิลลิเมตร
- 4) เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM
- 5) เครื่อง Rotary evaporator

3.1.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) Hydroxy Apatite ผสมกับ 10% TiO_2
- 2) Polyvinyl alcohol Mw 9,000-10,000
- 3) Silicone oil
- 4) PVB BL-10 Sekisui
- 5) Stearic acid 95% PS
- 6) Polyethylene Glycol 1540
- 7) สารละลายกรดฟอสฟอริก (85%)
- 8) Hydrated lime

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์

1. ชั่งผง Ca(OH)_2 หรือ Hydrated lime จำนวน 370.47 กรัม ผสมน้ำ 3000 กรัม ปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นน้ำดี ความเร็วต่ำ
2. ชั่งสารละลายกรดฟอสฟอริก (85%) จำนวน 345.86 กรัม และเติมน้ำกลั่นลงไปจนเป็น 1000 กรัม

3. เทกรดลงไปในสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ครึ่งละ 100 กรัม แล้วปั่นผสมเป็นเวลา 5 นาที จนหมด
4. ปั่นกวนต่อไปอีก 30 นาที เพื่อให้ทำปฏิกิริยาจนสมบูรณ์
5. อบแห้งสารทั้งหมด
6. นำไปเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม.
7. นำผงไฮดรอกซิอะพาไทต์มาบดแล้วผ่านตะแกรงขนาด 100# หรือขนาด 150 ไมโครเมตร

3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมเส้น

แบบผสมแห้ง

- 1) เตรียมวัตถุดิบตามสูตรดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงสูตรการเตรียมวัตถุดิบเส้นใยสูตรต่างๆ

Raw materials	HP9			HP10			HP11			HP12		
Polymer	Vol %	Mass %	Batch 30g	Vol%	Mass %	Batch 30g	Vol%	Mass %	Batch 30g	Vol%	Mass %	Batch 30g
PVB BL-10 Sekisui	10	6.61	4.19	8.77	6.13	4.19	8.17	5.87	4.19	8.17	5.87	4.19
PEG 1540 Wako	18	12.45	7.89	15.79	11.53	7.89	14.71	11.05	7.89	14.71	11.05	7.89
SA	2	1.13	0.72	14.02	8.37	5.72	19.90	12.22	8.72	19.90	12.22	8.72
PVA 9000 Aldrich	45	32.47	20.57	39.48	30.09	20.57	36.78	28.82	20.57	36.78	28.82	20.57
Ceramic												
Hydroxyapatite	25	47.35	30.00	21.93	43.88	30.00	20.43	42.04	30.00	20.43	42.04	30.00
Silicone oil												7.10
Sum	100	100.00	63.36	100	100.00	68.37	100	100.00	71.37	100	100.00	78.47

- 2) ชั่งส่วนผสมตามสูตรและผสมให้เข้ากันโดยนำไปหลอมที่ตู้อบอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 10-15 นาที



รูปที่ 3.1 ลักษณะของวัตถุดิบที่ผสมกันและนำไปหลอมที่ 110 °C

3) นำวัตถุดิบที่ผสมเข้ากันดีแล้วไปทำการรีดเป็นเส้นโดยใช้อุณหภูมิ 160 °C หัวรีดขนาด 1.75 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการรีดเส้นใยผ่านเครื่องรีดร้อน

4) นำเส้นที่รีดได้ไปทำการพิมพ์ด้วยเครื่อง FDM 2 หัวฉีด อุณหภูมิ 220 °C แผ่นรองอุณหภูมิ 80 °C หัวฉีด ขนาด 0.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ FDM ที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ

ตารางที่ 3.2 แสดงการตั้งค่าการพิมพ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

	แท่งสี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก
ขนาดหัวฉีด (mm)	0.4	0.4
อุณหภูมิหัวฉีด	220	220
อุณหภูมิฐานรอง	80	80
ความหนา(mm)	1.5	2.43
ขนาดแกน x (mm)	54.73	20
ขนาดแกน y (mm)	22.21	19.98

แบบผสมเป็ยก

สัดส่วนวัตถุดิบ

ตารางที่ 3.3 แสดงสูตรการผสมเป็ยก HP13

	HP13		
Polymer	Vol%	Mass%	Batch 50g
PVB BL-10 Sekisui	10	6.61	6.98
PEG 6000 Ajak Finecher	18	12.45	13.14
SA	2	1.13	1.19
PVA 9000 Aldrich	45	32.47	34.29
Ethanol			250
Water			100
Ceramic			
Hydroxyapatite	25	47.35	50.00
Sum	100	100.00	455.61
Polymer (Vol%)	75		
Ceramic (Vol%)	25		
PVB/(Cer+PVB) (Vol%)	28.57		
PVB/(Polymer) (Vol%)	13.33		

ขั้นตอนการผสมสูตรแบบวิธีเปียก

1. ทำการละลาย PVB และ SA ปริมาณ 6.98 และ 1.19 กรัม ลงใน Ethanol ปริมาณ 250 กรัมดังตารางที่ 3.3
2. เติม Hydroxyapatite ลงไปผสมด้วยปริมาณ 50 กรัม
3. เติมน้ำ 100 กรัม
4. ทำการผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่อง rotary evaporator ซึ่งเครื่องจะทำการผสม โดยการหมุนและให้ความร้อนไปพร้อมๆกัน ทำให้สารที่ผสมได้นั้นแห้งและมีความเข้ากันมาก
5. ทำการละลาย PEG 13.14 กรัม ดังตารางที่ 3.3 โดยใช้อุณหภูมิที่ 70 °C จากนั้นเติมผงที่เตรียมไว้จากข้อ 4 ผสมลงไป
6. ทำการเติม PVA 34.29 กรัม ดังตารางที่ 3.3 ลงในผงผสมที่เตรียมไว้จากข้อ 5 โดยนำ PVA ไปอุ่นที่อุณหภูมิ 120 °C ก่อนนำมาผสม
7. นำผงผสมที่ได้ไปทำการขึ้นรูปเป็นเส้น filament โดยวิธีรีดต่อไป

3.2.1.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วย Fused Deposition Modeling (FDM)

- 1) เตรียมไฟล์รูปภาพโครงเลี้ยงเซลล์ นามสกุล STL สำหรับการสั่งพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ FDM
- 2) เมื่อได้ชิ้นงานแล้วนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้วัสดุเชื่อมประสาน PEG ละลายออกเป็นการกำจัดตัวประสานด้วยวิธีการใช้ตัวทำละลาย เพื่อลดการหดตัวหลังเผาผนึกจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
- 3) หลังจากการไล่วัสดุเชื่อมประสานออกหมดแล้วนั้น จึงนำชิ้นงานไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 5 °C/นาที่ soak 2 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบการหดตัวของชิ้นงาน

$$\text{การหดตัวของชิ้นงานวัสดุเซรามิกพอรุน} = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100$$

L_i = ความยาวที่จุดอ้างอิงก่อนเผาผนึก

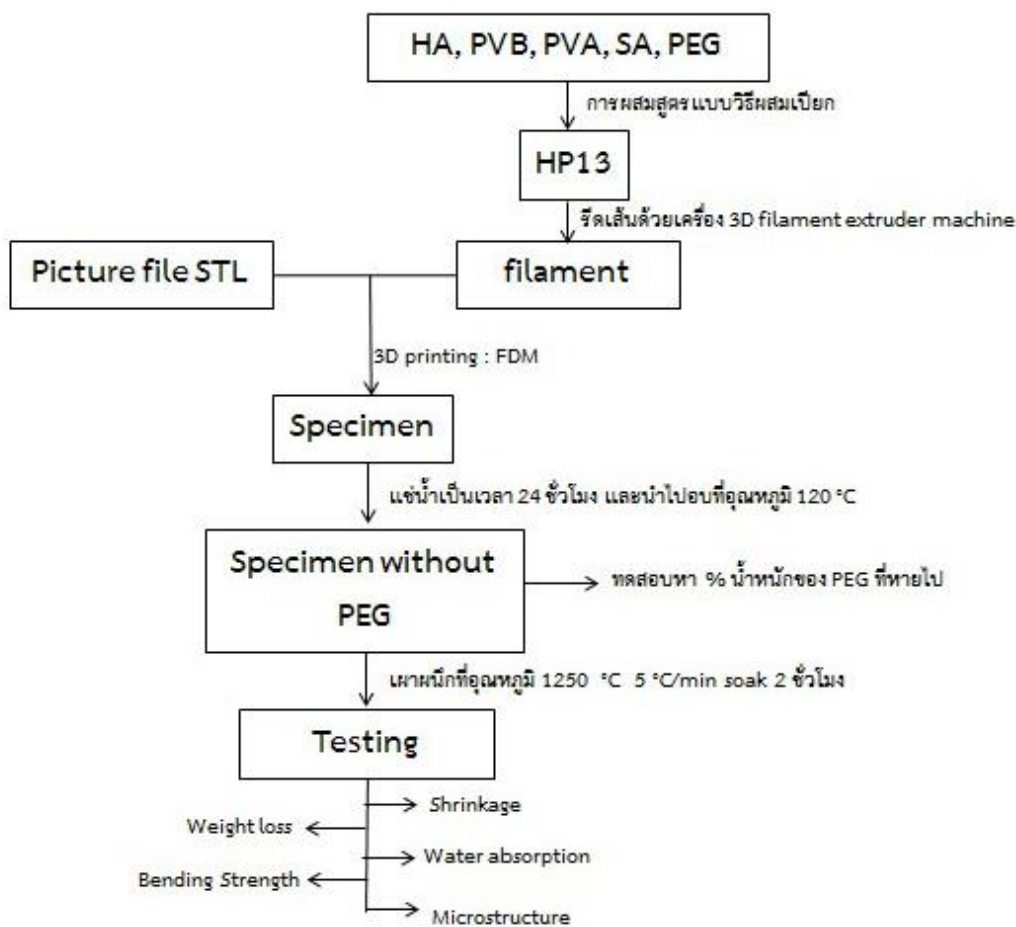
L_f = ความยาวที่จุดอ้างอิงหลังเผาผนึก

- 4) นำชิ้นงานที่ได้หลังการเผาผนึกไปทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ ทดสอบความแข็งแรง และทดสอบลักษณะข้อสันฐานวิทยาของวัสดุ

3.2.1.4 ขั้นตอนการกำจัดตัวเชื่อมประสาน

- 1) นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ นำมาแช่ D.I. water 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตัวเชื่อมประสาน PEG และ SA ออกไปส่วนหนึ่ง
- 2) หลังจากแช่น้ำแล้ว 24 ชั่วโมงนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C 15 นาที เพื่อให้สามารถแกะชิ้นงานโดยที่ตัวเชื่อมประสานไม่เกาะติดชิ้นงาน จากนั้นอบต่อที่อุณหภูมิ 120 °C 1 ชั่วโมง

3.2.2 แผนภาพการทดลอง



3.3 การทดสอบชิ้นงานเซรามิกพอร์น

3.3.1 การทดสอบสมบัติชิ้นงานทางกายภาพ

3.3.1.1 ความหนาแน่น (Density) การดูดซึมน้ำและปริมาณรูพรุน (Water absorption and Porosity)

การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในรูพรุนเปิดของชิ้นงาน แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิว โดยจะใช้วิธีต้มชิ้นงานแล้วชั่งน้ำหนักก่อนหลัง ดังสมการ

$$\text{Water Absorption} = \frac{W-D}{D} \times 100 \quad (\%)$$

3.3.1.2 การหดตัวของวัสดุ (shrinkage)

นำวัสดุมาคำนวณร้อยละการหดตัวหลังเผาได้ดังนี้

$$S_t = \frac{L_p - L_f}{L_p} \times 100$$

S_t = การหดตัวหลังเผา

L_p = ความยาวของระยะอ้างอิง

L_f = ความยาวหลังเผาของระยะอ้างอิง

3.3.2 การตรวจลักษณะทางสอปลัฐานวิทยา

การตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุ

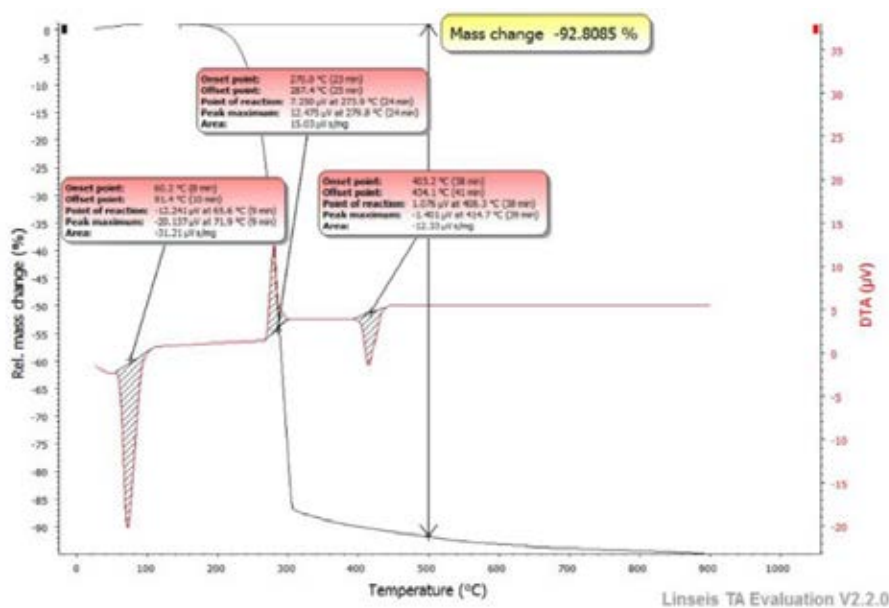
ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และสามารถตรวจสอบชิ้นทดสอบตัวอย่างเพื่อศึกษาพื้นผิวบริเวณรอยแตกของชิ้นทดสอบได้โดยการนำชิ้นทดสอบที่แตกหักหลังผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงมาตรวจสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

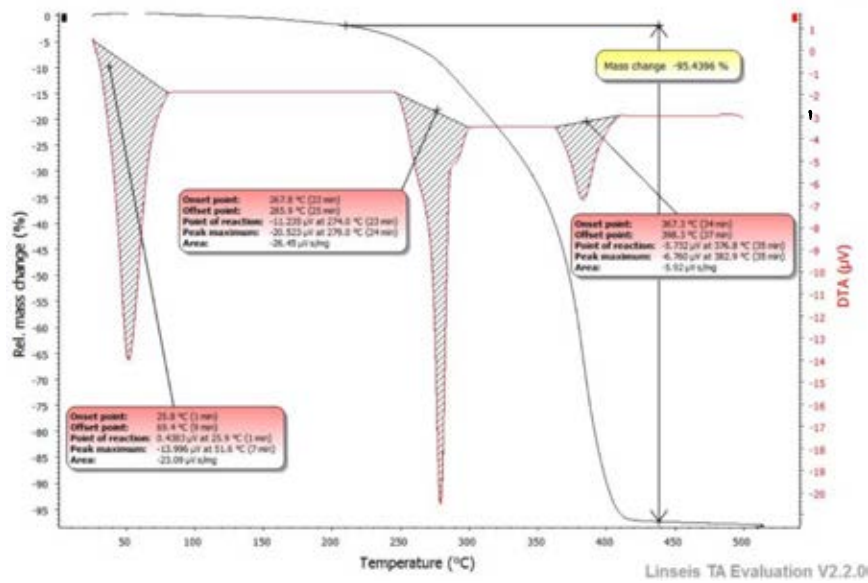
4.1 สมบัติเชิงความร้อนของ Stearic acid(SA), Poly Ethelene Glycol (PEG) ,Poly Vinyl alcohol(PVA) และ Poly Vinyl Butyral (PVB)

4.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค *Differential Thermal Analysis (DTA)* ซึ่งเป็นการวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง ในระหว่างให้ความร้อนอุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูด (Endothermic)หรือการคายความร้อน(Exothermic) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน(Enthalpic transition) ได้ผลดังนี้

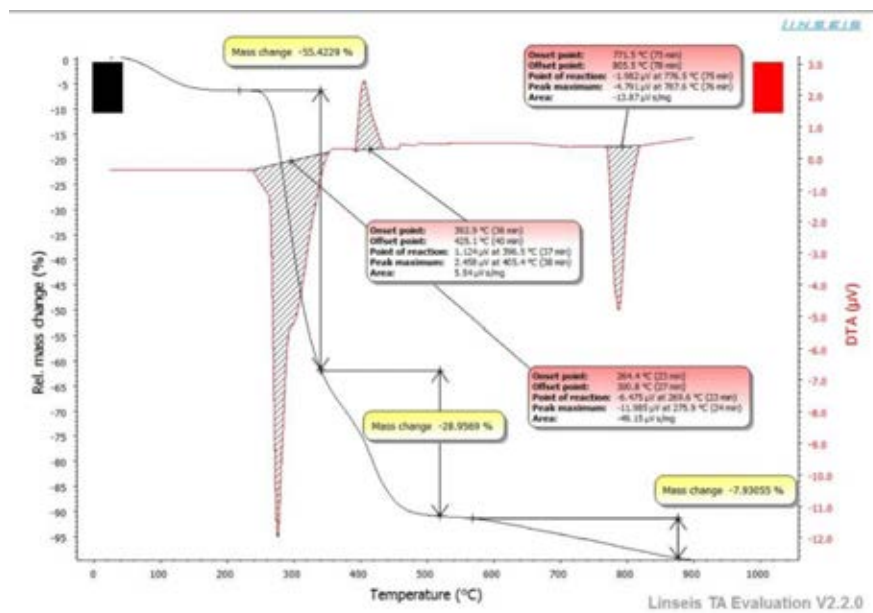


รูปที่ 4.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ SA

จากรูป จะเห็นว่าที่อุณหภูมิประมาณ 250 °C SA เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และเริ่มเกิดการสลายตัวไปจนถึงอุณหภูมิ 300 °C

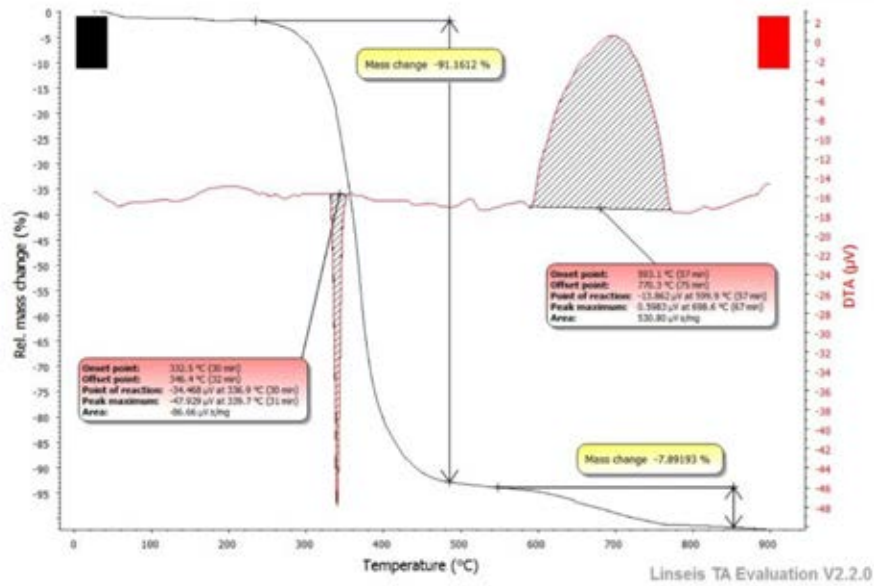


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ PEG
จากรูป จะเห็นว่าที่อุณหภูมิประมาณ 240 °C PEG เริ่มเกิดการสลายตัว เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และจะสลายตัวไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 420 °C



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิของ PVA

จากรูป ที่อุณหภูมิประมาณ 220 °C จะเริ่มเกิดการสลายตัว เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน และที่อุณหภูมิ 320 °C เกิดการสลายตัวขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และต่อมาเกิดการสลายตัวครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 575 °C เกิดเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

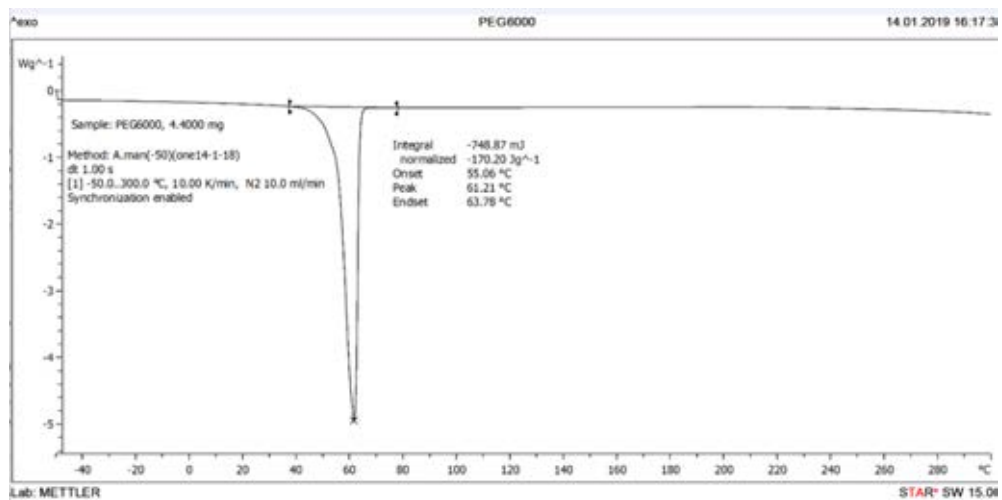


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิ ของ PVB

จากรูป ที่อุณหภูมิประมาณ 240°C จะเริ่มเกิดการสลายตัวไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500°C เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และต่อมาเกิดการสลายตัวขึ้นอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 540°C เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

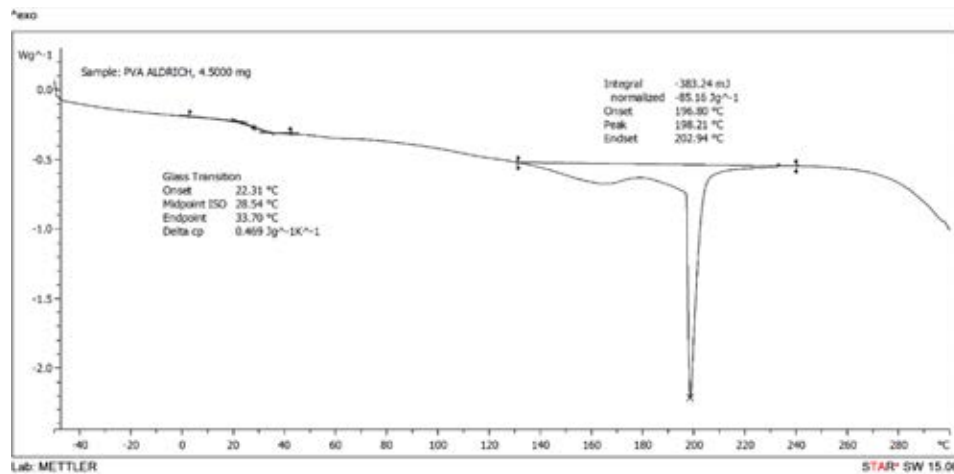
เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ผลของ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ของ PEG



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของ DSC ของ PEG

จากกราฟ DSC อุณหภูมิที่ PEG เริ่มหลอมเหลวคือ 55.06°C อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 61.21°C ไม่ปรากฏข้อมูล T_g อาจเนื่องมาจาก heating rate ไม่ละเอียด หรือ T_g อาจน้อยกว่า -40°C เพราะจากกราฟ DSC เริ่มดำเนินการที่ -40°C จึงไม่ปรากฏผล T_g

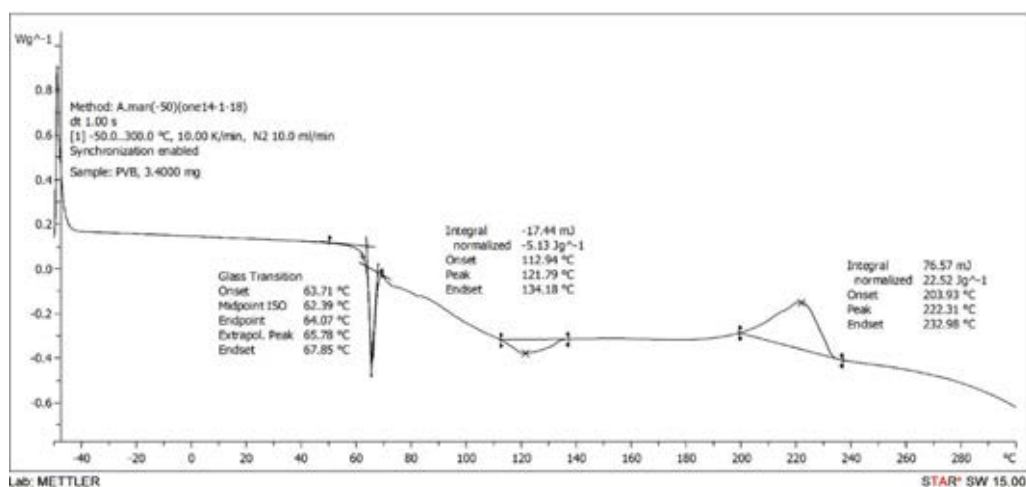
ผลของ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ของ PVA



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของ DSC ของ PVA

จากกราฟ DSC อุณหภูมิที่ PVA เริ่มหลอมเหลวอยู่ที่ 196.80°C และอุณหภูมิ T_m คือ 198.21°C ค่า T_g ของ PVA คือ 28.54°C

ผลของ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ของ PVB



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของ DSC ของ PVB

จากกราฟ DSC อุณหภูมิ T_g มีค่า 62.39 °C อุณหภูมิที่เริ่มมีการหลอมเหลวคือ 121.79 °C
อุณหภูมิ T_m มีค่า 222.31 °C

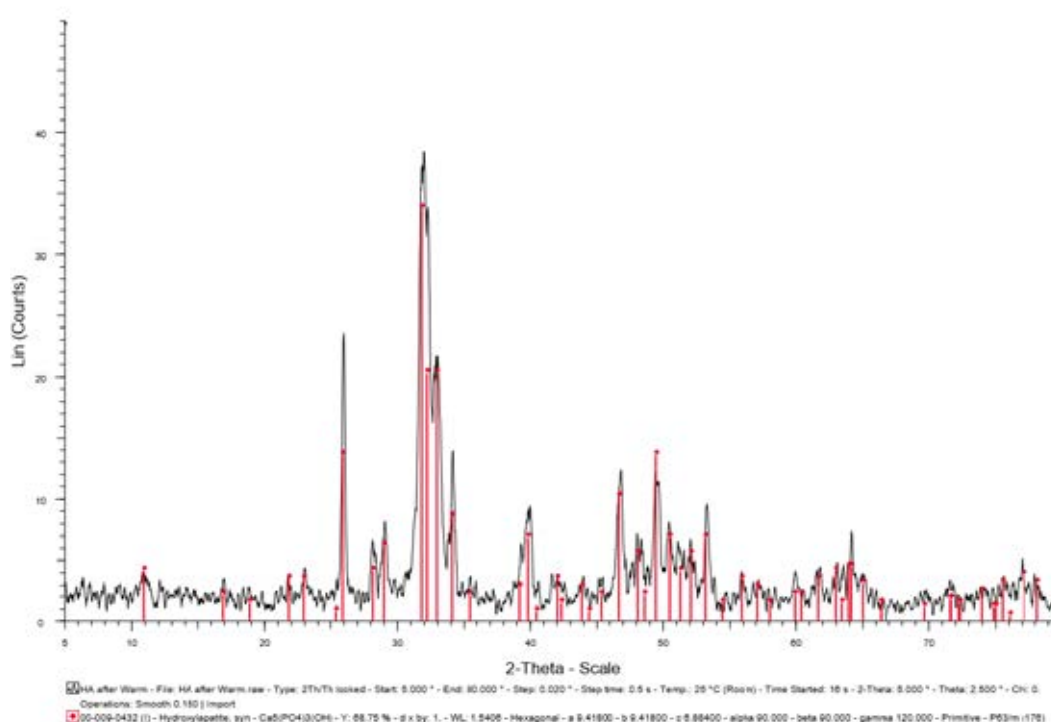
ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลการทดสอบทางความร้อนของวัสดุเชื่อมประสาน

	T_g (°C)	T_m (°C)	T_d (°C)
PVB	62.39	121.79	339.77
PEG 6000	-	61.21	279
PVA 9000	28.54	198.21	275.9

4.2 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้

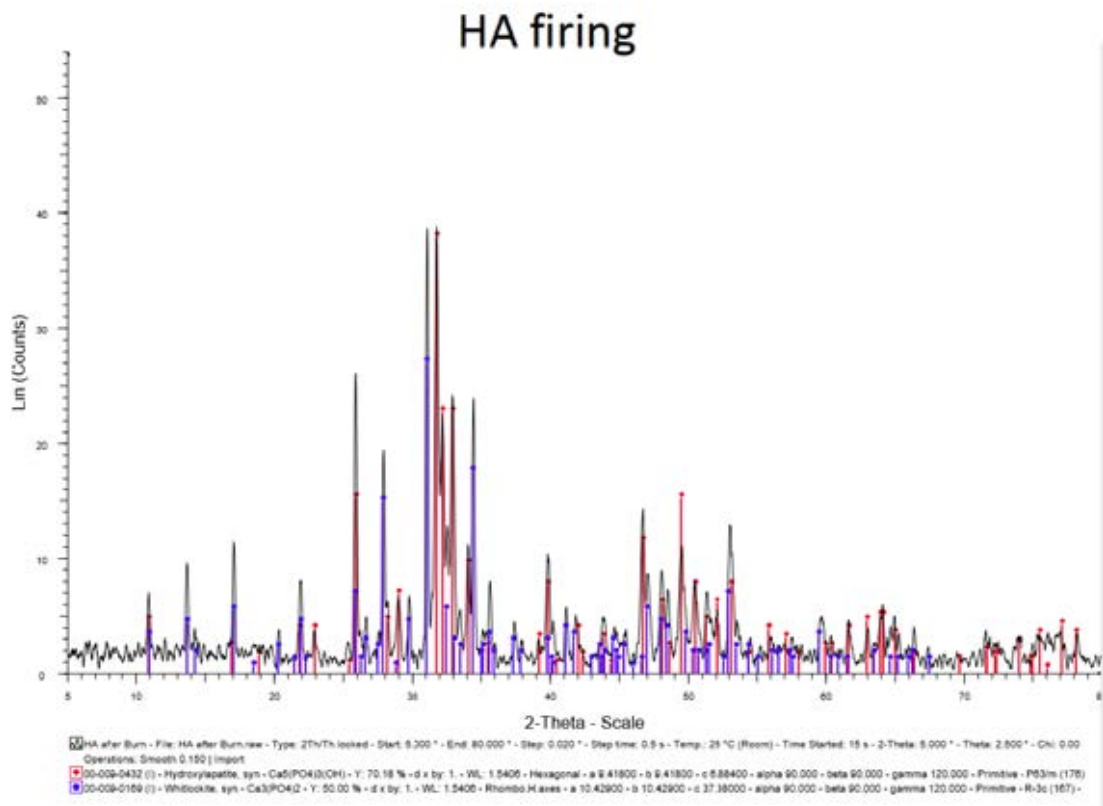
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD)

HA drying



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงผล XRD ไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังอบ

จากผลการวิเคราะห์กราฟ XRD ดังรูปที่ 4.8 พบว่าปรากฏพีคที่ตรงกันของเฟสไฮดรอกซีอะพาไทต์ดังกราฟ จึงจะได้ว่าเกิดเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ขึ้นหลังการนำไปอบ

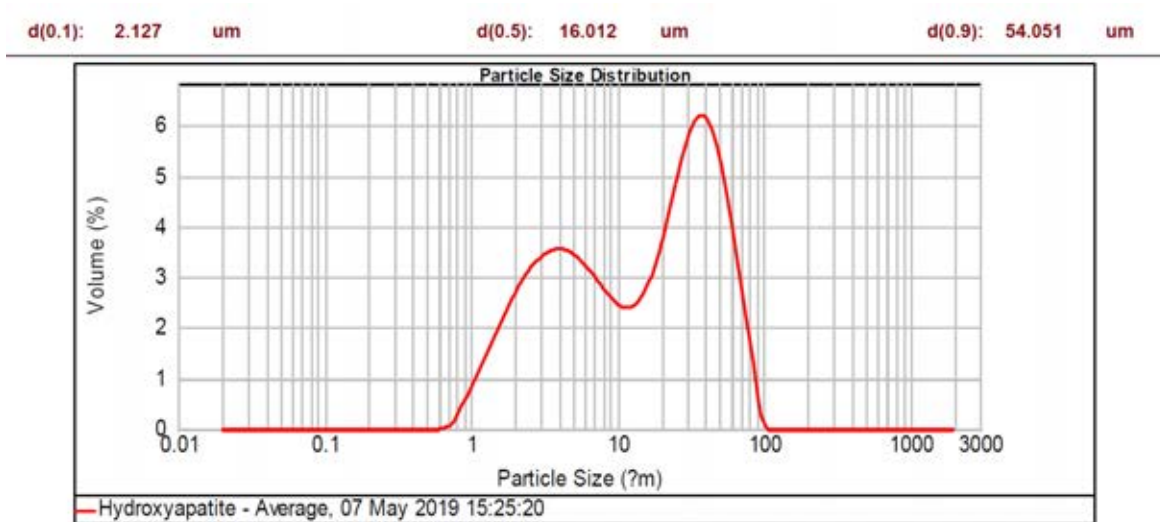


รูปที่ 4.9 ภาพแสดงผล XRD ไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังเผา

จากผลการวิเคราะห์กราฟ XRD พบว่าปรากฏพีคที่ตรงกันของเฟสไฮดรอกซีอะพาไทต์ดังกราฟ จึงจะได้ว่าเกิดเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$) ขึ้นหลังการนำไปเผาและเกิดเฟสของวิทลอคโคไซด์ (Ca_3PO_4)₂ เนื่องจากเป็นแร่ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบจึงอาจพบเฟสนี้ขึ้นได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วย Particle size distribution

การหาขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค จะใช้วิธีวัดโดยใช้เครื่อง Particle size distribution โดยใช้ laser เป็นตัวนับจำนวนอนุภาค และสามารถ plot ออกมาเป็นกราฟได้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการวัดขนาดอนุภาคโดยเครื่อง Particle size distribution

จากกราฟพบว่ามีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงประมาณ 3 ไมครอนและช่วงประมาณ 30 ไมครอน แต่ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาที่ได้ ดังรูปที่ 4.10 จะได้ว่าขนาดอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่าเท่ากับ 1-2 ไมครอน ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของการวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution นี้ ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคที่ได้เป็น 2 ช่วงอาจเกิดจากการที่สารยังมีการรวมกลุ่มกันในระหว่างที่ทำการวัดขนาดอนุภาค ทำให้ค่าเฉลี่ยอนุภาคที่ได้มีทั้งช่วงที่อนุภาคมีขนาดเล็กและช่วงที่อนุภาคมีขนาดใหญ่

4.3 ผลการทดลองรีดเส้น

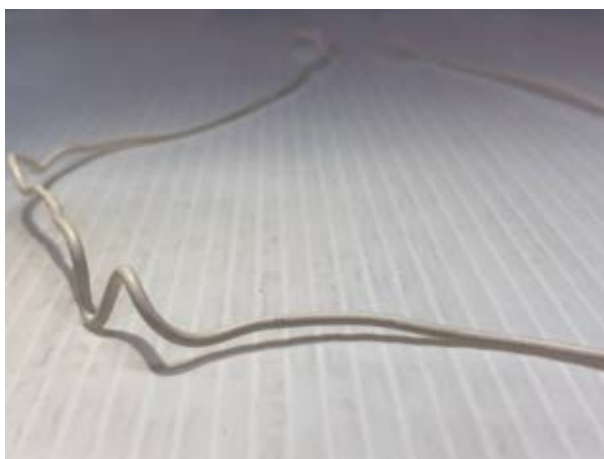
รีดเส้นครั้งที่ 1 สูต HP9 อุณหภูมิในการรีด 190-210 °C



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูต HP9 อุณหภูมิในการรีด 190-210 °C

เส้นมีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นดี ไม่แตกง่าย เนื้อผิวมีความขรุขระ ไม่ค่อยเรียบสม่ำเสมอ เนื้อเส้นมีเส้นเหลือง มันเงาเล็กน้อย

รีดเส้นครั้งที่ 2 สูต HP9 อุณหภูมิในการรีด 205-210 °C



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูต HP9 อุณหภูมิในการรีด 205-210 °C

เส้นมีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่นดี เนื้อผิวมีความเรียบขึ้น ความขรุขระน้อยลง เนื้อเส้นมีสีเหลืองเนียน มันเงา

รีดเส้นครั้งที่ 3 สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 170-180 °C



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 170-180 °C

เส้นมีลักษณะไหมเป็นหย่อมๆ ปนกับสีขาว เนื้อไม่homogeneousกัน และเส้นมีสีเข้มมาก เนื้อเส้นยืดหยุ่น ไม่ค่อยมันเงา เนื้อขรุขระ

รีดเส้นครั้งที่ 4 สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 175 °C



รูปที่ 4.14 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 175 °C

เส้นมีลักษณะสีเข้มอ่อนลงจากการรีดครั้งที่ 3 เนื้อมีความยืดหยุ่นและเข้ากันมากขึ้น มันเงาเล็กน้อย ยังคงขรุขระ

รีดเส้นครั้งที่ 5 สูตร HP9 อุณหภูมิในการรีด 185 °C



รูปที่ 4.15 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11 อุณหภูมิในการรีด 175°C

เส้นมีลักษณะสีเทา ผิวค่อนข้างขรุขระ ไม่เรียบเนียน มันเล็กน้อย

รีดเส้นครั้งที่ 6 สูตร HP11+Silicone oil(%10wt) อุณหภูมิในการรีด 185 °C



รูปที่ 4.16 ภาพแสดงเส้นที่รีดด้วย สูตร HP11ผสมSilicone oil อุณหภูมิในการรีด 175°C

เส้นมีลักษณะสีเทา มีสีขาวกระจายตามจุด เนื้อไม่ค่อยเข้ากันดีเท่าที่ควร ผิวค่อนข้างขรุขระ ไม่เรียบเนียน มันเงาเล็กน้อย

รีดเส้นโดยการปรับโดยการเริ่มรีดเส้นด้วยเครื่อง extrusion ก่อน 2-3 รอบที่อุณหภูมิ 220 °C แล้วจึงนำมารีดด้วยเครื่องรีดเส้นขนาด 1.75 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 180 °C



รูปที่ 4.17 เมื่อรีดด้วยเครื่อง extrusion ที่อุณหภูมิ 220 °C



รูปที่ 4.18 เมื่อรีดซ้ำด้วยเครื่องรีดเส้น ที่อุณหภูมิ 180 °C

จะเห็นว่าเส้นที่รีดได้ในแต่ละครั้งนั้นไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงปรับเปลี่ยนวิธีการผสมใหม่ ให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันด้วยวิธีการผสมเปียก ซึ่งเมื่อใช้วิธีนี้เส้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น สีขาว เป็นเนื้อเดียวโดยใช้อุณหภูมิในการรีดเส้นอยู่ที่ 160 °C ซึ่งผลการการรีดเส้นด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้เป็นครั้งแรก ลักษณะเส้นดังรูปที่ 4.19



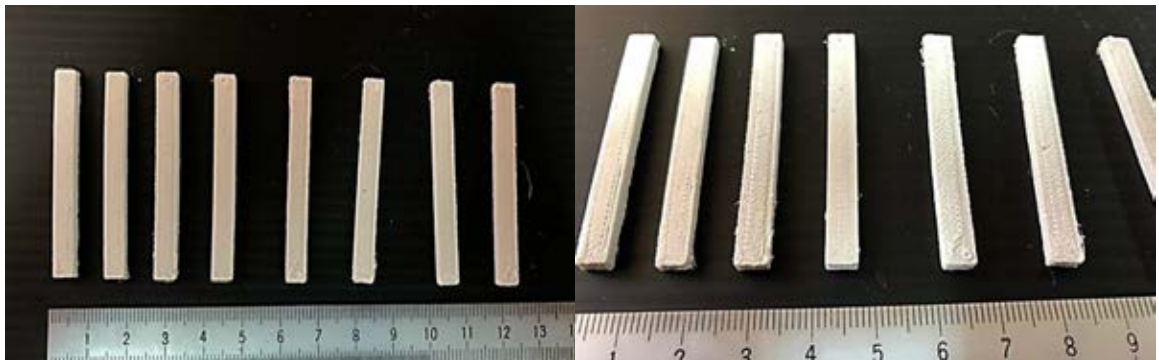
รูปที่ 4.19 เส้นที่ได้จากการผสมเปียกสูตร HP13

4.4 ผลการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 4.20 ภาพแสดงเส้นใยไม่สามารถพิมพ์เป็นชิ้นงาน 3 มิติได้

จากการทดลองขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.20 พบว่าเส้นใยที่สามารถผ่านหัวฉีดแล้วพิมพ์ออกมาได้คือเส้นที่ผสมด้วยสูตร HP9 ซึ่งเป็นสูตรที่ดีที่สุด แต่ยังไม่สามารถพิมพ์ได้ครบทั้งชิ้นงาน เส้นไม่สามารถผ่านหัวฉีดออกมาได้จึงต้องพัฒนาการผสมสารใหม่ให้มีความเข้ากันของเส้นใยมากกว่าเดิมด้วยวิธีผสมเปียก



รูปที่ 4.21 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมที่พิมพ์ได้โดยใช้สูตร HP13

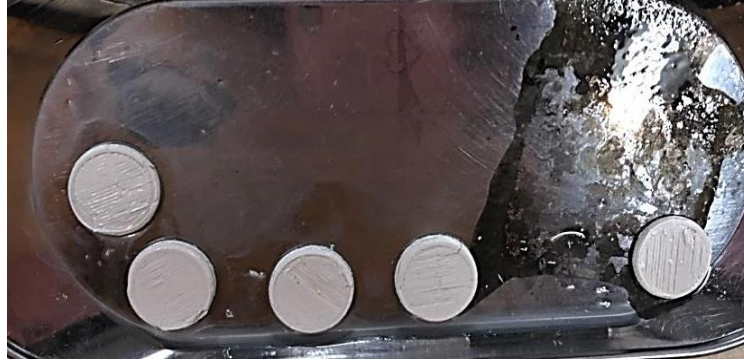


รูปที่ 4.22 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญที่พิมพ์ได้โดยใช้สูตร HP13

จากการทดลองนำสูตร HP13 ซึ่งเป็นสูตรที่นำมาผสมแบบวิธีเปียก พบว่าสามารถนำเส้นที่ได้มาพิมพ์เป็นชิ้นงาน 3 มิติโดยชิ้นงาน 3 มิติมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.21 และเป็นทรงเหรียญดังรูปที่ 4.22 จากรูปทั้งสอง ชิ้นงาน 3 มิติที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผิวจะมีลักษณะเรียบเนียนกว่าทรงเหรียญ เนื่องจากมีการตั้งค่าการพิมพ์ที่ละเอียดกว่า และจะสังเกตเห็นเส้นพิมพ์ระหว่างชั้นเป็นชั้นๆ เนื่องจากการพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 4.23 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง

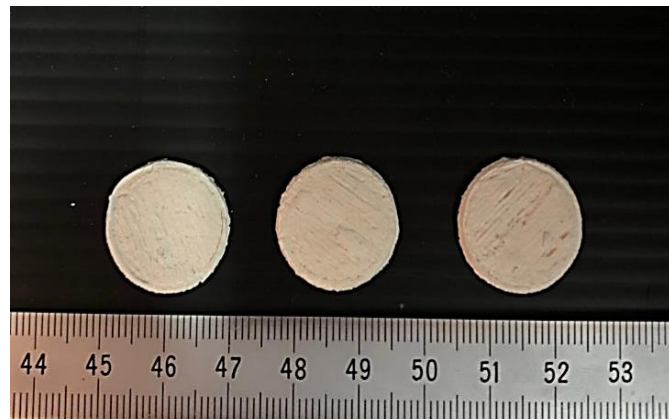


รูปที่ 4.24 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงลักษณะของชิ้นงาน 3 มิติทั้งทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก หลังนำไปแช่น้ำ เพื่อละลายตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์บางส่วนออก พบว่าชิ้นงานมีความอ่อนนุ่มและพบว่าการละลายของตัวเชื่อมประสานออกมาจากชิ้นงาน 3 มิติ เนื่องจากน้ำที่แช่มีลักษณะเหมือนกาว และเมื่อนำไปอบแล้วชิ้นงาน 3 มิติจะถูกยึดติดอยู่กับภาชนะ ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดการละลายของตัวเชื่อมประสาน

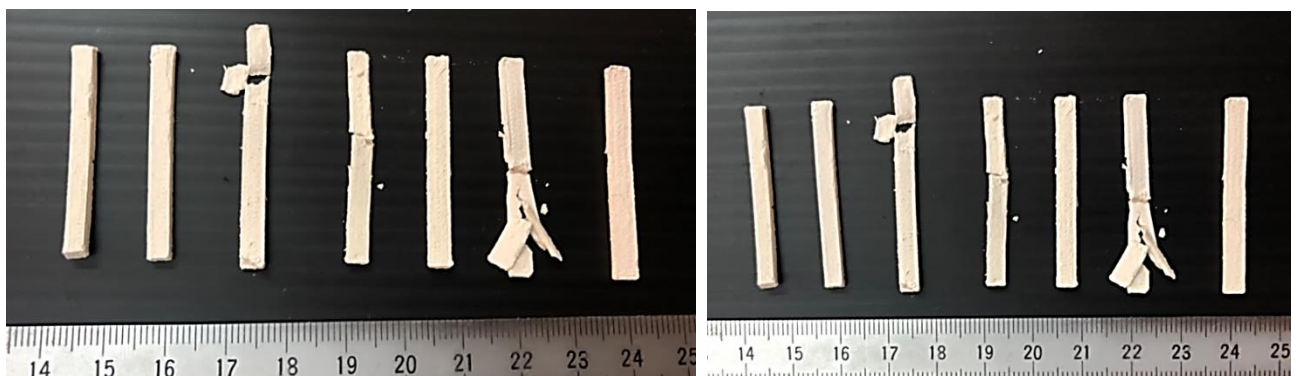


รูปที่ 4.25 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมหลังอบ



รูปที่ 4.26 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญหลังอบ

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงชิ้นงาน 3 มิติหลังอบ โดยจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C ก่อนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ชิ้นงาน 3 มิติมีลักษณะที่แน่นขึ้น สามารถจับชิ้นงานได้ หลังจากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C 2 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานแห้งและสามารถจับชิ้นงานได้ แต่ยังคงพบปัญหาชิ้นงานติดกับภาชนะเนื่องจากการละลายของตัวเชื่อมประสานทำให้ชิ้นงานเสียหาย



รูปที่ 4.27 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงสี่เหลี่ยมหลังเผา



รูปที่ 4.28 ภาพชิ้นงาน 3 มิติทรงเหรียญหลังเผา

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงชิ้นงาน 3 มิติหลังเผา พบว่าชิ้นงานมีลักษณะที่ยังไม่หลอมและเรียบเนียนดี ไม่เกิดปัญหาการโค้งงอ การพองตัว หรือการแตกร้าวเกิดขึ้น โดยชิ้นงาน 3 มิติที่แตกภายในรูปที่ 4.27 เป็นการแตกก่อนเผาเนื่องจากการติดภาชนะ ไม่ได้แตกเนื่องจากการเผา



รูปที่ 4.29 ภาพชิ้นงาน 3 มิติหลังเผาโดยไม่แช่น้ำ

จากรูปที่ 4.29 แสดงภาพชิ้นงาน 3 มิติหลังเผาโดยที่ไม่ได้นำไปแช่น้ำ เพื่อละลายตัวเชื่อมประสานออกไปก่อน พบว่าชิ้นงาน 3 มิติหลังเผาเกิดปัญหาการโค้งงอและพองตัวเกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถที่จะนำไปหาค่าทดสอบต่างๆได้

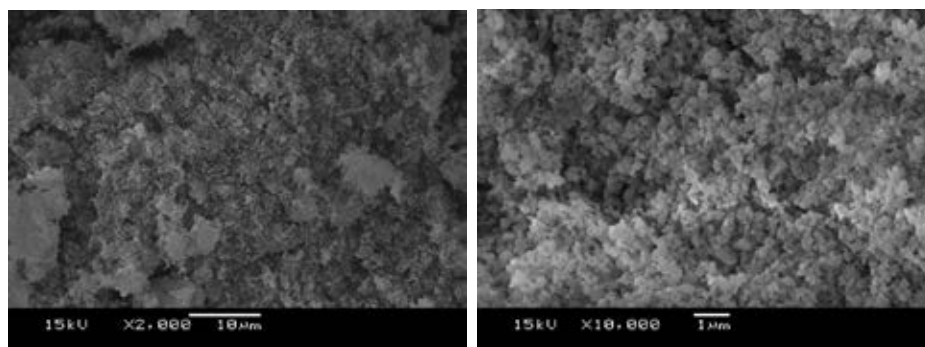
4.5 ตารางแสดงค่าทดสอบต่างๆของชิ้นงาน 3 มิติ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าทดสอบต่างๆของชิ้นงาน 3 มิติ

ผลการทดสอบ	%น้ำหนักที่หายไปหลังแช่น้ำ	%น้ำหนักที่หายไปหลังเผา	%การหดตัว	Water absorption (%)	Bending strength (MPa)	Density (g/cm ³)
HA	-	2.42	23.77	-	-	2.91
HP13 แท่งสี่เหลี่ยม	44.73	62.15	34.46	26.69	0	-
HP13 ทรงเหรียญ	46.88	64.75	23.63	-	-	-

4.6 ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา

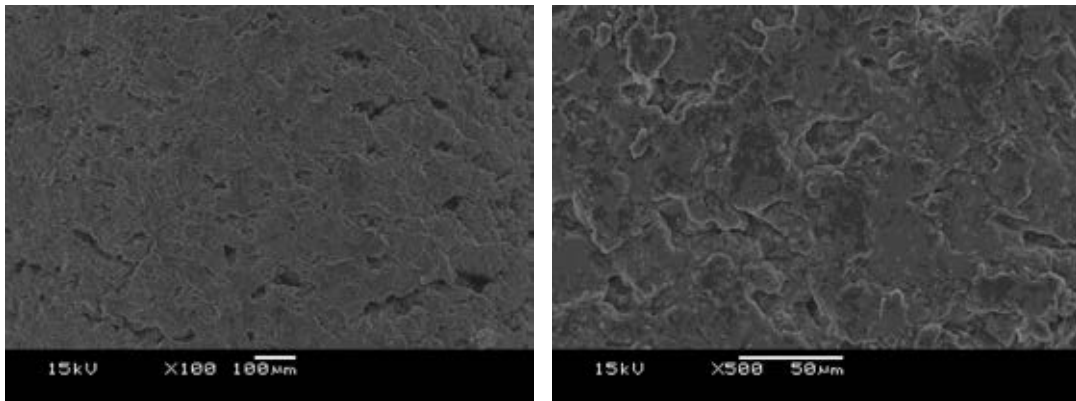
4.6.1 ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 4.30 ภาพ SEM ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่กำลังขยาย 2000 และ 10,000

จากรูปที่ 4.30 แสดงภาพ SEM ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งจะพบว่าผงของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จะมีขนาดประมาณ 1 ถึง 3 ไมครอน ซึ่งจะสังเกตได้จากภาพที่มีกำลังขยาย 10,000 นอกจากนี้ยังพบอนุภาคบางส่วนอยู่รวมกันอีกด้วย

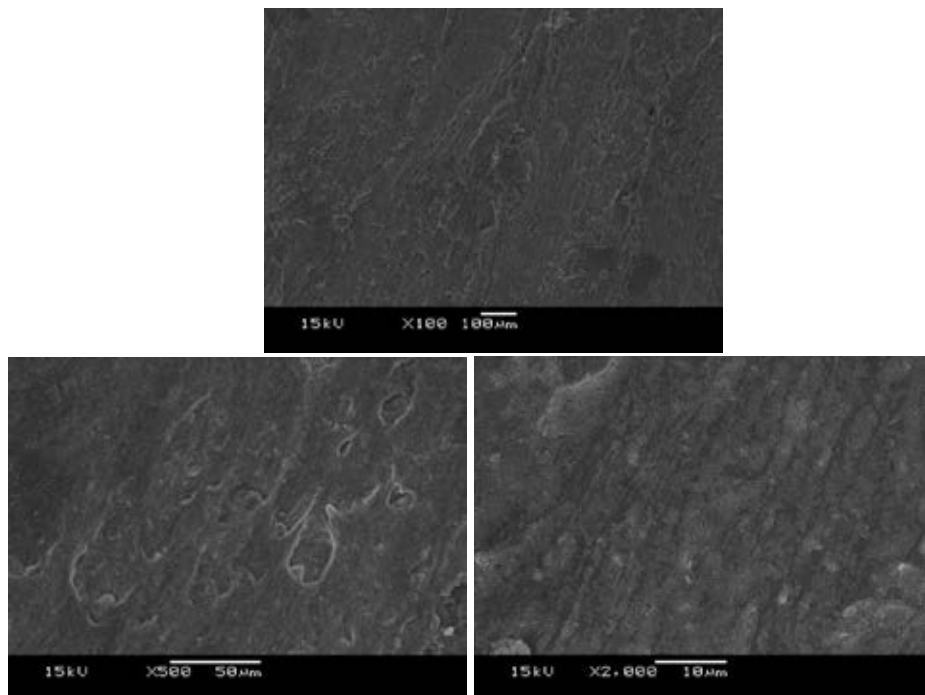
4.6.2 เส้น



รูปที่ 4.31 ภาพ SEM ของเส้นกำลังขยาย 100 และ 500

จากรูปที่ 4.31 แสดงภาพ SEM ของเส้น ซึ่งจะพบว่าเส้นที่ได้มีลักษณะไม่เรียบและมีรูพรุนอยู่บ้างเล็กน้อย

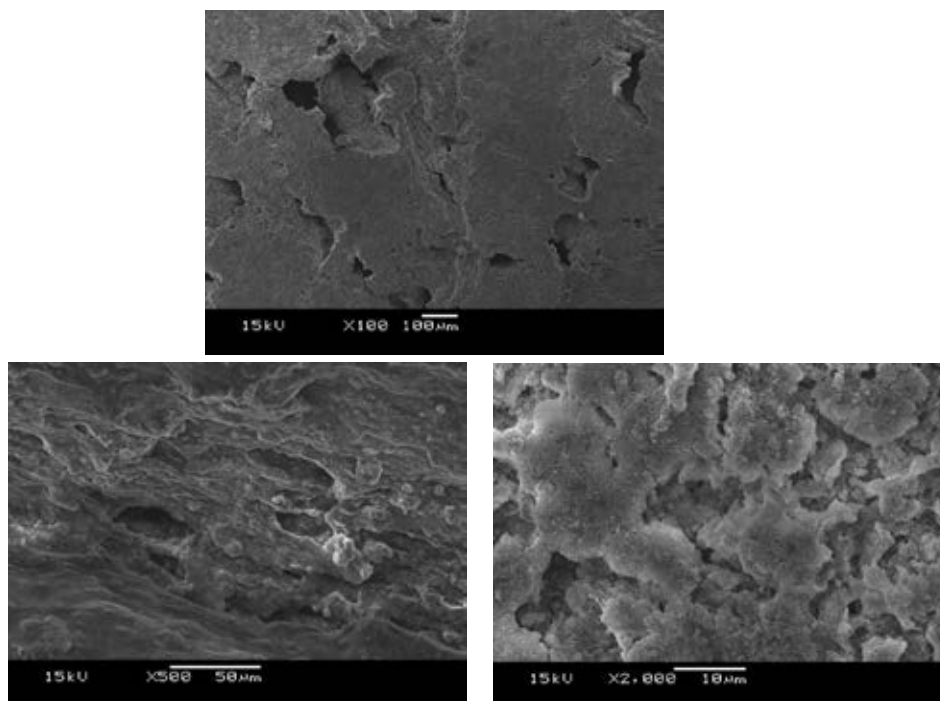
4.6.3 ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้



รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติกำลังขยาย 100, 500 และ 2000

จากรูปที่ 4.32 แสดงภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติ ซึ่งจะพบว่าพื้นผิวไม่เรียบเนียนและยังคงมีรอยเส้นที่เกิดจากการฉีดยเส้นเป็นชั้นๆ และยังคงพบรูพรุนอยู่บ้าง

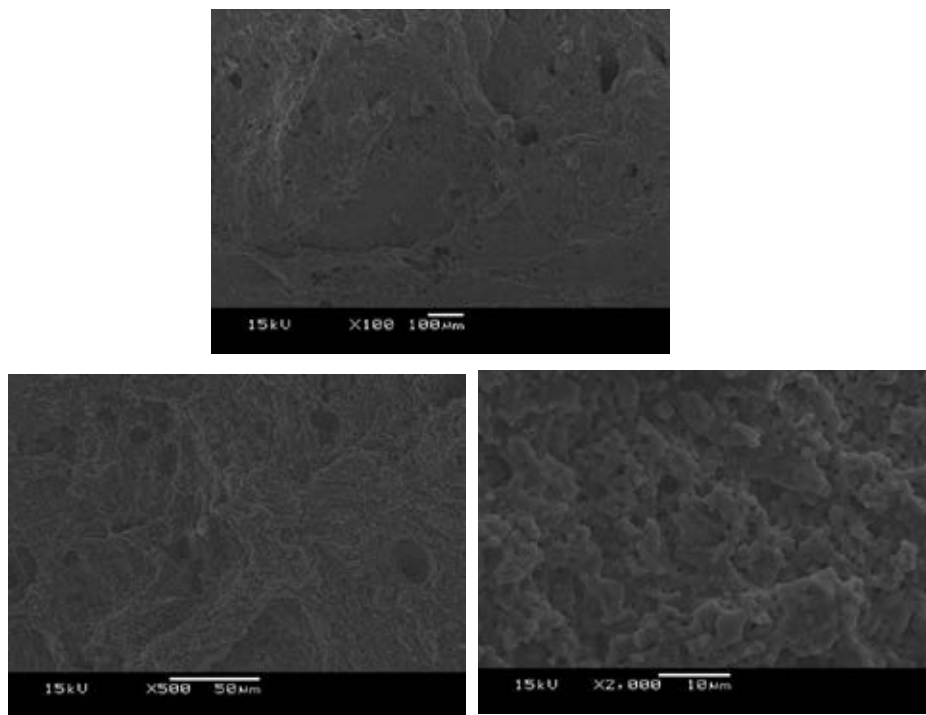
4.6.4 ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้หลังแช่น้ำ



รูปที่ 4.33 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังแช่น้ำกำลังขยาย 100, 500 และ 2000

จากรูปที่ 4.33 แสดงภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังแช่น้ำ ซึ่งจะพบว่าพบรูพรุนอยู่เป็นจำนวนมาก กระจายอยู่ตามพื้นผิวของชิ้นงาน 3 มิติ เนื่องจากการละลายไปของตัวเชื่อมประสานทำให้เกิดเป็นรูพรุนอยู่ตามพื้นผิวเป็นจำนวนมาก

4.6.5 ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้หลังเผา



รูปที่ 4.34 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังเผากำลังขยาย 100, 500 และ 2000

จากรูปที่ 4.34 แสดงภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังเผา ซึ่งจะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กลง เนื้อวัสดุแน่นมากขึ้น เนื่องจากการเผาผนึก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการนำไฮดรอกซีอะพาไทต์กับตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาฉีตเป็นเส้นเพื่อนำมาพิมพ์เป็นชิ้นงาน 3 มิติต่อไปนั้นพบว่าวิธีการผสมที่ดีที่สุดที่สามารถขึ้นรูปเส้นใยสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ คือวิธีการผสมเปียกด้วยสัดส่วนตามสูตร HP13 มีลักษณะยึดหยุ่นดี มีความเหนียว และมีเนื้อที่ผสมเข้ากันได้ดี ในส่วนของชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้จะแบ่งออกเป็น 2 รูปร่างคือ รูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยม ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จะมีความเป็นชั้นซ้อนๆ กัน เนื่องจากการพิมพ์ 3 มิติ เมื่อนำชิ้นงานไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชิ้นงานจะมีความอ่อนนุ่มขึ้น เมื่อได้รับแรงกระทำอาจทำให้ชิ้นงาน 3 มิติเกิดการบิ่นเสียรูปเกิดปัญหาบิดภาพขณะ ต่อมาเมื่อนำชิ้นงาน 3 มิติไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ชิ้นงาน 3 มิติจะมีความแข็งแรงขึ้น แต่ยังคงเปราะและแตกหักง่าย และเมื่อนำชิ้นงาน 3 มิติทั้งทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยมมาหาค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปหลังอบจะมีค่า 46.88 และ 44.73 ตามลำดับ ต่อมาคือร้อยละของน้ำหนักที่หายไปหลังเผาจะมีค่า 64.75 และ 62.15 ตามลำดับ และค่าร้อยละการหดตัวที่ได้มีค่า 23.63 และ 34.46 ตามลำดับ และชิ้นงาน 3 มิติมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เท่ากับ 26.69 ซึ่งเมื่อนำชิ้นงาน 3 มิตินี้ไปทดสอบวัดค่าความแข็งแรงด้วยการวัดค่า Bending Strength ค่าที่ได้เป็น 0 MPa คือไม่สามารถหาค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน 3 มิตินี้ได้ สำหรับสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้ มาตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่าสารไฮดรอกซีอะพาไทต์มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก โดยมีขนาดเล็กกว่า $1 \mu m$ ต่อมาคือ ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้ โดยในตอนแรกจะมีลักษณะเนื้อค่อนข้างแน่น มีรูพรุนไม่มากนัก แต่หลังจากที่ได้นำชิ้นงาน 3 มิติ ไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการละลายตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์ออกไป พบว่าชิ้นงาน 3 มิติ มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนไป คือ จะมีรูพรุนเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากการละลายของตัวเชื่อมประสาน ต่อมาเมื่อนำชิ้นงาน 3 มิติไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ก็ยังคงมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวแต่รูพรุนมีขนาดเล็กลง อนุภาคชิดกันมากขึ้น จากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้นจะได้ว่า ชิ้นงาน 3 มิติที่ผ่านการเผาแล้ว สามารถคงรูปได้ดีไม่เกิดการโค้งงอ แต่ชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์ได้นั้นยังมีความแข็งแรงและรูพรุนที่ไม่เพียงพอต่อการนำมาทำเป็นโครงเลี้ยงเซลล์กระดูก เนื่องจากโครงกระดูกเลี้ยงเซลล์ควรมีรูพรุนอยู่ที่ 50-90% จึงทำให้ต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ในปริมาณที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์มาฉีตเป็นเส้น

จะได้เป็นชิ้นงาน 3 มิติที่มีความแข็งแรงและหดตัวน้อยลง ทำให้สามารถใช้เป็นโพรงเลี้ยงเซลล์กระดูกต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองข้างต้นพบว่าการผสมให้สารไฮดรอกซีอะพาไทต์และตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์ มีความเข้ากันและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นก่อนนำไปฉีดเป็นเส้นฟิลาเมนต์ จะส่งผลให้เส้นที่ฉีดได้ มีเนื้อที่เนียนละเอียด ยืดหยุ่นดี ไม่เปราะง่าย เหมาะแก่การนำไปพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ เนื่องจากทำให้ลด การเกิดปัญหาเส้นอุดตันที่หัวฉีดหรือเส้นแตกหักภายในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนั้นจึงอาจแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนวิธีในการผสมสารตั้งต้นให้มีความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น หรืออาจเปลี่ยนชนิดของตัวเชื่อมประสาน ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่านี้

วิธีการผสมเปียกเป็นวิธีที่น่าสนใจและเหมาะแก่การนำไปพัฒนาต่อ แต่ในการนำมาฉีดซ้ำนั้นจะ พบปัญหาเรื่องการรีดแต่ครั้งแล้วเส้นใยมีลักษณะเปลี่ยนไป อาจเนื่องจาก สาร PVA เป็นพลาสติกที่มี คุณสมบัติ plasticizer กับน้ำทำให้มีความเหนียว เส้นใยมีการดูดความชื้นเมื่อนำมารีดแต่ละครั้งจึงได้ ลักษณะเส้นที่ไม่เหมือนกัน จึงควรนำเส้นที่ได้นำไปอบไล่ความชื้นก่อนหรือ เก็บรักษาเส้นใยด้วยสารดูด ความชื้น

ในการแช่น้ำชิ้นงานควรมีการเปลี่ยนน้ำที่แช่เป็นระยะหรือใช้น้ำที่มีการไหลผ่านตลอดเวลา เพื่อ ไม่เกิดปัญหาชิ้นงานบิดภาพานะ เนื่องจากขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนในการกำจัดตัวเชื่อมประสานที่มีลักษณะ เป็นกาวจึงทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานผิดรูปไม่สมบูรณ์ได้

เอกสารอ้างอิง

1. Ravinder Sharma, Rupinder Singh, R. Penna, F. Fraternal, Investigations for mechanical properties of Hap, PVC and PP based 3D porous structures obtained through biocompatible FDM filaments, *Composites Part B* **132** (2018) 237-243
2. Tianzhe Tu, Guojian Jiang, SiC reticulated porous ceramics by 3D printing, gelcasting and liquid drying, *Ceramics International* **44** (2018) 3400-3405
3. Lim Chin Hwaa, Srithar Rajoo, Alias Mohd Noor, Norhayati Ahmad, M.B. Uday, Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* **21** (2017) 323-347
4. Jianming Ying, Lin Lu, Lihao Tian, Xin Yan, Baoquan Chen, Anisotropic porous structure modeling for 3D printed objects, *Computers & Graphics* **70** (2018) 157-164
5. ศศิธรดา ตันจิตวิริยะ. (2557). การเตรียมโครงเลี้ยงเซลล์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกระดูกตามธรรมชาติจากแคลเซียมฟอสเฟตชนิดสองเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์. (2553). การผลิตเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดพรุน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. พรนภา สุจริตวรกุล. (2543). การขึ้นรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดพรุนโดยใช้ไตรแคลเซียมฟอสเฟตไฮเดรตและไตรแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัสจากอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8. ทันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ. เซรามิกพรุน. สืบค้นเมื่อ 8 เมษายน 2561, จาก http://ceramic.dss.go.th/files/pdf/porous_ceramic.pdf
9. อุไรวรรณ อินตะธาและสุขุม อิศเสียม. เซรามิกชีวภาพ-ทางเลือกใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์. สืบค้นเมื่อ 29 เมษายน 2561, จาก http://www.vet.cmu.ac.th/cmvtj/document/journal/4_25543.pdf

10. สุรศักดิ์ ไททรวงศ์สกุล. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ : ตัวประสานในอุตสาหกรรมเซรามิกส์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤษภาคม 2562, จาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/273_18_14.pdf
11. Wantae Kim, Fumio Saito, Sonochemical synthesis of hydroxyapatite from H₃PO₄ solution with Ca(OH)₂, Ultrasonics Sonochemistry **8** (2001) 85-88

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลจากเทคนิควิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Distribution, PSD)

ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้

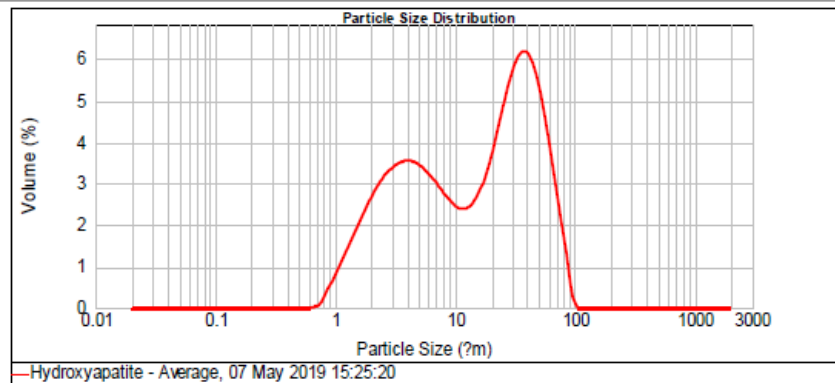


Result Analysis Report

Sample Name: Hydroxyapatite - Average	SOP Name:	Measured: 07 May 2019 15:25:20
Sample Source & type:	Measured by: User	Analysed: 07 May 2019 15:25:22
Sample bulk lot ref:	Result Source: Averaged	

Particle Name: hydroxyapatite	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.651	Absorption: 0.01	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 11.00 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.627 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0077 %Vol	Span : 3.243	Uniformity: 1.07	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.02 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 5.896 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 22.653 um	

d(0.1): 2.127 um d(0.5): 16.012 um d(0.9): 54.051 um



Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.010	0.00	0.106	0.00	1.096	1.13	11.482	2.17	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.48	13.183	2.29	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.82	15.136	2.59	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.15	17.378	3.06	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	2.46	19.963	3.66	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	2.73	22.909	4.33	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.95	26.303	4.95	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.95	30.200	5.42	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	3.11	34.674	5.82	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	3.20	39.811	6.18	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	3.22	45.709	6.46	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	3.17	52.481	6.66	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	3.06	60.256	6.79	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.04	6.607	2.90	69.183	6.85	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.18	7.586	2.50	79.433	6.83	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.48	8.710	2.31	91.201	6.70	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.79	10.000	2.18	104.713	6.46	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.79	11.482	2.18	120.226	6.00	1258.925	0.00		

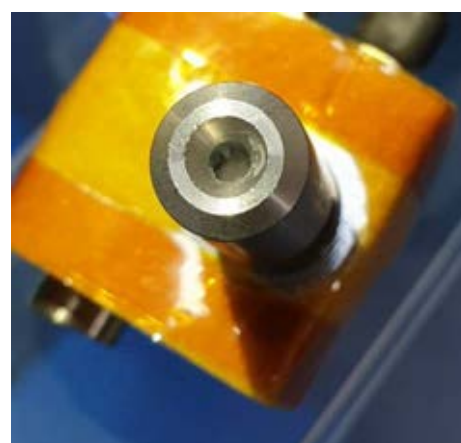
Operator notes:

ภาคผนวก ข

ภาพแสดงปัญหาและอุปสรรคจากการทดลอง



รูปที่ ข.1 ปัญหาที่เกิดจากการอุดตันในการรีดเส้น



รูปที่ ข.2 ปัญหาที่เกิดจากการอุดตันในการรีดเส้น