



## โครงการ

# การเรียนการสอนเพื่อเพิ่มประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ  
Preparation of Dense Sintered Alumina Ceramics by 3D Printing  
Technique

ชื่อนิสิต นางสาวภารดี เทียงธรรม รหัสประจำตัวนิสิต 5933248023  
นางสาวอารีรัตน์ ตันมา รหัสประจำตัวนิสิต 5933269223

ภาควิชา วัสดุศาสตร์  
แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ  
(Preparation of Dense Sintered Alumina Ceramics  
by 3D Printing Technique)

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวัสดุศาสตร์

โดย

นางสาวภาวดี เทียงธรรม รหัสประจำตัวนิสิต 5933248023  
นางสาวอารีรัตน์ ต้นมา รหัสประจำตัวนิสิต 5933269223

อนุมัติโดย



.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์)  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2562

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ
โดย	นางสาวภาวดี เทียงธรรม รหัสประจำตัวนิสิต 5933248023
	นางสาวอารีรัตน์ ต้นมา รหัสประจำตัวนิสิต 5933269223
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์
ปีการศึกษา	2562

---

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการสร้างชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด Fuse Deposition Modeling (FDM) โดยใช้ตัวเชื่อมประสานร่วมระหว่าง พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลบิวไทรอล วัตถุประสงค์ตั้งต้นคือ ผงอะลูมินา และใช้กรดสเตียริกเป็นสารเติมแต่ง งานวิจัยนี้แบ่งการผสมวัตถุดิบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการผสมแบบแห้ง โดยการผสมผงวัตถุดิบทั้งหมดเข้าด้วยกันตามอัตราส่วน ส่วนที่สองคือการผสมแบบเปียก โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ช่วยในการผสม จากนั้นนำไปฉีดด้วยเครื่องอัดรีดร้อนด้วย อุณหภูมิ 200 และ 190 องศาเซลเซียสตามลำดับ และนำไปขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ขั้นตอนการกำจัดตัวเชื่อมประสานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการกำจัดตัวเชื่อมประสาน ด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2.5 ชั่วโมง ส่วนที่สองคือการกำจัดตัวเชื่อมประสานโดยการให้ความร้อน จากนั้นนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะสมบัติของฟิลาเมนต์ ชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ชิ้นงานหลังการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการแช่น้ำและชิ้นงานหลังการเผาผนึก ได้แก่ ความหนาแน่น รูปทรงปรากฏ การดูดซึมน้ำ ความต้านทานการดัดโค้ง และโครงสร้างจุลภาค ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วน ผงอะลูมินาต่อตัวเชื่อมประสาน 25:75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ดีที่สุด การผสมแบบเปียกสามารถผสมผงวัตถุดิบให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าการผสมแบบแห้ง ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ผิวด้านข้างมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ไม่เรียบเนียน ทำให้การเชื่อมติดกันของแต่ละชั้นยังไม่ดีพอ

<b>Title</b>	Preparation of Dense Sintered Alumina Ceramics by 3D Printing Technique	
<b>Authors</b>	Miss. Pharadee Thiangtham	student ID 5933248023
	Miss. Arrirat Tanma	student ID 5933269223
<b>Department</b>	Materials Science	
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Thanakorn Wasanapiarnpong	
<b>Academic Year</b>	2019	

---

This study focuses on Preparation of Dense Sintered Alumina Ceramics by 3D Printing Technique Fuse Deposition Modeling (FDM) type using PEG, PVA and PVB co-binders. The starting powder is alumina 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 200 and 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 1650 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 alumina 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.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความรู้ความช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและเรื่องต่าง ๆ ตลอดมา

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำชี้แนะ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนในการทำโครงการวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่สนับสนุนให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้จัดทำตลอดการเรียน

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 อะลูมินา.....	3
2.1.1 ประวัติความเป็นมาของอะลูมินา.....	3
2.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค.....	3
2.2 สมบัติของอะลูมินา.....	4
2.2.1 สมบัติทางกายภาพ.....	4
2.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด Fuse Deposition Modeling.....	5
2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์.....	5
2.3.2 ส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM.....	5
2.3.2.1 ฐานรองชิ้นงาน (printer bed) .....	5
2.3.2.2 หัวฉีด (nozzle/printer head) .....	5
2.3.3 วัสดุดิบ.....	6
2.3.4 The FDM 3D printing process.....	6
2.4 ตัวเชื่อมประสาน.....	6
2.4.1 Polyethylene glycol (PEG) .....	6
2.4.2 Polyvinyl butyral (PVB) .....	7
2.4.3 Polyvinyl alcohol (PVA).....	7

2.4.4 Stearic acid (SA).....	7
2.5 การกำจัดตัวเชื่อมประสาน .....	7
2.5.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ตัวทำละลาย.....	7
2.5.2 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีใช้ความร้อน.....	8
2.6 ชนิดของ Yarn guide.....	8
2.6.1 สีชมพูอ่อน.....	8
2.6.2 สีชมพูเข้ม.....	9
2.6.3 สีแดงม่วง.....	10
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	16
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	17
3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	17
3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	17
3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง.....	20
3.2.3.1 การกำจัดตัวประสานชนิด PEG.....	20
3.2.3.2 การกำจัดตัวประสานชนิด PVB.....	20
3.2.3.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา.....	20
3.2.3.4 ความแข็งแรง.....	21
3.2.3.5 การหดตัวของชิ้นงาน.....	22
3.2.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	22
3.3 ระยะเวลาการดำเนินงาน.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	24
4.1 สูตรที่ใช้ทดลอง.....	24
4.2 การศึกษาการขึ้นรูปฟิลาเมนต์.....	24
4.2.1 ลักษณะของฟิลาเมนต์ที่ได้จากแต่ละสูตร.....	24
4.3 การศึกษาผลการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	25
4.4 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัสดุดิบ.....	26
4.4.1 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อน.....	26
4.4.2 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อน.....	27

4.4.3 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อน.....	28
4.5 ผลการทดลองของชิ้นงาน.....	29
4.5.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นโดยผ่านการแช่น้ำ.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	30
5.2 อุปสรรค.....	30
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	32
ภาคผนวก.....	34
ภาคผนวก ก สูตรอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
ภาคผนวก ข ลักษณะของเส้นฟิลาเมนต์.....	39



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 สมบัติของอะลูมินา (Nicholas P. Cheremisinoff, 1990) <sup>(18)</sup> .....	5
ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของ PEG ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่าง ๆ กัน <sup>(12)</sup> .....	12
ตารางที่ 3 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด.....	21
ตารางที่ 4 สูตรที่ใช้ในการทดลอง (Vol%).....	24
ตารางที่ 5 ลักษณะของฟิลาเมนต์ที่ได้จากแต่ละสูตร.....	24
ตารางที่ 6 อัตราส่วนผสมของส่วนผสมที่ใช้ทำการวิจัยนี้.....	25

## สารบัญรูป

รูปที่ 1 โครงสร้างของแอลฟาอะลูมินา <sup>(3)</sup> .....	4
รูปที่ 2 โครงสร้างของแกมมาอะลูมินา <sup>(4)</sup> .....	4
รูปที่ 3 FDM 3D printing process <sup>(17)</sup> .....	6
รูปที่ 4 (ก) ผลึกภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเนื้ออะลูมินาสีชมพูอ่อน (ข) ลักษณะผิวเป็นพื้นราบและ (ค) โครงสร้างจุลภาคแสดงเกรนอะลูมินายึดติดกันแน่น <sup>(10)</sup> .....	8
รูปที่ 5 (ก) ผลึกภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเนื้ออะลูมินาสีชมพูเข้ม (ข) ลักษณะผิวเป็นพื้นราบ และ (ค) โครงสร้างจุลภาคแสดงผลึกอะลูมินาเป็นแท่งคล้ายปริซึมหลังจากกัดส่วนที่เป็นแก้วออก ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) <sup>(10)</sup> .....	9
รูปที่ 6 (ก) ผลึกภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเนื้ออะลูมินาสีแดงม่วง (ข) ลักษณะผิวเป็นคลื่น (ค) โครงสร้าง จุลภาคจาก polished section แสดงผลึกอะลูมินาเป็นแท่งคล้ายปริซึมในเนื้อพื้นแก้วและ รูพรุนปิด <sup>(10)</sup> .....	11
รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไม่เติมตัวเชื่อมประสาน (ข) เติมตัวเชื่อมประสาน <sup>(13)</sup> .....	12
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิของการกำจัดตัวเชื่อมประสานต่อการกำจัดตัวเชื่อมประสานชนิด PEG ด้วย วิธีการแช่น้ำ ณ เวลาต่าง ๆ <sup>(14)</sup> .....	13
รูปที่ 9 โครงสร้างรอยหักชิ้นงานอะลูมินา (a) ผิวหน้าชิ้นงาน (b) ภายในชิ้นงานโดย (ก) หลังจากฉีดยื่น รูป (ข) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (ค) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ง) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง <sup>(9)</sup> .....	14
รูปที่ 10 ขนาดความหนาของชิ้นงานที่ฉีดยื่นรูป (ก) สัดส่วนของตัวเชื่อมประสานที่ถูกกำจัดออก เปรียบเทียบกับความหนา (ข) ภายถ่ายชิ้นงานหลังจากกำจัดตัวเชื่อมประสานที่เวลา 3 ชั่วโมง <sup>(15)</sup> .....	15
รูปที่ 11 ผงอะลูมินา alteo P172SB 0.43 ไมโครเมตร.....	16
รูปที่ 12 Stearic acid, Polyvinyl alcohol (PVA) 9000 Aldrich, Polyethylene glycol (PEG) 6000 จากบริษัท Ajax Finechem และ Polyvinyl butyral (PVB).....	17
รูปที่ 13 แผนผังงานวิจัยการเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ.....	18
รูปที่ 14 เครื่องฉีดยื่นรูปแบบที่มีแท่งดัน.....	19
รูปที่ 15 เครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM.....	19
รูปที่ 16 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด.....	21
รูปที่ 17 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากฟิลาเมนต์ สูตร A13 ผสมแห้ง จะเห็นว่าชั้นล่างที่ออกมาแล้วแข็งตัว ไม่เชื่อมต่อกับชั้นบนที่ออกมาใหม่ และเกิดการขาดของเส้นระหว่างฉีดยื่นรูป.....	25
รูปที่ 18 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยฟิลาเมนต์สูตร A13 ผสมเปียก.....	26

- รูปที่ 19 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อนจาก (ก) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (ข) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC).....26
- รูปที่ 20 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อนจาก (ก) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (ข) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC).....27
- รูปที่ 21 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อนจาก (ก) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) (ข) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC).....28

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมินาเซรามิกอย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม เช่น ตัวนำร่องเส้นด้ายเส้นไหมพรม (thread guide, yarn guide) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า (textile) แกนฟันปลอม (dental crown) ในด้านทันตกรรมและกระดูกเทียม (artificial bone) ในด้านการแพทย์ โดยการใช้อะลูมินาในการขึ้นรูป ซึ่งมีความแข็งแรงทนทานและมีความเฉื่อยทางปฏิกิริยาเคมี จึงไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีรูปร่างซับซ้อน ยากกับการใช้เทคนิคขึ้นรูปทั่วไป ดังนั้นจึงมีวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีที่จำกัด ซึ่งในปัจจุบันจะใช้วิธีการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (injection molding) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือต้นทุนในส่วนของแม่พิมพ์และต้นทุนเครื่องจักรสูงมาก หากผลิตปริมาณไม่มากจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ จึงต้องมีการนำเทคโนโลยีการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งระบบเข้ามาช่วยในการผลิตขึ้นงาน ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ฝีมือและประสบการณ์ของช่างในการผลิตมากนัก ซึ่งวิธีการขึ้นรูปที่น่าสนใจ คือ เทคโนโลยีสร้างต้นแบบด้วยความรวดเร็ว (Rapid Prototype : RP) โดยใช้ร่วมกับการออกแบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปที่เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer) สร้างขึ้นงานขึ้นทีละชั้น ออกมาเป็นชิ้นงานสามมิติที่มีขนาด รูปทรง เป็นไปตามที่ออกแบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ มักใช้วัสดุเป็นพลาสติกเพราะง่ายต่อการขึ้นรูป แบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ด้วยกัน คือ การใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสงในการขึ้นรูปขึ้นงาน การใช้เลเซอร์หรือกาวในการเชื่อมติดผงวัสดุเข้าด้วยกัน การตัดและติดแผ่นวัสดุทีละชั้นและการฉีดพลาสติกร้อนหลอมให้เรียงตัวขึ้นเป็นขึ้นงาน

1. การใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสงในการขึ้นรูปขึ้นงาน (Photopolymerization) เทคนิคที่ถือเป็นพื้นฐานดั้งเดิมของการขึ้นรูปแบบนี้คือ Stereolithography Apparatus (SLA) โดยการใช้วัสดุประเภทเรซินที่แข็งตัวได้เมื่อฉายด้วยแสงยูวี (Ultraviolet)

2. การใช้เลเซอร์หรือกาวในการเชื่อมติดผงวัสดุเข้าด้วยกัน (bonding) วิธีนี้ต่างจากวิธี Photopolymerization ตรงที่สถานะของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุผงและผิวงานที่ได้จะค่อนข้างหยาบและความแข็งแรงที่ได้จะต่ำกว่าวิธี Stereolithography ซึ่งจะให้ผิวขึ้นงานที่เรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเทคนิคที่เป็นที่รู้จักสำหรับการขึ้นรูปแบบนี้คือ Selective Laser Sintering (SLS)

3. การตัดและติดแผ่นวัสดุทีละชั้น (Layer laminate manufacturing) ถือว่าหลักการมีความง่ายมากที่สุดคือการการตัดแผ่นวัสดุที่มักทำจากกระดาษ โดยที่ด้านหนึ่งมักเคลือบด้วยกาวที่จะติดเมื่อได้รับความร้อนจากการตัดแผ่นวัสดุด้วยเลเซอร์ แผ่นวัสดุแต่ละแผ่นจะซ้อนติดกันเป็นชั้น

4. การฉีดพลาสติกร้อนหลอมเรียงตัวขึ้นเป็นขึ้นงาน (Extrusion process) หลักการคือการใช้พลาสติกที่ถูกทำให้ร้อนมาเรียงเป็นโครงสร้างขึ้นทีละชั้น เทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในกระบวนการขึ้นรูปนี้

คือ Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นเครื่องพิมพ์สามมิติที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน มีหลักการทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน และราคาเครื่องถูกกว่าเครื่องมือขึ้นรูปชนิดอื่น<sup>(1)</sup>

การผลิตชิ้นส่วนทางเซรามิกอะลูมินาด้วยเทคโนโลยีพิมพ์ภาพสามมิติได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นิยมนำมาปรับใช้กับเทคนิค Selective Laser Sintering (SLS) ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุผงในปริมาณที่มากเกินพอและที่สำคัญต้นทุนในการขึ้นรูปชิ้นงานมีราคาค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะใช้กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM เพื่อปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกให้มีความรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยการขึ้นรูปเซรามิกอะลูมินาจำเป็นต้องอาศัยตัวเชื่อมประสาน (binder) ช่วยในการขึ้นรูป ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด คือ Polyethylene glycol (PEG), Polyvinyl butyral (PVB), Polyvinyl alcohol (PVA), และ Stearic acid (SA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีการละลายแตกต่างกัน ตัวแรกเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำสูง ละลายได้ง่ายในน้ำ ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่น ให้เพิ่มความชอบน้ำได้ ส่วนตัวที่สองจะไม่ละลายในน้ำ โดยจะสลายตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติยึดเกาะติดผิววัสดุได้ดีโดยเฉพาะโลหะและเซรามิก มีความเหนียว ยืดหยุ่น และแข็งแรง โปร่งแสง จึงทำให้เซรามิกอะลูมินาคงรูปอยู่ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการผลิตชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติกด้วยเส้นพลาสติกผสมที่เตรียมขึ้นในโครงการ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาวิธีการเตรียมและขึ้นรูปฟิลาเมนต์หรือเส้นพลาสติกวัสดุผสมระหว่างผงอะลูมินาและตัวเชื่อมประสานชนิด PEG PVB PVA และ SA ด้วยการฉีดเป็นเส้นด้วยเครื่องอัดรีดร้อน สำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิดฉีดเส้นพลาสติกหลอมเหลว

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถสร้างชิ้นงานอะลูมินาด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM ได้
- 1.4.2 สามารถลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้
- 1.4.3 เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษาในอนาคตต่อไป

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเรื่อง การเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวม แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยนำเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

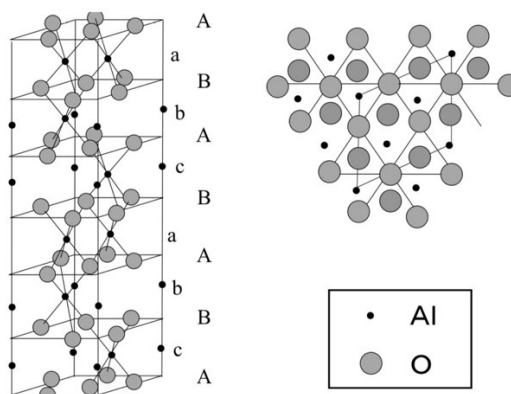
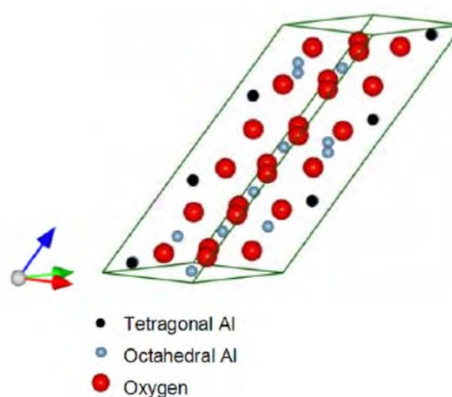
#### 2.1 อะลูมินา

##### 2.1.1 ประวัติความเป็นมาของอะลูมินา <sup>(2)</sup>

อะลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ Aluminium oxide มีสูตรทางเคมี คือ  $Al_2O_3$  จัดเป็นออกไซด์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ดึกดำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบัน และยังคงถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต อะลูมินาบริสุทธิ์ มีความถ่วงจำเพาะ 3.4-4.0 จุดหลอมเหลว 2030 องศาเซลเซียส ความแข็ง (Mohs scale) เท่ากับ 9 อะลูมินาในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ corundum ( $Al_2O_3$ ), diaspore ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ), gibbsite ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) และ bauxite ( $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ ) โดยแร่ corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติ เช่น ทับทิม (ruby) ไพลิน (sapphire) บุษราคัม (yellow sapphire) เป็นรูปแบบของ corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี อะลูมินาบริสุทธิ์ และ hydrate อะลูมินา สามารถสกัดได้จากแร่ bauxite และดินลูกรัง โดยวิธีของ Bayer (Bayer process) คือนำแร่มาบดแล้วหลอมด้วยโซดาไฟ (caustic soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผา

##### 2.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค <sup>(2)</sup>

อะลูมินาจะพบในรูปแอลฟา ( $\alpha$ ) แกมมา ( $\gamma$ ) และเบตา ( $\beta$ ) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอลฟาอะลูมินาและแกมมาอะลูมินา ในอุณหภูมิที่ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส อะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1150-1200 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอลฟา แต่เบตาอะลูมินาจะอยู่ในรูปของสารประกอบไฮเดรตคือ sodium aluminate ( $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$ )

รูปที่ 1 โครงสร้างของแอลฟาอะลูมินา<sup>(3)</sup>รูปที่ 2 โครงสร้างของแกมมาอะลูมินา<sup>(4)</sup>

## 2.2 สมบัติของอะลูมินา<sup>(18)</sup>

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

อะลูมินามีชื่อเรียกทางธรรมชาติว่า คอรันดัม ซึ่งเป็นแร่ที่ไม่บริสุทธิ์ รู้จักกันดีในรูปของวัสดุที่ใช้ในการขัดถู โดยคอรันดัมจะรวมถึงแร่ Andalusite, Silimanate และ Kayanite ซึ่งแร่ Andalusite ก็คือ แร่อะลูมินซิลิเกต โดยมีความเสถียรที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ ตรงกันข้ามกับแร่ Silimanate ซึ่งเสถียรที่อุณหภูมิสูง (Ring, 1996) สำหรับอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นวัสดุหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก มีมูลค่าสูงเนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูง มีความแข็งสูง และมีเสถียรภาพทางเคมีที่สูง ซึ่งอะลูมินาเป็นสารที่มีความเฉื่อยมากและทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างต่าง ๆ ได้ดี

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของอะลูมินา (Nicholas P. Cheremisinoff, 1990) <sup>(18)</sup>

Properties	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.96
Melting temperature, °C	2054
Elastic modulus, GPa	520
Coefficient of thermal expansion (25-1000°C), 10 <sup>-6</sup> /°K	8.5
Indentation hardness, GPa	20

## 2.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Fused Deposition Modeling (FDM) <sup>(16,17)</sup>

### 2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์

เครื่องพิมพ์ 3 มิติระบบ FDM จะใช้วัสดุที่เป็นของหนืด จำพวกเทอร์โมพลาสติก เช่น ABS PLA PET Nylon มาเป็นวัสดุในการขึ้นรูปโมเดล 3 มิติ ซึ่งพลาสติกที่นำมาใช้จะอยู่ในรูปของเส้นลวดพลาสติก ซึ่งหลักการก็คือ จะมีหัวฉีดที่มีรูขนาดเล็ก ซึ่งตรงหัวฉีดจะมีฮีทเตอร์สำหรับให้ความร้อนกับพลาสติก เมื่อพลาสติกเริ่มละลายจะมีตัวดันเส้นลวดพลาสติกให้ผ่านหัวออกมา ซึ่งหัวพิมพ์ก็จะเคลื่อนที่ตามโปรแกรมที่ผ่านการ Slice มาแล้ว ในขณะที่หัวพิมพ์เคลื่อนที่ ก็จะฉีดพลาสติกออกมาด้วยและเริ่มพิมพ์ทับกันไปเป็นชั้นจนก่อให้เกิดรูปชิ้นงาน 3 มิติ นอกจากพลาสติกแล้ว 3D printer ประเภทนี้สามารถนำไปใช้กับของหนืดได้อีกด้วย ซึ่งในตอนนี้ได้มีคนนำไปทำเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ไปใช้พิมพ์ช็อคโกแลต รวมไปถึงการแพทย์ก็นำระบบนี้ไปพิมพ์เนื้อเยื่อสำหรับเป็นโครงในการสร้างอวัยวะเทียมอีกด้วย

### 2.3.2 ส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM

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

#### 2.3.2.1 ฐานรองชิ้นงาน (printer bed)

เป็นส่วนที่รองรับวัสดุที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด

#### 2.3.2.2 หัวฉีด (nozzle/printer head)

เป็นส่วนที่ให้ความร้อนกับเส้นวัสดุที่ป้อนเข้ามาจากส่วนควบคุมการป้อนวัสดุหรือ Extruder โดยอุณหภูมิที่หัวฉีดนี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 190 ถึง 250 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับวัสดุ รูของหัวฉีดมีขนาดอยู่ที่ 0.2 ถึง 0.8 มิลลิเมตร รูที่มีขนาดเล็กจะทำให้ฉีดวัสดุออกมาได้ละเอียด ทำให้ได้ชิ้นงานที่เรียบเนียนยิ่งขึ้น หัวฉีดของ FDM เคลื่อนที่ด้วยระบบทางกลที่ใช้สายพานหรือระบบสกรู ส่วนประกอบ



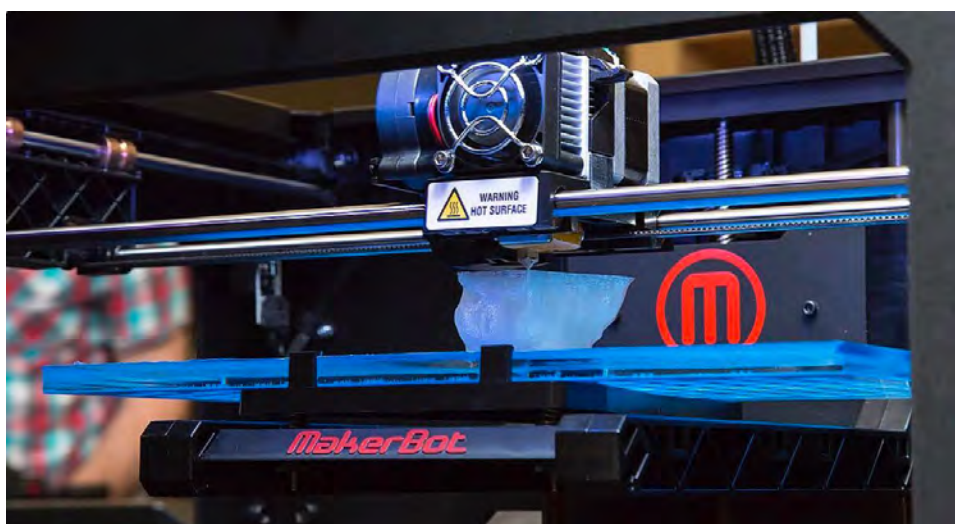
ของเครื่องพิมพ์สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนว X Y และ Z โดยระบบมอเตอร์เรียกว่า สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) การเคลื่อนที่ทั้งหมดของหัวฉีดและมอเตอร์ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

### 2.3.3 วัสดุพิมพ์

วัสดุพิมพ์ส่วนใหญ่ใช้เทอร์โมพลาสติกซึ่งจะหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและจะแข็งตัวเมื่อถูกทำให้เย็นลง เส้นใยเทอร์โมพลาสติกบนชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นรอยคล้ายขดลวด ไม่เรียบเนียน

### 2.3.4 The FDM 3D printing process

เมื่อเครื่องพิมพ์สามมิติเริ่มทำงาน วัสดุพิมพ์ที่อยู่ในลักษณะเส้นใยบาง ๆ จะถูกฉีดอัดผ่านหัวฉีดร้อนและหลอมเหลวไปอยู่ที่ด้านล่างของฐานรองชิ้นงาน จากนั้นแข็งตัวและชั้นถัดไปที่ถูกอัดฉีดจะหลอมติดกับชั้นล่างขณะยังร้อนอยู่และจะแข็งตัวสร้างเป็นชั้นขึ้นไปจนเสร็จกระบวนการ



รูปที่ 3 FDM 3D printing process <sup>(17)</sup>

## 2.4 ตัวเชื่อมประสาน

การใส่ตัวเชื่อมประสานลงไปเพื่อเพิ่มความสะอาดในขั้นตอนระหว่างการผลิตวัสดุพิมพ์และการขึ้นรูป โดยลักษณะตัวเชื่อมประสานที่ดีควรจะมีคุณสมบัติเหนียว เป็นวัสดุที่กำจัดได้ง่าย ไม่เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ควรส่งผลกระทบต่อรูปร่างและสมบัติของชิ้นงานหลังกำจัดออกไป โดยการวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวเชื่อมประสาน 4 ชนิด คือ Polyethylene glycol (PEG), Polyvinyl butyral (PVB), Polyvinyl alcohol (PVA) และ Stearic acid (SA)

### 2.4.1 Polyethylene glycol (PEG) <sup>(8)</sup>

PEG คือ สารประกอบพอลิเอเทอร์ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยา มีจุดหลอมเหลวประมาณ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส PEG อาจถูกเรียกว่า polyethylene oxide (PEO) หรือ polyoxyethylene (POE) ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล โดยน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ยังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่บอกสถานะ หน้าที และการนำไปใช้ มีชื่อพ้องดังนี้ Carbowax, Carbowax Sentry, Lipoxol, Lutrol E, PEG, Pluriol E และ polyoxyethylene glycol

ตาม USP NF 23 ได้ระบุไว้ว่า PEG เกรด 200-600 จะอยู่ในสถานะของเหลว มีลักษณะขุ่นหนืด สีเหลืองอ่อนหรือใส มีกลิ่นเฉพาะตัวและขมปนรสเผ็ดร้อนเล็กน้อย ในขณะที่เกรด 1000 ขึ้นไปจะอยู่ในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะเป็น pastes หรือแผ่นสีขาวหรือสีขาวนวล การนำไปใช้งาน คือ Ointment base (สารพื้นฐานในตำรับ ointment), plasticizer (สารเพิ่มความยืดหยุ่น), solvent (ตัวทำละลาย), suppository base (สารพื้นฐานในยาเหน็บ), tablet and capsule lubricant (สารหล่อลื่นในยาเม็ดหรือแคปซูล) เป็นต้น

#### 2.4.2 Polyvinyl butyral (PVB) <sup>(8)</sup>

เป็นโพลิเมอร์ที่ไม่มีสี เสถียรต่อแสง และมีหมู่ไฮดรอกซิล (ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติด) มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110 องศาเซลเซียส มักถูกนำไปใช้ทำกระจกปลอดภัย (safety glass) ใช้เป็นสารเติมแต่งในการทำให้เหนียว และยืดหยุ่นได้โดยเฉพาะกาวที่ใช้ในการประกอบเครื่องบิน

#### 2.4.3 Polyvinyl alcohol (PVA) <sup>(6)</sup>

เป็นสารพอลิเมอร์สังเคราะห์โมเลกุลใหญ่ชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อเพิ่มความเสถียร ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้มีการนำมาใช้เป็นตัวประสานเพื่อช่วยการขึ้นรูป เนื่องจากละลายได้ดีในน้ำและมีสมบัติในการยึดเกาะสูง

#### 2.4.4 Stearic acid (SA) <sup>(7)</sup>

สเตียริกแอซิด เป็นผลึกสีขาว มันเงา ลักษณะเฉพาะ คือ มีกลิ่นหืนของไขมัน ใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมพาวด์ โดยสเตียริกแอซิดมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของสารเติมเต็มหรือเม็ดสี อีกทั้งยังช่วยพัฒนากระบวนการผลิต เนื่องจากมันทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของยางและช่วยให้การอัดขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้นด้วย

### 2.5 การกำจัดตัวเชื่อมประสาน <sup>(9)</sup>

การกำจัดตัวเชื่อมประสานพบได้ 2 วิธี คือ การใช้ตัวทำละลายและการใช้ความร้อน

#### 2.5.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ตัวทำละลาย

ของเหลวที่ใช้กำจัดตัวประสาน เช่น ตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำ เป็นต้น องค์ประกอบของตัวเชื่อมประสานจะมีทั้งละลายได้และไม่เกิดการละลาย ตัวเชื่อมประสานที่ไม่ละลายจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดของผงวัสดุให้คงรูปร่างอยู่ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถกำจัดตัวเชื่อมประสานได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของตัวเชื่อมประสานที่อยู่ในชิ้นงานด้วยวิธีการแพร่ โดยมีปัจจัยที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการแพร่ของโมเลกุลตัวเชื่อมประสานเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น

## 2.5.2 การกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้ความร้อน

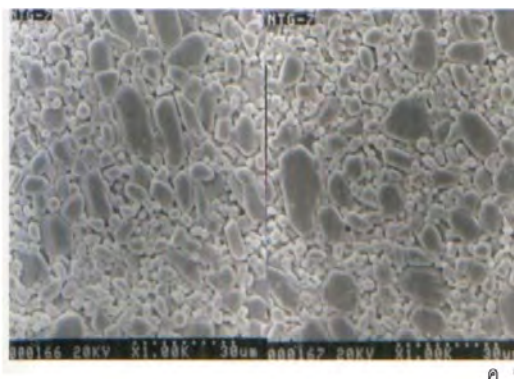
ตัวเชื่อมประสานถูกกำจัดโดยความร้อนด้วยการเพิ่มพอลิเมอร์จะช่วยย่อยสลายด้วยการระเหยแพร่กระจายออกจากพื้นผิวของชิ้นงานโดยจะต้องกำจัดตัวเชื่อมประสานออกให้หมดถึงจะสามารถนำไปในกระบวนการเผาผนึกต่อไปได้

## 2.6 ชนิดของ Yarn guide <sup>(10)</sup>

### 2.6.1 สีชมพูอ่อน

มีปริมาณอะลูมินาและความหนาแน่นสูงที่สุด คือ มีอะลูมินาสูงถึงร้อยละ 91.79 ความหนาแน่นรวม 3.92 กรัม/ลบ.ซม. นอกจากอะลูมินาแล้วยังมีสารช่วยการเผาผนึกโดยการเกิดเฟสของเหลว (liquid phase sintering) ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 4.93 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.51 แมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.56 และสารช่วยทำให้เกิดสีชมพูอ่อนคือ โครเมียมออกไซด์ ร้อยละ 0.01 เนื่องจากปริมาณสารช่วยเผาผนึกมีอยู่น้อย โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์สีชมพูอ่อนจึงมีเนื้อแก้วอยู่ไม่มาก โครงสร้างหลักประกอบด้วยเกรนอะลูมินาทั้งละเอียดและหยาบผนึกตัวติดกันแน่นแทบจะไม่มีรูพรุนอยู่เลย ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สีชมพูอ่อนจัดเป็นผลิตภัณฑ์อะลูมินาชั้นคุณภาพดีที่สุด ลักษณะผิวจากภาพขยาย 1000 เท่า เป็นพื้นราบ ไม่มีขอบคมที่จะทำอันตรายเส้นด้าย ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R) ต่ำเพียง 0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น ตัวแปรอื่น ๆ ของความหยาบผิว ได้แก่ พีสัยและความสูงที่สูงที่สุด (R) และความชันผิวเฉลี่ย ( $\theta$ ) ก็มีค่าต่ำคือ 1.7 ไมโครเมตรและ 1.4 องศาตามลำดับ





รูปที่ 4 (ก) ผลิตภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเนื้ออะลูมินาสีชมพูอ่อน  
(ข) ลักษณะผิวเป็นพื้นราบและ (ค) โครงสร้างจุลภาคแสดงเกรนอะลูมินายึดติดกันแน่น<sup>(10)</sup>

## 2.6.2 สีชมพูเข้ม

มีปริมาณอะลูมินาและความหนาแน่นสูงปานกลางคือ อะลูมินาร้อยละ 88.97 ความหนาแน่นรวม 3.41 กรัม/ลบ.ซม. ปริมาณสารช่วยเผาเผาผนึกโดยการเกิดเฟสของเหลวซิลิโคนไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้นคือ ร้อยละ 1.16 และ 0.74 ตามลำดับ ปริมาณโครเมียมออกไซด์ซึ่งทำให้เกิดสีก็มีเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.69 จึงทำให้เกิดสีชมพูเข้ม นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีเฟอร์ริกออกไซด์อยู่ด้วยประมาณร้อยละ 2.9 เนื่องจากปริมาณสารช่วยเผาเผาผนึกโดยการเกิดฟองเฟสของเหลวมีอยู่มากกว่าสีชมพูอ่อน โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จึงมีส่วนที่เป็นเนื้อแก้วอยู่มากพอสมควร ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างก็เปลี่ยนไป กล่าวคือ การยึดติดกันของเนื้อนอกจากการยึดติดกันด้วยตัวผลึกโดยตรงแล้วยังมีการยึดติดกันด้วยแก้วและรูปร่างของผลึกส่วนใหญ่จะเป็นแท่งยาวคล้ายปริซึม นอกจากนี้ยังมีรูพรุนปิด (closed pore) อยู่ทั่วไป และบางรูพรุนมีขนาดค่อนข้างใหญ่ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตภัณฑ์สีชมพูอ่อนมาก รวมทั้งมีความแข็งน้อยกว่าด้วย ส่วนลักษณะผิวจากภาพขยาย 1000 เท่า พบว่าเป็นพื้นที่ยาวคล้ายคลึงกับสีชมพูอ่อน ไม่มีขอบคม ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R) ต่ำเพียง 0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น ตัวแปรอื่น ๆ ของความหยาบผิว ได้แก่ พิสัยและความสูงที่สูงที่สุด (R) และความชันผิวเฉลี่ย ( $\theta$ ) ก็มีค่าต่ำคือ 1.9 ไมโครเมตร และ 1.2 องศา ตามลำดับ





ข



ค

รูปที่ 5 (ก) ผลผลิตภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเนื้ออะลูมินาสีชมพูเข้ม (ข) ลักษณะผิวเป็นพื้นราบ และ (ค) โครงสร้างจุลภาคแสดงผลึกอะลูมินาเป็นแท่งคล้ายปริซึมหลังจากกัดส่วนที่เป็นแก้วออกด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)<sup>(10)</sup>

### 2.6.3 สีแดงม่วง

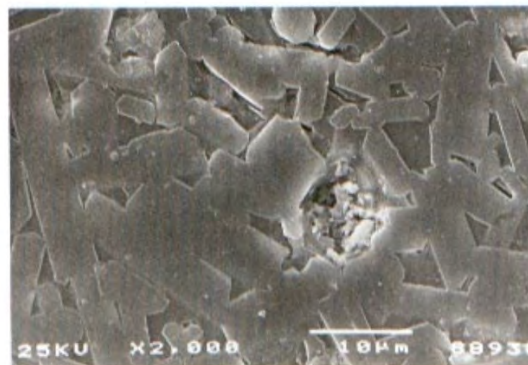
มีปริมาณอะลูมินาและความหนาแน่นต่ำสุดคือ อะลูมินาร้อยละ 81.05 ความหนาแน่นรวม 3.28 กรัม/ลบ.ซม. ปริมาณสารช่วยเผาผนึกโดยการเกิดเฟสของเหลว ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ มีอยู่สูงมากคือ ร้อยละ 10.8 1.08 และ 0.85 ตามลำดับ ปริมาณสารที่ใส่สีโครเมียมออกไซด์ก็มีอยู่สูงถึงร้อยละ 4.04 จึงทำให้สีเข้มมากจนเป็นสีแดงม่วง เนื่องจากปริมาณสารช่วยเผาผนึกมีอยู่สูงมาก จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคมีส่วนที่เป็นเนื้อแก้วมากขึ้น ผลึกอะลูมินาเป็นแท่งยาวคล้ายปริซึมอยู่ในเนื้อพื้นแก้ว มีรูพรุนปิดทั้งขนาดใหญ่และเล็กอยู่ทั่วไป และในปริมาณมากกว่าสีชมพูเข้ม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สีแดงม่วงมีความหนาแน่นและความแข็งแรงต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 สี ที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนลักษณะผิวจากภาพขยาย 3,000 เท่า จะเห็นได้ชัดว่าเป็นคลื่น ไม่มีขอบคม ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R) ค่าพิสัยและความสูงที่สูงที่สุด (R) และความชันผิวเฉลี่ย ( $\theta$ ) ค่อนข้างสูงคือ 1.0 ไมโครเมตร และ 10.5 ไมโครเมตร และ 8.2 องศา ตามลำดับ



ก



ข



ค

รูปที่ 6 (ก) ผลิตภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเนื้ออะลูมินาสีแดงม่วง (ข) ลักษณะผิวเป็นคลื่น (ค) โครงสร้างจุลภาคจาก polished section แสดงผลึกอะลูมินาเป็นร่างคล้ายปริซึมในเนื้อพื้นแก้วและรูพรุนปิด<sup>(10)</sup>

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

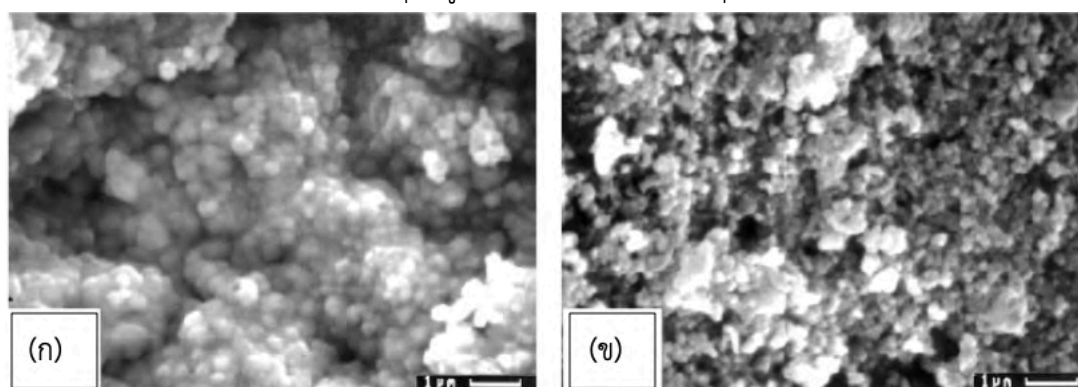
Wantanee Buggakupta และคณะ<sup>(12)</sup> ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำในการกำจัดตัวเชื่อมประสานชนิดละลายน้ำได้ จากการขึ้นรูปด้วยวิธี Power Injection Moulding พบว่า ส่วนผสมของ Alumina และ Alumina - Tungsten Carbide ที่ถูกขึ้นรูปด้วยวิธี Power Injection Moulding และนำมาผสมกับตัวเชื่อมประสาน คือ polyethylene glycol (PEG) และ Polyvinyl butyral (PVB) ในการกำจัดตัวเชื่อมประสานด้วยวิธีการใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย เพื่อกำจัด PEG ออกไปก่อนและต่อมากำจัด PVB ด้วยการใช้ความร้อน ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการสลายตัว

ของ PEG โดยที่อุณหภูมิของน้ำที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของ PEG จะเห็นได้ชัด และสามารถกำจัดออกจากชิ้นงานโดยใช้เวลาเพียง 5 ชั่วโมง ในทางกลับกัน PVB ยังคงอยู่ภายในชิ้นงาน และจะพบว่า อัตราในการกำจัด PEG ในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Power Injection Moulding ไม่ค่อยแตกต่างกันมาก ถ้าหากใช้ผงวัสดุและขนาดของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการสลายตัวของ PEG ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 45 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่าง ๆ กัน <sup>(12)</sup>

de binding time (hours)	water temperature used for PEG removal					
	30 °C		45 °C		60 °C	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /WC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /WC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /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

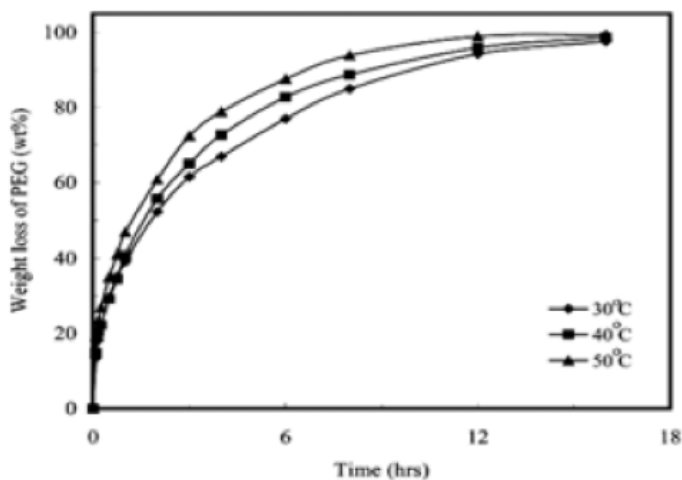
J. Tseng และคณะ<sup>(13)</sup> ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผงวัสดุเพียงอย่างเดียวกับการเติมตัวเชื่อมประสานหลังจากการเติมตัวเชื่อมประสาน โดยเตรียมผงอะลูมินาที่ประกอบด้วยอิตเทรียมออกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ขนาดผงอนุภาคเท่ากับ 0.25 ไมครอน ตัวประสานที่ใช้ได้แก่ พาราฟิน, Vinyl acetate และกรดสเตียริก โดยปริมาณของผงวัสดุมีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมเข้ากันด้วยวิธีบดผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแท่งกระบอกขนาด 4 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร x 60 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันในการฉีด 100 เมกะพาสคัล จากการศึกษาพบว่า หลังผ่านวิธีการกำจัดตัวเชื่อมประสานชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุผงอะลูมินาเพียงอย่างเดียวเทียบกับการใส่ตัวเชื่อมประสานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวที่มีตัวเชื่อมประสานเกิดเป็นรูพรุนของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีเพียงผงวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียวมีอนุภาคผงเรียงชิดติดกัน



รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน

(ก) ไม่เติมตัวเชื่อมประสาน (ข) เติมตัวเชื่อมประสาน <sup>(13)</sup>

W. Yang และคณะ<sup>(14)</sup> ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อน้ำของการจำกัดตัวประสานที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยเตรียมผงอะลูมินาและตัวประสานและจำกัดตัวประสานด้วยการละลายน้ำ ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พาราฟินไซ และกรดสเตียริก อัตราส่วนของอะลูมินาและตัวประสานเท่ากับ 55 และ 45 ในอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยปริมาณ ฉีดขึ้นรูปให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาด 75 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร x 4 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำไปแช่น้ำที่มีอุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 นาที ถึง 8 ชั่วโมง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พอลิเอทิลีนไกลคอลละลายออกจากชิ้นงานได้เร็วกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะเดียวกันอัตราปฏิกิริยาของการจำกัดตัวประสานสามารถเกิดได้สูงในช่วงเวลาเริ่มต้นและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและในเนื้อของอะลูมินามีแนวโน้มที่ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการจำกัดตัวประสาน กลไกในการจำกัดตัวประสานเกี่ยวข้องกับวิธีการแพร่จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ และจะเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3.5 ชั่วโมง และสิ้นสุดปฏิกิริยาของการจำกัดตัวประสาน

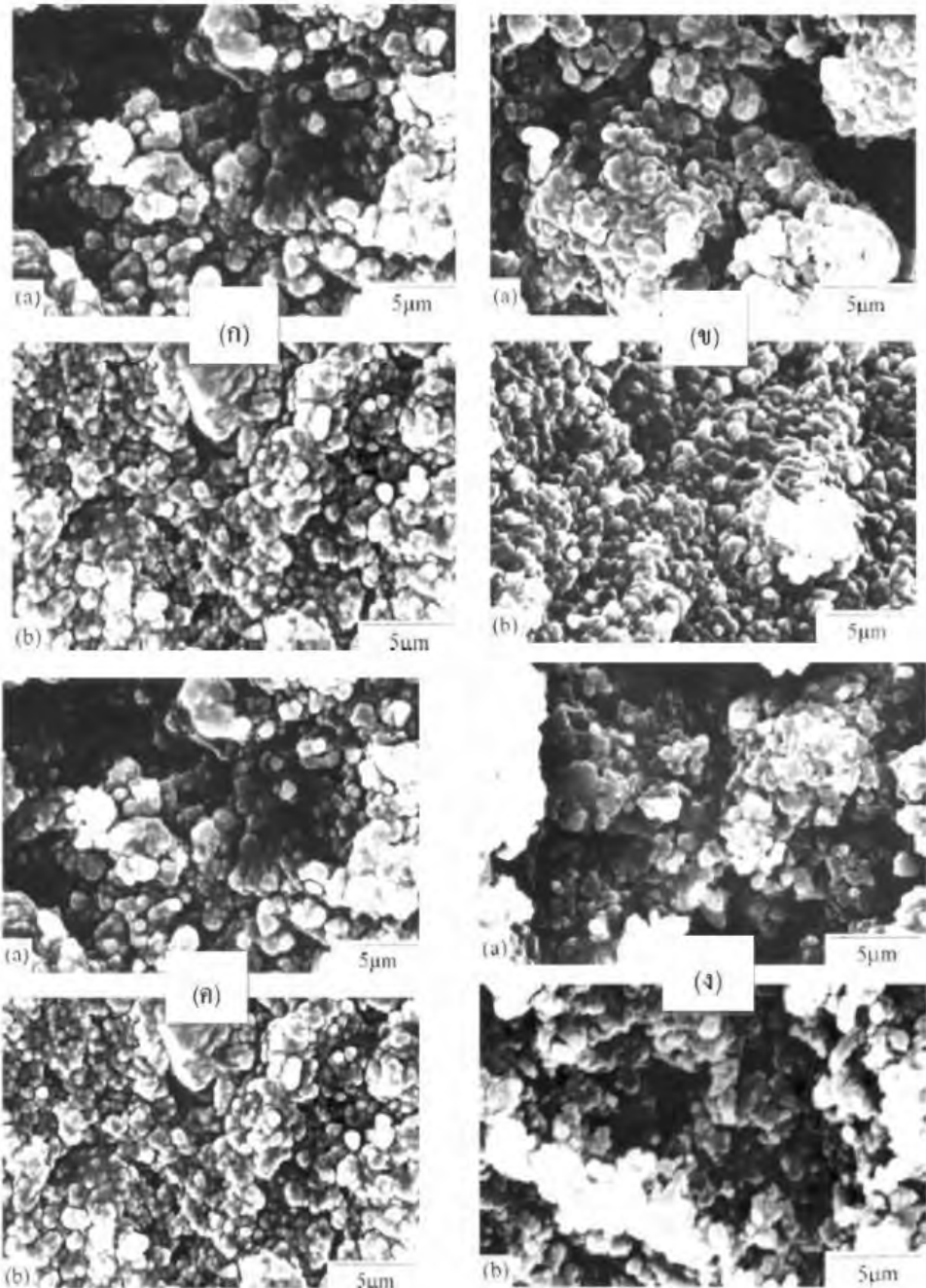


รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิของการจำกัดตัวเชื่อมประสานต่อการจำกัดตัวเชื่อมประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำ ณ เวลาต่าง ๆ <sup>(14)</sup>

จุฬาเทพ สุรวัฒนา<sup>(9)</sup> ศึกษาผลของการฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้ตัวประสานร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลพิวริลซึ่งสามารถจำกัดได้โดยการแช่น้ำและให้ความร้อนตามลำดับ ประกอบด้วยการทดลอง 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองหาปริมาณผงวัสดุต่อตัวประสานที่สามารถฉีดขึ้นรูปด้วยผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีอัตราส่วน 90 : 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG ต่อ PVB คือ 85 : 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนของตัวประสานคงที่ ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของตัวประสานที่เหมาะสม อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG ร้อยละ 90 85 80 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนตัวประสานชนิด PVB ร้อยละ 10 15 20 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวประสานชนิด PVB เริ่มการสลายพันธะตั้งแต่อุณหภูมิ 100 จนถึง 470 องศาเซลเซียส และ



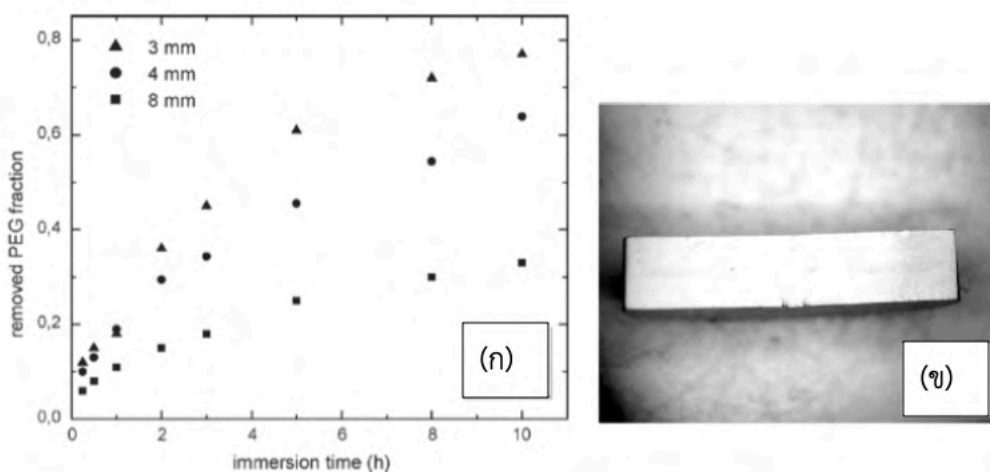
ตัวประสานชนิด PEG กำจัดโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามวัสดุผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 44 46 48 50 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนปริมาณรูพรุนที่ปรากฏจะให้ผลตรงข้าม ความแข็งของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามวัสดุผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น สมบัติที่กล่าวมามีความสอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



รูปที่ 9 โครงสร้างรอยหักชิ้นงานอะลูมินา (a) ผิวหน้าชิ้นงาน (b) ภายในชิ้นงาน โดย (ก) หลังจากฉีดขึ้นรูป (ข) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (ค) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ง) แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง <sup>(9)</sup>

จากรูปที่ 9 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมินา เห็นได้ว่ารูป (ก) คือชิ้นงานหลังขึ้นรูป (a) ผิวหน้าของชิ้นงานมีการเกาะรวมตัวกันของผงวัสดุกับตัวเชื่อมประสานชนิด PEG อย่างหนาแน่น ส่วน (b) ภายในเนื้อชิ้นงานมีลักษณะเช่นเดียวกับผิวหน้าของชิ้นงานแต่มีลักษณะการเกาะกันของผงวัสดุกับตัวเชื่อมประสานที่หนาแน่นกว่าชัดเจน รูป (ข) เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 นาที (a) ผิวหน้าของชิ้นงานเริ่มเกิดช่องว่างเมื่อตัวเชื่อมประสานชนิด PEG ถูกละลายในจำนวนเล็กน้อย ส่วน (b) ภายในชิ้นงานเกิดการละลายของตัวเชื่อมประสานเช่นเดียวกับผิวหน้าแต่เกิดได้น้อยกว่า รูป (ง) เมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง (a) ผิวหน้าของชิ้นงานเริ่มเกิดช่องว่างมากเมื่อตัวเชื่อมประสานชนิด PEG ถูกละลายและอัตราการละลายเริ่มลดลง ส่วน (b) ภายในชิ้นงานเกิดช่องว่างอย่างชัดเจน

V.A. Krauss และคณะ<sup>(15)</sup> ศึกษาการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยการแช่น้ำ โดยเตรียมผงอะลูมินากับตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลบิวทิลโรล โดยปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลบิวทิลโรล ในอัตราส่วน 2:1 ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ลักษณะชิ้นงานเป็นแท่งทรงกลมความยาว 165 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 24 - 28 มิลลิเมตร และมีความหนาต่าง ๆ กันคือ 3 4 และ 8 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่า ขนาดความหนาของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปของผงอะลูมินากับตัวประสานมีผลต่อการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลถูกกำจัดออกจากชิ้นงานได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 8 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป หลังการผ่านการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลชิ้นงานยังสามารถคงรูปอยู่ได้



รูปที่ 10 ขนาดความหนาของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป

(ก) สัดส่วนของตัวเชื่อมประสานที่ถูกกำจัดออกเปรียบเทียบกับความหนา

(ข) ภายถ่ายชิ้นงานหลังจากกำจัดตัวเชื่อมประสานที่เวลา 3 ชั่วโมง<sup>(15)</sup>

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงให้เป็นเส้นยาว ๆ ที่เรียกว่า filament เพื่อนำไปใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM โดยใช้ตัวประสานที่ประกอบไปด้วย Polyethylene glycol (PEG), Polyvinyl butyral (PVB), Polyvinyl alcohol (PVA) และ Stearic acid (SA) เป็นหลัก และเมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วจะกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดตัวประสานชนิด PVB ก่อน และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ซึ่งบทนี้ได้กล่าวถึงวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ตัวแปรในการทดลอง การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ผงอะลูมินา alteo P172SB 0.43 ไมโครเมตร สำหรับตัวประสานที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ Polyethylene glycol (PEG) โมเลกุลเฉลี่ย 6000 จากบริษัท Ajax Finechem, Polyvinyl butyral (PVB) BL-10 Sekisui, Polyvinyl alcohol (PVA) 9000 Aldrich และ Stearic acid



รูปที่ 11 ผงอะลูมินา alteo P172SB 0.43 ไมโครเมตร



รูปที่ 12 Stearic acid, Polyvinyl alcohol (PVA) 9000 Aldrich, Polyethylene glycol (PEG) 6000 จากบริษัท Ajax Finechem และ Polyvinyl butyral (PVB)

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.2.1 การออกแบบการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมของตัวประสานชนิด PEG และ PVB ในชิ้นงานอะลูมินาฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์โดยการแปรผันอัตราส่วนของตัวประสาน เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM จากนั้นกำจัดตัวประสานด้วยวิธีแช่น้ำและเผาตามลำดับที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ตามขั้นตอนในแผนผังงานวิจัย

#### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

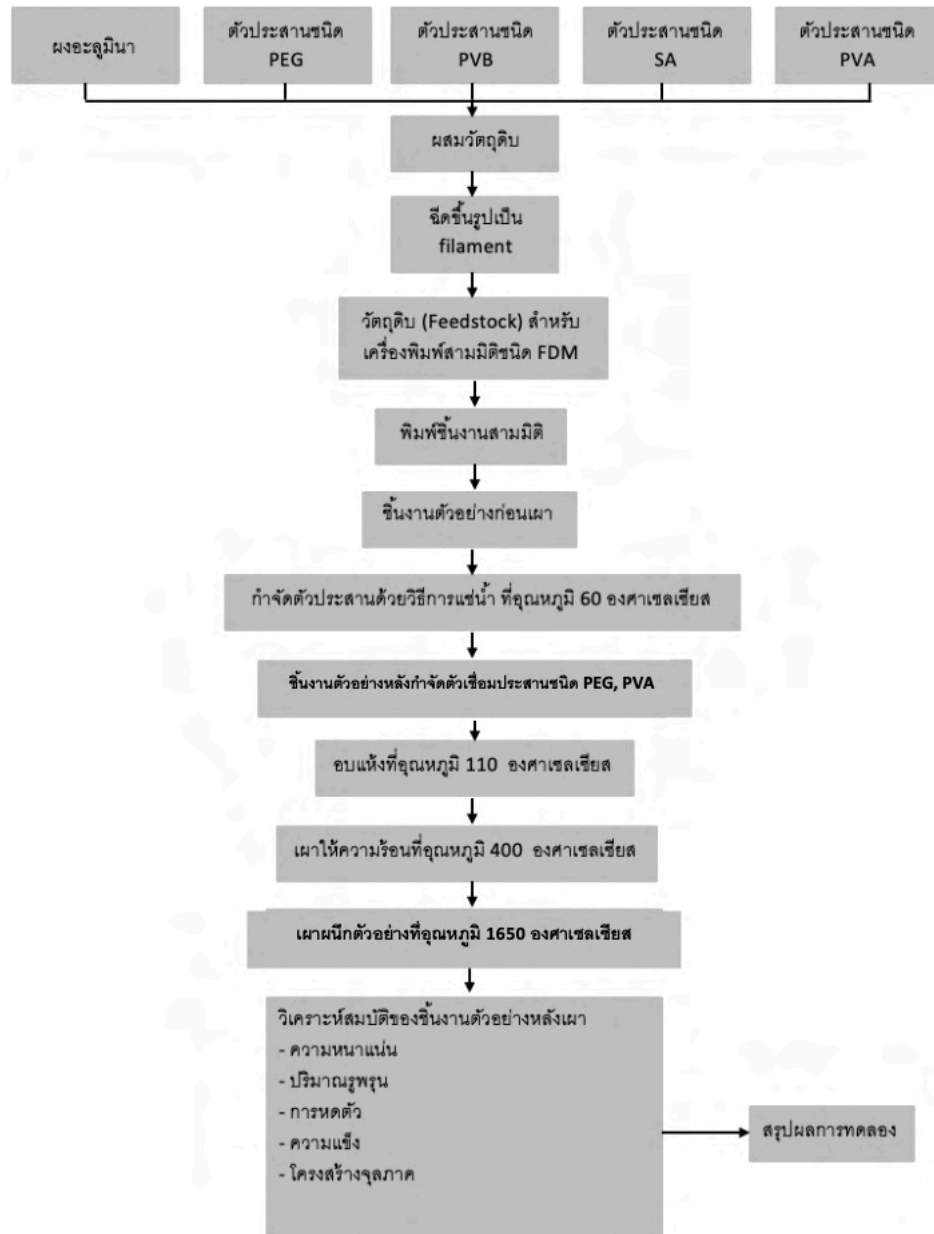
1) เตรียมส่วนผสมผงอะลูมินา PVB PEG PVA และ SA ตามอัตราส่วนที่กำหนดแล้วผสมผงวัตถุดิบเข้าด้วยกัน

2) ฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบที่มีแท่งดัน (ดังแสดงในภาพประกอบที่ 14)

3) นำตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นฟิลาเมนต์แล้วไปเป็นวัตถุดิบสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM (ดังแสดงในภาพประกอบที่ 15)

4) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วไปกำจัดตัวประสานชนิด PEG และ PVA ด้วยวิธีการแช่น้ำแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

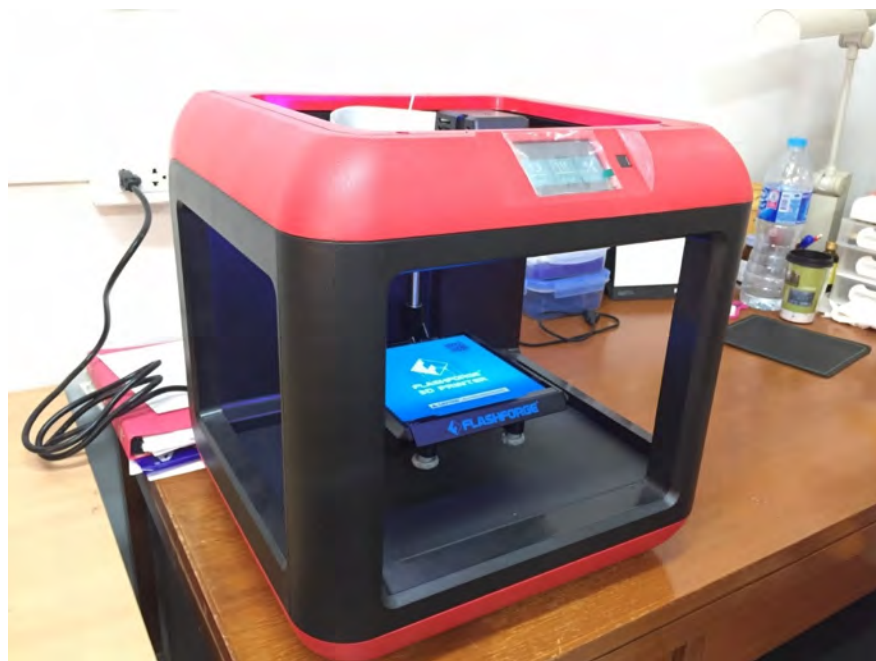
- 5) นำตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งมาเผาไล่ตัวประสานชนิด PVB ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส
- 6) นำตัวอย่างชิ้นงานไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 13 แผนผังงานวิจัยการเตรียมเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูง ด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 14 เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบที่มีแท่งดัน



รูปที่ 15 เครื่องพิมพ์สามมิติชนิด FDM

### 3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

#### 3.2.3.1 การกำจัดตัวประสานชนิด PEG

การกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยการแช่น้ำ (Water leaching) ก่อนกำจัดตัวประสานนำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติซึ่งน้ำหนักแล้วจดบันทึกค่าน้ำหนักเอาไว้ ต่อจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างแช่น้ำ เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง โดยวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก PEG ที่ถูกกำจัดมีดังนี้

$$1) \text{ น้ำหนัก PEG ที่หายไป} = \text{น้ำหนักหลังจากขึ้นรูป} - \text{น้ำหนักหลังแช่น้ำและแห้ง}$$

$$2) \text{ เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก PEG ที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนัก PEG ที่หายไป}}{\text{น้ำหนัก PEG ในชิ้นงาน}} \times 100$$

#### 3.2.3.2 การกำจัดตัวประสานชนิด PVB

การกำจัดตัวประสานชนิด PVB ด้วยการเผาให้ความร้อน ก่อนกำจัดตัวประสานนำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการตัวประสานชนิด PEG ชั่งน้ำหนักแล้วจดบันทึกค่าน้ำหนักเอาไว้ ต่อจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง โดยวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก PVB ที่ถูกกำจัด มีดังนี้

$$1) \text{ น้ำหนัก PVB ที่หายไป} = \text{น้ำหนักหลังจากกำจัด PEG} - \text{น้ำหนักหลังเผา}$$

$$2) \text{ เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก PEG ที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนัก PVB ที่หายไป}}{\text{น้ำหนัก PVB ในชิ้นงาน}} \times 100$$

#### 3.2.3.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา

ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาหรือความหนาแน่นรวม (Bulk density) ใช้หลักอาร์คิมิดีสทำได้โดยนำชิ้นงานใส่ในบีกเกอร์ตมชิ้นงานตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างชิ้นงานชั่งน้ำหนักเปียก ( $W_{sat}$ ) น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในน้ำ ( $W_{sub}$ ) นำชิ้นงานอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงาน ( $W_{dry}$ ) คำนวณความหนาแน่นรวม ( $W_{total}$ ) และปริมาณรูพรุนจริงที่ปรากฏ โดยวิธีการคำนวณ มีดังนี้

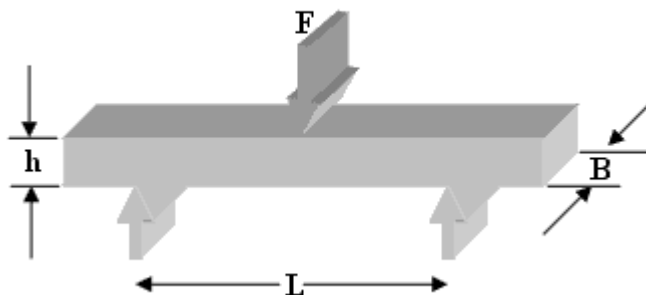
$$1) \text{ Bulk density} = \frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \times \rho_{water}$$

$$2) \text{ Apparent Porosity} = \left( \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \right) \times 100$$

$$3) \text{ Relative Density} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{th}} \times 100$$

3.2.3.4 ความแข็งแรง

การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (round knife edges) หรือเพลาลโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกดและชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าว เพื่อเป็นการลดความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



รูปที่ 16 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

ตารางที่ 3 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก
ความเค้น	$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2}$	$\sigma = \frac{8FL}{\pi D^3}$
ความเครียด	$\epsilon = \frac{6Yh}{L^2}$	$\epsilon = \frac{6YD}{L^2}$
โมดูลัส	$E = \frac{L^3}{4Bh^3} \left( \frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{4L^3}{3\pi D^4} \left( \frac{F}{Y} \right)$



โดยที่

F คือ แรงกระทำ

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (span length)

h คือ ความหนา

B คือ ความกว้าง

Y คือ ระยะการดัดงอของชิ้นงาน

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกต้น

### 3.2.3.5 การหดตัวของชิ้นงาน

การวัดการหดตัวของชิ้นงานเชิงเส้น (linear shrinkage) ทำได้โดยขึ้นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดความยาว 5×5×5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวัดขนาดความยาวเฉลี่ยชิ้นงาน ( $L_d$ ) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังขึ้นรูป (%drying shrinkage) และเมื่อกำจัดตัวเชื่อมประสานชนิด PEG วัดความยาวเฉลี่ยชิ้นงาน ( $L_{peg}$ ) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG (%debinding PEG shrinkage) ถัดไปเมื่อกำจัดตัวเชื่อมประสานชนิด PVB วัดความยาวเฉลี่ยชิ้นงาน ( $L_{pvb}$ ) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังกำจัดตัวประสานชนิด PVB (%debinding PVB shrinkage) และเมื่อนำชิ้นงานไปเผาผืนิก วัดความยาวเฉลี่ยชิ้นงาน ( $L_f$ ) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังการเผา (%frying shrinkage) โดยวิธีการคำนวณหา มีดังนี้

$$1) \%drying\ shrinkage = \frac{5 - L_d}{5} \times 100$$

$$2) \%debinding\ PEG\ shrinkage = \frac{L_d - L_{peg}}{L_d} \times 100$$

$$3) \%debinding\ PVB\ shrinkage = \frac{L_{peg} - L_{pvb}}{L_{peg}} \times 100$$

$$4) \%frying\ shrinkage = \frac{L_{pvb} - L_f}{L_{pvb}} \times 100$$

### 3.3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานก่อนเผา ส่วนที่ 2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานชนิด PEG PVA และส่วนที่ 3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการเผาผืนิก

## 3.3 ตารางการดำเนินงานวิจัย

การปฏิบัติ	สิงหาคม 2562	กันยายน - ตุลาคม 2562	พฤศจิกายน - ธันวาคม 2562	มกราคม 2563	กุมภาพันธ์ - มีนาคม 2563	เมษายน - พฤษภาคม 2563
เตรียมสารและอุปกรณ์ที่ใช้ ในการทดลอง	✓					
ขึ้นรูปฟิลาเมนต์		✓				
ขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานด้วย เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM และนำไปกำจัดตัวประสาน			✓			
เผาตัวอย่างชิ้นงาน				✓		
วิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง ชิ้นงาน					✓	
สรุปผลการวิจัย จัดทำรูปเล่ม						✓

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 สูตรที่ใช้ทดลอง

ตารางที่ 4 แสดงสูตรที่ใช้ในการทดลอง (Vol%)

	PVB BL-10 Sekisui	PEG 6000 Ajak Finechem	SA	PVA 9000 Aldrich	Alumina
A0	10	40	0	0	50
A1	15	35	0	0	50
A2	20	30	0	0	50
A3	30	20	0	0	50
A4	40	10	0	0	50
A5	50	0	0	0	50
A6	12	48	0	0	40
A7	18	42	0	0	40
A8	14	56	0	0	30
A9	16	64	0	0	20
A10	10	35	0	5	50
A11	10	30	0	10	50
A12	10	28	2	35	25
A13	10	18	2	45	25

#### 4.2 การศึกษาการขึ้นรูปฟิลาเมนต์

4.2.1 ตารางที่ 5 แสดงลักษณะของฟิลาเมนต์ที่ได้จากแต่ละสูตร

สูตร	อุณหภูมิที่รีดเส้น(°C)	ลักษณะเส้นที่รีดได้	ผลการขึ้นรูป
A0	180	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A1	160	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A2	160	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A3	160	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A4	190	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A5	200	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-

A6	190	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A7	180	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A8	190	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A9	160	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A10	160	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A11	160	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่เปราะ	-
A12	190	ส่วนผสมเข้ากันดีแต่ไม่ค่อยเหนียว	ทดลอง print แต่ print ไม่ได้
A13	190	ส่วนผสมเข้ากันดีและมีความเหนียวพอสมควร	ทดลอง print Print ได้แค่ 60%

#### 4.3 การศึกษาผลการขึ้นรูปชิ้นงาน

จากการทดลองผสมส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ สูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM ได้ คือ สูตรส่วนผสม A13 ผสมแบบเปียก ดังแสดงในตารางที่ 4 เนื่องจากขั้นตอนในการผสมแห้งไม่สามารถทำให้ฟิลาเมนต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ ทำให้ไม่สามารถนำไปพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้

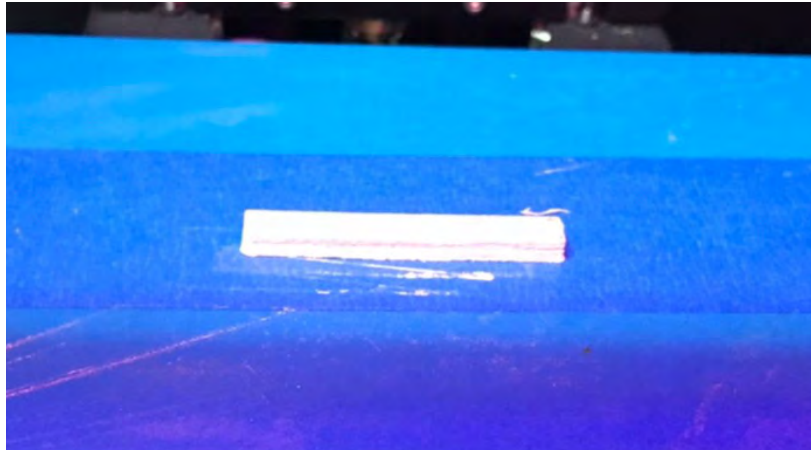


รูปที่ 17 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากฟิลาเมนต์ สูตร A13 ผสมแห้ง จะเห็นได้ว่าชั้นล่างที่ออกมาแล้วแข็งตัวไม่เชื่อมต่อกับชั้นบนที่ออกมาใหม่ และเกิดการขาดของเส้นระหว่างฉีดยาขึ้นรูป

ตารางที่ 6 แสดงอัตราส่วนผสมของส่วนผสมที่ใช้ทำการวิจัยนี้

A13	Vol%	Batch 20 g
PVB BL-10 Sekisui	10	2.23
PEG 6000 Ajak Finechem	18	4.19
SA Panreac	2	0.38
PVA 9000 Aldrich	45	10.94
Alumina	25	20.00

จากการนำฟิลาเมนต์ สูตร A13 ผสมเปียกมาขึ้นเป็นชิ้นงาน 3 มิติด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ได้ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 18



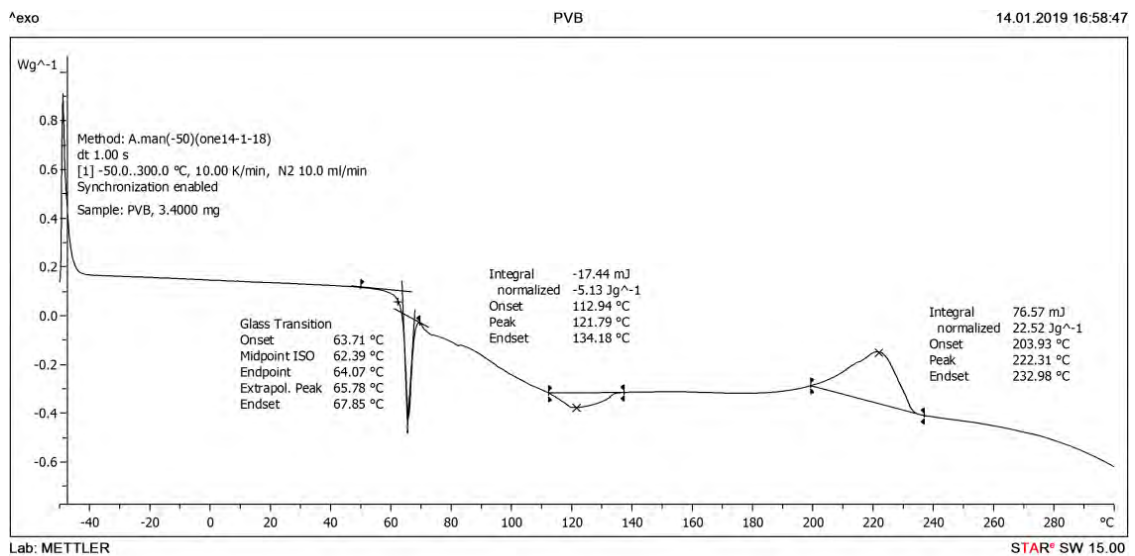
รูปที่ 18 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยฟิลาเมนต์สูตร A13 ผสมเปียก

ผลการทดลองที่คาดว่าจะได้รับ

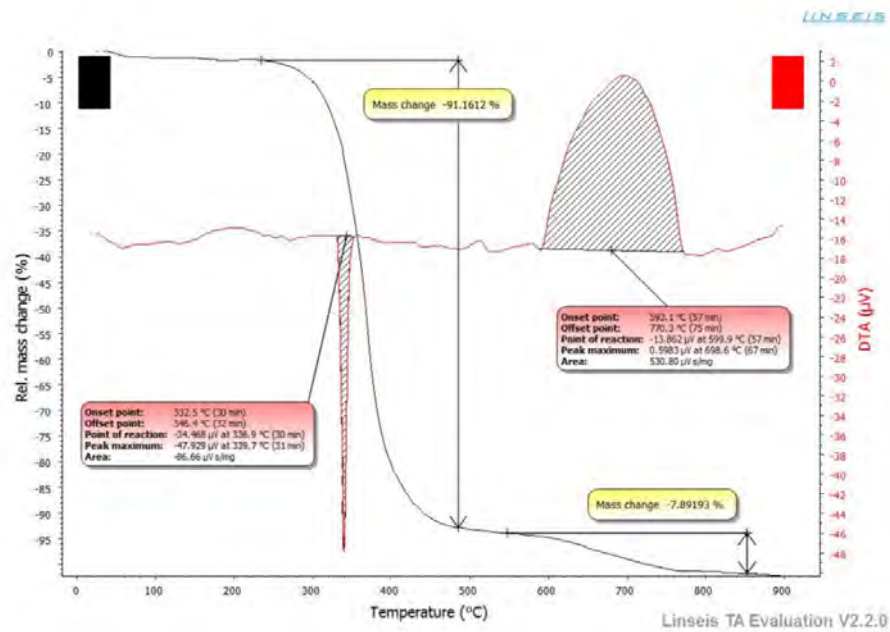
#### 4.4 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัสดุดิบ

##### 4.4.1 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อน

(ก)



(ข)

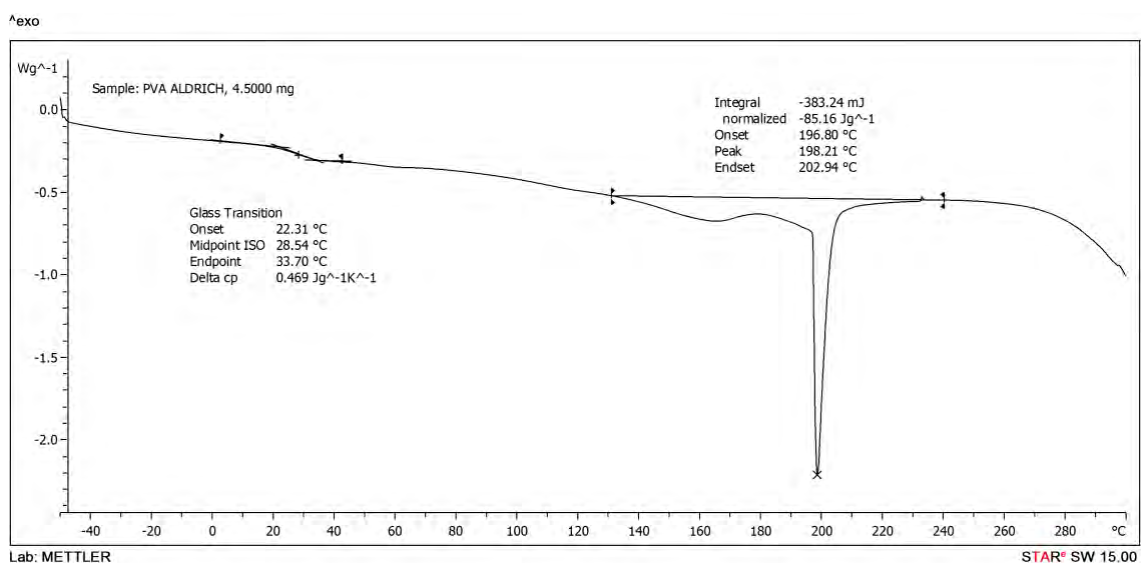


รูปที่ 19 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิไวนิลบิวไทรอลด้วยความร้อนจาก (ก) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ข) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA)

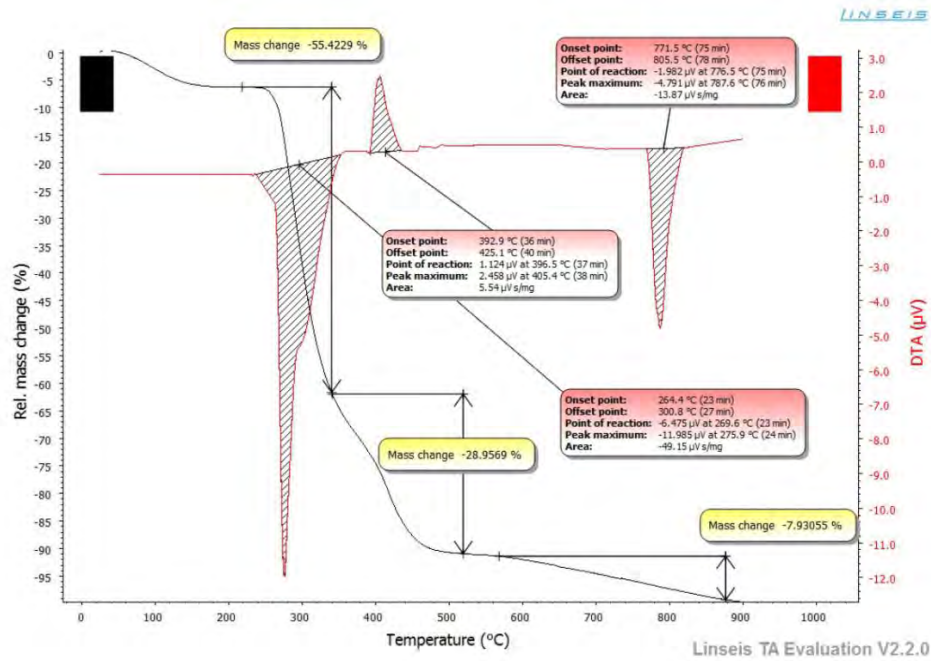
จากกราฟรูปที่ 19 พบว่า พอลิไวนิลบิวไทรอลเริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นยืดหยุ่น คล้ายยางที่อุณหภูมิประมาณ 62 องศาเซลเซียส จากนั้นหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 121 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 19 (ก) เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 339 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 19 (ข)

#### 4.4.2 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อน

(ก)



(จ)

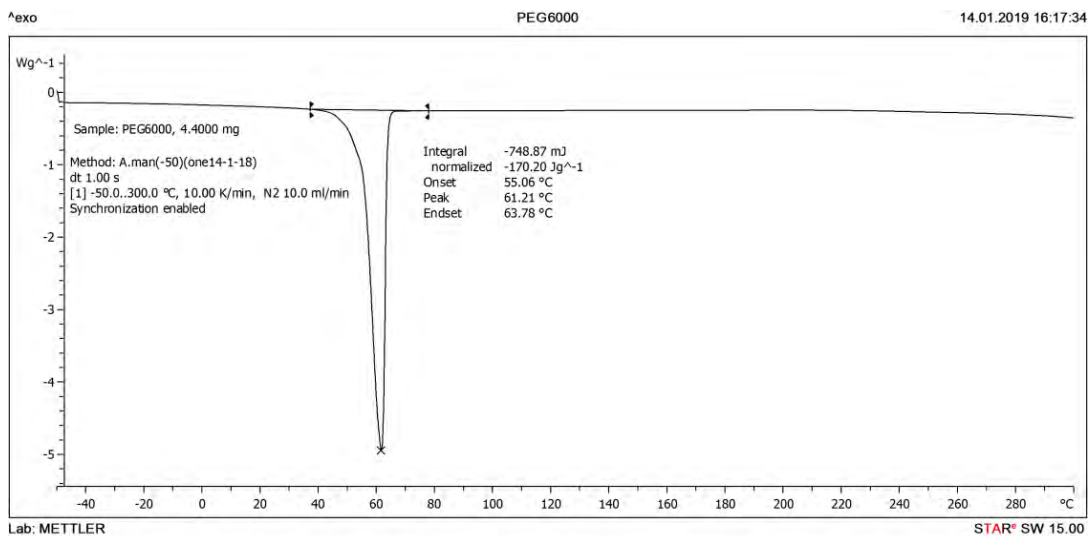


รูปที่ 20 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยความร้อนจาก (ก) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ข) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA)

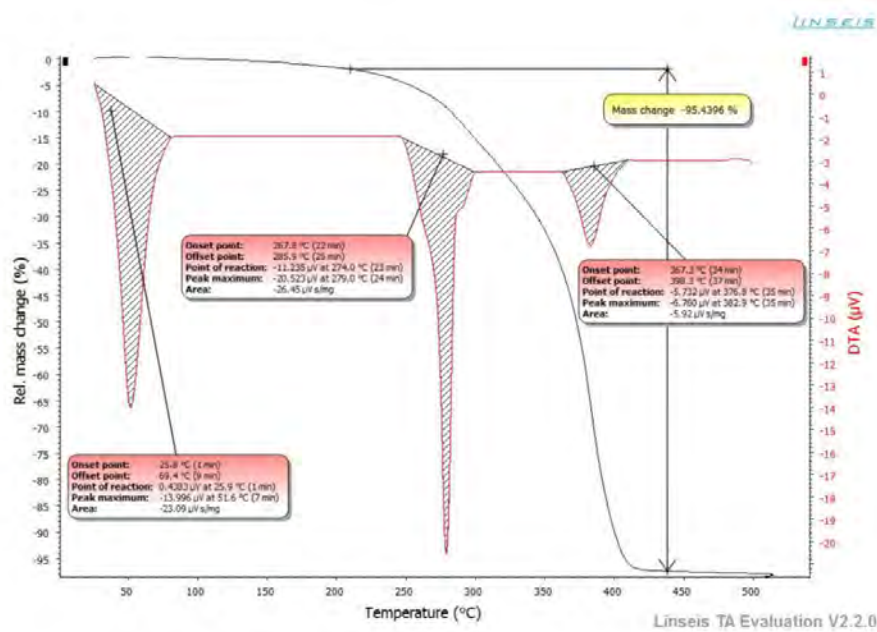
จากกราฟรูปที่ 20 พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็น ยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิประมาณ 28 องศาเซลเซียส จากนั้นหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 198 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 20 (ก) เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 275 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 20 (ข)

#### 4.4.3 การสลายตัวของตัวเชื่อมประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อน

(ก)



(ข)



รูปที่ 21 กราฟแสดงการสลายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยความร้อนจาก (ก) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ข) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA)

จากกราฟรูปที่ 21 พบว่าพอลิเอทิลีนไกลคอลเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 61 องศาเซลเซียส และจากข้อมูลที่ได้จากกราฟไม่ทราบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันดังแสดงในรูปที่ 21 (ก) และเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 279 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 21 (ข)

#### 4.5 ผลการทดลองของชิ้นงาน

##### 4.5.1 การกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นโดยผ่านการแช่น้ำ

อ้างอิงจากงานวิจัยเรื่อง การเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูง พบว่าจากการกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นของชิ้นงานตัวอย่างของเซอร์โคเนียที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM สูตร Z13 ผสมเปียก (สัดส่วนเท่ากับสูตร A13 ของงานวิจัยนี้) โดยผ่านการแช่น้ำ พบว่าสามารถกำจัดตัวเชื่อมประสานและสารหล่อลื่นออกไปจากชิ้นงานได้หมดจากการให้ความร้อน และชิ้นงานสามารถคงรูปได้มากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

แม้ว่าการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติกชนิด FDM จะมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้และยังมีความรวดเร็ว แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องบางประการ อาทิเช่น การที่นำผงเซรามิก ตัวเชื่อมประสาน และสารหล่อลื่นมาผสมเข้าด้วยกันมีความยากที่จะทำให้สารผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ ส่วนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปชิ้นงานผ่านหัวฉีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีขนาดเล็ก จะส่งผลให้เกิดรอยแตกบนชิ้นงาน รวมไปถึงความยากต่อการกำจัดรูพรุนออกจากชิ้นงานเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยวิธี FDM ซึ่งรูพรุนเหล่านั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน การเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นของชิ้นงานยังไม่เชื่อมติดกันได้ดีพอ อีกทั้งขั้นตอนในการกำจัดตัวเชื่อมประสานใช้เวลานานและยังทำให้ชิ้นงานเสียรูปไปเล็กน้อย

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 วิธีการผสมเปียกสามารถขึ้นรูปฟิลาเมนต์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมมากกว่าการผสมแห้ง

5.1.2 สูตร A13 ผสมเปียก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ดีที่สุด

5.1.3 ผิวด้านข้างของชิ้นงานมีลักษณะเป็นชั้น ๆ เนื่องจากการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM

#### 5.2 อุปสรรค

5.2.1 สูตรการขึ้นรูปฟิลาเมนต์และการปรับอุณหภูมิการรีดที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องรีดเส้นฟิลาเมนต์ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้และใช้ระยะเวลาในการช้อนาน

5.2.2 ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเส้นฟิลาเมนต์ เมื่อนำมารีดผ่านหัวรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทำให้หัวรีดอุดตันไม่สามารถพิมพ์ต่อได้

5.2.3 เนื่องจากมีความชื้นในส่วนผสม การรีดส่วนผสมในเครื่องฉีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์จะทำให้เส้นฟิลาเมนต์ที่ได้ขาด และไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นที่มีความยาวตามต้องการได้

5.2.4 วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลองหมด ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ตามปริมาณที่ต้องการ

5.2.5 ช่วงระยะเวลาการทำงานวิจัยเกิดการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ตามแผนการดำเนินงาน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จตามที่คาดหวังไว้ได้แต่ทว่าในการศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาความหนาแน่นสูงด้วยการพิมพ์ 3 มิติระบบฉีดเส้นพลาสติก ชนิด FDM สามารถนำไปต่อยอดได้ในอนาคต จึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.1 การศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถพิสูจน์ได้ว่าตัวเชื่อมประสานชนิด PEG PVB และ PVA สามารถนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ระบบฉีดเส้นพลาสติก ชนิด FDM ได้

5.3.2 การผสมส่วนผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมีความสำคัญต่อการฉีดขึ้นรูปฟิลาเมนต์และขึ้นรูปชิ้นงาน

5.3.3 ควรมีการควบคุมความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงาน ความหนาของแต่ละชั้นของชิ้นงาน และอุณหภูมิของฐานรองชิ้นงานให้เหมาะสมกับรูปร่างของชิ้นงาน

5.3.4 เนื่องจากฟิลาเมนต์มีความแข็งและยาวจนไม่สามารถบิดฝากรอบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อควบคุมอุณหภูมิได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่หัวฉีดเส้นจึงไม่คงที่

## เอกสารอ้างอิง

- (1) วิบุณ ตังวโรดมณกุล. (2554). เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบเร็ว (rapid prototyping technologies). Technology promotion. 38(216): 071-076. สืบค้นจาก <https://www.scribd.com/Document/62618331/เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบเร็ว>
- (2) สุจินต์ พรราวพันธุ์. 2545. อะลูมินากับการนำไปใช้งานทางเซรามิก. (15 เมษายน 2562). [http://www.dss.go.th/images/st-article/ct\\_2\\_2545\\_alumina.pdf](http://www.dss.go.th/images/st-article/ct_2_2545_alumina.pdf)
- (3) G. Yamaguchi, “Arumina to Aruminasuiwabutsu no Kouzou”, Kagaku to Kougyou, 17 [12], (1964) 1326-1335.
- (4) K. Jiang, D. Music, K. Sarakinos, J. Schneider, Ab initio study of effects of substitutional additives on the phase stability of  $\gamma$  -alumina. Journal of Physics: Condensed Matter, 2010. Vol 22, 505502 (8pp).
- (6) สุรศักดิ์ ไททวยวงศ์สกุล. 2543. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์: ตัวประสานในอุตสาหกรรมเซรามิกส์. (13 พฤษภาคม 2562). [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/273\\_18\\_14.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/273_18_14.pdf)
- (7) Admin. (13 พฤษภาคม 2562). Stearic acid. สืบค้นจาก <https://thaipolychemicals.weebly.com/stearic-acid.html>
- (8) กัมปนาท หวลบุตตา. (28 มีนาคม 2560). พอลิเมอร์ที่ใช้ทางเภสัชกรรม (Pharmaceutical polymer). สืบค้นจาก <https://goo.gl/bKxEkd>
- (9) จุฬาทเพ สุรวัฒนา. (2554). การฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคราไบต์.(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์, สาขาวิชาเซรามิก
- (10) สุจินดา โชติพานิช, วรณา ต. แสงจันทร์, สุทธิชัย ทีปประสาน, ชาญ จรรย์วานิชย์, ธีรานี โชติกไกร, สมศักดิ์ แสงศิลา, สุชาดา ศรีไพโรจน์ธิกุล. 2541. การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ตัวนำร่องเส้นด้ายเซรามิกส์เนื้ออะลูมินาของต่างประเทศ. (16 เมษายน 2562). [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/262\\_MT10\\_45.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/262_MT10_45.pdf)
- (11) Nutthita Chuankrerkkul, Rattanaporn Charoenkijmongkol, Punnapa Somboonthanasarn, Chiraporn Auechalitanukul, & Ryan C. McCuiston. (2015). Microstructure and Properties of Alumina 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) DesignTech. (n.d.). How Fused Deposition Modeling (FDM) Printers Work. Retrieved from <http://www.designtechsys.com/articles/working-fdm-3d-printers>
- (17) Admin. (22 ตุลาคม 2559). 3D printer Introduction. สืบค้นจาก <http://www.inventor-3d.com/3d-printer-introduction/>
- (18) จิตติ รินเสนา. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมแบบอัดซ้อน.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ; 2551

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก สูตรอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

	A0		
Polymer	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	10	4.32	1.11
PEG 6000 Ajak Fineche	40	18.07	4.66
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	77.60	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.77
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	16.67		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	20.00		

	A1		
Polymer	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	15	6.49	1.67
PEG 6000 Ajak Fineche	35	15.83	4.08
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	77.68	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.75
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	23.08		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	30.00		

	A2		
Polymer	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	18	8.76	2.51
PEG 6000 Ajak Fineche	42	21.36	6.11
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	40	69.88	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	28.62
<b>Polymer (Vol%)</b>	60		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	40		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	31.03		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	30.00		

	A3		
Polymer	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	20	8.66	2.23
PEG 6000 Ajak Fineche	30	13.58	3.49
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	77.76	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.72
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	28.57		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	40.00		

	A4		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	30	13.02	3.34
PEG 6000 Ajak Fineche	20	9.07	2.33
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	77.91	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.67
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	37.50		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	60.00		

	A5		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	50	21.78	5.57
PEG 6000 Ajak Fineche	0	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	78.22	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.57
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	50.00		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	100.00		

	A6		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	40	17.39	4.46
PEG 6000 Ajak Fineche	10	4.55	1.16
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	78.06	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.62
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	44.44		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	80.00		

	A7		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	10	4.32	1.11
PEG 6000 Ajak Fineche	35	15.80	4.08
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	5	2.36	0.61
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	77.53	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.80
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	16.67		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	20.00		

	A8		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	10	4.31	1.11
PEG 6000 Ajak Fineche	30	13.53	3.49
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	10	4.71	1.22
<b>Ceramic</b>			
Alumina	50	77.45	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	25.82
<b>Polymer (Vol%)</b>	50		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	50		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	16.67		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	20.00		

	A9		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	12	5.83	1.67
PEG 6000 Ajak Fineche	48	24.38	6.99
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	40	69.79	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	28.66
<b>Polymer (Vol%)</b>	60		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	40		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	23.08		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	20.00		

	A10		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	14	7.77	2.60
PEG 6000 Ajak Fineche	56	32.48	10.87
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	30	59.76	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	33.47
<b>Polymer (Vol%)</b>	70		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	30		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	31.82		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	20.00		

	A11		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	16	10.34	4.46
PEG 6000 Ajak Fineche	64	43.24	18.63
SA	0	0.00	0.00
PVA 9000 Aldrich	0	0.00	0.00
<b>Ceramic</b>			
Alumina	20	46.42	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	43.09
<b>Polymer (Vol%)</b>	80		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	20		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	44.44		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	20.00		



	A12		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	10	5.92	2.23
PEG 6000 Ajak Fineche	28	17.33	6.52
SA	2	1.01	0.38
PVA 9000 Aldrich	35	22.60	8.51
<b>Ceramic</b>			
Alumina	25	53.14	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	37.64
<b>Polymer (Vol%)</b>	75		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	25		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	28.57		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	13.33		

	A13		
<b>Polymer</b>	Vol %	Mass %	Batch 20g
PVB BL-10 Sekisui	10	5.90	2.23
PEG 6000 Ajak Fineche	18	11.11	4.19
SA	2	1.01	0.38
PVA 9000 Aldrich	45	28.98	10.94
<b>Ceramic</b>			
Alumina	25	53.00	20.00
<b>Sum</b>	100	100.00	37.74
<b>Polymer (Vol%)</b>	75		
<b>Ceramic (Vol%)</b>	25		
<b>PVB/(Cer+PVB) (Vol%)</b>	28.57		
<b>PVB/(Polymer) (Vol%)</b>	13.33		

## ภาคผนวก ข ลักษณะของเส้นฟิลาเมนต์

