

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



248261

ผลของสัณฐานวิทยาของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ขนาดนาโนต่อ
สมบัติของเซรามิกไบโเฟลิกแคลเซียมฟอสเฟต

พันธุ์ระวี ศรีประภา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พฤษภาคม 2554

600253212

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



248261

ผลของสัณฐานวิทยาของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ขนาดนาโนต่อ
สมบัติของเซรามิกไบโफลิกแคลเซียมฟอสเฟต



พันธุ์ระวี ศรีประภา

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง

ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พฤษภาคม 2554

ผลของสัณฐานวิทยาของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ขนาดนาโน

ต่อสมบัติของเซรามิกไบโเฟลิกแคลเซียมฟอสเฟต

พันธุระวี ศรีประภา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
อ.ดร. อุไรวรรณ อินตะธา


.....
ผศ.ดร. กมลพรรณ เพ็งพัค


.....กรรมการ
ผศ.ดร. กมลพรรณ เพ็งพัค


.....กรรมการ
อ.ดร. สุขุม อิสเสียม

6 พฤษภาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เพราะความกรุณาจาก ผศ.ดร. กมลพรรณ เพ็งพัก ที่ให้โอกาสในการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ แนะนำทักษะในการค้นคว้าวิจัย การทำงานและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ FE-SEM และ FTIR และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์เครื่องมือ XRD

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยคณะทันตะแพทยศาสตร์ ในความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบสมบัติทางกล

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ บ้านหลังน้อยๆ ที่ให้ความอบอุ่นและความสุขเสมอตลอดระยะเวลา 6 ปี

ขอขอบคุณพี่ๆน้องๆและอาจารย์ที่น่ารักเกือบทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ที่ทำให้มีความผ่อนคลายให้การเรียนรู้ปริญญาโทและทำงานวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน โอน แอม อู๋ย เจนและเพื่อนๆพี่ๆที่เรียนด้วยกัน คอยแบ่งปันความรู้และคอยสอบถามความสุขทุกข์เสมอมาตลอดระยะเวลา 2 ปี

ขอขอบคุณโรงเรียน ภ.ป.ร.ราชวิทยาลัยฯ บ้านหลังที่อบอุ่นที่สุดในชีวิตที่ทำให้ผมมีวันนี้ได้ และเพื่อนๆราชวิทย์ 36 ทุกคน เพื่อนที่แปลกและหาไม่ได้ในโลกที่ให้ความสุขและผ่อนคลายเสมอมา

ขอขอบคุณเหตุการณ์ที่เลวร้าย ไม่เอื้ออำนวย ความกดดัน และการไม่ได้รับการสนับสนุนที่ดีพอพอในบางเรื่องที่ทำให้ผมเกิดการกระตุ้นและพยายามทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องชายที่รัก ที่ช่วยสนับสนุนการศึกษามาตลอด
และให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาในที่สุด

สุดท้ายนี้หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ผู้เขียนต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่า
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจงานด้านนี้ต่อไป

พันธุ์ระวี ศรีประภา

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์

ผลของสัณฐานวิทยาของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ขนาด
นาโนต่อสมบัติของเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต

ผู้เขียน

นายพันธุ์ระวี ศรีประภา

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.กมลพรรณ เพ็งพัก

บทคัดย่อ

248261

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสัณฐานของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) ขนาดนาโน ได้แก่ สัณฐานแบบกลม แบบแท่ง และแบบเข็ม ต่อสมบัติของเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต (BCP) โดยทำการตรวจสอบค่าสมบัติต่างๆสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบสัณฐานของอนุภาค HAp ไม่ส่งผลต่อเฟสของเซรามิก BCP เมื่อผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์พบว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C ซึ่งานเซรามิก BCP เริ่มเกิดเฟสแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP) เหมือนกันทั้งหมด ในทางสมบัติทางกายภาพนั้น พฤติกรรมของเซรามิก BCP มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่สัณฐานของอนุภาค HAp ส่งผลให้ค่าต่างๆของสมบัติทางกายภาพมีค่าแตกต่างกัน ในส่วนของสมบัติทางกลนั้นกล่าวได้ว่าลักษณะมิติของสัณฐาน HAp ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเซรามิกโดยมีลักษณะแปรผันกับระยะการแตกหักของเซรามิก BCP สุดท้ายสมบัติทางเคมีโดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าที่ความหนาแน่นมากที่สุดของเซรามิก BCP แต่ละเงื่อนไขพบว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลุ่มฟังก์ชันอย่างมากโดยเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้นพบว่าหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH⁻) ของเซรามิก BCP จากสัณฐานแบบกลมหายไป ในขณะที่สัณฐานแบบแท่งและแบบเข็มกลับพบหมู่ฟังก์ชัน OH⁻ ณ บริเวณ 3500-3700 cm⁻¹ นั้นบ่งบอกถึงปริมาณสารสัมพันธ์ของ HAp ในเซรามิกได้เป็นอย่างดีนั้นเกิดกลุ่มของคาร์บอเนตไอออนมากขึ้น (CO₃²⁻) โดยจะไปรวมกับกลุ่มของ PO₄³⁻ จากผลทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าสมบัติของเซรามิก BCP ที่ดึ้นขึ้นขึ้นอยู่กับสัณฐานหรือมิติของอนุภาค HAp มากกว่าขนาด เนื่องจากว่าสัณฐานแบบแท่งนั้นเป็นรูปแบบธรรมชาติของผลึก HAp ในกระดูก

Thesis Title	Effect of Morphology of Hydroxyapatite Nanoparticles on Properties of Biphasic Calcium Phosphate Ceramics
Author	Mr. Phanrawee Sriprapha
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Kamonpan Pengpat

Abstract

248261

In this research, we study the effect of morphology of hydroxyapatite (HAp) nanoparticles (spherical, rod and needle) on properties of biphasic calcium phosphate ceramics (BCP). In XRD peak observed α -TCP phase on all BCP ceramics at 1200 °C degree so morphological of HAp was not effected to phase transition in BCP ceramics. In physical properties, All ceramics were similar direction of behavior but magnitude depended on morphological. In case mechanical properties, the elastic modulus (compressive extension) of HAp is affected to dimension of morphology more than size . Finally, the FTIR for function group we found when temperature was increased OH⁻ of BCP ceramics (by spherical shape) disappeared, while both conditions (rod and needle shape) was found OH⁻ absorption band in range 3500-3700 cm⁻¹ and increased group of CO₃²⁻ ions in B site by combined with group of PO₄³⁻ . All result of BCP ceramics depend on morphological or dimension of HAp, specially rod shape because HAp in nature bone was liked its thus size was important when compared morphological or dimension of HAp nanoparticles

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ธ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 บทนำเกี่ยวกับเซรามิกชีวภาพ (Introduction of bioceramics)	4
2.2 แคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate)	7
2.3 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite)	13
2.4 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Tricalcium phosphate)	27
2.5 ไบเฟสิกแคลเซียมฟอสเฟต (Biphasic calcium phosphate)	29
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	41
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	42

3.3 การเตรียมผงเซรามิก	42
3.3.1 การเตรียมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	42
3.3.2 การเตรียมผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	46
3.3.3 การเตรียมผงไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	49
3.4 การเตรียมชิ้นงานเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	50
3.4.1 การเตรียมชิ้นงานเซรามิกแบบเหรียญ (Pellet shape)	52
3.4.2 การเตรียมชิ้นงานเซรามิกแบบแท่ง (Pellet shape)	52
3.4.3 การเตรียมชิ้นงานเซรามิกแบบบาร์ (Rectangular shape)	52
3.5 การวิเคราะห์ผงเซรามิก	54
3.5.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	54
3.5.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)	56
3.5.3 การตรวจสอบฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค ฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)	57
3.6 การวิเคราะห์ชิ้นงานเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	61
3.6.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)	61
3.6.1.1 ความหนาแน่น (Density)	61
3.6.1.2 ความพรุน (Porosity)	62
3.6.1.3 การหดตัวหลังเผา (Shrinkage)	63

3.6.1.4 ปริมาณน้ำหนัที่สูญเสีห้หลังการเผา (Weight loss)	63
3.6.2 การตรวจสอบสมบัติทางกล (Mechanical properties)	63
3.6.2.1 ความแข็งแรงต่อการกดอัด (Compressive strength)	64
3.6.2.2 ความแข็งแรงต่อการดัดงอแบบสามจุด (3-point bending)	67
3.6.2.3 ความแข็งแบบวิสเกอร์ (Vickers hardness)	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	73
4.1 การตรวจสอบผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	73
4.1.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	73
4.1.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM)	78
4.1.3 การเลือกผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	83
4.1.4 การตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Particles distribute analysis	84
4.1.5 การตรวจสอบกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)	87
4.2 การตรวจสอบผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	89
4.2.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	89
4.2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM)	90

4.2.3 การตรวจสอบกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค	91
ฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)	
4.3 การตรวจสอบผงไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	92
4.3.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	92
4.3.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วย	94
กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM)	
4.3.3 การตรวจสอบกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค	96
ฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)	
4.4 การตรวจสอบชิ้นงานเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	97
4.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)	97
4.4.1.1 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	97
4.4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย	103
กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM)	
4.4.1.3 ความหนาแน่น (Density)	109
4.4.1.4 การหดตัวเชิงเส้น (Shrinkage)	110
4.4.1.5 ปริมาณน้ำหนัที่สูญเสียหลังการเผา (Weight loss)	112
4.4.2 การตรวจสอบสมบัติทางกล (Mechanical properties)	114
4.4.2.1 ความแข็งแรงต่อการกดอัด (Compressive strength test)	114

4.4.2.2 ความค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอแบบสามจุด (3-point bending test)	120
4.4.2.3 ความค่าความแข็งแบบวิสเกอร์ (Vickers hardness)	124
4.4.3 การตรวจสอบสมบัติทางเคมี (Chemical properties)	129
4.4.3.1 การตรวจสอบกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค ฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)	129
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	132
5.1 สรุปผลการทดลอง	132
5.2 ข้อเสนอแนะ	133
เอกสารอ้างอิง	134
ประวัติผู้เขียน	136

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติของเซรามิกชีวภาพในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับการฝัง	6
2.2 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบเฟสต่างๆ	9
2.3 ความสามารถในการละลายและค่า pH ที่เสถียรของ แคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบเฟสต่างๆ	10
2.4 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมฟอสเฟต	12
2.5 องค์ประกอบและสมบัติเชิงกายภาพขอ AP ของสารเคลือบ กระดูก/ฟัน (enamel) ฟัน (dentine) และกระดูก (bone)	14
2.6 เทคนิคการเตรียม HAp ด้วยกระบวนการต่างๆ	17
2.7 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ HAp	22
2.8 ค่าตัวแปรทางเคมีที่ใช้สังเคราะห์ผง BCP	33
2.9 อัตราส่วนเฟส HAp และ TCP ที่เกิดขึ้นทั้งหมดใน BCP เมื่อทำการให้ความร้อนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	37
2.10 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของเฟสผสมระหว่าง HAp และ β -TCP หลังจากผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1050 °C	38
2.11 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค ICP ของ HAp, TCP บริสุทธิ์ และ BCP เซรามิกบางเงื่อนไขที่ให้อุณหภูมิ 1050 °C	40

3.1 รายละเอียดของสารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.2 แสดงอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	42
4.1 แสดงขนาดของผง HAp เตรียมโดยวิธีตกตะกอน โดย ทำการควบคุมค่า pH และอุณหภูมิ	83
4.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของอนุภาค HAp ระหว่างการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค และ FE-SEM	85
4.3 แสดงแถบการดูดกลืน FTIR ของหมู่ฟังก์ชันเคมีของผง HAp	88
4.4 แสดงขนาดเกรนของชิ้นงานเซรามิก BCP	108
4.5 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิก BCP ที่เงื่อนไขต่างๆ	110
4.6 แสดงค่าการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานเซรามิก BCP ที่เงื่อนไขต่างๆ	112
4.7 แสดงค่าค่าน้ำหนักชิ้นงานเซรามิก BCP ที่ลดลงที่เงื่อนไขต่างๆ	113
4.8 แสดงค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของชิ้นงานเซรามิก BCP	119
4.9 แสดงค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอแบบสามจุดของชิ้นงานเซรามิก BCP	123
4.10 แสดงค่าความแข็งแรงแบบวิสโกสของเซรามิก BCP	128

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 รูปแบบ XRD ของสารเคลือบกระดูก/ฟัน, ฟัน และกระดูก	15
2.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-H}_2\text{O}$ ภายใต้อุณหภูมิ 600 °C และความดัน 2 kbar	18
2.3 รูปถ่าย TEM ของ HAp สังเคราะห์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C ณ ความดัน 2 MPa	19
2.4 โครงสร้างระดับอะตอมของ HAp โดยโปรเจกเตอร์ลงไปยังระนาบของแกน c	20
2.5 รูปแบบ XRD ของผง HAp เตรียมโดยวิธีการทางเคมีและไฮโดรเทอร์มอล (a) เตรียมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง (b) เตรียมที่อุณหภูมิ 100 °C ณ ความดัน 0.1 MPa (c) เตรียมที่อุณหภูมิ 150 °C ณ ความดัน 0.5 MPa (d) เตรียมที่อุณหภูมิ 200 °C ณ ความดัน 2 MPa	21
2.6 โครงสร้างผลึกของ HAp แบบ 3 มิติ	23
2.7 แสดงรูปแบบจำลองการพ่นเคลือบด้วยพลาสมา (plasma spraying)	23
2.8 ภาพถ่าย SEM แสดงสัญญาณวิทยาของการเกิดผลึก HAp บนแก้วชีวภาพ (bioglass)	24
2.9 รูปแบบ XRD ของ (a) HAp (b) HAp หลังจากทำการเคลือบลงไปบนชิ้นงานโลหะ หลังจากทำการเคลือบลงไปบนชิ้นงานโลหะ	25
2.10 การสลายตัวของ ACP, α -TCP, β -TCP และ HAp	26
2.11 การสังเคราะห์ผง BCP ที่ 20-50wt% HAp	31

2.12 การสังเคราะห์ผง BCP ที่ 60-90wt% HAp	32
2.13 รูปแบบ XRD ของผง BCP ที่อัตราส่วน 20%HAp : 80%TCP ที่ผ่านการเผาซินเตอร์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อ (1) β -TCP [ICDD File Card No. 9-169] (2) HAp [ICDD File Card No. 9-432] (3) α -TCP [ICDD File Card No. 9-348]	34
2.14 รูปแบบ XRD ของผง BCP ที่อัตราส่วน 40%HAp : 60%TCP ที่ผ่าน การเผาซินเตอร์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อ (1) β -TCP [ICDD File Card No. 9-169] (2) HAp [ICDD File Card No. 9-432] (3) α -TCP [ICDD File Card No. 9-348]	35
2.15 รูปแบบ XRD ของผง BCP ที่อัตราส่วน 60%HAp : 40%TCP ที่ผ่าน การเผาซินเตอร์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อ (1) β -TCP [ICDD File Card No. 9-169] (2) HAp [ICDD File Card No. 9-432] (3) α -TCP [ICDD File Card No. 9-3	36
2.16 ภาพถ่าย SEM ของ BCP ที่อัตราส่วน 20%HAp + 80%TCP (A) เผาซินเตอร์ 1100 °C 5 ชั่วโมง (B) เผาซินเตอร์ 1300 °C 5 ชั่วโมง	39
3.1 แผนผังการเผาไล่สารละลายตกค้างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	43
3.2 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	44
3.3 เครื่องหยดสาร รุ่น Eyela MP-3	45
3.4 เตาเผาสาร รุ่น Thermolyne Type 4610	45
3.5 แผนผังการเผาแคลไซน์ผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	46
3.6 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	47
3.7 เครื่องบดย่อยด้วยลูกบอล	48
3.8 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมผงไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	49
3.9 แผนผังการเผาซินเตอร์ของชิ้นงานเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	50

3.10 แผนผังการเตรียมชิ้นงานเซรามิกไบเฟล็กแคลเซียมฟอสเฟต	51
3.11 โมลชิ้นรูปชิ้นงานเซรามิกแบบเหรียญ	52
3.12 โมลชิ้นรูปชิ้นงานเซรามิกแบบแท่งและบาร์	53
3.13 ขนาดชิ้นงานเซรามิก BCP แบบแท่งและบาร์	53
3.14 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)	55
3.15 กล้อง Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)	56
3.16 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีที่ตอบสนองต่อ IR รูปแบบต่างๆ	59
3.17 แสดงแผนภาพหลักการทำงานของ FTIR	59
3.18 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometers (FTIR)	60
3.19 เครื่องวัดความหนาแน่น (Archimedes method)	62
3.20 พฤติกรรมของชิ้นงานที่ได้รับแรงสำหรับการทดสอบความแข็งแรงต่อการกดอัด	65
3.21 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแสดงเส้นทางสำหรับการผิรูรูปแบบยืดหยุ่น	65
3.22 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแสดงพฤติกรรมผิรูรูปแบบถาวร	66
3.23 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)	67
3.24 ลักษณะการแตกแบบเปราะและการกดอัดของเซรามิก	68
3.25 การทดสอบความแข็งแรงต่อการคดงอ (MOR)	68
3.26 ชุดทดสอบสำหรับความแข็งแรงต่อการคดงอ (3-Point Bending Test)	69
3.27 หลักการทำงานของทดสอบความแข็งแรงแบบวิสเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E 92	71

3.28 ลักษณะรอยห้วกดแบบต่างๆจากการทดสอบความแข็งแบบวิสเกอร์	72
(a) รอยกดแบบสมบูรณ์ (ideal indentation) (b) รอยกดลักษณะบุ๋มลงไป (sink-in indentation) (c) รอยกดลักษณะซ้อนกันขึ้นไป (pile-up indentation) (d) รอยกดสี่เหลี่ยมรูว่าว (kite-shaped indentation)	
3.29 เครื่องวัดค่าความความแข็งแบบวิสเกอร์ (Vickers Hardness Tester)	72
4.1 รูปแบบ XRD แสดงเฟสที่เกิดขึ้นจากการเตรียม HAp ที่ค่า pH 8 อุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90 °C	74
4.2 รูปแบบ XRD แสดงเฟสที่เกิดขึ้นจากการเตรียม HAp ที่ค่า pH 9 อุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90 °C	75
4.3 รูปแบบ XRD แสดงเฟสที่เกิดขึ้นจากการเตรียม HAp ที่ค่า pH 10 อุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90 °C	76
4.4 รูปแบบ XRD แสดงเฟสที่เกิดขึ้นจากการเตรียม HAp ที่ค่า pH 11 อุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90 °C	77
4.5 ภาพถ่าย FE-SEM ของ HAp เตรียมที่ค่า pH 8 ที่อุณหภูมิ (A) 30 °C (B) 50 °C (C) 70 °C และ (D) 90 °C	79
4.6 ภาพถ่าย FE-SEM ของ HAp เตรียมที่ค่า pH 9 ที่อุณหภูมิ (A) 30 °C (B) 50 °C (C) 70 °C และ (D) 90 °C	80
4.7 ภาพถ่าย FE-SEM ของ HAp เตรียมที่ค่า pH 10 ที่อุณหภูมิ (A) 30 °C (B) 50 °C (C) 70 °C และ (D) 90 °C	81
4.8 ภาพถ่าย FE-SEM ของ HAp เตรียมที่ค่า pH 11 ที่อุณหภูมิ (A) 30 °C (B) 50 °C (C) 70 °C และ (D) 90 °C	80
4.9 รูปแบบ XRD ของผง HAp ที่มีค่าความเป็นผลึกสูงที่สุดในแต่ละสัณฐาน	84

4.10 การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของ HAp เตรียมที่ pH 10 อุณหภูมิ 90 °C	85
4.11 การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของ HAp เตรียมที่ pH 11 อุณหภูมิ 30 °C	86
4.12 การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของ HAp เตรียมที่ pH 11 อุณหภูมิ 90 °C	86
4.13 การเปรียบเทียบกระจายตัวและขนาดอนุภาค HAp	87
4.14 แถบการดูดกลืน FTIR ของผง HAp เตรียมด้วยกระบวนการตกตะกอน (A) pH 10-90 °C [needle] (B) pH 11-30 °C [spherical] และ (C) pH 11-90 °C [rod]	88
4.15 รูปแบบ XRD แสดงเฟสของ β -TCP ที่เตรียมได้จากวิธีการบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	89
4.16 ภาพถ่าย FE-SEM แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาค β -TCP ที่เตรียมได้วิธีการบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	90
4.17 แถบการดูดกลืน FTIR ของผง β -TCP เตรียมจากกระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	91
4.18 รูปแบบ XRD แสดงเฟสของ HAp และ β -TCP ที่ปรากฏในผงเซรามิก BCP ที่เตรียมจากกระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	93
4.19 ภาพถ่าย FE-SEM ของผง BCP เซรามิกกำลังขยาย 2000 เท่า แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอนุภาค HAp (อนุภาคขนาดเล็ก) และอนุภาค β -TCP (อนุภาคขนาดใหญ่) โดย (A) pH 10-90 °C (B) pH 11-30 °C (C) pH 11-90 °C	94
รูป 4.20 แถบการดูดกลืน FTIR ของผง BCP (A) pH 11-30 °C [spherical] (B) pH 11-90 °C [rod] และ (C) pH 10-90 °C [needle]	95
4.21 ภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพของเซรามิก BCP ที่ผ่านการเผาซินเตอร์	98
4.22 รูปแบบ XRD ของ α -TCP	99

4.23 รูปแบบ XRD ของเซรามิก BCP ที่เงื่อนไขการเตรียม 10-90 °C ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1200, 1250 และ 1300 °C เมื่อ (H) HAp (B) β -TCP (A) α -TCP	100
4.24 รูปแบบ XRD ของเซรามิก BCP ที่เงื่อนไขการเตรียม 11-30 °C ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1200, 1250 และ 1300 °C เมื่อ (H) HAp (B) β -TCP (A) α -TCP	101
4.25 รูปแบบ XRD ของเซรามิก BCP ที่เงื่อนไขการเตรียม 11-90 °C ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1200, 1250 และ 1300 °C เมื่อ (H) HAp (B) β -TCP (A) α -TCP	102
4.26 ภาพถ่าย FE-SEM โครงสร้างจุลภาคของของขึ้นงานเซรามิก BCP เตรียมที่ค่า pH 10-90 °C หลังจากผ่านการกัด้วยความร้อน (A) 1100 °C (B) 1150 °C (C) 1200 °C (D) 1250 °C และ(E) 1300 °C	105
4.27 ภาพถ่าย FE-SEM โครงสร้างจุลภาคของของขึ้นงานเซรามิก BCP เตรียมที่ค่า pH 11-30 °C หลังจากผ่านการกัด้วยความร้อน (A) 1100 °C (B) 1150 °C (C) 1200 °C (D) 1250 °C และ(E) 1300 °C	106
4.28 ภาพถ่าย FE-SEM โครงสร้างจุลภาคของของขึ้นงานเซรามิก BCP เตรียมที่ค่า pH 11-90 °C หลังจากผ่านการกัด้วยความร้อน (A) 1100 °C (B) 1150 °C (C) 1200 °C (D) 1250 °C และ(E) 1300 °C	107
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนและอุณหภูมิของเซรามิก BCP	108
4.30 ค่าความหนาแน่นของของเซรามิก BCP	109
4.31 ค่าการหดตัวเชิงเส้นของของเซรามิก BCP	111
4.32 ค่าน้ำหนักขึ้นงานเซรามิก BCP ที่ลดลง	113

4.33 ตัวอย่างชิ้นงานเซรามิก BCP สำหรับทดสอบความแข็งแรงต่อการกดอัด	115
4.34 กราฟแสดงพฤติกรรมความแข็งแรงต่อการกดอัดของเซรามิก BCP	115
4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของเซรามิก BCP	116
4.36 กราฟแสดงพฤติกรรมความแข็งแรงต่อการกดอัดและระยะการแตกหักของเซรามิก BCP	117
4.37 รอยแตกของชิ้นงานเซรามิก BCP (A) Spherical (B) Rod (C) Needle กำลังขยาย 10000 เท่า (D) Spherical (E) Rod (F) Needle กำลังขยาย 1000 เท่า	118
4.38 ตัวอย่างชิ้นงานเซรามิก BCP สำหรับทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดงอแบบสามจุด	120
4.39 กราฟแสดงแรงกดต่อระยะการยุบของเซรามิก BCP	121
4.40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอแบบสามจุดของเซรามิก BCP	121
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะการแตกหักของเซรามิก BCP	122
4.42 รอยหักคแบบวิสเกอร์บนชิ้นงานเซรามิก BCP เตรียมที่ค่า pH 10-90 °C (A) 1100°C (B) 1150°C (C) 1200°C (D) 1250°C และ (E) 1300°C	125
4.43 รอยหักคแบบวิสเกอร์บนชิ้นงานเซรามิก BCP เตรียมที่ค่า pH 11-30 °C (A) 1100°C (B) 1150°C (C) 1200°C (D) 1250°C และ (E) 1300°C	126
4.44 รอยหักคแบบวิสเกอร์บนชิ้นงานเซรามิก BCP เตรียมที่ค่า pH 11-90 °C (A) 1100°C (B) 1150°C (C) 1200°C (D) 1250°C และ (E) 1300°C	127
4.45 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงแบบวิสเกอร์กับอุณหภูมิเผาขึ้นเตอร์ของเซรามิก BCP	128
4.46 แถบการดูดกลืน FTIR ของชิ้นงานเซรามิก BCP (A) pH 11-30 °C [spherical] (B) pH 11-90 °C [rod] และ (C) pH 10-90 °C [needle]	130

อักษรย่อและสัญลักษณ์

HAp	Hydroxyapatite
β -TCP	Beta-Tricalcium Phosphate or Beta-Whitlockite
α -TCP	Alpha-Tricalcium Phosphate
BCP	Biphasic Calcium Phosphate
AP	Apatite
CDHA	Ca-Deficient Apatite
ACP	Amorphous Calcium Phosphate
Ca : P	Calcium Phosphate ratio
XRD	X-ray Diffraction
FE-SEM	Field-Emission Scanning Electron Microscopy
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
JCPDS	Joint Committee for Powder Diffraction Standards