

การเตรียมแผ่นเส้นใยนาโนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์: ผลการบำบัดด้วยพลาสมาอากาศ

Preparation of Polyvinyl Alcohol Nanofiber Membrane: Effects of Plasma Air Treatment

สิรินาถ ชูประจง^{1*}, สาทิตรี นาแว¹, อารมณ ปู่เต๊ะ¹, และ นวัล บินหะยีนียิ¹
Sirinat Chooprajong^{1*}, Safitree Nawae¹, Arom Puteh¹, and Nawal Binhayeeniyi¹

(Received: 14 March 2024; Revised: 8 May 2024; Accepted: 27 May 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งผลิตขึ้นโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างแผ่นเส้นใยนาโนที่ไม่ถูกบำบัดและถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศที่อุณหภูมิห้องพบว่าแผ่นเส้นใยนาโนก่อนและหลังจากบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศมีความหนาไม่ต่างกัน โดยจะมีความหนาอยู่ในช่วง 71.55 ± 6.78 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลงเมื่อใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยกว้างขึ้นส่งผลให้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนใหญ่ขึ้น ความพรุนจะเพิ่มขึ้น และแผ่นเส้นใย PVA ที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาจะมีค่ามุมสัมผัสลดลงจาก 74.276° เหลือ 19.846° แสดงถึงความชอบน้ำและความสามารถในการเปียกที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับแผ่นเส้นใยที่ไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา

คำสำคัญ: การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต เส้นใยนาโน คุณสมบัติทางกายภาพ พลาสมา

Abstract

This research studies the physical properties of polyvinyl alcohol nanofibers produced by an electrospinning process in a laboratory. Comparing the physical properties of untreated and air plasma treated membranes at room temperature. It was found that the nanofiber

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Faculty of Science and Technology, Princess of Naradhiwas University

*Corresponding Author, E-mail: sirinat.c@pnu.ac.th

membranes before and after air plasma treatment had the same thickness in the range of 71.55 ± 6.78 micrometers. The diameter of the fibers becomes smaller as the treatment time increases. This widens the space between the fibers, resulting in a larger pore size of the membrane. Therefore, the porosity was increased. The plasma-treated PVA fiber membranes had a contact angle decrease from 74.276° to 19.846° , showing a marked increase in hydrophilicity and wettability compared to the untreated membranes.

Keywords: Electrospinning, Nanofiber, Physical property, Plasma

บทนำ

นาโนเทคโนโลยี เป็นศาสตร์ที่ศึกษาปรากฏการณ์และการจัดการสสารที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร รวมถึงการพัฒนาวัสดุ เครื่องมือ โครงสร้าง ระบบ และเทคนิคทางด้านนาโนเทคโนโลยี ปัจจุบันวัสดุนาโนที่สังเคราะห์ได้มีหลายประเภท หลายรูปทรง (Mekuye & Abera, 2023) เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticle) แท่งนาโน (Nanorod) ท่อนาโน (Nanotube) เส้นใยนาโน (Nanofiber) ด้วยโครงสร้างระดับอะตอมทำให้วัสดุนาโนมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีสเกลใหญ่กว่า คุณสมบัติพิเศษที่น่าสนใจของวัสดุนาโน เช่น คุณสมบัติทางแม่เหล็ก คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อน คุณสมบัติการมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น นำมาทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ตัวเก็บข้อมูลแม่เหล็ก (Magnetic data storage) และนำมาเป็นส่วนประกอบในวัสดุฉลาด (Smart materials) เป็นต้น งานวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยีมีการพัฒนาที่เติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นที่คาดการณ์ว่านาโนเทคโนโลยีจะกลายเป็นศูนย์กลางสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจในศตวรรษที่ 21 สังเกตได้จากการลงทุนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากภาครัฐบาลและภาคธุรกิจทั่วโลก

เส้นใยนาโน เป็นหนึ่งในวัสดุนาโนที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ทั่วโลกมีจำนวนงานวิจัยตีพิมพ์ต่อปีเกี่ยวกับเส้นใยนาโนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี มีการใช้ประโยชน์จากเส้นใยนาโนทั้งในด้านการแพทย์และเกษตรกรรม ด้านอุตสาหกรรม ด้านพลังงาน และด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากขั้นตอนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถใช้ได้กับวัสดุหลากหลาย และมีคุณสมบัติเด่น เช่น การมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก เส้นใยขนาดเล็ก การมีความพรุนสูง รูพรุนขนาดเล็ก และมีคุณสมบัติการสะท้อนน้ำ (Langwald et al., 2023)

กระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่นิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน ได้แก่ เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) ซึ่งอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากความต่างศักย์สูงระหว่างปลายเข็มกับฉากรับที่เป็นโลหะ

ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนผิวพอลิเมอร์เหลว เมื่อแรงผลักทางไฟฟ้านี้มากกว่าแรงดึงดูดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ก็จะถูกผลักออกจากเข็มไปสู่ฉากรับ และด้วยความหนืดทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่ถูกผลักยืดออกเป็นเส้นใยขนาดเล็ก ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ระยะห่างระหว่างเข็มกับฉากรับ ความเข้มข้นของสารละลาย ชนิดของพอลิเมอร์และตัวทำละลาย และอัตราการไหลของสารละลาย เป็นต้น (Islam et al., 2019) สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยให้มีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมแก่การใช้งานโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การนำไปอบ นำไปบำบัดด้วยสารเคมี หรือนำไปบำบัดด้วยพลาสมา (Asadian et al., 2020) ซึ่งการบำบัดด้วยพลาสมา เป็นวิธีการปรับปรุงเส้นใยที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

พลาสมา ถือว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร ประกอบด้วยอิเล็กตรอน อนุมูล โฟตอน และไอออนที่มีประจุ พลาสมาเกิดจากการที่ก๊าซที่ได้รับพลังงานมากพอ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมจนก๊าซแตกตัวเป็นประจุบวกและประจุลบที่เคลื่อนไหวอย่างอิสระ พลาสมามีความเป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากความสมดุลระหว่างจำนวนประจุทั้งสองชนิด พลาสมาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ พลาสมาร้อน (hot plasma) และพลาสมาเย็น (cold plasma) ซึ่งพลาสมาเย็นมีอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส พลาสมาเย็นได้รับความนิยมอย่างมากในการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยนาโน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำและสะอาด ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างของเส้นใยนาโนจากความร้อนส่วนเกิน (Dufay et al., 2020)

เมื่อนำพอลิเมอร์ไปบำบัดด้วยพลาสมาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเชิงผิวเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างพลาสมากับพอลิเมอร์ เช่น อนุภาคของพลาสมาจะเข้าไปกัดผิว (etching) ทำให้อนุภาคลิ่งสกปรกที่เกาะอยู่บนพื้นผิวพอลิเมอร์หลุดออกไป นับเป็นการทำความสะอาดพื้นผิว อีกทั้งยังเพิ่มความขรุขระเชิงจุลภาคของพื้นผิว ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับอนุภาคอื่นมากขึ้น ผลจากปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของพลาสมากับพอลิเมอร์ ยังทำให้เกิดอนุภาคอิสระ โดยอนุภาคอิสระนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ บนผิวพอลิเมอร์ได้อีกด้วย (อัจฉราภรณ์ บุญมา, 2556)

งานวิจัยนี้ สนใจศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยพอลิเมอร์ ได้แก่ ความหนาของแผ่นเส้นใย (Thickness of membranes) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (Fiber diameter) ขนาดรูพรุน (Pore size) ความพรุน (Porosity) และความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของเยื่อบางที่สังเคราะห์ขึ้นจากเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ (Nanofibrous membrane) ซึ่งผลิตขึ้นโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างเยื่อบางที่ไม่ถูกบำบัด กับเยื่อบางที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที และ 3 นาที ตามลำดับ เพื่อให้ทราบลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นและเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการประยุกต์ใช้ในอนาคต

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ขนาดรูพรุน ความพรุน และความชอบน้ำ ของเยื่อบางที่สังเคราะห์ขึ้นจากเส้นใยนาโนพอลิเมอร์โดยเทคนิคกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ถูกบำบัดและไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ

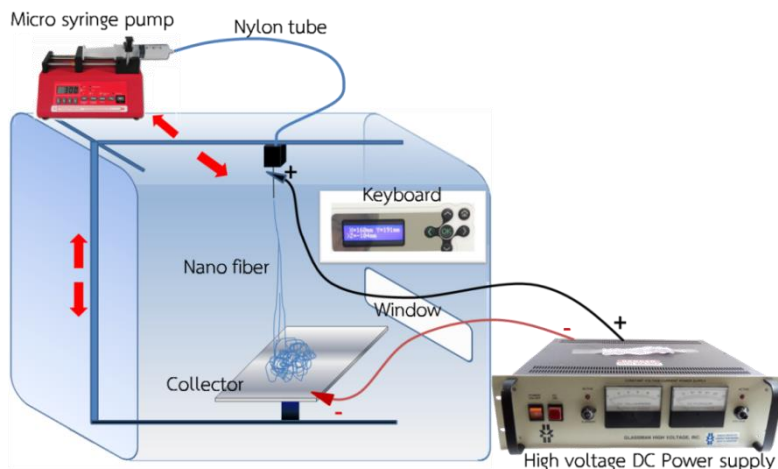
วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. สร้างเครื่องผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่สามารถควบคุมระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฉากรับเส้นใยด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ
2. ผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ โดยตัวแปรต่างๆในการผลิตเส้นใย ได้แก่ ชนิดพอลิเมอร์และตัวทำละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฉากรับเส้นใย และเวลาที่ใช้ กำหนดค่าตามที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. การบำบัดเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ด้วยพลาสมาของอากาศ
4. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ถูกบำบัดและไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ

ขั้นตอนที่ 1 สร้างเครื่องผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

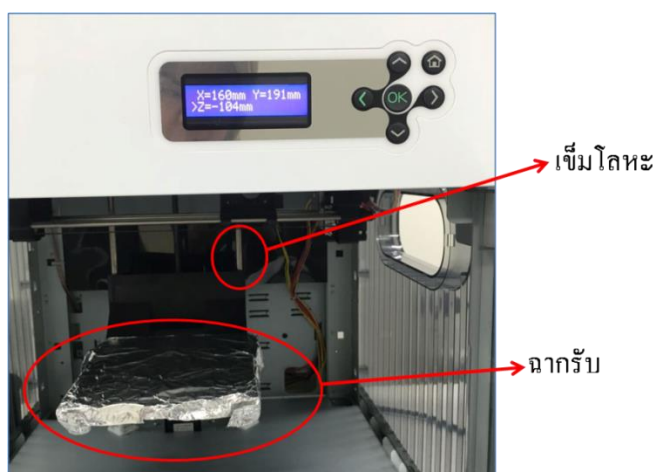
เริ่มจากการออกแบบระบบโดยคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งาน การผลิตเส้นใยนาโนโดยเทคนิคการหมุนปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีความเสี่ยงที่ผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับสารเคมีอันตรายที่ใช้เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ อีกทั้งต้องเสี่ยงกับไฟฟ้าแรงสูงจากเครื่อง High Voltage DC Power Supply ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะอยู่ระหว่างหัวเข็มกับฉากรับเส้นใย ดังนั้น จึงออกแบบให้ส่วนที่มีความเสี่ยงทั้งหมดอยู่ในระบบปิดในตู้อะคริลิก เครื่องนี้สามารถกำหนดค่าระยะห่างระหว่างเข็มกับฉากรับได้ด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ อาศัยการสั่งการ Stepper motor ผ่านคีย์บอร์ดที่ติดตั้งไว้ด้านหน้าของตู้ สามารถเลื่อนเข็มได้ในแนวระนาบ (แกน x และแกน y) และปรับเปลี่ยนตำแหน่งของฉากรับขึ้น - ลงในแนวดิ่ง (แกน z) ภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การออกแบบเครื่องผลิตเส้นใยนาโนที่สามารถควบคุมการทำงานโดยสั่งการผ่านระบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์

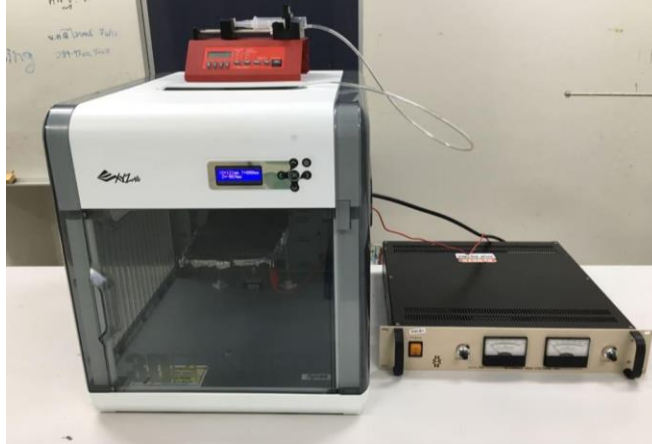
ระบบที่พัฒนาขึ้นจะใช้โปรแกรม Arduino pro mini microcontroller ควบคุมการทำงานของ Stepper motor ทั้งสามแกนอันได้แก่ แกน x y z โดยใช้ Stepper motor driver รุ่น A4988 ร่วมกับสายพาน และแกนเหล็กเกลียวนอก ทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของ Stepper motor และระยะห่างของเข็มโลหะ และฉากรับเส้นใยได้ ด้านหน้าตู้จะติดตั้งมีคีย์บอร์ดสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่และกำหนดระยะห่างระหว่าง เข็มกับฉากรับใน 3 มิติ และแสดงผลผ่านหน้าจอแสดงผลแบบ LCD

ภายในตู้จะมีเข็มโลหะที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z ได้ แต่สามารถเคลื่อนซ้าย-ขวา หน้า-หลัง ในระนาบ XY ได้ ส่วนฉากรับเส้นใย จะเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z ได้เพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างเข็มกับฉากรับ ซึ่งเป็นการฉีดเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ในแนวตั้ง ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตำแหน่งของเข็มและฉากรับเส้นใยภายในตู้ผลิตเส้นใยนาโน

ตุ้มผลิตเส้นใยนาโนที่พัฒนาขึ้นนี้ ถูกดัดแปลงมาจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (3-D Printer) XYZ printing รุ่น da vinci 1.0 สามารถเปิดฝาได้ทั้งด้านหน้าและด้านบนเพื่อความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ ส่วนด้านข้างซ้ายขวาจะมีช่องสำหรับให้สายไฟลอดผ่านได้ ดังภาพที่ 3



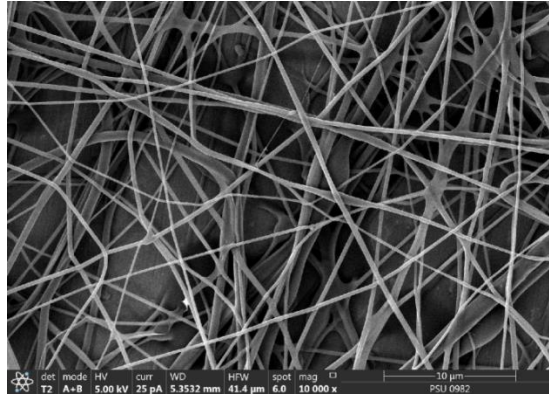
ภาพที่ 3 ตัวถังของเครื่องหมุนปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ดัดแปลงมาจาก 3D printer

ขั้นตอนที่ 2 การผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์

ในการผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ ใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย โดยเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 10 % w / v ตามที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ชลดา สุวรรณบุรณ์ และคณะ, 2561) เนื่องจากเป็นสารที่ไม่เป็นอันตราย เมื่อได้สารละลายพอลิเมอร์ที่ต้องการแล้ว เซตอุปกรณ์ต่างๆในระบบหมุนปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ดังนี้

1. อัตราการไหลของสารละลาย 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 26 กิโลโวลต์
3. ระยะห่างระหว่างเข็มถึงฉากรับ 10 เซนติเมตร
4. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส
5. ใช้เวลาในการหมุนปั่นเส้นใย 8 ชั่วโมง

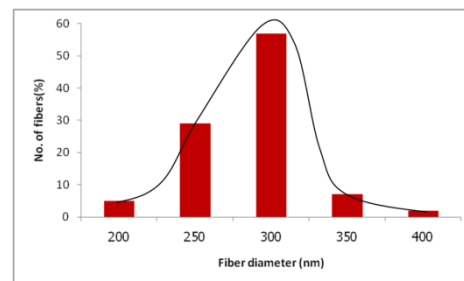
จากนั้น นำตัวอย่างที่ได้ไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) พบว่าเกิดเส้นใยขึ้นบนฉากรับ ดังภาพที่ 4 แล้วนำรูปที่ได้ไปหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายเส้นใยนาโนพอลิเมอร์จากกล้องจุลทรรศน์ SEM

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์

Fiber diameter (nm)	No. of fibers (%)
200	5.00
250	29.00
300	57.00
350	7.00
400	2.00



เมื่อใช้ไมโครมิเตอร์วัดความหนาของแผ่นเส้นใยทั้งหมด 10 จุด พบว่ามีความหนาอยู่ในช่วง 71.55 ± 6.78 ไมโครเมตร และจะเห็นว่าเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ผิวเรียบและไม่ปรากฏเม็ดบีดส์ผสมอยู่ในเส้นใย แสดงว่าพารามิเตอร์เชิงสารละลาย พารามิเตอร์เชิงการทดลอง และพารามิเตอร์เชิงสิ่งแวดล้อมที่ใช้มีความเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 3 การบำบัดเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ด้วยพลาสมาของอากาศและตรวจสอบคุณสมบัติ

นำเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ได้ไปบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ ดังภาพที่ 5 ซึ่งจะดำเนินการในระบบสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Plasma cleaner ยี่ห้อ HARRICK PLASMA รุ่น PDC-32G (115V)



ภาพที่ 5 การนำแผ่นเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ใส่ใน chamber เพื่อบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ

ขั้นตอนการบำบัดพลาสมาของอากาศโดยใช้เครื่อง Plasma cleaner ยี่ห้อ HARRICK PLASMA รุ่น DC-32G เริ่มจากการเช็ดทำความสะอาดภายใน chamber ที่ใช้ใส่ตัวอย่าง จากนั้นใส่ตัวอย่างซึ่งเป็นแผ่นเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ขนาดกว้าง 2.5 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว เข้าไปใน chamber ดังภาพที่ 5 ปิดฝาให้สนิทแล้วเปิด vacuum pump เพื่อให้ภายในเป็นสุญญากาศ รอจนหน้าจอแสดงผลความดันลดลงถึง 220 Torr ค่อย ๆ เปิดวาล์วเพื่อปล่อยอากาศจากถังแก๊สเข้าสู่ chamber จากนั้นปิดวาล์วของเครื่องพลาสมาเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ในระบบปิด แล้วเปิดสวิทช์เครื่องเพื่อทำให้อากาศภายในแตกตัวเป็นพลาสมา ใช้เวลาในการบำบัดแผ่นเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ตัวอย่างละ 1 นาที และ 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การวัดและเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ถูกบำบัดและไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ

4.1 วัดความหนาของแผ่นเส้นใย

ในแต่ละรอบของการผลิตเส้นใย จะแบ่งแผ่นเส้นใยออกเป็น 3 แผ่นย่อย แผ่นที่ 1 ไม่ผ่านการ บำบัดเส้นใย แผ่นที่ 2 นำไปบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศเป็นเวลา 1 นาที และแผ่นที่ 3 นำไปบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศเป็นเวลา 3 นาที นำแต่ละแผ่นมาวัดความหนาของแผ่นเส้นใยด้วยไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียด 10 ไมโครเมตร จำนวน 5 จุดต่อ 1 แผ่น ทำการทดลองเช่นนี้ 3 ครั้ง

4.2 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ด้วยกำลังขยาย 3 ระดับ ได้แก่ 10,000 เท่า 50,000 เท่า และ 100,000 เท่า ต่อ 1 ตัวอย่าง แล้วนำภาพที่ได้มาหาค่าการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

4.3 วัดขนาดรูพรุน

ขนาดรูพรุนในงานวิจัยนี้ หมายถึงขนาดของช่องว่างระหว่างเส้นใยพอลิเมอร์ที่ไขว้ซ้อนทับกันจนเป็นแผ่น สามารถหาขนาดของรูพรุนได้จากการนำแผ่นเส้นใย PVA ไปประกอบเข้ากับ Holder ของตัวกรอง เพื่อใช้กรอง สารแขวนลอยพอลิสไตรีน เช่นเดียวกับงานวิจัยของชลดา ชลดา สุวรรณบุรณ์ และคณะ (2561) เจือจางสารแขวนลอย 1 % จาก stock ให้ได้สารแขวนลอยปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำสารแขวนลอยที่ผ่านการกรองแล้วไปหาขนาดอนุภาคพอลิสไตรีนที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Nanosizer) แผ่นเส้นใยแต่ละตัวอย่าง ทำการทดลอง 3 ครั้ง ค่าขนาดของรูพรุนหาได้จากขนาดของอนุภาคที่เริ่มไม่พบในสารแขวนลอย

4.4 ความพรุน

ตัดแผ่นเส้นใยนาโน PVA ให้มีขนาด 2×2 ตารางเซนติเมตร นำแผ่นเส้นใยมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง และวัดความหนาของแผ่นเส้นใยด้วยไมโครมิเตอร์ จำนวน 5 ตำแหน่ง จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏ (ρ_{mat}) ดังสมการ

$$\rho_{mat} = \frac{\text{น้ำหนักแผ่นเส้นใยนาโน (กรัม)}}{\text{พื้นที่ (เซนติเมตร}^2\text{)} \times \text{ความหนา (เซนติเมตร)}}$$

นำค่า ρ_{mat} ที่ได้มาคำนวณหาความพรุน โดยที่ ρ_{powder} คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์ PVA และ ρ_{mat} เป็นความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) ของแผ่นเส้นใยนาโน

$$\text{porosity}(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{mat}}{\rho_{powder}} \right) \times 100$$

4.5 ความชอบน้ำ

ศึกษาความสามารถในการเปียกน้ำหรือคุณสมบัติการชอบน้ำ โดยการวัดมุมสัมผัสของน้ำกับเยื่อบาง (Contact angle) ด้วยเครื่อง contact angle meter เมื่อหยดน้ำอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยโดยไม่เกิดการแพร่ หยดน้ำจะทำมุมกับพื้นผิวของเส้นใยซึ่งเรียกว่ามุมสัมผัส ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างผิวของเหลวกับผิวของของแข็ง มุมสัมผัสที่สมดุลจะเป็นตัววัดความสามารถในการเปียกของเส้นใยโดยของเหลว มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 0 - 180 องศา

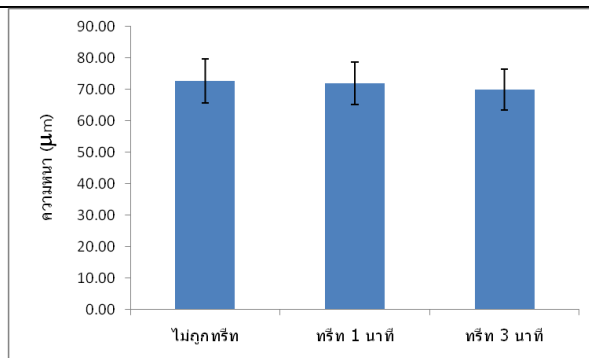
ผลการวิจัย

ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ถูกบำบัดและไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา มีดังนี้

1. ความหนาของแผ่นเส้นใย

ตารางที่ 2 ความหนาของแผ่นเส้นใย PVA ที่ถูกบำบัดและไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ

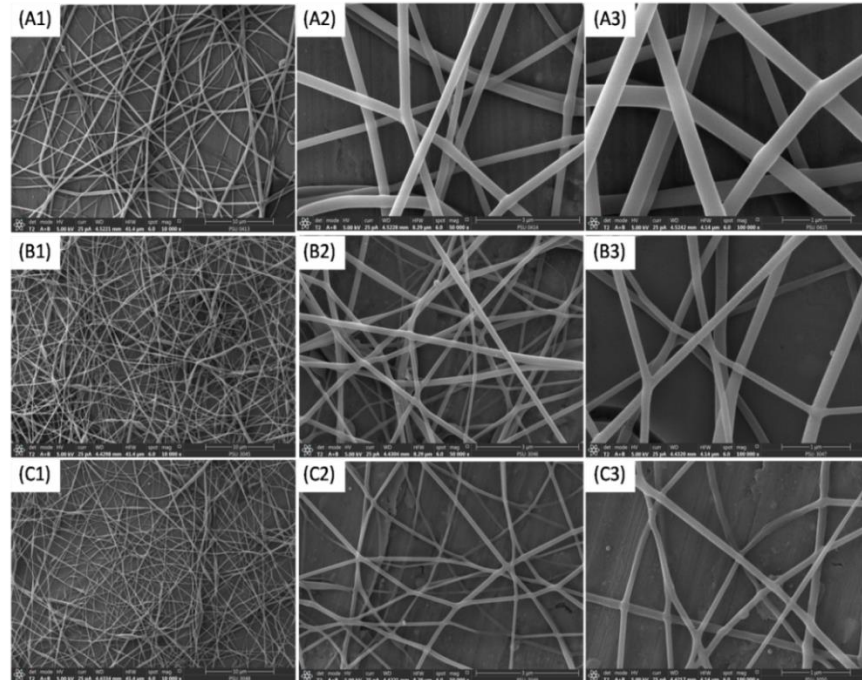
ครั้งที่	จุดวัดที่	ความหนา (ไมโครเมตร)		
		ไม่ถูกบำบัด	บำบัด 1 นาที	บำบัด 3 นาที
1	1	70	70	60
	2	80	80	70
	3	80	70	80
	4	70	70	70
	5	80	80	70
2	1	70	60	80
	2	60	80	70
	3	70	70	70
	4	80	70	70
	5	70	60	60
3	1	80	80	60
	2	80	70	70
	3	70	70	80
	4	60	70	70
	5	70	80	70
ความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร)		72.67	72.00	70.00
SD		7.04	6.76	6.55



ภาพที่ 6 แผนภูมิแท่งแสดงความหนาของแผ่นเส้นใย PVA

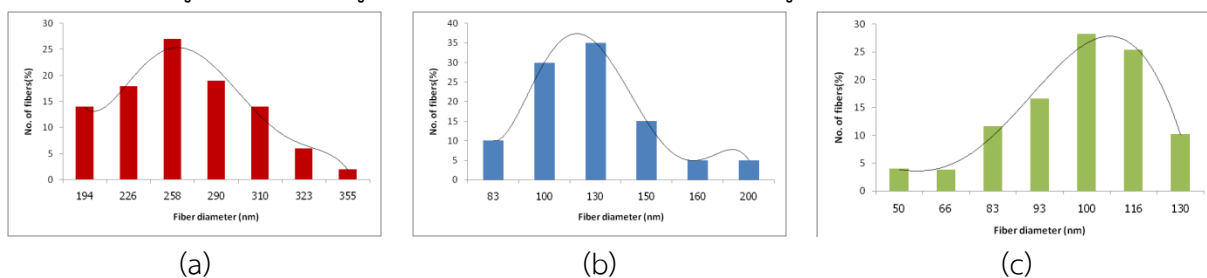
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ผลจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า 50,000 เท่า และ 100,000 เท่า พบว่า เส้นใยนาโนพอลิเมอร์ มีลักษณะสัณฐานและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะสัณฐาน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย PVA โดยที่ (A1), (A2), (A3) คือ เส้นใย PVA ที่ไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา กำลังขยาย 10,000 50,000 และ 100,000 เท่า ตามลำดับ (B1), (B2), (B3) คือ เส้นใย PVA ที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ 1 นาที กำลังขยาย 10,000 50,000 และ 100,000 เท่า ตามลำดับ และ (C1), (C2), (C3) คือ เส้นใย PVA ที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ 3 นาที กำลังขยาย 10,000 50,000 และ 100,000 เท่า ตามลำดับ

นำภาพถ่าย SEM ที่ได้ มาหาการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแต่ละตัวอย่าง เพื่อที่จะทราบผลของพลาสมาที่มีต่อขนาดเส้นใย PVA ทราบช่วงของการกระจายตัวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่ถูกบำบัดและไม่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (a) ไม่ผ่านการบำบัด (b) บำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ นาน 1 นาที (c) บำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ นาน 3 นาที

สามารถคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมา ได้ 262.48 ± 42 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA ที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศ นาน 1 นาที มีขนาด 124.30 ± 50 นาโนเมตร และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA ที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศนาน 3 นาที มีขนาด 100.68 ± 45 นาโนเมตร

3. ขนาดรูพรุน

เมื่อนำแผ่นเส้นใยไปกรองอนุภาคแขวนลอยของพอลิสไตรีน แล้วนำสารแขวนลอยที่ผ่านการกรองแล้วไปหาขนาดอนุภาคพอลิสไตรีนที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Nanosizer) แผ่นเส้นใยแต่ละตัวอย่าง ทำการทดลอง 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดรูพรุนของเส้นใยนาโน PVA

ตัวอย่าง	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)
แผ่นเส้นใยที่ไม่ถูกบำบัด	580 ± 20
แผ่นเส้นใยที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา 1 นาที	702 ± 11
แผ่นเส้นใยที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา 3 นาที	751 ± 17

4. ความพรุน

การหาความพรุนของแผ่นเส้นใยนาโน PVA จะต้องทราบความหนาแน่นของแผ่นเส้นใยเสียก่อน โดยความหนาแน่นของแผ่นเส้นใย (ρ_{mat}) สามารถคำนวณได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 น้ำหนักเฉลี่ย พื้นที่ ความหนาเฉลี่ย และความหนาแน่นเฉลี่ยของแผ่นเส้นใย PVA

ตัวอย่าง	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)	พื้นที่ (ซม. ²)	ความหนาเฉลี่ยของแผ่นเส้น ใย (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น ρ_{mat} (กรัม/ซม. ³)
แผ่นเส้นใยที่ไม่ถูกบำบัด	0.0057	4	72.67 ± 7.04	0.196
ถูกบำบัดด้วยพลาสมา 1 นาที	0.0050	4	72.00 ± 6.67	0.175
ถูกบำบัดด้วยพลาสมา 3 นาที	0.0039	4	70.00 ± 6.55	0.140

เมื่อทราบความหนาแน่นของแผ่นเส้นใยแล้ว สามารถคำนวณหาค่าความพรุนของแผ่นเส้นใยได้จากสมการ

$$\text{porosity}(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{mat}}{\rho_{powder}} \right) \times 100$$

เมื่อ ρ_{powder} คือ ความหนาแน่นของ PVA ที่เป็นของแข็ง มีค่าเท่ากับ 0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 5 ความพรุนของแผ่นเส้นใย PVA

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น ρ_{mat} (กรัม/ซม ³)	ความพรุน (%)
แผ่นเส้นใยที่ไม่ถูกบำบัด	0.196	72
แผ่นเส้นใยที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา 1 นาที	0.175	75
แผ่นเส้นใยที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา 3 นาที	0.140	80

5. ความชอบน้ำ

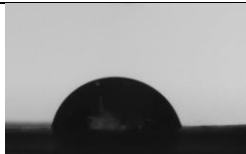
ศึกษาคุณสมบัติความชอบน้ำ โดยทำการวัดตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างทำการวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) 5 จุด ได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 มุมสัมผัสของน้ำกับเส้นใยนาโน PVA

ตัวอย่าง	ครั้งที่	มุมสัมผัส (°)					เฉลี่ย (°)	SD
ไม่ถูกบำบัด	1	72.985	74.995	71.020	72.783	71.910	72.739	1.483
	2	73.820	74.265	77.778	75.176	77.835	75.775	1.918
	3	72.621	75.265	73.578	75.176	74.925	74.313	1.165
บำบัด 1 นาที	1	21.426	20.972	20.769	20.367	20.829	20.873	0.382
	2	21.026	21.809	23.905	19.062	20.569	21.274	1.779
	3	20.769	20.367	21.026	21.809	23.905	21.575	1.405
บำบัด 3 นาที	1	16.552	18.421	19.602	21.873	19.761	19.242	1.951
	2	23.302	22.535	19.096	17.962	20.723	20.724	2.248
	3	18.421	19.602	22.745	19.116	17.982	19.573	1.879

ค่ามุมสัมผัสระหว่างแผ่นเส้นใยกับน้ำ (Water contact angle) บ่งบอกถึงความสามารถในการเปียกของแผ่นเส้นใย เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นเส้นใย ถ้าน้ำทำมุม 0° กับแผ่นเส้นใย นั่นคือการเปียกสมบูรณ์หรือแผ่นเส้นใยมีความชอบน้ำยิ่งยวด ถ้ามุมสัมผัสของน้ำมีค่ามากกว่า 0° - 30° เรียกว่าแผ่นเส้นใยมีการเปียก เมื่อมุมสัมผัสระหว่าง 30° - 89° เรียกว่า เปียกเป็นบางส่วน (partially wetting) และเมื่อมีมุมสัมผัสมากกว่าหรือเท่ากับ 90° เรียกว่า ไม่เปียก (non wetting) หรือมีความไม่ชอบน้ำ

ตารางที่ 7 ความสามารถในการเปียกน้ำของแผ่นเส้นใย

ตัวอย่าง	มุมสัมผัสเฉื่อย(°)	ความสามารถในการเปียก	ภาพถ่าย
ไม่ถูกบำบัด	74.276	เปียกบางส่วน	
บำบัด 1 นาที	21.241	เปียก	
บำบัด 3 นาที	19.846	เปียก	

อภิปรายผล

จากการทดสอบระบบหมุนปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่อนข้างเล็กอยู่ที่ประมาณ 125 นาโนเมตร ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการเส้นใยขนาดเล็กมากๆ เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น การประยุกต์ใช้งานทางด้านไบโอเซนเซอร์ การนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการนำมาทำเป็นโครงเลี้ยงเซลล์ (Sharma & James, (2022) Electrospinning: The Technique and Applications. *Recent* 2022)

ความหนาเฉลี่ยของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมา มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่า ความหนาของแผ่นเส้นใยไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่า เวลาที่ใช้ในการบำบัดพลาสมาไม่มีผลต่อความหนาของแผ่นเส้นใย อาจเนื่องมาจากแผ่นเส้นใยที่เตรียมขึ้นมีความบางมาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลในภาพรวมพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเส้นใยทั้งแผ่นได้ อีกทั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงเนื่องจากการบำบัดพลาสมานั้น ไปทำให้ขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยกว้างขึ้น

สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเส้นใยนาโน PVA ที่เตรียมขึ้นจากระบบหมุนปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยที่ไม่ถูกบำบัด กับเส้นใยที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศนาน 1 นาที

และ 3 นาที นั้น สามารถสรุปผลเป็นข้อๆ ดังนี้ 1) ความหนาของแผ่นเส้นใยทุกๆตัวอย่าง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาอยู่ที่ 71.55 ± 6.78 ไมโครเมตร 2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยจะมีค่าลดลง เมื่อใช้เวลาในการบำบัดด้วยพลาสมานานขึ้น 3) ขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยจะกว้างขึ้นเมื่อใช้เวลาในการบำบัดด้วยพลาสมานานขึ้น เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลง ทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นใยแต่ละเส้นมากขึ้น เป็นเหตุให้ขนาดรูพรุนกว้างขึ้น 4) ความพรุนของแผ่นเส้นใย แปรตามขนาดของรูพรุน ดังนั้นเมื่อใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ทำให้รูพรุนกว้างขึ้น ความพรุนจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย 5) ความชอบน้ำและความสามารถในการเปียกของแผ่นเส้นใยที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาของอากาศเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้รับการบำบัด และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้บำบัด สามารถสังเกตได้จากค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยที่มีค่าลดลงจาก 74.276 องศา เป็น 21.241 องศา และ 19.846 องศา ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อที่จะศึกษาหลักการการทำงาน และเงื่อนไขต่างๆของระบบหมუნปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต แต่หากจะนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์ ยังต้องปรับปรุงเพื่อพัฒนาให้ใช้ได้ในสเกลที่ใหญ่ขึ้น ผลิตเส้นใยได้ครั้งละมากขึ้น
2. เนื่องจากต้องทำการทดลองกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ดังนั้น ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในขณะที่ปฏิบัติงานอย่างมาก เช่น ตรวจสอบระบบไฟฟ้าในอาคารที่ทำการทดลอง ตรวจสอบสายดินว่าอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานหรือไม่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา รองคณบดีคณะคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และคุณสัตยา บุญรัตนชู วิศวกรชำนาญการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่สละเวลาในการให้คำแนะนำปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณต ถาวรังกูร และรองศาสตราจารย์ ดร. จงดี บุรณชัย ที่ปรึกษาและผู้อำนวยการศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านการวิเคราะห์สารปริมาณน้อยและไบโอเซนเซอร์ (Center of Excellence for Trace Analysis and Biosensor : TAB-CoE) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องพลาสมาคลีนเนอร์

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ ในการให้ใช้สถานที่ทำวิจัย และขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้คำแนะนำทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาชิ้นงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ขอบคุณทุกท่านที่ให้ความสนใจจากครอบครัวที่คอยสนับสนุนการทำงานในทุกๆเรื่อง และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยในครั้งนี้

รายการอ้างอิง

- ชลดา สุวรรณบุรณ์, นพวรรณ ชนัญพานิช และ กนกวรรณ กิตตินิยม. (2561) แผ่นกรองด้านแบบที่เรียวจากพื้นเส้นใยนาโนผสมระหว่างพอลิไวนิลลิติกฟลูออไรด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 28(4), 881 – 891.
- อัจฉราภรณ์ บุญมา. (2556). *อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Asadian, M., Chan, K. V., Norouzi, M., Grande, S., Cools, P., Morent, R., & Geyter, N.D. (2020). Fabrication and Plasma Modification of Nanofibrous Tissue Engineering Scaffolds. *Nanomaterials*. 10, 119.
- Dufay, A., Jimenez, M., & Degoutin, S. (2020). Effect of Cold Plasma Treatment on Electrospun Nanofibers Properties: A Review. *ACS Applied Bio Materials*. 3(8), 4696 - 5454.
- Islam, Md. S., Ang, B. C., Andriyana, A., & Afifi, A. M. (2019). A review on fabrication of nanofibers via electrospinning and their applications. *SN Applied Sciences*. 1, 1248.
- Langwald, S.V., Ehrmann, A., & Sabantina, L. (2023). Review: Measuring Physical Properties of Electrospun Nanofiber Mats for Different Biomedical Applications. *Membranes*. 13, 488.
- Mekuye, B., & Abera, B. (2023). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization and applications. *Nano Select*. 4(8), 463 – 524.
- Sharma, G. K., & James, N. R. (2022). Electrospinning: The Technique and Applications. *Recent Developments in Nanofibers Research*. DOI: 10.5772/intechopen.105804