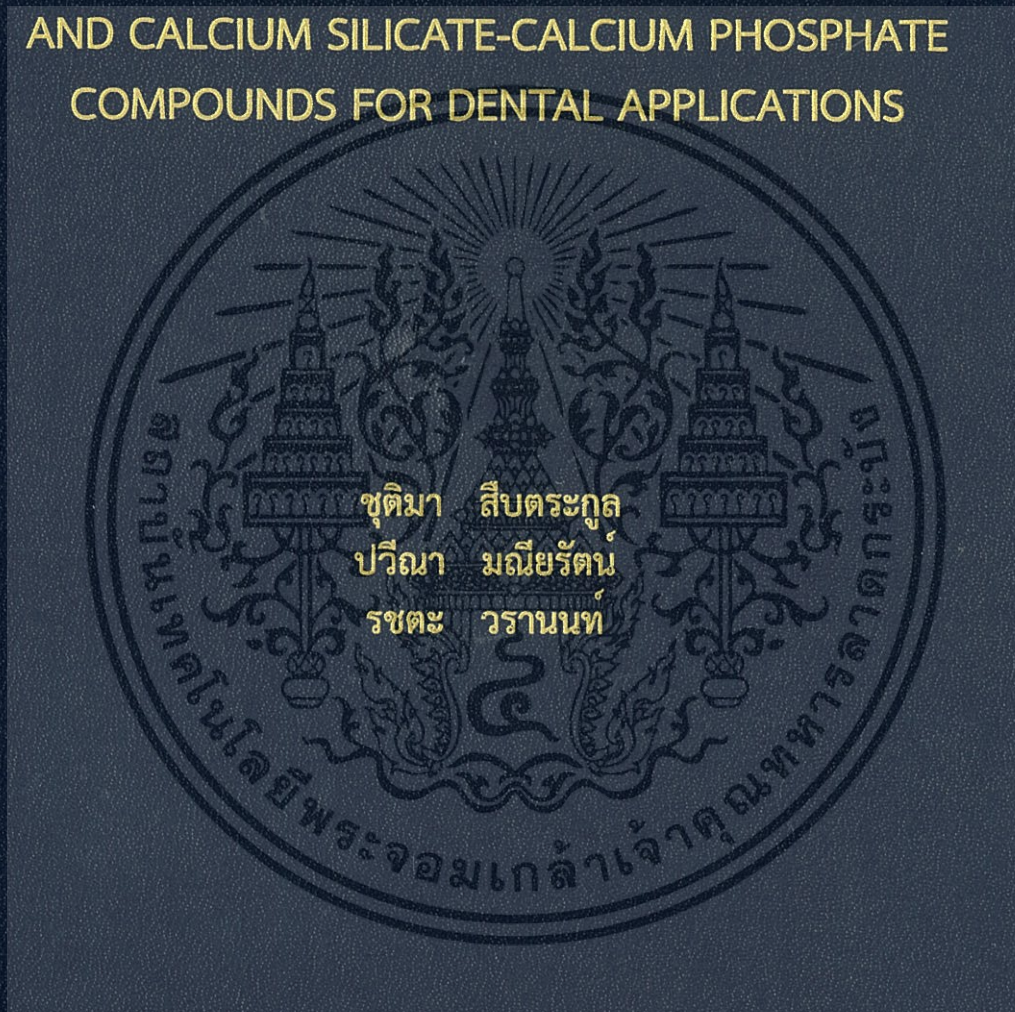


การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบ
ผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำ
เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานทันตกรรม

LOW TEMPERATURE SYNTHESIS OF CALCIUM SILICATE
AND CALCIUM SILICATE-CALCIUM PHOSPHATE
COMPOUNDS FOR DENTAL APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบ
ผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำ
เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานทันตกรรม

LOW TEMPERATURE SYNTHESIS OF CALCIUM SILICATE
AND CALCIUM SILICATE-CALCIUM PHOSPHATE
COMPOUNDS FOR DENTAL APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW TEMPERATURE SYNTHESIS OF CALCIUM SILICATE
AND CALCIUM SILICATE-CALCIUM PHOSPHATE
COMPOUNDS FOR DENTAL APPLICATIONS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อ
 ประยุกต์ใช้สำหรับงานทันตกรรม
 Low Temperature Synthesis of Calcium Silicate and Calcium
 Silicate-Calcium Phosphate Compounds for Dental Applications

ชื่อนักศึกษา นางสาวชุตินา สืบตระกูล รหัสนักศึกษา 57050401
 นางสาวปวีณา มณีรัตน์ รหัสนักศึกษา 57050455
 นายรชตะ วรานนท์ รหัสนักศึกษา 57050492

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
 ภาควิชา เคมี
 ปีการศึกษา 2560
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
 อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี กรรมการ	
ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานทันตกรรม	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชุตินา	สีบตระกูล รหัสนักศึกษา 57050401
	นางสาวปวีณา	มณียรัตน์ รหัสนักศึกษา 57050455
	นายรัชตะ	วารานนท์ รหัสนักศึกษา 57050492
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน	

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานทันตกรรม สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตถูกสังเคราะห์โดยใช้แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ($\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:Si เป็น 1:1 (CS1:1) 1:2 (CS1:2) และ 2:1 (CS2:1) ส่วนสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตสามารถสังเคราะห์จากสารตั้งต้น $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) โดยควบคุมให้อัตราส่วนโดยโมลของ Ca:Si:P เป็น 2:1:0.6 (CSP1:1) 2:2:0.6 (CSP1:2) และ 3:1:0.6 (CSP2:1) สารตั้งต้นผสมที่เตรียมได้นำไปทำปฏิกิริยา ไฮโดรเทอร์มอลในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบที่สังเคราะห์ได้ พบว่า สารประกอบ CS ทุกอัตราส่วนมีวิวัฒนาการหลักเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ในขณะที่สารประกอบผสมกลุ่ม CSP ทุกตัวอย่างประกอบด้วยวิวัฒนาการหลัก 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และ ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) สารประกอบที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่างด้วย 2 วิธี ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และการใช้สารยึดติดพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ก่อนนำไปแช่ในสารละลายจำลองสภาวะของเหลวร่างกาย (SBF) ที่อุณหภูมิ 36.5 °C เป็นเวลา 7 วัน พบว่าสารประกอบกลุ่ม CS สามารถคงรูปได้ดีทั้งที่เตรียมด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันและการใช้สารยึดติด PMMA สารประกอบทั้ง 2 กลุ่ม (CS และ CSP) สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อผลึกไฮดรอกซีแอ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปาไทต์ได้ทุกในอัตราส่วน ผลดังกล่าวแสดงถึงสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารประกอบที่สังเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงสามารถนำสารประกอบทั้ง 2 กลุ่ม ไปประยุกต์ใช้ทางทันตกรรมได้

คำสำคัญ : แคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมฟอสเฟต ปฏิกริยาไฮโดรเทอร์มอล สารละลายจำลองสภาวะของเหลวร่างกาย ไฮดรอกซีแอปาไทต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Low temperature synthesis of calcium silicate and calcium silicate-calcium phosphate compounds for dental applications		
Student	Miss Chutima Suebtrakul	Student ID	57050401
	Miss Paweena Maneeyarat	Student ID	57050455
	Mr. Rachata Waranon	Student ID	57050492
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic year	2017		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Punnama Siriphannon		

ABSTRACT

This research studied on the low temperature synthesis of calcium silicate and calcium silicate-calcium phosphate compounds for dental applications. The calcium-silicate compounds were synthesized by using calcium nitrate tetrahydrate ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) and tetraethyl orthosilicate ($\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$), in which the molar ratio of Ca:Si was varied to 1:1 (CS1:1), 1:2 (CS1:2) and 2:1 (CS2:1). The calcium silicate-calcium phosphate compounds were synthesized from the starting substances of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$ and diammonium phosphate ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$). The molar ratio of Ca:Si:P was controlled to be 2:1:0.6 (CSP1:1), 2:2:0.6 (CSP1:2) and 3:1:0.6 (CSP2:1). All of starting mixtures were hydrothermally reacted in sodium hydroxide (NaOH) solution at 100 °C for 1, 3, 6 and 24 hours. It was found from the characterization data of the synthesized products that all CS compounds was mainly composed of crystalline phase of calcium silicate hydrate ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). While, all CSP compounds were mainly composed of 3 crystalline phases, i.e. calcium silicate hydrate ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), dicalcium phosphate dihydrate ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). The synthesized compounds were shaped to pellet samples by 2 methods, i.e. hydration reaction and using poly(methyl methacrylate) binder, and then soaked in a simulated body fluid (SBF) at 36.5 °C for 7 days. It was found that the CS compounds shaped from hydration reaction and PMMA binder could maintain their pellet-forms. Both CS and CSP compounds could induce the formation of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hydroxyapatite, indicating the bioactivities of all synthesized compounds. Therefore, both compounds tend to apply for dental applications.

Keywords: Calcium silicate, Calcium phosphate, Hydrothermal reaction, Simulated body fluid, Hydroxyapatite



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำ กำลังใจ จากทุกท่านที่มีให้แก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการ และตรวจทานแก้ไขเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์มากที่สุดมา โดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ที่ให้ความกรุณาเป็น คณะกรรมการตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำ เสนอแนะ ในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของการใช้ เครื่องมือ ไปจนถึงคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ บิตา มารดา ซึ่งเป็นกำลังใจและแรงบันดาลใจที่สำคัญในการจัดทำโครงการ พิเศษนี้ตลอดจนผู้เขียนหนังสือ บทความต่าง ๆ ที่ผู้จัดทำได้อ่านเป็นความรู้ และบุคคลอื่น ที่ได้กล่าว มา ผู้จัดทำขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ชุตินา สืบตระกูล
ปวีณา มณีรัตน์
รชตะ วรานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แคลเซียมซิลิเกต	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต	3
2.1.2 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกต	3
2.1.3 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต	4
2.1.4 สมบัติอื่น ๆ ของแคลเซียมซิลิเกต	4
2.1.5 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต	4
2.1.6 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	5
2.1.7 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	5
2.2 แคลเซียมฟอสเฟต	5
2.2.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมฟอสเฟต	5
2.2.2 สมบัติทางกายภาพของไฮดรอกซีแอปาทิต	6
2.2.3 สมบัติทางเคมี	7
2.2.4 โครงสร้างของไฮดรอกซีแอปาทิต	7
2.2.5 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต	7
2.2.6 ประโยชน์ของไฮดรอกซีแอปาทิต	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.7 การประยุกต์การใช้งานแคลเซียมฟอสเฟตในปัจจุบัน.....	8
2.3 กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ	8
2.4 การสังเคราะห์ผงเซรามิกส์.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้แคลเซียมซิลิเกต	10
บทที่3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทดลอง	17
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	17
3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	17
3.3.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล.....	20
3.3.3 การสังเคราะห์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต.....	22
ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	
3.4 การทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพในระบบจำลองสภาวะในร่างกาย	25
3.4.1 การเตรียมสารจำลองสภาวะในร่างกาย (Simulated body fluid , SBF).....	25
3.4.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของชิ้นงาน	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	27
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต	27
4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	31
4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต	32
4.4 สมบัติความว่องไวทางชีวภาพ.....	36
4.4.1 สมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต	39
บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca: P แตกต่างกัน	5
3.1 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์สารผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิติลิกเตดด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	18
3.2 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	20
3.3 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบผสมแคลเซียมซิติลิกเตด-แคลเซียมฟอสเฟต	23
ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	
3.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารจำลองสภาวะในร่างกาย.....	25
3.5 ความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ในสารจำลองสภาวะร่างกายและของเหลวในร่างกายมนุษย์ ..	26
4.1 ความสามารถในการคงรูปของก้อนตัวอย่าง	37



สารบัญรูล

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของแคลเซียมซิริลเกดไฮเดรต.....	5
2.2 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของไฮดรอกซีแปปาไทด์	7
2.3 อุปกรณ์การสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล	9
3.1 แผนภาพการเตรียมสารประกอบแคลเซียมซิริลเกดด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล	19
3.2 แผนภาพการเตรียมไฮดรอกซีแปปาไทด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	21
3.3 แผนภาพการเตรียมสารประกอบผสมแคลเซียมซิริลเกด-แคลเซียมฟอสเฟต	24
ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	
4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิริลเกด	27
โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)	
4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิริลเกด	28
โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)	
4.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิริลเกด	29
โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)	
4.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิริลเกด	29
โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)	
4.5 แผนภาพของวงภาคแคลเซียมซิริลเกด	30
4.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต	31
โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	
4.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสม	32
แคลเซียมซิริลเกด-แคลเซียมฟอสเฟตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1(ค)	
4.8 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสม	33
แคลเซียมซิริลเกด-แคลเซียมฟอสเฟตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1(ค)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.9	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสม 34 แคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1(ค)	34
4.10	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสม 35 แคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1 (ค)	35
4.11	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 39 ของตัวอย่าง CS1:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CS1:1-H1 (ก) CS1:1-H3 (ข) CS1:1-H6 (ค) และ CS1:1-H24 (ง)	39
4.12	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 42 ของตัวอย่าง CS1:2 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CS1:2-H1 (ก) CS1:2-H3 (ข) CS1:2-H6 (ค) และ CS1:2-H24 (ง)	42
4.13	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 44 ของตัวอย่าง CS2:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CS2:1-H1 (ก) CS2:1-H3 (ข) CS2:1-H6 (ค) และ CS2:1-H24 (ง)	44
4.14	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 47 ของตัวอย่าง HA โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วัน	47
4.15	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 48 ของตัวอย่าง CSP1:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CSP1:1-H1 (ก) CSP1:1-H24 (ข)	48
4.16	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 49 ของตัวอย่าง CSP1:2 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CSP1:2-H1 (ก) CSP1:2-H6 (ข) และ CSP1:2-H6 (ค)	49

สารบัญญรูป(ต่อ)

หน้า

- 4.17 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า 52
ของตัวอย่าง CSP2:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและ
หลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CSP2:1-H1 (ก) CSP2:1-H24 (ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
H	Hydrothermal
CS1:1	สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 1:1
CS1:2	สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 1:2
CS2:1	สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 2:1
CSP1:1	สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 1:1
CSP1:2	สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 1:2
CSP2:1	สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 2:1
SBF	Simulated body fluid
XRD	X-ray diffractometer
SEM	Scanning electron microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แคลเซียมซิลิเกตเป็นวัสดุที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactivity) และมีความสามารถในการเข้ากันได้ (Biocompatibility) กับเซลล์เนื้อเยื่อภายในร่างกาย โดยสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อตัวของชั้นผลึกแอสปาทิต (Apatite) ได้ในสภาวะที่มีเลือดหรือของเหลวทางชีวภาพ มีระยะการก่อตัวสั้น และมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบางชนิดได้ [1-2] ดังนั้นแคลเซียมซิลิเกตจึงได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ทางด้านการแพทย์และทางทันตกรรม การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกตในทางทันตกรรมคือสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนฟันได้ และยังแปรสภาพจากเซลล์ต้นกำเนิดไปเป็นเซลล์สร้างกระดูกได้อีกด้วย [3]

แคลเซียมซิลิเกตสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธี เช่น วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี วิธีปฏิกิริยาโซล-เจล วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง วิธีการโซโนเคมี วิธีการไฮโดรเทอร์มอล โดยวิธีที่นิยมมากที่สุดและง่ายต่อการเตรียมในระดับอุตสาหกรรมคือ วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการที่มีต้นทุนที่ต่ำ แต่วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีนั้นต้องนำไปผ่านขั้นตอนการเผาแคลไซน์ (Calcination) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มี วัฏภาคเสถียร จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตมีอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่และแข็ง ซึ่งยากต่อการทำให้มีขนาดเล็กเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านทันตกรรมในบริเวณที่มีแผลขนาดเล็ก เช่น การอุดยอนปลายรากฟัน เป็นต้น [4]

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนากระบวนการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ได้อนุภาคขนาดเล็กและเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านทันตกรรม โดยใช้ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลและคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) ในการสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามพบว่าเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลและคลื่นเสียงความถี่สูงมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการก่อผลึกแคลเซียมซิลิเกต เป็นวัฏภาคผลึกวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) แต่เกิดเป็นวัฏภาคกึ่งเสถียร [5] ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้ จึงนำไฮดรอกซีแอสปาทิตซึ่งเป็นเซรามิกส์ชีวภาพที่ก่อเป็นผลึกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่ำได้ง่ายมาช่วยในการพัฒนาวัฏภาคผลึกของแคลเซียมซิลิเกต โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ในโครงการพิเศษได้ศึกษาความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างผลึกแอสปาทิต เพื่อประเมินสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ทางด้านทันตกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกตแคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านทันตกรรม
2. ศึกษาสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกตแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกตแคลเซียมฟอสเฟตโดยมีปัจจัยศึกษา ได้แก่
 - 1.1) ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca : Si) ในสารตั้งต้น
 - 1.2) ผลของการเติมแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)
 - 1.3) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง
2. การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์แคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกตแคลเซียมฟอสเฟต ได้แก่
 - 2.1) การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectroscopy)
 - 2.2) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)
3. การทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย (Simulated body fluid, SBF)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านทันตกรรมได้
2. ข้อมูลที่ได้จากโครงการวิจัยสามารถประยุกต์ใช้และพัฒนาในงานด้านการแพทย์ได้
3. ข้อมูลจากโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์เซรามิกส์ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดการใช้พลังงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

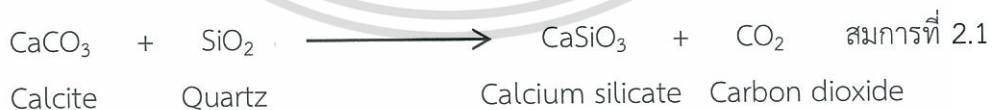
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคลเซียมซิลิเกต

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate; CaSiO_3) หรือวอลลาสโทไนต์ (Wollastonite) เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตชนิดหนึ่งที่เป็นไบโอเซรามิกส์ ปรากฏในรูปลักษณะของผง เป็นสารที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactivity) และมีความสามารถในการเข้ากันได้ (Biocompatibility) กับเซลล์เนื้อเยื่อภายในร่างกาย ซึ่งพบว่าสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการสร้างชั้นฟลิกไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite; $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) ได้อย่างรวดเร็วภายหลังจากการแช่ในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย (Simulated body fluid; SBF) และไอออนของแคลเซียมซิลิเกตสามารถส่งเสริมกระบวนการแบ่งเซลล์ของกระดูก โดยแปรสภาพจากการแสดงออกของยีนเซลล์ต้นกำเนิดไปยังเซลล์สร้างกระดูก โดยองค์ประกอบหลักของแคลเซียมซิลิเกตเกิดการละลายเมื่อแช่ในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย ก่อให้เกิดชั้นของซิลิกา (Silica-rich interlayer) บนผิวของแคลเซียมซิลิเกต จากนั้นจึงตามด้วยการสร้างแคลเซียมฟอสเฟตที่มีรูปร่างอสัณฐาน (Amorphous calcium phosphate) และก่อเป็นผลึกของไฮดรอกซีแอปาทิต ซึ่งเป็นการก่อตัวของแคลเซียมไอออน ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) และไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย [3] โดยแคลเซียมซิลิเกตมีทั้งหมด 3 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase; Amorphous- CaSiO_3) วัฏภาคที่อุณหภูมิต่ำ (β - CaSiO_3) ซึ่งมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุน และวัฏภาคที่อุณหภูมิสูง (α - CaSiO_3) ซึ่งมีลักษณะผิวเรียบและมีความแข็งแรงที่มากกว่าอสัณฐานและวัฏภาคที่อุณหภูมิสูง [6] โดยแคลเซียมซิลิเกตสามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์ (Calcite; CaO) กับซิลิกา (Silica; SiO_2) โดยอาศัยความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้คือ [7]



2.1.2 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกต

- ผลึกเป็นสีขาวโครงสร้างผลึกระบบไตรคลินิก (Triclinic)
- ค่าความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.8-2.9
- ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 5-5.4 มอร์ (Moh's scale)
- ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
- วอลลาสโทไนต์บริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1540 องศาเซลเซียส [8-9]

2.1.3 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต

- ความสามารถในการละลายน้ำต่ำ แต่สามารถละลายในกรดไฮโดรคลอริกได้
- เมื่อนำแคลเซียมซิลิเกตไปกระจายตัวในน้ำให้อยู่ในรูปแขวนลอยส่งผลให้ pH ของสารแขวนลอยอยู่ในช่วง 8-10 [10-11]
- องค์ประกอบของแคลเซียมซิลิเกตเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

2.1.4 สมบัติอื่น ๆ ของแคลเซียมซิลิเกต

- แคลเซียมซิลิเกตที่มีสีขาวนิยมใช้ทำเป็นผงสีขาว
- ความเฉื่อยสูง ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นในระหว่างการนำไปใช้งานหรือหลังจากผ่านกระบวนการผลิต
- แคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณสารที่ระเหยได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เวลาในการเผาผลาญและสามารถลดปัญหาการเกิดฟองก๊าซในวัสดุที่เกิดจากการสลายตัวเป็นก๊าซในระหว่างการเผา จึงนิยมนำมาใช้ในงานเซรามิกส์
- แคลเซียมซิลิเกตมีโครงสร้างผลึกและสมบัติทางกายภาพคงรูปที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส จึงสามารถใช้ทดแทนเส้นใยหินในการทำเป็นฉนวนความร้อนได้ [12]

2.1.5 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีความสำคัญอย่างมากเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ทำจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นบาง ๆ (Lamellar) แบบกึ่งผลึกต่อเนื่องกันและมีความซับซ้อน มีแรงไอออนิกโควาเลนต์ในระหว่างชั้นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โดยแต่ละแผ่นมีแผ่น Ca-O อยู่ตรงกลางและมีสายโซ่ซิลิเกตทั้งสองด้านบิดเป็นเกลียวเป็นช่วง ๆ เรียงตัวเป็นรูปทรงเตตระฮีดรอล และเรียกสายโซ่เหล่านี้ว่า ซิลิเกตไอออน โครงสร้างทำจากโซ่ซ้ำของรูปแบบสาม (Dreierketten) และรูปแบบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบของ Tobermorite-jennite ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบคริสตัลระดับนาโน เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนส่งผลให้ภายในมีความเปราะหรือหักง่ายและมีความแข็งแรงยืดหยุ่นที่ต่ำ ดังนั้นโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีและง่ายสำหรับการควบคุมสมบัติ

การประยุกต์ใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเซรามิกส์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีสมบัติที่ดีในด้านความแข็งแรง ความหยุ่นตัว ความสม่ำเสมอของขนาดผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ยังมีการนำแคลเซียมซิลิเกตมาประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์ โดยนำแคลเซียมซิลิเกตมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมเพื่อทดแทนกระดูกในร่างกายมนุษย์อีกด้วย [13-14]

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

สูตร	ชื่อ	อักษรย่อ	Ca: P
$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Octacalcium phosphate	OCP	1.33
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Dicalcium phosphate dehydrate (Brushite)	DCPD	1.0
CaHPO_4	Dicalcium phosphate (Monetite)	DCP	1.0
$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$	Calcium pyrophosphate dehydrate	CPPD	1.0
$\text{Ca}_7(\text{P}_5\text{O}_{16})_2$	Heptacalcium phosphate (Tromelite)	HCP	0.7
$\text{Ca}_2\text{H}_2\text{P}_6\text{O}_4$	Tetracalcium dihydrogen phosphate	TDHP	0.67
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$	Monocalcium phosphate monohydrate	MCPM	0.5
$\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$	Calcium metaphosphate (α, β, γ)	CMP	0.5

ไฮดรอกซีแอสพาไทต์ (HAp) สูตรเคมีคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ เป็นแคลเซียมฟอสเฟตชนิดหนึ่ง มีองค์ประกอบและลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อแข็งของมนุษย์ในรูปสัณฐานวิทยา [19] ไฮดรอกซีแอสพาไทต์ (Hydroxyapatite) เป็นสารเคมีที่มีการประยุกต์ใช้เป็นสารทดแทนกระดูกที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยสารไฮดรอกซีแอสพาไทต์เป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกและฟันซึ่งมีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถเตรียมได้จากแหล่งต่าง ๆ ในธรรมชาติ ดังนั้นสารชนิดนี้จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารทดแทนกระดูกและใช้ในระบอบนำส่งยาได้

2.2.2 สมบัติทางกายภาพของไฮดรอกซีแอสพาไทต์

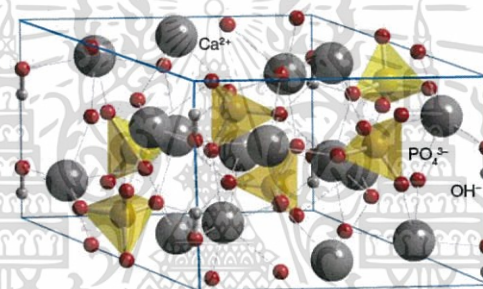
- ไฮดรอกซีแอสพาไทต์เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรทางความร้อนและสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 800-1200 องศาเซลเซียส [19]
- ไฮดรอกซีแอสพาไทต์มีโครงสร้างเฮกซะโกนอล (Hexagonal structure) [20]
- รูปร่างผลึก (Crystal shape) เป็นแผ่นหรือเข็ม สีขาว เหลืองขี้ผึ้ง เขียวเข้ม น้ำตาล และดำ [20]
- ค่าความหนาแน่นจากการวัดอยู่ในช่วง 3.10 - 3.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นจากการคำนวณตามทฤษฎีเท่ากับ 3.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [21]
- มีค่าความแข็งกดประมาณ 5 มอร์ (Moh's scale) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สมบัติทางเคมี

- ไฮดรอกซีแอปพาไทต์เหมือนกับกระดูก มีความเสถียรที่สุดในสภาวะทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ พีเอช และส่วนประกอบของของเหลวในร่างกาย [20]
- ไฮดรอกซีแอปพาไทต์เป็นผลึกที่เกิดจากการก่อตัวของแคลเซียมและฟอสฟอรัส [23]
- องค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีแอปพาไทต์คล้ายคลึงกับกระดูกซึ่งมีอัตราส่วนของ Ca: P เป็น 1.67 และสามารถเกิดพันธะเคมีกับกระดูกได้จึงสามารถนำไฮดรอกซีแอปพาไทต์มาประยุกต์ใช้เป็นกระดูกทดแทนชนิดแข็งแบบเนื้อแน่นหรือแบบเนื้อพรุน กระดูกทดแทนชนิดนุ่มแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุนได้ [24]

2.2.4 โครงสร้างของไฮดรอกซีแอปพาไทต์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ [25]

2.2.5 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์

วิธีการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์มีหลากหลายวิธี [18] ได้แก่

- วิธีการตกตะกอนทางเคมี (Precipitation method)
- การใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis method)
- การใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)
- วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method)
- วิธีอัลคอกไซด์ (Alkoxide method)

2.2.6 ประโยชน์ของไฮดรอกซีแอปพาไทต์

ไฮดรอกซีแอปพาไทต์สามารถใช้สำหรับทดแทนกระดูกซึ่งสารไฮดรอกซีแอปพาไทต์ สามารถทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์กับเซลล์กระดูกของคนไข้ได้โดยรูปแบบ

การนำไฮดรอกซีแอปพาไทต์ไปใช้ทดแทนกระดูก แบ่งได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบผง สำหรับใช้เพื่อเคลือบลงบนโลหะ เพื่อให้ทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกาย นอกจากนี้ไฮดรอกซีแอปพาไทต์สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อใช้ทำกระดูกเทียม ไฮดรอกซีแอปพาไทต์นี้สามารถทำให้เซลล์กระดูกสามารถเกิดสร้างพันธะกับอุปกรณ์ทางการแพทย์ อีกทั้งสามารถใช้สำหรับทดแทนรากฟันเทียมได้

2. แบบเป็นชิ้นเนื้อแน่น มีการนำไปใช้เป็นกระดูกเสริมช่องว่างทางด้านศัลยกรรมกระดูกและไบโหน้า โดยรูปแบบนี้มีสมบัติเชิงกลที่ดี จึงสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า ในต่างประเทศมักใช้งานในส่วนกระดูกสันหลังของผู้ป่วย

3. แบบเป็นรูพรุน ใช้งานเป็นวัสดุทดแทนกระดูกเป็นตัวเติมทางด้านศัลยกรรมกระดูก และไบโหน้านอกจากการนำสารไฮดรอกซีแอปพาไทต์ไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์แล้ว ในประเทศไทยขณะนี้ได้มีการวิจัยเพื่อนำไปใช้ในระบบนำส่งยา โดยเฉพาะยาที่ใช้ในการรักษาการอักเสบและติดเชื้อของกระดูก ข้อดีของวัสดุนำส่งยาข้างต้นคือ สามารถนำส่งยาปฏิชีวนะเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย วัสดุดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นกระดูกเทียมและสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับกระดูกของผู้ป่วยได้ [26]

2.2.7 การประยุกต์การใช้งานแคลเซียมฟอสเฟตในปัจจุบัน

กลุ่มของแคลเซียมฟอสเฟตประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต และเตตระแคลเซียมฟอสเฟต เป็นเซรามิกส์ทางการแพทย์ ที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งคือความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อภายในร่างกาย ประเภทของกระดูกเป็นอย่างดี นอกจากนี้การใช้งานของแคลเซียมฟอสเฟตยังสามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเคลือบบนผิววัสดุชนิดอื่นเพื่อทดแทนกระดูก การผสมร่วมกับวัสดุทางการแพทย์หรือทางทันตกรรม การนำวัสดุมาฝังเข้าร่างกายโดยตรง เป็นต้น [27]

2.3 กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ

สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. เซรามิกส์ค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert ceramics) เซรามิกส์ประเภทนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีน้อยมาก หรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เมื่ออยู่ในสภาวะของร่างกายเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตามร่างกายสามารถสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุเซรามิกส์ที่ใส่เข้าไป เมื่อมีการสร้างเนื้อเยื่อใหม่จนมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเลื่อนหลุดของวัสดุเซรามิกส์ได้

2. เซรามิกส์และโลหะที่มีรูพรุน (Porous ceramics and porous metal) ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อและอวัยวะข้างเคียง เนื่องจากเซรามิกส์ประเภทนี้มีรูพรุน ซึ่งเนื้อเยื่อที่สร้างขึ้นใหม่สามารถเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนของวัสดุ ส่งผลให้ลดปัญหาการเลื่อนหลุดของวัสดุได้ ขนาดรูพรุนควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยสามารถเจริญเข้าไปเลี้ยงเนื้อเยื่อภายในรูพรุนได้ เซรามิกส์ประเภทนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของการเคลื่อนไหว หากมีการ

เคลื่อนบริเวณรอยต่อบ่อย ๆ อาจทำให้เส้นเลือดฝอยขาด ส่งผลให้เนื้อเยื่อบริเวณนั้นเกิดการอักเสบ ติดเชื้อ และเป็นอันตรายถึงชีวิตได้

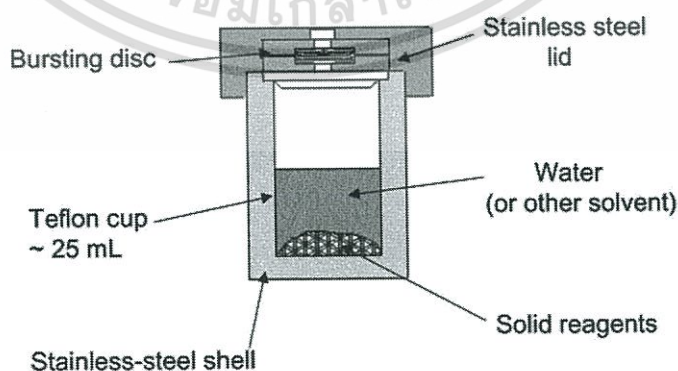
3. เซรามิกส์ที่มีความสามารถในการถูกดูดซับหรือกัดเซาะ (Resorbable/Bioresorbable ceramics) เซรามิกส์ประเภทนี้สามารถสลายตัวได้อย่างช้า ๆ ซึ่งเนื้อเยื่อของร่างกายสามารถเติบโตเข้ามาแทนที่ โดยการเลือกใช้วัสดุเหล่านี้มีข้อสำคัญคือ วัสดุต้องสามารถย่อยสลายได้ด้วยระบบการย่อยสลายของร่างกาย อัตราการถูกดูดซับของวัสดุต้องพอดีกับอัตราการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาทดแทน และสารที่ถูกปล่อยออกมาจากการสลายตัวต้องไม่เป็นพิษและร่างกายสามารถกำจัดสารดังกล่าวได้

4. เซรามิกส์ที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive ceramics) วัสดุชนิดนี้มีลักษณะที่สำคัญ คือ เป็นวัสดุที่สามารถสร้างพันธะขึ้นกับเนื้อเยื่อโดยรอบได้ โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่พื้นผิวของวัสดุภายใต้สภาวะของร่างกาย ส่งผลดีต่อการรักษาตัวของบาดแผล จึงสามารถช่วยลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อได้ ตัวอย่างวัสดุประเภทนี้ ได้แก่ เซรามิกส์ประเภทไบโอกลาสส์ (Bioglass) ไฮดรอกซีแอปาทาइट (Hydroxyapatite) [11,28]

2.4 การสังเคราะห์ผงเซรามิกส์

การเตรียมเซรามิกส์โดยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

การสังเคราะห์สารโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis) วิธีการที่สำคัญในการสังเคราะห์สารอนินทรีย์โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง สามารถสังเคราะห์ที่มีผลึกไม่เสถียรที่จุดหลอมเหลวได้ และยังมียังมีการกระจายตัวของอนุภาคได้ขนาดเล็กได้ดีในสารละลาย เหมาะกับการสังเคราะห์วัสดุที่เป็นผง นอกจากนี้เป็นกระบวนการที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเผาแคลไซน์และได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถขยายกำลังผลิตสู่ระบบอุตสาหกรรมในราคาที่ดินทุนต่ำ [29-30]



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์การสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้แคลเซียมซิลิเกต

งานวิจัยของ Mehrali และคณะ [4] ได้ทำการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ในรูปแบบของแผ่นนาโน (Nanosheet) โดยเทคนิคอัลตราโซนิก (Ultrasonic irradiation; UI) โดยนำแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) กับโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) มาผสมกันแล้วปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำปฏิกิริยาด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่เวลา 5 10 และ 15 นาทีตามลำดับ โดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิวซึ่งอยู่ในรูปสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) ที่มีปริมาณของ SDS แตกต่างกันคือ 0.1 0.2 และ 0.3 กรัม พบว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่สังเคราะห์ได้เกิดเป็นแผ่นขนาดนาโน ผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้คลื่นอัลตราโซนิกและปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้น และเวลาในการทำปฏิกิริยาอัลตราโซนิกและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมขนาดผลึกและลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) และการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือการทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที และใช้ปริมาณของ SDS ที่ 0.2 กรัม ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดผลึกโดยเฉลี่ย 9 นาโนเมตร วิธีการนี้ทำให้ได้ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่หลากหลายจึงเหมาะสำหรับการสังเคราะห์ผง CSH

งานวิจัยของ จิตาภา เครือละม้าย และคณะ [5] ได้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานทางด้านทันตกรรม โดยใช้แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) กับเตตระเอธิลอร์โทซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$; TEOS) เป็นสารตั้งต้น และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารตกตะกอน จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อก่อให้เกิดผลึก โดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน ได้แก่ เทคนิคโซโนเคมี ซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 10 20 และ 30 นาที เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส และเทคนิค โซโนเคมีร่วมกับเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล โดยทำปฏิกิริยาโซโนเคมีเป็นเวลา 10 นาทีร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ในทุกเทคนิค มีวัฏภาคผลึกเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิค โซโนเคมีเป็นเวลา 30 นาที สารผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่ 150 องศาเซลเซียส และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโซโนเคมี 10 นาทีร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่ 150 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Ca: Si ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) สภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่อุณหภูมิต่ำมากที่สุด คือ การทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีวัฏภาคผลึกที่สมบูรณ์ ในการทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ โดยการแช่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่สังเคราะห์ได้ในสารละลายจำลองสภาวะ

ของเหลวภายในร่างกาย (SBF) เป็นเวลา 7 วัน พบว่าสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตทุก

ตัวอย่างสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ได้ ซึ่งแสดงถึงสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

งานวิจัยของ Siriphannon และคณะ [32] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการสร้างผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) ที่แตกต่างกันของวัสดุภาคแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3 ; CS) ได้แก่ วัสดุภาคอสัณฐาน (Amorphous-CS) วัสดุภาคที่อุณหภูมิต่ำ (β -CS) ซึ่งมีลักษณะรูพรุนและพื้นผิวที่ขรุขระ และวัสดุภาคที่อุณหภูมิต่ำ (α -CS) ซึ่งมีลักษณะผิวเรียบ โดยแคลเซียมซิลิเกตเตรียมได้จากแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต ($\text{SiO}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, TEOS) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอนทางเคมี เมื่อนำแคลเซียมซิลิเกตแช่ในสารละลาย SBF ซึ่งเป็นสารที่มีสภาวะคล้ายกับของเหลวในร่างกายมนุษย์ คือมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.25 และอุณหภูมิ 36.5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จนถึง 30 วัน ผลการทดลองพบว่า วัสดุภาคอสัณฐานมีการสร้างผลึกแอปพาไทต์อย่างรวดเร็ว ผลึกแอปพาไทต์มีลักษณะเป็นรูพรุนและเรียงตัวไม่แน่น และอนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นลูกบอลเรียงตัวกัน แต่ผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนของอสัณฐานแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ค่อนข้างสูงเนื่องมาจากสารตั้งต้น ส่วนวัสดุภาคที่อุณหภูมิต่ำ (β -CS) ผลึกแอปพาไทต์มีลักษณะหนาแน่น และอนุภาคลูกบอลเรียงตัวกันขนาดใหญ่ ส่วนวัสดุภาคที่อุณหภูมิต่ำ (α -CS) มีลักษณะเดียวกับวัสดุภาคที่อุณหภูมิต่ำ (β -CS)

งานวิจัยของ Binnaz และคณะ [33] ได้ศึกษาสมบัติทางชีวภาพในการสร้างชั้นผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) ของแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) โดยแคลเซียมซิลิเกตสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วมกับวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) โดยนำแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ละลายในเอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) และปรับความเข้มข้นให้เป็น 0.2 โมลต่อลิตร จากนั้นหยด เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต ($\text{SiO}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$; TEOS) ในแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ในระหว่างการให้คลื่นเสียงความถี่สูง จากนั้นใส่สารที่ทำให้ตกตะกอนคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ประกอบด้วยความเข้มข้น 0.15 0.25 0.35 0.40 0.50 และ 0.70 โมลต่อลิตรตามลำดับ แต่เนื่องจากโซเดียม (Na) มีผลเสียต่อลักษณะเฉพาะของผลึกผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงจำเป็นต้องกำจัดโซเดียม โดยการล้างด้วยน้ำกลั่นหลังจากผ่านวิธีการตกตะกอนร่วมกับวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าสารประกอบที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลต่อลิตร เหลือปริมาณโซเดียมที่มีค่าต่ำที่สุดจึงเลือกผลิตภัณฑ์นี้มาใช้ในการทดสอบทางชีวภาพ หลังจากนั้นนำสารผลิตภัณฑ์ที่เลือกไปเผาแคลไซน์ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 500 และ 900 องศาเซลเซียส และนำไปเผาผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นรวม (bulk density) เท่ากับ 1.49 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 2.035 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นแบบเม็ด โดยใช้แรงเท่ากับ 240 เมกกะปาสคาลและนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ไปแช่ในสารละลาย SBF ซึ่งเป็นสารที่มีสภาวะคล้ายกับของเหลวในร่างกาย พบว่ามีการสร้างชั้นผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์เป็นลักษณะคล้ายอนุภาคลูกบอลบนพื้นผิวของแคลเซียมซิลิเกตอย่างรวดเร็วหลังจากแช่ใน SBF

งานวิจัยของ Ishida และคณะ [34] ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสีย (Remediation of waste water) โดยทำการสังเคราะห์สารตัวอย่างด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เพื่อให้ได้สารประกอบโทเบอร์มอไรต์ ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ไฮดรอกซีแอปาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้ ได้แก่ ดินเบา (Diatomaceous earth) แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -tricalcium phosphate; α - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ α -TCP) และปูนขาว (Slake lime; CaOH_2) โดยดินเบาเตรียมได้จากการนำมาเผาแคลไซน์ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ส่วนแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟตและปูนขาวได้จากการเผา แคลไซน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; CaCO_3) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำสารตั้งต้นที่เตรียมได้มาผสมกันในอัตราส่วน ดินเบา : แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต : ปูนขาว เท่ากับ 50 : 40 : 10 จากนั้นนำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำการกดอัดด้วยเครื่องอัดทิศทางเดียว (Uniaxially pressed) และใช้แรงอัดเท่ากับ 5 เมกะปาสคาล ได้ขนาดผงอัดเท่ากับ $3 \times 5 \times 40$ มิลลิเมตร นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลภายใต้แรงดันไอ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เนื่องจากการสร้างผลึกแบบใหม่ โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ของโทเบอร์มอไรต์ และ ไฮดรอกซีแอปาไทต์เกิดขึ้น และความแข็งแรงของผลึกเพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ Santosa และคณะ [35] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มซิลิกา (SiO_2) เพื่อเพิ่มสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล และสมบัติทางชีวภาพ ในสารประกอบแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, α -TCP / ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5 , C_3S) เนื่องจากการเพิ่มซิลิกา (SiO_2) สามารถเพิ่มการย่อยสลายทางธรรมชาติ (Degradability) การเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) และการตอบสนองทางชีวภาพได้ อีกทั้งสามารถลดความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) โดยแอลฟาไตร-แคลเซียมฟอสเฟตสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีการทำปฏิกิริยาของสารในสถานะของแข็งระหว่างแอลฟา-แคลเซียมไพโรฟอสเฟต (γ -Calcium pyrophosphate; γ - $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ส่วนไตรแคลเซียมซิลิเกตสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีการโซลเจล (sol-gel) โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$; (TEOS)) แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จากนั้นเก็บสารละลายดังกล่าวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนเกิดเจล ทำให้เจลแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นผสมแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟตไตรแคลเซียมซิลิเกต แล้วนำสารผสมดังกล่าวไปแช่ใน SBF ที่อุณหภูมิ 36.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน จนถึง 24 วัน เกิดการสร้างผลึกแอปาไทต์ (HAP) ซึ่งมีองค์ประกอบเหมือนกับกระดูกในร่างกายมนุษย์

งานวิจัยของ Mikowski และคณะ [36] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุประกอบแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (C-S-H) ร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยใช้วิธีการตกตะกอนในการสังเคราะห์แคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต จากนั้นนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำมาผสมกับแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรต พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำเกิดการแทรกตัวระหว่างชั้นแคลเซียม-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิเกต ไฮดรต ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเพิ่มขึ้น เป็นผลให้สมบัติเชิงกลของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเปลี่ยนแปลง โดยมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแรงลดลง ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อเป็นวัสดุที่ต้องการลดรอยร้าว

งานวิจัยของ Zhai และคณะ [37] ได้ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอสพาไทต์ที่มีซิลิกอนอยู่ในโครงสร้าง $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2; Si-HAp]$ เป็นรูปแบบลวดนาโน (Nanowires) โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอลในการสังเคราะห์ และใช้สารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่แตกต่างกัน ได้แก่ $CaSiO_3$ (CS) Ca_2SiO_4 (C_2S) และ Ca_3SiO_5 (C_3S) โดยนำสารตั้งต้นดังกล่าวมาละลายในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 และ 7 วัน จากนั้นล้างและกรองผลิตภัณฑ์ที่ได้ และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ผสม คือ Si-HAp1 Si-HAp2 และ Si-HAp3 ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ทำการไฮโดรเทอร์มอลเป็นเวลา 7 วัน มีปริมาณของซิลิกอนในโครงสร้างไฮดรอกซีแอสพาไทต์อยู่ในช่วง 0.318-3.75 โดยน้ำหนัก รูปร่างของอนุภาคผลิตภัณฑ์เป็น Si-HAp แบบลวดนาโน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 3 ไมโครเมตร โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาค CS ไปเป็น Si-HAp แบบลวดนาโนมีความแข็งแรงมากกว่าของ C_2S และ C_3S และวิธีไฮโดรเทอร์มอลเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ง่ายต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างผลึก อีกทั้งโครงสร้างแบบลวดนาโนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวัสดุทางชีวภาพและวัสดุทดแทนเนื้อเยื่อได้

งานวิจัยของ Gao และคณะ [38] ได้ทำการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต ($CaSiO_3$) เพื่อทำหน้าที่เป็นโครงเลี้ยงเซลล์ร่วมกับการเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงไฮดรอกซีแอสพาไทต์ (Hydroxyapatite whiskers) ด้วยวิธีการเผาผนึกด้วยแสงเลเซอร์ (Laser sintering) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการต้านทานการแตกหัก จากการทดลองพบว่า โครงเลี้ยงเซลล์แคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะรูพรุนสม่ำเสมอในช่วง 0.5-0.8 มิลลิเมตร และการเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงไฮดรอกซีแอสพาไทต์ในปริมาณ 0-20 %โดยน้ำหนัก ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความแข็งแรงอัดเป็น 27.28 เมกะปาสคาล ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเป็น 156.2 เมกะปาสคาล ค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอเป็น 15.64 เมกะปาสคาล และความทนทานต่อการแตกหักเป็น 1.43 เมกะปาสคาล.เมตร^{1/2} นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการตอบสนองทางชีวภาพ โดยการแช่ในสารละลายจำลองในร่างกายมนุษย์ (SBF) พบว่ามีการสร้างสารคล้ายกระดูกที่มีลักษณะคล้ายกับแอสพาไทต์บนพื้นผิวของโครงเลี้ยงเซลล์ และเมื่อทำการให้ระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นพบว่าการแบ่งตัวของเซลล์ MG-63 ซึ่งเป็นชนิดของเซลล์ที่สร้างกระดูก ส่งผลให้โครงเลี้ยงเซลล์แคลเซียมซิลิเกตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงไฮดรอกซีแอสพาไทต์สามารถนำไปใช้ทดแทนกระดูกและประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อได้

งานวิจัยของ Nam Pham และคณะ [39] ได้ทำการสังเคราะห์ผลึกนาโนไฮดรอกซีแอสพาไทต์ โดยการเคลือบบนเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 316LSS) โดยใช้เทคนิคการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition techniques) โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีดักชัน โดยไอออนเคลื่อนที่ไปปรับอิเล็กทรอนิกส์ที่ขั้วลบของอิเล็กโทรดและเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกระดับนาโนที่เป็นของแข็งก่อตัวบริเวณขั้ว ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรตเข้มข้น 3×10^{-2} โมลาร์และแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเข้มข้น 1.8×10^{-2} โมลาร์ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อฟอสเฟตเป็น 1.67 พบว่าผลึกไฮดรอกซีแอสพาไทต์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นแผ่นและมีโครงสร้างคล้ายปะการัง (Coral-like structure) สภาวะการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดคือ การใช้อัตราการสแกนเป็น 5 mV s^{-1} ช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็น 26.67 นาที และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบภายในร่างกายของสุนัขที่บริเวณต้นขา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิดนี้ไม่ก่อให้เกิดการอักเสบในร่างกายและไม่ก่อให้เกิดโรคติดเชื้อและความผิดปกติของกระดูก ดังนั้นวัสดุที่เตรียมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์เกี่ยวกับการปลูกถ่ายอวัยวะได้

งานวิจัยของ Ho และคณะ [40] ได้ทำการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต (CS) สำหรับทดแทนกระดูก โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) ที่ปราศจากตัวทำละลายเอทานอลและกรด เพื่อเปรียบเทียบกับวิธี โซลเจล (Sol-gel) ซึ่งมีการใช้เอทานอลและกรดเป็นตัวทำละลาย โดยทำการผสมเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, TEOS) และแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ในอัตราส่วนของ Ca: P เท่ากับ 1: 1 และใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อให้ก่อตัวเป็นซีเมนต์ จากนั้นทำการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพและการสร้างเนื้อเยื่อกระดูก โดยแช่ในสารละลาย SBF จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบของวัฏภาค (Phase composition) น้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) และความต้านทานแรงดึง (Diametral tensile strength) พบว่าการเตรียมทั้งสองวิธีส่งผลให้เกิดการก่อตัวของชั้นแอสพาไทต์ (Apatite) บนพื้นผิวของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งองค์ประกอบของวัฏภาค สัณฐานวิทยา ความแข็งแรง และการสลายตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการเตรียมทั้งสองวิธีให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการแนบติดของเซลล์ การเพิ่มจำนวนเซลล์ การเจริญเติบโตของเซลล์ และการสะสมของแร่ธาตุคล้ายคลึงกัน

งานวิจัยของ Goncharenko และคณะ [41] ทำการสังเคราะห์แคลเซียมไพโรฟอสเฟต (α -Calcium pyrophosphate; α -CPP) แบบพหุสัณฐานกึ่งเสถียร โดยใช้วิธีการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว (Ultra-Short synthesis) แบบไนเตรตแบบเปียก (Wet nitrate) ที่มีอัตราส่วนของ Ca: P เท่ากับ 1: 1 สารตัวอย่างที่ได้เป็นแคลเซียมฟอสเฟตที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous Calcium phosphate, ACP) ซึ่งแบ่งได้เป็นสองแบบ ได้แก่ แบบที่ไม่มีการล้างด้วยสารละลายแอมโมเนีย เรียกว่า UW และแบบที่ล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียหกครั้ง เรียกว่า 6W จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดไปทำให้แห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze-drying) แล้วนำไปทำการอบอ่อน (Annealing) จนถึงอุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคของสารตัวอย่าง พบว่า UW เกิดวัฏภาคทั้งหมดสองวัฏภาค ได้แก่ α' -CPP และ β -CPP ที่ช่วงอุณหภูมิ 530-640 องศาเซลเซียส และ 6W เกิดวัฏภาคทั้งหมดสี่วัฏภาค ได้แก่ α' -CPP β -CPP α' -TCP และ β -TCP ที่ช่วงอุณหภูมิ 620-720 องศาเซลเซียส นอกจากนี้

ได้ทำการหาค่าพลังงานการกระตุ้นของการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคจาก ACP ไปเป็น α' -CPP ซึ่งมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 165 KJ.mol^{-1} และมีเปลี่ยนแปลงวิภาคของ ACP ไปเป็น TCP ที่อัตราส่วนของ Ca: P เท่ากับ 1.5 ดังนั้นแคลเซียมไฮดรอกซีฟอสเฟตแบบพหุสัณฐานกึ่งเสถียรมีองค์ประกอบที่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดีกว่าแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์โดยการเผาผนึกแบบธรรมดา และสามารถประยุกต์ใช้ทางการแพทย์และทางทันตกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เอทานอล 95% (Ethanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) องค์การสุรา กรมสรรพสามิต เกรตวิเคราะห์
2. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate, $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$) SIGMA-ALDRICH Co.Ltd เกรตวิเคราะห์
3. แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) Ajax Finechem Pty Ltd เกรตวิเคราะห์
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) Carlo Erba Reagenti SpA เกรตวิเคราะห์
5. ไดแอมโมเนียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต (Di-Ammonium hydrogen phosphate, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) Carlo Erba Reagenti SpA เกรตวิเคราะห์
6. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) Carlo Erba Reagenti SpA
7. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3) Carlo Erba Reagenti SpA
8. โพแทสเซียม คลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) Carlo Erba Reagenti SpA
9. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไตรไฮเดรต (Potassium hydrogen phosphate trihydrate, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) Carlo Erba Reagenti SpA
10. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Magnesium chloride hexahydrate, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Carlo Erba Reagenti SpA
11. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) Carlo Erba Reagenti SpA
12. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) Carlo Erba Reagenti SpA
13. โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate, Na_2SO_4) Carlo Erba Reagenti SpA
14. ทริส (ไฮดรอกซีเมทิล) อะมิโนมีเทน (Tris (hydroxymethyl) aminomethane, $(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNH}_2$) Carlo Erba Reagenti SpA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทดลอง

1. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) Bruker AXS Inc., D8 Advance
2. เครื่องกรองลดความดัน SIBATA Ltd., WJ-20
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง DENVER Pvt. Ltd., SI-234
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) LEO Co., Leo 1455 Vp
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิ Memmert Co., WNG-29
6. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) METTLER TOLEDO Thailand Ltd., FiveGo
7. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) IKA Inc., C-MAG HS 7
8. ตู้อบสาร
9. เครื่องปั่นกวนสาร
10. เครื่องอัดเม็ดสาร

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

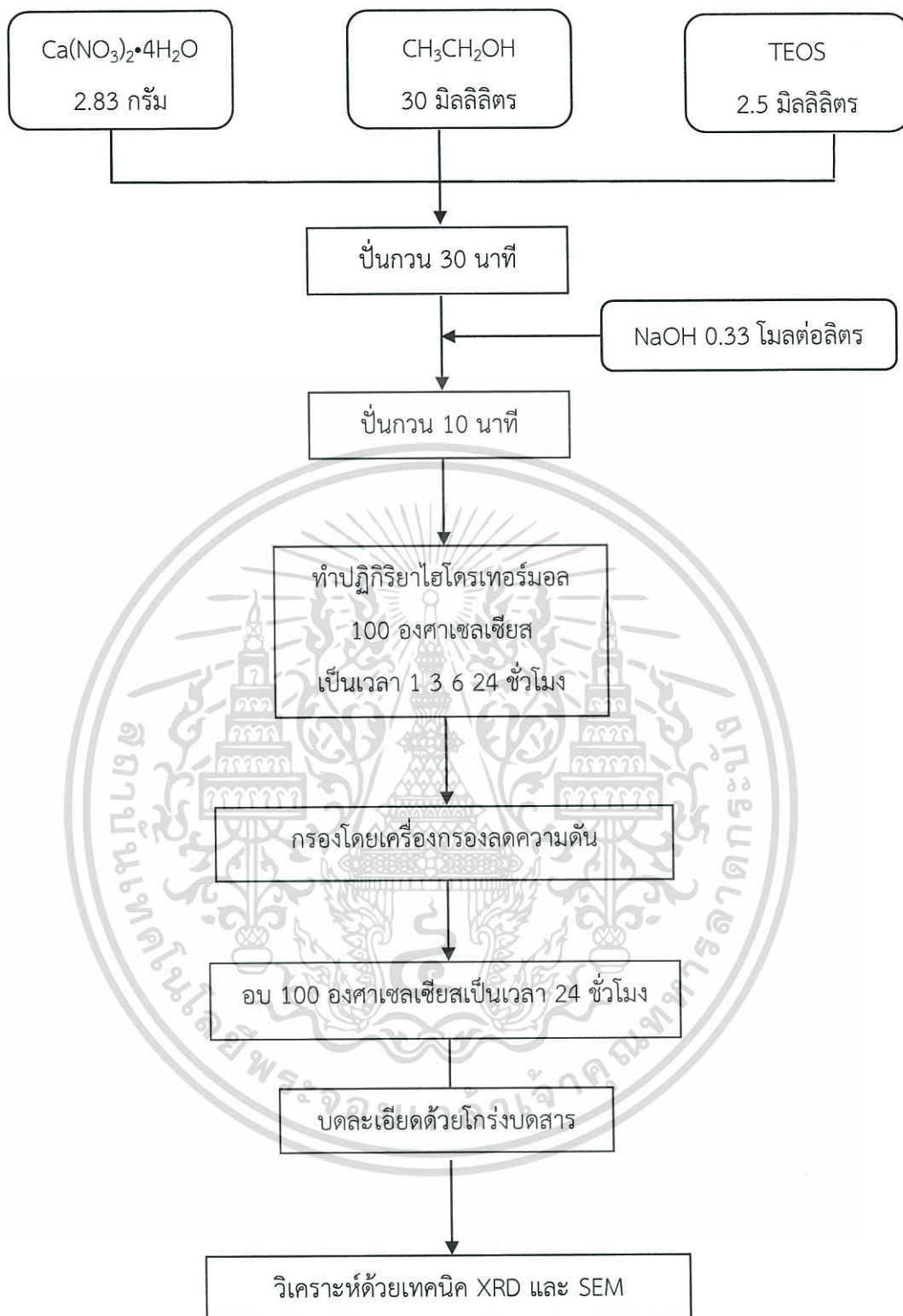
1. เตรียมส่วนผสมแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต และเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) ละลายในเอทานอล โดยมีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.1 ปั่นกวนสารละลายผสมที่เตรียมได้เป็นเวลา 30 นาที ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.33 โมลต่อลิตร โดยซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.396 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงในสารละลายผสมแล้วปั่นกวนต่อไปอีก 10 นาที
4. นำสารผลิตภัณฑ์ผสมที่ได้ไปทำปฏิกิริยาดังวิธีการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 6 24 ชั่วโมง
5. นำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองโดยเครื่องกรองลดความดัน
6. นำสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. บดสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ด้วยโม่บดสารและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์สารผลึกภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

ชื่อสาร ตัวอย่าง	ปริมาตร ตัวทำละลาย เอทานอล (มิลลิลิตร)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา ไฮโดรเทอร์มอล (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยา ไฮโดรเทอร์มอล (ชั่วโมง)	อัตราส่วน โดยโมล ของสารตั้งต้น Ca:Si
CS1:1	30	100	1	1:1
			3	
			6	
			24	
CS1:2	30	100	1	1:2
			3	
			6	
			24	
CS2:1	30	100	1	2:1
			3	
			6	
			24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

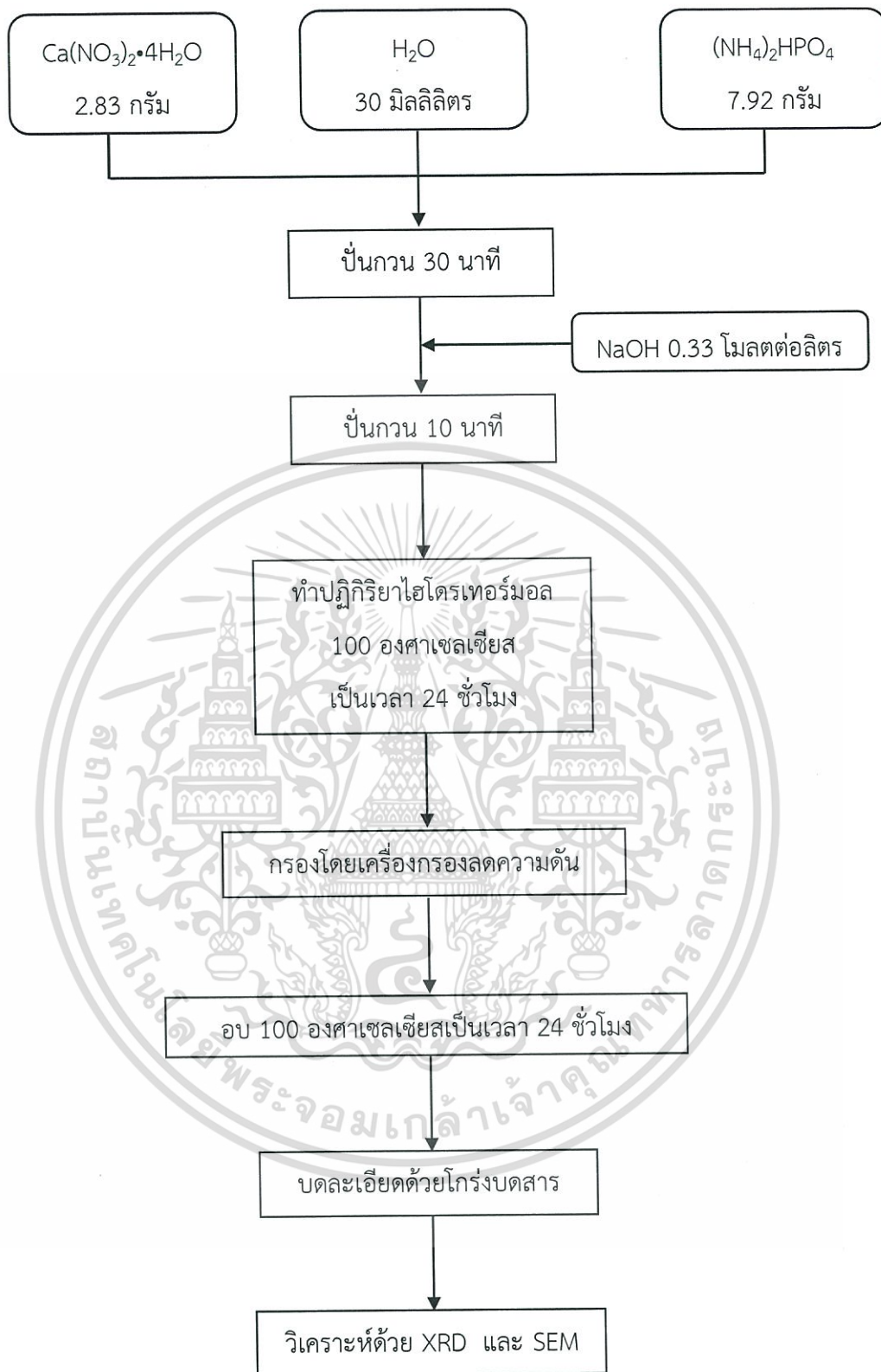
3.3.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทาइटด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

1. เตรียมส่วนผสมแคลเซียมไนเตรตเตรสไฮเดรต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ละลายในน้ำกลั่น โดยมีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 ปั่นกวนสารละลายผสมที่เตรียมได้เป็นเวลา 30 นาที ในปิกเกอร์พลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.33 โมลต่อลิตร โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.396 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงในสารละลายผสมแล้วปั่นกวนต่อไปอีก 10 นาที
4. นำสารผสมที่ได้ไปทำปฏิกิริยาด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองโดยเครื่องกรองลดความดัน
6. นำสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. บดสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ด้วยโกร่งบดสารและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทาइटด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

ชื่อสารตัวอย่าง	ปริมาณตัวทำละลายน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (ชั่วโมง)	อัตราส่วนโดยมวลของสารตั้งต้น	
				Ca	P
HA	30	100	24	1	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมไฮดรอกซีแอปพาไทต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การสังเคราะห์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตด้วยเทคนิค

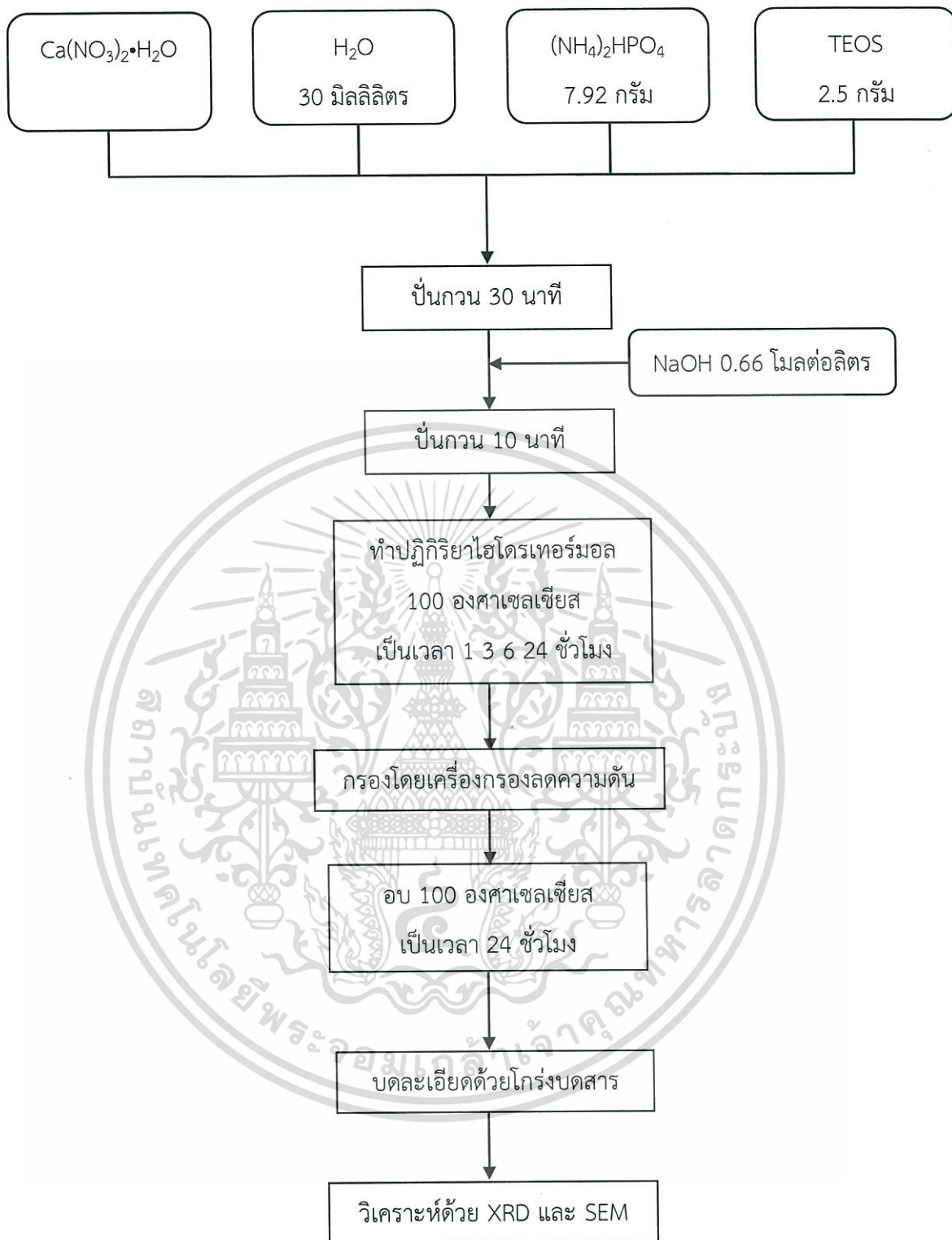
ไฮโดรเทอร์มอล

1. เตรียมส่วนผสมแคลเซียมไนเตรตเตรไฮเดรต TEOS และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจน-ฟอสเฟต โดยมีอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.3 ละลายในเอทานอล ปั่นกวนสารละลายผสมที่เตรียมได้เป็นเวลา 30 นาที ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.66 โมลต่อลิตร โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.792 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงในสารละลายผสมแล้วปั่นกวนต่อไปอีก 10 นาที
4. นำสารผสมที่ได้ไปทำปฏิกิริยาด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 6 24 ชั่วโมง
5. นำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองโดยเครื่องกรองลดความดัน
6. นำสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 6 24 ชั่วโมง
7. บดสารผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่เตรียมได้ด้วยโม่บดสารและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

ชื่อสารตัวอย่าง	ปริมาตรตัวทำละลายเอทานอล (มิลลิลิตร)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (ชั่วโมง)	ตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น Ca:Si:P	หมายเหตุ
CSP1:1	30	100	1	2:1:0.6	อัตราส่วนโดยโมล Ca:Si 1:1 Ca:P 1:0.6
			3		
			6		
			24		
CSP1:2	30	100	1	2:2:0.6	อัตราส่วนโดยโมล Ca:Si 1:2 Ca:P 1:0.6
			3		
			6		
			24		
CSP2:1	30	100	1	3:1:0.6	อัตราส่วนโดยโมล Ca:Si 2:1 Ca:P 1:0.6
			3		
			6		
			24		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเตรียมสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพในระบบจำลองสภาวะในร่างกาย

การทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารที่สังเคราะห์ทำได้โดยการนำชิ้นงานลงไปแช่ในสารจำลองสภาวะในร่างกายซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์ โดยชิ้นงานที่ผ่านการแช่ในสารจำลองสภาวะในร่างกาย จะถูกส่งไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM

3.4.1 การเตรียมสารจำลองสภาวะในร่างกาย (Simulated body fluid , SBF)

ตารางที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารจำลองสภาวะในร่างกาย

สารเคมีที่ใช้	ปริมาณสารที่ใช้
1. NaCl	15.992 กรัม
2. NaHCO ₃	0.7 กรัม
3. KCl	0.448 กรัม
4. K ₂ HPO ₄ • 3H ₂ O	0.348 กรัม
5. MgCl ₂ • 6H ₂ O	0.612 กรัม
6. 1 M HCL	80 มิลลิลิตร
7. CaCl ₂	0.556 กรัม
8. Na ₂ SO ₄	0.144 กรัม
9. (CH ₂ OH) ₃ CNH ₂	12.116 กรัม

โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ดังนี้

1. นำบีกเกอร์ชนิดพลาสติกที่บรรจุน้ำกลั่น 1,400 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิของน้ำกลั่นประมาณ 36-37 องศาเซลเซียส จากนั้นปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
2. นำสารละลายเคมีในตารางที่ 3.3 มาค่อย ๆ ละลายทีละตัวในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ เริ่มตั้งแต่สารตัวที่ 1 จนถึงสารตัวที่ 8 ยกเว้นสารตัวที่ 6 ซึ่งจะแบ่งใส่ลงไปเพียง 30 มิลลิลิตร ในระหว่างการผสมสารละลายต้องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง จากนั้นเติมสารตัวที่ 9 ลงไปที่เล็กน้อย จนกระทั่งสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.4
3. เติมสารละลายตัวที่ 6 ที่เหลือลงไปเพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 7.3 (ค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ควรมีค่าเกิน 7.5 เพราะจะทำให้สารละลายที่เตรียมได้เกิดการตกตะกอน) ทำเช่นนี้สลับกันจนกระทั่งสารตัวที่ 9 หมดลง จะได้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับปริมาณสารละลายที่เตรียมได้ด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 2,000 มิลลิลิตร
5. เก็บสารละลายจำลองสภาวะร่างกายที่เตรียมไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 5 องศาเซลเซียส สารจำลองสภาวะร่างกายจะมีความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ในสารจำลองสภาวะร่างกายและของเหลวในร่างกายมนุษย์

ไอออน	สารจำลองสภาวะร่างกาย (มิลลิโมลาร์)	ของเหลวในร่างกายมนุษย์ (มิลลิโมลาร์)
Na ⁺	142.0	142.0
Cl ⁻	148.8	103.0
HCO ₃ ⁻	4.2	27.0
K ⁺	5.0	5.0
Mg ²⁺	1.5	1.5
Ca ²⁺	2.5	2.5
HPO ₄ ⁻	1.0	1.0

3.4.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของชิ้นงาน

1. นำสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต และสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลนำไปอัดเม็ด ตัวอย่างละ 2 เม็ด
2. นำเม็ดแรกของแต่ละตัวอย่างไปผ่านกระบวนการไฮเดรชัน
3. เม็ดที่สองของแต่ละตัวอย่างนำไปหยดด้วยพอลิเมอร์พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนำไปอบในตู้อบ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำผลิตภัณฑ์ทั้งหมดไปแช่ในสารละลายจำลองสภาวะร่างกายเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 36.5 องศาเซลเซียส
5. นำไปวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยเทคนิค XRD และ SEM

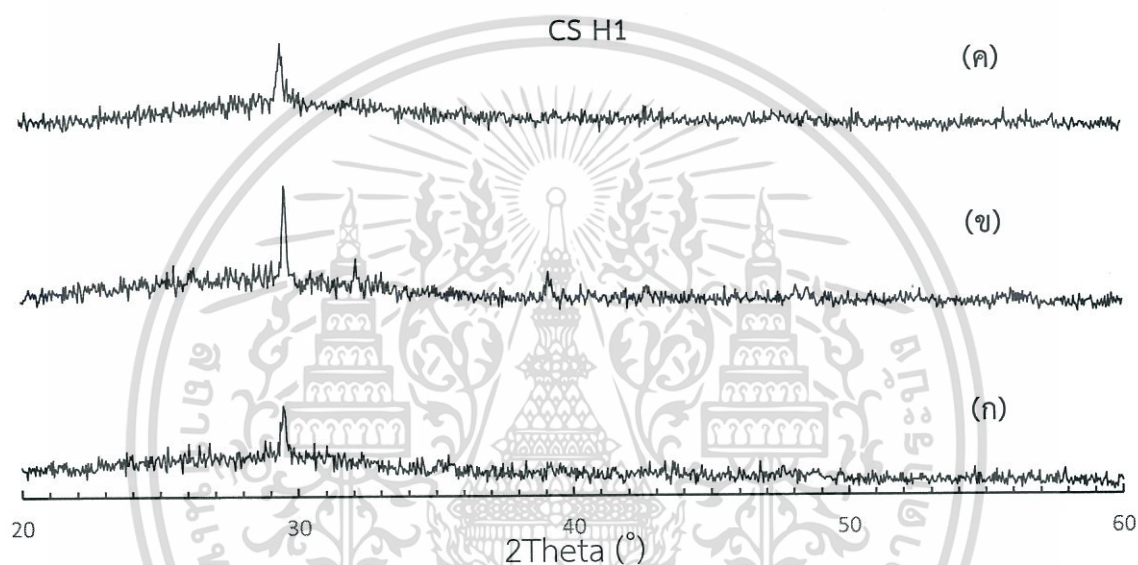
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

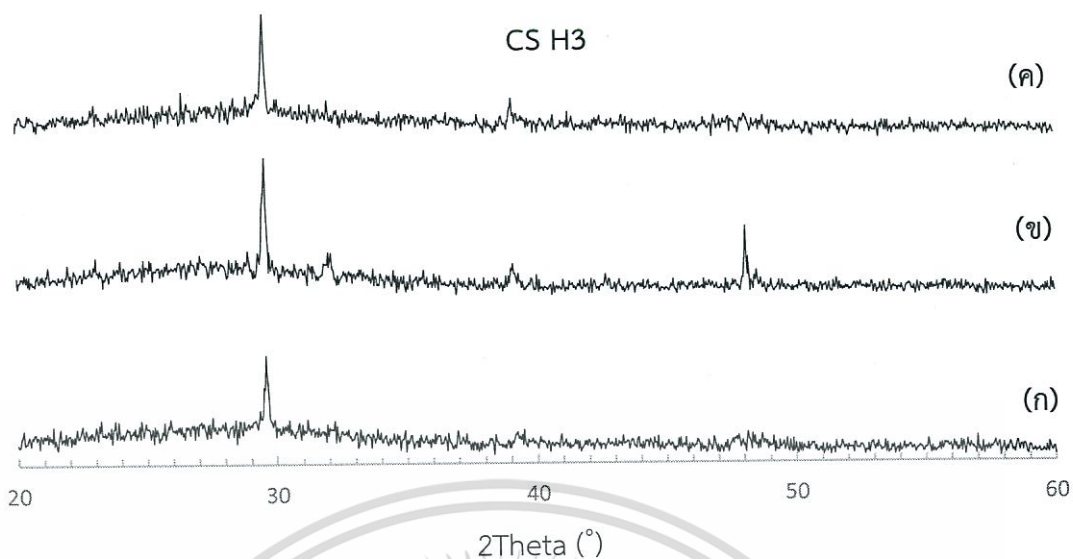
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต

เมื่อนำสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลในระยะเวลาและอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca : Si) ที่แตกต่างกัน มาทำการวิเคราะห์วัฏภาคผลึกด้วยเทคนิค XRD ซึ่งได้ผลแสดงในดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4



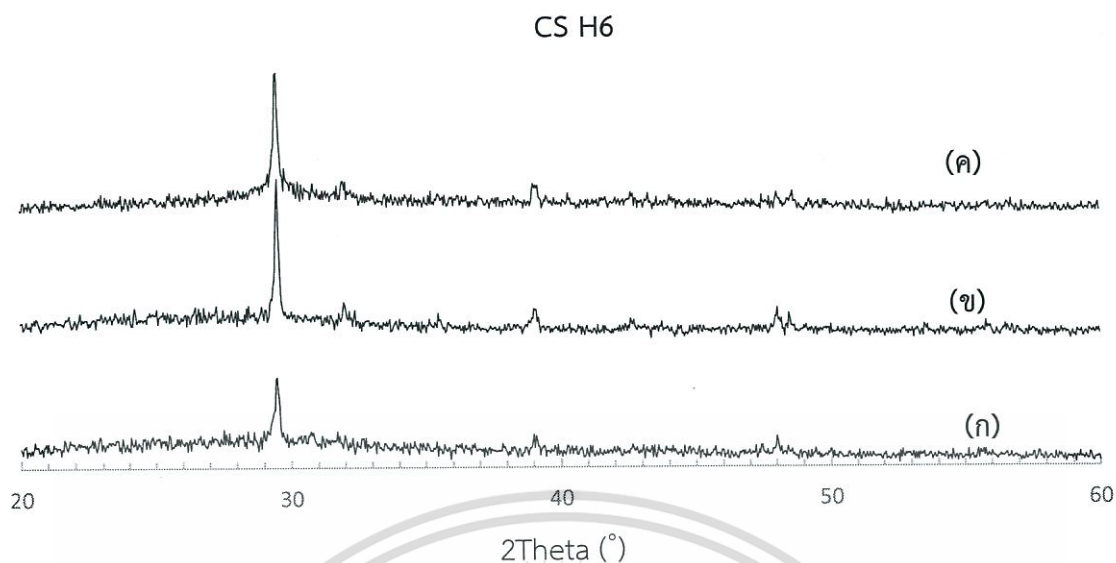
รูปที่ 4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)

จากรูปที่ 4.1 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต ที่สังเคราะห์ได้เมื่อปรับอัตราส่วนทั้ง 3 อัตราส่วน ปรากฏพีคของวัฏภาคผลึกในรูปแบบเดียวกันคือ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.36° ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพีคของสารตัวอย่างกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากฐานข้อมูลพบว่าสอดคล้องกับข้อมูลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; JCPDS NO.33-306)



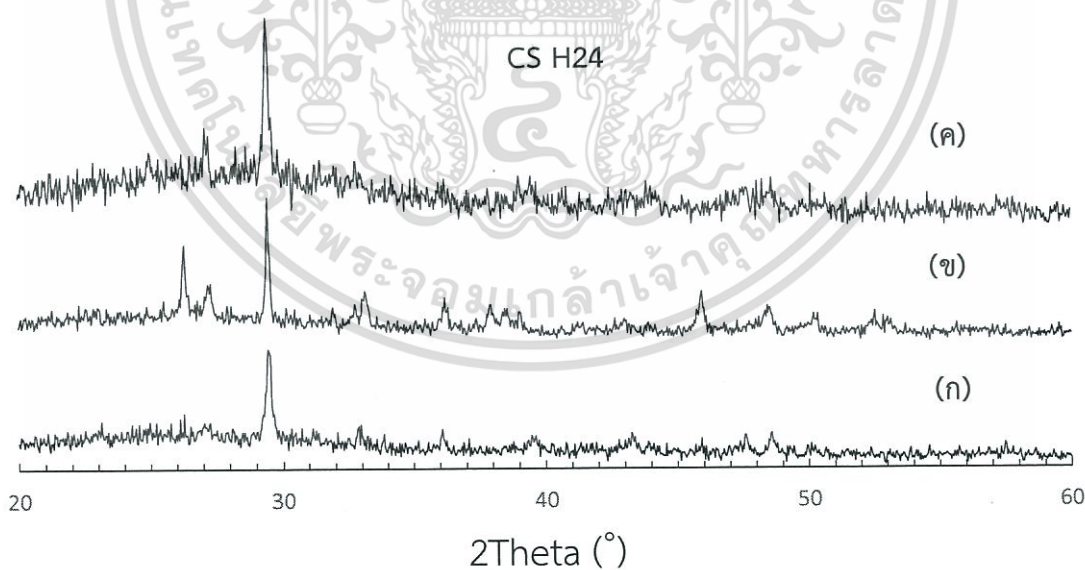
รูปที่ 4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)

จากรูปที่ 4.2 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต ทั้ง 3 อัตราส่วนที่ใช้ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 3 ชั่วโมง ปรากฏพีกของวัฏภาคผลึกชนิดเดียวกันคือ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.36° นอกจากนี้ที่ตัวอย่าง CS1 และ CS2 ยังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 38.00° และ 48.00° ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพีกของสารตัวอย่างทั้ง 3 พีก กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากฐานข้อมูลพบว่าสอดคล้องกับข้อมูลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; JCPDS NO.33-306) โดยพีกที่ปรากฏมีความเข้มและชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.1 เนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงขึ้น



รูปที่ 4.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิติเลตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 6 ชั่วโมง รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิติเลต ทั้ง 3 อัตราส่วน ปรากฏพีกของวัฏภาคผลึกชนิดเดียวกันคือ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.1 และ 4.2

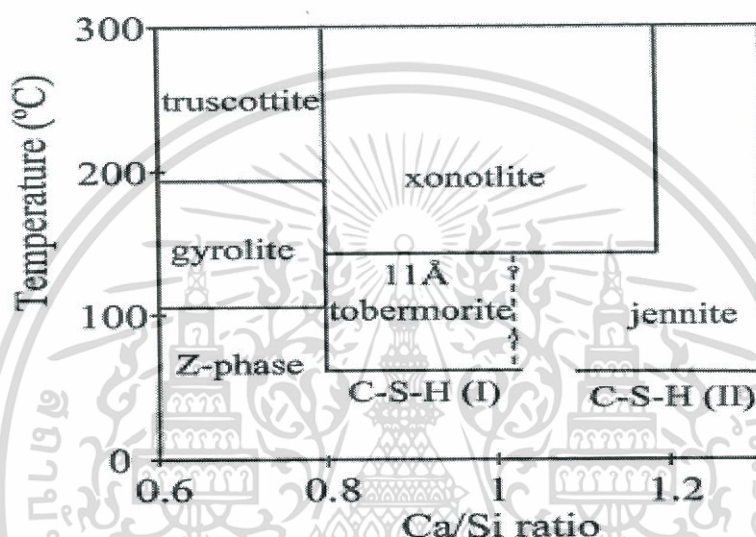


รูปที่ 4.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิติเลตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CS1:1 (ก) CS1:2 (ข) และ CS2:1 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 24 ชั่วโมง รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต ทั้ง 3 อัตราส่วน ยังคงมีวัฏภาคผลึกเป็นชนิดเดียวกันแต่พิภพมีความชัดเจนขึ้นในทุกตำแหน่ง

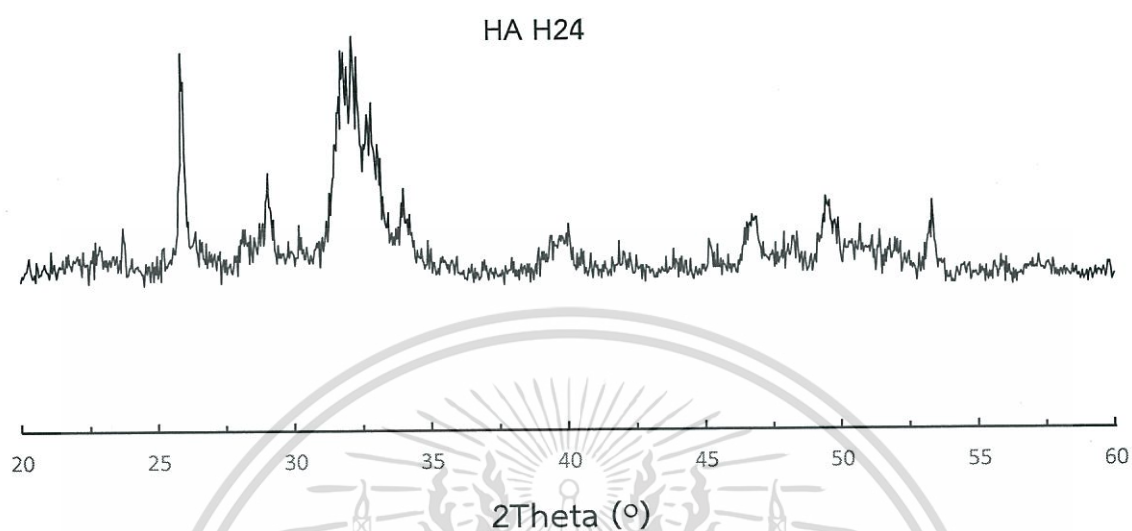
จากผลการวิเคราะห์ XRD ข้างต้น สรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ca:Si ในการสังเคราะห์ในช่วงอัตราส่วน 1:2 ถึง 2:1 ยังคงเป็นช่วงที่ให้วัฏภาคผลึกชนิดเดียวกันคือ $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โดยการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลจาก 1 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมงจะส่งผลให้ผลึกมีความสมบูรณ์และขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.5 แผนภาพของวัฏภาคแคลเซียมซิลิเกต [42]

4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

เมื่อนำสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลในระยะเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์วัฏภาคผลึกด้วยเทคนิค XRD ซึ่งได้ผลแสดงในดังรูปที่ 4.5

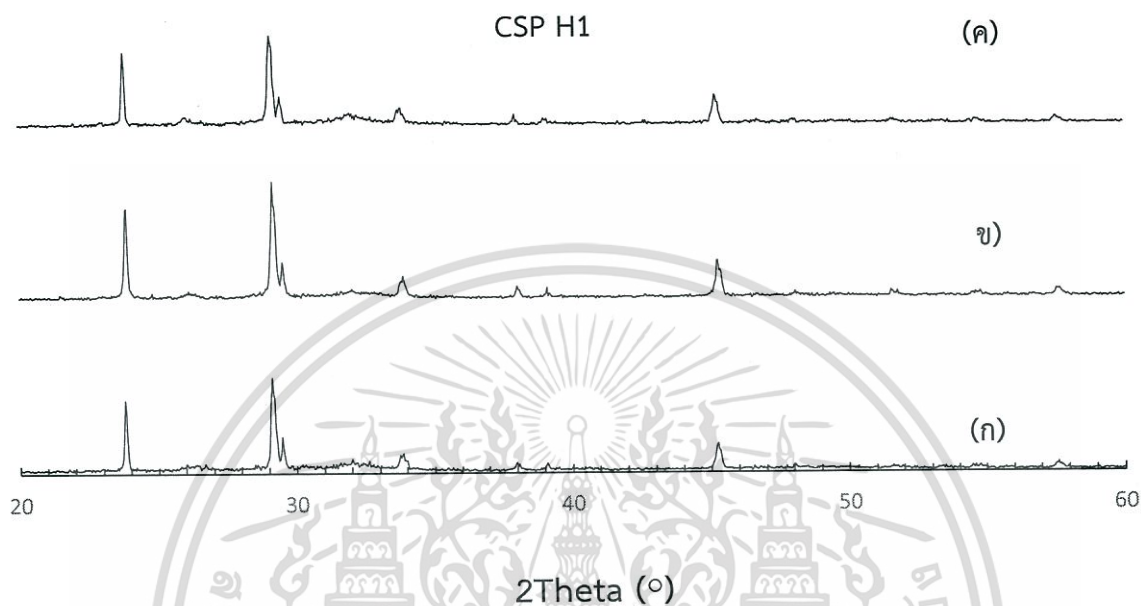


รูปที่ 4.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตโดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.6 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตปรากฏพีกของวัฏภาคผลึกคือ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.8° 31.7° 33.00° 34.2° 39.8° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00° ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งพีกของสารตัวอย่าง กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากฐานข้อมูลพบว่าสอดคล้องกับข้อมูลของวัฏภาคผลึกของไฮดรอกซีแอปาทิต ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$; JCPDS No.09-0432)

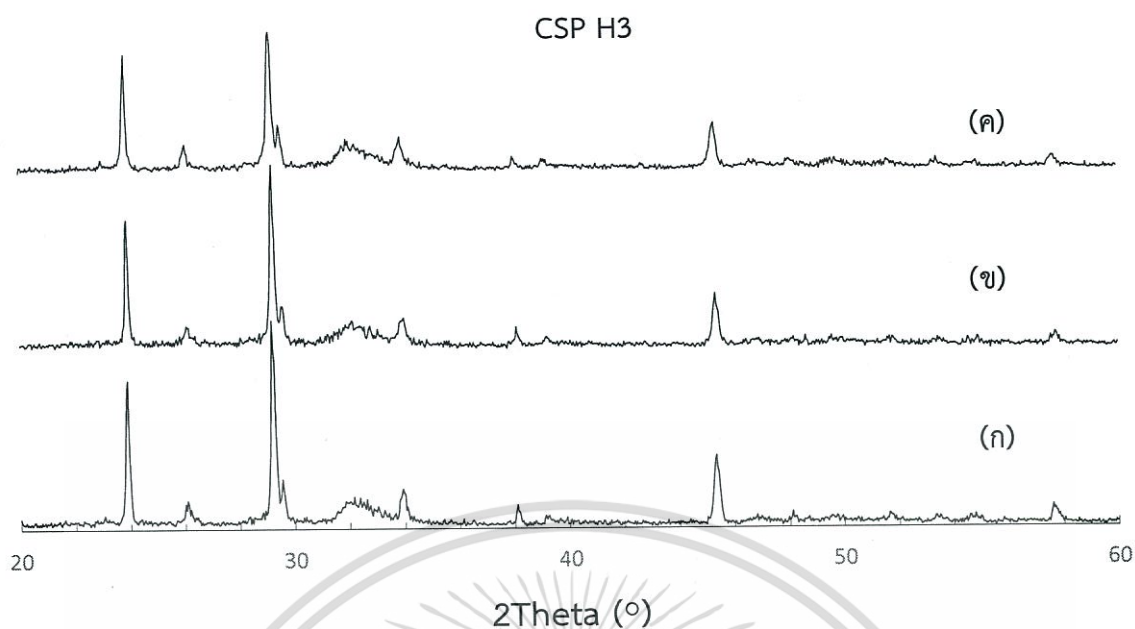
4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต

เมื่อนำสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลในระยะเวลาที่แตกต่างกันและอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมซิลิเกตต่อแคลเซียมฟอสเฟต คงที่เท่ากัน มาทำการวิเคราะห์วัฏภาคผลึกด้วยเทคนิค XRD ซึ่งได้ผลแสดงในดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9



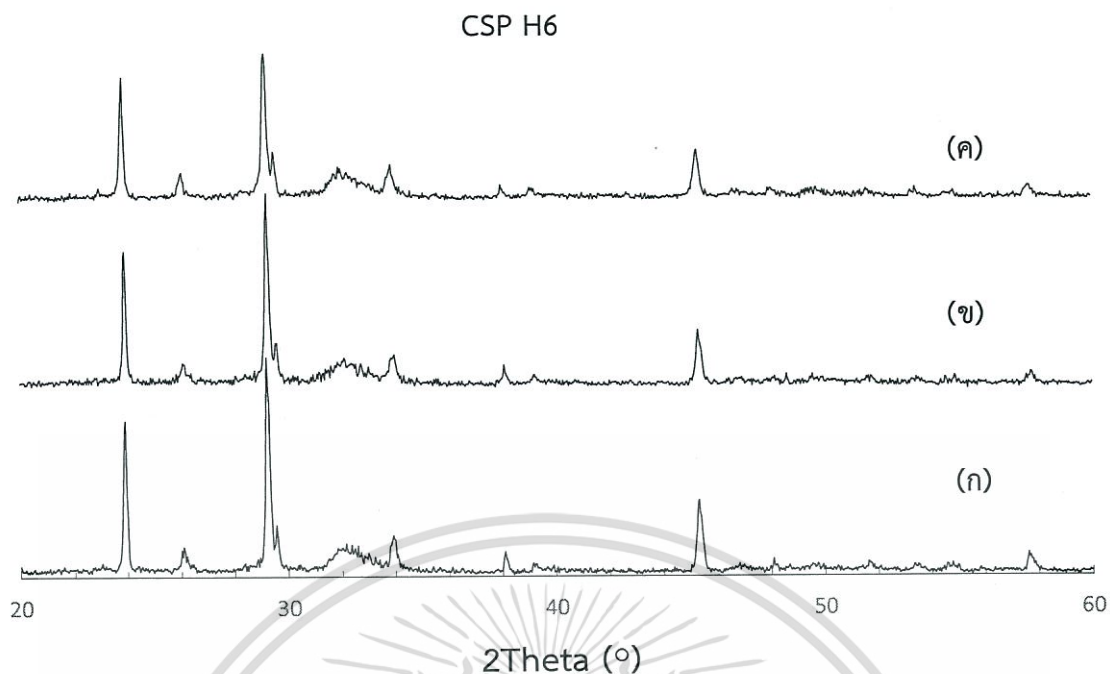
รูปที่ 4.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1(ค)

จากรูปที่ 4.7 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้เมื่อปรับอัตราส่วนทั้ง 3 อัตราส่วน ปรากฏพีกของวัฏภาคผลึกในรูปแบบเดียวกันคือ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.36° 38.00° ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งพีกของสารตัวอย่างพบว่าสอดคล้องกับฐานข้อมูลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; JCPDS NO.33-306) และปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.70° เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งพีกของที่ 3 พีกมีความสอดคล้องกับฐานข้อมูลของวัฏภาคผลึกของไฮดรอกซีแอสพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$; JCPDS No.09-0432) นอกจากนี้ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 24.00° 45.00° ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูลของไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (DCPD) or Brushite; JCPDS No 11-293)



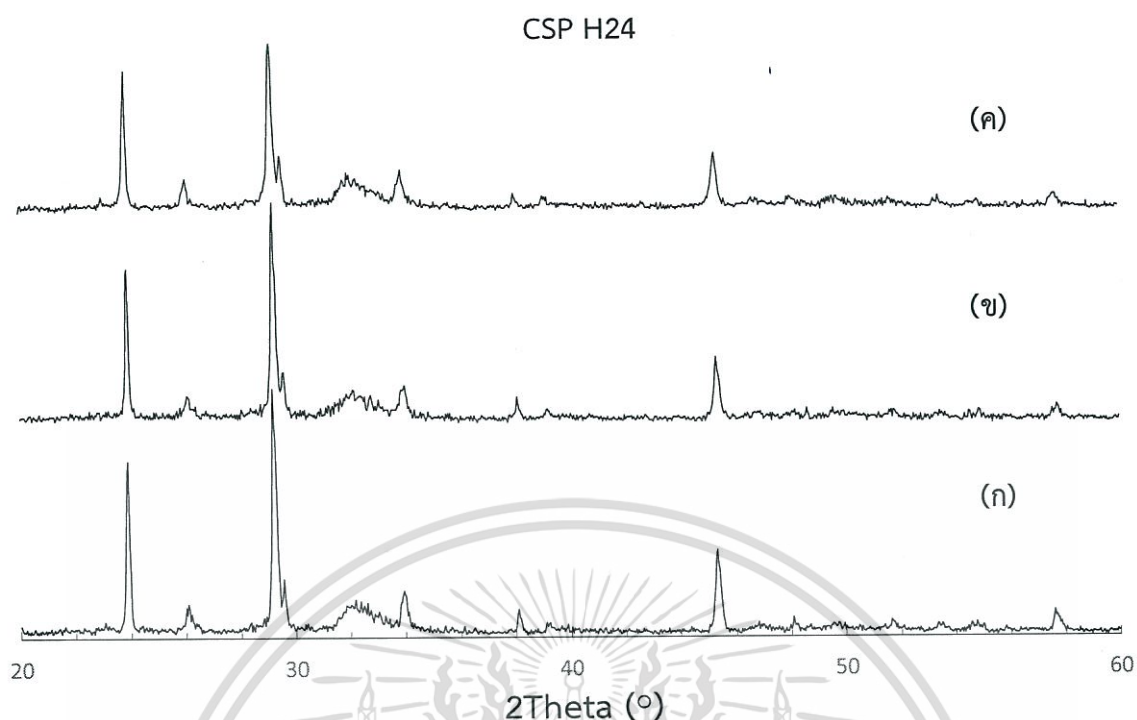
รูปที่ 4.8 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1(ค)

จากรูปที่ 4.8 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้เมื่อปรับอัตราส่วนทั้ง 3 อัตราส่วน ปรากฏฟีกของวัฏภาคผลึกในรูปแบบเช่นเดียวกับรูปที่ 4.6 ประกอบด้วยวัฏภาคผลึก $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ นอกจากนี้พบว่าฟีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 31.7° ของวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอสพาไทต์ มีความเข้มของฟีกชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากเพิ่มระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลมากขึ้น จึงมีความเป็นผลึกสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1(ค)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าตัวอย่างสารประกอบทั้ง 3 อัตราส่วน มีแผนภาพ XRD ที่แสดงเช่นเดียวกันทั้ง 3 ตัวอย่างของวัฏภาคผลึก $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ โดยมีฟีกผลึกที่แหลมสูงชัดเจนเช่นเดียวกับตัวอย่างที่สังเคราะห์โดยการไฮโดรเทอร์มอลในระยะเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง แสดงถึงผลึกที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.10 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CSP1:1 (ก) CSP1:2 (ข) และ CSP2:1 (ค)

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มอลเป็น 24 ชั่วโมง พบว่า ทั้ง 3 ตัวอย่าง เช่นเดียวกับตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้ระยะเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง และยังพบว่ามีความชัดเจนของพีกที่เด่นชัดขึ้นในทุกตำแหน่ง

จากผลการวิเคราะห์ XRD ข้างต้น สรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ca:Si ในการสังเคราะห์ในช่วงอัตราส่วน 1:2 ถึง 2:1 แต่อัตราส่วนของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตต่อแคลเซียมฟอสเฟตยังคงเท่าเดิมคือ 0.6 ซึ่งวัฏภาคผลึกที่สังเคราะห์ได้ไม่แตกต่างกัน โดยมีวัฏภาคผลึก ได้แก่ $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ นอกจากนี้การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลจาก 1 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมงจะส่งผลให้ผลึกมีความสมบูรณ์และขนาดใหญ่ขึ้น โดยไฮโดรเทอร์มอล 24 ชั่วโมงจะเกิดผลึกสมบูรณ์ที่สุด

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการคงรูปของก้อนตัวอย่าง

ชื่อสาร ตัวอย่าง	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา ไฮโดรเทอร์มอล (ชั่วโมง)	ความสามารถในการคงรูปของ ก้อนตัวอย่างก่อนแช่ใน สารละลายจำลองสภาวะใน ร่างกาย (SBF)		ความสามารถในการคงรูปของก้อน ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลายจำลอง สภาวะในร่างกาย (SBF) เป็น ระยะเวลา 7 วัน	
		Hydration	PMMA	Hydration	PMMA
CS1	1	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
	6	✓	✓	✓	✓
	24	✓	✓	✓	✓
CS2	1	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
	6	✓	✓	✓	✓
	24	✓	✓	✓	✓
CS3	1	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
	6	✓	✓	✓	✓
	24	✓	✓	✓	✓
HA	24	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓- สามารถคงรูปได้

✗- ไม่สามารถคงรูปได้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

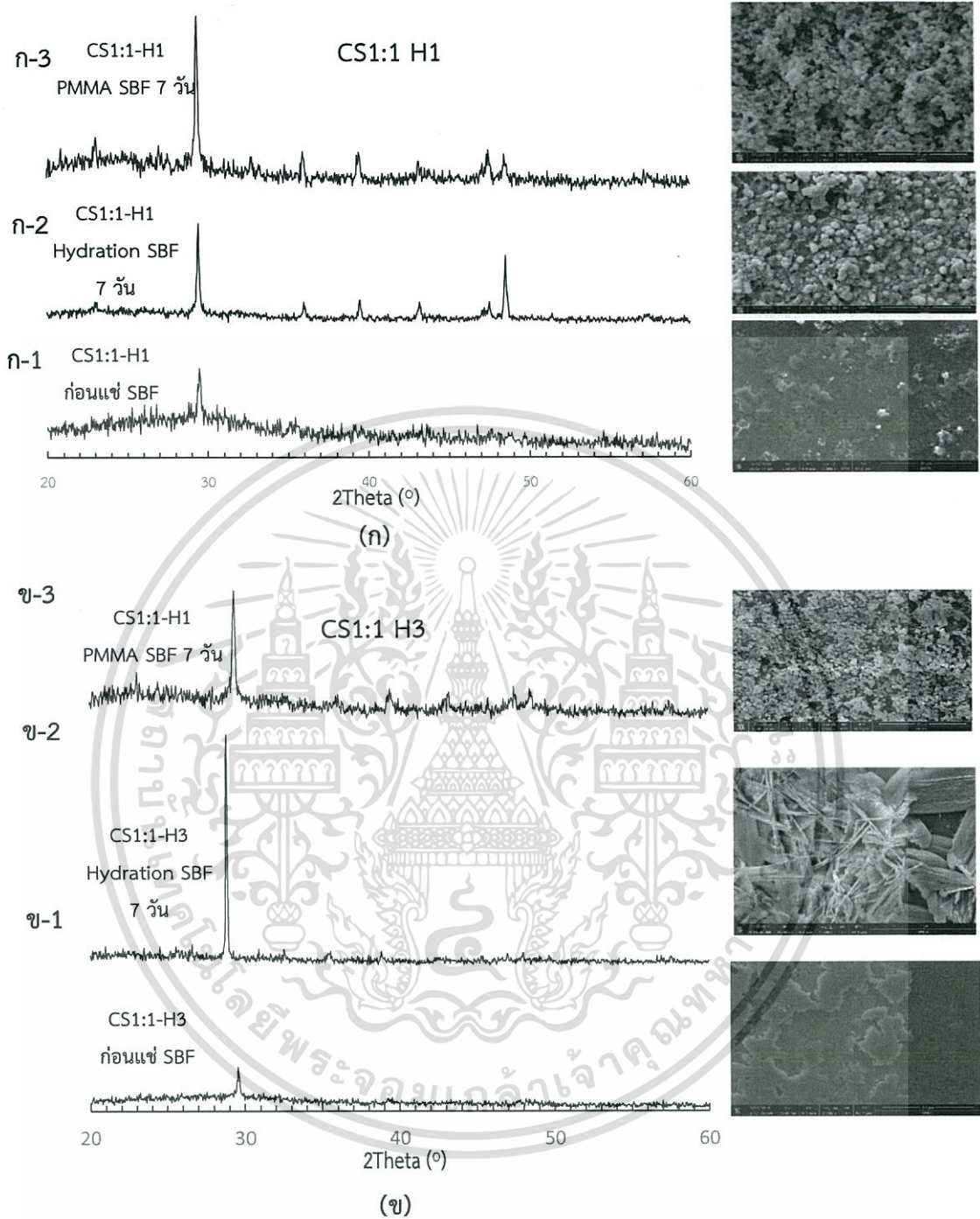
ชื่อสาร ตัวอย่าง	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา ไฮโดรเทอร์มอล (ชั่วโมง)	ความสามารถในการคงรูปของ ก้อนตัวอย่างก่อนแช่ใน สารละลายจำลองสภาวะใน ร่างกาย (SBF)		ความสามารถในการคงรูปของก้อน ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลายจำลอง สภาวะในร่างกาย (SBF) เป็น ระยะเวลา 7 วัน	
		Hydration	PMMA	Hydration	PMMA
CSP1	1	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✗	✗
	6	✓	✓	✗	✗
	24	✓	✓	✓	✓
CSP2	1	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✗	✗
	6	✓	✓	✗	✓
	24	✓	✓	✗	✓
CSP3	1	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✗	✗
	6	✓	✓	✗	✗
	24	✓	✓	✗	✓

หมายเหตุ ✓- สามารถคงรูปได้

✗- ไม่สามารถคงรูปได้

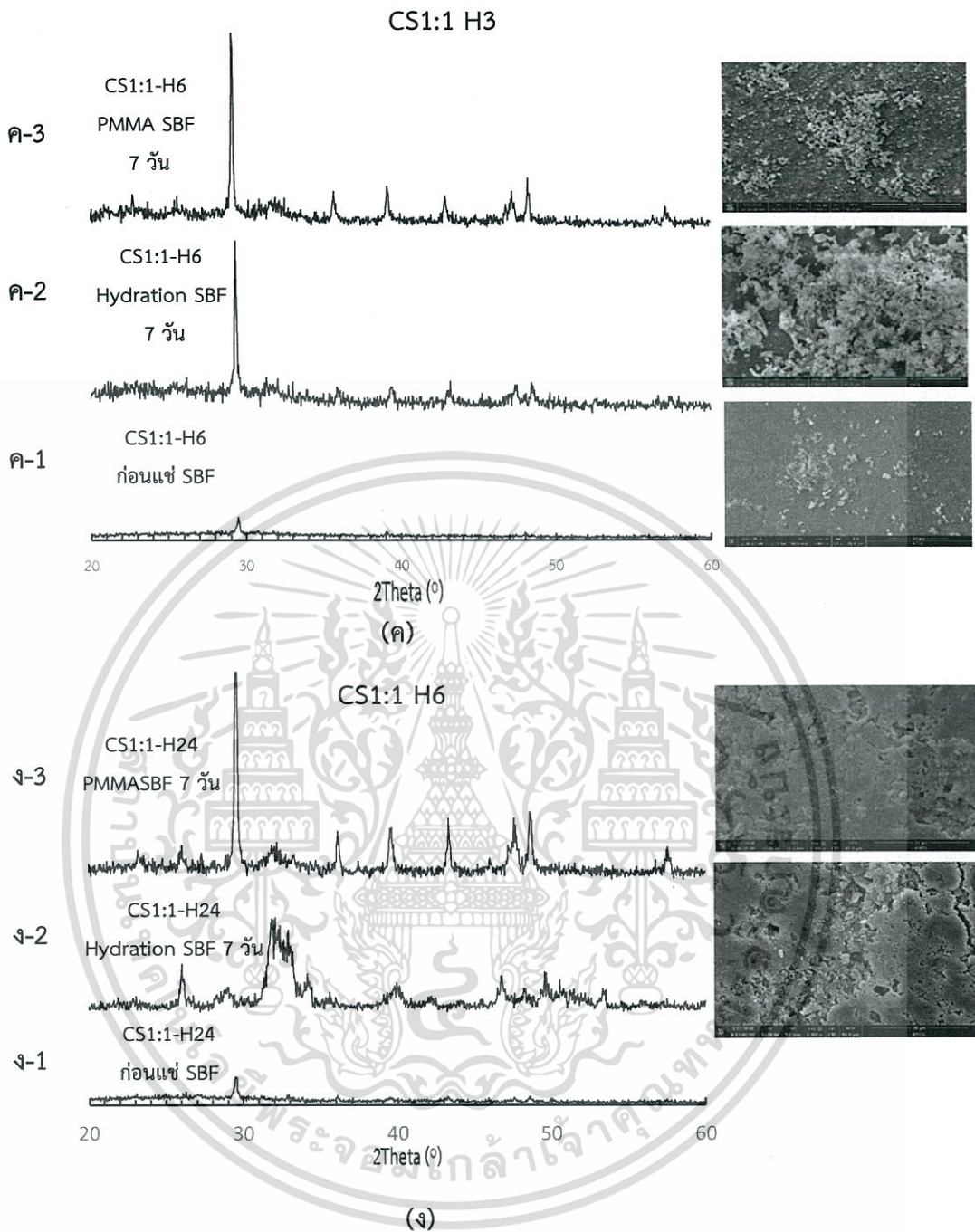
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 สมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต



รูปที่ 4.11 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่า ของตัวอย่าง CS1:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CS1:1-H1 (ก) CS1:1-H3 (ข) CS1:1-H6 (ค) และ CS1:1-H24 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



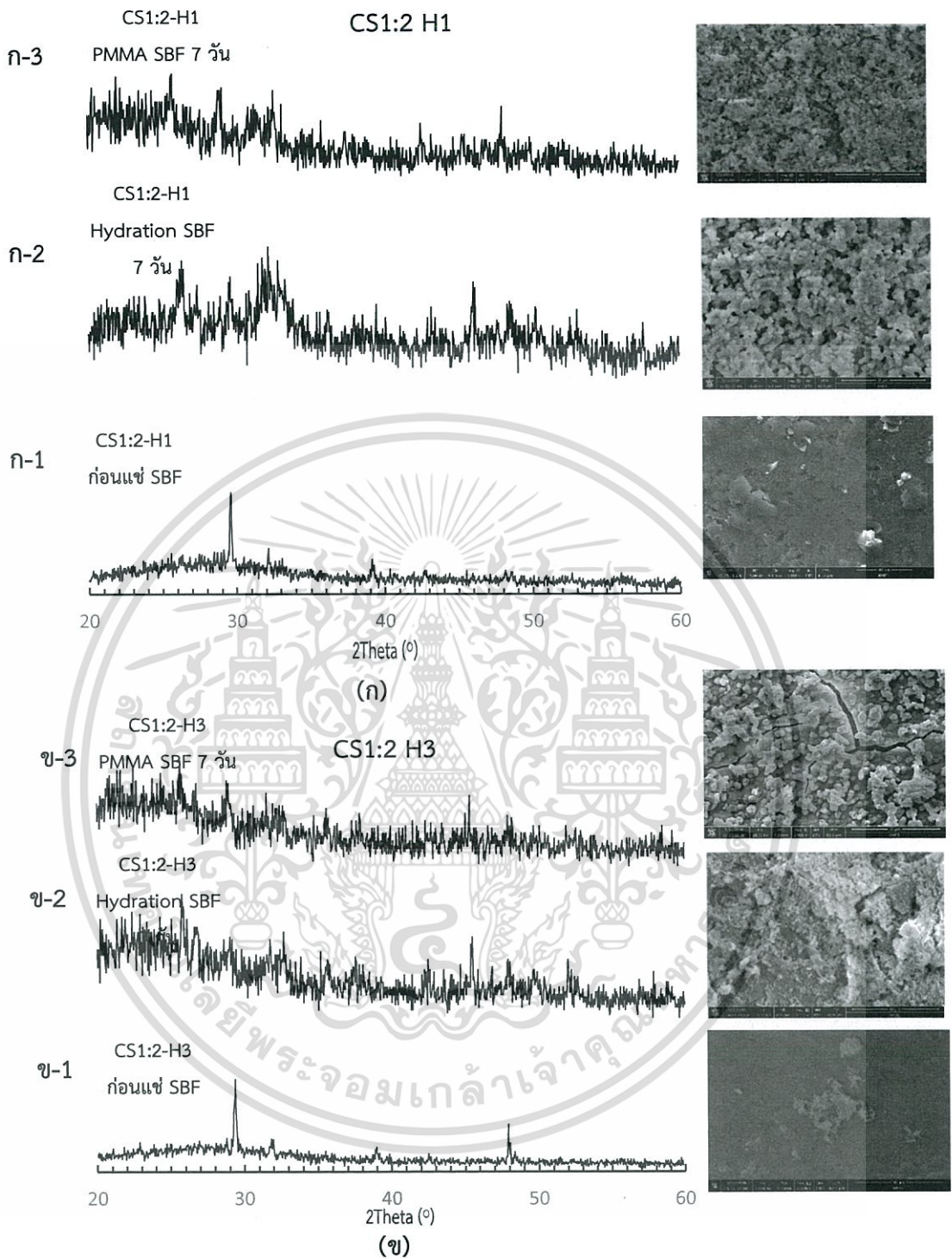
รูปที่ 4.11 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.11 (ก) ถึง (ค) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง CS1:1 ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 3 และ 6 ชั่วโมง ทั้งก่อนและหลังแช่ในสารละลาย SBF พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไม่ปรากฏพีกใหม่ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามพบว่ารูปที่ 4.11 (ง-1) ซึ่งเป็นตัวอย่าง CS1:1 ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะสังเกตเห็นพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 39.8° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00° เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพีกของวัฏภาคผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

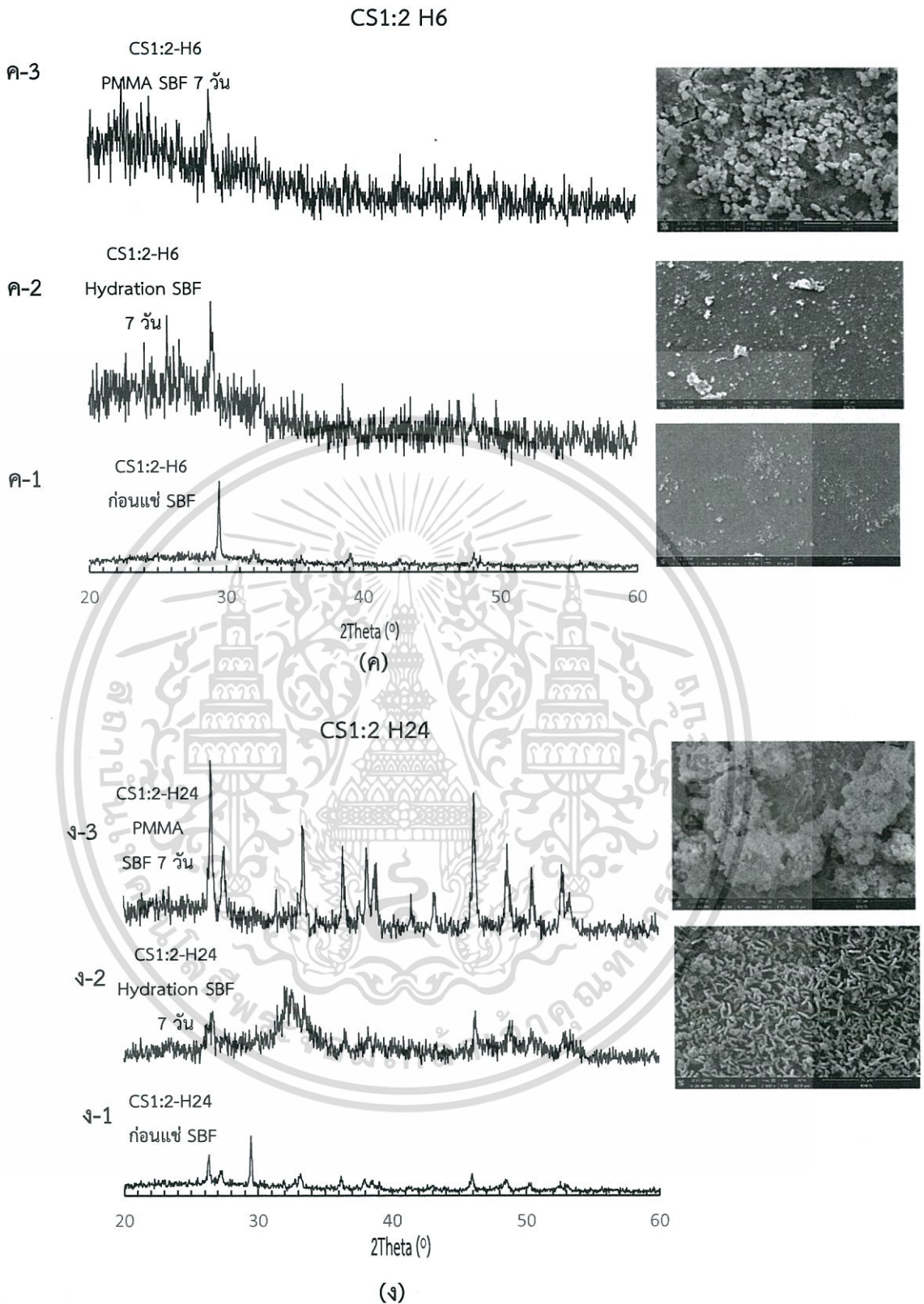
ผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$; JCPDS No.09-0432) เกิดขึ้นอย่างชัดเจน แสดงถึงสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของตัวอย่าง CS1:1

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากลักษณะสัณฐานทางวิทยา จากภาพถ่าย SEM พบว่าจากตัวอย่างในรูปที่ 4.11 ซึ่งผลึกที่ก่อขึ้นใหม่คือไฮดรอกซีแอปพาไทต์หลังจากแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 วันจะเห็นการก่อตัวของผลึกชนิดใหม่เกิดขึ้นในทุกตัวอย่าง การไม่ปรากฏฟีกของวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่ก่อตัวขึ้นในแผนภาพ XRD ในรูปที่ 4.11 (ก) - (ค) สันนิษฐานว่าจะ เป็นผลเนื่องจากวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่เกิดขึ้นใหม่มีปริมาณไม่มากพอที่จะบดบังสัญญาณของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตตั้งต้น และ/หรือในระหว่างที่ทำการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาจจะเป็นการวิเคราะห์ด้านใต้ของเม็ดสารตัวอย่างที่ติดกับพื้นผิวของภาชนะที่ใส่สารละลาย SBF ส่งผลให้เกิดวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่น้อยกว่า นอกจากนี้รูปร่างของผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายอยู่บนพื้นผิวของสารตัวอย่าง และบางพื้นที่เกาะกลุ่มกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ P. Siriphannon และคณะ [32] ระบุว่าเมื่อแช่ตัวอย่างแคลเซียมซิลิเกตลงในสารละลาย SBF วัฏภาคแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดการละลายของแคลเซียมไอออนในสารละลาย SBF เป็นผลให้ Ca^{2+} ในสารละลาย SBF ซึ่งอิมมูบิยิวต์สูงชันจึงช่วยส่งเสริมก่อสร้างชั้นผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ขึ้นบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง และในลักษณะสัณฐานทางวิทยาในรูปที่ 4.11 (ข-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่ามีชั้นผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์แบบแท่ง (Nanorod) กระจายอยู่บนพื้นผิวของสารตัวอย่างซึ่งจากงานวิจัยของ C.Qi [43] และคณะ ระบุว่าเป็นการก่อสร้างชั้นผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ในลักษณะดังกล่าวจะเติบโตต่อไปเป็นไฮดรอกซีแอปพาไทต์แบบไมโครฟลาวเวอร์ (Microflowers HAp) ซึ่งมีศักยภาพในการขนส่งยาและบรรจุยาเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูง จึงมีค่าที่สามารถใช้งานทางด้านการแพทย์ได้



รูปที่ 4.12 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่าของตัวอย่าง CS1:2 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CS1:2-H1 (ก) CS1:2-H3 (ข) CS1:2-H6 (ค) และ CS1:2-H24 (ง)

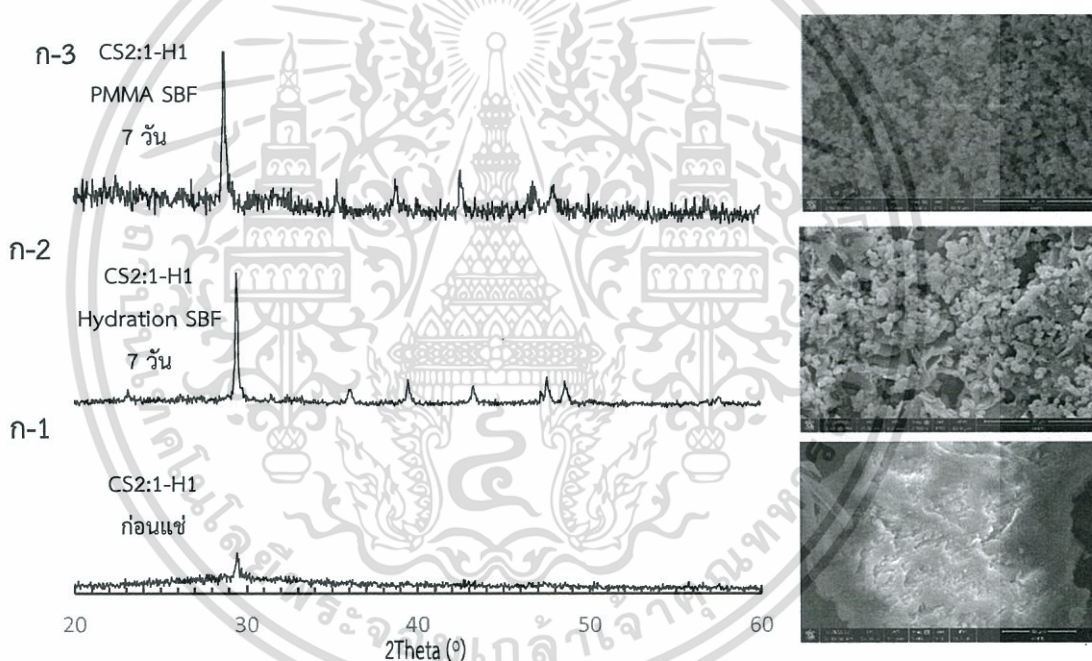
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 (ต่อ)

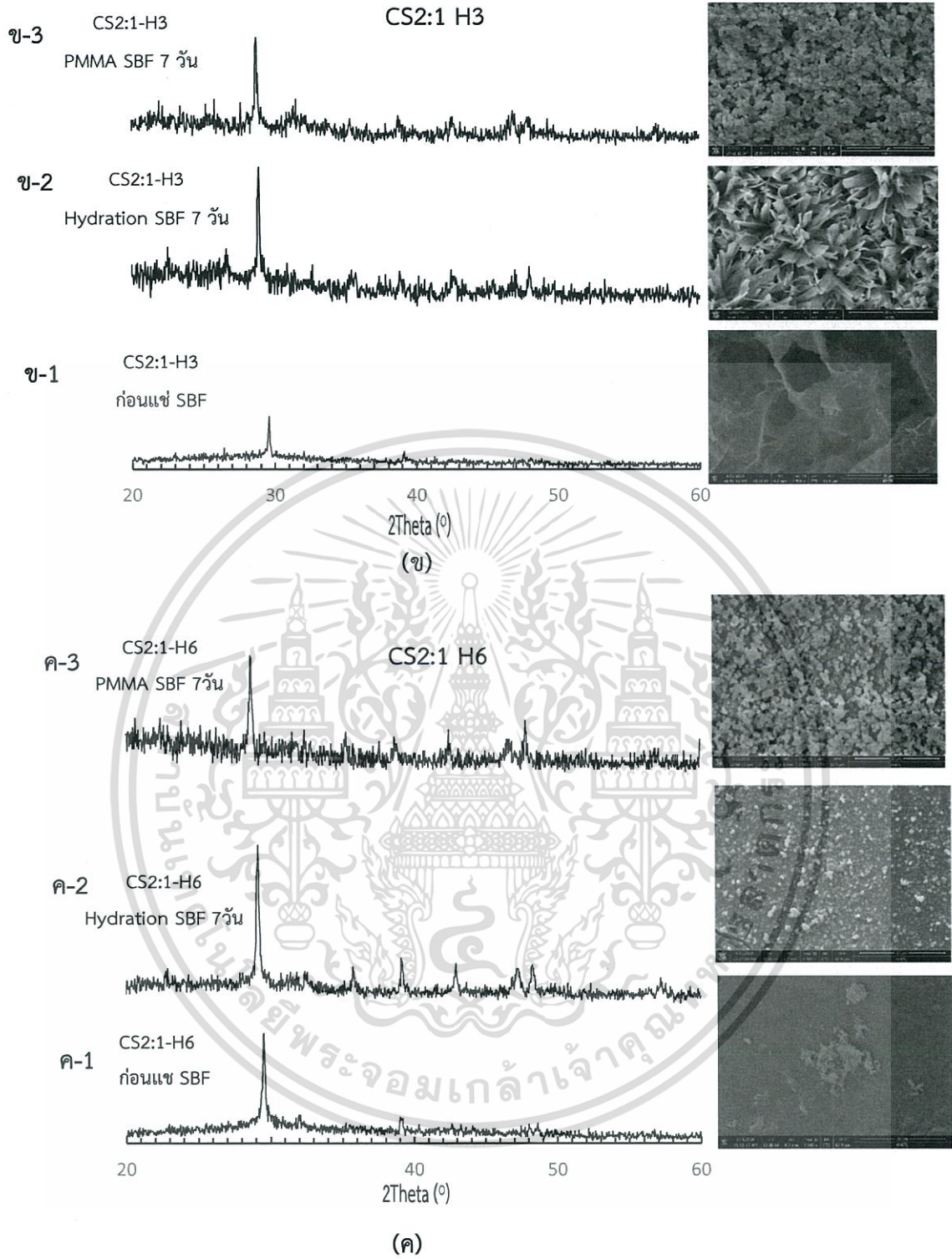
จากรูปที่ 4.12 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตัวอย่าง CS1:2 รูปที่ 4.12 (ก) - (ค) ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการขึ้นรูปด้วยการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต 1 3 และ 6 ชั่วโมง ปรากฏว่าเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผลึกของ ไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ไม่แตกต่างกันที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 27.00° 31.7° 33.00° 34.2° 36.5° 38.00° 39.8° 41.5° 43.5° 46.8° 49.6° 50.6° 53.00° และ 54.00° นอกจากนี้รูปที่ 4.12 (ง-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่ามีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์ โดยพบฟีกของวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 46.8° 49.6° 50.6° 53.00° และ 54.00° เมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 (ง-3) ขึ้นรูปด้วยการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลตพบว่าฟีกวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ปรากฏ ไม่มีความแตกต่างจากฟีกของรูปที่ 4.12 (ง-1) ก่อนแช่ในสารละลาย SBF จึงสันนิษฐานว่าเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 (ก) ถึง (ค) แต่เมื่อพิจารณารูปลักษณะสัณฐานทางวิทยาของ CS1:2 หลังจากแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 วัน ส่วนมากจะก่อตัวเป็นชั้นผลึกไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ลักษณะทรงกลมเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 ในขณะที่รูปที่ 4.12 (ง-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยา ไฮเดรชัน พบว่าการก่อตัวของผลึกไฮดรอกซีแอปาทาइटแตกต่างออกไปคือมีลักษณะการโตของผลึกแบบรูปวงรีคล้ายฟองน้ำและมีรูพรุน



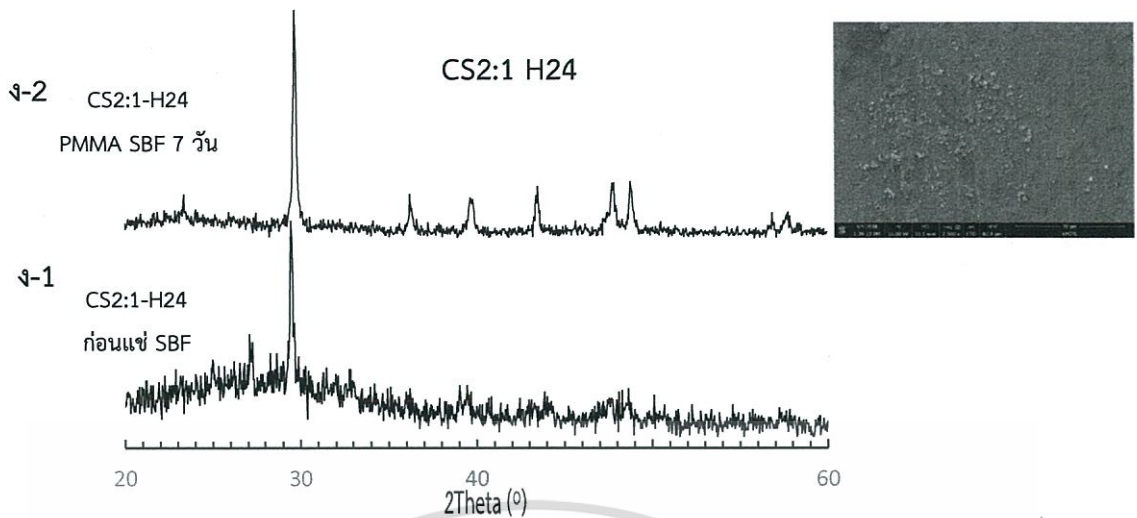
(ก)

รูปที่ 4.13 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่าของตัวอย่าง CS2:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 3 6 และ 24 ชั่วโมงก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CS2:1-H1 (ก) CS2:1-H3 (ข) CS2:1-H6 (ค) และ CS2:1-H24 (ง)



รูปที่ 4.13 (ต่อ)

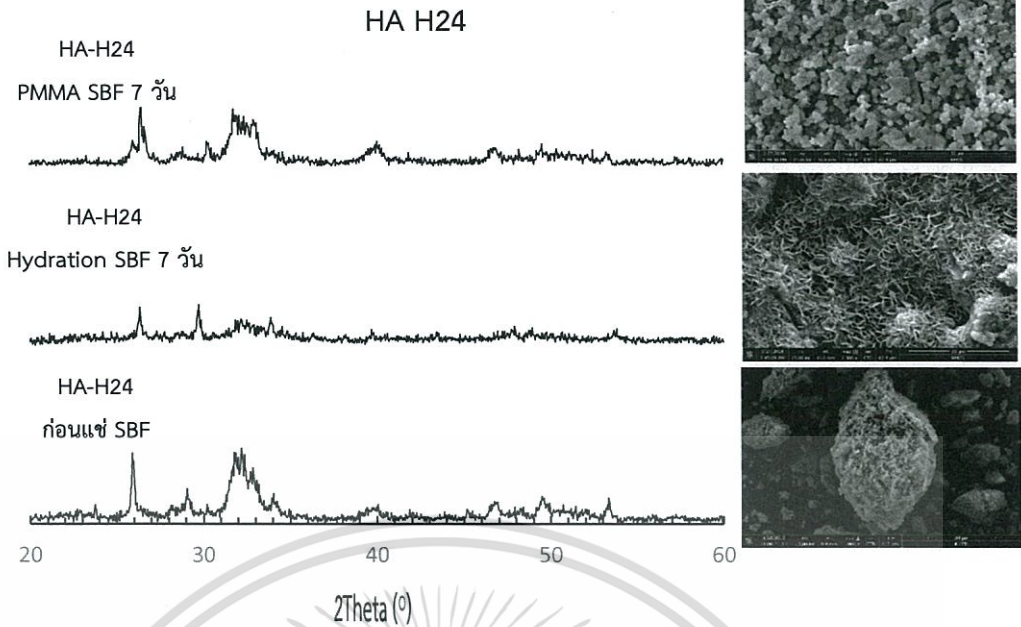
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

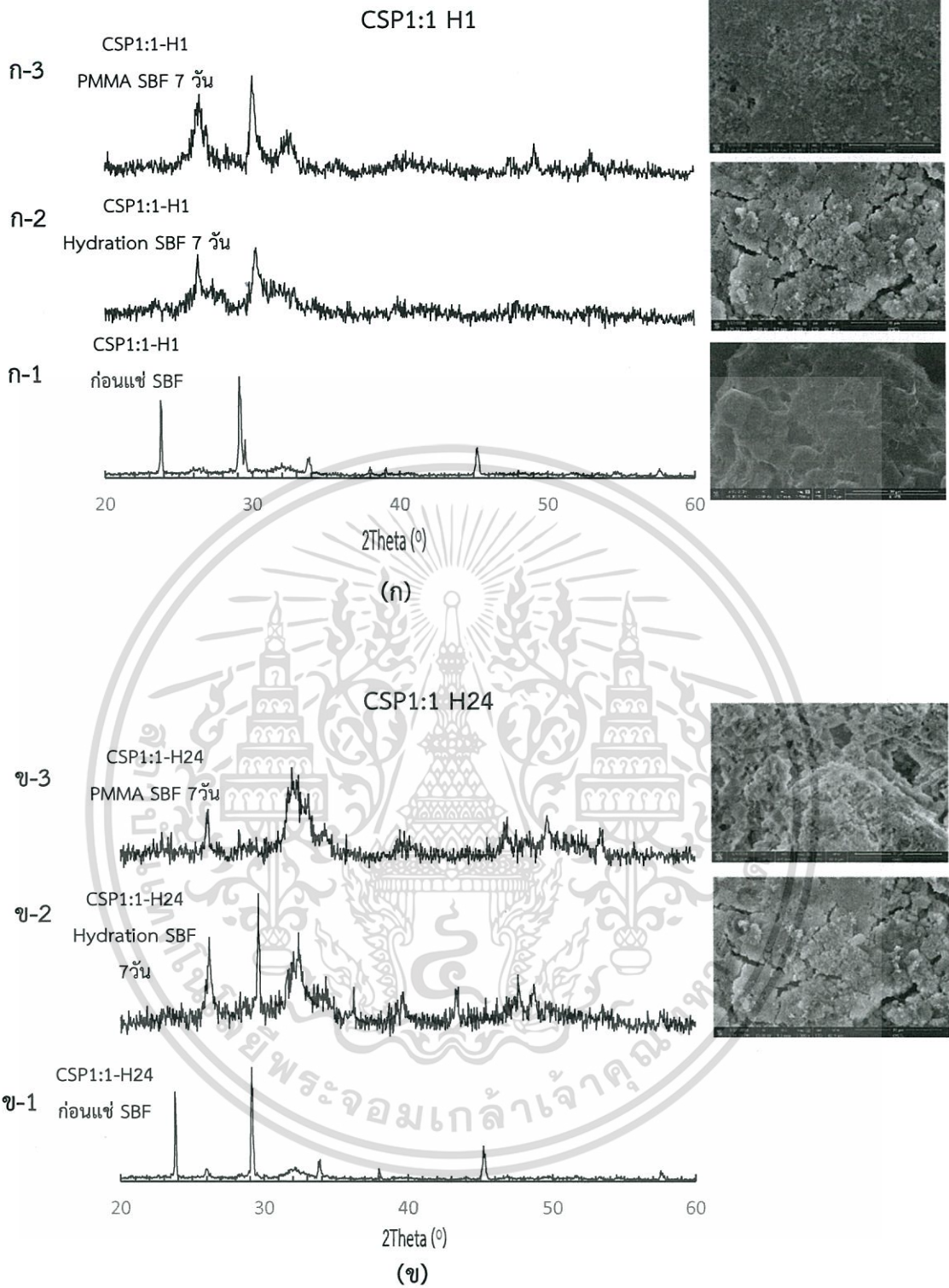
รูปที่ 4.13 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.13 สารตัวอย่าง CS2:1 หลังจากแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทุกตัวอย่าง CS2:1 ปรากฏพีกของวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอพาไทต์ชนิดเดียวกันที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 36.5° 39.80° 43.5° 49.60° และ 50.6° และรูปที่ 4.13 (ง-1) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์กว่าทุกอย่าง เนื่องจากให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 24 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาลักษณะสัญญาณทางวิทยาของ CS2:1 พบว่ามีการก่อตัวของผลึกไฮดรอกซีแอพาไทต์ในทุกตัวอย่างซึ่งส่วนมากจะเป็นผลึกที่มีลักษณะทรงกลมเช่นเดียวกับ รูปที่ 4.11 นอกจากนี้ลักษณะสัญญาณทางวิทยาของรูปที่ 4.13 (ง-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าเป็นการก่อตัวของผลึกไฮดรอกซีแอพาไทต์รูปแบบแท่ง (Nanorod) เช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 (ง-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้พบว่ารูปที่ 4.13 (ง-2) ที่ขึ้นรูปด้วยการหดยดพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีลักษณะสัญญาณทางวิทยาที่ไม่สอดคล้องกับแผนภาพ XRD ที่เกิดขึ้น จึงสันนิษฐานว่า ระหว่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราดเม็ดตัวอย่างอาจจะเป็นด้านใต้ที่ติดกับพื้นผิวภาชนะใส่สารละลาย SBF ทำให้เกิดผลึกฮดรอกซีแอพาไทต์ที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.14 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่าของตัวอย่าง HA โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วัน

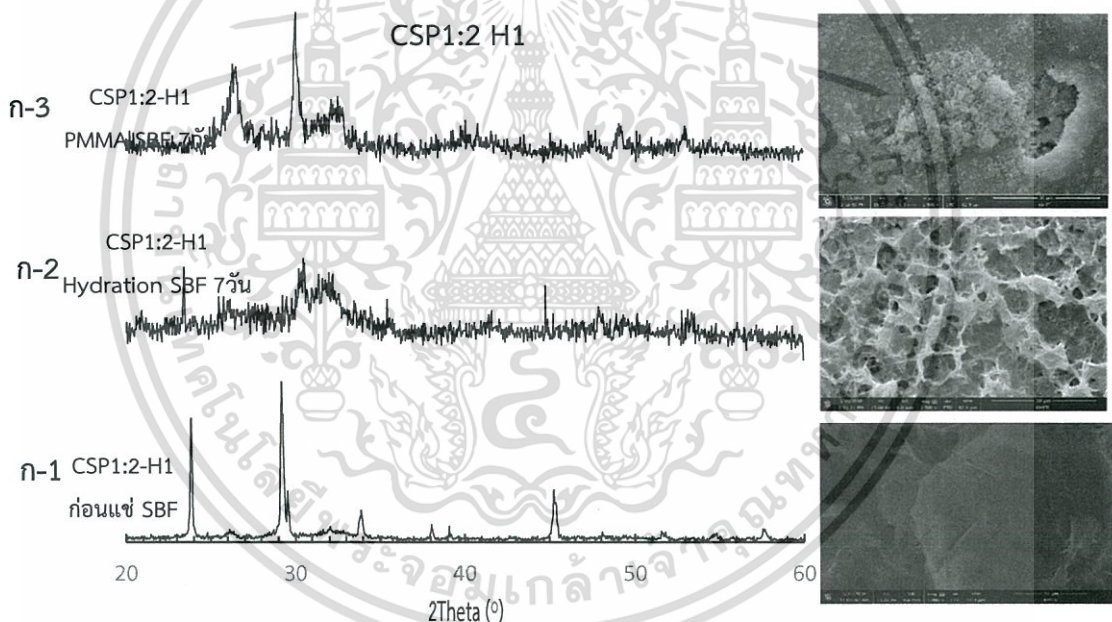
จากรูปที่ 4.14 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่มีการปรับอัตราส่วนโดยมวล Ca:P เท่ากับ 1.67 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของไฮดรอกซีแอสพาไทต์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ปรากฏฟังก์ชันของภูมิภาคผลึกของไฮดรอกซีแอสพาไทต์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 39.80° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00° ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}))$; JCPDS No.09-0432) และเมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของ HA พบว่าเกิดการสร้างขึ้นผลึกไฮดรอกซีแอสพาไทต์ ซึ่งแสดงถึงสมบัติความว่องทางชีวภาพ โดยไฮดรอกซีแอสพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีลักษณะของชั้นผลึกเป็นรูปทรงรีขนาดเล็กมีรูพรุนและคล้ายฟองน้ำ ในขณะที่ไฮดรอกซีแอสพาไทต์ที่ขึ้นรูปด้วยการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลตเกิดผลึกเช่นเดียวกับรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.15 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่าของตัวอย่าง CSP1:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CSP1:1-H1 (ก) และ CSP1:1-H24 (ข)

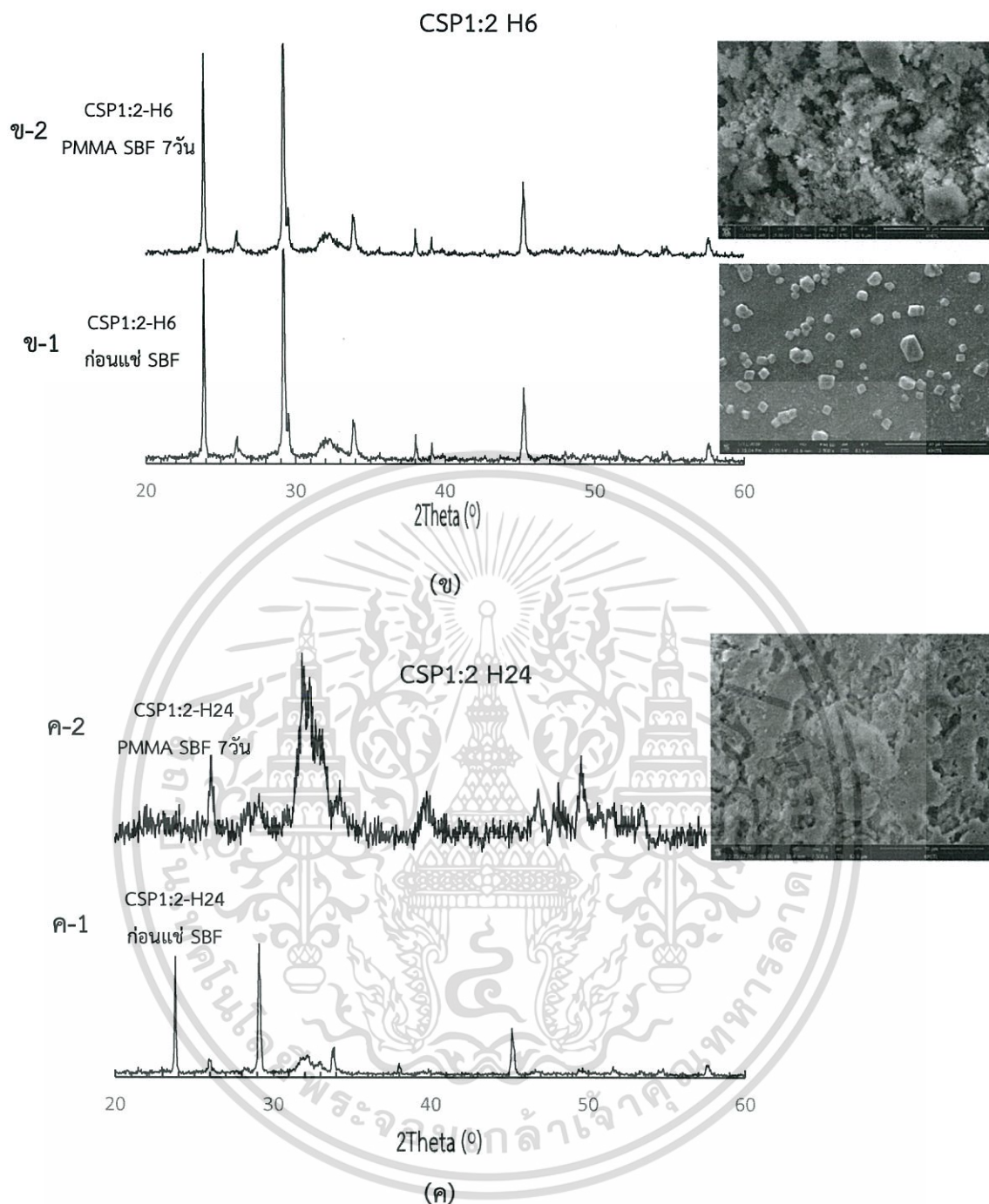
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 (ก) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูป (ก-2) – (ก-3) ภายหลังจากแช่ในสารละลาย SBF พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ปรากฏวัฏภาคผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์คือที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 36.5° 39.80° 43.5° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00° นอกจากนี้ยังพบว่าผลึกของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 24.00° ได้หายไป ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการสร้างชั้นผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่บริเวณบนพื้นผิวของสารประกอบแคลเซียมซิลิ-เกตไฮเดรตเริ่มต้น แต่เมื่อพิจารณาลักษณะสัญญาณวิทยาของตัวอย่าง CSP1:1 พบว่าไม่ปรากฏการสร้างชั้นของผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ จึงสันนิษฐานว่าเกิดเช่นเดียวกับรูปที่ 4.13 (ง-2) ในขณะที่ รูปที่ 4.15 (ข-3) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และลักษณะสัญญาณวิทยามีความสอดคล้องกัน โดยปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 36.5° 39.80° 43.5° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00° ซึ่งเป็นพีกของของวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ สอดคล้องกับฐานข้อมูล ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$; JCPDS No.09-0432) นอกจากนี้ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของรูปที่ 4.15 (ข-3) พบการสร้างชั้นผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่มีลักษณะทรงกลมหนาแน่น



(ก)

รูปที่ 4.16 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัญญาณวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่าของตัวอย่าง CSP1:2 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 6 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CSP1:2-H1 (ก) CSP1:2-H6 (ข) และ CSP1:2-H6 (ค)



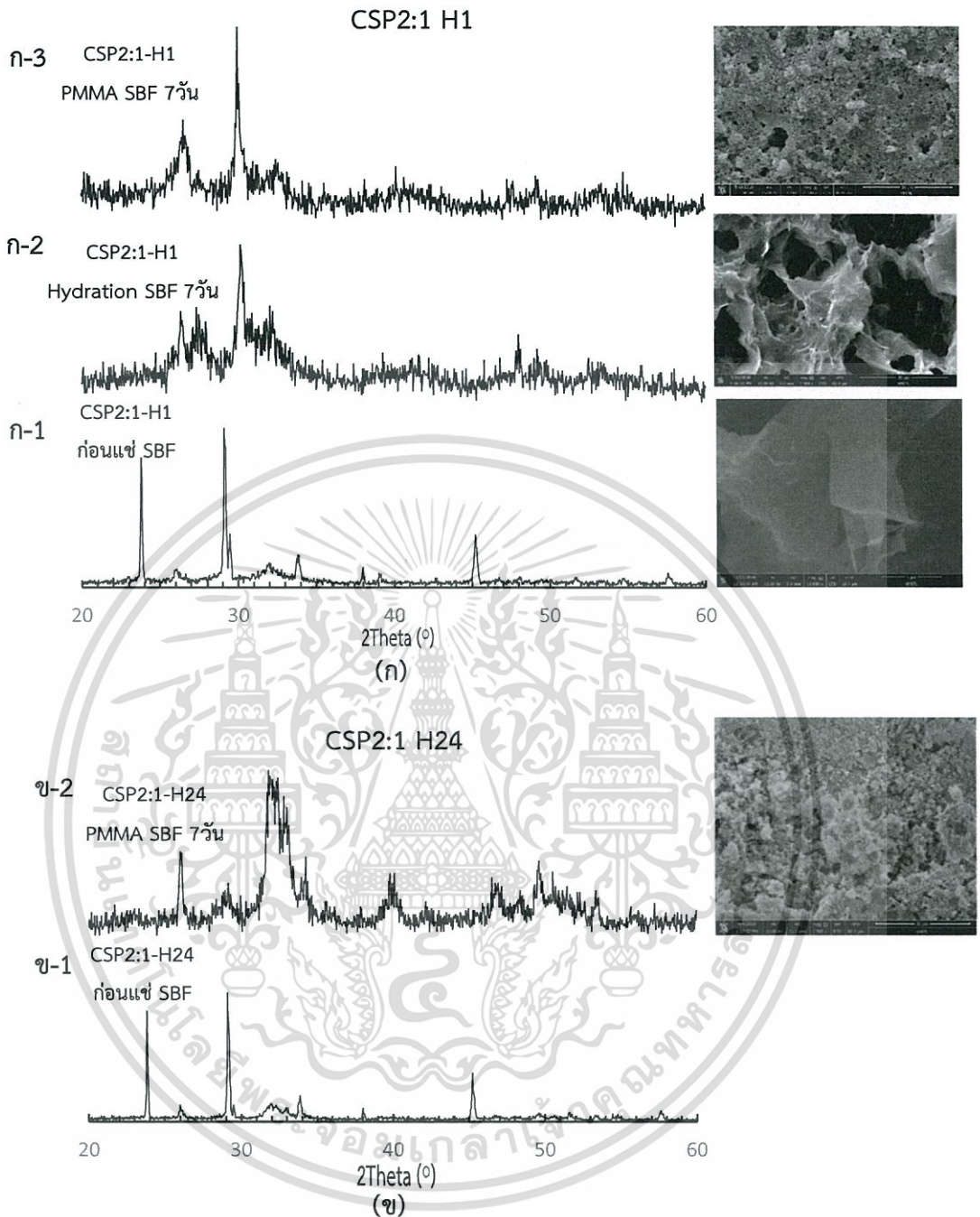
รูปที่ 4.16 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบสารตัวอย่าง CSP1:2 ทั้งก่อนและหลังแช่ในสารละลาย SBF พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของรูปที่ 4.16 (ก-2) และ (ก-3) ปรากฏพีคของวัฏภาคผลึกของ ไฮดรอกซีแอปาทาइटที่มีความคล้ายกันคือ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 36.5° 39.80° 43.5° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00° แต่เมื่อพิจารณารูปที่ขึ้นรูปด้วยการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ยังคงปรากฏพีคของไดแคลเซียมฟอสเฟสไดไฮดรตที่ 24.00° และ 45.00° จึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สันนิษฐานว่า วัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์ที่เกิดขึ้นใหม่มีปริมาณไม่มากพอที่จะบดบังสัญญาณของสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตตั้งต้น ในขณะที่รูปที่ 4.16 (ข-2) พบว่าไม่ปรากฏพีคของวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์ที่ก่อตัวขึ้นในแผนภาพ XRD และมีลักษณะคล้ายกับก่อนนำไปแช่ในสารละลาย SBF และไม่สอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาจึงสันนิษฐานว่าเกิดลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 และในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CSP1:2 ในรูปที่ 4.16 (ค-2) พบวัฏภาคผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์อย่างชัดเจนในทุกตำแหน่งคือที่ 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 36.5° 39.80° 43.5° 46.8° 49.6° 50.6° และ 54.00°

อย่างไรก็ตามลักษณะสัณฐานวิทยาของทุกตัวอย่างมีการก่อตัวของผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะทรงกลมที่ก่อตัวขึ้นอย่างหนาแน่น ในขณะที่รูปที่ 4.16 (ก-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดการสร้างขึ้นผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์เป็นลักษณะโครงข่ายคล้ายปะการังและมีรูพรุนที่ชัดเจน





รูปที่ 4.17 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2500 เท่าของตัวอย่าง CSP2:1 โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังจากแช่ใน SBF เป็นระยะเวลา 7 วันของตัวอย่าง CSP2:1-H1 (ก) และ CSP2:1-H24 (ข)

จากรูปที่ 4.17 ตัวอย่าง CSP2:1 ในรูปที่ (ก) และ (ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบวัฏภาคผลึกของไฮดรอกซีแอปาทาไทต์ที่มีลักษณะเช่นเดียวกันที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.00° 31.7° 33.00° 34.2° 36.5° 39.80° 43.5° 49.6° 50.6° และ 54.00° และเมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานทางเอกสารถูกเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาของ CSP2:1 พบว่าเกิดการสร้างขึ้นผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์ซึ่งมีความสอดคล้องกัน โดยรูป (ก-3) และ (ข-2) ที่หยดด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตรูปร่างลักษณะของผลึกไฮดรอกซีแอมพาไทต์เป็นทรงกลม อยู่จำนวนมากและมีความหนาแน่น ในขณะที่รูปที่ 4.17 (ก-2) ที่ขึ้นรูปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิด รูปร่างลักษณะของ ไฮดรอกซีแอมพาไทต์เช่นเดียวกับรูปที่ 4.16 (ก-2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่ำ โดยปรับอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca:Si) ในสารตั้งต้น เป็น 1:1 1:2 และ 2:1 อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ca:Si ในสารตั้งต้นไม่ส่งผลต่อชนิดของวัฏภาคผลึกที่สังเคราะห์ได้ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตทุกอัตราส่วนมีของวัฏภาคผลึกเดียวกัน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเป็นผลให้ความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้นและผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น

- การสังเคราะห์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต

ในการสังเคราะห์สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมล ของ Ca:Si:P ในสารตั้งต้นเป็น 2:1:0.6 (CSP1:1) 2:2:0.6 (CSP1:2) และ 3:1:0.6 (CSP2:1) พบว่าสารประกอบที่สังเคราะห์ประกอบด้วยวัฏภาคผลึกผสม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไฮดรอกซีแอปาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ca:Si:P ในสารตั้งต้นไม่ส่งผลต่อชนิดและสัดส่วนของวัฏภาคผลึกที่เกิดขึ้น การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลส่งผลต่อความสมบูรณ์และขนาดของผลึกเช่นเดียวกับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่มีการผสมแคลเซียม-ฟอสเฟต

- สมบัติความว่องไวทางชีวภาพ

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต และสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ทุกตัวอย่างสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่างโดยใช้ 2 วิธี ได้แก่การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำกลั่นและการใช้สารยึดติด PMMA เมื่อนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดไปทดสอบโดยการแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าทุกตัวอย่างสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อผลึกไฮดรอกซีแอปาไทต์ได้ แสดงถึงสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของสารประกอบที่เตรียมได้ในทุกสภาวะ นอกจากนี้สารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต สามารถเหนี่ยวนำไฮดรอกซีแอปาไทต์ได้ดีกว่าเป็นเพราะมีสารประกอบฟอสเฟตที่ช่วยเพิ่มฟอสเฟตไอออนที่เป็นองค์ประกอบในการก่อตัวของไฮดรอกซีแอปาไทต์ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านทันตกรรมและทางการแพทย์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาการขึ้นรูปโดยวิธีไฮดรอลิกและวิธีใช้สารยึดติด PMMA และสมบัติเชิงกลของสารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสมแคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟต เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์
- ศึกษาการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายระหว่างการทดลองเพื่อสามารถควบคุมรูปร่างของผลึกไฮดรอกซีแอพาไทต์ที่ก่อตัวขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang, N. Molenda, J.A. Fournelle, J.H. Murphy, W.L. and Sahai, N. 2010. "Effects of pseudowollastonite (CaSiO_3) bioceramic on in vitro activity of human mesenchymal stem cells." *Biomaterials* (3) : 7653–7665.
- [2] Ding, S.J. Shie, M.Y. Hoshiba, T. Kawazoe, K. Chen, G. and Chang, H.C. 2010. "Osteogenic differentiation and immune response of human bone marrow-derived mesenchymal stem cells on injectable calcium silicate based bone grafts." *Tissue Eng* (16) : 2343–2354.
- [3] ปริญญา ชัยสิงห์เหนือ. 2557. "ความเป็นพิษต่อเซลล์และคุณสมบัติการสร้างเนื้อเยื่อแข็งของกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ ที่มีโมโนแคลเซียมซิลิเกต ผสมในเซลล์เนื้อเยื่อในฟันมนุษย์." *ปริญญาพนธ์ วท.ม. (วิทยาเอ็นโดดอนต์) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.*
- [4] Mehrali, M. Shirazi, S.F.S. Baradaran, S. Mehrali, M. Metselaar, H.S.C. Kadri, N.A.B. and Osman, N.A.A. 2013. "Facile synthesis of calcium silicate hydrate using sodium dodecyl sulfate as a surfactant assisted by ultrasonic irradiation." *Ultrasonics Sonochemistry* (21) : 735–742.
- [5] จิตภา เครือละม้าย, จิตภา สาธุวงศ์, ปภัสรา ภิญโญ. 2559. "การพัฒนากระบวนการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตที่อุณหภูมิต่ำสำหรับงานด้านทันตกรรม." *ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- [7] Amethyst Galleries. 2018. The Mineral Wollastonite. [Online]. Available: <http://www.galleries.com/Wollastonite>.
- [8] Imerys. 2018. Physical Properties of Wollastonite. [Online]. Available: www.imerysadditivesformetallurgy.com.
- [9] บรรจง เทียนทอง. 2561. แร่ไวลาสโทไนต์ (Wollastonite). [Online]. Available: <http://www.patchra.net/minerals/MinDesc/wollastonite.php>.
- [10] Lee Lemke. 2011. Wollastonite/Calcium silicate. [Online]. Available: <http://www.kaolin.com.my/thai/wollastinite.html>.
- [11] Larry, L. Hench. 2012. *An Introduction to Bioceramics*. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [12] Robert, L. Virta. 2001. Wollastonite–A Versatile Industrial Mineral. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-0002-01/fs-0002-01textonly.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Industrial Minerals Association. 2012. **What is Wollastonite**. [Online]. Available: http://www.ima-na.org/?page=what_is_wollastonite.
- [14] คชินท์ สายอินทวงศ์. 2551. **วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite)**. [Online]. Available: http://thaiceramicsociety.com/rm_paint_wollastonite.php.
- [15] Wikipedia. 2018. **Calcium silicate hydrate**. [Online]. 2018. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_silicate_hydrate.
- [16] ปัญญาพร หาสุข, สุชาติ มงคลสารกิจ, ศรีวงศ์วัลย์ เมืองงา. 2556. **ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ**. [Online]. Available: http://sungkomonline.com/file/Webboard_ans.php?webID=11&pageID=3&questionID=3
- [17] Grangeon, S. and Claret, F. 2016. **Structure of nanocrystalline calcium silicate hydrates: insights from X-ray diffraction, synchrotron X-ray absorption and nuclear magnetic resonance**. [Online]. Available: <http://journals.iucr.org/j/issues/2016/03/00/po5053/index.html>
- [18] ณีฐฎการต์ พงศธนานนท์, ณีฐหทัย สิทธิพนัน, ดลพร รักถิ่น. 2548. การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไตรแคลเซียมฟอสเฟต-แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] Karlis Gross. 2017. **Hydroxyapatite Properties and Applications**. [Online]. Available : <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=107>.
- [20] FLUIDINOVA. 2017. **Hydroxyapatite**. [Online]. Available : <http://www.fluidinova.com/hydroxyapatite-properties-uses-and-applications>.
- [21] Anthony. John, W. Bideaux. Richard, A. Bladh. Kenneth, W. Nichols. Monte C. (2000). **Handbook of Mineralogy**. Chantilly VA, USA: Mineralogical Society of America.
- [22] Article in *Materials Science and Engineering C* 29(4):1463-1466 · May 2009 with 341 Reads
- [23] Hudson Institute of Mineralogy. 2018. **Hydroxylapatite**. [Online]. Available: <https://www.mindat.org/min-1992.html>.
- [24] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2560. **สารละลายไฮดรอกซีแอพาไทต์**. [Online]. Available: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/109>.
- [25] University of Liverpool. 2017. **Hydroxyapatite**. [Online]. Available : <https://www.chemtube3d.com/solidstate/Sshydroxyapatite.htm>.
- [26] ลิกขวัฒน์ นักร้อง. 2559. **ไฮดรอกซีแอพาไทต์ (Hydroxyapatite)**. [Online]. Available: <http://www.wongkarnpat.com/viewya.php?id=1030#.WprCGuhubIU>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] จินตมัย สุวรรณประทีป และ วราพร สุวรรณพฤกษ์. 2554. การพัฒนาเทคนิคการเคลือบผิวชั้นเคลือบเชื่อมฟอสเฟตบนอุปกรณ์การแพทย์ด้วยวิธีโซล-เจล. [Online]. Available : https://www2.mtec.or.th/th/search_sys/search_proj/detail.asp?proj_id=MT-B-49-BMD-07-122-l&lang=1.
- [28] โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. 2559. ประเภทของวัสดุทางการแพทย์. [Online]. Available: <http://kanchanapisek.or.th/kp6 / sub/book/book.php?book=3 0 &chap=9 &page=t30-9-infodetail04.html>.
- [29] glasswarechemical. 2017. Hydrothermal synthesis. [Online]. Available : <http://glasswarechemical.com/author/admin/>
- [30] Hydrothermal Method. 2018. [Online]. Available : http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/7511/11/11_chapter%202.pdf.
- [31] Chemical Society Reviews. 2014. oxide nanostructures from chemical solutions. [Online]. Available : <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014-/cs/c3cs60219b/unauth#!divAbstract>.
- [32] Siriphannon, P. Kameshima, Y. Yasumoria, A. Okada, K. Hayashib, S. 2002. "Formation of hydroxyapatite on CaSiO₃ powders insimulated body fluid." *Journal of the European Ceramic Society* (22) : 511-520.
- [33] Binnaz, A. Yoruc. Hazar. 2007. "Preparation and in vitro bioactivity of CaSiO₃ powders." *Ceramics International* 33 : 687-692.
- [34] Ishida, E.H. Maeda, H. Ioku. K. 2008. "Hydrothermal synthesis of tobermorite." *Materials Letters* 62 : 3291-3293.
- [35] Santosa, L.A.D. Morejón-Alonsoa, L. Carrodegua, R.G. 2011. "Effects of Silica Addition on the Chemical, Mechanical and Biological Properties of a New a-Tricalcium Phosphate/Tricalcium Silicate Cement." *Materials Research* ; 14(4) : 475-482.
- [36] Mikowski, A. Pelisser, F. Gleize, P.J.P. 2014. "Structure and micro-nanomechanical characterization of synthetic calcium-silicate-hydrate with Poly(Vinyl Alcohol)." *Cement & Concrete Composites* 48 : 1-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

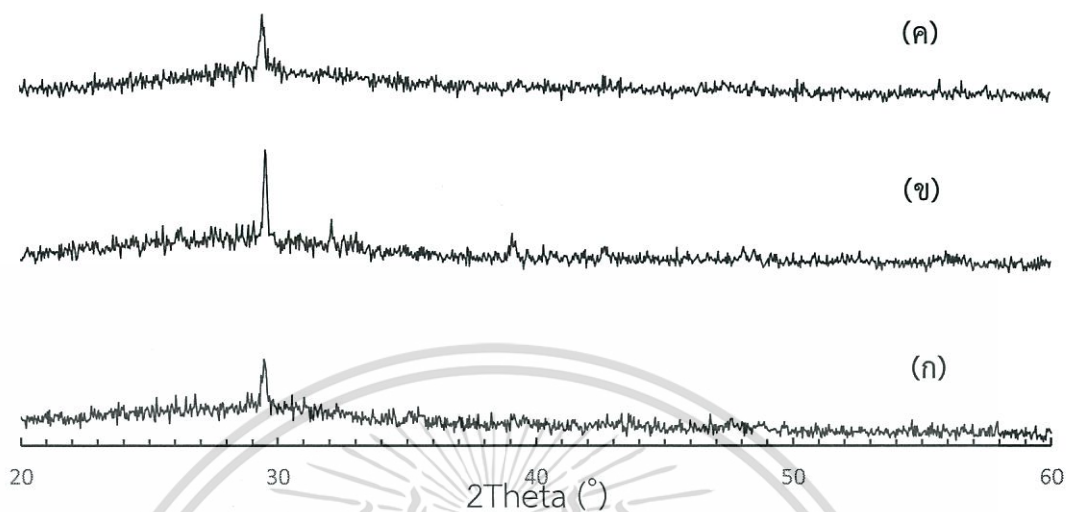
- [37] Zhai, D. Chang, J. Lin, K. Chen, L. Zhang, N. Zou. Z. 2014. "Hydrothermal synthesis and characterization of Si and Sr co-substituted hydroxyapatite nanowires using strontium containing calcium silicate as precursors." *Materials Science and Engineering* 37 : 286–291.
- [38] Gao, C. Shuai, C. Feng, P. Wei, P. Li, P. Feng, S. 2014. "Calcium silicate ceramic scaffolds toughened with hydroxyapatite whiskers for bone tissue engineering." *Materials Characterization* 97 : 47–56.
- [39] Nam Pham, T. Mai Thanh, D. Nguyen, T.T. Nguyen, T.P. Kergourlay, E. Grossin, D. Bertrand, G. Pebere, N. Marcelin, S. J. Charvillat, C. and Drouet, C. 2017. "Operating parameters effect on physico-chemical characteristics of nanocrystalline apatite coatings electrodeposited on 316L stainless steel." *Nanosci Nanotechnol.* 8 035001 (11pp)
- [40] Ho, C. Wei, C. Lin, S. and Ding, S. 2016. "Calcium silicate cements prepared by hydrothermal synthesis for bone repair." *Ceramics International* (42) : 9183–9189
- [41] Goncharenko, A. Rokhmistrov, D. Loza, K. Epple, M. Prymak, O. Zyman. Z. 2016. "Thermally induced crystallization and phase evolution in powders derived from amorphous calcium phosphate precipitates with Ca/P ratio of 1:1." *Journal of Crystal Growth* 450 : 190-196.
- [42] Shaw, S. Clark, S.M. Henderson C.M.B. 1999. "Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and xonotlite $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$: an in situ synchrotron study." *Chemical Geology* 2000(167) : 129–140
- [43] Qi, C. Wu, J. Zhu, J.Z. Yu, Y.D. 2017. "Hydroxyapatite nanorod-assembled hierarchical microflowers: Rapid synthesis via microwave hydrothermal transformation of CaHPO_4 and their application in protein/drug delivery." *Ceramics International* 43 : 6511-6518



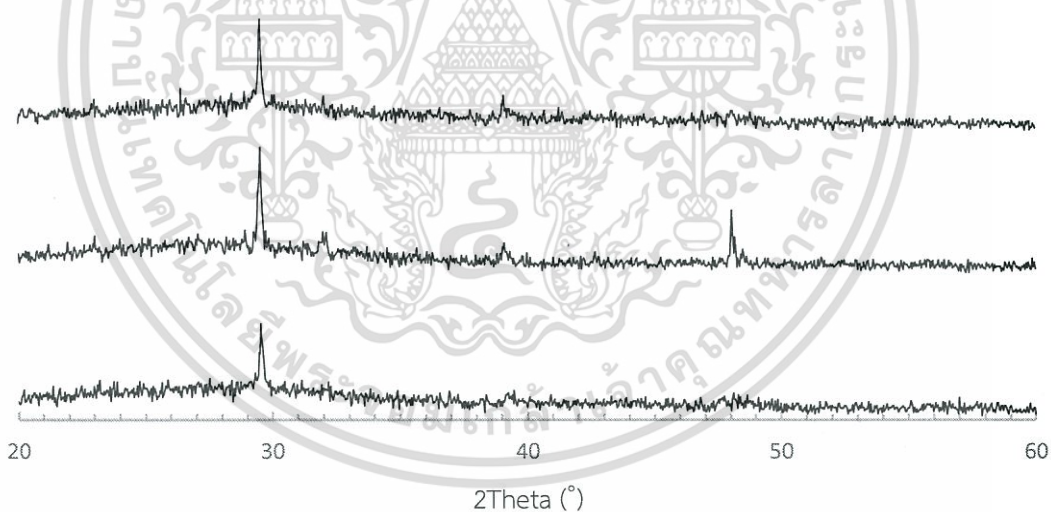
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผสมก่อนทำปฏิกิริยา

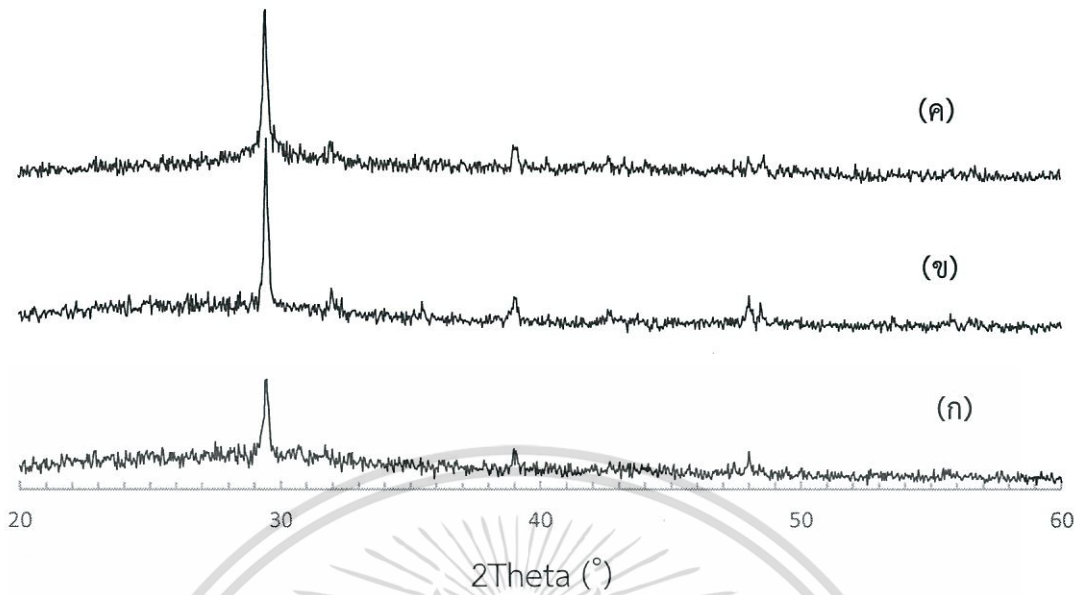


รูปที่ ก.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 1 ชั่วโมง

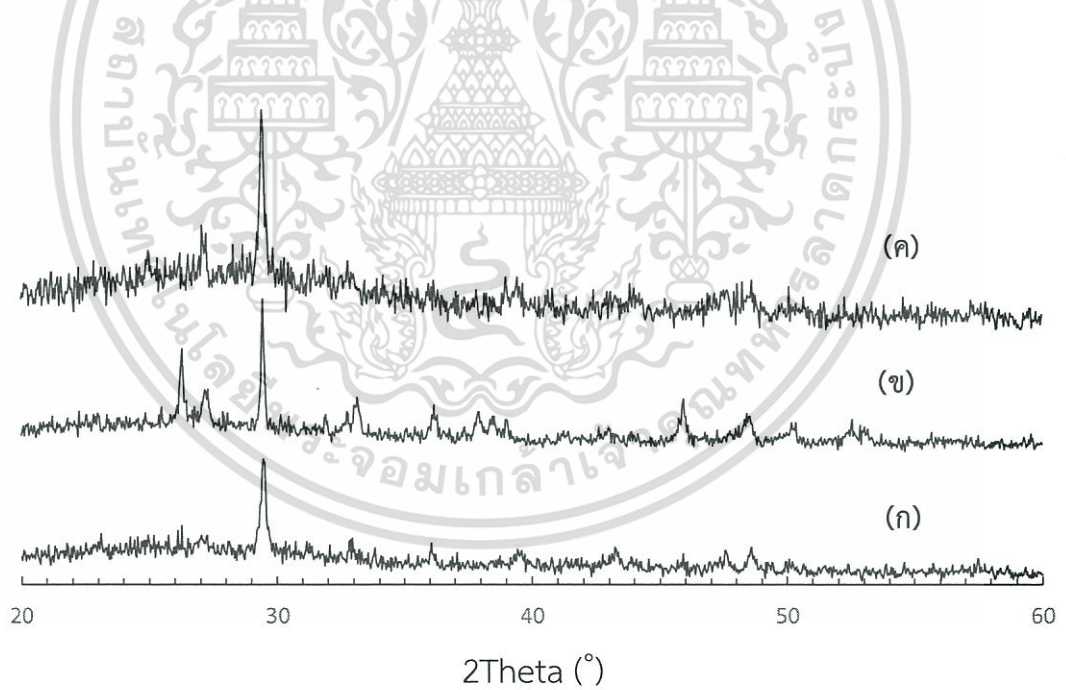


รูปที่ ก.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

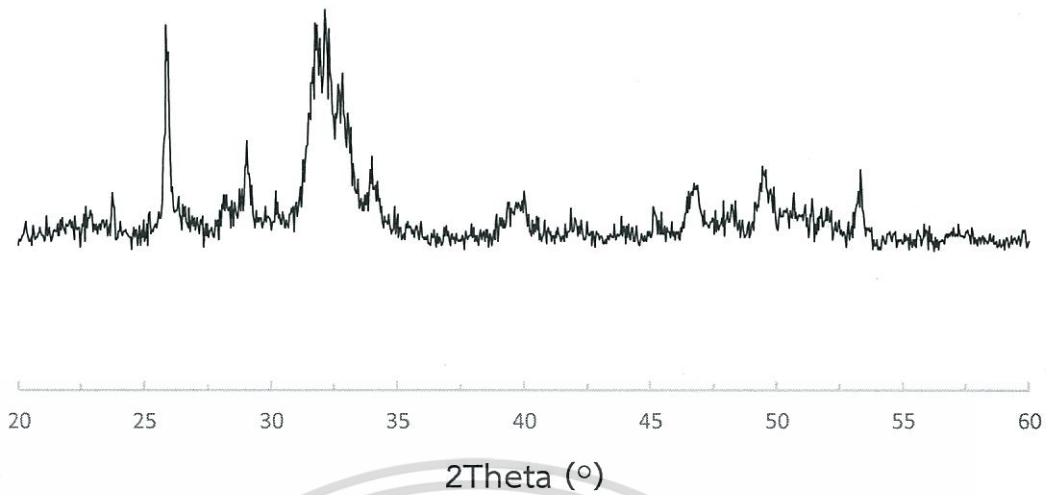


รูปที่ ก.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 6 ชั่วโมง

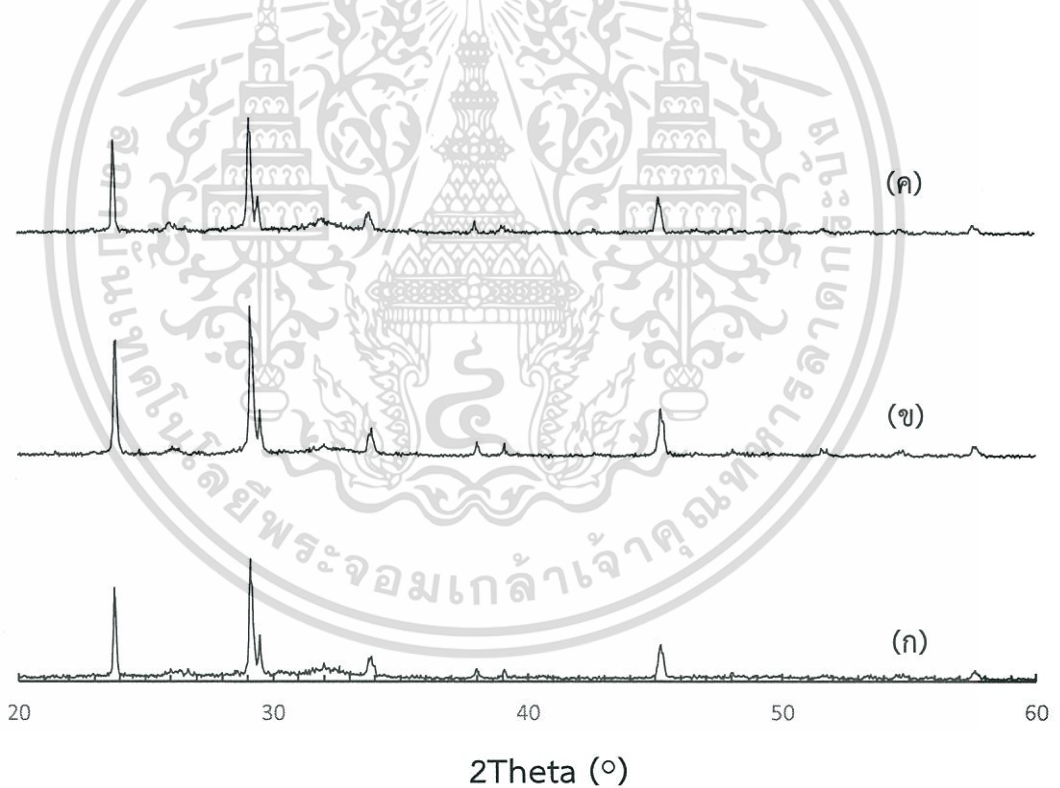


รูปที่ ก.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

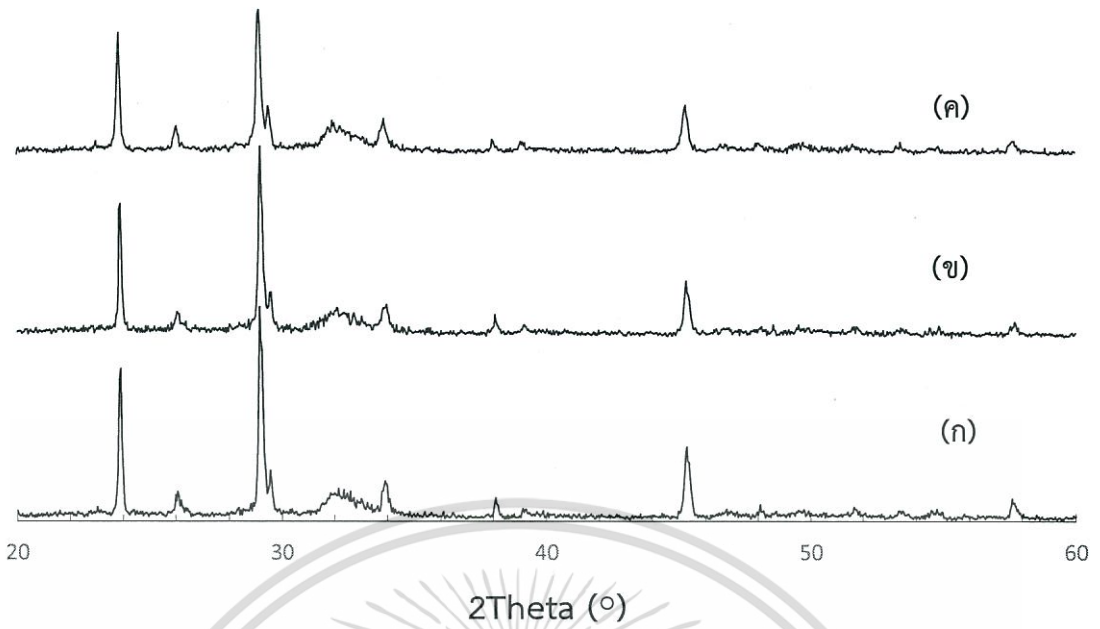


รูปที่ ก.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Hydroxyapatite ก่อนการทำปฏิกิริยา

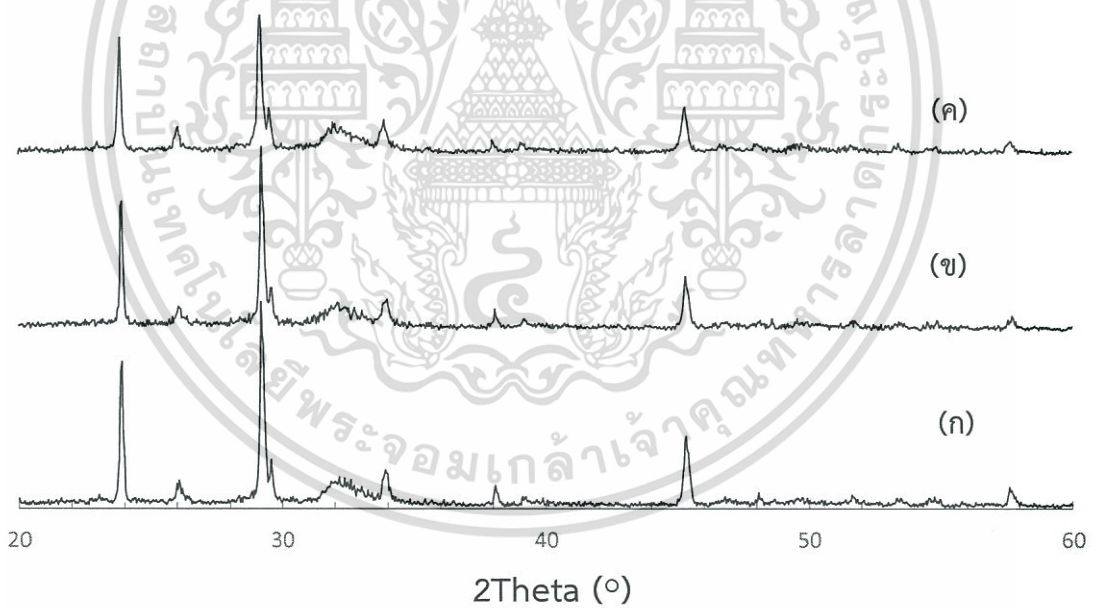


รูปที่ ก.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CSP โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

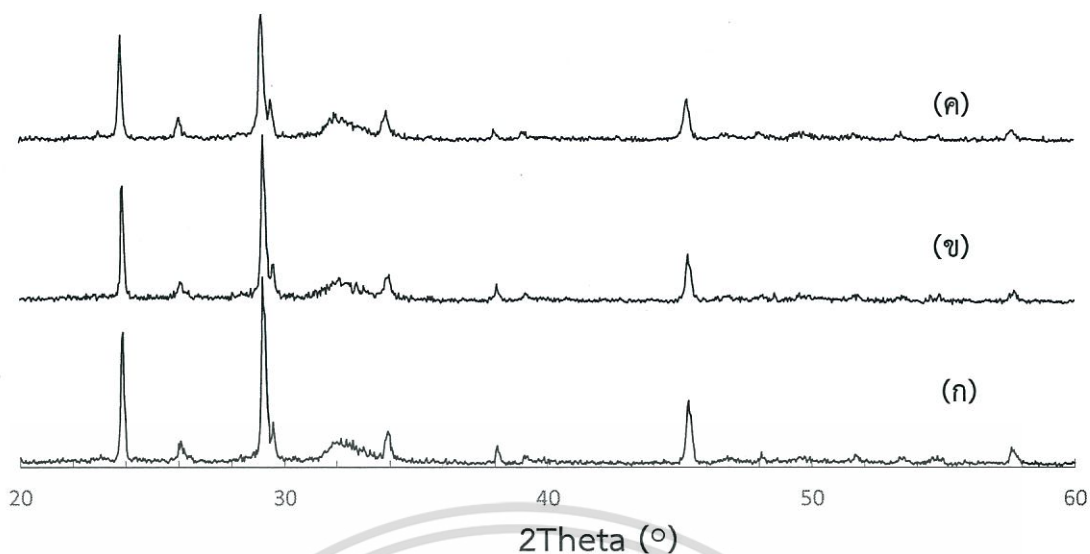


รูปที่ ก.8 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CSP โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 3 ชั่วโมง



รูปที่ ก.9 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CSP โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

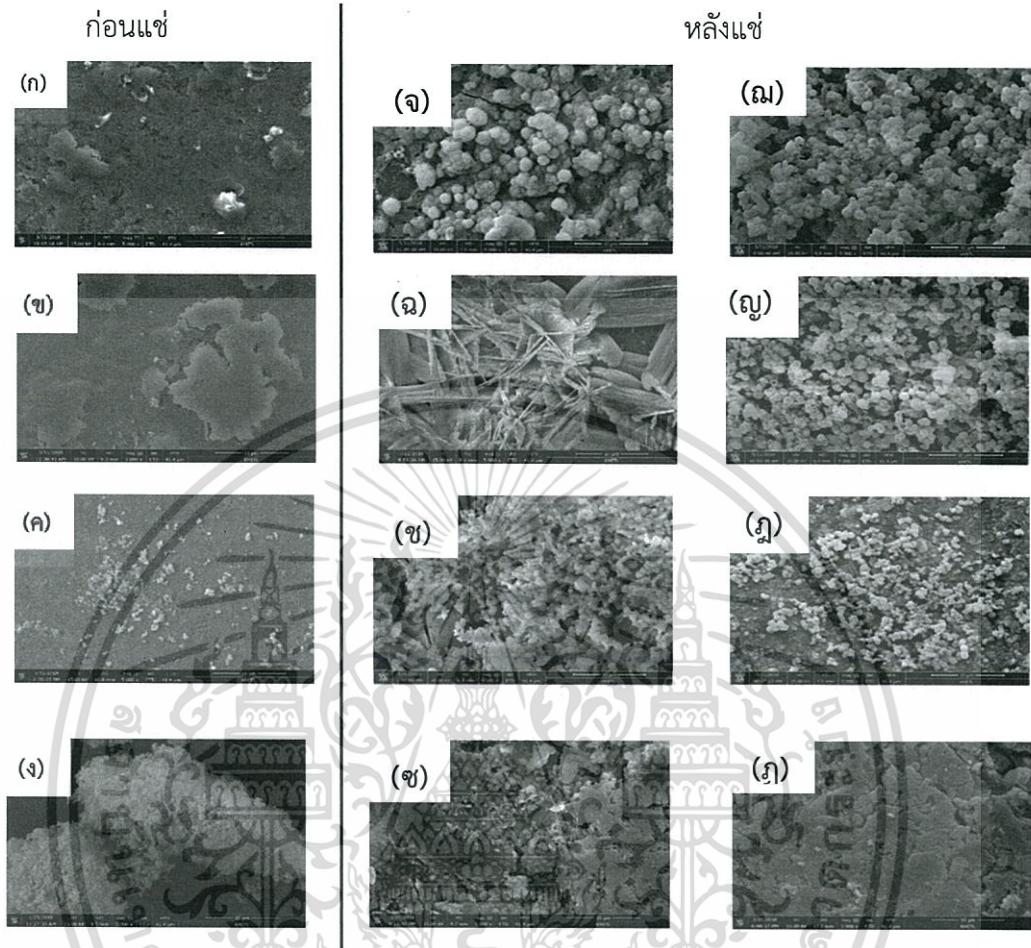


รูปที่ ก.10 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CSP โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล 24 ชั่วโมง

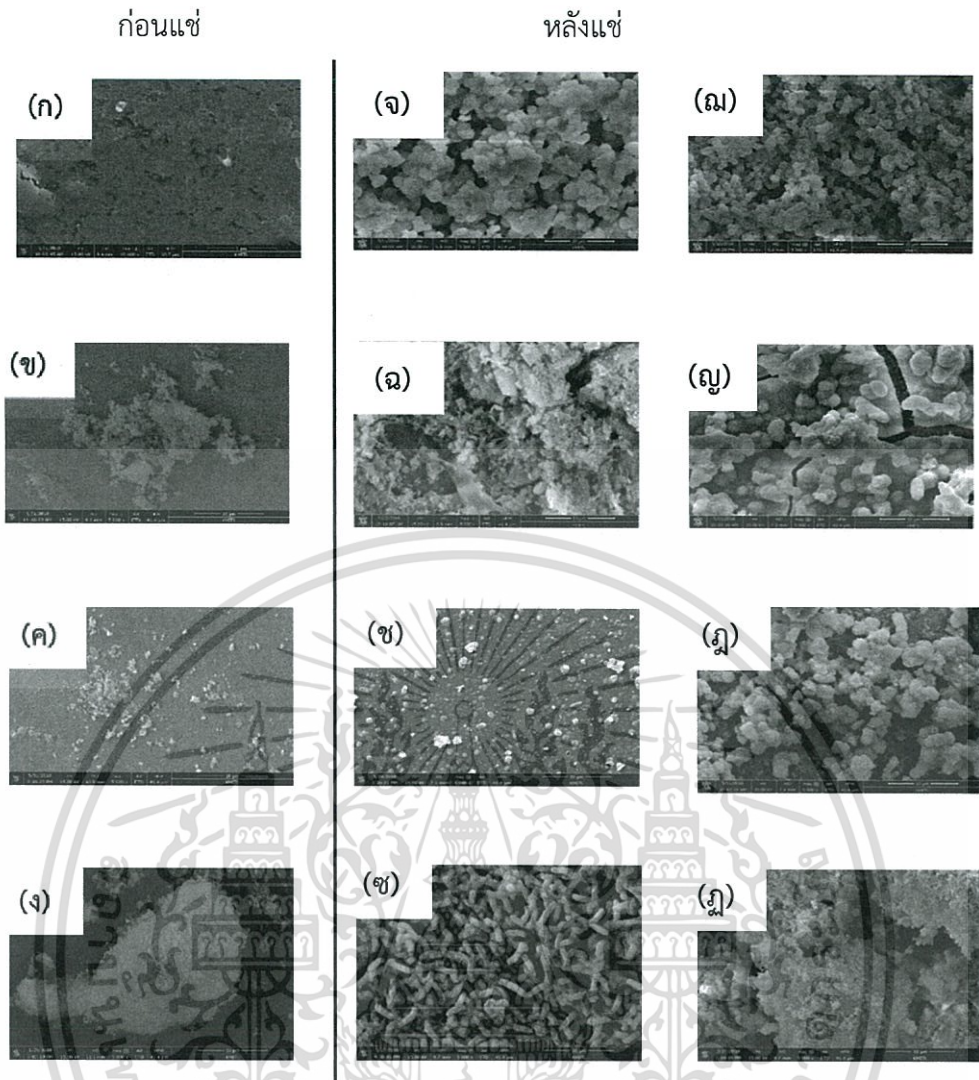


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

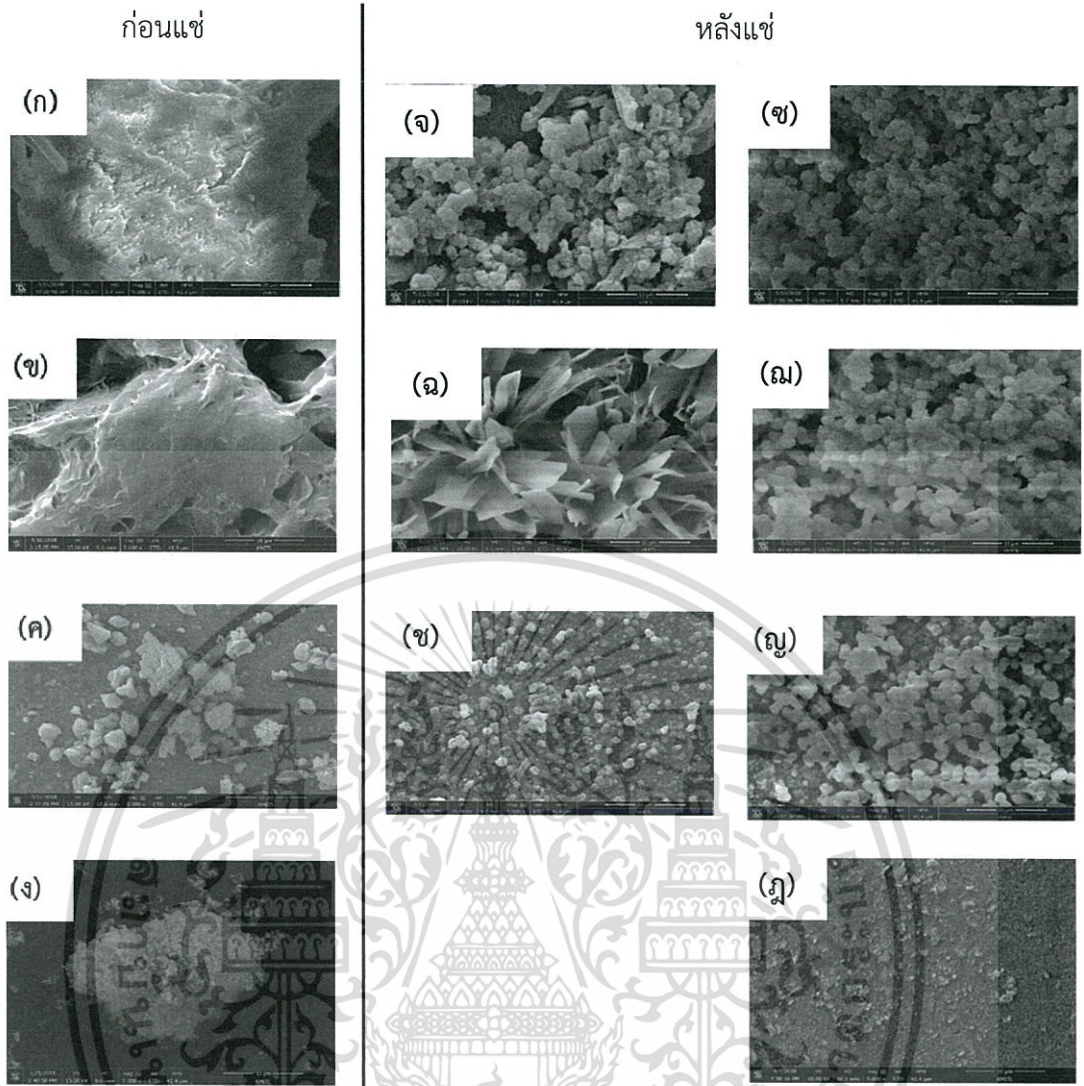
ภาคผนวก ข
ลักษณะทางสัณฐานวิทยา



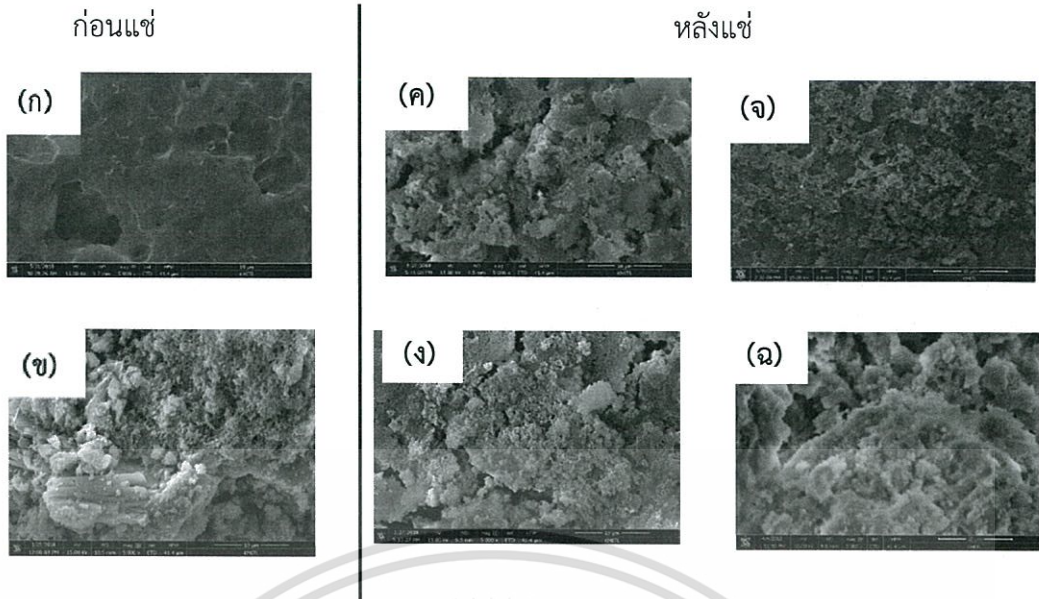
รูปที่ ข.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง CS1:1 ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) CS1:1-H1 (ข) CS1:1-H3 (ค) CS1:1-H6 (ง) CS1:1-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮเดรชัน ได้แก่ (จ) SBF-CS1:1-H1 (ฉ) SBF-CS1:1-H3 (ช) SBF-CS1:1-H6 (ฐ) SBF-CS1:1-H24 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (ณ) SBF-CS1:1-H1 (ญ) SBF-CS1:1-H3 (ฎ) SBF-CS1:1-H6 และ (ฏ) SBF-CS1:1-H24



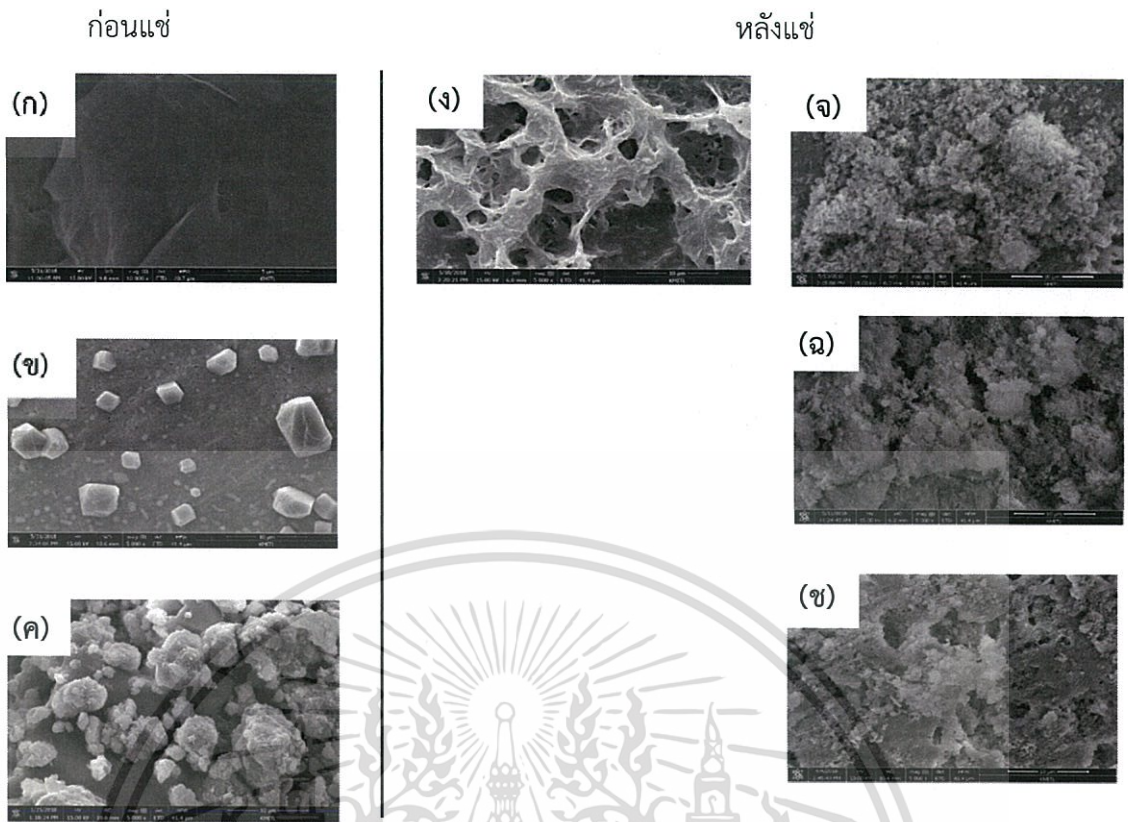
รูปที่ ข.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง CS1:2 ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) CS1:2-H1 (ข) CS1:2-H3 (ค) CS1:2-H6 (ง) CS1:2-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮเดรชัน ได้แก่ (จ) SBF-CS1:2-H1 (ฉ) SBF-CS1:1-H3 (ช) SBF-CS1:2-H6 (ช) SBF-CS1:2-H24 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (ฉ) SBF-CS1:2-H1 (ญ) SBF-CS1:2-H3 (ฎ) SBF-CS1:2-H6 และ (ฏ) SBF-CS1:2-H24



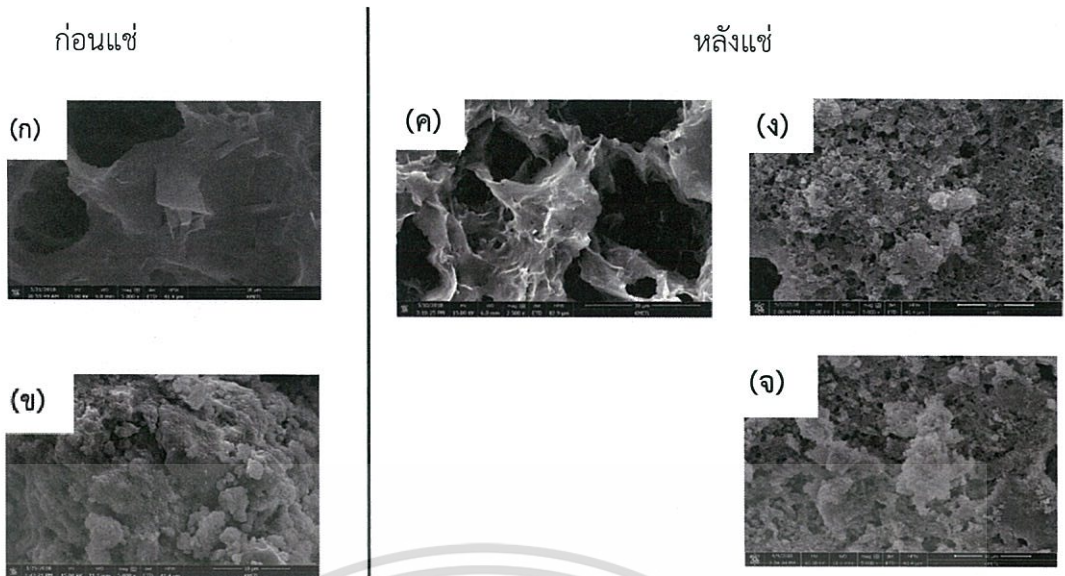
รูปที่ ข.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง CS2:1 ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) CS2:1-H1 (ข) CS2:1-H3 (ค) CS2:1-H6 (ง) CS2:1-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮเดรชัน ได้แก่ (จ) SBF-CS2:1-H1 (ฉ) SBF-CS2:1-H3 (ช) SBF-CS2:1-H6 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหดยพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (ซ) SBF-CS2:1-H1 (ฌ) SBF-CS2:1-H3 (ญ) SBF-CS2:1-H6 และ (ฎ) SBF-CS2:1-H24



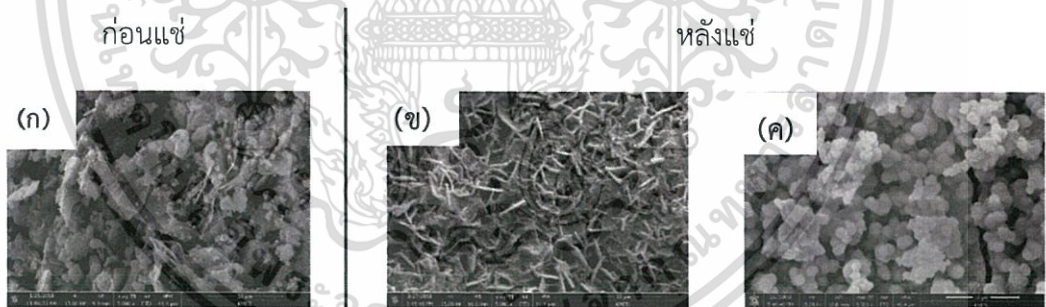
ปที่ ข.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง CSP1:1 ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) CSP1:1-H1 (ข) CSP1:1-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮเดรชัน ได้แก่ (ค) SBF-CSP1:1-H1 (ง) SBF-CSP1:1-H24 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (จ) SBF-CSP1:1-H1 และ (ฉ) SBF-CSP1:1-H24



รูปที่ ข.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง CSP1:2 ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) CSP1:2-H1 (ข) CSP1:2-H6 (ค) CSP1:2-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮเดรชัน ได้แก่ (ง) SBF-CSP1:2-H1 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (จ) SBF-CSP1:2-H1 (ฉ) SBF-CSP1:2-H6 และ (ช) SBF-CSP1:2-H24



รูปที่ ข.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง CSP2:1 ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) CSP2:1-H1 (ข) CSP2:1-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรชัน ได้แก่ (ค) SBF-CSP2:1-H1 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (ง) SBF-CSP2:1-H1 และ (จ) SBF-CSP2:1-H24



รูปที่ ข.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของตัวอย่าง HA โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่ในสารละลาย SBF ได้แก่ (ก) HA-H24 และตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรชัน ได้แก่ (ข) SBF-HA-H24 ตัวอย่างหลังแช่ในสารละลาย SBF ที่ผ่านการหยดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้แก่ (ค) SBF-HA-H24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 16 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นางสาวชุตีมา สืบตระกูล รหัสประจำตัว 57050401
นางสาวปวีณา มณียรัตน์ รหัสประจำตัว 57050455
นายรชตะ วรรณนท์ รหัสประจำตัว 57050492

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี
ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและสารประกอบผสม
แคลเซียมซิลิเกต-แคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานทันตกรรม
LOW TEMPERATURE SYNTHESIS OF CALCIUM SILICATE AND CALCIUM SILICATE-
CALCIUM PHOSPHATE COMPOUNDS FOR DENTAL APPLICATIONS
ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน
เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม
โครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว
โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.00 %

ลงชื่อ ชุตีมา สืบตระกูล ลงชื่อ ปวีณา มณียรัตน์ ลงชื่อ รชตะ วรรณนท์
(นางสาวชุตีมา สืบตระกูล) (นางสาวปวีณา มณียรัตน์) (นายรชตะ วรรณนท์)
นักศึกษา นักศึกษา นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ
ของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลง
ชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน
(ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน)
อาจารย์ที่ปรึกษา