

การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของเส้นใยนาโน
ชนิดพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ประกอบด้วยอนุภาคเงินนาโน
โดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

Preparation and characterization of polycaprolactam/polyvinyl
alcohol nanofibers containing silver nanoparticles using
electrospinning technique

ชนิษฐา พลสันติ¹, เบนจามาภรณ์ ตั้งนริชชัย², นิภาพร เงินยวง³ และ ชีราวุฒิ เพชรเย็น^{4*}
Khanittha Ponsanti¹, Benchamaporn Tangnorawich², Nipaporn Ngernyuang³
and Chiravoot Pechyen^{4*}

^{1,4}สาขาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³วิทยาลัยแพทยศาสตร์นานาชาติจุฬาภรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

^{1,4}Department of Materials Technology and Textile, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

²Department of Physical, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

³Chulabhom International College of Medicine, Thammasat University

*Email: chiravoot.p@gmail.com

Received: September 24, 2019; Revised: November 19, 2019; Accepted: November 24, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนชนิดพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ประกอบด้วยอนุภาคเงินนาโนในระดับนาโนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง เส้นใยได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาที่อัตราส่วนของพอลิคาโพรแลคแทมต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็น 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 และ 70/30 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโน คือ อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเป็น 16 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของเส้นใยนาโนชนิดพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน ที่เตรียมได้โดยอาศัยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบการกระจายพลังงาน พบว่า เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 5 ไมโครเมตร และโลหะเงินที่ติดอยู่บนผิวของเส้นใยมีขนาดอนุภาคประมาณ 200 นาโนเมตร ผลของการเพิ่มปริมาณอนุภาคเงินนาโนได้เส้นใยที่มีเม็ดปมมากขึ้น และเส้นใยที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนในอัตราส่วน 85/15 นั้นมีความเข้มข้นในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะให้เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่มีความเรียบสม่ำเสมอ ความหนาของเส้นใยมีความสม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอ

คำสำคัญ: พอลิคาโพรแลคแทม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อนุภาคเงินนาโน อิเล็กโทรสปินนิง เส้นใยนาโน

Abstract

The objective of this work research to study the preparation nanofibers of Polycaprolactam/Polyvinyl Alcohol containing Silver Nanoparticles using electrospinning technique. The fibers were synthesized at the ratio of Polycaprolactam to Polyvinyl alcohol were 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 and 70/30 with parameters used for were formed nanofibers at flow rate of 0.1 ml/h, electric potential of 16 KV and the distance between the needle and the collector was 16 cm. Analysis of the characteristics of Polycaprolactam/Polyvinyl alcohol/Silver Nanoparticles nanofibers prepared by using the Fourier transform infrared (FTIR), Scanning electron microscope (SEM) and Energy distribution x-ray spectroscopy analyzer (EDS). Found that the fibers had a diameter from 1 to 5 μm and the silver metal attached to the surface of the fibers had a particle size of about 200 nm. The effect of increasing the amount of silver nanoparticles obtained more bead fibers and fibers not have continuity. Polycaprolactam/Polyvinyl alcohol/Silver Nanoparticles nanofibers in the ratio of 85/15 have the appropriate concentration ratio which Polycaprolactam/ Polyvinyl alcohol/Silver Nanoparticles nanofibers that have uniform thickness, gap and smooth, respectively.

Keyword: Polycaprolactam, Polyvinyl Alcohol, Silver Nanoparticles, Electrospinning, Nanofibers

1. บทนำ

ในปัจจุบันเส้นใยนาโนเป็นนาโนเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมที่นำมาพัฒนาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งวิธีในการผลิตเส้นใยนาโนมีหลากหลายวิธีเช่น Drawing [1] Template synthesis [2] Phase separation [3] Self-assembly [4] และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต หรือ อิเล็กโทรสปินนิง (Electrospinning) [5] [6] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการง่ายๆ และไม่ซับซ้อน เส้นใยนาโนที่ได้มีความละเอียดมาก การผลิตขนาดใหญ่ เส้นใยนาโนแบบต่อเนื่องที่ยาวนาน และต้นทุนต่ำจึงได้เปรียบสำหรับใช้สร้างแผ่นเส้นใย [7] ดังนั้นเส้นใยนาโนที่ได้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีความเป็นรูพรุนสูง และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก [8] ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของเส้นใยนาโนเหล่านี้จึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ [9] วัสดุปิดแผล [10] ตัวกรอง [11] ระบบนำส่งยา [12] เซนเซอร์ [13] และวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ [14]

พอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันทั้งในด้านอุตสาหกรรมมีการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) [15] พอลิคาโพรแลค

โตน (Polycaprolactone) [16] และ พอลิอะคริโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile) [17] และหนึ่งในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมคือ พอลิคาโพรแลคแทม หรือ ไนลอน 6 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ดีโดยพอลิคาโพรแลคแทม ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ประกอบด้วยกลุ่มเอไมด์ และเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมกันใช้อย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำและมีคุณสมบัติทั้งในด้านสมบัติเชิงกลที่ดี มีเสถียรทางความร้อนที่ดี และทนทานสารเคมี [18] และนอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งพอลิเมอร์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ดีนั่นคือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่มีความเป็นพิษ ความทนต่อสารเคมี ละลายได้ดีในน้ำ และสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ดี และขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม [19,20] และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถือว่าเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [21] ดังนั้นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ พลาสติก และสิ่งทอ [22]

อนุภาคเงินนาโน เป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง สมบัติความร้อน สมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และสมบัติทางชีวภาพ เนื่องด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้ดี [23,24,25] เช่น เซนเซอร์ [26] ต้านเชื้อแบคทีเรีย [27] และกระบวนการต้านมะเร็ง [28] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนมาทำการขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน
2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน

3. วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

พอลิคาโพรแลคแทม (Polycaprolactam) (น้ำหนักโมเลกุล=22,000) ซื้อมาจากบริษัททอเบเคมิคอลส์ (เอเชีย) จำกัด พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) (น้ำหนักโมเลกุล=89,000 - 98,000) ซื้อมาจากบริษัท เอส.เอ็ม.เคมิคอล ซัพพลาย จำกัด กรดฟอร์มิก (Formic acid) 99% ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate) เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethyl ammonium bromide) ซื้อมาจากบริษัทวิโรฒวิทยากันท์ จำกัด และแป้งข้าวโพด (Corn starch) ซื้อมาจากตลาด

3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน

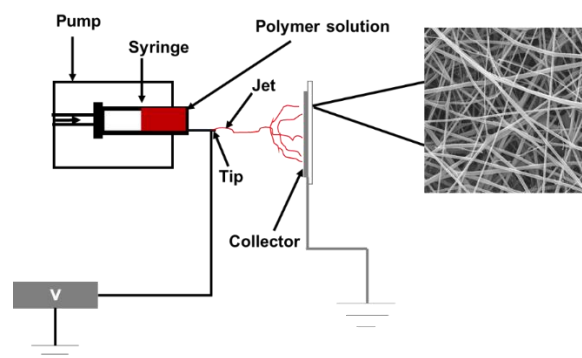
ในขั้นที่หนึ่งนำซิลเวอร์ไนเตรต 15 มิลลิโมลาร์ และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.1 โมลาร์ และนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตผสมสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ แล้วเติมสารละลายน้ำแป้งข้าวโพด จากนั้นนำสารละลายผสมไปกวน แล้วนำไปแช่ในอ่างน้ำ

ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนถูกนำมาใช้ในขั้นที่สอง

ในขั้นที่สองนำซิลเวอร์ไนเตรต 15 มิลลิโมลาร์ และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.2 โมลาร์ และนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตผสมสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ แล้วเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 10 มิลลิลิตร สารละลายน้ำแป้งข้าวโพดปริมาตร 8 มิลลิลิตร ได้สารละลายผสม จากนั้นทำการเติมสารละลายผสมในขั้นที่หนึ่ง แล้วนำสารละลายผสมไปกวน และนำสารละลายผสมไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้สารละลายอนุภาค เงินนาโน

3.3 การเตรียมเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

นำพอลิคาโพรแลคแทมและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นที่ 18 wt% ในอัตราส่วนต่างๆ 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 และ 70/30 ละลายในตัวทำละลายกรดฟอร์มิก 99% กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำอนุภาคเงินนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์มาเติมลงสารละลายพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่ได้จากการเตรียมมาบรรจุลงหลอดฉีด เข็มขนาดเบอร์ 24 ความยาว 1.5 นิ้ว ซึ่งขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังนี้ อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 16 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ 16 เซนติเมตร ความชื้น 33% และที่อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 1

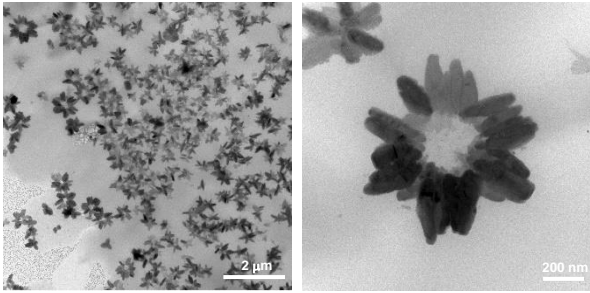


ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน

วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเงินนาโนที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy: TEM)



ภาพที่ 2 ภาพ TEM แสดงการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน

จากการนำผลที่ได้จากการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เพื่อดูรูปร่างลักษณะ และขนาดของอนุภาคเงินนาโนที่สังเคราะห์ได้พบว่าอนุภาคเงินนาโนที่สังเคราะห์นั้นมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงดอกไม้ มีการกระจายตัว และขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2

4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการขึ้นรูปเส้นใยนาโน

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนจากสารละลายพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือการศึกษาตัวแปรของการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล ความชื้น และอุณหภูมิ เพื่อที่จะได้เส้นใยนาโนที่มีความเรียบสม่ำเสมอ ในการศึกษาครั้งนี้ นำพอลิคาโพรแลคแทม และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในกรดฟอร์มิก 99% เพื่อเตรียมเป็นสารละลายสำหรับปั่นในความเข้มข้นที่ 12 %wt และ 18 %wt ซึ่งกำหนดให้สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วย

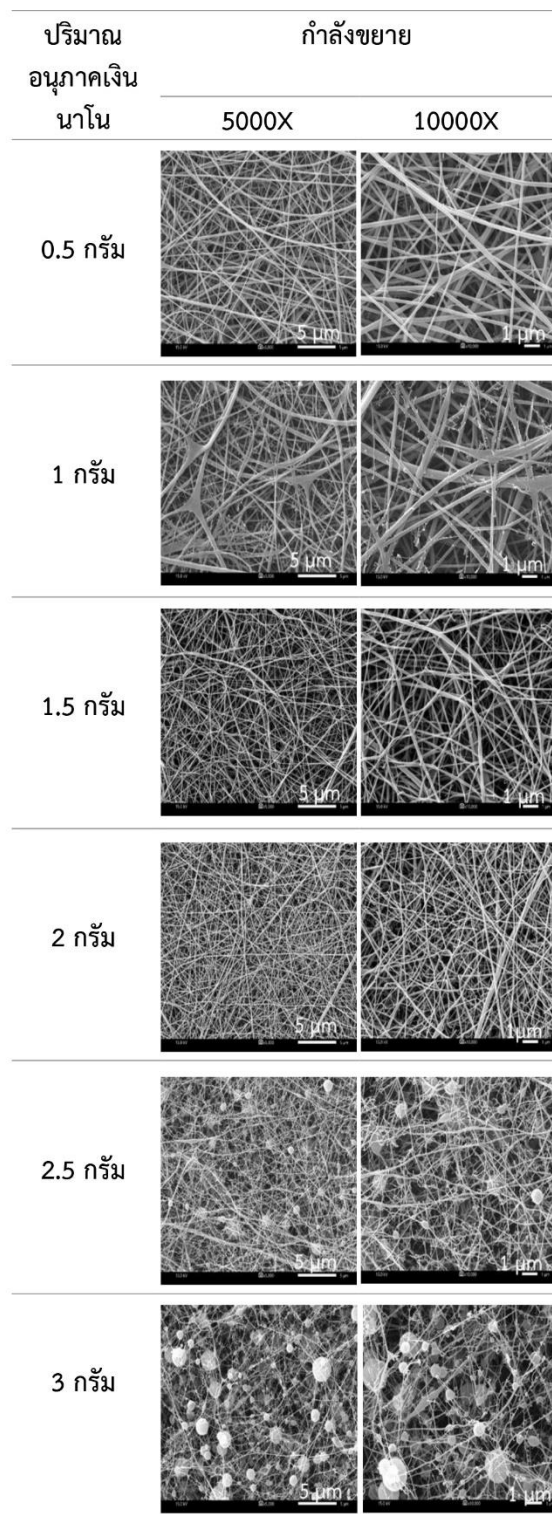
เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ 12 %wt และ 18 %wt ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 16 กิโลโวลต์ อัตราการไหลเท่ากับ 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเป็น 16 เซนติเมตร ความชื้น 33% และที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น	กำลังขยาย	
	5000 X	10000 X
12 wt%		
18 wt%		

ภาพที่ 3 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ความเข้มข้น 12 %wt และ 18 %wt

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปั่นได้ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า และ 10000 เท่า แสดงในภาพที่ 3 จากภาพที่ 3 แสดงเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 12 %wt จะพบว่าเส้นใยที่ได้มีหยดพอลิเมอร์บนแผ่นเส้นใยด้วย ใช้เวลานานในการสปิน และเส้นใยที่ได้เป็นเม็ดปม และไม่มี ความต่อเนื่อง มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ แต่เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 18 %wt ได้เส้นใยนาโนที่ได้มีความต่อเนื่อง มีความเรียบที่มีความสม่ำเสมอ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 18 %wt ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 16 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเป็น 16 เซนติเมตร ความชื้น 33% และที่อุณหภูมิห้อง ได้เส้นใยนาโนที่มีความเรียบ โดยความเข้มข้นที่ 18 wt% นั้นเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

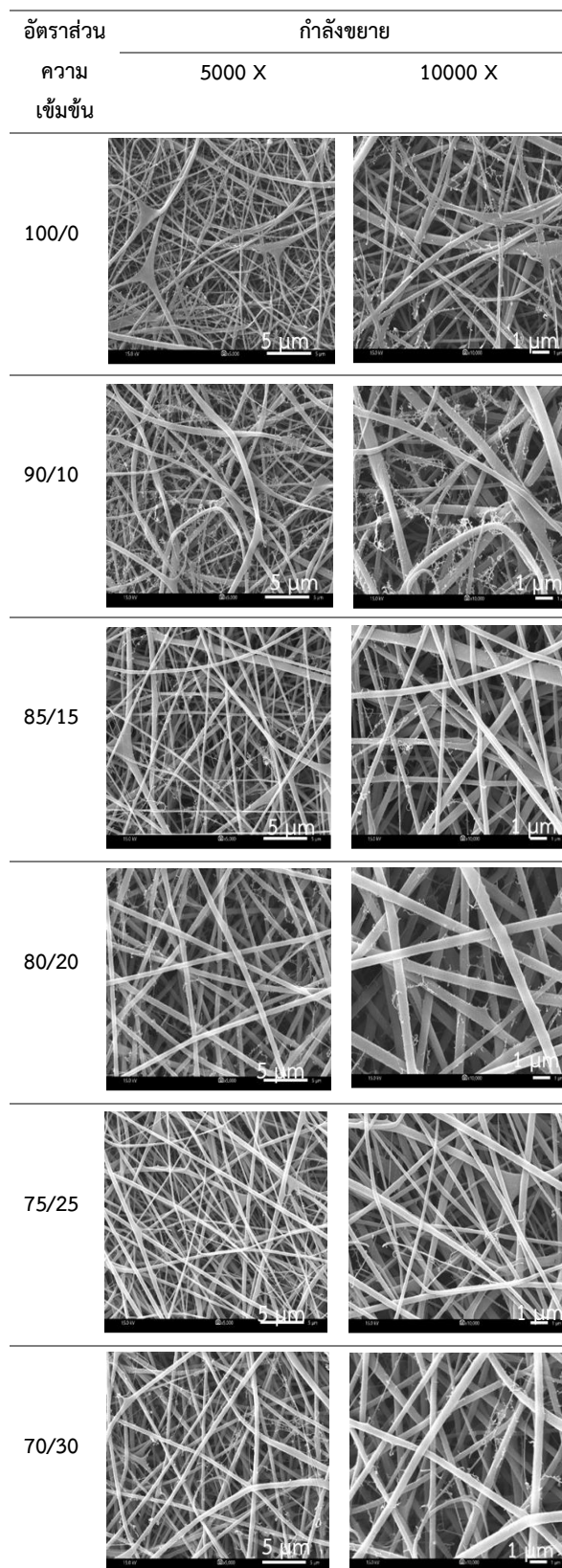
จากภาพที่ 3 ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโนจากสารละลายพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือ ความเข้มข้นที่ 18 wt% จากนั้นศึกษานำสารละลายพอลิคาโพรแลคแทมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาเติมอนุภาคเงินนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมไม่มีขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร ดังในภาพที่ 2 โดยใช้อนุภาคเงินนาโนที่แตกต่างกัน อนุภาคเงินนาโนที่ 0.5 กรัม 1 กรัม 1.5 กรัม 2 กรัม 2.5 กรัม และ 3 กรัม ดังในภาพที่ 4 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน



ภาพที่ 4 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่แตกต่างกันคือ 0.5 กรัม 1 กรัม 1.5 กรัม 2 กรัม 2.5 กรัม และ 3 กรัม

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ต่างกันที่ปั่นได้ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า และ 10000 เท่า แสดงในภาพที่ 4 จากภาพที่ 4 แสดงเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ต่างกัน พบว่าเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่ปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ต่างกัน ที่ความเข้มข้น 18 %wt จะพบว่าเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ 0.5 กรัม 1 กรัม และ 1.5 กรัม นั้นจะมีลักษณะเส้นใยที่ได้มีความต่อเนื่อง มีความเรียบ มีปริมาณเส้นใยที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีความสม่ำเสมอ ดังในภาพที่ 4 และเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ 2 กรัม 2.5 กรัม และ 3 กรัม นั้นพบว่าได้เส้นใยมีหยดพอลิเมอร์บนแผ่นเส้นใยด้วย และใช้เวลานานในการสปิน แต่เส้นใยที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง แต่มีบางเส้นใยเกิดการขาดในเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ 2 กรัม แต่เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ 2.5 กรัม และ 3 กรัม ได้เส้นใยที่มีเม็ดปมมากขึ้น และเส้นใยที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง ดังนั้นจึงสรุปได้เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยปริมาณอนุภาคเงินนาโนที่ 0.5 กรัม 1 กรัม และ 1.5 กรัม เหมาะสมเนื่องจากเส้นใยที่ได้มีความเรียบสม่ำเสมอ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 5 ไมโครเมตร ดังในภาพที่ 4

จากภาพที่ 4 ได้ปริมาณของอนุภาคเงินนาโนที่เหมาะสม จากนั้นเตรียมเป็นสารละลายสำหรับปั่นในความเข้มข้นที่ 18 %wt ในอัตราส่วน 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 และ 70/30 ซึ่งกำหนดให้สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิค อิเล็กโตรสปินนิ่งเป็นดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่ 18 %wt ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น









ภาพที่ 5 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นที่ 18 wt% ในอัตราส่วนที่ 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 และ 70/30

16 กิโลโวลต์ อัตราการไหลเท่ากับ 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเป็น 16 เซนติเมตร ความชื้น 33% และที่อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 5

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่ปั่นได้ ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า และ 10000 เท่า แสดงในภาพที่ 5 จากภาพที่ 5 แสดงเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่อัตราส่วน 100/0 และ 90/10 ลักษณะเส้นใยที่ได้มีความเรียบแต่มีใยตามเส้นใย และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วนในอัตราส่วนที่ 85/15 จะพบว่าเส้นใยที่ได้มีความสม่ำเสมอ เส้นใยมีความเรียบ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดสม่ำเสมอ แต่ที่เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่อัตราส่วน 80/20 75/25 และ 70/30 จะพบว่าเส้นใย มีหยดพอลิเมอร์บนแผ่นเส้นใยด้วย และใช้เวลานานในการสปิน ดังภาพที่ 5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่อัตราส่วน 85/15 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมคือ เส้นใยที่ได้มีความเรียบที่สม่ำเสมอ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 ถึง 5 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอ และไม่เกิดหยดพอลิเมอร์บนแผ่นเส้นใย ดังนั้นเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในภาพที่ 6 แสดงภาพถ่ายลักษณะของแผ่นเส้นใยพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนบนวัสดุรองรับสำหรับการขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 %wt ในอัตราส่วน 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 และ 70/30 สังเกตได้ว่าในแผ่นรองรับเส้นใยที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งในอัตราส่วน 100/0 90/10 80/20 75/25 และ 70/30 มีปริมาณหยดสารละลายที่หลุดออกจากปลายเข็มฉีดเกิดขึ้นปริมาณมากบนแผ่นรองรับเส้นใยที่ขึ้นรูป เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นไม่เหมาะสม เมื่อทำการฉีดหรือขึ้นรูปออกมาเป็นเส้นใยที่ได้ไม่ค่อยต่อเนื่อง นอกจากนี้ทำให้ต้องทำการปิด เปิดเครื่องบ่อยเพื่อเช็ดปลายเข็มฉีดอย่าไม่ให้เกิดการสปินไม่ออก และทำให้

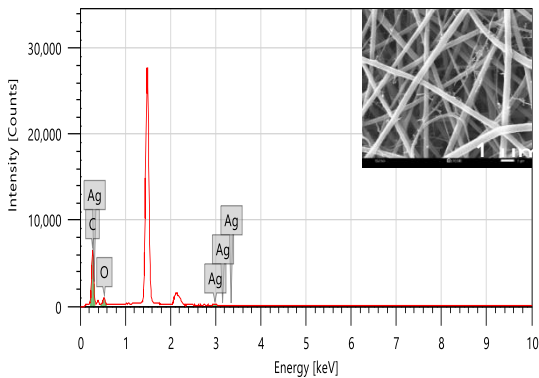
ความเข้มข้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	แผ่นเส้นใยนาโน
100/0	16 กิโลโวลต์	
90/10		
85/15		
80/20		
75/25		
70/30		

ภาพที่ 6 แสดงภาพถ่ายแผ่นเส้นใยที่เกิดขึ้นบนวัสดุรองรับในการทำสปินเส้นใยในอัตราส่วนต่างๆ

ต้องปิด เปิดโวลต์ไฟฟ้าบ่อย เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนในอัตราส่วน 85/15 เป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากไม่เกิดปริมาณหยดสารละลายบนแผ่นรองรับเส้นใย ใช้เวลาการสปินไม่นาน และทำให้ไม่มีปัญหาในการต้องปิด เปิดโวลต์ไฟฟ้าบ่อย

4.3 ศึกษาการยืนยันของธาตุเงิน

ศึกษาการยืนยันการมีอยู่ของธาตุเงินจากเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนมาถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์แบบการกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy: EDS) ดังในภาพที่ 7

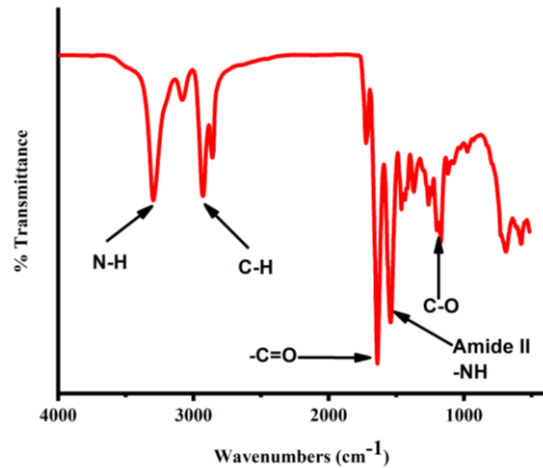


ภาพที่ 7 การวิเคราะห์ธาตุเงินจากเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน

จากภาพที่ 7 วิเคราะห์การยืนยันการมีอยู่ของธาตุเงินในเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน โดยสังเกตเห็นได้ว่าพบสเปกตรัมของธาตุเงินจากเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในเส้นใยนาโนมีธาตุเงินอยู่จริง

4.4 ศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยนาโน พอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared: FTIR)



ภาพที่ 8 FTIR สเปกตรัมของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน

จากภาพที่ 8 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน จากสเปกตรัมที่ได้พบว่าปรากฏพีกที่ประมาณ 2930 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของ CH และพีกที่ประมาณ 1143 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของ CO ซึ่งเป็นพีกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพีกที่ประมาณ 3312 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืด N-H พีกที่ประมาณ 3085 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืด C-H พีกที่ประมาณ 1552 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสัมพันธ์กับการสั่นแบบ amide II, N-H bending และ C-N stretching ซึ่งเป็นพีกของพอลิคาโพรแลคแทม [29] แสดงให้เห็นว่ามีเส้นใยนาโนมีทั้งหมู่ฟังก์ชันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร่วมกับพอลิคาโพรแลคแทม

5. สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน ด้วยกำหนดให้สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโน 18 %wt ในอัตราส่วน 100/0 90/10 85/15 80/20 75/25 และ 70/30 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 16 กิโลโวลต์ อัตราการไหลเท่ากับ 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่าง

ปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเป็น 16 เซนติเมตร ความชื้น 33% และที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนในอัตราส่วน 85/15 นั้นมีความเข้มข้นในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะให้เส้นใยนาโนพอลิคาโพรแลคแทม/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/อนุภาคเงินนาโนที่มีความเรียบสม่ำเสมอ ความหนาของเส้นใยมีความสม่ำเสมอ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 5 ไมโครเมตร มีช่องว่างระหว่างเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้อนุภาคเงินนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงดอกไม้มีขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร ดังนั้นเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ในอนาคตต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ตามทิศทางการยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2562 เลขที่สัญญาทุน บช.วช.13/2562 และทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์จากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เลขที่สัญญาทุน สป7/2561 และทุนโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) เพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรมสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เลขที่สัญญาทุน SCA-CO-2561-7558-TH ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jana B., Jiri C., David L., Maxime L., "DRAWING-THE PRODUCTION OF INDIVIDUAL NANOFIBERS BY EXPERIMENTAL METHOD," *Bmo*, vol 9, pp 21-23, 2011.
- [2] Taegon Kim, Watanabe Naoki, Jin Miyawaki, Joo-Il Park, Chanmin Lee, Hoi-Kyoeng Jung, Min-Seok Jeon, Hyun-Jong Kim, Seong-Ho

Yoon, "Synthesis of surface-replicated ultra-thin silica hollow nanofibers using structurally different carbon nanofibers as templates," *Solid State Chemistry*, vol,272, pp.21-26, 2019.

- [3] F. Yang, R. Murugan, S. Ramakrishna, X. Wang, Y.-X. Ma, S. Wang, "Fabrication of nano-structured porous PLLA scaffold intended for nerve tissue engineering," *Biomaterials* vol.25, pp. 1891-1900, 2004.
- [4] Tong Liu, Jingyu Li, Xiangyu Li, Shihui Qiu, Yuwei Ye, Feng Yang, Haichao Zhao, "Effect of self-assembled tetraaniline nanofiber on the anticorrosion performance of waterborne epoxy coating," *Progress in Organic Coatings*, vol.128, pp. 137-147, 2019.
- [5] Alessandro Di Mauro, Massimo Zimbone, Maria Elena Fragala, Giuliana Impellizzeri, "Synthesis of ZnO nanofibers by the electrospinning process," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol.42, pp.98-101, 2016.
- [6] Jyoti V. Patil, Sawanta S. Mali, Archana S. Kamble, Chang K. Hong, Jin H. Kim, Pramod S. Patil, "Electrospinning: A versatile technique for making of 1D growth of nanostructured nanofibers and its applications: An experimental approach," *Applied Surface Science*, vol.423, pp.641-674, 2017.
- [7] Sampath K. Nune, Krupanidhi S. Rama, Vijaya R. Dirisala, Murthy Y. Chavali, "Electrospinning of collagen nanofiber scaffolds for tissue repair and regeneration," *Nanostructures for Novel Therapy*, pp.281-311, 2017.
- [8] Mehran Shahhosseini, Saeed Bazgir, Morteza Daliri Joupari, Fabrication and investigation of silica nanofibers via

- electrospinning, *Materials Science & Engineering C*, vol.91, pp.502–511, 2018.
- [9] Peng Chen, Leyun Liu, Jiaqi Pan, Jie Mei, Chaorong Li, Yingying Zheng, “Biomimetic composite scaffold of hydroxyapatite/gelatin-chitosan core-shell nanofibers for bone tissue engineering,” *Materials Science & Engineering C*, vol.97, pp.325–335.
- [10] Muhammad Qamar Khan, Davood Kharaghani, Sanallah, Amir Shahzad, Y. Saito, T. Yamamoto, Hiroshi Ogasawara, Ick Soo Kim, “Fabrication of antibacterial electrospun cellulose acetate/ silver-sulfadiazine nanofibers composites for wound dressings applications,” *Polymer Testing*, vol.74, pp.39–44, 2019.
- [11] Ye Bian, Li Zhang, Chun Chena, “Experimental and modeling study of pressure drop across electrospun nanofiber air filters,” *Building and Environment*, vol.142, pp.244–251, 2018.
- [12] Bakhtawar Ghafoor, Amna Aleem, Murtaza Najabat Ali, Mariam Mir, “Review of the fabrication techniques and applications of polymeric electrospun nanofibers for drug delivery systems,” *Drug Delivery Science and Technology*, vol. 48, pp.82–87, 2018.
- [13] Gong Wang, Tao Liu, Xiang-Chao Sun, Pu Li, Yi-Shi Xu, Jian-Guan Hua, Yan-Hao Yu, Shun-Xin Li, Yun-Zhi Dai, Xin-Yu Song, Chao Lv, Hong Xia, “Flexible pressure sensor based on PVDF nanofiber,” *Sensors and Actuators A*, vol.280, pp. 319–325, 2018.
- [14] Lavanya Thirugnanam, Ramaprabhu Sundara, “Few layer graphene wrapped mixed phase TiO₂ nanofiber as a potential electrode material for high performance supercapacitor applications,” *Applied Surface Science*, vol. 444, pp. 414–422, 2018.
- [15] E Y Gómez-Pachon, R Vera-Graziano, R Montiel Campos, “Structure of poly(lactic-acid) PLA nanofibers scaffolds prepared by electrospinning”, *Materials Science and Engineering*, vol.59:012003, 2014.
- [16] Maria Ann Woodruff, Dietmar Werner Hutmacher, “The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century”, *Progress in Polymer Science*, vol.35, pp.1217–1256, 2010.
- [17] Wenyu Wang, Yide Zheng, Xin Jin, Yue Sun, Binbin Lu, Hongxia Wang, Jian Fang, Hao Shao, Tong Lin, “Unexpectedly high piezoelectricity of electrospun polyacrylonitrile nanofiber membranes,” *Nano Energy*, vol.56. pp.588–594, 2019.
- [18] Huihui Zhao, Weimin Kang, Xiaomin Ma, Nanping Deng, Zongjie Li, Bowen Cheng, “Fabrication and catalytic behavior of hierarchically-structured nylon 6 nanofiber membrane decorated with silver nanoparticles,” *Catalysis*, vol.38, pp.73–82, 2017.
- [19] Wen-Ching Lin, Da-Guang Yu, Ming-Chien Yang, “Blood compatibility of novel poly(γ -glutamic acid)/polyvinyl alcohol hydrogels,” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol.47, pp.43–49, 2006.
- [20] K.T. Shalumon, K.H. Anulekha, Sreeja V. Nair, S.V. Nair, K.P. Chennazhi, R. Jayakumar, Sodium alginate/poly (vinyl alcohol)/nano ZnO composite nanofibers for antibacterial wound dressings, *Biological Macromolecules*, vol.49: 247– 254, 2011.

-
- [21] Pengju Liu, Wenhua Chen, Shibing Bai, Yuan Liu, QiWang, "Fabrication of an ultralight flame-induced high conductivity hybrid sponge based on poly (vinyl alcohol)/silver nitrate composite," *Materials and Design*, vol.139, pp.96–103, 2018.
- [22] Srinath Muppalaneni and Hossein Omidian, "Polyvinyl Alcohol in Medicine and Pharmacy: A Perspective," *Develop Drugs*, pp.2-3, 2013.
- [23] Sangiliyandi Gurunathan, Jung Hyun Park, Jae Woong Han, Jin-Hoi Kim, "Comparative assessment of the apoptotic potential of silver nanoparticles synthesized by *Bacillus tequilensis* and *Calocybe indica* in MDA-MB-231 human breast cancer cells: targeting p53 for anticancer therapy," *Nanomedicine*, vol.10, pp. 4203–4223, 2015.
- [24] Wen-Ru Li, Xiao-Bao Xie, Qing-Shan Shi, Hai-Yan Zeng, You-Sheng OU-Yang, Yi-Ben, "Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli*," *Microbiol Biotechnol*, vol.85, pp.1115–1122, 2010.
- [25] Priyabrata Mukherjee, Absar Ahmad, Deendayal Mandal, Satyajyoti Senapati, Sudhakar R. Sainkar, Mohammad I. Khan, Renu Parishcha, P. V. Ajaykumar, Mansoor Alam, Rajiv Kumar, and Murali Sastry, "Fungus-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Immobilization in the Mycelial Matrix: A Novel Biological Approach to Nanoparticle Synthesis," *Nano Letter*, vol.1, pp. 515–519, 2001.
- [26] Sasiwimon Kraithong, Jitnapa Sirirak, Kittibandid Soisuwan, Nantanit Wanichacheva, Pattanawit Swanglap, "Enhancing Sensitivity of Novel Hg²⁺ Fluorescent Sensor via Plasmonic Enhancement of Silver Nanoparticles," *Sensors and Actuators B*, vol.258, pp.694–703, 2018.
- [27] Maheshkumar Prakash Patil, Rahul Dheerendra Singh, Prashant Bhimrao Koli, Kalpesh Tumadu Patil, Bapu Sonu Jagdale, Anuja Rajesh Tipare, Gun-Do Kim, "Antibacterial potential of silver nanoparticles synthesized using *Madhuca longifolia* flower extract as a green resource," *Microbial Pathogenesis*, vol.121, pp.184–189, 2018.
- [28] V. Kathiravan, S. Ravi, S. Ashokkumar, "Synthesis of silver nanoparticles from *Melia dubia* leaf extract and their in vitro anticancer activity," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 130, pp.116–121, 2014.
- [29] Abdalla Abdal-hay, Abdel Salam Hamdy, Khalil Abdelrazek Khalil, "Fabrication of durable high performance hybrid nanofiber scaffolds for bone tissue regeneration using a novel, simple in situ deposition approach of polyvinyl alcohol on electrospun nylon 6 nanofibers," *Materials Letters*, vol.147, pp. 25–28, 2015.
-