ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249166

รหัสโครงการ SUT7-708-53-12-29

รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเซรามิกชีวภาพไฮดรอกซีแอปาไทต์–อะลูมินาด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย

(Improvement of Mechanical Properties of Hydroxyapatite-Alumina Bioceramic Composite Materials with Zirconia Particles)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

b00254319

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

249166

รหัสโครงการ SUT7-708-53-12-29

รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเซรามิกชีวภาพไฮดรอกซีแอปาไทต์–อะลูมินาด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย

(Improvement of Mechanical Properties of Hydroxyapatite-Alumina Bioceramic Composite Materials with Zirconia Particles)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553 ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณไพรัช ทองละเอียดผู้ช่วยวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล)
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

249166

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของเซอร์โคเนียที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์-อะลูมินาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์–อะลูมินา โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความแข็งแรง ความแข็ง และความเหนียว โดยใช้เซอร์โคเนียเป็นสารเติมแต่งสมบัติ เพื่อสามารถใช้งานเป็นวัสดุสำหรับทดแทนกระดูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำผงไฮดรอกซีแอปาไทต์มาบดผสมกับอะลูมินา ปริมาณร้อยละ 20-30 โดยปริมาตร และใช้เซอร์โคเนียปริมาณร้อยละ 15-25 โดยปริมาตร เป็นสารเติมแต่งส่วนผสมจะถูกอัดแห้งและทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่ต่าง ๆ วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกจะนำไปวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ความหนาแน่น วัฏภาค โครงสร้างจุลภาค รวมถึง ความแข็งแรง ความแข็ง และความเหนียว

ผลการทดสอบเชิงกลพบว่าความทนต่อการดัดโค้ง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 45.60±2.24 MPa ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ใช้อะลูมินาปริมาณร้อยละ 25+4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 20 โดยปริมาตรที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C ค่าความแข็ง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.73±0.05 GPa ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ใช้อะลูมินาปริมาณร้อยละ 30+4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C และค่าความเหนียว มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.04±0.06 $MPa.m^{0.5}$ ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ใช้อะลูมินาปริมาณร้อยละ 20+4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 25 โดยปริมาตรที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C

Abstract

249166

The purpose of this work is to study the effect of ZrO_2 on mechanical properties of HAp-Al_2O_3 based composite is to improve the flexural strength, hardness and fracture toughness properties of biocomposite materials for bone replacement . HAp powder was mixed with 20-30%vol Al_2O_3 and 15-25%vo lZrO_2 as an additive. The mixtures were dry pressed and then sintered at different temperatures. Density, phase and microstructure of sintered composites were characterized. Flexural strength, hardness and fracture toughness.

The results from mechanical tests showed that the highest flexural strength, 45.60±2.24 MPa, was obtained with 25%vol Al_2O_3+20%vol ZrO_2 addition and sintering temperature at 1500°C. The maximum hardness, 3.73±0.05 GPa, was obtained with 30%vol Al_2O_3+15%vol ZrO_2 addition and sintering temperature at 1500°C. The maximum fracture toughness, 1.04±0.06 $MPa.m^{0.5}$ was obtained with 20%vol Al_2O_3+25%vol ZrO_2 addition and sintering temperature at 1500°C.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ไฮดรอกซีแอปาไทต์ 4
2.1.1 โครงสร้างไฮดรอกซีแอปาไทต์ 4
2.1.2 องค์ประกอบของไฮดรอกซีแอปาไทต์ 5
2.1.3 การเตรียมวัสดุผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 6
2.1.3.1 การเตรียมวัสดุผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 6
2.1.3.2 การเตรียมวัสดุผงจากการตกตะกอน 8
2.1.3.3 การเตรียมวัสดุผงด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล 11
2.1.3.4 การเตรียมวัสดุผงด้วยเทคนิคโซล-เจล 12
2.1.3.5 การเตรียมวัสดุผงด้วยวิธี Pechini หรือวิธีพอลีเมอร์เชิงซ้อน 15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 อะลูมินา....................17
2.3 เซอร์โคเนีย....................18
2.4 รูปแบบเสถียรของเซอร์โคเนีย....................19
2.4.1 Partially Stabilised Zirconia....................20
2.4.2 Tetragonal Zirconia Polycrytals....................21
2.4.3 Partially Stabilised Zirconia in a non Zirconia matrix....................23
2.5 กระบวนการเกิดความเหนียวของเซอร์โคเนีย....................23
2.5.1 กระบวนการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนีย....................23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....................25
3 วิธีดำเนินการวิจัย....................32
3.1 อุปกรณ์การทดลอง....................32
3.2 วัสดุและสารเคมี....................33
3.2.1 ผงไฮดรอกซีแอปาไทต์(Hydroxyapatite Powder)....................33
3.2.2 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide Powder)....................33
3.2.3 ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide Powder)....................33
3.3 วิธีการทดลอง....................35
3.3.1 การทดลองเบื้องต้น....................35
3.3.1.1 การ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)....................35
3.3.1.2 การเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)....................36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 การทดลองในงานวิจัย 37
3.3.3 การออกแบบการทดลอง 39
3.3.4 การทดสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น 40
3.3.4.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของตัวอย่าง 40
3.3.4.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส 40
3.3.5 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง 41
3.3.6 การเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง 43
3.3.7 การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่าง 44
3.3.8 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง 45
3.3.9 การทดสอบความแข็งจุลภาค 46
3.3.10 การหาค่าความเหนียว 48
3.3.11 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 49
3.3.11.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค 49

4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 52
4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น 52
4.1.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 52
4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 53
4.1.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 54
4.1.1.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 55
4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา 56
4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงอะลูมินา 57
4.1.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา 58
4.1.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา 59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย 60

4.1.3.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงเซอร์โคเนีย 61

4.1.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเซอร์โคเนีย 62

4.1.3.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนีย 63

4.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4%โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y) 64

4.1.4.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4%โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y) 64

4.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะ และสมบัติเชิงกลของวัสดุชีวภาพเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์-อะลูมินา/เซอร์โคเนียหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 120 นาที 65

4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่น 65

4.2.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค 68

4.2.3 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาค 75

4.2.3.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชีวภาพเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C 75

4.2.3.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชีวภาพเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400°C 77

4.2.3.3 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชีวภาพเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C 79

4.2.4 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการดัดโค้งความแข็งและความเหนียว 81

5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 85

5.1 สรุปผลการวิจัย 85

5.2 ข้อเสนอแนะ 86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง..87
ประวัติผู้วิจัย..90

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของไฮดรอกซีแอปาไทต์ 5

2.2 XRD แพทเทิร์นของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์เตรียมโดยวิธีการตกตะกอน 6

2.3 XRD แพทเทิร์นของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 7

2.4 แผนภาพแสดงกลไกการเกิดวัสดุผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 9

2.5 รูปไมโครกราฟของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ ทำให้แห้งที่ $100^{\circ}C/12h$ 10

2.6 XRD แพทเทิร์นของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 10

2.7 ผลึกไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล 12

2.8 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์ด้วยวิธีโซล-เจล 14

2.9 XRD แพทเทิร์นของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ ที่ถูกทิ้งไว้ 4 h และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $700^{\circ}C$ 15

2.10 การสังเคราะห์วัสดุผงไฮดรอกซีแอปาไทต์โดยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อน 16

2.11 โครงสร้างของอะลูมินา 17

2.12 การเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนีย ณ อุณหภูมิต่าง ๆ 18

2.13 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเซอร์โคเนีย ทั้ง 3 ระบบ 19

2.14 แผนภูมิวัฏภาคของ MgO ใน ZrO_2 21

2.15 แผนภูมิวัฏภาคของ Y_2O_3 ใน ZrO_2 22

2.16 ผลของปริมาณสารสร้างความเสถียรกับขนาด Critical Grain Size 23

2.17 แสดงการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาค 24

2.18 ค่าความแข็งแรงและค่าความเหนียวของ HAp โดยการเติม Tetragonal ZrO_2 Polycrystalline (TZP) และเติม Al_2O_3 ที่ปริมาณแตกต่างกันและเปรียบเทียบกันระหว่างการผสมปกติ (Mixing) และการเคลือบ 26

2.19 ค่าความแข็งแรงและค่าความเหนียวของ HAp โดยการเติม Tetragonal ZrO_2 Polycrystalline (TZP) และเติม Al_2O_3 ที่ปริมาณแตกต่างกัน 27

2.20 ค่าความแข็งแรงของ HAp โดยการเติม ZrO_2 ในปริมาณแตกต่างกัน 28

2.21 ค่าความเหนียวของ HAp ที่มีขนาดอนุภาคของ ZrO_2 ที่แตกต่างกัน 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	แผนผังขั้นตอนการ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)	35
3.2	กราฟข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่างการเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)	36
3.3	แผนผังขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 1	37
3.4	การตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ	38
3.5	เครื่อง Particle Size Analyzer	40
3.6	เครื่อง X-ray Diffraction, XRD	41
3.7	เครื่องอัดแบบไฮโดรลิกแรงอัดขนาด 11 ตัน	43
3.8	กราฟข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง	44
3.9	การเรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด	47
3.10	ลักษณะรอยกดและความยาวรอยแตกของชิ้นงาน	49
3.11	เครื่อง Ion Sputtering Device	50
3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	50
3.13	การวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เร็ต	51
4.1	XRD แพทเทิร์น ของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์	53
4.2	รูปไมโครกราฟของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	54
4.3	การกระจายขนาดอนุภาคของไฮดรอกซีแอปาไทต์	55
4.4	XRD แพทเทิร์น ของผงอะลูมินา	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	รูปไมโครกราฟของผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	58
4.6	การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา	59
4.7	XRD แพทเทิร์น ของผงเซอร์โคเนีย	61
4.8	รูปไมโครกราฟของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	62
4.9	การกระจายขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนีย	63
4.10	XRD แพทเทิร์น ของผง 4Yเซอร์โคเนีย	64
4.11	ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	66
4.12	โครงสร้างจุลภาคแสดงรอยร้าวที่เกิดขึ้นในไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C	67
4.13	XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ1300°C	68
4.14	XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ1400°C	69
4.15	XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ1500°C	70
4.16	XRD แพทเทิร์นของชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาไทต์ร้อยละ 100 โดยปริมาตร	71
4.17	XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยอะลูมินาร้อยละ 30 โดยปริมาตรและ4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 15 โดยปริมาตร หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	72
4.18	XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยอะลูมินาร้อยละ 25 โดยปริมาตรและ4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 20 โดยปริมาตร หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.19 XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยอะลูมินาร้อยละ 20 โดยปริมาตร และ 4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 25 โดยปริมาตร หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 74
4.20 โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C 75
4.21 โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400°C 77
4.22 โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C 79
4.23 ค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ 82
4.24 ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ 83
4.25 ค่าความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ 84
4.26 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอยกดจากการทดสอบด้วยเครื่อง Microhardness Tester 85
4.27 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอยร้าวที่เกิดจากกดด้วยเครื่อง Microhardness Tester 86

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ค่าความแข็งและค่าความเหนียวของ HAp โดยการเติม ZrO_2 ในปริมาณแตกต่างกัน 28

2.2 ค่าความหนาแน่นและความแข็งแรงของ HAp ที่ wt% ของ ZrO_2 ที่แตกต่างกัน 29

2.3 ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงของ HAp ที่มีขนาดอนุภาคของ ZrO_2 ที่แตกต่างกัน 30

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 32

3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 33

3.3 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น 34

3.4 อัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น สารแต่งเติม และอุณหภูมิในการเผาผนึก
ของการทดลอง 39

4.1 ลักษณะเฉพาะของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 52

4.2 ลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา 56

4.3 ลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย 60

4.4 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง 65

4.5 ค่าความทนต่อการดัดโค้ง ความแข็งและความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ
ของแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ
ที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 120 นาที 81