



การเตรียมและการวิเคราะห์แก้วและแก้วเซรามิกชีวภาพจาก
ระบบแคลเซียมโซเดียมฟอสเฟต

Preparation and Analysis of Bioactive Glasses and
Glass-ceramics from Calcium Sodium Phosphate System



โดย
ดร.วิไลวรรณ สีนะกุล

งานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้คณะ
ประจําปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความกรุณาจากคณาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ น.ส.ปรารธนา อินตะวิน ผู้ช่วยนักวิจัยที่มีบทบาทสำคัญในงานวิจัยทุกๆส่วน อาจารย์วรนุช ดีละมัน และ ดร. กัลทิมา เขาว์ชาญชัยกุล ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำการวิจัย และร่วมทำโครงการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณอาจารย์ปิยธิดา รุจะศิริ ผู้ช่วยคณบดีคณะวิทยาศาสตร์ และ นายภิรมย์ เอียดดำ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการประสานงานและจัดกองทุนสนับสนุนในการจัดทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนเงินวิจัยในโครงการวิจัยเงินงบประมาณรายได้ ปี พ.ศ. 2558

อนึ่งผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอขอบคุณความกตัญญูทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆที่จะเกิดขึ้นนั้นผู้วิจัยขออ้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และพร้อมที่จะรับคำแนะนำของทุกท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2558

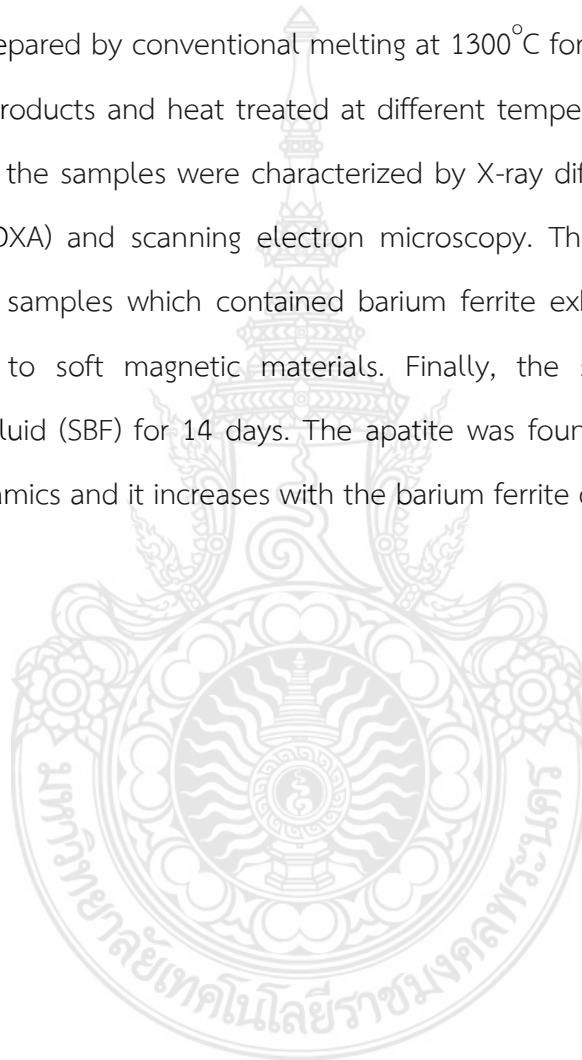
บทคัดย่อ

งานวิจัยโครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการสังเคราะห์แก้วเคลือบเซรามิกโซเดียมฟอสเฟตที่มีการเติมสารแม่เหล็ก $\text{CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-BaO-Fe}_2\text{O}_3$ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน นั่นคือ การเตรียมแก้วเซรามิก และเซรามิก จากนั้นนำไปทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆกันเพื่อศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องนั่นคือ การทดสอบสมบัติทางกายภาพ จุลภาค สมบัติทางกล โดยการใช้เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน การส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดสอบความแข็ง การหดตัว ยิ่งไปกว่านั้นทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมบัติทางชีวภาพของชิ้นงานที่ได้ พบว่าเมื่อมีการเติมสารแม่เหล็กในปริมาณมากขึ้นสมบัติทางชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าแก้วที่มีการเติมสารแม่เหล็กสามารถสร้างพันธะอะพาไทต์ได้ นั่นคือมีสมบัติทางชีวภาพนั่นเอง



Abstract

The aim of this work was to study the magnetic properties of magnetic glass-ceramics with composition system $\text{CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-BaO-Fe}_2\text{O}_3$. The magnetic glass-ceramics were prepared by conventional melting at 1300°C for 2 h of the coprecipitation derived starting products and heat treated at different temperatures. The structure and microstructure of the samples were characterized by X-ray diffraction, energy dispersive X-ray analysis (EDXA) and scanning electron microscopy. The magnetic measurement showed that the samples which contained barium ferrite exhibited magnetic behavior which is similar to soft magnetic materials. Finally, the samples were soaked in simulated body fluid (SBF) for 14 days. The apatite was found to form on the surface layer of glass-ceramics and it increases with the barium ferrite content was increased.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	(ก)
บทคัดย่อ	(ข)
บทคัดย่ออังกฤษ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ฉ)
สารบัญภาพ	(ช)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	
บทที่ 2 ทฤษฎี สมมติฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แก้ว (Glasses)	4
2.2 แก้วและแก้วเซรามิกที่เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Glass and glass ceramics as a biomaterials)	9
2.3 แบเรียมเฟอร์ไรท์ (Ba-ferrite; BaFe ₁₂ O ₁₉)	12
2.4 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	15
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	18
3.3 วิธีการทดลอง	20
3.4 วิธีการวัดและการตรวจวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่าง (Characterization and Measurement Method)	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass)	29
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass-ceramic)	34
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
อ้างอิง	46
ประวัติการศึกษา	49



สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ	4
รูปที่ 2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้ว หลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน	5
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)	6
รูปที่ 2.4 กราฟระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปในการเกิดนิวเคลียสผลึก (ΔG) กับขนาดของนิวเคลียส (r)	8
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของ $BaFe_{12}O_{19}$ หรือ $BaO \cdot 6Fe_2O_3$	13
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) กับอุณหภูมิ (T)	15
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกแก้วเซรามิกชีวภาพ ที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก	20
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก	21
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ (punch and die) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร	21
รูปที่ 3.4 เครื่องอัดไฮดรอลิก	22
รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางชิ้นงานตัวอย่างบนฝาของถ้วยหลอมแพลทินัม	22
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์เซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก	23
รูปที่ 3.7 เครื่อง High Temperature DTA Cell Adaptor	24
รูปที่ 3.8 X-ray diffractometer	26
รูปที่ 3.9 เครื่อง sputtering รุ่น JFC-1100E	27
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด Low vacuum (JEOL JSM 5910LV)	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.1 แสดงแก้วชีวภาพระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5 -CaO-Na ₂ O bioglass) ที่เตรียมได้จากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	30
รูปที่ 4.2 แสดงสารแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ที่เตรียมได้จากขั้นตอน	30
รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่างๆ	31
รูป 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้ว ที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่างๆ	33
รูป 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแก้วที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่างๆ	34
รูป 4.6 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสาร เฟอร์โรแมกเนติก ที่ผ่านการปลูกผลึกด้วยเงื่อนไขต่างๆ	36
รูป 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียม เฟอร์ไรท์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง	38
รูป 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียม เฟอร์ไรท์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง	39
รูป 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียม เฟอร์ไรท์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง	40
รูป 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียม เฟอร์ไรท์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง	41
รูป 4.11 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานแก้วเซรามิกเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งผ่านการปลูกผลึก ที่อุณหภูมิตกผลึก นาน 2 ชั่วโมง	42
รูป 4.12 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานแก้วเซรามิกเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งผ่านการแช่สารละลาย SBF เป็นเวลา 14 วัน	43

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 2.1 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองระหว่างวัสดุเทียบกับเนื้อเยื่อ	11
ตาราง 2.2 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างวัสดุเทียบกับเนื้อเยื่อ	11
ตาราง 2.3 แสดงจุดหลอมเหลวของสารประกอบต่างๆ	14
ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดการยึดติดกับเนื้อเยื่อของเซรามิกชีวภาพและชนิดของเซรามิกชีวภาพ	17



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการพัฒนาแก้วเซรามิกเพื่อนำไปประยุกต์ทางด้านการรักษาด้วยวิธี Hyperthermia ได้แก่ แก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยผลึกของสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic glass-ceramics) เพื่อใช้ในการรักษามะเร็งด้วยวิธี hyperthermia [2-10] ซึ่งแก้วเซรามิกที่จะประยุกต์ใช้ทางด้าน Hyperthermia ได้ดีจะต้องมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ได้ดี ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ใช้แก้วในระบบที่มีแคลเซียมโซเดียมฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นแก้วที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพได้ดี ดังตัวอย่างของงานวิจัยจากกลุ่มวิจัยชาวอิตาลี Bretcanu และคณะ [5-7] ซึ่งทำการศึกษแก้วในระบบ $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ โดยทำการสังเคราะห์สารตั้งต้นด้วยวิธีตกผลึกร่วม (coprecipitation derived method) ก่อนที่จะนำมาหลอมด้วยวิธีกาหลอมแก้วแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 1400 ถึง 1550 องศาเซลเซียส ซึ่งพวกเขาสามารถผลิตแก้วที่ประกอบด้วยผลึกของเฟอร์โรแมกเนติกที่มีขนาดอยู่ในช่วง 34-54 นาโนเมตรได้สำเร็จ ทั้งนี้การปลูกผลึกในแก้วเซรามิกยังต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสมกับระบบ โดยมีปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาดของผลึกในแก้วที่มีความสำคัญมากต่อสมบัติทางแม่เหล็กของแก้ว และสัดส่วนความเป็นผลึกในแก้วเซรามิก (crystallinity) เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตแก้วเซรามิกเฟอร์โรแมกเนติกที่ใช้ในการรักษาด้วยวิธี Hyperthermia ดังผลงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัยชาวอินเดีย Singh Srinivasan และคณะ [8, 10-11] ซึ่งได้ทำการศึกษแก้วในระบบ $41\text{CaO}-(52-x)\text{SiO}_2-4\text{P}_2\text{O}_5-x\text{Fe}_2\text{O}_3-3\text{Na}_2\text{O}$ โดย x มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2-10 โดยโมล $4.5\text{MgO}-(45-x)\text{CaO}-3\text{SiO}_2-16\text{P}_2\text{O}_5-0.5\text{CaF}_2-x\text{Fe}_2\text{O}_3$ โดย x มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก และระบบ $x(\text{ZnO},\text{Fe}_2\text{O}_3)-(65-x)\text{SiO}_2-20(\text{CaO},\text{P}_2\text{O}_5)-15\text{Na}_2\text{O}$ โดย x มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 6-21 โดยโมล จะเห็นได้ว่านักวิจัยกลุ่มนี้สนใจศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทางเคมีของเหล็กออกไซด์ต่อการเกิดผลึกเฟอร์ไรท์ และสมบัติต่างๆ โดยใช้สารตั้งต้นเป็นออกไซด์ทางการค้า และวิธีการหลอมแก้วแบบดั้งเดิม จากนั้นจึงทำการปลูกผลึกในแก้วด้วยกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแก้วเซรามิกที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งพบว่าพวกเขาสามารถควบคุมชนิดของผลึกขนาดและปริมาณ ได้ด้วยการเลือกอุณหภูมิการตกผลึกที่เหมาะสม ในขณะที่ยังรักษาสมบัติทางแม่เหล็กที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการรักษาแบบ hyperthermia นอกจากนี้กลุ่มวิจัยยังนำเสนอการปลูกผลึกของสารเฟอร์ไรท์ชนิดใหม่ๆ เช่น ซิงค์เฟอร์ไรท์ (ZnFe_2O_4) ซึ่งสามารถนำมาปลูกในแก้ว

ระบบ $x(\text{ZnO}, \text{Fe}_2\text{O}_3) - (65-x)\text{SiO}_2 - 20(\text{CaO}, \text{P}_2\text{O}_5) - 15\text{Na}_2\text{O}$ ได้สำเร็จ แต่ยังมีปัญหาของการพบเฟสอื่นๆ ที่ตกผลึกคู่กันมาด้วย

ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกที่จะสังเคราะห์แก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยใช้สารตั้งต้นจาก แก้วฟอสเฟต (Phosphate glass) เพราะแก้วฟอสเฟตนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ จุดหลอมเหลวต่ำ (low melting temperature) อยู่ที่ประมาณ 700-800 องศาเซลเซียส ตามอัตราส่วนมากน้อยของแคลเซียมและโซเดียม ทำให้ง่ายต่อกระบวนการเตรียมเพราะใช้อุณหภูมิสำหรับการหลอมแก้วชนิดนี้ต่ำ และมีความสามารถที่จะเข้ากับเนื้อเยื่อของร่างกายได้ [12-13] แก้วฟอสเฟต ระบบที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ นั่น คือ ฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ($45\text{P}_2\text{O}_5 - 40\text{CaO} - 15\text{Na}_2\text{O}$) โดยใช้ ฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5), แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เป็นสารหลักในการสังเคราะห์แก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ แล้วจึงเติมสารเฟอร์โรแมกเนติกชนิดแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการแบบมิกซ์ออกไซด์ (mixed oxide) นำมาหลอมผสมกับผงแก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ตามสัดส่วนที่เหมาะสม แล้วนำแก้วที่ได้ไปทำการปลุกผลึกในแก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์แล้วควบคุมขนาดและชนิดของผลึกด้วยการบวนการทางความร้อน (heat treatment) ซึ่งสามารถหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตกผลึกได้จากการวิเคราะห์ทางความร้อนแบบอนุพันธ์ (differential thermal analysis: DTA) ทำให้เกิดความแม่นยำในการปลุกผลึกได้ดีกว่าวิธีแบบดั้งเดิม นอกจากนั้นยังศึกษาสมบัติต่างๆ ของแก้วเซรามิกที่เตรียมได้ ทั้งในทางกายภาพและทางชีวภาพ เพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ในทางการแพทย์ และน่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการนำไปใช้ในการรักษาแบบ Hyperthermia ทางผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าผลสำเร็จของงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปสู่องค์ความรู้ใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแก้วและแก้วเซรามิกในทางการแพทย์ให้กับประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาแก้วและแก้วเซรามิกชีวภาพจากระบบที่มีฟอสฟอรัสออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และ สมบัติเชิงกล ของเซรามิกกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ ในการนำไปประยุกต์เป็นวัสดุชีวภาพ
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผาผนึก ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และ สมบัติเชิงกล ของเซรามิกกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การสังเคราะห์แก้วและแก้วเซรามิกชีวภาพที่มีฟอสฟอรัสออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และ สมบัติเชิงกล เพื่อสามารถสร้างต้นแบบแบบแก้วและแก้วเซรามิกชีวภาพจากระบบที่มีฟอสฟอรัสออกไซด์สำหรับใช้ประยุกต์เป็นวัสดุชีวภาพได้



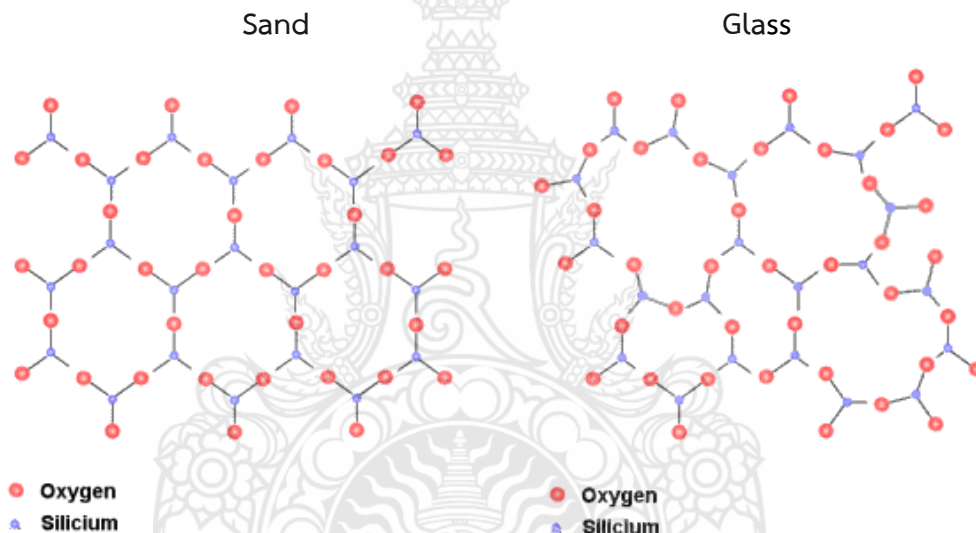
บทที่ 2

ทฤษฎี สมมติฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก้ว (Glasses)

2.1.1 คำนิยามของแก้ว (Definitions of glasses) [14]

แก้วไม่มีความเป็นผลึกเหมือนของแข็งทั่วไปและมีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลว นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มจึงถือว่าแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสสาร นอกเหนือจาก ของเหลว (liquid) ของแข็ง (solid) และก๊าซ (gas) ดังรูป 2.1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของทราย (sand) ที่เป็นผลึกของ สารซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งแตกต่างจากแก้วที่ประกอบไปด้วยอะตอมของ Si และ O ที่เรียงตัวกันแบบสุ่ม (random disordered arrangement

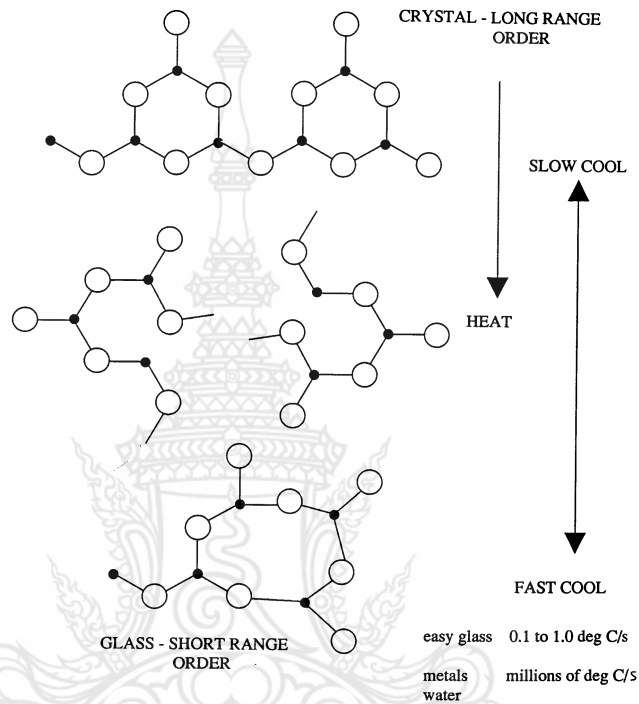


รูป 2.1 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ

[15]

นักวิทยาศาสตร์ผู้มีความเชี่ยวชาญทางด้านแก้วหลายท่านพยายามให้คำนิยามที่เหมาะสมที่สุดของแก้ว ตามที่พื้นฐานความรู้ และมุมมองที่ต่างกัน จนสรุปคำนิยามของแก้วไว้เป็นมาตรฐานตาม ASTM standards ไว้ว่า “แก้วคือผลิตภัณฑ์สารอนินทรีย์ของการหลอมซึ่งได้ถูกทำให้เย็นตัวลงเป็นภาวะแข็งเกร็ง (rigid condition) โดยไม่มีการตกผลึก” สมบัติที่สำคัญที่สุดของแก้วคือ ความโปร่งใส ซึ่งเกิดเนื่องจากแก้วปราศจากขอบของเกรน (grain boundary) และสิ่งแปลกปลอม (inclusion) ที่เป็นเหตุของการกระเจิงของแสง (scattering of light) ซึ่งแตกต่างจากเซรามิก (ceramic) โดยทั่วไปที่มีขอบเกรนและรูพรุน ทำให้เซรามิกทึบแสง ถึงแม้ว่าเซรามิกส่วนใหญ่จะมี

ความเป็นฉนวนเหมือนแก้วซึ่งมีค่าช่องว่างของพลังงาน (energy gap) ระหว่างแถบการนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่มากกว่า 1 อิเล็กตรอนโวลต์เหมือนกันก็ตาม



รูป 2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้วหลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน [14]

2.1.2 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว (Kinetic theories of glass formation) [14]

ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว ตระหนักว่าวัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดแก้วได้ ถ้าสามารถทำให้เย็นตัวได้อย่างรวดเร็วพอที่จะหลีกเลี่ยงการตกผลึก ดังนั้น ทฤษฎีนี้จึงให้ความสำคัญกับกลไกในการตกผลึกของสาร ซึ่งเป็นการรวมกระบวนการที่สำคัญสองกระบวนการเข้าด้วยกันคือ

1. การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)
2. การเติบโตของผลึก (crystal growth)

2.1.2.1 การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)

การเกิดนิวเคลียสผลึกแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักคือ

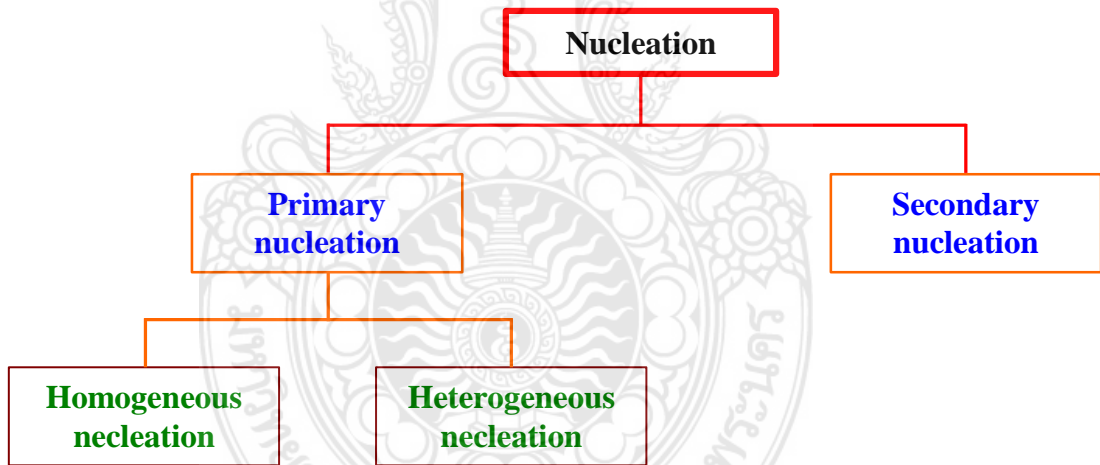
1. การเกิดนิวเคลียสผลึกปฐมภูมิ (primary nucleation) คือ กรณีของการเกิดนิวเคลียสผลึกทุกกรณีในระบบที่ไม่ประกอบไปด้วยสารที่เป็นผลึกอยู่ก่อน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิดย่อย คือ

ก. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous nucleation) การเกิดนิวเคลียสผลึกโดยไม่อาศัยสิ่งที่มีอยู่ก่อนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำแก้วหลอม

ข. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous nucleation) นิวเคลียสผลึกเกิดจากสิ่งที่มีอยู่ก่อนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำแก้วหลอม อาทิ ผนังเตา (furnace wall) สิ่งแปลกปลอมที่ไม่ละลาย (insoluble inclusions) หรือแม้กระทั่งพื้นผิวอิสระ (free surface)

2. การเกิดนิวเคลียสผลึกทุติยภูมิ (secondary nucleation) คือ การที่มีผลึกปรากฏอยู่ในระบบที่อิมิตัวยิ่งยวดเพื่อสร้างนิวเคลียสทุติยภูมิต่อไป

แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสได้แสดงไว้ ดังรูป 2.4



รูป 2.3 แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) [14]

ในการศึกษาเรื่องการเกิดนิวเคลียสผลึก คำว่านิวเคลียสในที่นี้คือนิวเคลียสของผลึก (crystal nucleus) ซึ่งแตกต่างไปจากนิวเคลียสของอะตอม (atomic nucleus) โดยการเกิดนิวเคลียสผลึกนั้น จะถูกต่อต้านด้วยเครื่องขวางกั้นสองชนิด คือ

1. เครื่องขวางกั้นอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic barrier) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระ (free energy) ที่เปลี่ยนไปในระบบเมื่อมีการเกิดนิวเคลียสขึ้น

2. เครื่องขวางกั้นจลนพลศาสตร์ (kinetic barrier) เกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการในการเคลื่อนที่ของมวลหรือการจัดเรียงตัวใหม่ในช่องว่าง เพื่อให้การเติบโตของอนุภาคที่เป็นระเบียบ (หรือผลึก) เกิดขึ้นได้ จากของเหลวที่ไม่เป็นระเบียบ
ดังนั้นระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสองชนิดคือ

1. พลังงานอิสระ (free energy)
2. พลังงานพื้นผิว (surface energy)

การจัดเรียงตัวของอะตอมในนิวเคลียสจะทำให้พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (volume free energy) ลดลงแต่พลังงานพื้นผิวของการเกิดผิวร่วมใหม่ (a new interface) เพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานอิสระที่เกินมาทั้งหมด (the overall excess free energy) จะมีค่าเป็นไป ดังสมการ 2.1

$$\begin{aligned}\Delta G &= \Delta G_{Surface} + \Delta G_{Volume} \\ &= 4\pi r^2 \gamma + \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v\end{aligned}\quad (2.1)$$

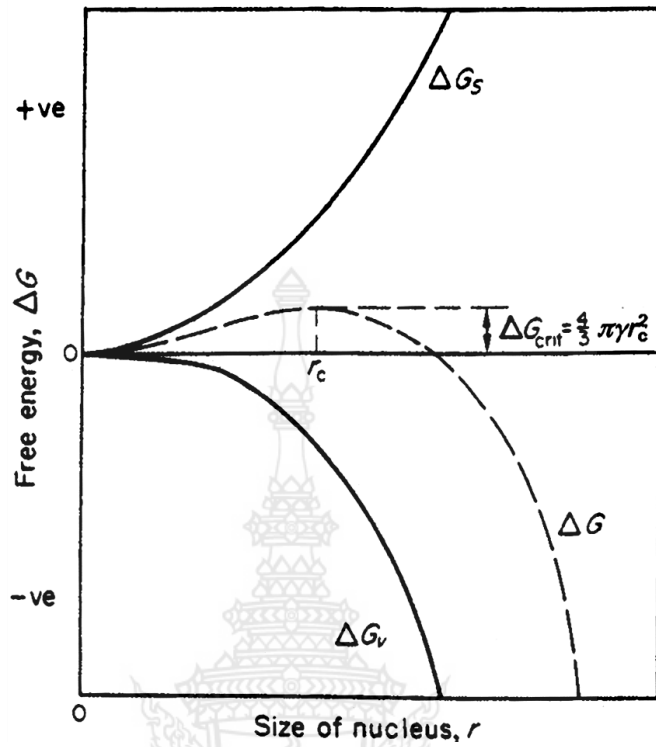
โดยที่ ΔG คือ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยปริมาตร

γ คือ พลังงานการเกิดพื้นผิวร่วม (the interfacial energy)

ΔG_v มีปริมาณเป็นลบ (a negative quantity)

ΔG_s มีปริมาณเป็นบวก (a positive quantity)

เมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปทั้งหมดกับขนาดของนิวเคลียสจะได้กราฟดังรูปที่ 2.4



รูป 2.4 กราฟระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปในการเกิดนิวเคลียสผลึก (ΔG) กับขนาดของนิวเคลียส (r) [14]

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปจะผ่านจุดสูงสุดที่ r_c ที่เรียกว่า นิวเคลียสวิกฤต (the critical nucleus)

ถ้าหาอนุพันธ์ของ ΔG (สมการที่ 2.1) ด้วยขนาดของนิวเคลียส r และให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 \quad (2.2)$$

จะได้ตั้งสมการที่ 2.3

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 8\pi r\gamma + 4\pi r^2 \Delta G_v = 0 \quad (2.3)$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้ r_c ตั้งสมการที่ 2.4

$$r_c = \frac{-2\gamma}{\Delta G_V} \quad (2.4)$$

และพลังงานอิสระที่จุดวิกฤต (ΔG_{crit}) จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังสมการที่ 2.5

$$\Delta G_{crit} = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_V)^2} = \frac{4\pi r_c^2}{3} \quad (2.5)$$

ขนาดของนิวเคลียสวิกฤต r_c เป็นขนาดที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ของนิวเคลียสเสถียร (a stable nucleus) โดยที่

$r > r_c$ เป็นนิวเคลียสเสถียร และจะมีการเติบโตต่อไป

$r < r_c$ เป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียร (unstable nucleus) จะละลายหรือระเหยหายไป (dissolve or evaporate)

2.2 แก้วและแก้วเซรามิกที่เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Glass and glass ceramics as a biomaterials) [16]

จากงานวิจัยของ Hench และคณะ พบว่า แก้วบางกลุ่มสามารถเป็นองค์ประกอบของกระดูกได้ ซึ่งแก้วกลุ่มนี้กลายเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นแก้วที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive glasses) ซึ่งมากจากนิยามของวัสดุที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive materials) คือ “วัสดุที่ตอบสนองทางชีวภาพบริเวณรอยต่อของวัสดุซึ่งก่อให้เกิดพันธะระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุ” แก้วที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพส่วนใหญ่ใช้ในการทดแทน ซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของกระดูก ที่อาจเกิดจากอุบัติเหตุหรือภาวะเสื่อมถอยของกระดูก ซึ่งทำให้แก้วเซรามิกชีวภาพแตกต่างจากเซรามิกชีวภาพทั่วไปและแก้วเซรามิกสามารถควบคุมสมบัติทางเคมีและอัตราการยึดเกาะกับเนื้อเยื่อและมีความเสถียรในการยึดติดกับเนื้อเยื่อ และยังสามารถพัฒนาคุณสมบัติของแก้วเซรามิกให้เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

2.2.1 รูปแบบของการตอบสนองระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุทางชีวภาพ (Types of Biomaterial-Tissue Interface) [18]

วัสดุทางชีวภาพเมื่อนำไปปลูกถ่ายในเนื้อเยื่อในร่างกาย วัสดุจะเกิดการตอบสนองจากเนื้อเยื่อที่วัสดุนั้นเข้าไปอยู่ การตอบสนองนั้นจะเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุเทียม และขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ระบุไว้ดังตาราง 2.1 ประเภทของการตอบสนองของวัสดุเทียมกับเนื้อเยื่อสามารถสรุปได้ดังตาราง 2.2

สิ่งจำเป็นในการปลูกถ่ายวัสดุเทียมในเนื้อเยื่อ คือ การหลีกเลี่ยงการตอบสนองที่เป็นพิษที่จะทำให้เนื้อเยื่อรอบข้างตาย และสร้างความเสียหายให้กับร่างกายผู้ป่วยได้ การตอบสนองที่พบบ่อยคือ การก่อตัวของเนื้อเยื่อเป็นเส้นๆ ที่ไม่สามารถยึดเกาะกับเนื้อเยื่อได้ เนื้อเยื่อที่ก่อตัวขึ้นมีลักษณะเป็นกำแพงแยกตัวออกจากวัสดุเทียม การตอบสนองในรูปแบบนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในวัสดุเทียมที่ผลิตจากโลหะและพอลิเมอร์

รูปแบบที่สามของการตอบสนองต่อเนื้อเยื่อบริเวณรอยต่อ ที่แสดงไว้ดังตาราง 2.2 เกิดขึ้นเนื่องจากเนื้อเยื่อเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างวัสดุเทียมกับเนื้อเยื่อ ซึ่งเรียกว่า “ความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ” ซึ่งเกิดพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของวัสดุเทียมกับเนื้อเยื่อ ป้องกันการเคลื่อนที่ของวัสดุเทียมกับเนื้อเยื่อรอบๆ ข้าง และเกิดการเลียนแบบรูปแบบของเนื้อเยื่อที่แท้จริงที่มีการเชื่อมแซมเนื้อเยื่อได้ด้วยตัวเอง การตอบสนองต่อเนื้อเยื่อในรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นในวัสดุที่สามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ลักษณะที่สำคัญของรอยต่อที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ คือ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อเทียบกับเวลาที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อที่แท้จริง

ตาราง 2.1 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองระหว่างวัสดุเทียมกับเนื้อเยื่อ [17]

เนื้อเยื่อบริเวณข้างเคียง (Tissue side)
ชนิดของเนื้อเยื่อ (Type of Tissue)
องค์ประกอบของวัสดุเทียม (Composition of Implant)
สุขภาพของเนื้อเยื่อ (Health of Tissue)
ขั้นตอนในการปลูกถ่ายวัสดุเทียม (Phases in Implant)
อายุของเนื้อเยื่อ (Age of Tissue)
ขอบเขตของการปลูกถ่ายวัสดุเทียม
การไหลเวียนของเลือดในเนื้อเยื่อ (Blood Circulation in Tissue)
ลักษณะพื้นผิวของวัสดุเทียม (Surface Morphology)
การไหลเวียนของเลือดระหว่างรอยต่อเนื้อเยื่อ (Blood Circulation at interface)
ความพรุนที่ผิวของวัสดุเทียม (Surface Porosity)
การเคลื่อนไหวบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อ (Motion at Interface)
ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction)
กลไกการรับแรง (Mechanical Load)

ตาราง 2.2 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างวัสดุเทียมกับเนื้อเยื่อ [17]

ปฏิกิริยาระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุเทียม	ผลกระทบกับเนื้อเยื่อ
1. ความเป็นพิษ	เนื้อเยื่อตาย
2. ความเฉื่อยทางชีวภาพ	เนื้อเยื่ออยู่ในรูปแบบของเส้นใย ที่ไม่สามารถยึดเกาะกับเนื้อเยื่อได้
3. ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ	เนื้อเยื่อและวัสดุเทียมสามารถเกิดพันธะยึดเกาะกันได้เป็นอย่างดี
4. การละลายของวัสดุเทียม	เนื้อเยื่อสามารถแทนที่เข้าไปในวัสดุเทียมได้

เมื่อรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อเกิดความเข้ากันทางชีวภาพ ซึ่งเกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในวัสดุเทียม หรือเรียกว่า “การละลาย” วัสดุเทียมจะถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อ ดังนั้น วัสดุทางชีวภาพที่ละลายได้ จะต้องมียังคงประกอบทางเคมีที่ย่อยสลายได้ในของเหลวในร่างกาย โดยที่สิ่งที่ได้จากการย่อยสลายจะต้องเป็นสารเคมีที่ไม่เป็นพิษและก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ร่างกายและสามารถกำจัดออกจากร่างกายได้โดยง่ายตาย

2.3 แบเรียมเฟอร์ไรท์ (Ba-ferrite; BaFe₁₂O₁₉) [30]

แบเรียมเฟอร์ไรท์เป็นเฟอร์ไรท์ชนิดเฟอร์โรแมกนิโตพลัมไบท์ ซึ่งเป็นเฟอร์ไรท์ชนิดแม่เหล็กถาวร (hard ferrite or permanent magnet) มีสูตรทั่วไป คือ BaFe₁₂O₁₉ รูปผลึกเป็นรูปเฮกซะโกนอล (hexagonal) ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะถูกสร้างขึ้นจากสูตร AB₁₂O₁₉ หรือ A²⁺O · B₂³⁺O₃ โดยที่ A เป็นไอออนของโลหะที่มีวาเลนซ์ 2 ได้แก่ Ba ส่วน B เป็นไอออนของโลหะที่มีวาเลนซ์ 3 ได้แก่ Fe

โครงสร้างของแบเรียมเฟอร์ไรท์จะประกอบด้วยส่วนของแลกทิตสปิเนลแบบลูกบาศก์ (ใช้แทนด้วย S) และส่วนที่เรียงตัวอย่างใกล้ชิดเป็นรูปหกเหลี่ยม (ใช้แทนด้วย R) แต่ละส่วนของ S จะประกอบด้วย 2 ชั้นของสี่ไอออนของออกซิเจน ซึ่งขนานกับระนาบฐานของหกเหลี่ยมหรือ (111) ระนาบของสปิเนล และในแต่ละชั้นถูกคั่นด้วย 3 ตำแหน่งของไอออนบวก ในส่วนของ R จะประกอบด้วย 3 ชั้นของแลกทิตรูปหกเหลี่ยม โดยมีหนึ่งไอออนของสี่ไอออนของออกซิเจนจะอยู่ที่ชั้นกลาง ถูกแทนที่โดย Ba ในหน่วยเซลล์จะประกอบไปด้วย ส่วนของ S, R, S*, R* และต่อกันไปเรื่อยๆ โดย * หมายถึง การหมุน 180° รอบแกน C ของหกเหลี่ยมหรือในทิศ <111> ของผลึกแบบสปิเนล ดังนั้นในหน่วยเซลล์จะมีสิบชั้นของออกซิเจนและทุกๆ 5 ชั้นของออกซิเจนจะมี Ba แทนที่อยู่ ในหนึ่งหน่วยเซลล์แต่ละส่วนของ S จะเขียนสูตรได้เป็น Fe₆O₈ และแต่ละส่วนของ R เขียนได้เป็น BaFe₆O₁₁ นั่นคือผลลัพธ์ของสูตร คือ 2(BaFe₁₂O₁₉) สำหรับหนึ่งหน่วยเซลล์ของ SRS*R* โดยที่ Fe จะอยู่ในตำแหน่งของเตตระฮีดรอลและออกตะฮีดรอล โดยตำแหน่งหนึ่งถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออน 5 ตัว ซึ่งจัดรูปเป็นพีรามิดสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.11

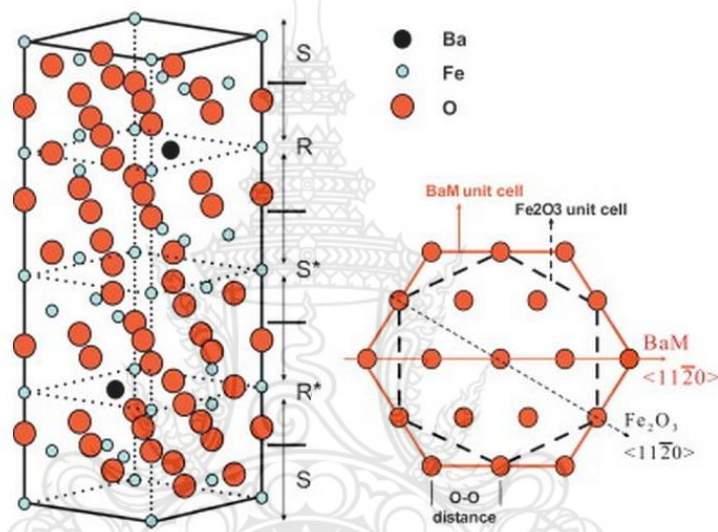
ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของเฟอร์ไรท์ชนิดนี้ที่เกิดจากไอออนของ Fe โดยแต่ละไอออนของ Fe จะมีโมเมนต์แม่เหล็กเป็น $5\mu_B \uparrow$ ในหนึ่งหน่วยของสูตร BaFe₁₂O₁₉ ดังนี้ ในส่วนของ S จะมี $2 \times 5\mu_B \uparrow$ โดยจากสองไอออนของ Fe ในตำแหน่งเตตระฮีดรอลของสปิเนล ถ้าไอออนของ Fe ในออกตะฮีดรอลจะประกอบด้วย $2 \times 5\mu_B \uparrow$ และ $7 \times 5\downarrow$ และหนึ่งไอออนของ Fe ใน fivefold symmetry ซึ่งอยู่ในส่วนของ R จะมีโมเมนต์แม่เหล็กเป็น $1 \times 5\mu_B \uparrow$ ดังนั้น ค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิของออกไซด์ในส่วนไอออนของ Fe คือ

$$M_{\text{net}} = 4 \times 5 \mu_B = 20 \mu_B$$

(2.10)

ซึ่งทิศของการ spin ในสปินเนลของส่วน S และส่วน R สามารถเขียนได้ดังนี้

ส่วนของ S; 2↑ tetrahedral 4↓ octahedral
 ส่วนของ R; 4↓ fivefold 2↑ 3↓ octahedral



รูป 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของ BaFe₁₂O₁₉ หรือ BaO.6Fe₂O₃ [30]

2.3.1 คุณสมบัติของเฟอร์ไรท์

2.3.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

1. ไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ
2. มีโครงสร้างเป็นตาข่ายติดต่อกันไปจนตลอดเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น เฟอร์ไรท์จึงมีความแข็งแกร่งต่อแรงกระแทกได้ดี
3. มีสถานะเป็นของแข็งและมีจุดหลอมเหลวสูง ดังแสดงในตาราง 2.6

ตาราง 2.3 แสดงจุดหลอมเหลวของสารประกอบต่างๆ [31]

สารประกอบ	จุดหลอมเหลว (°C)
BaO.Fe ₂ O ₃	1390
CdO.Fe ₂ O ₃	1540
CoO.Fe ₂ O ₃	1570
CuO.Fe ₂ O ₃	1560
MgO.Fe ₂ O ₃	1760
MnO.Fe ₂ O ₃	1570
NiO.Fe ₂ O ₃	1660
PbO.Fe ₂ O ₃	1530
ZnO.Fe ₂ O ₃	1590

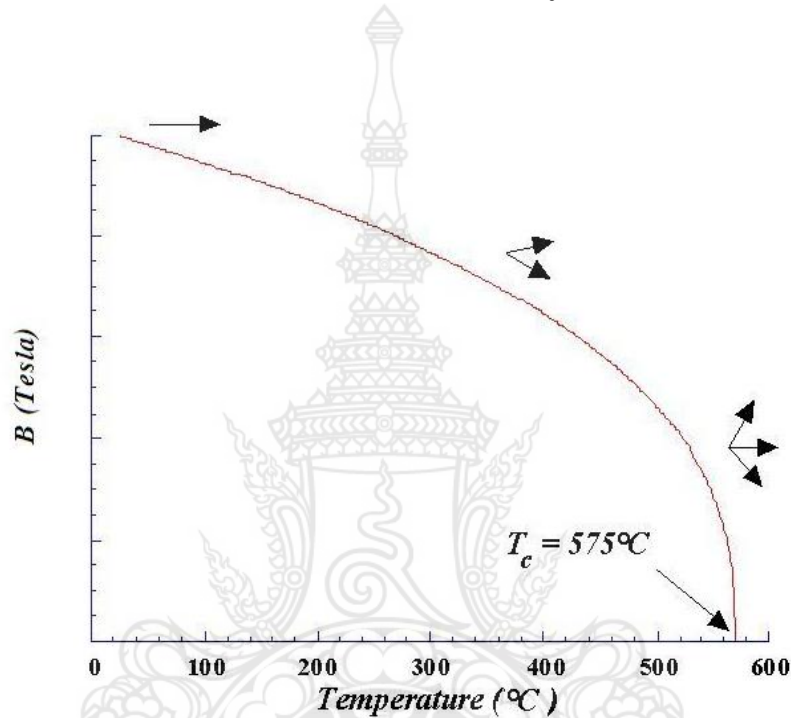
2.3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

1. เป็นตัวนำที่เลว
2. มีผลน้อยมากต่อกระแสไหลวนในเนื้อเฟอร์ไรท์ เนื่องจากเฟอร์ไรท์เป็นตัวนำที่เลว ดังนั้นเมื่อทำเฟอร์ไรท์ให้เป็นแม่เหล็กจึงไม่มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไหลวนและไม่เกิดความร้อนจากกระแสไหลวนอีกด้วย
3. ถูกเหนี่ยวนำให้มีอำนาจแม่เหล็กได้
4. ส่วนผสมของเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสม และการเตรียมที่ดีจะทำให้ได้เนื้อเฟอร์ไรท์ที่มีสภาพความซึมได้ทางแม่เหล็กสูง
5. เฟอร์ไรท์ชนิดแม่เหล็กชั่วคราวจะมีการสูญเสียพลังงานในการกลับขั้วแม่เหล็กน้อย
6. เฟอร์ไรท์ชนิดแม่เหล็กถาวรมีความคงทนในการเป็นแม่เหล็กได้ดี

2.3.2 อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)

ค่าของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ของสารแม่เหล็กจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) กล่าวคือ ถ้าให้สารแม่เหล็กนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าลดลง จนถึง ณ ที่อุณหภูมิหนึ่งที่ทำให้ค่าของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์พอดี เราเรียกอุณหภูมินั้นว่า อุณหภูมิคูรี ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหว ซึ่งจะไปทำลายการเรียงตัวของแนวแรงที่เกิดจากอิทธิพลของสปิน (spin-spin interaction) ในสารที่ต่างชนิดกันอุณหภูมิคูรีก็จะแตกต่างกันออกไป เช่น เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni), โคบอลต์ (Co) และแกดเลียม (Ga) มีอุณหภูมิคูรีเป็น 770, 365, 1075, และ 15°C ตามลำดับ [32]

สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c) สารพวกเฟอร์โรแมกเนติก เฟอร์ริแมกเนติก และ แอนติเฟอร์โรแมกเนติก จะกลายเป็นสารพวกพาราแมกเนติก เพราะว่า พลังงานความร้อนทำให้ทิศทางการเรียงตัวของแมกเนติกไดโพลเปลี่ยนไปอย่างไม่มีระเบียบ ดังนั้นที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ T_c นี้ สารดังกล่าวจะไม่มีค่าผลลัพท์ของแมกเนติกโมเมนต์เหลืออยู่เลย



รูป 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) กับอุณหภูมิ (T) [32]

2.4 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.4.1 งานวิจัยทางด้านแก้วเซรามิก

แก้วเซรามิก (glass ceramic) มีความหมายคือ ของแข็งที่มีผลึกเป็นแบบเชิงซ้อน สามารถเตรียมได้โดยวิธีการควบคุมการตกผลึก (controlled crystallization) ในแก้ว ซึ่งการควบคุมการตกผลึกนั้นจะทำให้สำเร็จได้โดยการนำแก้วพื้นฐาน (base glass) ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เพียงพอต่อการเกิดนิวเคลียส (nucleation) และการเติบโตของผลึก (crystal growth) ในแก้ว [35] โดยปกติแล้วแก้วเซรามิกจะมีสมบัติที่ดีกว่าแก้วโดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกล และแก้วเซรามิกนี้ยังไม่มีรูพรุนเหมือนเซรามิกทั่วไปอีกด้วย ดังนั้นเมื่อเทียบกับวิธีการขึ้นรูปของเซรามิกแบบดั้งเดิมที่ค่อนข้างยุ่งยาก และมีหลายขั้นตอน การขึ้นรูปโดยวิธีทางแก้วเซรามิกนี้จึง

ง่ายกว่าและสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายแบบยิ่งขึ้น เช่นวิธีการหล่อแบบ (casting) หรือการอัดรีด (extrusion) เป็นต้น แก้วเซรามิกในยุคแรกได้พัฒนามากจากบริษัทผลิตแก้วชั้นนำระดับโลก ซึ่งก็คือ บริษัท คอร์นิงกลาสส์เวิร์ค (Corning glass Work) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีประวัติในการพัฒนาและเป็นต้นคิดในการประดิษฐ์แก้วที่นำไปประยุกต์ในด้านต่างๆ มากมาย โดยผู้ที่ค้นพบแก้วเซรามิกเป็นคนแรกคือ ดร. สแตนลีย์ โดนัลด์ สตุคีย์ (Dr. Stanley Donald Stookey) ซึ่งเป็นนักวิจัยในบริษัทนี้ เขาพบว่า แก้วเซรามิกสามารถที่จะสร้างมาจากการหลอมแก้วด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและเปลี่ยนแก้วเป็นเซรามิกที่มีเกรนขนาดเล็กมากๆ (fine grained ceramic) โดยกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) [36] ซึ่งในช่วงแรกการประยุกต์แก้วเซรามิกโดยส่วนมากจะนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงมาก อย่างเช่น ภาชนะอบอาหาร กระจกในยานอวกาศ หรือ อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งแก้วเซรามิกเหล่านี้สามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง การเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน และยังทนต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี หลังจากนั้นเป็นต้นมาก็ได้มีการพัฒนาแก้วเซรามิกอย่างต่อเนื่อง ในแก้วหลายระบบ ตัวอย่างเช่น แก้วในระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [21] ที่ประกอบไปด้วยผลึกสารละลายของแข็งของเฟสเบตาควอตซ์ (β -quartz) หรือ เบตาซูดอมีน (β -sudomene) ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำมากจนเกือบมีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถนำไปใช้ประยุกต์เป็นภาชนะประกอบอาหารที่อุณหภูมิสูง และเนื่องจากแก้วเซรามิกชนิดนี้มีผลึกที่มีขนาดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร ทำให้มีสมบัติทางแสงที่ดี เช่นมีค่าแสงหักเหสองแนว (birefringence) ที่ต่ำทำให้แสงกระเจิงออกจากแก้วได้น้อยมาก จึงสามารถไปทำเป็นกระจกที่ใช้กับกล้องส่องทางไกล หรืออุปกรณ์ที่รังสีอินฟราเรดทะลุผ่านได้ดี เป็นต้น ส่วนแก้วในระบบที่มีผลึกของฟลูออไรต์ (fluorite) ก็สามารถนำไปประยุกต์เป็นแก้วเซรามิกเชิงกล (machinable glass-ceramic) ซึ่งเป็นแก้วที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก จนกระทั่งสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายยิ่งขึ้น เช่น การกลึงเหมือนกับโลหะ นอกจากแก้วเซรามิกจะสามารถนำไปประยุกต์ทั้งทางด้านแสงและทางกลได้นั้น ยังมีการนำกระบวนการแบบแก้วเซรามิกไปประยุกต์ในงานทางด้านต่างๆ อีกมากมาย ในที่นี้เนื่องจากมีความสนใจในงานทางด้านไฟฟ้าและทางการแพทย์เป็นสำคัญ เนื่องจากยังมีความจำเป็นในการศึกษาพัฒนาวัสดุใน 2 กลุ่มนี้ให้มีสมบัติที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ในอนาคต

2.4.2 งานวิจัยทางด้านวัสดุชีวภาพ

ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูก (bone grafts) มาใช้จริงในร่างกายมนุษย์กันอย่างกว้างขวางในวงการแพทย์ ทั้งนี้เป็นการเพิ่มคุณภาพชีวิตและยืดอายุขัยของมนุษย์ให้ยาวนานขึ้น นักวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์และทางการแพทย์จึงมีความสนใจในการศึกษาวัสดุชนิดนี้มาอย่างต่อเนื่อง เซรามิกชีวภาพ (bioceramics) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากวัสดุหนึ่ง ซึ่งได้มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุชนิดนี้มากกว่าครึ่งศตวรรษ [37] จนสามารถผลิตและนำมาใช้ในการ

ปลูกถ่ายทดแทนกระดูกได้จริงในที่สุด วัสดุเซรามิกชีวภาพสามารถแบ่งแยกได้ตามการยึดติดกับเนื้อเยื่อ (tissue attachment) เป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังตาราง 2.7

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดการยึดติดกับเนื้อเยื่อของเซรามิกชีวภาพและชนิดของเซรามิกชีวภาพ [35]

ชนิดของการยึดติดกับเนื้อเยื่อ	ชนิดเซรามิกชีวภาพ
เซรามิกเนื้อแน่น ปราศจากรูพรุนและเจือย ซึ่งยึดติดกับกระดูกได้ โดยการเติบโตของกระดูกในพื้นที่แบบไม่ปรกติที่ได้ทำการยึดติดกับกระดูกส่วนที่สูญเสียด้วยวิธีการเชื่อมด้วยซีเมนต์หรือการอัดเข้าไปในส่วนของกระดูกที่มีความบกพร่อง	อะลูมินา (Al_2O_3) เซอร์โคเนีย (ZrO_2)
เซรามิกที่มีรูพรุน โดยจะมีการเชื่อมต่อแบบเชิงกลกับกระดูกเดิม ด้วยการเติบโตของกระดูกและเนื้อเยื่อใหม่ในรูพรุนของเซรามิกชีวภาพนั้นๆ	ไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบพรุน โลหะที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์
เซรามิก แก้วและแก้วเซรามิกที่มีพื้นผิวแบบตอบสนองได้ดีต่อเนื้อเยื่อ ซึ่งจะยึดติดกับกระดูกเดิม โดยตรงด้วยพันธะเคมี	แก้วและแก้วเซรามิกชีวภาพ ไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบแน่น
เซรามิกหรือแก้วที่สามารถสลายตัวได้ในเนื้อเยื่อ (resorbable ceramics and glasses) ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของผงหรือก้อนของแข็ง ซึ่งในที่สุดจะถูกแทนที่ด้วยกระดูกจริงอย่างช้าๆ	แคลเซียมซิลเฟต ไตรแคลเซียมฟอสเฟต เกลือแคลเซียมฟอสเฟต แก้วชีวภาพ (bioactive glasses)

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ วิธีการทดลอง รวมถึง ขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ชิ้นงาน ซึ่งได้แก่ แก้ว แก้วเซรามิก และเซรามิกที่เตรียมได้ ทั้งทางด้านการศึกษาวิวัฒนาการของเฟส การวิเคราะห์ทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และศึกษาสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไตแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) ความบริสุทธิ์ 98% ผลิตโดยบริษัท Fluka
- 3.1.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ความบริสุทธิ์ 98.5% ผลิตโดยบริษัท Riedel-de Haën
- 3.1.3 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.8% ผลิตโดยบริษัท Riedel-de Haën
- 3.1.4 แบริียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ความบริสุทธิ์ 98.0% ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.5 ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.8% ผลิตโดยบริษัท Riedel-de Haën
- 3.1.6 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ความบริสุทธิ์ 99.5% ผลิตโดยบริษัท Merck
- 3.1.7 น้ำกลั่นไร้ประจุ (deionized)
- 3.1.8 ซิลิกาเจล (Silica gel blue)

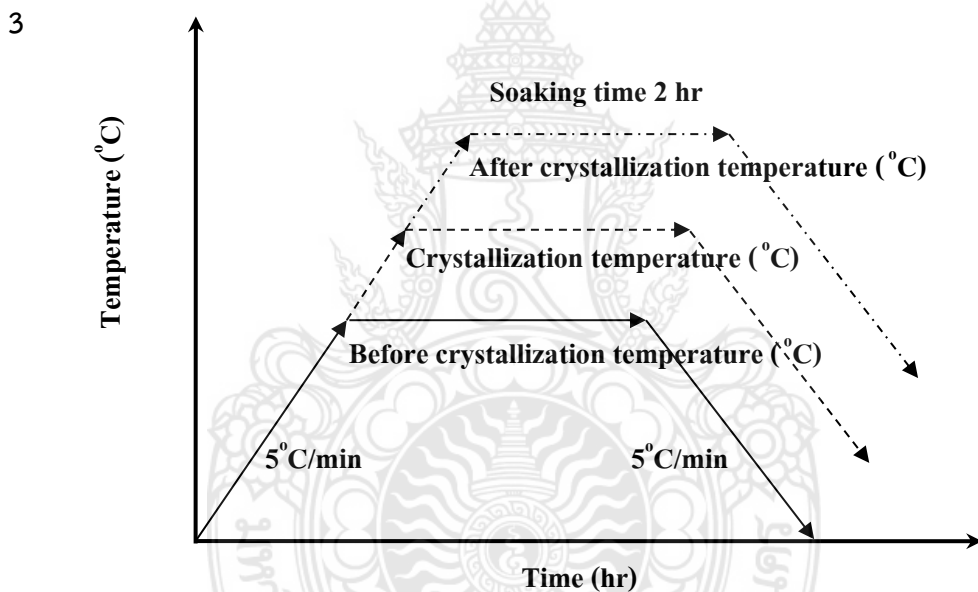
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ซ้อนตักสารเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)
- 3.2.2 ปีกเกอร์ขนาดต่างๆ
- 3.2.3 ถ้วยอะลูมินา (alumina crucible) พร้อมฝาปิด
- 3.2.4 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel plate)
- 3.2.5 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)
- 3.2.6 อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากความร้อน ประกอบด้วย ถุงมือหนัง หน้ากาก ร้องเท้า เสื้อคลุม และอุปกรณ์คีบถ้วยอะลูมินาจากเตาหลอมแก้ว
- 3.2.7 ปากคีบ (forceps) เหล็กกล้าไร้สนิม
- 3.2.8 โกร่งบดสารขนาดเล็ก (agate mortar)
- 3.2.9 กระปุกพลาสติกสำหรับใส่สารแบบผง

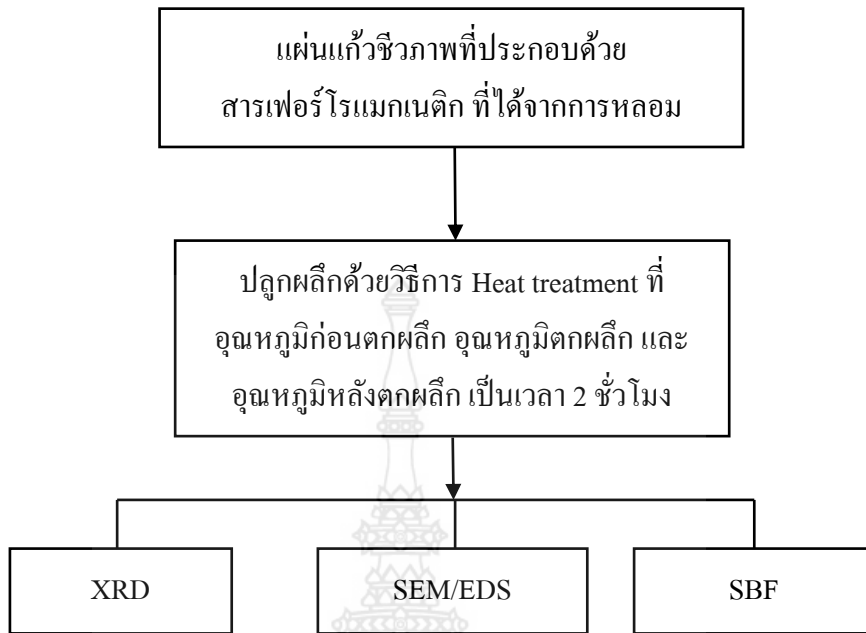
- 3.2.10 จานเพาะเชื้อ
- 3.2.11 โถดูดความชื้น (desiccators)
- 3.2.12 แม่พิมพ์ (mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร
- 3.2.13 เครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮดรอลิก รุ่น Carver 3853-0 ผลิตโดยบริษัท CARVER
- 3.2.14 กระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000 และ 1200
- 3.2.15 ผงซัลเฟอร์ขนาด 0.1 ไมครอน
- 3.2.16 แท่งทองเหลือง (stub)
- 3.2.17 เทปคาร์บอน (carbon tape)
- 3.2.18 กระดาษชั่งสาร (paper weight)
- 3.2.19 ขวดบีบสำหรับใส่ เอทิลแอลกอฮอล์
- 3.2.20 แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)
- 3.2.21 เม็ดบดเซอร์โคเนียทรงกลม
- 3.2.22 เตาแผ่นความร้อน (hot plate)
- 3.2.23 เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม) รุ่น HM-300 ผลิตโดยบริษัท AND
- 3.2.24 เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม) ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดค่าความหนาแน่น รุ่น HM-300 ผลิตโดยบริษัท AND
- 3.2.25 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ระบบดิจิทัล ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
- 3.2.26 เครื่องบดไฟฟ้า ผลิตโดยบริษัท Retsch
- 3.2.27 เครื่องขัดไฟฟ้า ผลิตโดยบริษัท Struers
- 3.2.28 เตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิ 120°C รุ่น UE-300 ผลิตโดยบริษัท Memmert
- 3.2.29 เตาเผาไฟฟ้า (furnace) สำหรับหลอมแก้ว
- 3.2.30 เตาเผาไฟฟ้า (furnace) สำหรับเผาผนึก รุ่น Type 46100 ผลิตโดยบริษัท SYBRON
- 3.2.31 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer) รุ่น D8 ADVANCE ผลิตโดยบริษัท Bruker AXS
- 3.2.32 เครื่อง High Temperature DTA Cell Adaptor รุ่น DTA model 673-4 ผลิตโดยบริษัท Stanton redcroft
- 3.2.33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) ชนิด Low vacuum รุ่น JSM 5910LV ผลิตโดยบริษัท JEOL
- 3.2.34 เครื่อง sputtering รุ่น JFC-1100E ผลิตโดยบริษัท JEOL
- 3.2.35 สารละลายที่คล้ายกับของเหลวของมนุษย์ (simulate body fluid: SBF)

3.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้ คือ ขั้นตอนที่ 1 จะกล่าวถึงการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ แก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass) แก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass-ceramic) และเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioceramic) ส่วนในขั้นตอนที่ 2 นั้นเป็นวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของชิ้นงานตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์ทางความร้อน การศึกษาวิวัฒนาการของเฟส สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และศึกษาสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ



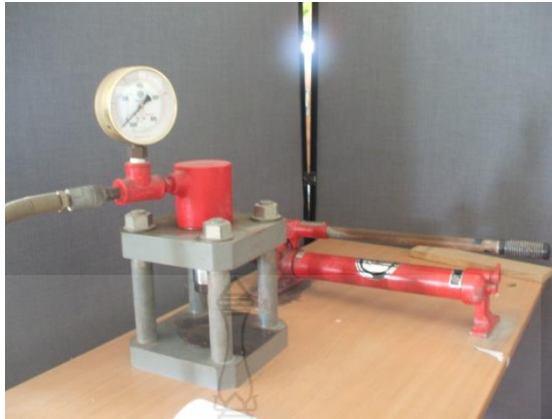
รูป 3.1 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก



รูป 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก



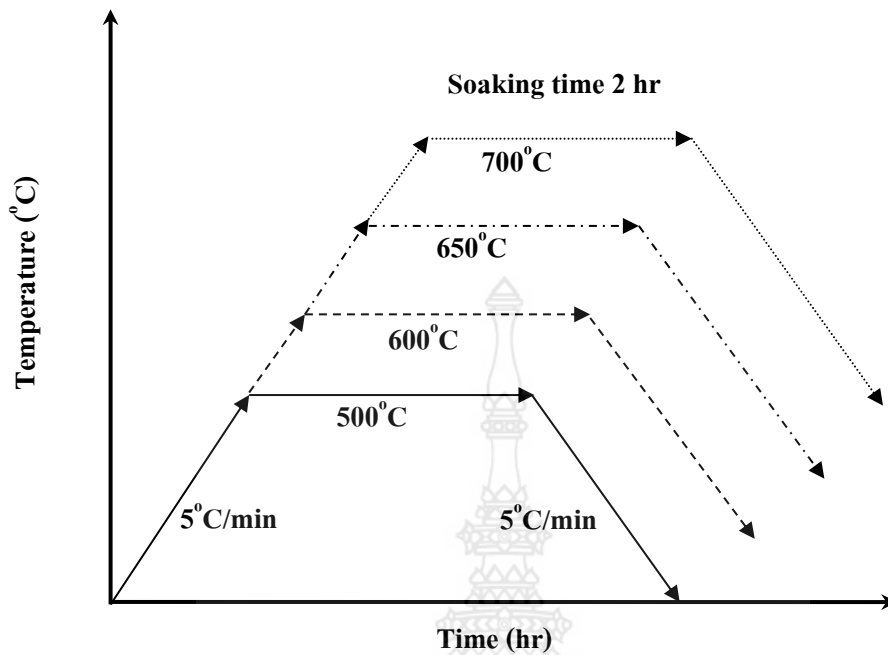
รูป 3.3 แม่พิมพ์ (punch and die) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร



รูป 3.14 เครื่องอัดไฮดรอลิก



รูป 3.5 ลักษณะการวางชิ้นงานตัวอย่างบนฝาของถ้วยหลอมแพลทินัม



รูป 3.6 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์เซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก

3.4 วิธีการวัดและการตรวจวิเคราะห์หลักคุณเฉพาะของสารตัวอย่าง (Characterization and Measurement Method)

หลังจากที่ได้ทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ แก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass) แก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass-ceramic) และเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioceramic) ด้วยการใช้น้ำอุณหภูมิต่างๆ แล้ว จึงนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทำการหาหลักคุณเฉพาะ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ทางความร้อน การตรวจสอบชนิดของเฟสที่ปรากฏ สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาคและศึกษาสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน (thermal analysis)

ในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาถึงรายละเอียดของพฤติกรรมทางความร้อนแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass) ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งมีจุดประสงค์ในการตรวจสอบหาสถานะของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกด้วยวิธีการทางความร้อน (heat treatment) โดยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน (thermal analysis) ที่ใช้ในการทดลองนี้คือเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (differential thermal analysis: DTA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการใช้ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุที่มีลักษณะเป็นผง ดังนั้น ก่อนการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนจะต้องทำการบดชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ให้เป็นผงก่อน จากนั้นใช้เครื่อง High Temperature DTA Cell Adaptor (ดังแสดงในรูป 3.20) ทำการตรวจสอบผงที่ได้โดยใช้เงื่อนไขในการทดสอบดังนี้ คือ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 700°C ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิคือ 10°C/min และใช้ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นตัวเทียบมาตรฐาน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมของการปลูกผลึกสารเฟอร์โรแมกเนติกลงในแก้วชีวภาพต่อไป



รูป 3.7 เครื่อง High Temperature DTA Cell Adaptor

3.4.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

เทคนิคนี้เป็นการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของสารโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนผิววัสดุซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปผลึก และมีการจัดเรียงของอะตอมอย่างมีระเบียบที่มีลักษณะเป็นระนาบ (hkl) จะทำให้เกิดการกระเจิง (scattering) ของรังสีเอกซ์เกิดขึ้น หลังจากนั้นรังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน โดยที่มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ออกจากผลึกจะเป็นลักษณะเฉพาะตามชุดระนาบนั้นๆ ดังนั้น เมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด นอกจากนี้รังสีที่ตรวจจับได้นั้นยังสามารถบอกได้ว่า มาจากระนาบใดและมีปริมาณเท่าใดอีกด้วย โดยดูจากค่ามุม (Bragg's angle) และความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งสารแต่ละชนิดก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะ-เฉพาะแตกต่างกันไปตามลักษณะของโครงสร้าง

สำหรับการตรวจสอบนั้น จะมีขั้นตอนในการเตรียมสารตัวอย่างดังต่อไปนี้ คือ

1. นำผงและชิ้นงานที่เตรียมได้มาบรรจุใส่ในแผ่นบรรจุชิ้นงาน (sample holder) จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer (ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นผงให้นำมาบดให้ละเอียดแล้วบรรจุลงในแผ่นบรรจุสารตัวอย่างก่อน จากนั้นเกลี่ยผงตัวอย่างให้เรียบโดยใช้กระจกสไลด์)
2. เริ่มทำการทดสอบโดยให้มุมเริ่มต้นที่ 2θ เท่ากับ 10 องศา และมุมสุดท้าย 2θ เท่ากับ 60 องศา
3. ผลที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลในแฟ้ม JCPDS เพื่อตรวจสอบเฟสองค์ประกอบและความบริสุทธิ์ของชิ้นงานตัวอย่างที่เกิดขึ้นโดยนำค่ามุม 2θ ที่ได้มาหาค่า d-spacing จากกฎของแบรค ดังสมการที่ 3.1

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.1)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ในกรณีนี้ ($\lambda = 1.54439 \text{ \AA}$)



รูป 3.8 X-ray diffractometer

3.4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค จะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิก แคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูพรุนด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยชิ้นงานแก้วเซรามิกจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในโหมดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค EDS อีกด้วย เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ประกอบการอธิบายถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเม็ดสารที่เตรียมได้ รวมถึงลักษณะและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนในเม็ดสารที่เตรียมได้ โดยมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ดังนี้

1. นำชิ้นงานแก้วเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วนำไปขัดต่อด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.1 ไมครอน จนผิวหน้าของชิ้นงานมีความมันวาวคล้ายกระจก จากนั้นทำความสะอาดด้วยการใช้เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดเศษสิ่งสกปรกให้หลุดออกไปจากผิวชิ้นงาน แล้วนำชิ้นงานไปอบในตู้อบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการกำจัดความชื้นออกไปจากชิ้นงาน
2. ในส่วนของชิ้นงานที่เป็นเซรามิกนั้นจะถูกนำไปทำความสะอาดด้วยการใช้เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดเศษสิ่งสกปรกให้หลุดออกไปจากผิวชิ้นงาน แล้ว

- นำไปอบในตู้อบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานแห้งเช่นเดียวกับชิ้นงานที่เป็นแก้วเซรามิก จากนั้นทำการติดชิ้นงานตัวอย่างบนแท่งทองเหลือง (stub) ด้วยเทปคาร์บอน
3. ทำการเคลือบผิวของชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยทองคำ โดยใช้เทคนิค sputtering เป็นเวลานาน 1 นาที ก่อนที่จะนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมดต่างๆ ตามความเหมาะสม เพื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานต่อไป



รูป 3.9 เครื่อง sputtering รุ่น JFC-1100E



รูป 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด Low vacuum (JEOL JSM 5910LV)

3.4.4 การศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Bioactivity analysis)

การศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพในหลอดทดลอง (In vitro bioactivity analysis) เป็นการศึกษาการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของชิ้นงานตัวอย่างโดยทำการทดลองในหลอดทดลอง เพื่อศึกษาว่าชิ้นงานตัวอย่างมีความสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อมนุษย์ และศึกษาถึงความสามารถในการเจริญเติบโตของชั้นอะพาไทต์บนชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อทำการแช่ชิ้นงานในสารละลายจำลองไอออนพลาสมาของเลือดมนุษย์ (Simulated Body Fluid, SBF) ที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 7.4 และทำการเก็บไว้ในห้องที่รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 36.5 °C เพื่อจำลองสภาวะที่ใกล้เคียงกับร่างกายมนุษย์

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอผลการทดลอง จากการศึกษาแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass-ceramic) ซึ่งในงานวิจัยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาขั้นตอน และวิธีการเตรียมแบบแก้วเซรามิก รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนศึกษาถึงสมบัติในด้านต่างๆ ของแก้วเซรามิกดังกล่าว เช่น สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางความร้อน และสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาต่อในด้านการเตรียมแบบเซรามิก ตลอดจนการวิเคราะห์สมบัติต่างๆอีกด้วย โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass)

ในการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass-ceramic) นั้น จะต้องเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass) ก่อน โดยเริ่มจากการหลอมแก้วชีวภาพระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ($P_2O_5-CaO-Na_2O$ bioglass) (ดังรูป 4.1) และแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) (ดังรูป 4.2) เข้าด้วยกัน ซึ่งใช้อัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) เท่ากับ 5, 10, 15, and 20 wt% ตามลำดับ โดยทำการหลอมที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (quenched) ลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วนำแก้วที่ได้ไปบดเป็นผงเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA และวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก(ferromagnetic bioglass-ceramic) ต่อไป



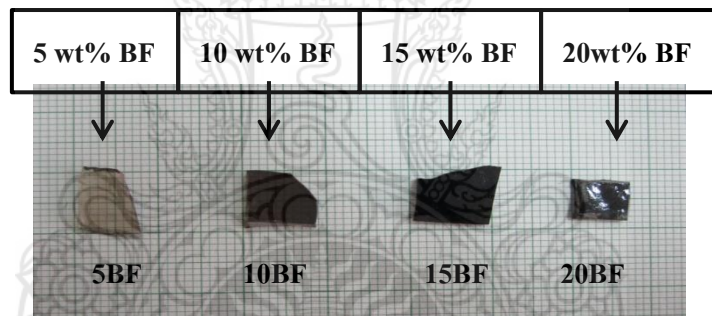
รูป 4.1 แสดงแก้วชีวภาพระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5 -CaO- Na_2O bioglass) ที่เตรียมได้จากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน 3.3.1.1 (ขั้นตอนสอง)



รูป 4.2 แสดงสารแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ที่เตรียมได้จากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน 3.3.1.1 (ขั้นตอนแรก)

4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

จากการเตรียมขึ้นด้วยวิธีการหลอมแก้วนั้น พบว่า ลักษณะของชิ้นงานแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกที่เตรียมได้จากการหลอมที่เงื่อนไขแตกต่างกัน คือ อัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะมีลักษณะที่ต่างกัน โดยชิ้นงานที่ขึ้นงานแก้วที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะโปร่งใส มีสีดําอ่อนๆ ซึ่งความโปร่งใสของชิ้นงานแก้วจะลดลงและสีดําของชิ้นงานแก้วจะเข้มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.3 โดยที่ชิ้นงานแก้วที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะทึบแสงและผิวมีความมันวาว ซึ่งจากลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันนี้ อาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่มากขึ้นและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับบรรยากาศภายนอกในขั้นตอนการอบอ่อน ซึ่งทำให้สีของแก้วที่ได้แตกต่างกัน



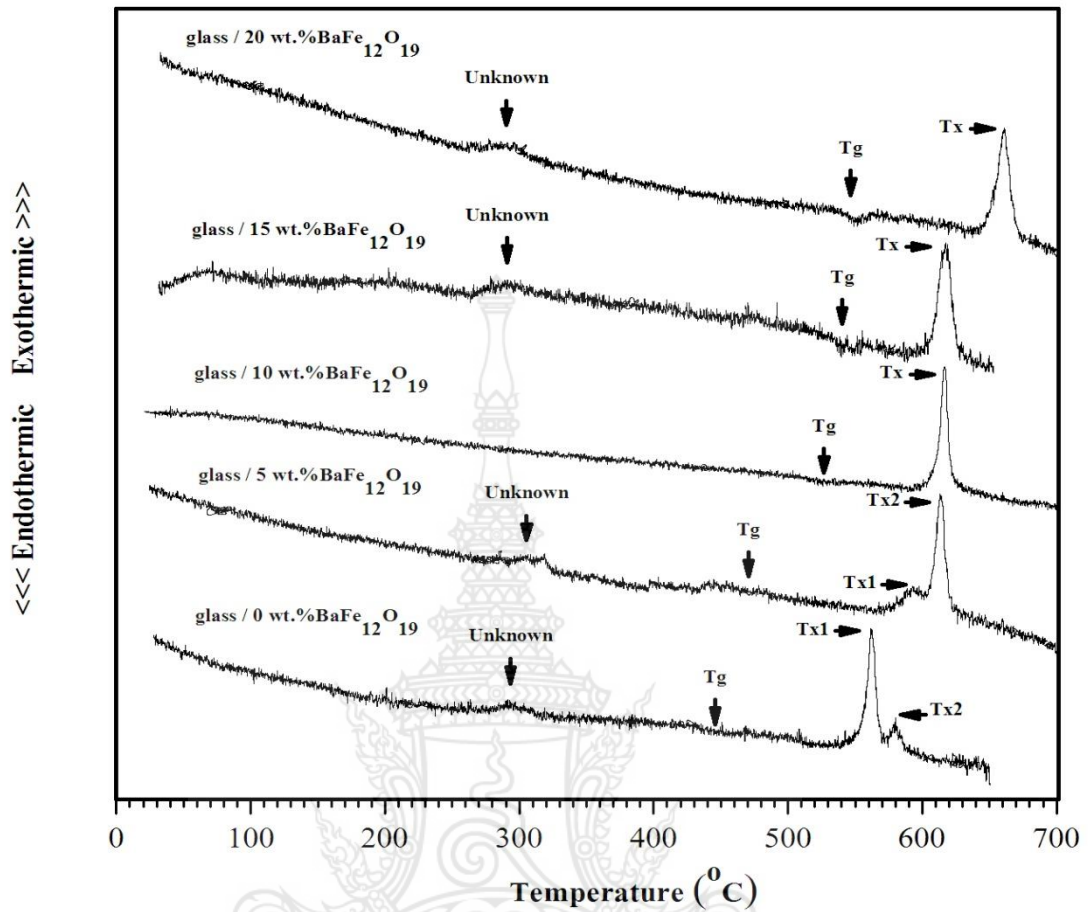
รูป 4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่างๆ

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA

จากการตรวจสอบผงแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกที่เตรียมได้ โดยใช้การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 องศาเซลเซียส) ไปจนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้ผงอลูมินา (Al_2O_3) เป็นตัวเทียบมาตรฐาน พบว่า มีรูปแบบดังแสดงในรูป 4.4

คือ เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของผงแก้ว โดยมีทั้งกระบวนการดูด (endothermic) และคายพลังงาน (exothermic) เกิดขึ้น ดังนี้คือ

- แก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ พบพีคของการคายพลังงานอยู่ 3 พีค คือ ที่อุณหภูมิ 295 562 และ 580 องศาเซลเซียส ซึ่งพีคนี้จะแสดงถึงอุณหภูมิการระเหยของสารอินทรีย์ อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้วครั้งที่ 1 (T_{x1}) และอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้วครั้งที่ 2 (T_{x2}) ตามลำดับ พบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิ 445 องศาเซลเซียส
- แก้วที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบพีคของการคายพลังงานอยู่ 3 พีค คือ ที่อุณหภูมิ 304 592 และ 612 องศาเซลเซียส ซึ่งพีคนี้จะแสดงถึงอุณหภูมิการระเหยของสารอินทรีย์ อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้วครั้งที่ 1 (T_{x1}) และอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้วครั้งที่ 2 (T_{x2}) ตามลำดับ ซึ่งยืนยันการเปลี่ยนเฟสในแก้วสองครั้งได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและพบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส
- แก้วที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบพีคของการคายพลังงานอยู่ 1 พีค คือ ที่อุณหภูมิ 616 องศาเซลเซียส ซึ่งพีคนี้จะแสดงถึงอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้ว (T_x) และพบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส
- แก้วที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก พบพีคของการคายพลังงานอยู่ 2 พีค คือ ที่อุณหภูมิ 290 และ 618 องศาเซลเซียส ซึ่งพีคนี้จะแสดงถึงอุณหภูมิการระเหยของสารอินทรีย์ อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้ว (T_x) ตามลำดับ และพบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส
- แก้วที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบพีคของการคายพลังงานอยู่ 2 พีค คือ ที่อุณหภูมิ 290 และ 660 องศาเซลเซียส ซึ่งพีคนี้จะแสดงถึงอุณหภูมิการระเหยของสารอินทรีย์ อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสในแก้ว (T_x) ตามลำดับ และพบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส

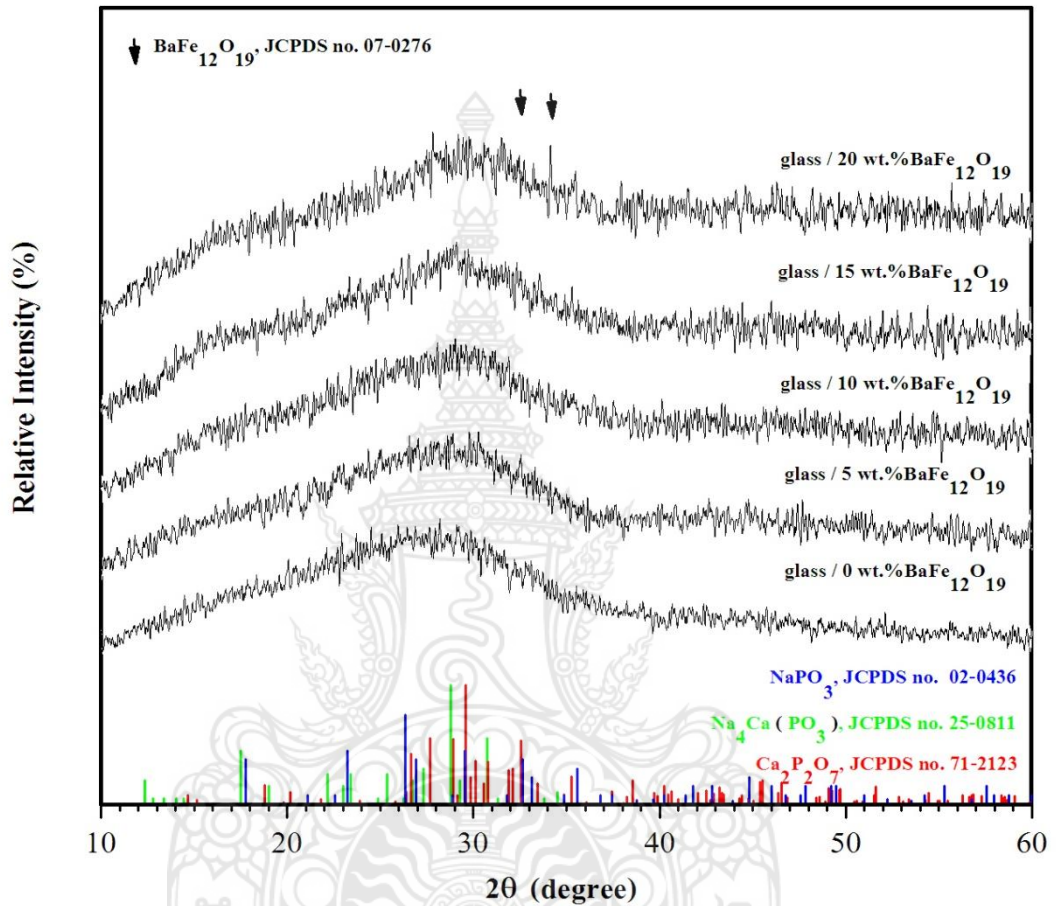


รูป 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้ว
ที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่างๆ

4.1.3 ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD

จากการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของผงแก้วที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขที่ต่างกันอย่าง
เทคนิค XRD พบว่าแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกที่ผ่านการหลอมนั้น ไม่มีความ
เป็นผลึกอยู่เลยหรืออาจกล่าวได้ว่ามีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) หรือแก้ว โดยสังเกตได้จาก
ลักษณะของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 4.5 คือ เป็นพีคกว้าง (broad) แบบอ
สัณฐาน ซึ่งเมื่อนำไปตรวจสอบเฟสองค์ประกอบโดยรวมที่เกิดขึ้นด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก
JCPDS พบว่า เฟสที่เกิดขึ้น เป็นเฟสที่มีความสอดคล้องกับ เฟส $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)_6$, $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ และ
 NaPO_3 ซึ่งตรงกับข้อมูล JCFDS หมายเลข 25-0811 71-2123 และ 02-0436 ตามลำดับ โดยที่
ภาพรวมของพีคมีแนวโน้มจะไปทางขวาเพิ่มขึ้นอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น ตามลำดับ พบว่า

เฟสที่เกิดขึ้นเป็นเฟสที่มีความสอดคล้องกับ เฟส $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 07-0276



รูป 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแก้วที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่างๆ

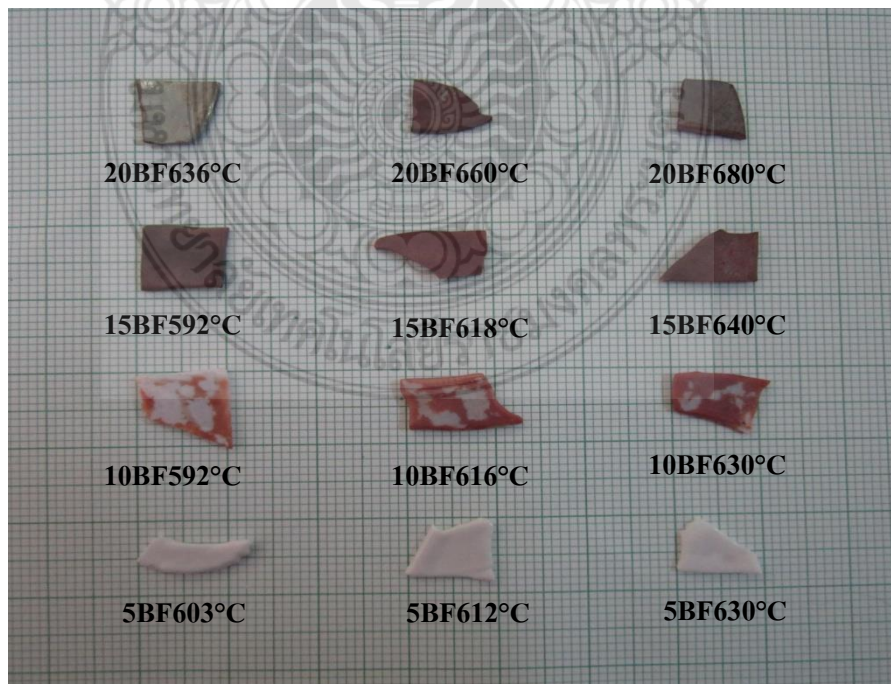
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic bioglass-ceramic)

ในการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกนั้น จะอาศัยข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนมาใช้ในการพิจารณาเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกด้วยวิธีการทางความร้อน ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่มีอัตราส่วนแบบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก คือ 612 616 618 และ 660

องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำการปลูกผลึกลงในแก้วด้วยวิธีการทางความร้อน (heat treatment) ตามเงื่อนไขของอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วนำแก้วเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาพ และและศึกษาสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ตามลำดับ

4.2.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

จากการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ลักษณะของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่เตรียมได้จะมีลักษณะที่บดแสงและมีสีที่แตกต่างกัน ดังแสดงรูป 4.6 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดผลึกขึ้นภายในแก้ว และสีที่แตกต่างกันของชิ้นงานแก้วเซรามิกเป็นผลมาจากอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่มากขึ้นและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับบรรยากาศภายนอกในขั้นตอนการปลูกผลึก ซึ่งทำให้สีของแก้วเซรามิกที่ได้แตกต่างกัน



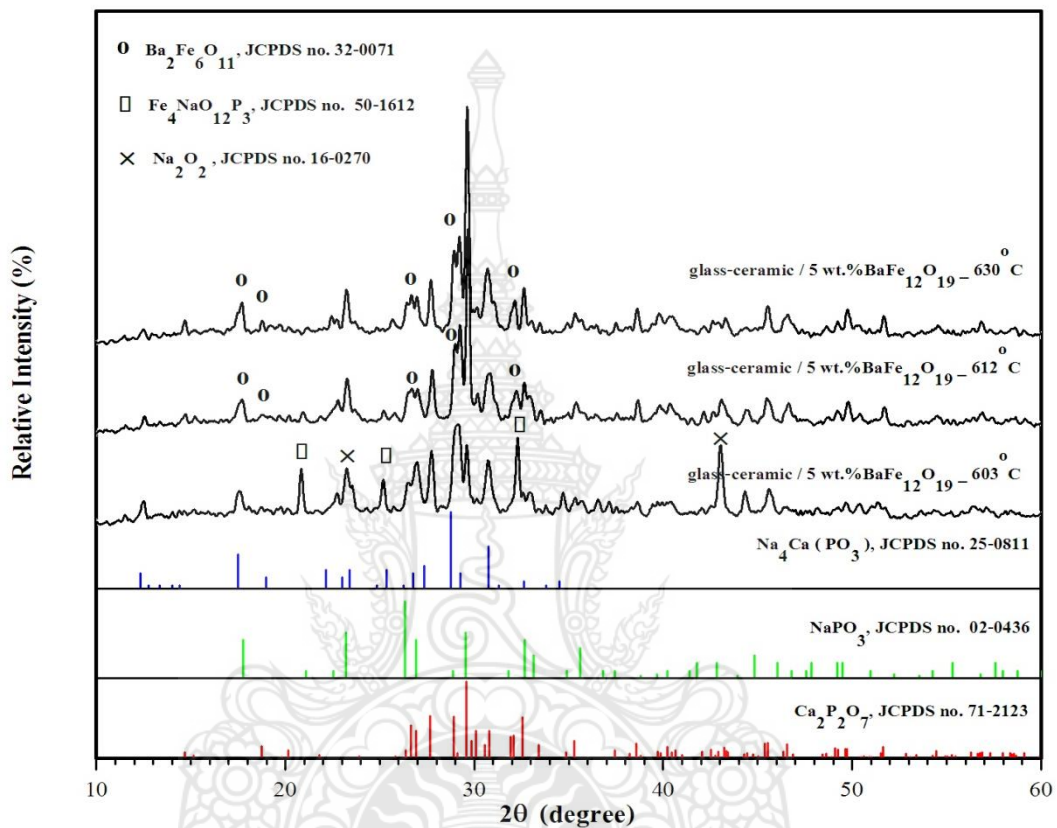
รูป 4.6 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่ผ่านการปลูกผลึกด้วยเงื่อนไขต่างๆ

4.2.2 ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD

จากการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 4.7 4.8 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ ซึ่งแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกถูกปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่างกัน คือ อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่า

- แก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก คือที่อุณหภูมิ 603 612 และ 630 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 4.7 พบว่าแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 603 องศาเซลเซียส มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นพีคที่ไม่ใช่เฟสเดียว โดยมีทั้งหมด 4 เฟส คือ แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 71-2123 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) โซเดียมแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 25-0811 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (monoclinic) โซเดียมไอรอนฟอสเฟต ($\text{Fe}_4\text{NaO}_{12}\text{P}_3$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 50-1612 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O_2) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 16-0270 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ตามลำดับ ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างไปจากแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 612 และ 630 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาเฟสที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ร่วมกับผลจากการวิเคราะห์ด้วย DTA จะพบว่า มีสอดคล้องกัน เพราะ พบการเกิดเฟสขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 595 องศาเซลเซียส และเกิดอีกเฟสหนึ่งขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 612 องศาเซลเซียสจากการวิเคราะห์ด้วย DTA ส่วนแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 612 และ 630 องศาเซลเซียส มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่คล้ายคลึงกัน โดยมีเฟสเกิดขึ้นทั้งหมด 3 เฟส คือ แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 71-2123 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) แคลเซียมฟอสเฟต (NaPO_3) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 02-0436 ซึ่งไม่ระบุว่าผลึกมีโครงสร้างแบบไหน และ

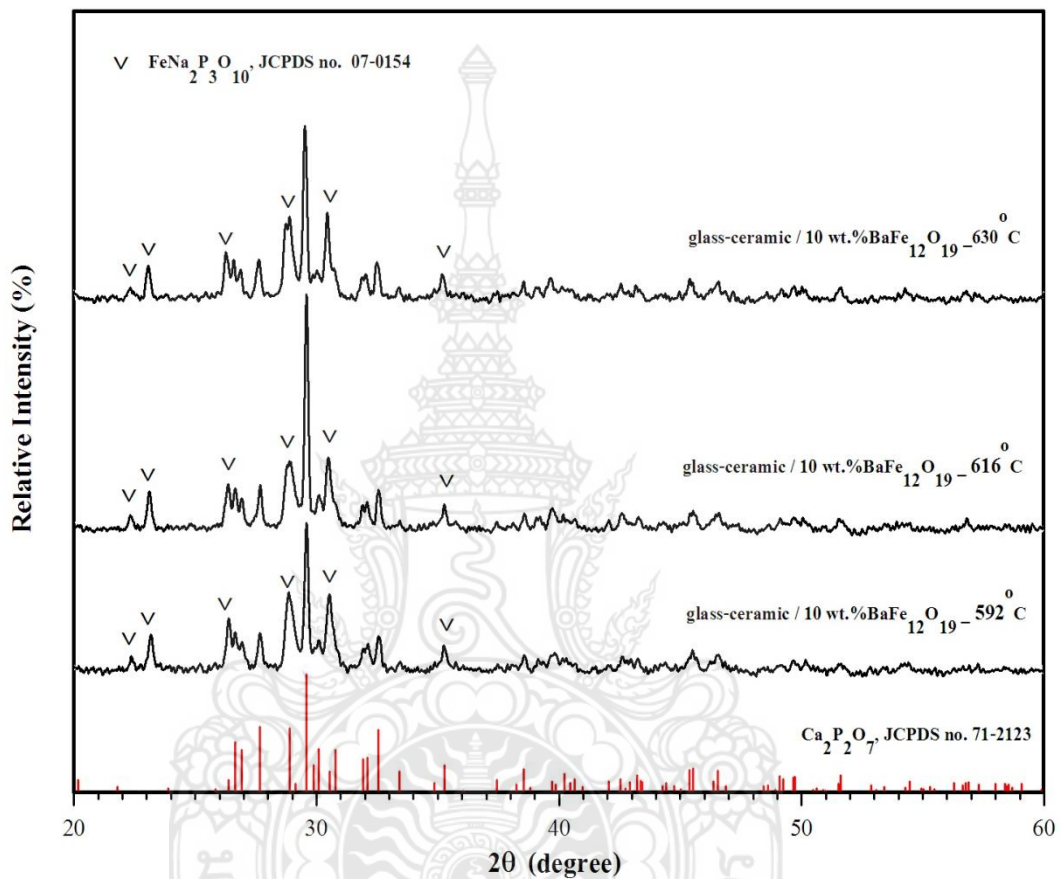
แบบเรียมออกไซด์ ($\text{Ba}_2\text{Fe}_6\text{O}_{11}$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 32-0071 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ตามลำดับ



รูป 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง

- แก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปลุกผลึกที่อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก คือที่อุณหภูมิ 592, 616 และ 630 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 4.8 พบว่าแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลุกผลึกทั้ง 3 อุณหภูมิ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเกิดขึ้นทั้งหมด 2 เฟส ซึ่งเป็นเฟสหลักและเฟสรองของแก้วเซรามิก โดยที่เฟสหลักของแก้วเซรามิก คือ แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 71-2123 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) และเฟสรองของแก้วเซรามิกที่เกิดขึ้น คือ ไอรอนโซเดียมฟอสเฟต ($\text{FeNa}_2\text{P}_3\text{O}_{10}$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS

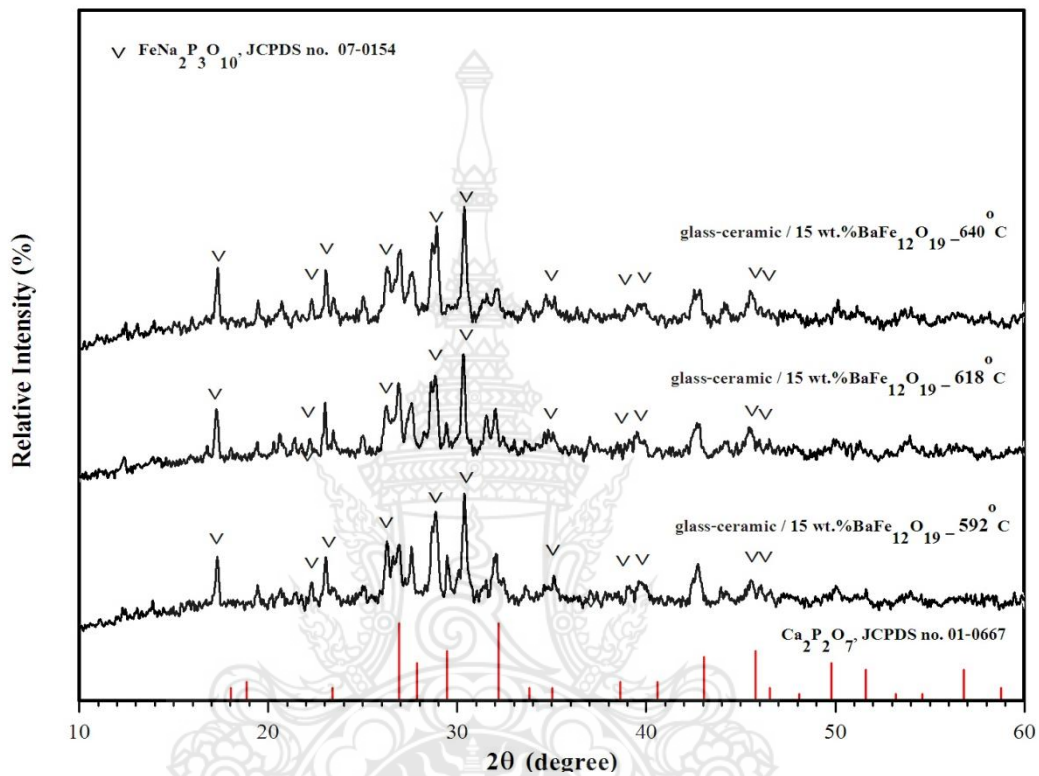
หมายเลข 07-0154 ซึ่งไม่ระบุว่าผลึกมีโครงสร้างแบบไหน ตามลำดับ โดยที่แก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 616 องศาเซลเซียส มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นพีกสูงที่สุด



รูป 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง

- แก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก คือที่อุณหภูมิ 592 618 และ 640 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 4.9 พบว่าแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกทั้ง 3 อุณหภูมิ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเกิดขึ้นทั้งหมด 2 เฟส ซึ่งเป็นเฟสหลักและเฟสรองของแก้วเซรามิก โดยที่เฟสหลักของแก้วเซรามิก คือ แคลเซียมฟอสเฟต($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-0667 ซึ่งไม่ระบุว่าผลึกมีโครงสร้างแบบไหน และเฟสรองของแก้วเซรามิกที่

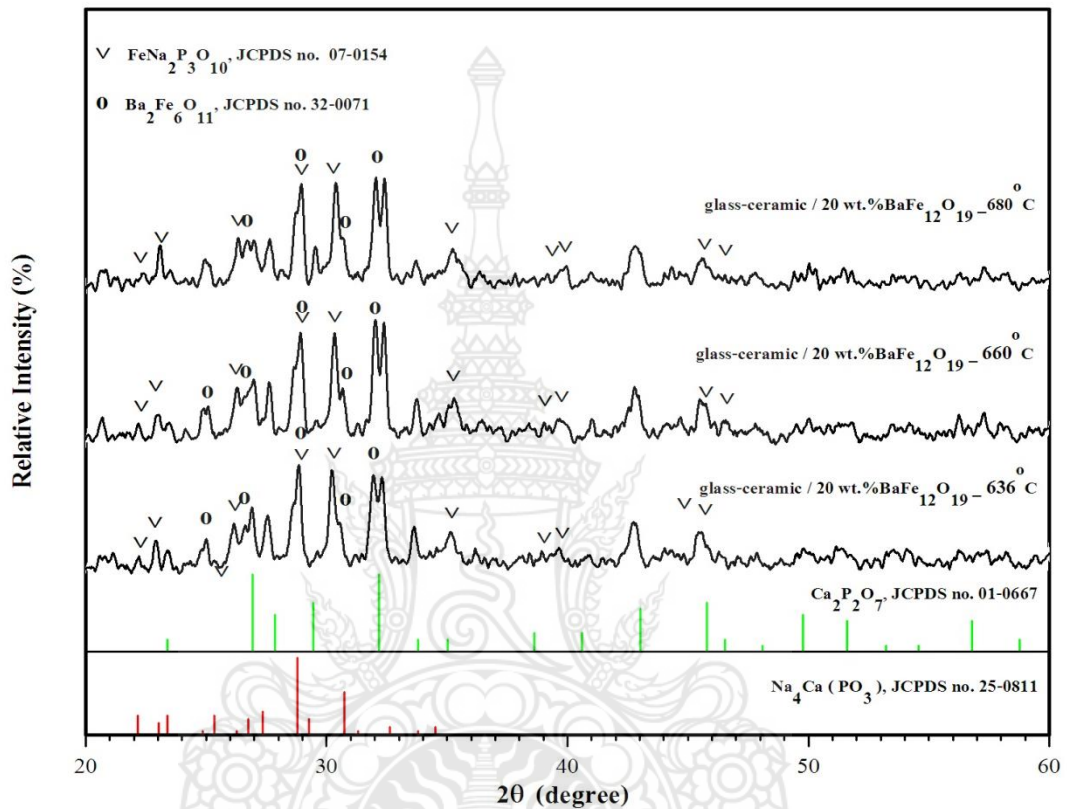
เกิดขึ้น คือ ไอรอนโซเดียมฟอสเฟต ($\text{FeNa}_2\text{P}_3\text{O}_{10}$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 07-0154 ซึ่งไม่ระบุว่าผลึกมีโครงสร้างแบบไหน ตามลำดับ โดยที่แก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 616 องศาเซลเซียส มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นพีคสูงที่สุด แสดงว่าเกิดการตกผลึกของแก้วเซรามิกในเงื่อนไขนี้มากที่สุด



รูป 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง

- แก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก คือที่อุณหภูมิ 636 660 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 4.10 พบว่าแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกทั้ง 3 อุณหภูมิ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเกิดขึ้นทั้งหมด 4 เฟส ซึ่งเป็นเฟสหลักของแก้วเซรามิก 2 เฟส และเฟสรองของแก้วเซรามิก 2 เฟส โดยที่เฟสหลักของแก้วเซรามิก คือ แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-0667 ซึ่งไม่ระบุว่าผลึกมีโครงสร้างแบบไหน และโซเดียมแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 25-0811 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (monoclinic) และเฟสรองของแก้วเซรามิกที่

เกิดขึ้น คือ ไอรอนโซเดียมฟอสเฟต ($\text{FeNa}_2\text{P}_3\text{O}_{10}$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 07-0154 ซึ่งไม่ระบุว่าผลึกมีโครงสร้างแบบไหน และแบเรียมออกไซด์ ($\text{Ba}_2\text{Fe}_6\text{O}_{11}$) ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 32-0071 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ตามลำดับ

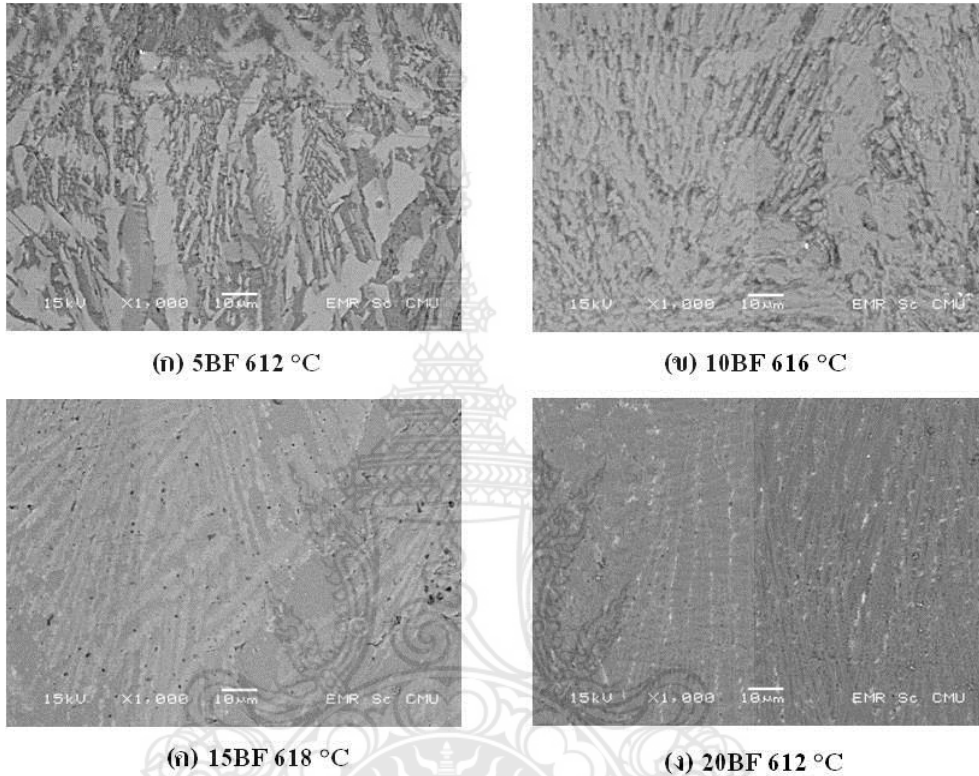


รูป 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 2 ชั่วโมง

4.2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิกประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยเทคนิค SEM

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปลุกผลึกที่อุณหภูมิ 612 616 618 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

กราด ในโหมด backscattered electron พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในแก้วเซรามิก มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบ dendrite และมักจะเริ่มเกิดขึ้นที่ผิว (surface crystallization) ก่อนเสมอ ซึ่งพบว่า ขนาดของผลึก และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจะลดลง เมื่อมีอัตราส่วนแบเรียมเฟอโรไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ที่มากขึ้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.11

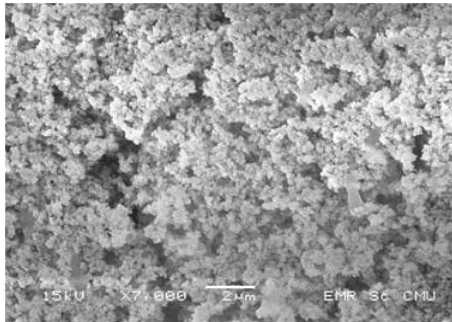


รูป 4.11 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานแก้วเซรามิกเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งผ่านการปลูกผลึก ที่อุณหภูมิตกผลึก นาน 2 ชั่วโมง

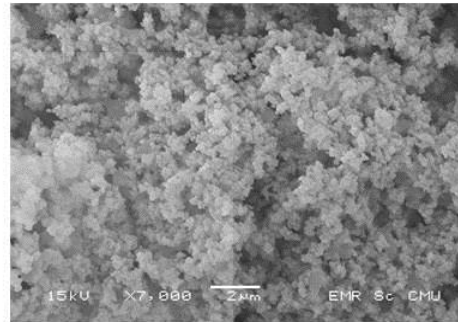
4.2.4 ผลจากการศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Bioactivity analysis)

จากการศึกษาพฤติกรรมในหลอดแก้วของแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอโรไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 612 616 618 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อแช่อยู่ในสารละลาย SBF ที่จำลองให้เหมือนกับพลาสมาของเลือดมนุษย์ ภายใต้สภาวะการควบคุมที่ 37 ± 1 องศาเซลเซียส และ pH 7.4 เป็นระยะเวลา 14 วัน ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่เกิดขึ้นโดยการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิก ที่ผ่านการแช่ในสารละลาย SBF แล้ว มีลักษณะดังแสดงในรูป 4.12 ซึ่งเห็นได้ชัดว่า ที่ผิวหน้าของแก้วเซรามิกมีการเปลี่ยนแปลง โดย

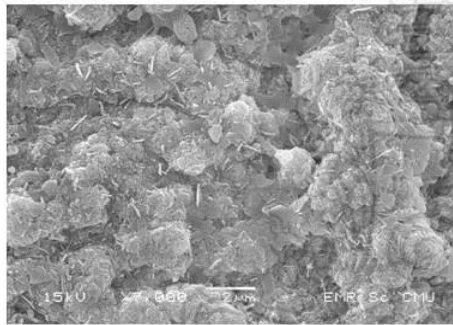
พบว่าผิวหน้าของแก้วเซรามิกถูกปกคลุมด้วยอนุภาคแคลเซียมฟอสเฟตทรงกลม ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นชั้นอะพาไทต์เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานแก้วเซรามิก โดยพบว่าชั้นอะพาไทต์ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มจะลดลง เมื่อมีอัตราอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ในแก้วเซรามิกมากขึ้น



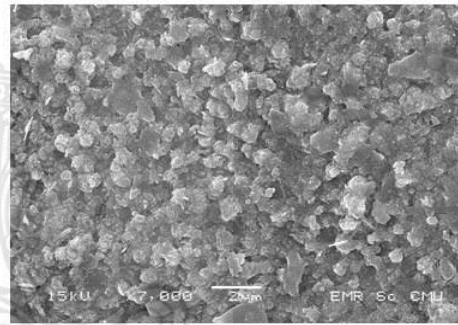
(ก) 5BF 612 °C



(ข) 10BF 616 °C



(ค) 15BF 618 °C



(ง) 20BF 612 °C

รูป 4.12 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานแก้วเซรามิกเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งผ่านการแช่สารละลาย SBF เป็นเวลา 14 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติก ในระบบแก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ด้วยวิธีการแบบแก้ว โดยเริ่มจากการหลอมแก้วชีวภาพระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5 -CaO- Na_2O bioglass) และแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) เข้าด้วยกัน โดยมีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยกำหนดเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้หลอมที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (quenched) ลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วนำแก้วที่ได้นั้นไปบดเป็นผงเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA และวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติก ต่อไป ซึ่ง สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1. จากการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติกที่เตรียมได้ มีลักษณะการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์เป็นแบบออสัญฐาน

2. จากการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการตกผลึกของแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก คือ ที่อุณหภูมิ 612 616 618 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากนั้นนำแก้วชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติก ที่ผ่านการหลอม มาทำการปลูกผลึกลงในแก้วด้วยวิธีการทางความร้อน (heat treatment) ตามเงื่อนไขของอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิก่อนการตกผลึก อุณหภูมิตกผลึก และอุณหภูมิหลังการตกผลึก ตามลำดับ แล้วนำแก้วเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

3. แก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaFe_{12}O_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมได้จากการปลูกผลึกด้วยวิธีการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 612 616 618 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจากการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นฟิสิกที่ไม่ใช่เฟสเดียว ซึ่งประกอบด้วยฟิสิกหลักและฟิสิกรองจำนวนมาก โดยที่ฟิสิกหลักเป็นฟิสิกของแก้ว

ฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับเฟส $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)$ NaPO_3 ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 71-2123 25-0811 และ 02-0436 ตามลำดับ ส่วนพีคออกเป็นพีคที่ได้จากการเติมแบเรียมเฟอร์ไรท์ ซึ่งสอดคล้องกับเฟส $\text{Fe}_4\text{NaO}_{12}\text{P}_3$ $\text{Ba}_2\text{Fe}_6\text{O}_{11}$ และ $\text{FeNa}_2\text{P}_3\text{O}_{10}$ ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 50-1612 32-0071 และ 07-0154 ตามลำดับ

4. จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติก พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในแก้วเซรามิก มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบ dendrites และมักจะเริ่มเกิดขึ้นที่ผิว (surface crystallizations) ก่อนเสมอ และยังพบว่าขนาดของผลึก และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจะลดลง เมื่อมีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ในแก้วเซรามิกที่มากขึ้น ตามลำดับ

5. จากการศึกษาพฤติกรรมในหลอดแก้วของแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก พบว่า ผิวหน้าของแก้วเซรามิกถูกปกคลุมด้วยอนุภาคแคลเซียมฟอสเฟตทรงกลม ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นชั้นอะพาไทต์เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานแก้วเซรามิก โดยพบว่าชั้นอะพาไทต์ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มจะลดลง เมื่อมีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ในแก้วเซรามิกมากขึ้น ซึ่งสามารถบอกได้ว่าชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก มีความสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อมนุษย์

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาถึงเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติกในระบบแก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ด้วยวิธีการแบบเซรามิก โดยเริ่มจากการผสมแก้วชีวภาพระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5 - CaO - Na_2O bioglass) และแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) เข้าด้วยกัน โดยมีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นทำการมาอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม แล้วทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 550 600 650 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6. จากการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติกที่มีอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 550 600 650 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นพีคที่ไม่ใช่เฟสเดียว ซึ่งประกอบด้วยพีคหลักและพีครองจำนวนมาก โดยที่พีคหลักเป็นพีคของแก้วฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับเฟส $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)$ NaPO_3 และ $\text{Na}_1.8\text{Ca}_{1.1}\text{P}_6\text{O}_{17}$ ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 71-2123 25-0811 02-0436 และ 47-0863 ตามลำดับ ส่วนพีคออกเป็นพีคที่ได้จากการเติมแบเรียมเฟอร์ไรท์ ซึ่งสอดคล้องกับเฟส $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ NaFeP_2O_7 ซึ่งตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 07-0276 และ 80-1476

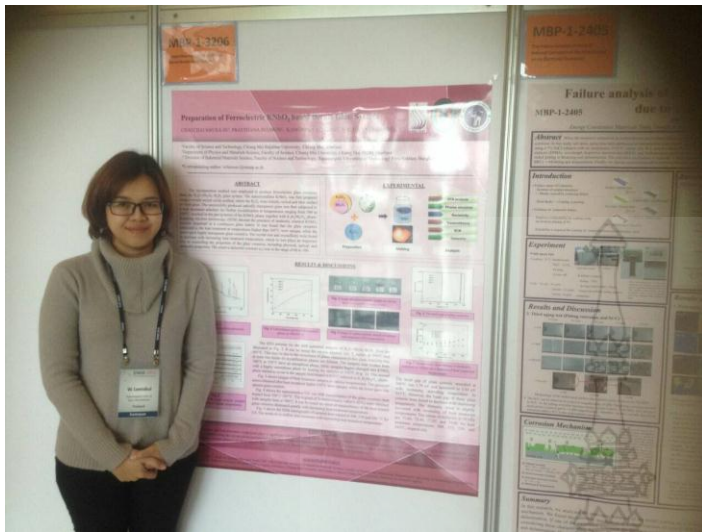
ตามลำดับ โดยที่พีคของเฟสหลักของเซรามิกมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีอัตราอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ในเซรามิกมากขึ้น และพีคของเฟสรองของเซรามิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีอัตราอัตราส่วนแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ในเซรามิกมากขึ้น ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของสมบัติทางแม่เหล็กของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก เพื่อหาอัตราส่วนของแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการรักษาแบบ Hyperthermia
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยใช้วิธีการนำชิ้นงานบ่มร่วมกับเซลล์โดยตรงเพื่อดูปฏิกิริยาของเซลล์ที่มีต่อชิ้นงาน



นำเสนอผลงานงานวิจัยระดับนานาชาติ ENGE 2014 ที่ประเทศเกาหลีใต้



เอกสารอ้างอิง

1. Park J.B. and. Kim Y.K, Biomaterials: Principles and Applications, ed. J.B. Park and J.D. Bronzino (BocaRaton: CRC Press, 2003), pp. 1–20.
2. Park J. B., Bioceramics: properties, characterizations, and applications, page 97, 2008.
3. Sukjai O., Optical and structural properties of ZrO₂ thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering, (2010)5-14.
4. Hemra K., High strength materials: Alumina-zirconia composite using low cost raw powder, (2003) 4-14.
5. Joon B. Park, Joseph D. Bronzino. Metallic Biomaterials :Biomaterials Principles and Applications. Washington D.C. : CRC PRESS., 2003.
6. Park J. Hydroxyapatite : Bioceramics Properties, Characterizations and Applications. New York: Springer Science+Business Media LLC., 2008.
7. Oh I. H., Nomura N., Chiba A., Murayama Y., Masahasht N., Lee B.-T., Hanada S. Microstructures and bond strengths of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings on porous titanium substrates. J. Mater. Sci.: Materials in Medicine. 2005; 16:635–640.
8. Vallet-Regi M., Gonzalez-Calbet J.M. Calcium phosphates as substitution of bone tissues. Solid State Chem. 2004; 32:1–31.
9. Kumta P.N., Sfeir C., Lee D. H., Olton D., Choi D. Nanostructured calcium phosphates for Biomedical applications: novel synthesis and Characterization. Acta Biomater. 2005: 65–83.
10. Suchanek W., Yoshimura M. Processing and properties of hydroxyapatite-based biomaterials for use as hard tissue replacement implants. J. Mater. Res. 1998;13:94–115.
11. Goller G., Oktar F.N., Agathopoulos S., Tulyaganov D.U., J Ferreira M.F., Kayali E.S., Peker Z. Effect of sintering temperature on mechanical and microstructural properties of bovine hydroxyapatite (BHA). J. Sol-Gel Sci. Techn. 2006; 37:111–115.118
12. Tadic D., Beckmann F., Schwarz ., Epple M. A novel method to produce hydroxyapatite objects with interconnecting porosity that avoids sintering. Biomater.2004; 25: 3335–3340.
13. Manjubala I., Woesz A., Pilz C., Rumpler M., Fratzl-Zelman N., Roschger P., Stampf U. Fratzl P. Biomimetic mineral-organic composite scaffolds with controlled internal architecture. J Mater Sci Mater Med.2005;16:1111–1119.
14. Arinzeh T.L., Tran T., Mcalary J., Daculsi G. A comparative study of Biphasic calcium phosphate ceramics for human mesenchymal stem-cell-induced bone formation Biomater 2005; 26: 3631–3638.

15. Vani R., Girija E. K., Elayaraja K., Prakash Parthiban S., Kesavamoorthy R., Narayana Kalkura S. Hydrothermal synthesis of porous triphasic hydroxyapatite (α and β) tricalcium phosphate. *J Mater Sci: Mater Med.* 2009; 20:S43–S48.
16. กระจุก[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org>
17. ชูศักดิ์ เวชแพศย์, วัสดุทางการแพทย์และอวัยวะเทียม, Biomaterials and Artificial organ กรุงเทพมหานคร, กรกฎาคม 2528
18. Buddy D. R., Allan S. H., Frederick J. S., Jack E.L. Biomaterials science an introduction to materials in medicine.London: Elsevier Inc., 2004.
19. Fabbri M., Celotti G.C., Ravaglioli A. Hydroxyapatite-based porous aggregates: physico-chemical nature, structure, texture and architecture. *Biomater.* 1995; 16: 225-228.
20. Vallet-Regi M., Gonzalez-Calbet J.M. Calcium phosphates as substitution of bone tissues. *Prog. Solid State chem.*2004; 32: 1-31.
21. Tadic D., Epple M. A thorough physicochemical characterization of 14 calcium phosphate- based bone substitution materials in comparison to nature bone. *Biomater.* 2004; 25: 987-994.
22. Yubao L., Xingdong Z.,de Groat K. Hydrolysis and phase transition of alpha-tricalcium phosphate. *Biomater.*1997; 18: 737-741.119
23. Kumta P. N., Sfeir C., Lee D.H., Olton D., Choi D. Nanostructured calcium phosphates for biomedical application: novel synthesis and characterization. *Acta Biomater.* 2005; 1: 65-83.
- 24.Kobayashi S., Kawai W. Development of carbon nonofiber reinforced hydroxyapatite with enhanced mechanical properties. *Compos. Part A* . 2007; 38: 114-123.
25. Chiu C. Y., Hsu H. C., Tuan W. H. Effect of zirconia addition on the microstructural evolution of porous hydroxyapatite. *Ceram. Inter.* 2007; 33: 715-718.26.เอกฉัตร กงพานิชวิเศษ. “การพ่นเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเปลวพลาสมาสำหรับการแพทย์”.คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
27. Anirut Ruksudjarit “ Fabrication of dense hydroxyapatite nanomaterials for bone implant applications” Doctor of philosophy in materia ls science Chiang mai university 2008.
28. Weiner, S. and Wagner, H. D. (1998). “The materials bone : structure -mechanical function Relations”. *Annual Review of Meterials Science*, 28 : 271-298.

29. Schultz, O. and et al . (2000). “Emerging strategies of bone and joint repair”. Arthritis Res. 2(6) : 433-436.
30. Hamadouche, M. and Sedel, M. L. (2000). “Ceramics in orthopaedics”. Journal of Bone Joint Surgery. Br., 82(8) : 1095-1099.
31. Gibson, I. R., Best, S. M. and Bonfield. (1999). “Chemical haracterization of siliconsubstitued hydroxyapatite”. Journal of Biomedical. Materials. esearch., 44(4) : 422-428.
32. Serre, C. M. and et al. (1998). “Influence of magnesium substitution on a collagen-apatite biomaterial on the production of a calcifying matrix by human osteoblasts”. Journal of Biomedical and Materials Research., 42(4) : 626-633.
33. จุฑารัตน์ กลิ่นแหวงรงค์. “เซรามิกชีวภาพไฮดรอกซีอะพาไทต์ผลึกระดับนาโนเมตรโดยวิธีพอลิเมอริเซชัน: การสังเคราะห์ การศึกษาคุณลักษณะ และพฤติกรรมการเผาผนึก”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ,2548 120
34. Li Y., Tjandra W., Tam K.C. Synthesis and characterization of anoporous hydroxyapatite using cationic surfactants as templates. Mater.Res. Bull. 2008; 43:2318–2326.
35. อรทัย ลีลาพจนานพร. “Fourier Transform InfraRed Spectrometer”, สำนักพัฒนาภาพถ่ายนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ, 2546., 2539



ประวัติการศึกษา

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย)	ดร. วิไลวรรณ ลีนะกุล
(ภาษาอังกฤษ)	Dr. Wilaiwan Leenakul

ประวัติการศึกษา

วท.บ. (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
---------------------	----------------------

วศ.ม. (วิศวกรรมพลังงาน)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
-------------------------	----------------------

ปร.ด. (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
---------------------	----------------------

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- Glass and Glass-ceramics (Lead-free)
- Glass and Glass-ceramics (Bioactive glass ceramics)

