

การพัฒนาผ้าสมานแผลด้วยอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส

Development of wound healing cloth containing bioactive glass nanoparticles

ชีวกัทร ปาโมกข์^{1*}, เอกธรรพ์ มีชูวาศ¹, กนิษฐ์ ตะปะสา¹

Cheevapat Pamok^{1*}, Ekarat Meechoowas¹, Kanit Tapasa¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์ไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสให้ได้อนุภาคนาโนและไม่มีความเป็นผลึกซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น พัฒนาเป็นผ้าสมานแผล การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส ถูกเตรียมโดยการผสม $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน ด้วยวิธีโซลเจลโดยกระบวนการของ Stöber ซึ่งใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) Scanning electron microscope (SEM) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกและสัณฐานของไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้พบว่า จากผล XRD เมื่อผสม CaO ที่อัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ไม่มีความเป็นผลึก ภาพถ่าย SEM สามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดเฉลี่ยที่ 200-300 นาโนเมตร และ FTIR พบพันธะที่สอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกุลของไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส จากนั้นนำไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนระหว่างนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกับเซลลูโลส อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:6 เพราะที่อัตราส่วนนี้อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสมีการกระจายตัวที่ดีในแผ่นเซลลูโลส

Abstract

This research aims to synthesize bioactive glass nanoparticles in non-crystalline structure which can be used in medical application for example wound healing cloth. This synthesis was composed of $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ at the different ratio using Sol-gel method and Stöber's process that ammonium hydroxide was utilized as a catalyst. The synthesized bioactive glasses and cellulose adding bioactive glasses were characterized using X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The XRD results of the 10% mol CaO show a non-crystalline structure and the SEM images of the morphology reveal nanospherical shape in size range of 200-300 nm. FTIR results identify chemical bonds corresponding to bioactive glass structure and then obtained nanoparticles were composited with cellulose. The results show that the composition of bioactive glasses and cellulose at a ratio of 1:6 is homogeneously dispersed in cellulose matrix.

คำสำคัญ : ไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส อนุภาคนาโน ผ้าสมานแผล

Keywords : Bioactive glasses, Nanoparticles, Wound healing cloth

1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกมีโครงสร้างของประชากรที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีสัดส่วนของผู้สูงอายุเพิ่มสูงขึ้นและหลายประเทศกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ (aging society) รวมทั้งประเทศไทย โดยคาดว่าภายในปี 2030 สัดส่วนของประชากรช่วงอายุ 65 ปีขึ้นไปทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ 12% จาก 8% ในปัจจุบัน สำหรับประเทศไทยจะมีสัดส่วนผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเป็น 18% จาก 10% ในปี 2562 [1] จากปัจจัยนี้เองมีส่วนทำให้เกิดอัตราการทางการแพทย์และอุปกรณ์การแพทย์เติบโตสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเห็นได้จากแนวโน้มการขยายตัวของจำนวนผู้ป่วยและธุรกิจอุปกรณ์การแพทย์ของประเทศไทย ซึ่งประเทศไทย

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

*Corresponding author. e-mail address: cheevapat@dss.go.th

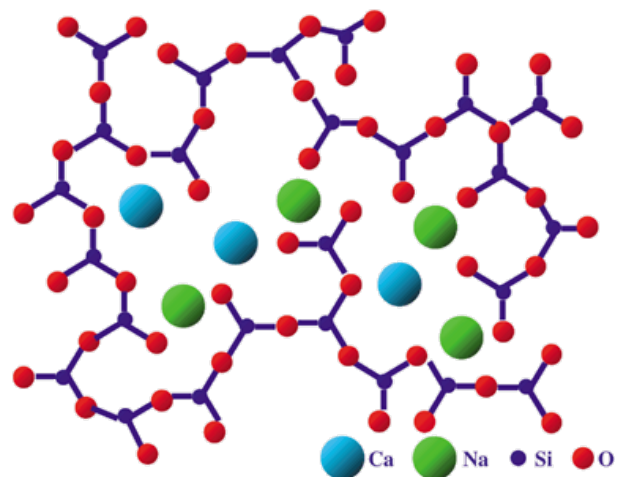
ถือได้ว่าเป็นศูนย์กลางของธุรกิจบริการเพื่อสุขภาพในอาเซียน โดยมีความได้เปรียบทั้งในแง่คุณภาพและมาตรฐานการศึกษา ซึ่งได้รับความเชื่อมั่นจากผู้ให้บริการทั้งภายในและต่างประเทศ ปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมให้อุตสาหกรรมการแพทย์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมเป้าหมายที่จะเป็นตัวขับเคลื่อนประเทศไทยให้หลุดพ้นจากกับดักรายได้ปานกลาง ด้วยเศรษฐกิจเชิงสร้างสรรค์และการสร้างนวัตกรรมตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 โดยมีเป้าหมายให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการแพทย์แบบครบวงจร (Medical hub) ทั้งด้านการให้บริการและการวิจัยพัฒนา

อย่างไรก็ตามความท้าทายสำคัญของการยกระดับธุรกิจอุปกรณ์การแพทย์ในไทยคือการวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยี และการได้รับการรับรองด้านมาตรฐานความปลอดภัยระดับสูง การผลิตวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ของไทยยังเป็นการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน เช่น ถูมือแพทย์ เข็มฉีดยา และสายน้ำเกลือ เป็นต้น ขณะที่อุปกรณ์การแพทย์ระดับสูง เช่น อวัยวะเทียม เครื่องเอ็กซเรย์ และเครื่องสแกน ที่ต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตและมาตรฐานความปลอดภัยระดับสูง ยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าจากผู้ผลิตชั้นนำจากต่างประเทศ โดยในปี 2015 มูลค่าการนำเข้าเครื่องมือและอุปกรณ์การแพทย์ของไทยสูงถึง 150,000 ล้านบาท ขณะที่มูลค่าการส่งออกอยู่ราว 22,000 ล้านบาทเท่านั้น [1] ดังนั้นประเทศไทยต้องเร่งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์การแพทย์ที่มีมูลค่าระดับสูงเพื่อเพิ่มมูลค่าการส่งออกให้สูงขึ้น

วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ที่มีมูลค่าสูง ซึ่งนำมาใช้ทดแทนส่วนหนึ่งส่วนใดในร่างกายมนุษย์ที่เสื่อมสภาพ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ การสร้างอวัยวะเทียม การปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ รวมไปถึงอุปกรณ์และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้กับร่างกาย เช่น เข็มฉีดยา วัสดุอุดฟัน และท่อขยายหลอดเลือด เป็นต้น วัสดุชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัสดุทั่วไปไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ วัสดุผสม หรือสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น แก้วเป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพ ซึ่งเรียกว่าไบโอกลาส (Bioglass) เนื่องจากมีสมบัติเด่นกว่าวัสดุชีวภาพชนิดอื่น ๆ คือสามารถละลายและกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมกระดูกหรือเนื้อเยื่อ (bioactive) ที่ดีกว่าวัสดุชีวภาพอื่น ๆ โดยเฉพาะไบโอแอคทีฟกลาสที่มีอนุภาคระดับนาโน (bioactive glass nanoparticles) จุดมุ่งหมายของ

การพัฒนาวัสดุนี้นี้ขึ้นมาก็คือ ต้องการให้วัสดุมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อย และวัสดุที่สามารถละลายได้ วัสดุนี้นี้จึงมีปฏิกิริยาทางเคมีกับร่างกาย แต่เกิดเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น [2] ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาสสำหรับใช้ในวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น การนำไปเคลือบผิววัสดุชีวภาพอื่น ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) การนำไปผสมกับวัสดุชีวภาพพอลิเมอร์เพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การนำไปใช้ในเทคโนโลยีการลำเลียงยาเข้าสู่ร่างกาย (drug delivery) การนำไปใช้สมานแผล (wound healing) เนื่องจากอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาสมีสมบัติในการห้ามเลือดโดยสามารถลดเวลาการปิดแผลและเร่งเวลาให้เลือดแข็งตัวได้เร็ว นอกจากนี้ยังสามารถลดอาการอักเสบของแผลก่อนทำการเย็บปิดได้อีกด้วย

สมบัติในการสมานแผลของไบโอแอคทีฟกลาสเกิดจากการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ซึ่งเป็นแร่แคลเซียมฟอสเฟต สูตรทางเคมีคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ โดยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นเป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกและมีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ซึ่งเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นสามารถเตรียมขึ้นได้จากแหล่งต่าง ๆ ในธรรมชาติ ดังนั้น สารชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นสารทดแทนกระดูกและใช้ในระบบนำส่งยา [3] โดยไบโอแอคทีฟกลาสจะเกิดเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ก็ต่อเมื่อสัมผัสกับเลือดของผู้ป่วย



รูปที่ 1 : โครงสร้างโมเลกุลของไบโอแอคทีฟกลาส [4]

การพัฒนาเป็นผ้าสमानแผล วัสดุที่เลือกใช้ในการทำเป็นแผ่นปิดแผลคือ เซลลูโลส เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสกัดเซลลูโลสออกมาใช้งานได้ มีงานวิจัยหลายงานที่นำวัสดุธรรมชาติในประเทศไทย เช่น ใบสับปะรด ชานอ้อย มันสำปะหลัง [5-7] มาสกัดเป็นเซลลูโลส นอกจากนี้เซลลูโลสยังมีสมบัติคือ ไม่ละลายน้ำ ย่อยสลายยากและดูดซับน้ำได้ จึงเหมาะกับการนำมาทำเป็นวัสดุผ้าสमानแผล

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแผ่นวัสดุปิดแผลที่ใช้อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตเป็นส่วนผสม ซึ่งอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลโดยกระบวนการของ Stöber ศึกษาอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วน 70:25:5, 80:15:5 และ 85:10:5 เปรียบเทียบโดยไมล วิเคราะห์ความเป็นผลึกและสัณฐานของอนุภาคไบโอแอคทีฟฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ เนื่องจากการเกิดผลึกของไบโอแอคทีฟฟอสเฟตทำให้ความเป็นไบโอแอคทีฟและการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ลดลง จึงนำเซลลูโลสทางการค้าที่ผลิตในประเทศผสมกับอนุภาคไบโอแอคทีฟฟอสเฟตสูตรที่ไม่มีความเป็นผลึก ที่อัตราส่วน 0.06:0.06, 0.06:0.03, 0.06:0.01 และ 0.06:0.005 กรัม ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเซลลูโลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate, TEOS) สูตรทางเคมีคือ $\text{SiO}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ยี่ห้อ Acros Organics แคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate) สูตรทางเคมีคือ $(\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents สารละลายไตรเอทิลฟอสเฟต (Triethyl phosphate, TEP) สูตรทางเคมีคือ $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{PO}_4$ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ยี่ห้อ Acros Organics สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สูตรทางเคมีคือ NH_4OH ความบริสุทธิ์ร้อยละ 30 ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents สารละลายเอทานอล สูตรทางเคมีคือ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents และสารละลายเซลลูโลสทางการค้าที่ผลิตในประเทศ

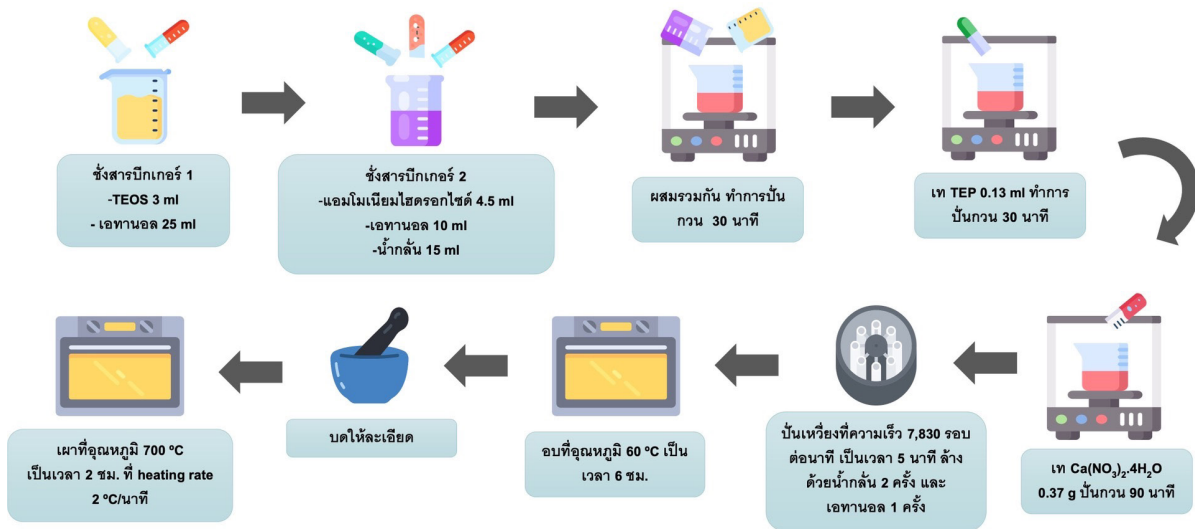
<http://bas.dss.go.th>

2.2 วิธีการสังเคราะห์นาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาอัตราส่วนระหว่างเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต แคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต และไตรเอทิลฟอสเฟต ในอัตราส่วน ดังตารางที่ 1 ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายเอทานอลเป็นตัวทำละลาย [8-9] โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2 นำสารเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ผสมกับเอทานอล แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำกลั่น ปั่นกวนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำไปผสมกับไตรเอทิลฟอสเฟตและแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ตามลำดับ ปั่นกวนสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน สารละลายที่ได้จะมีสีขาวขุ่น นำสารที่สังเคราะห์ได้มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 7,830 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ล้างอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต ด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้งและเอทานอล 1 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้แห้ง นำสารที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อไล่หมู่ O-H บนผิวของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตออกไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์

สารตั้งต้นที่ต้องการ	สารเคมีที่ใช้	สูตร $70\text{SiO}_2 - 25\text{CaO} - 5\text{P}_2\text{O}_5$ (mol%)	สูตร $80\text{SiO}_2 - 15\text{CaO} - 5\text{P}_2\text{O}_5$ (mol%)	สูตร $85\text{SiO}_2 - 10\text{CaO} - 5\text{P}_2\text{O}_5$ (mol%)
SiO_2	Tetraethyl orthosilicate, TEOS ($\text{SiO}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$)	70	80	85
CaO	Calcium nitrate tetrahydrate ($(\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	25	15	10
P_2O_5	Triethyl phosphate, TEP ($(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{PO}_4$)	5	5	5



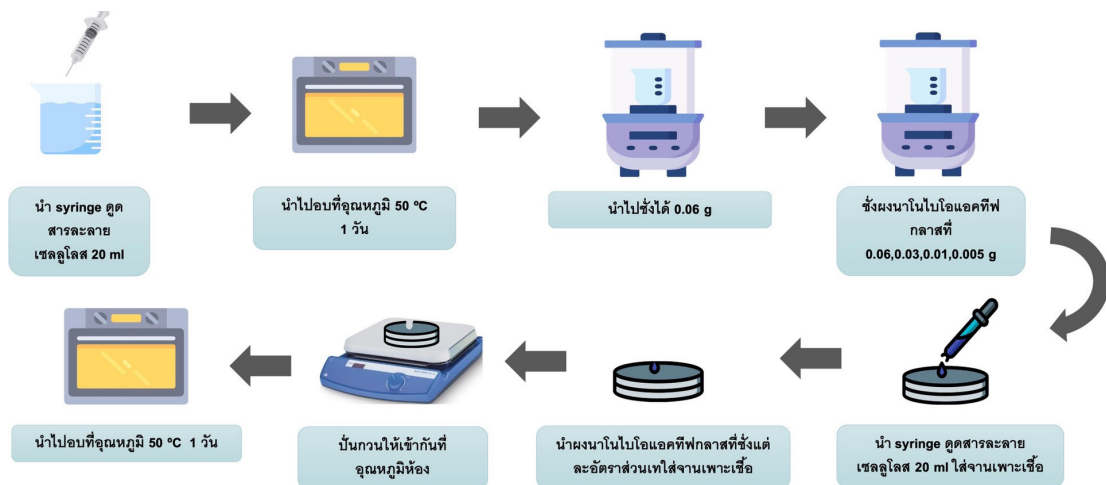
รูปที่ 2 : ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนไบโอแอคทีฟกลาส

2.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มเซลล์โลสผสมอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส

หาปริมาณเนื้อสารของเซลล์โลสก่อนนำไปผสมกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3 ดูดสารละลายเซลล์โลสมา 20 มิลลิลิตร อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จนสารละลายแห้งกลายเป็นแผ่น นำไปชั่งน้ำหนักได้ 0.06 กรัม ผสมนาโนไบโอแอคทีฟกลาสกับสารละลายเซลล์โลสที่อัตราส่วนดังตารางที่ 2 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเป็นแผ่นปิดแผล ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนระหว่างเซลล์โลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส

	อัตราส่วน (กรัม)			
	0.06	0.03	0.01	0.005
เซลล์โลส	0.06	0.06	0.06	0.06
อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส	0.06	0.03	0.01	0.005



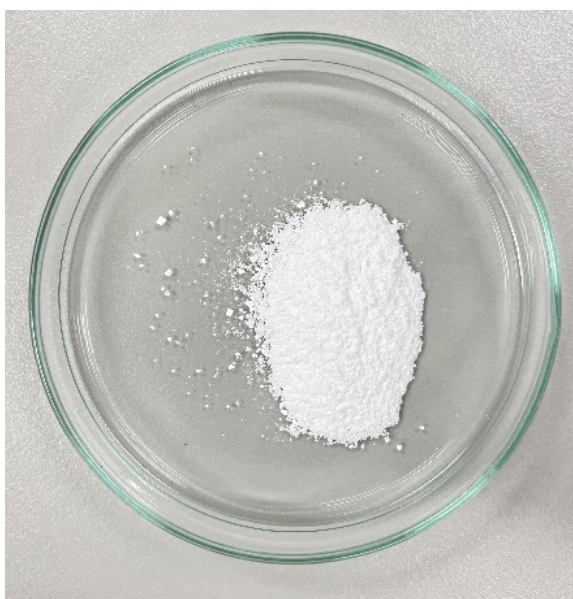
รูปที่ 3 : ขั้นตอนการเตรียมเซลล์โลสผสมกับนาโนไบโอแอคทีฟกลาสที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2.4 การทดสอบตัวอย่าง

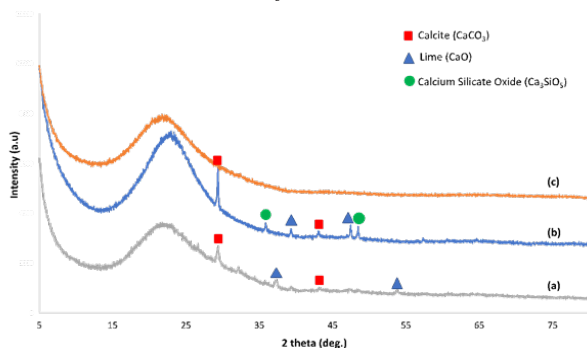
นำสารที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ AXS BRUKER รุ่น D8 ADVANCE วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV และวิเคราะห์รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometry ยี่ห้อ BRUKER รุ่น VERTEX 70

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต

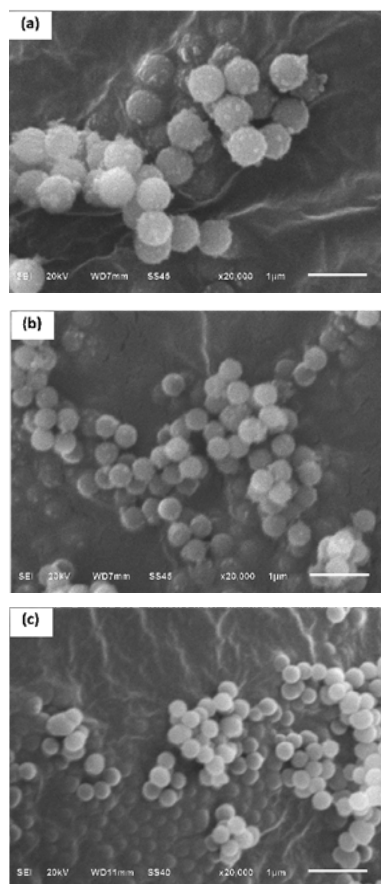


รูปที่ 4 : ผงของนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นผงสีขาวเหมือนกันทั้ง 3 สูตร



รูปที่ 5 : รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (a) สูตร $70\text{SiO}_2\text{-}25\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ (b) สูตร $80\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ (c) สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$
<http://bas.dss.go.th>

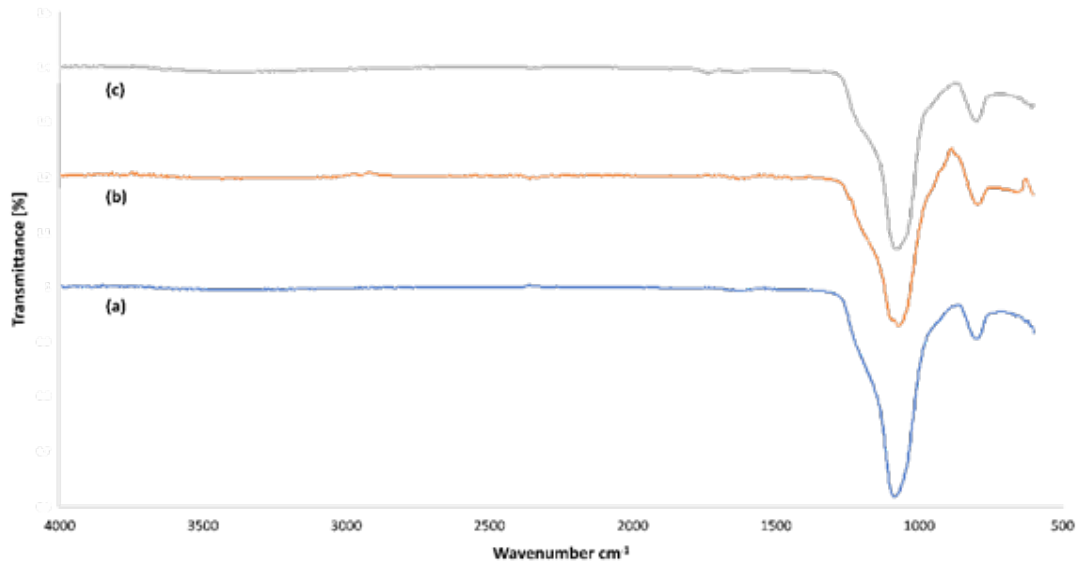
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต พบว่า ทุกตัวอย่างมีพีคกว้างที่ 2-theta ที่ประมาณ 24 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึง SiO_2 ออสตรอนที่เป็นวัฏภาคหลัก [10] และพบพีคของวัฏภาคอื่นคือที่สูตร $70\text{SiO}_2\text{-}25\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ และ สูตร $80\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ พบผลึกของ Calcite (CaCO_3) JCPDS number 85-1108, Lime (CaO) JCPDS number 43-1001 และ Calcium Silicate Oxide (Ca_3SiO_5) JCPDS number 13-0209 โดยเมื่ออัตราส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้นจะพบเฉพาะพีคของ SiO_2 ออสตรอนเพียงอย่างเดียว จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลึกที่พบประกอบด้วยแคลเซียมทั้งหมด สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ ที่มีแคลเซียมน้อยที่สุด จึงไม่พบผลึก เนื่องจากการเกิดผลึกทำให้ความเป็นไบโอแอคทีฟของสารที่สังเคราะห์ได้ลดลง ดังนั้นจึงใช้สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ ผสมกับเซลลูโลสทางการค้า เพื่อพัฒนาเป็นผ้าสมานแผล



รูปที่ 6 : สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต (a) สูตร $70\text{SiO}_2\text{-}25\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ (b) สูตร $80\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ และ (c) สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$

การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 6 พบว่า รูปร่างของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตเป็นทรงกลม อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม มีขนาดเฉลี่ยที่ 200-300 นาโนเมตร โดยขนาดของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตจะมีขนาดเล็กลง เมื่ออัตราส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้นและ CaO ลดลง

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารตัวอย่างในช่วงเลขคลื่น $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ ของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตเพื่อดูการเกิดพันธะหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต แสดงดังรูปที่ 7



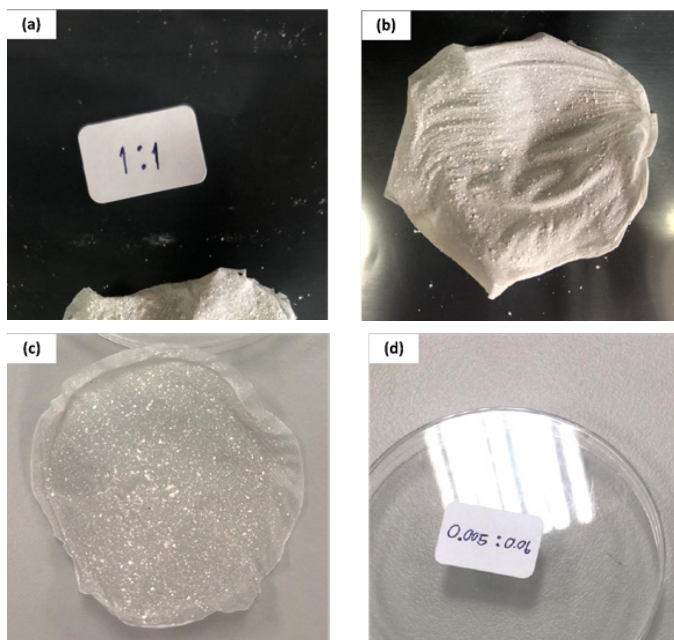
รูปที่ 7 : รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด FTIR ของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต (a) สูตร $70\text{SiO}_2\text{--}25\text{CaO--}5\text{P}_2\text{O}_5$ (b) สูตร $80\text{SiO}_2\text{--}15\text{CaO--}5\text{P}_2\text{O}_5$ (c) สูตร $85\text{SiO}_2\text{--}10\text{CaO--}5\text{P}_2\text{O}_5$

ตัวอย่างทั้ง 3 สูตรพบสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $1,400\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ $1100\text{--}1040\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบไม่สมมาตรในโหมด stretching และพบสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $814\text{--}793\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับพันธะ Si-O-Si แบบสมมาตรในโหมด stretching [11]

3.2 ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตผสมกับเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่างๆ

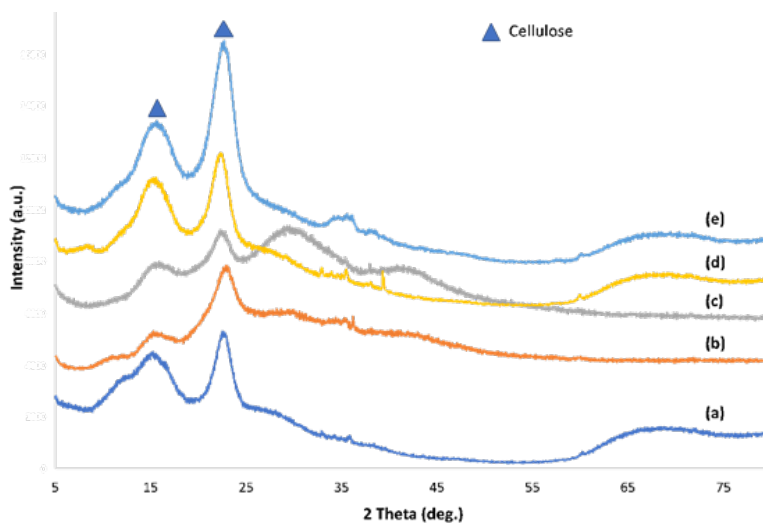


รูปที่ 8: แผ่นเซลลูโลสที่อบแห้งแล้ว



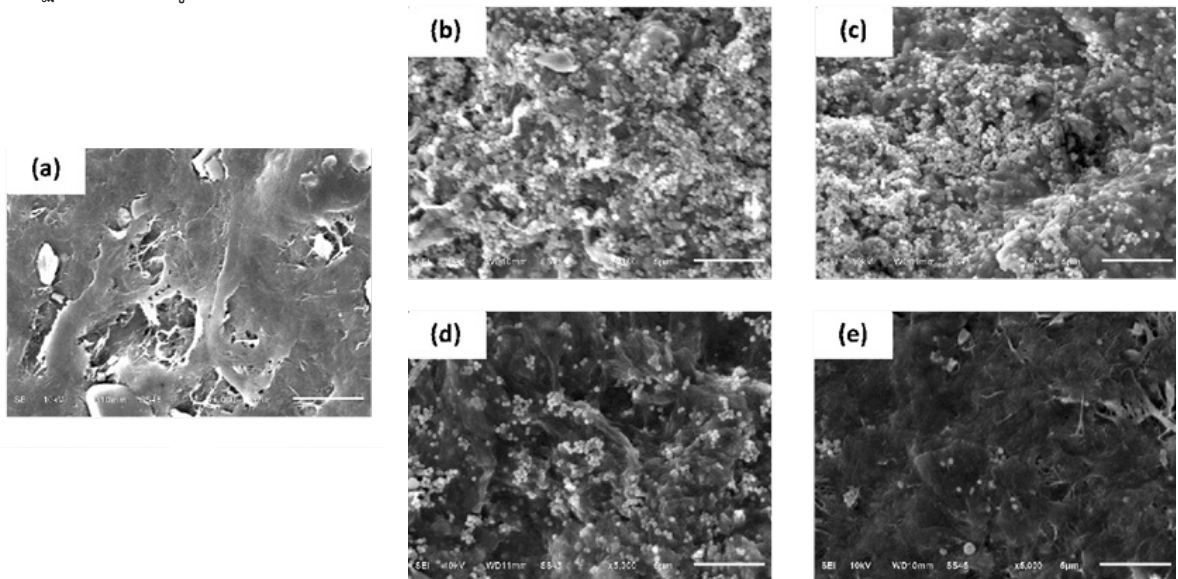
รูปที่ 9 : เซลลูโลสที่ผสมกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสสูตร $85\text{SiO}_2-10\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วน (a) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

แผ่นเซลลูโลสที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ฉีกขาดยาก ไม่ยืดหยุ่น น้ำหนักประมาณ 0.06 กรัม เมื่อผสมเซลลูโลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส ดังรูปที่ 9 พบว่า ที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม และเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม แผ่นเซลลูโลสมีลักษณะหึ่งงอ ไม่เป็นแผ่นทรงกลม สีขาวขุ่น มีเศษผงของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสหลุดออกมา แต่ที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม และเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม แผ่นเซลลูโลสมีลักษณะเป็นแผ่นทรงกลม มีจุดสีขาวของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกระจายอยู่ทั่วแผ่นเซลลูโลส



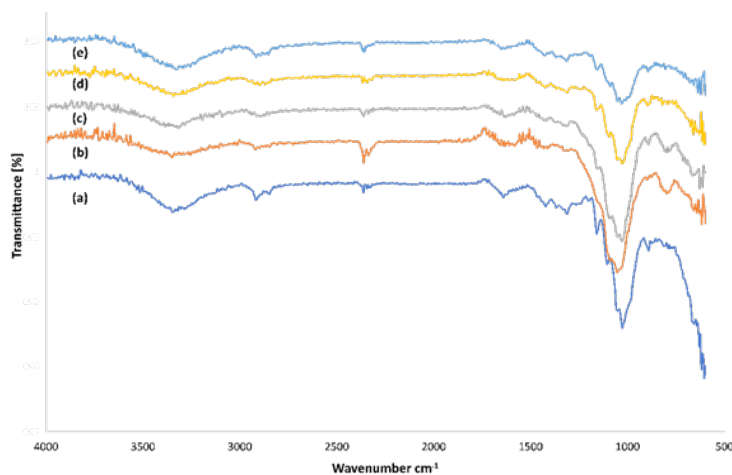
รูปที่ 10 : รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อผสมเซลลูโลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสสูตร $85\text{SiO}_2-10\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5$ (a) เซลลูโลส (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (e) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและเซลลูโลสที่ผสมกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสสูตร $85\text{SiO}_2-10\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ทุกตัวอย่างมีพีคหลักที่ 2-Theta ที่ประมาณ 15 และ 23 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นวิญญากาศของเซลลูโลส



รูปที่ 11 : สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสเมื่อผสมกับเซลลูโลส โดยที่ (a) เซลลูโลส (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (e) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม และเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม อนุภาคจะมีการกระจายตัวในเซลลูโลสอย่างหนาแน่นมากทำให้แผ่นเซลลูโลสมีพื้นผิวไม่เรียบ และเป็นสีขาวขุ่น ส่วนที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม พบว่าอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกระจายตัวในเซลลูโลสได้เป็นอย่างดี ไม่หนาแน่นจนเกินไป และที่อัตราส่วน เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม พบว่า อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสมีจำนวนน้อย ทำให้อนุภาคกระจายตัวไม่ทั่วแผ่นเซลลูโลส



รูปที่ 12 : รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด FTIR (a) เซลลูโลส (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (e) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

รูปที่ 12 สารตัวอย่าง (a) ที่เป็นเซลลูโลส พบสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $3,600-3,300\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H ในโหมด stretching ซึ่งเป็นพันธะเคมีของเซลลูโลสหรือน้ำ ช่วงสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $2,900-2,800\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C-H ของเซลลูโลสในโหมด stretching สัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $1,643\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H ในโหมด stretching ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนพลังงานของพันธะของน้ำในเซลลูโลส สัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $1,027\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นโหมด stretching ของพันธะ C-O สัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ 891 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นโหมด deformation ของพันธะ glycosidic ที่ตำแหน่ง β -1,4 ซึ่งเป็นลักษณะของเซลลูโลส [12-14] โดยเมื่อผสมอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกับเซลลูโลสแล้ว พบว่า สารตัวอย่าง (b) และ (c) ที่มีอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสปริมาณมาก พบช่วงการดูดกลืนแสงของ Si-O-Si symmetric stretching mode ที่ประมาณ 800 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่า มีอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสอยู่ในแผ่นฟิล์มเซลลูโลส

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสได้ด้วยวิธีโซลเจลโดยกระบวนการของ Stöber ใช้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและมีเอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษ้อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ พบว่า ที่อัตราส่วน 85:10:5 ไม่มีความเป็นผลึก สารที่สังเคราะห์ได้เป็นอนุภาคระดับนาโน มีขนาดเฉลี่ยที่ 200-300 นาโนเมตร โดยจะมีขนาดเล็กลง เมื่ออัตราส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้นและ CaO ลดลง นอกจากนี้เมื่อผสมอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกับเซลลูโลส พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสมีการกระจายตัวที่ดีในเซลลูโลสเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] เลิศพงศ์ ลากชีวะสิทธิ์. อุปกรณ์การแพทย์ ดาารุ่งดวงใหม่ ยุกระดับอุตสาหกรรมพลาสติกไทยก้าวทันโลก [ออนไลน์]. 2559. [อ้างถึงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2564]. เข้าถึงจาก: <https://www.scbeic.com/th/detail/product/2729>
- [2] นิศา จันทรพวง. พฤติกรรมในหลอดแก้วของกลาสเซรามิก ที่มีไบตาแคลเซียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2550, 100 หน้า.
- [3] ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 25 มิถุนายน 2564]. เข้าถึงจาก: <http://wongkarnpat.com/viewya.php?id=1030>
- [4] Bioglass 45S5 [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2564]. เข้าถึงจาก: https://en.wikipedia.org/wiki/Bioglass_45S5
- [5] แสงสุรีย์ โรจน์สกุลวงศ์. การผลิตจากเส้นใยไบโอสัปรด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2540, 91 หน้า.
- [6] รัตนา อางสมรรถ และ อิทธิพล แจ่มชัด. การสกัดเซลลูโลสจากชานอ้อย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2532, 58 หน้า.
- [7] สวรรยา ปัญญานันท์, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และ กล้านรงค์ ศรีรอด. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลังเพื่อประยุกต์ใช้ในอาหาร. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 2561, 36(2), 106-116.
- [8] IBRAHIM, ISMAIL A.M., A.A.F. ZIKRY and MOHAMED A. SHARAF. Preparation of spherical silica nanoparticles: Stober silica. *Journal of American Science*. 2010, 6(11). 985-989.
- [9] ZHENG, KAI., XINYI DAI, MIAO LU, NORBERT HÜSER, NICOLA TACCARDI and ALDO. R. BOCCACCINI. Synthesis of copper-containing bioactive glass nanoparticles using a modified Stöber method for biomedical applications. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2017, 150, 159-167.
- [10] GUO, QIAN, GUOQIANG YANG, DANCHUN HUANG, WENBIN CAO, LIN GE and LU LI. Synthesis and

characterization of spherical silica nanoparticles by modified Stöber process assisted by slow-hydrolysis catalyst. *Colloid and Polymer Science*. 2018, **296**, 379-384.

- [11] PAPPAS, G.S., P. LIATSI, I.A. KARTSONAKIS, I. DANILIDIS and G. KORDAS. Synthesis and characterization of new SiO₂-CaO hollow nanospheres by sol-gel method: Bioactivity of the new system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008, **354**(2-9), 755-760.
- [12] ALEMDAR, AYSE and MOHINI SAIN. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues-Wheat straw and soy hulls. *Bioresource Technology*. 2008, **99**(6), 1664-1671.
- [13] WADA, M., JUNJI SUGIYAMA and TAKESHI OKANO. Native celluloses on the basis of two crystalline phase (I α /I β) system. *Journal of Applied Polymer Science*. 1993, **49**(8), 1491-1496.
- [14] กิตติยา ปลื้มใจ, กรองทิพย์ เต็มเกาะ, เอกรัฐ มีชูวาศ และ วิษณุ เพชรภา. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสจากชานอ้อย. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 2563, **9**(9), 31-37.