การศึกษาปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์

นาย สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1093-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 8 ธ.ค. 2550

A STUDY OF FORMING PROCESS FACTORS AFFECTING ON POROSITY OF HYDROXYAPATITE

Mr.Sujin Woottichaiwat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 971-03-1093-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์
โดย	นายสุจินต์ วุฒิขัยวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ นพ.ศุภชัย วงศ์พิเชษฐชัย)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จันทนา จันทโร)

สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์ : การศึกษาปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ (A STUDY OF FORMING PROCESS FACTORS AFFECTING ON POROSITY OF HYDROXYAPATITE) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ,174 หน้า. ISBN 974-03-1093-1

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของเซรามิกซ์ไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ในการศึกษาได้สังเคราะห์สารไฮดรอกซี่อะพาไทต์จากปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมีระหว่าง $Ca(NO_3)_2$ และ $NH_4(HPO_4)_2$ และขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการใช้วัสดุสร้างความพรุน 2 ชนิด คือ ฟองน้ำ และผงแป้ง

การขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกซ์ไฮดรอกซี่อะพาไทต์ด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ จะเตรียมชิ้นงาน โดยผสมฟองน้ำ ตั้งแต่ 0.05-0.20 กรัม ต่อ ผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 10 กรัม และขึ้นรูปด้วยแรงกดในช่วงระหว่าง 2-8 MPa สำหรับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง จะเตรียมชิ้นงานโดยผสมปริมาณผงแป้ง ตั้งแต่ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และขึ้นรูปด้วยแรงกดในช่วงระหว่าง 2-36 MPa จากนั้นจึงนำชิ้นงานทั้งหมดไปเผาที่อุณหภูมิ 1050 1100 และ1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วจะถูกนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และทางกล ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ความหนาแน่นบัลค์ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ความแข็งของวัสดุ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกด

จากการศึกษา พบว่า ปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อความพรุน คือ ปริมาณวัสดุสร้างความพรุน ได้แก่ ฟองน้ำ และผงแป้ง เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความพรุนของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงกดขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความพรุนของชิ้นงานลดลง โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ความหนาแน่นบัลค์ ความแข็งของวัสดุ ความแข็งแรงภายใต้แรงกด และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกด ในช่วงระหว่าง 14-75% 1.2-1.9g/cm^3 27-113 HV 1-44MPa และ 6-368MPa ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยผงแป้ง จะมีค่าในช่วงระหว่าง 17-45% 1.4-1.9g/cm^3 29-120HV 5-67MPa และ 30-611MPa ตามลำดับ และผลจากภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ชิ้นงานทั้งสองชนิดจะมีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 5-30 ไมโครเมตร

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2544 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

4270598821 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : POROSITY / POROUS / HYDROXYAPATITE / HA

MR. SUJIN WOOTTICHAIWAT : A STUDY OF FORMING PROCESS FACTORS AFFECTING ON POROSITY OF HYDROXYAPATITE. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, D.Eng. 174 pp. ISBN 974-03-1093-1.

The forming process factors affecting on porosity of Hydroxyapatite (HA) were studied. Hydroxyapatite, synthesized by chemical precipitation from $Ca(NO_3)_2$ and $NH_4(HPO_4)_2$, was formed into porous material by 2 pore-forming techniques. There were Sponge and Starch.

For Sponge method, HA powder and pieces of sponge were mixed with composition of 0.05 g to 0.2 g of sponge and 10 g of HA powder, and then using die-pressing with pressure between 2 MPa to 8 MPa. For Starch method, the green specimens were prepared by mixing starch ranging between 1% to 5% by volume and then pressed between 2 MPa to 36 MPa. After that, all specimens were sintered in furnace at 1050, 1100 and 1150^{o}C for 3 hours. Each specimens were characterized on physical and mechanical properties such as %porosity, Bulk density, %linear shrinkage, hardness, compressive strength and compressive Young's modulus.

The experimental results showed that forming process factors, which were the quantities of pore-former, forming force and sintering temperature, significantly affected on porosity of sintered HA. The increasing of quantity of both sponge and starch increased the porosity, while increasing of forming force and sintering temperature decreased the porosity. The properties of porous HA prepared using sponge technique provided the porosity of between 14-75%, bulk density of between 1.2-1.9 g/cm^3, hardness of between 27-113 HV, compressive strength of between 1-44 MPa and compressive Young's modulus of between 6-368 MPa, respectively. For using starch technique, the properties of specimens were the porosity of between 17-45%, bulk density of between 1.4-1.9 g/cm^3, hardness of between 29-120 HV, compressive strength of between 5-67 MPa and compressive Young's modulus of between 30-61 MPa, in ordered. Finally, the scanning electron microscope resulted that all specimens have a lot of pores and pore sizes about 5-30 micron.

Department INDUSTRIAL ENGINEERING Student's signature .....

Concentration INDUSTRIAL ENGINEERING Advisor's signature .....

Academic year 2001 Co-advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องมาจากความเมตตา กรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภชัย วงศ์พิเชษฐชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อแนะนำ ความคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ยิ่ง ตลอดระยะเวลาของการทำ วิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก และ รองศาสตราจารย์ จันทนา จันทโร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทบวงมหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ วิศิษฏ์ โล้เจริญรัตน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ได้แก่ เจ้าหน้าที่ช่าง และเจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งเป็นที่ยึดมั่น เคารพ บูชาตลอดมา และขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 5

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 5

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 6

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 เซรามิกซ์ทางการแพทย์ 8

2.2 ลูกตาเทียม 11

2.3 สารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 12

2.3.1 การสังเคราะห์จากกระดูกวัวควาย (Bovine Bone) 14

2.3.2 การสังเคราะห์จากซากสิ่งมีชีวิตในทะเล (Carbonate Skeleton) 14

2.3.3 การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Process) 16

2.4 วัสดุรูพรุน 19

2.4.1 การขึ้นรูปวัสดุรูพรุน 19

2.4.2 อิทธิพลของความพรุนต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ 23

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24

3 วิธีการดำเนินการทดลอง 31

3.1 การสังเคราะห์สารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 32

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3.1.2 วิธีการสังเคราะห์สารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 33

3.2 การเตรียมชิ้นงานและการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง 35

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 35

3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ 36

3.2.3 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง 39

3.2.4 การเผาชิ้นงานตัวอย่าง 42

3.3 การตรวจสอบสมบัติของผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์สังเคราะห์ 44

3.3.1 การตรวจสอบลักษณะเฟส 44

3.3.2 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค 44

3.3.3 การศึกษาลักษณะรูปทรง 44

3.4 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุสร้างความพรุน 45

3.4.1 การเลือกวัสดุสร้างความพรุนสำหรับการขึ้นรูป 45

3.4.2 การศึกษาอุณหภูมิที่วัสดุสร้างความพรุนสลายตัว 46

3.4.3 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงแป้ง 46

3.4.4 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุสร้างความพรุน 46

3.5 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานตัวอย่าง 47

3.5.1 เปอร์เซ็นต์ความพรุน (% Porosity) 47

3.5.2 ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) 48

3.5.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น (% Linear Shrinkage) 48

3.5.4 ความแข็งของวัสดุ (Hardness) 49

3.5.5 ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ (Compressive Strength) และ โมดูลัสของยังภายใต้แรงกด (Compressive Young's Modulus) 49

3.5.6 ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงาน 50

4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ 53

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์สังเคราะห์ 54

4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะเฟส 54

4.1.2 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาค 54

4.1.3 ผลการตรวจสอบลักษณะรูปทรง 54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของวัสดุสร้างความพรุน 58
4.2.1 ผลการเลือกวัสดุสร้างความพรุนสำหรับการขึ้นรูป 58
4.2.2 ผลการตรวจสอบอุณหภูมิที่วัสดุสร้างความพรุนสลายตัว 58
4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงแป้ง 58
4.2.4 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของวัสดุสร้างความพรุน 59
4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานตัวอย่าง 62
4.3.1 เปอร์เซ็นต์ความพรุน (% Porosity) 62
4.3.2 ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) 71
4.3.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น (% Linear Shrinkage) 80
4.3.4 ความแข็งของวัสดุ (Hardness) 89
4.3.5 ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ (Compressive Strength) และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกด (Compressive Young's Modulus) 98
4.3.6 ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงาน 109
5 วิจารณ์ผลการทดลอง 131
5.1 เปอร์เซ็นต์ความพรุน 131
5.2 ความหนาแน่นบัลค์ 134
5.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น 135
5.4 ความแข็งของวัสดุ 136
5.5 ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกด 138
5.6 ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงาน 140
6 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 141
6.1 สรุปผลการทดลอง 141
6.1.1 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ 141
6.1.2 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง 142
6.1.3 ผลกระทบของความพรุนต่อสมบัติของชิ้นงาน 144
6.2 ข้อเสนอแนะ 144
รายการอ้างอิง 146
ภาคผนวก 148

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

ภาคผนวก – ก ข้อมูลผลการทดลองสมบัติทางกายภาพ และทางกล 149

ภาคผนวก – ข ตัวอย่างการคำนวณ 169

ภาคผนวก – ค มาตรฐาน XRD ของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 172

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 174

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 ประเภทของปฏิกิริยาการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ปลูกฝัง 8

3.1 ส่วนผสมของสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์สารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 10 กรัม 34

3.2 ส่วนผสมทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ 37

3.3 ส่วนผสมทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง 40

4.1 ผลการตรวจสอบการกระจายของอนุภาคของผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์สังเคราะห์ 56

4.2 บันทึกลักษณะของวัสดุสร้างความพรุนที่อุณหภูมิระดับต่างๆ 59

4.3 ผลการตรวจสอบการกระจายของขนาดอนุภาคผงแป้งข้าวจ้าว 60

4.4 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ด้วยแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 64

4.5 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ 65

4.6 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 69

4.7 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ 70

4.8 ข้อมูลค่าความหนาแน่นบัลค์ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ด้วยแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 73

4.9 ข้อมูลค่าความหนาแน่นบัลค์ของไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ 74

4.10 ข้อมูลค่าความหนาแน่นบัลค์ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 78

4.11 ข้อมูลค่าความหนาแน่นบัลค์ของไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ 79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

4.12 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ด้วยแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 82

4.13 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ 83

4.14 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้งที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 87

4.15 ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ 88

4.16 ข้อมูลค่าความแข็งของวัสดุของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ด้วยแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 91

4.17 ข้อมูลความแข็งของวัสดุของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ 92

4.18 ข้อมูลค่าความแข็งของวัสดุของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 96

4.19 ข้อมูลค่าความแข็งของวัสดุของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ 97

4.20 ข้อมูลค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ด้วยแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 101

4.21 ข้อมูลค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

4.22 ข้อมูลค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการเผาซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 107

4.23 ข้อมูลค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 108

5.1 เปรียบเทียบข้อมูลผลการทดลองกับการสำรวจงานวิจัย 133

6.1 สรุปผลกระทบจากปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 143

สารบัญภาพ

ภาพ หน้า

1.1 ภาพแสดงลูกตาเทียม cHA ชนิดมีรูพรุนของนายแพทย์ Arthur C. Perry หลังผ่าตัดฝัง 6 เดือน เพื่อเจาะรู และเตรียมใส่ตาปลอมครอบชนิดมีก้านเสียบ 4

2.1 เปรียบเทียบความหนาของชั้นเนื้อเยื่อที่เกิดปฏิกิริยาทางชีวะบริเวณระหว่างผิววัสดุกับกระดูก 10

2.2 ระดับปฏิกิริยาทางชีวะของเซรามิกซ์ทางการแพทย์ประเภทต่างๆ 10

2.3 ภาพแสดงโครงสร้างอะตอมของผลึกสารคล้ายกระดูกไฮดรอกซี่อะพาไทต์ 13

2.4 แผนผังแสดงการสังเคราะห์สารไฮดรอกซี่อะพาไทต์จากกระดูกวัวควาย 15

2.5 กรรมวิธีการอัดผงขึ้นรูปแบบ Uniaxial 21

2.6 กลไกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผงขณะทำการเผา 21

3.1 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ 38

3.2 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง 41

3.3 แสดงอัตราการให้ความร้อนในการเผาซินเทอร์ชิ้นงานตัวอย่าง 43

3.4 เตาไฟฟ้า ของบริษัท Carbolite รุ่น STF16/75/450 51

3.5 เครื่องทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness Tester) ของบริษัท ZWICK 51

3.6 เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine) ของบริษัท Hounsfield รุ่น H10K- C 52

4.1 แสดงรูปแบบเฟส XRD ของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองเทียบกับสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์มาตรฐาน 55

4.2 แสดงรูปแบบเฟส XRD ของสารไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลอง 55

4.3 การกระจายของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์สังเคราะห์ 56

4.4 ภาพถ่าย SEM ของผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์สังเคราะห์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า 57

4.5 ภาพถ่าย SEM ของผงไฮดรอกซี่อะพาไทต์สังเคราะห์ ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า 57

4.6 การกระจายของขนาดอนุภาคของผงแป้งข้าวจ้าว 60

4.7 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างของฟองน้ำ ที่กำลังขยาย 50 เท่า 61

4.8 ภาพถ่าย SEM ของผงแป้งข้าวจ้าว ที่กำลังขยาย 50 เท่า 61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

4.9 ผลของ ปริมาณฟองน้ำ ที่มีต่อ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ แรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 63

4.10 ผลของ แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้เผาชิ้นงาน ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 63

4.11 ผลของ แรงกดที่ใช้ขึ้นรูป ที่มีต่อ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1% ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 68

4.12 ผลของเปอร์เซ็นต์แป้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกดขึ้นรูป 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 68

4.13 ผลของ ปริมาณฟองน้ำ ที่มีต่อ ความหนาแน่นบัลค์ ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ แรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 72

4.14 ผลของ แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อความหนาแน่นบัลค์ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 72

4.15 ผลของ แรงกดที่ใช้ขึ้นรูป ที่มีต่อความหนาแน่นบัลค์ ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1% ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 77

4.16 ผลของ เปอร์เซ็นต์แป้ง และอุณหภูมิซินเทอร์ ที่มีต่อ ความหนาแน่นบัลค์ ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกดขึ้นรูป 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 77

4.17 ผลของ ปริมาณฟองน้ำ ที่มีต่อ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ แรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

4.18 ผลของ แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิซินเทอร์ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 81

4.19 ผลของ แรงกดที่ใช้ขึ้นรูป ที่มีต่อ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1% ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 86

4.20 ผลของ เปอร์เซ็นต์แป้ง และอุณหภูมิซินเทอร์ ที่มีต่อ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกดขึ้นรูป 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 86

4.21 ผลของ ปริมาณฟองน้ำ ที่มีต่อ ความแข็งของวัสดุ ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ แรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 90

4.22 ผลของ แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ ความแข็งของวัสดุของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 90

4.23 ผลของ แรงกดที่ใช้ขึ้นรูป ที่มีต่อ ความแข็งของวัสดุ ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1% ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 95

4.24 ผลของ เปอร์เซ็นต์แป้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ ความแข็งของวัสดุ ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกดขึ้นรูป 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 95

4.25 ผลของ ปริมาณฟองน้ำ ที่มีต่อ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ แรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 99

4.26 ผลของ ปริมาณฟองน้ำ ที่มีต่อ โมดูลัสของยังภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ แรงกด 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

4.27 ผลของ แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 100

4.28 ผลของ แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ ค่าโมดูลัสของยังภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ ที่มีส่วนผสมของปริมาณฟองน้ำ 0.15 กรัม ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 100

4.29 ผลของ แรงกดที่ใช้ขึ้นรูป ที่มีต่อ ความแข็งแรงภายใต้แรงกด ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1% ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 105

4.30 ผลของ แรงกดที่ใช้ขึ้นรูป ที่มีต่อ โมดูลัสของยังภายใต้แรงกด ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่เปอร์เซ็นต์แป้ง 1% ภายหลังการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 105

4.31 ผลของเปอร์เซ็นต์แป้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกดขึ้นรูป 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 106

4.32 ผลของเปอร์เซ็นต์แป้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้ง ที่ระดับแรงกดขึ้นรูป 2 MPa ภายหลังการเผาซินเทอร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 106

4.33 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.20 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า 110

4.34 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.20 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 110

4.35 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.20 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

4.36 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 8 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า 112

4.37 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 8 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 112

4.38 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 8 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 113

4.39 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า 114

4.40 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 114

4.41 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 115

4.42 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า 116

4.43 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 116

4.44 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

4.45 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า 118

4.46 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 118

4.47 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ฟองน้ำ ปริมาณ 0.15 กรัม ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 119

4.48 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 10 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำสังขยาย 200 เท่า 121

4.49 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง ลัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 10 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 121

4.50 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 10 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 122

4.51 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า 123

4.52 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า 123

4.53 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 124

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

4.54 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 125

4.55 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 125

4.56 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า..... 126

4.57 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 127

4.58 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 127

4.59 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า..... 128

4.60 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 129

4.61 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 129

4.62 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นงานไฮดรอกซี่อะพาไทต์ ที่ขึ้นรูปด้วย วิธีการใช้ผงแป้ง สัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แรงกดขึ้นรูป 2 MPa และ เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า..... 130