



209117



การเตรียมและการศึกษาลมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

ที่มีซิลิกอนในโครงร่างและพอลิคาโพรแลคโตน

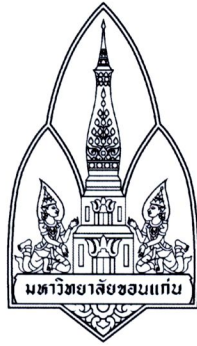
PREPARATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
SILICON-SUBSTITUTED HYDROXYAPATITE/  
POLYCAPROLACTONE COMPOSITES

นางสาวมาศกร ไทวันนัง

วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2554



การเตรียมและการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์  
ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างและพอลิคาโพรแลคโตน

PREPARATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
SILICON-SUBSTITUTED HYDROXYAPATITE/  
POLYCAPROLACTONE COMPOSITES



นางสาวมาศกร โทวันนัง

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2554

การเตรียมและการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์  
ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างและพอลิคาโพรแลกโตน

นางสาวมาศกร โทวันนัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

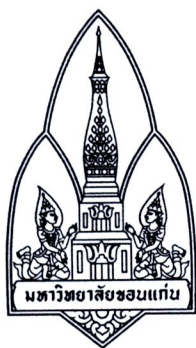
พ.ศ. 2554

**PREPARATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
SILICON-SUBSTITUTED HYDROXYAPATITE/  
POLYCAPROLACTONE COMPOSITES**

**MISS MADSAKORN TOWANNANG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN PHYSICS  
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

**2011**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

หลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ชื่อวิทยานิพนธ์: การเตรียมและการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของสาร  
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างและพอลิคาโพรเลคโตน

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นางสาวมาศกร โทวันนัง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. สมักร์ พิมานแพง

ดร. จุฑารัตน์ กลิ่นแก้วณรงค์

ดร. สุภาสินี ชีท

ผศ.ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง

ประธานกรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

.....  
(อ.ดร. สุภาสินี ชีท)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แม่นมาคย์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ แสงอรุณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

มาศกร โทวันนัง. 2554. การเตรียมและการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทด์  
ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างและพอลิคาโพรแลคโตน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ดร. สุภาสินี ชีท,

ผศ.ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง

## บทคัดย่อ

209117

งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์วัสดุผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ (hydroxyapatite: HA) และไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่มีซิลิกอนในโครงสร้าง (silicon-substituted hydroxyapatite: SiHA) ส่วนที่สองเป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA กับพอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone: PCL) หรือ HA/PCL และ SiHA/PCL และสุดท้ายได้ทำการศึกษสมบัติความต้านทานแรงกด (compressive strength)

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ สารตั้งต้นที่ใช้คือ เปลือกไข่และกรดฟอสฟอริก ฟุ่มค์ซิลิกาถูกใช้เป็นแหล่งของซิลิกอน (Si) วัสดุผง HA และ SiHA ที่ได้จากวิธีการตกตะกอน ถูกนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600, 700, 800, 900 และ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับเฟสของ HA และมีเฟสของ  $\beta$ -TCP เจือปนเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิการแคลไซน์ตั้งแต่ 900°C หรือมากกว่า จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM และ TEM พบว่าวัสดุผงที่ได้เป็นแบบพหุผลึกที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 nm ในส่วนของการสังเคราะห์ SiHA ที่เติม Si ตั้งแต่ 1-5 wt% ใน HA และวัสดุผงที่ได้จากการตกตะกอนถูกนำไปแคลไซน์ที่ 600, 700 และ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นเป็นเฟสของ HA ที่มีเฟสของ  $\beta$ -TCP และแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) ปะปน สำหรับค่าแลตทิซพารามิเตอร์  $a$  และ  $c$  ของ SiHA พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ HA บริสุทธิ์ ซึ่งให้เห็นการแทนที่ของ Si ในโครงสร้าง HA ซึ่งยืนยันการมีอยู่ของ Si โดยการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีพีกซิลิเกตเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 750  $\text{cm}^{-1}$  นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มของพีกของหมู่ฟอสเฟตทั้งหมดมีค่าลดลงทุกเงื่อนไข

สำหรับการศึกษาความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ HA/PCL หรือ SiHA/PCL เพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารตัวอย่าง HA, SiHA, HA/PCL และ SiHA/PCL ถูกเตรียมโดยเทคนิคการอัดแบบแกนเดียว (uniaxial) สารตัวอย่างที่เตรียมได้ถูกนำไปศึกษาด้วยเครื่อง universal testing machine (UTM) ภายใต้โหมดของแรงกด พบว่าสารตัวอย่างทั้งหมดมีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ในช่วง 2.1010-39.5021 MPa และค่าโมดูลัสของยังอยู่ในช่วง 42.0699-84.7220 MPa

Madsakorn Towannang. 2011. *Preparation and Mechanical Properties of Silicon-substituted Hydroxyapatite/ Polycaprolactone Composites*. Master of Science Thesis in Physics, Graduate School, Khon Kaen University.

**Thesis Advisor:** Dr. Suphasinee Seet,  
Asst. Prof. Dr. Ekaphan Swatsitang

## ABSTRACT

209117

This research is divided into three parts: the syntheses of hydroxyapatite (HA) and silicon-substituted HA (SiHA) powders, the preparations of HA/polycaprolactone (PCL) and SiHA/PCL composites, and finally a compressive strength test was conducted.

For the HA powder synthesis, egg shells and phosphoric acid were used as the starting materials. Fumed silica was used as a source of silicon. HA and SiHA powders were obtained via a chemical precipitation method and were calcined at 600, 700, 800, 900 and 1000°C for 2 hours. From XRD study, it was found that all the peaks correspond to HA pure phase with a small amount of tricalcium phosphate ( $\beta$ -TCP) as a second phase when it was calcined at 900°C or higher. From SEM and TEM studies, it was found that the obtained powders were polycrystalline, spherical in shape and less than 100 nm in diameter. In case of SiHA synthesis, Si was added at 1-5 wt% of HA and the precipitated powder were calcined at 600, 700 and 800°C for 4 hours. The HA was found as the main phase with  $\beta$ -TCP and calcium silicate as second phases. The lattice parameters  $a$  and  $c$  of SiHA were slightly increased when compared to those of pure HA, indicating the substitution of Si into HA structure. The existence of Si was confirmed by the FTIR study, where the silicate peak was found at the wave number of 750  $\text{cm}^{-1}$ . Moreover, the intensities of all the phosphate peaks in all prepared sample were decreased.

For compressive strength study, PCL was mixed with HA or SiHA to prepare HA/PCL or SiHA/PCL composites in order to improve the mechanical properties. HA, SiHA, HA/PCL and SiHA/PCL samples were prepared by an uniaxial press technique. The obtained samples were subjected to the universal testing machine (UTM) under the compression mode. It was found that all the samples had a compressive strength between 2.1010-39.5021 MPa and Young's modulus between 42.0699-84.7220 MPa.

**ขอมอบส่วนดีในงานวิทยานิพนธ์นี้แด่**

**บิดา มารดา ครอบครัว และคณาจารย์**

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยในครั้งนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สุภาสินี ชีท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์จิตตั้ง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำเกี่ยวกับการศึกษาวิจัย และอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี มีความเพียร และช่วยสร้างกำลังใจที่ส่งผลให้มีความมุ่งมั่นพยายามทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ พิมานแพง และอาจารย์ ดร. จุฑารัตน์ กลิ่นแก้วณรงค์ สำหรับคำแนะนำและติชมที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สุปรีย์ พินิจสุนทร ที่เอื้อเฟื้อในการใช้เบ้าอัดเม็ด เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งแก่ศิษย์

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ TG/DTA และ FTIR

ขอขอบคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อการใช้เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่อง UTM

ขอขอบคุณสถานบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาประจำภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาเคมี และภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้ให้กำลังใจ คอยดูแลและช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณร้านน้องเนยเบเกอรี่ และร้าน โรตีสานาน ที่ให้ความอนุเคราะห์เปลือกไข่ไก่ เพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสาคร ไทวันนัง คุณแม่หนูทิพย์ ไทวันนัง และครอบครัวไทวันนังทุกคน ที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี ช่วยสนับสนุนการทำงาน รวมทั้งให้กำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด

มาศกร ไทวันนัง

สารบัญ

|                                                                                   | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                                                   | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                                                | ข    |
| คำอุทิศ                                                                           | ค    |
| กิตติกรรมประกาศ                                                                   | ง    |
| สารบัญตาราง                                                                       | ช    |
| สารบัญภาพ                                                                         | ฅ    |
| บทที่ 1 บทนำ                                                                      | 1    |
| 1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                                             | 1    |
| 1.2    วัตถุประสงค์ของการวิจัย                                                    | 2    |
| 1.3    ขอบเขตของการวิจัย                                                          | 2    |
| 1.4    สถานที่ทำการวิจัย                                                          | 3    |
| 1.5    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                  | 3    |
| 1.6    โครงสร้างของวิทยานิพนธ์                                                    | 3    |
| บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                          | 4    |
| 2.1    สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต                                                    | 4    |
| 2.2    การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารแคลเซียมฟอสเฟต                              | 5    |
| 2.3    ไฮดรอกซีอะพาไทต์                                                           | 7    |
| 2.4    พอลิเมอร์                                                                  | 12   |
| 2.5    การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์                                              | 14   |
| 2.6    การประยุกต์ใช้ HA ในทางการแพทย์และทางทันตกรรม                              | 17   |
| บทที่ 3 วิธีการวิจัย                                                              | 18   |
| 3.1    การเตรียมสารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่                                 | 18   |
| 3.2    การสังเคราะห์วัสดุผง HA โดยวิธีการตกตะกอน                                  | 19   |
| 3.3    การสังเคราะห์วัสดุผง SiHA โดยวิธีการตกตะกอน                                | 21   |
| 3.4    การเตรียมวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL                                         | 23   |
| 3.5    การเตรียมวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL                                       | 24   |
| 3.6    การศึกษาลักษณะของวัสดุผง HA และ SiHA                                       | 25   |
| 3.7    การศึกษาสมบัติเชิงกลของสาร HA, SiHA และวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL, SiHA/PCL | 29   |

สารบัญ (ต่อ)

|                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล                                     | 31   |
| 4.1 ผลการศึกษาวัสดุผงไฮดรอกซีอะพาไทต์                              | 31   |
| 4.2 ผลการศึกษาวัสดุผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีซิลิกอนในโครงสร้าง       | 45   |
| 4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน HA, SiHA, HA/PCL และ SiHA/PCL | 61   |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ                                        | 74   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง                                                 | 74   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                                                     | 75   |
| เอกสารอ้างอิง                                                      | 76   |
| ภาคผนวก                                                            | 79   |
| ประวัติผู้เขียน                                                    | 86   |

## สารบัญตาราง

|              | หน้า                                                                                                                                   |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ตารางที่ 2.1 | ประเภทของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต                                                                                                       |
| ตารางที่ 2.2 | การประยุกต์ใช้งาน HA ทางด้านการแพทย์ และทางทันตกรรม                                                                                    |
| ตารางที่ 3.1 | รายละเอียดเกี่ยวกับเทคนิคในการวิเคราะห์วัสดุผง HA และ SiHA                                                                             |
| ตารางที่ 4.1 | ขนาดอนุภาค และแลตทิซพารามิเตอร์ $a$ และ $c$ ของวัสดุผง HA ที่อบแห้งและแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง                       |
| ตารางที่ 4.2 | ตำแหน่งของเลขคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ                                                                      |
| ตารางที่ 4.3 | ผลการคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบเพื่อระบุโครงสร้างเฟสที่มีภายในอนุภาค HA แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (H : Hexagonal) |
| ตารางที่ 4.4 | ขนาดอนุภาคและ แลตทิซพารามิเตอร์ $a$ และ $c$ ของวัสดุผง SiHA ที่เติม Si ตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 wt%                                 |
| ตารางที่ 4.5 | ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดและ โมดูลัสของยังของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL                                                         |
| ตารางที่ 4.6 | ผลการทดสอบความแข็งแรงกด และ โมดูลัสของยังของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL                                                         |

## สารบัญภาพ

|            |                                                                                                                                                  | หน้า |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 2.1 | ผลึกโครงสร้างของ HA                                                                                                                              | 7    |
| ภาพที่ 2.2 | ภาพตำแหน่งอะตอมโครงสร้างของ HA                                                                                                                   | 8    |
| ภาพที่ 2.3 | สมบัติเชิงกลของวัสดุ HA ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Ca/P                                                                                             | 9    |
| ภาพที่ 2.4 | ภาพถ่ายลักษณะของเซลล์บนชิ้นงานที่แช่ในสารละลาย HOBs เป็นเวลา 31 วัน                                                                              | 12   |
| ภาพที่ 2.5 | ภาพโครงสร้างอย่างง่ายของ PCL                                                                                                                     | 13   |
| ภาพที่ 2.6 | ภาพถ่าย SEM ของผลึก HA ที่เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยสารตั้งต้นที่เตรียมที่อุณหภูมิห้องมีค่า pH เป็น 10 | 15   |
| ภาพที่ 2.7 | ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผง HA                                                                                                                        | 16   |
| ภาพที่ 2.8 | รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผง HA โดย heat ที่อุณหภูมิต่างๆ                                                                              | 16   |
| ภาพที่ 3.1 | แผนภาพการเตรียมวัสดุผงแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่                                                                                             | 19   |
| ภาพที่ 3.2 | แผนภาพการสังเคราะห์วัสดุผง HA จากเปลือกไข่ โดยวิธีการตกตะกอน                                                                                     | 20   |
| ภาพที่ 3.3 | แผนภาพแสดงการสังเคราะห์วัสดุผง SiHA จากเปลือกไข่กับฟุ้งซิลิกาโดยวิธีการตกตะกอน                                                                   | 22   |
| ภาพที่ 3.4 | แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL                                                                                                     | 23   |
| ภาพที่ 3.5 | แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL                                                                                                   | 24   |
| ภาพที่ 3.6 | ลักษณะการวางชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติแรงกด                                                                                                        | 29   |
| ภาพที่ 4.1 | การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุผง HA (อบที่ 80°C) โดยใช้เทคนิค TG/DTA                                                                              | 31   |
| ภาพที่ 4.2 | รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุผง HA ที่อบ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง | 33   |
| ภาพที่ 4.3 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิการแคลไซน์ของวัสดุผง HA                                                                          | 34   |
| ภาพที่ 4.4 | อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผง HA ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง                                                              | 37   |
| ภาพที่ 4.5 | ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 30,000 เท่า ของวัสดุผง HA ที่ผ่านการแคลไซน์ตั้งแต่ 600-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง                                           | 38   |
| ภาพที่ 4.6 | ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 70,000 เท่า ของวัสดุผง HA ที่ผ่านการแคลไซน์ตั้งแต่ 600-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง                                           | 39   |
| ภาพที่ 4.7 | ภาพถ่าย TEM และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของวัสดุผง HA ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง                                 | 42   |
| ภาพที่ 4.8 | รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุผง SiHA ที่อบ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง                                                      | 47   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุผง SiHA ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง                                                                                                                                                                                                                                            | 48   |
| ภาพที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุผง SiHA ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง                                                                                                                                                                                                                                           | 49   |
| ภาพที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุผง SiHA ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง                                                                                                                                                                                                                                           | 50   |
| ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับปริมาณการเติม Si ในวัสดุผง HA ที่อบแห้ง และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง                                                                                                                                                                                                                        | 52   |
| ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแลตทิซพารามิเตอร์ $a$ และ $c$ กับปริมาณการเติม Si ในวัสดุผง HA ที่อบแห้ง และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง                                                                                                                                                                                                    | 53   |
| ภาพที่ 4.14 สเปกตรัม FTIR ของวัสดุผง HA และ SiHA ที่ยังไม่แคลไซน์ ได้แก่ HA บริสุทธิ์, Si <sub>1,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 1 wt%, Si <sub>2,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 2 wt%, Si <sub>3,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 3 wt%, Si <sub>4,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 4 wt% และ Si <sub>5,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 5 wt%                    | 55   |
| ภาพที่ 4.15 สเปกตรัม FTIR ของวัสดุผง HA และ SiHA ที่แคลไซน์ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้แก่ HA บริสุทธิ์, Si <sub>1,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 1 wt%, Si <sub>2,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 2 wt%, Si <sub>3,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 3 wt%, Si <sub>4,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 4 wt% และ Si <sub>5,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 5 wt% | 56   |
| ภาพที่ 4.16 สเปกตรัม FTIR ของวัสดุผง HA และ SiHA ที่แคลไซน์ 700°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้แก่ HA บริสุทธิ์, Si <sub>1,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 1 wt%, Si <sub>2,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 2 wt%, Si <sub>3,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 3 wt%, Si <sub>4,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 4 wt% และ Si <sub>5,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 5 wt% | 57   |
| ภาพที่ 4.17 สเปกตรัม FTIR ของวัสดุผง HA และ SiHA ที่แคลไซน์ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้แก่ HA บริสุทธิ์, Si <sub>1,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 1 wt%, Si <sub>2,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 2 wt%, Si <sub>3,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 3 wt%, Si <sub>4,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 4 wt% และ Si <sub>5,0</sub> HA คือ HA ที่เติมซิลิกอน 5 wt% | 58   |
| ภาพที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า ของวัสดุผง SiHA ที่ยังไม่ได้แคลไซน์                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 59   |
| ภาพที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20,000 เท่า ของวัสดุผง SiHA ที่เผาแคลไซน์ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง                                                                                                                                                                                                                                                                  | 60   |

สารบัญภาพ (ต่อ)

|             | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 4.20 | ผลของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL เมื่อ P40 แทน HA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน HA/PCL 4/6, P80 แทน HA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์ (HA comercial)                                              | 62 |
| ภาพที่ 4.21 | แสดงกราฟแท่งค่าความต้านทานแรงกดของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL เมื่อ P0 แทน HA/PCL เท่ากับ 10/0 wt%, P40 แทน HA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน HA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน HA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์ (HA comercial)        | 63 |
| ภาพที่ 4.22 | ผลของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL เมื่อ P40 แทน HA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน HA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน HA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์ (HA synthesis)                                  | 64 |
| ภาพที่ 4.23 | ผลของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ HA/PCL เมื่อ P0 แทน HA/PCL เท่ากับ 10/0 wt%, P40 แทน HA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน HA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน HA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์ (HA synthesis)       | 65 |
| ภาพที่ 4.24 | ผลของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL (Si 1 wt%) เมื่อ P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์                              | 67 |
| ภาพที่ 4.25 | ผลของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL (Si 1 wt%) เมื่อ P0 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 10/0 wt%, P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์ | 68 |
| ภาพที่ 4.26 | ผลของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL (Si 3 wt%) เมื่อ P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์                              | 69 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

|             | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 4.27 | ผลของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL (Si 3 wt%) เมื่อ P0 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 10/0 wt%, P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์     | 70 |
| ภาพที่ 4.28 | ผลของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL (Si 5 wt%) เมื่อ P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์                                  | 71 |
| ภาพที่ 4.29 | ผลของค่าความความต้านทานแรงกดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL (Si 5 wt%) เมื่อ P0 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 10/0 wt%, P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt%, P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt% และ P100 แทน PCL บริสุทธิ์ | 72 |
| ภาพที่ 4.30 | ผลรวมของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบของ SiHA/PCL เมื่อ P0 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 10/0 wt%, P40 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 6/4 wt%, P60 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 4/6 wt% และ P80 แทน SiHA/PCL เท่ากับ 2/8 wt%                                     | 73 |