ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242439

การประดิษฐ์แก้วและแก้วเซรามิกชีวรูพรุนจากระบบแก้วที่ไม่มีซิลิกา เป็นองค์ประกอบหลักเพื่อนำไปประยุกต์เป็นกระดูกเทียม

สุธาทิพย์ ทองเล่ม

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กันยายน 2553

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242439

การประดิษฐ์แก้วและแก้วเซรามิกชีวรูพรุนจากระบบแก้วที่ไม่มีซิลิกา เป็นองค์ประกอบหลักเพื่อนำไปประยุกต์เป็นกระดูกเทียม

สุธาทิพย์ ทองเล่ม

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กันยายน 2553

การประดิษฐ์แก้วและแก้วเซรามิกชีวรูพรุนจากระบบแก้วที่ไม่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักเพื่อนำไปประยุกต์เป็นกระดูกเทียม

สุธาทิพย์ ทองเล่ม

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจิจนากุล

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัด

.....กรรมการ
ดร.สุขุม อิสเสงี่ยม

.....กรรมการ
ดร.อุไรวรรณ อินต๊ะถา

20 กันยายน 2553

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนเงินทุนศึกษาวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพรรณ เพ็งพัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจิจนากุล ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และชี้แนะแนวทาง ข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุขุม อิสเสงี่ยม และ อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ อินต๊ะถา ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดี จนทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ทวี ตันฆศิริ ที่กรุณาช่วยให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยชี้แนะแนวทาง และข้อบกพร่องต่างๆ ระหว่างการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นายแพทย์สิทธิพร บุญยนิตย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความรู้เกี่ยวกับวัสดุทางชีวภาพ และ กระดูกเทียม ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณยาย และน้องสาว ที่ช่วยสนับสนุนในการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัย อิเล็กโทรเซรามิก ที่ช่วยให้คำแนะนำ และคำปรึกษาในด้านต่างๆ ตลอดงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงในข้อบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนผู้สนใจในงานด้านนี้ต่อไป

สุธาทิพย์ ทองเล่ม

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์แก้วและแก้วเซรามิกชีวรูพรุน จากระบบแก้วที่ไม่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อนำไปประยุกต์เป็นกระดูกเทียม
ผู้เขียน	นางสาวสุธาทิพย์ ทองเล่ม
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. กมลพรรณ เพ็งพัด

บทคัดย่อ

242439

งานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์แก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตเพื่อประยุกต์ใช้เป็นกระดูกเทียม โดยศึกษาการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมที่มีต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และการเปลี่ยนแปลงเฟสของแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5-CaO-Na_2O) ใน 3 อัตราส่วนด้วยกัน โดยให้ปริมาณฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5) คงที่ และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ CaO:Na_2O ชิ้นงานแก้วจะถูกเตรียมด้วยกระบวนการหลอมแบบดั้งเดิม (conventional melt quenching) ที่อุณหภูมิ 1200°C แล้วจึงนำมาศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA) จากนั้นนำผงแก้วผสมกับการบูรในอัตราส่วน 10:0 7:3 และ 5:5 (แก้ว: การบูร) แล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดสารเซรามิก เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500 550 600 และ 650°C เม็ดสารเซรามิกที่ได้จากการเผาจะถูกนำมาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าความหนาแน่น และความพรุนด้วยเทคนิคการแทนที่ของอาร์คีมิดิช (Archimedes) วิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) โครงสร้างจุลภาค รูปร่าง และความพรุนของเม็ดสารเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเอเนอร์จีดิสเพอร์ซีฟ สเปกโทรเมตรี (EDS) สมบัติเชิงกลแรงกดของเม็ดสารเซรามิกศึกษาด้วยเครื่องมือทดสอบแบบเอนกประสงค์ (UTM) ด้วยวิธีการทดสอบแบบทนแรงกด (Compressive

242439

stress) จากการทดลองพบว่า แก้วที่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์มี 2 สูตร คือ $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ และ $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ เพราะ แก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ จะให้สมบัติเชิงกลที่สูง ในขณะที่สูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ จะได้เฟสหลักคือแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) ซึ่งเป็นเฟสที่เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ และ อัตราส่วน 7:3 (แก้ว : การบูร) จะเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด เพราะ มีความพรุนที่เหมาะสมและสมบัติเชิงกลที่ดี

Thesis Title	Fabrication of Porous Bioactive Glasses and Glassceramics from Non-Silicate Based Glass System for Artificial Bone Applications
Author	Miss. Sutatip Thonglem
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Kamonpan Pengpat

242439

Abstract

This project is aimed at producing porous calcium phosphate glass ceramics for bone substituting application. Effects of calcium content on the thermal parameter, physical properties and phase formation of P_2O_5-CaO-Na_2O glass ceramics were studied. Three glass compositions with fixed P_2O_5 content of various CaO:Na_2O ratios were prepared by conventional melt quenching method at 1200°C. Thermal parameters of each glass were studied by differential thermal analysis (DTA). The prepared glass powder was mixed with camphor with 10:0, 7:3 and 5:5 of glass: camphor ratio. The mixtures were pressed into pellets and subsequently sintered at 500, 550, 600 and 650°C. After that, linear shrinkage, density and apparent porosity of glass ceramic samples were measured by Archimedes's method. Phase investigation was performed by X-ray diffraction (XRD) while microstructural, morphology and porosity of the samples were studied by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometry (EDS). Compressive stress was studied by universal testing machine in compressive mode. Suitable glasses from this system were $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ and $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$, $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ which have the highest mechanical properties. The $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ sample also processes calcium phosphate as a main phase which is

useful for biomaterials application. The 7:3 (glass : camphor) ratio gives the optimum porosity of the ceramic sample with high compressive strength.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ซ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฏ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 แก้ว (Glasses)	4
2.1.1 คำนิยามของแก้ว (Definitions of glasses)	4
2.1.2 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว (Kinetic theories of glass formation)	8
2.2 กระดูกเทียมสังเคราะห์ (Synthetic Bone Substitute Materials)	14
2.2.1 คุณสมบัติและประเภทของกระดูกเทียมสังเคราะห์	14
2.2.2 เซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต	15
2.3 รูพรุน (pore)	17
2.3.1 กระบวนการสร้างกระดูกในรูพรุน	17
2.3.2 กระบวนการสร้างรูพรุน (Preparation methods)	18
2.4 การบูร (Camphor)	21
2.5 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	23

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง 30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 30
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 31
3.3 วิธีการทดลอง 33
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง 33
3.3.1.1 การเตรียมแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5-CaO-Na_2O glass system) 33
3.3.1.2 การเตรียมแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุน 37
3.3.2 วิธีการวัด และการตรวจวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่าง 41
3.3.2.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน 41
3.3.2.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) 42
3.3.2.3 การหาค่าความหนาแน่นและความพรุน 44
3.3.2.4 การหาค่าการหดตัวหลังเผา 45
3.3.2.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 46
3.3.2.6 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์ 48

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 50
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมแก้ว ในระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O 50
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ 51
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA 51
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ 52
4.1.4 ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD 53
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุน 54
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ 54
4.2.2 การศึกษาเฟสองค์ประกอบของแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุนด้วยเทคนิค XRD 57
4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ 68
4.2.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเฟสองค์ประกอบเม็ดสารเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุน ด้วยเทคนิค SEM 79

4.2.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรูพรุนเม็ดสารแก้วเซรามิก
แคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุนด้วยเทคนิค SEM 81
4.2.6 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต 90

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 94
5.1 สรุปผลการทดลอง 94
5.2 ข้อเสนอแนะ 98

เอกสารอ้างอิง 99

ภาคผนวก 103
ภาคผนวก ก ค่าความหนาแน่นของแก้วระบบ
ฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5-CaO-Na_2O) 104
ภาคผนวก ข ค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) 105
ภาคผนวก ค ค่าความหนาแน่น (Density) 106
ภาคผนวก ง ค่าความพรุนที่ปรากฏ (Apparent porosity) 107
ภาคผนวก จ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore size) 108
ภาคผนวก ฉ สมบัติเชิงกลแรงกด (Compressive stress) 109
ภาคผนวก ช ผลงานทางวิชาการที่เผยแพร่ 110

ประวัติผู้เขียน 117

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของการบูร	22
2.2	แสดงอัตราส่วน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (T_g) และ อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของแก้วในอัตราส่วนต่างๆ	24
2.3	แสดงอัตราการละลายของแก้วในน้ำกลั่นและ SBF ภาวะความเป็นพิษ และ pH ของ α- MEM หลังจากทดสอบความเป็นพิษ	25
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2	อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3	แสดงเงื่อนไขของเม็ดสารตัวอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักระหว่างผงแก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ กับผงการบูร และ อุณหภูมิเผาผนึก (sintering temperature)	38

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	สมบัติเชิงกลของเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต	2
2.1	ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ	4
2.2	ภาพการเรีย่งตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้ว หลังจากการการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน	5
2.3	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอนทัลปีของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว	6
2.4	แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)	9
2.5	กราฟระหว่างพลังอิสระที่เปลี่ยนไปในการเกิดนิวเคลียสผลึก (ΔG) กับ ขนาดของนิวเคลียส (r)	10
2.6	อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของผลึกเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของ ของเหลวที่มีความหนืดสูง (viscous liquid)	13
2.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูพรุนที่เกิดจาก การละลายออกของเกลือและ PVA	19
2.8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูพรุนของ Endobon®	20
2.9	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูพรุนที่เกิดจากวิธี polymeric sponge	21
2.10	ลักษณะของต้นการบูรหรืออบเชยจีน และลักษณะของผงการบูร	21
2.11	แสดงโครงสร้างของแก้วฟอสเฟต (phosphate glass structure) เมื่อ (a) คือ chain structure และ (b) คือ การสร้าง cross-link ด้วยไอออน Ca^{2+}	24
2.12	แสดงการการลดลงของน้ำหนัก (weight loss) เมื่อแช่อยู่ในน้ำกลั่น (distilled water) และ SBF ที่อุณหภูมิ 37°	25

2.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงการเจริญเติบโตของ human pulp cell หลังการทดสอบภาวะความเป็นพิษเมื่อ (a) ตัวควบคุม (b) 10C50P (c) 20C50P และ (d) 0C50P 26

2.14 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และ จุดหลอมเหลว (T_m) ของแก้วระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O ที่มีอัตราส่วน P_2O_5 ร้อยละ 45 โดยโมล 27

3.1 อัตราส่วนของแก้วระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O ที่แสดงด้วย Ternary phase diagram 34

3.2 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว P_2O_5-CaO-Na_2O 34

3.3 ถ้วยหลอมอะลูมินา (Al_2O_3 crucible) 35

3.4 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel plate) สำหรับกดทับน้ำแก้ว 35

3.5 เตาเผาไฟฟ้า (furnace) สำหรับหลอมแก้ว 35

3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมแก้วระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O 36

3.7 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกแก้วที่ผ่านการหลอมด้วยถ้วยหลอมอะลูมินา 37

3.8 เครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮโดรลิก 39

3.9 เตาเผาไฟฟ้าสำหรับเผาผนึก 39

3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต 40

3.11 เครื่อง High Temperature DTA Cell Adaptor 42

3.12 เครื่อง X-ray diffracttometer 43

3.13 เครื่องชั่งระบบดิจิตอล สำหรับวัดค่าความหนาแน่น 45

3.14 เครื่อง sputtering รุ่น JFC-1100E 47

3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด Low vacuum (JEOL JSM 5910LV) 47

3.16 เครื่องมือทดสอบแบบเอนกประสงค์ [Universal testing machine (Instron Model 55R4502)] 49

3.17 การติดตั้งชิ้นงานบนเครื่องมือทดสอบแบบเอนกประสงค์ 49

4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วที่ผ่านการหลอม 51

4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้วสูตร ($45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$) ($45P_2O_5$-36CaO-$29Na_2O$) และ ($45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$) 52

4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และ อุณหภูมิการแปลงเฟส ของแก้ว ระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O ที่ปริมาณ CaO ต่างกัน 53
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแก้วระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O ที่ผ่านการหลอม 54
4.5 เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่ผสมการบูรในอัตราส่วน 10:0 และผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C 55
4.6 เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่ผสมการบูรในอัตราส่วน 7:3 และผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C 56
4.7 เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่ผสมการบูรในอัตราส่วน 55 และผ่านกรเผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C 56
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ อัตราส่วน 10:0 59
4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ อัตราส่วน 7:3 60
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ อัตราส่วน 5:5 61
4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ อัตราส่วน 10:0 62
4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ อัตราส่วน 7:3 63
4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ อัตราส่วน 5:5 64
4.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ อัตราส่วน 10:0 65
4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ อัตราส่วน 7:3 66
4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มาจากแก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ อัตราส่วน 5:5 67
4.17 ความหนาแน่น (Density) และการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของ เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต จากแก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C 69

4.18 ความหนาแน่น (Density) และการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของ
เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต จากแก้วสูตร $45P_2O_5$-$36CaO$-$19Na_2O$
ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C 69

4.19 ความหนาแน่น (Density) และการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของ
เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต จากแก้วสูตร $45P_2O_5$-$40CaO$-$15Na_2O$
ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C 70

4.20 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต
ที่มีรูพรุน ที่อัตราส่วน 10:0 ของแก้วระบบ P_2O_5-CaO-Na_2O 70

4.21 ความหนาแน่น (Density) และความพรุนที่ปรากฏ (apparent porosity) ของ
เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุน จากแก้วสูตร
$45P_2O_5$-$32CaO$-$23Na_2O$ 71

4.22 ความหนาแน่น (Density) และความพรุนที่ปรากฏ (apparent porosity) ของ
เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุน จากแก้วสูตร
$45P_2O_5$-$36CaO$-$19Na_2O$ 72

4.23 ความหนาแน่น (Density) และความพรุนที่ปรากฏ (apparent porosity) ของ
เม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุน จากแก้วสูตร
$45P_2O_5$-$40CaO$-$19Na_2O$ 72

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความหนาแน่นกับการหดตัว และ
(ข) ความหนาแน่นกับความพรุนที่ปรากฏ ของเม็ดสารแก้วเซรามิก
จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-$32CaO$-$23Na_2O$ 74

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความหนาแน่นกับการหดตัว และ
(ข) ความหนาแน่นกับความพรุนที่ปรากฏ ของเม็ดสารแก้วเซรามิก
จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-$36CaO$-$19Na_2O$ 75

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความหนาแน่นกับการหดตัว และ
(ข) ความหนาแน่นกับความพรุนที่ปรากฏ ของเม็ดสารแก้วเซรามิก
จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-$40CaO$-$15Na_2O$ 76

4.25 ช่องว่างที่สามารถมองเห็นได้ชัดอยู่ภายใต้พื้นผิว (visible bubbles underneath)
ของเม็ดสารที่มาจากแก้วสูตร (ก) $45P_2O_5$-$32CaO$-$23Na_2O$
(ข) $45P_2O_5$-$32CaO$-$23Na_2O$ และ (ค) $45P_2O_5$-$32CaO$-$23Na_2O$
ที่อุณหภูมิเผาผนึก 650°C อัตราส่วน 10:0 78

4.26 แสดงร้อยละความพรุนที่ปรากฏของเม็ดสารเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 650°C ที่มาจากแก้วสูตรที่มี CaO ต่างกัน ในอัตราส่วน 10:0 79
4.27 การวิเคราะห์ EDS บนพื้นผิวรอยหัก (fracture surface) ชิ้นงานแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุนA3-650 เมื่อ (1) คือ แคลเซียมฟอสเฟต และ (2) คือ โซเดียมฟอสเฟต 80
4.28 แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ของเม็ดสารแก้วเซรามิกในอัตราส่วน 7:3 เผาที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ 82
4.29 แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ของเม็ดสารแก้วเซรามิกในอัตราส่วน 7:3 เผาที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ 83
4.30 แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ของเม็ดสารแก้วเซรามิกในอัตราส่วน 7:3 เผาที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ 84
4.31 แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ของเม็ดสารแก้วเซรามิกในอัตราส่วน 5:5 เผาที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ 85
4.32 แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ของเม็ดสารแก้วเซรามิกในอัตราส่วน 5:5 เผาที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ 86
4.33 แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ของเม็ดสารแก้วเซรามิกในอัตราส่วน 5:5 เผาที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ 87
4.34 การเปรียบเทียบระหว่างขนาดของรูพรุน (pore size) กับ การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ 88
4.35 การเปรียบเทียบระหว่างขนาดของรูพรุน (pore size) กับ การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ 88
4.36 การเปรียบเทียบระหว่างขนาดของรูพรุน (pore size) กับ การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C จาก แก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ 89
4.37 Compressive stress ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C จากแก้วสูตร $45P_2O_5$-32CaO-$23Na_2O$ 91
4.38 Compressive stress ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C จากแก้วสูตร $45P_2O_5$-36CaO-$19Na_2O$ 91

4.39 Compressive stress ของเม็ดสารแก้วเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 500-650°C จากแก้วสูตร $45P_2O_5$-40CaO-$15Na_2O$ 92

4.40 แสดงลักษณะแบบวัสดุผสมของเม็ดสารแก้วเซรามิก A2-600 (ก) เทียบกับโครงสร้างที่ไม่เกิดลักษณะแบบวัสดุผสมของเม็ดสารเซรามิก C2-600 (ข) 93

อักษรย่อและสัญลักษณ์

P_2O_5	Phosphorus tetra oxide
CaO	Calcium Oxide
Na_2O	Sodium Oxide
P_2O_5-CaO-Na_2O	Phosphorus Calcium Sodium Oxide
DTA	Differential Thermal Analysis
XRD	X-ray Diffraction technique
SEM	Scanning Electron Microscopy
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry
UTM	Universal Testing Machine
T_x	Crystallization temperature
T_m	Melting temperature
T_g	Glass transition temperature