

บทความวิจัย (Research Article)

การขึ้นรูปและการวิเคราะห์ลักษณะของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบ
มะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

Fabrication and Characterization of Electrospun Polyvinyl Alcohol Fiber Mats
Containing *Phyllanthus emblica* Crude Extract

ณัฐนรี เจอะอาลี¹ ธนพงษ์ เชื้อฉุน^{1*} เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์¹ และ ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ²

Natnaree Chealee¹, Thanapong Chuechun^{1*}, Pianguetai Boonprasith¹ and Tippavan Hongkachern²

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

¹Department of Medical Science, Faculty of Allied Health Sciences, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

²Department of Physics, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

*Corresponding author; email: thanapong.ch@bsru.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)

15 พฤษภาคม 2569

วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)

13 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)

13 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงแบบแกนหมุน พร้อมทั้งตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย องค์ประกอบทางเคมี และสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยผสมสารสกัด การทดลองเริ่มจากการสกัดสารสำคัญจากผลมะขามป้อมด้วยเอทานอลความเข้มข้น 95% จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มาผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ผลการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่ละลายในสารละลาย 5% DMSO สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* และ *Streptococcus sobrinus* ได้เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัดอย่างน้อย 30% (w/v) และขนาดโซนยับยั้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของสารสกัด แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% (w/w) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้อย่างชัดเจน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* เท่ากับ 12.52 ± 0.62 มิลลิเมตร และ *S. sobrinus* เท่ากับ 11.87 ± 0.41 มิลลิเมตร สเปกตรัม FTIR แสดงพิกของหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับองค์ประกอบของสารแทนนินที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและบ่งชี้ถึงการเกิดอันตรกิริยาผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบพอลิฟีนอลในสารสกัดกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ส่งผลให้สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีการเชื่อมต่อกันบริเวณจุดสัมผัสระหว่างเส้นใยและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.58 ± 0.50 μm ซึ่งสูงกว่าเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.53 ± 0.08 μm แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงแสดงสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก และมีศักยภาพในการนำไปต่อยอดเป็นนวัตกรรมวัสดุทางการแพทย์ฐานชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมสุขภาพและการดูแลสุขภาพช่องปากในอนาคต

คำสำคัญ: พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, มะขามป้อม, อิเล็กโตรสปินนิง, ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย, เชื้อก่อโรคในช่องปาก

Abstract

This research investigated the fabrication of polyvinyl alcohol (PVA) electrospun fiber mats incorporated with *Phyllanthus emblica* crude extract using the rotary electrospinning technique. The antibacterial activity, chemical composition, and morphology of the extract-loaded fiber mats were evaluated. The experiment began with the extraction of bioactive compounds from *Phyllanthus emblica* fruits using 95% ethanol, followed by blending the obtained extract with a PVA solution and fabricating the mixture into fiber mats via electrospinning. The results demonstrated that the *Phyllanthus emblica* crude extract dissolved in 5% DMSO solution exhibited antibacterial activity against *Streptococcus mutans* and *Streptococcus sobrinus* at extract concentrations of at least 30% (w/v), with the inhibition zone diameters increasing slightly with increasing extract concentration. The PVA fiber mat containing 40% (w/w) *Phyllanthus emblica* crude extract exhibited clear antibacterial activity, with mean inhibition zone diameters of 12.52 ± 0.62 mm against *S. mutans* and 11.87 ± 0.41 mm against *S. sobrinus*. FTIR spectra showed peaks corresponding to functional groups associated with tannins exhibiting antibacterial activity and indicated hydrogen-bonding interactions between the polyphenolic compounds in the extract and PVA. These interactions were associated with morphological changes in the extract-loaded PVA fibers, including interconnections at fiber contact points and an increase in the average fiber diameter to 1.58 ± 0.50 μ m, compared with 0.53 ± 0.08 μ m for pure PVA fibers. The PVA fiber mats incorporated with *Phyllanthus emblica* crude extract exhibited antibacterial activity against oral pathogens and have potential for further development as innovative bio-based medical materials for future healthcare and oral care applications.

Keywords: Polyvinyl alcohol, *Phyllanthus emblica*, Electrospinning, Antibacterial activity, Oral pathogens

บทนำ

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรือเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง (Electrospinning) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงนาโนเมตร [1, 2] โดยอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูงในการเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายหรือพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้เกิดการยืดตัวเป็นเส้นใยต่อเนื่องและเคลื่อนที่ไปยังตัวรองรับ ขณะที่ตัวทำละลายระเหยออกระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ [3] เส้นใยที่ได้มีลักษณะเด่นคือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและมีความพรุนสูง [4] ซึ่งเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ [5, 6] การชักนำการสร้างกระดูก [7] วัสดุปิดแผล [8, 9] ระบบนำส่งยา [6] การกรอง [10] และไบโอเซนเซอร์ [11] และในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาระบบอิเล็กโทรสปินนิงแบบหมุน (Rotary electrospinning) เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตเส้นใยนาโนให้มากกว่าระบบเข็มเดี่ยว (Single-needle electrospinning) อีกทั้งยังลดปัญหาการอุดตันของหัวปั่นและเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต [12] จึงมีศักยภาพต่อการขยายระดับการผลิตสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและทางชีวการแพทย์ ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงในการผลิตเส้นใยที่มีสัณฐานวิทยาสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งสมบัติของสารละลาย เช่น ความหนืด สภาพนำไฟฟ้า และแรงตึงผิว ตลอดจนพารามิเตอร์ของกระบวนการ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ระยะห่างระหว่างหัวปั่นกับตัวรองรับ อัตราการไหลของสารละลาย และความเร็วรอบของตัวรองรับหรือหัวปั่น ในระบบอิเล็กโทรสปินนิงแบบหมุน ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสม่ำเสมอ และการเกิดเม็ดป๊อ (Bead formation) ของเส้นใย ดังนั้น การควบคุมพารามิเตอร์การปั่นอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการผลิตแผ่นเส้นใยที่มีคุณภาพและมีสมบัติเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ [3, 13]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตเส้นใยนาโน เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ และละลายน้ำได้ดี อีกทั้งยังมีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] นอกจากนี้ PVA ยังสามารถผสมร่วมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้หลากหลายชนิด โดยยังคงคุณสมบัติในการสร้างเส้นใยที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สามารถปรับปรุงสมบัติด้านชีวภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้านได้ [15] พอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ยังมีข้อจำกัดด้านฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะการต้านเชื้อจุลินทรีย์และการส่งเสริมการยึดเกาะของเซลล์ ทำให้มีการพัฒนาโดยการผสมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน [16] และเจลาติน [17] หรือการเติมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเติมสารออกฤทธิ์หลากหลายชนิดลงในเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทั้งในรูปของสารอนินทรีย์และสารสกัดจากพืช เช่น อนุภาคเงิน (Silver nanoparticles; AgNPs) [18] สารสกัดจากว่านหางจระเข้ (*Aloe vera*) [19] หนุ่ป็นนัส (*Bidens pilosa*) [20] ผลมะระขี้นก (*Bitter melon*) [21] และใบตำลึง (*Coccinia grandis*) [22] ซึ่งล้วนมีรายงานว่าสามารถเพิ่มสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นใยได้ แต่ระดับประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันตามชนิดของสารออกฤทธิ์ ความสามารถในการกระจายตัวภายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ และการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างเส้นใย

ประสิทธิภาพของสารเติมแต่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสาร ตลอดจนความเข้ากันได้กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ อนุภาคเงินแม้มีประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์สูง แต่มีข้อจำกัดด้านความเป็นพิษต่อเซลล์เมื่อใช้ในความเข้มข้นสูง [23] ขณะที่สารสกัดจากพืชทั่วไปมีข้อจำกัดด้านความคงตัวของสารออกฤทธิ์และความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งที่มาของพืช [24] ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนสำหรับวัสดุปิดแผลและการสมานแผล ขณะที่การประยุกต์ใช้เพื่อยับยั้งเชื้อก่อโรคในช่องปาก โดยเฉพาะ *Streptococcus mutans* และ *Streptococcus sobrinus* ซึ่งเป็นเชื้อสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟันผุจากการสร้างไบオフィล์มบนผิวฟัน เป็นอีกแนวทางที่มีความน่าสนใจสำหรับการพัฒนาวัสดุเพื่อการดูแลสุขภาพช่องปาก แม้จะมีการใช้สารต้านจุลชีพสังเคราะห์ เช่น คลอร์เฮกซิดีน (Chlorhexidine) ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อก่อโรคในช่องปาก แต่มี

ฤทธิ์ต้านจุลชีพแบบไม่จำเพาะ ส่งผลกระทบต่อทั้งเชื้อก่อโรคและจุลชีพประจำถิ่นในช่องปาก อีกทั้งการใช้ต่อเนื่องอาจก่อให้เกิดผลข้างเคียง เช่น การเปลี่ยนสีของฟัน ความผิดปกติของการรับรส และอาการไม่พึงประสงค์อื่น ๆ [25] ข้อจำกัดดังกล่าวจึงเป็นแรงผลักดันให้มีการค้นหาสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบเส้นใยนาโนที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

มะขามป้อม (*Phyllanthus emblica*) เป็นพืชสมุนไพรที่ได้รับความนิยมและมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางอย่างแพร่หลาย โดยอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด โดยเฉพาะสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ เช่น กรดแกลลิก รวมถึงวิตามินซี (กรดแอสคอร์บิก) และฟลาโวนอยด์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ [26, 27] สารประกอบฟีนอลิกเหล่านี้สามารถออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียได้หลายกลไก ได้แก่ การรบกวนความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ การเพิ่มการรั่วไหลของสารภายในเซลล์ การยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึม และการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรีย ซึ่งล้วนเป็นกลไกสำคัญต่อการลดความสามารถในการก่อโรคของจุลินทรีย์ [28] นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่น ๆ เช่น แทนนิน อัลคาลอยด์ ไฟโตสเตอรอล เทอร์พีนอยด์ กรดอินทรีย์ และกรดอะมิโน ซึ่งล้วนมีบทบาทในการส่งเสริมสุขภาพและฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย [29] รายงานการศึกษาหลายฉบับยังแสดงให้เห็นว่าสารสกัดมะขามป้อมมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ รวมทั้งสามารถทำลายผนังเซลล์แบคทีเรียและยับยั้งการก่อตัวของไบโอฟิล์ม [30] สมบัติเหล่านี้บ่งชี้ถึงศักยภาพของมะขามป้อมในการนำไปใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในวัสดุทางชีวการแพทย์ โดยเฉพาะสำหรับการควบคุมจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อจำกัดของสารต้านจุลชีพสังเคราะห์และสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ มะขามป้อมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสารจากธรรมชาติ มีสารออกฤทธิ์หลายชนิดที่สามารถออกฤทธิ์ร่วมกัน และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารเติมแต่งในระบบเส้นใยนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้ทางทันตกรรมและการดูแลสุขภาพช่องปาก

จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีความสนใจในการสกัดสารสำคัญจากผลมะขามป้อมเพื่อศึกษาการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟันผุและการสร้างไบโอฟิล์มบนผิวฟัน รวมทั้งนำมาผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงแบบแกนหมุน และศึกษาผลของปริมาณสารสกัดต่อโครงสร้างทางเคมี สัณฐานวิทยาของเส้นใย และสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาวัสดุชีวภาพที่มีศักยภาพในการควบคุมเชื้อก่อโรคในช่องปาก และสามารถต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้ในวัสดุทางทันตกรรมหรือระบบนำส่งสารออกฤทธิ์เฉพาะที่ในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงแบบแกนหมุน
2. ศึกษาผลของสารสกัดต่อโครงสร้างทางเคมี สัณฐานวิทยาของเส้นใย และฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย *S. mutans* และ *S. sobrinus* ของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CO72PVA) ของบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, เอทานอล 95% (Food grade) ของบริษัท ออลเคมีคอลแอนด์ซัพพลาย จำกัด, ผลมะขามป้อมสด, ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) ของบริษัทวินเน็กซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด

2. การเตรียมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

นำผลมะขามป้อมสดมาล้างทำความสะอาดและหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 7 วัน แล้วบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร ผงมะขามป้อมที่ได้ถูกนำมาแช่ในสารละลายเอทานอล 95% ในอัตราส่วน 1:5 (w/v) พร้อมกวนผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบางร่วมกับกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่กรองได้ไประเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 42 °C

3. การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

เตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 14% (w/v) ในน้ำกลั่น โดยให้ความร้อนที่ 80 °C และกวนจนผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมสารสกัดหยาบมะขามป้อม ในอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์:สารสกัด เท่ากับ 100:0, 70:30 และ 60:40 (w/w) และผสมให้เข้ากันจนเป็นสารละลายเนื้อเดียว ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

4. การขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

การขึ้นรูปเส้นใยดำเนินการโดยใช้ชุดอุปกรณ์อิเล็กโตรสปินนิงแบบหมุน โดยนำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่เตรียมได้แล้วเทลงในอ่างพลาสติก จากนั้นใช้หัวปั่นที่ประกอบด้วยแท่งสแตนเลสจำนวน 12 แท่งติดตั้งรอบทรงกระบอกและเชื่อมต่อกับแกนกลาง ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า โดยระหว่างการทดลองใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง 25 kV และหมุนหัวปั่นด้วยความเร็ว 40 รอบต่อนาที โดยกำหนดระยะห่างระหว่างปลายแท่งสแตนเลสกับแผ่นรองรับอะลูมิเนียมฟอยล์เท่ากับ 15 ซม. เพื่อเหนี่ยวนำให้สารละลายพอลิเมอร์ยึดตัวเป็นเส้นใยและเก็บรวบรวมบนแผ่นรองรับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. การวิเคราะห์สมบัติของสารสกัดหยาบและแผ่นเส้นใย

ทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียด้วยวิธี agar disc diffusion โดยใช้เชื้อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* เพาะเลี้ยงบน Mueller Hinton Agar (MHA) ที่ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และปรับความเข้มข้นด้วยสารละลาย 0.85% NaCl (Normal saline) ให้เทียบเท่า McFarland No. 0.5 ($\approx 1.5 \times 10^8$ CFU/mL) จากนั้นเกลี่ยเชื้อให้ทั่วผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ สำหรับสารสกัดหยาบ เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบมะขามป้อมความเข้มข้น 10–60% (w/v) โดยใช้สารละลาย 5% DMSO เป็นตัวทำละลาย และปิเปตปริมาตร 5 μ L ลงบนแผ่นดิสก์ปลอดเชื้อ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.) ที่วางบนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อ พร้อมทั้งเตรียมแผ่นควบคุมลบ (DMSO) สำหรับแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด ตัดขึ้นตัวอย่างเป็นแผ่นดิสก์ขนาด 6 มม. และวางลงบนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อโดยตรง โดยจานเพาะเชื้อถูกบ่มที่ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดขนาดโซนยับยั้งการเจริญของเชื้อ (Zone of inhibition, ZOI)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ในโหมด attenuated total reflectance (ATR) ช่วงเลขคลื่น 550–4000 cm^{-1}

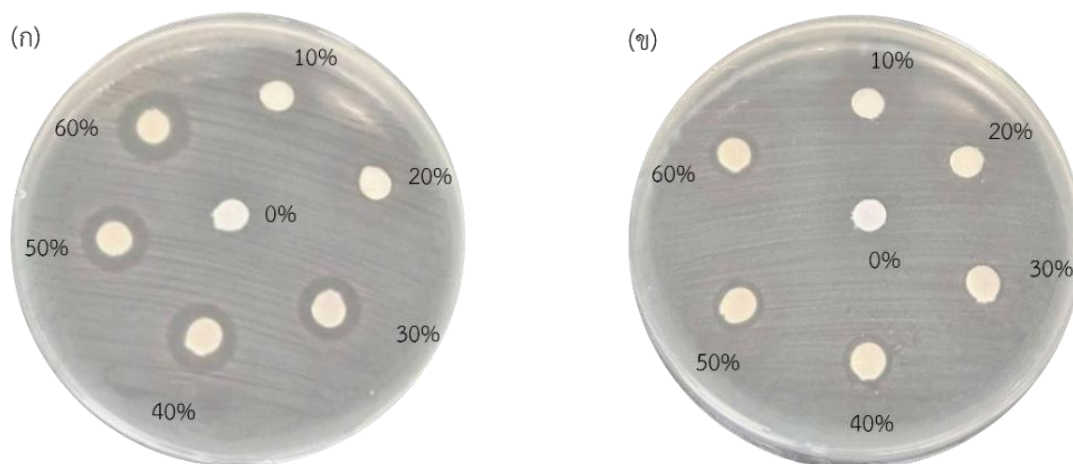
ศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาดประมาณ 10 $\times$ 10 มม. ติดตั้งบนแท่นวางตัวอย่าง และเคลือบทองคำก่อนการวิเคราะห์ภาพถ่ายถูกบันทึกที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และนำมาวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดหยาบมะขามป้อม

จากภาพที่ 1 พบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* ได้ตั้งแต่ความเข้มข้น 30% (w/v) ขึ้นไป โดยบริเวณโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีลักษณะใสรอบแผ่นดิสก์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่ามะขามป้อมอุดมด้วยสารประกอบฟีนอลิกและแทนนิน ซึ่งสามารถยับยั้งเชื้อในกลุ่ม *Streptococcus* ได้ผ่านหลายกลไกร่วมกัน ทั้งการลดการยึดเกาะของแบคทีเรียบนพื้นผิว การยับยั้งเอนไซม์ glucosyltransferase (GTF) ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารพอลิแซ็กคาไรด์นอกเซลล์ (Extracellular polysaccharides; EPS) อันเป็นองค์ประกอบสำคัญของไบโอฟิล์ม ตลอดจนการรบกวนความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้ความสามารถในการเจริญและการสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรียลดลง [28] เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่า 30% (w/v) พบว่าขนาดโซนยับยั้งเชื้อทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มเข้าสู่ระดับคงที่ ซึ่งบ่งชี้ว่าสารออกฤทธิ์ในสารสกัดมีปริมาณเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อได้ตั้งแต่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวแล้ว

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนยับยั้งเชื้อ พบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. mutans* ได้ดีกว่า *S. sobrinus* ดังแสดงในตารางที่ 1 ความแตกต่างนี้อาจเกี่ยวข้องกับความไวต่อสารประกอบฟีนอลิกที่ต่างกัน ความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์ม และการแสดงออกของปัจจัยก่อโรคที่แตกต่างกันระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิด แม้การศึกษาจะไม่ได้ประเมินกลไกดังกล่าวโดยตรง แต่ผลการทดลองก็แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดมะขามป้อมในการยับยั้งเชื้อก่อโรคในช่องปาก โดยเฉพาะ *S. mutans* ซึ่งเป็นเชื้อสำคัญที่มีบทบาทในการเริ่มต้นการเกิดโรคฟันผุ



ภาพที่ 1 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. mutans* (ก) และ *S. sobrinus* (ข)

ของสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่มีความเข้มข้น 10–60% (w/v) ในสารละลาย 5% DMSO

ตารางที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ยังเชื่อแบคทีเรีย *S. mutans* และ *S. sobrinus* ของสารสกัดหยาบมะขามป้อม

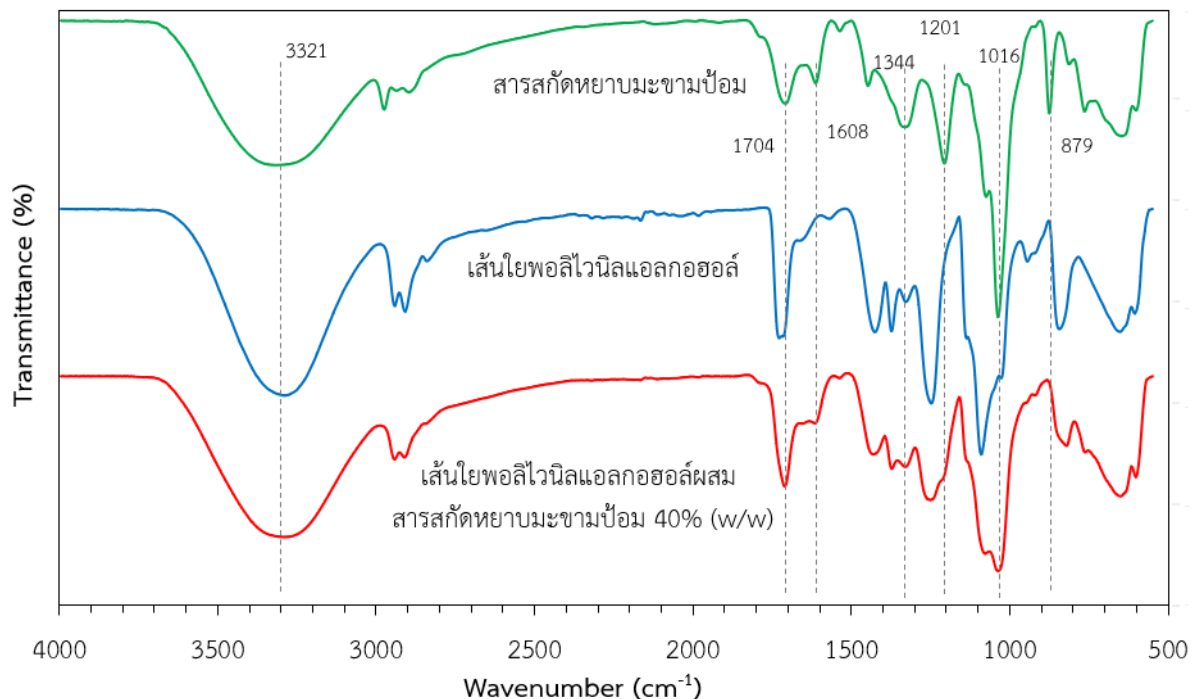
ปริมาณความเข้มข้นของสารสกัด % (w/v)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ยังเชื่อแบคทีเรีย	
	<i>S. mutans</i>	<i>S. sobrinus</i>
0	-	-
10	-	-
20	-	-
30	10.71±0.11	7.18±0.12
40	11.13±0.13	8.69±0.18
50	11.26±0.27	8.84±0.17
60	12.29±0.27	8.71±0.16

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดหยาบมะขามป้อมและแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด

การวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR ของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม (ภาพที่ 2) พบพิพการสั่นของหมู่ฟังก์ชันหลักได้แก่ O-H, C-H และ C-O ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารประกอบออกฤทธิ์ในสารสกัดมะขามป้อม เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารสกัดที่มีต่อเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าสเปกตรัมของสารสกัดหยาบมะขามป้อมแสดงพิกสำคัญที่เลขคลื่น 3321, 1704, 1608 และ 1344 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ O-H stretching, C=O stretching, C=C aromatic bending และ C-O-C stretching ตามลำดับ พิกการสั่นของ C-O stretching พบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1201 และ 1016 cm^{-1} และพิก C-C stretching พบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 879 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับสารประกอบกลุ่มพอลิฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แทนนิน และวิตามิน [31, 32] สำหรับเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบพิกที่ 3305 cm^{-1} (O-H stretching), 2902 cm^{-1} (C-H stretching), 1710 cm^{-1} (C=O stretching), 1242 cm^{-1} และ 1083 cm^{-1} (C-O stretching) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [16, 33]

ส่วนแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด พบพิกที่สอดคล้องกับทั้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารสกัด โดยเฉพาะช่วงเลขคลื่น 1610-1702, 1205-1269 และ 1037-1089 cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของสารสกัดในโครงสร้างเส้นใย และยังพบว่าพิก O-H stretching ที่ช่วงเลขคลื่น 3050-3600 cm^{-1} มีความกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดอันตรกิริยาผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะขามป้อม [34] อันตรกิริยาดังกล่าวอาจช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และสารสกัด ซึ่งอาจส่งผลต่อการกระจายตัวของสารสกัดภายในโครงสร้างเส้นใย และผลดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมสารสกัดหยาบ

การตรวจพบพิกของหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับสารประกอบฟีนอลิกและแทนนินในแผ่นเส้นใยผสมสารสกัด แสดงให้เห็นว่าสารออกฤทธิ์สำคัญจากสารสกัดมะขามป้อมยังสามารถตรวจพบได้ภายหลังผ่านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์หนึ่ง ผลสเปกตรัมที่ได้จึงช่วยสนับสนุนการคงอยู่ของสารสกัดภายในระบบเส้นใย ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้แผ่นเส้นใยมีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย

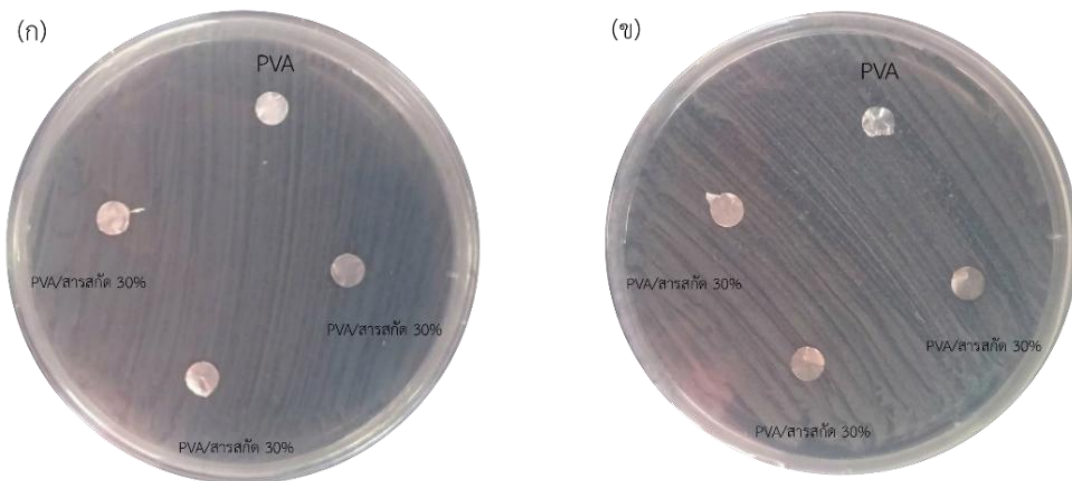


ภาพที่ 2 สเปกตรัม FTIR ของสารสกัดหยาบมะขามป้อมและแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด

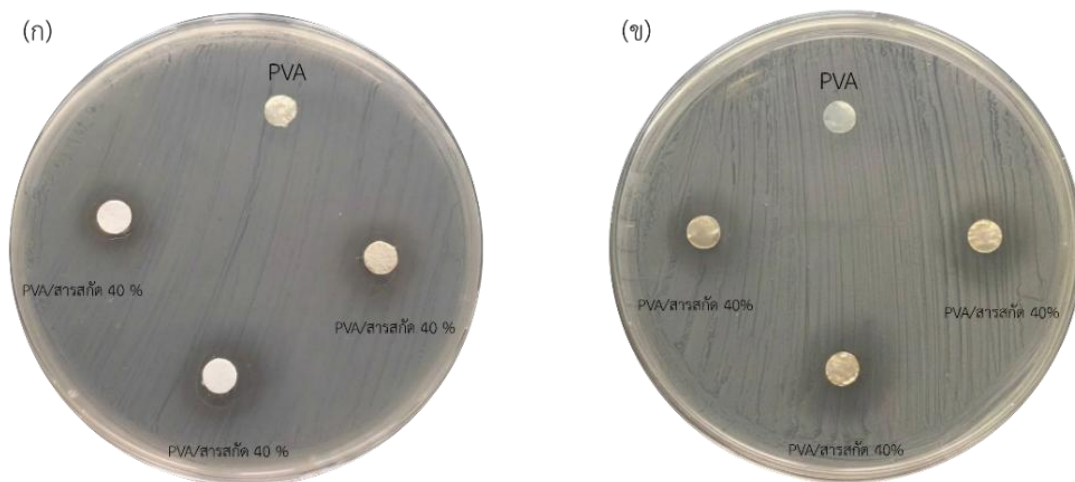
ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

จากการนำแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่ขึ้นรูปได้มาทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียต่อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* พบว่า แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด 30% (w/w) ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ (ภาพที่ 3) อาจเกิดจากปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างเส้นใยไม่เพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อ เมื่อเพิ่มปริมาณสารสกัดเป็น 40% (w/w) ทำให้สารออกฤทธิ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากแผ่นเส้นใยมีปริมาณเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อทั้งสองชนิด (ภาพที่ 4) ส่งผลให้เกิดโซนยับยั้งเชื้ออย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารสกัดที่เติมลงในเส้นใยเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย บริเวณโซนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีลักษณะเป็นสีเทาขอบแผ่นเส้นใย โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* เท่ากับ 12.52 ± 0.62 มิลลิเมตร และ *S. sobrinus* เท่ากับ 11.87 ± 0.41 มิลลิเมตร เมื่อสังเกตโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* มีลักษณะทั้งส่วนที่เป็นโซนใสรอบแผ่นเส้นใยและส่วนที่เป็นสีเทาขอบนอกโซนใส ลักษณะดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยและการแพร่ของสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างเส้นใยออกสู่บริเวณโดยรอบ จึงทำให้ความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ในบริเวณรอบแผ่นเส้นใยลดหลั่นตามระยะทางจากพื้นผิวเส้นใย โดยส่วนที่เป็นสีเทาอาจเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ต่ำกว่าบริเวณรอบแผ่นเส้นใย แต่ยังคงเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย ขณะที่บริเวณใกล้แผ่นเส้นใยอาจมีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์สูงกว่าจึงปรากฏเป็นโซนใส ส่วนการยับยั้งเชื้อ *S. sobrinus* พบบริเวณโซนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นสีเทา และพบโซนใสรอบแผ่นเส้นใยเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. mutans* ได้ดีกว่าเชื้อ *S. sobrinus* ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสารสกัดหยาบมะขามป้อมโดยตรง ซึ่งพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* มากกว่า *S. sobrinus* และบ่งชี้ว่าการนำสารสกัดมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยไม่ได้เปลี่ยนแปลงแนวโน้มการตอบสนองของแบคทีเรียทั้งสองชนิดต่อสารออกฤทธิ์ แม้ว่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อของแผ่นเส้นใยจะต่ำกว่าการใช้สารสกัดโดยตรง แต่การกักเก็บสารสกัดไว้ในโครงสร้างเส้นใยและการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ออกสู่บริเวณ

โดยรอบอาจเป็นข้อได้เปรียบสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ และแสดงถึงศักยภาพของแผ่นเส้นใยผสมสารสกัด
สำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุเพื่อการดูแลสุขภาพช่องปากในอนาคต



ภาพที่ 3 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 30% (w/w)
(ก) *S. mutans*, (ข) *S. sobrinus*



ภาพที่ 4 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% (w/w)
(ก) *S. mutans*, (ข) *S. sobrinus*

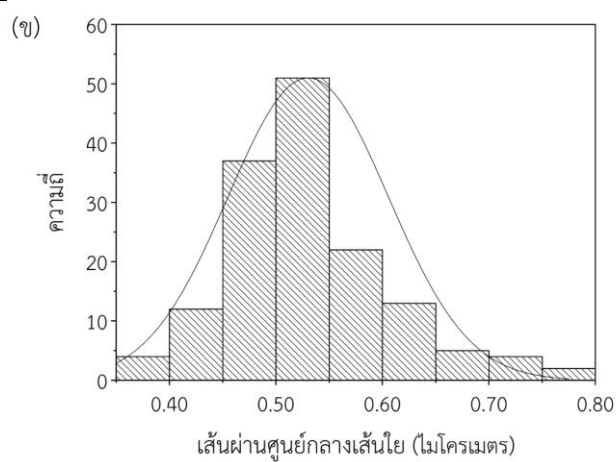
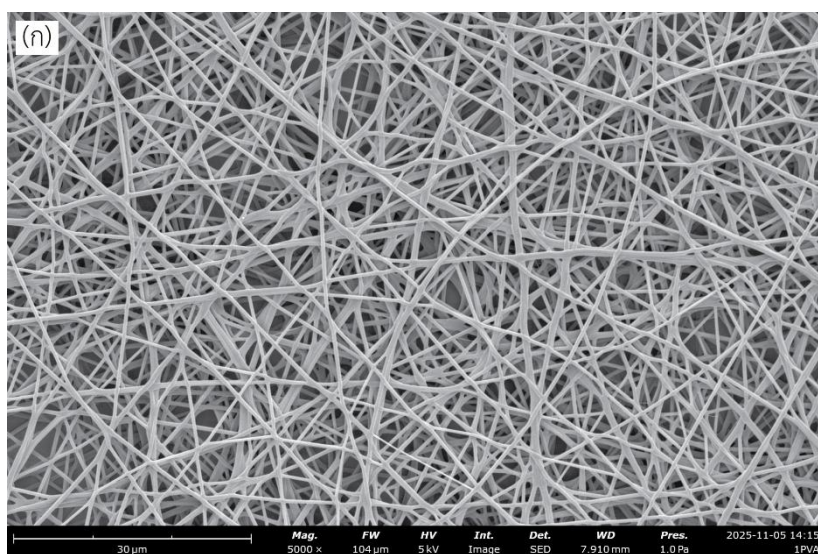
ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย

ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเส้นใยมีการเรียงตัวแบบสุ่มและซ้อนทับกันเป็นโครงข่ายสามมิติที่มีความพรุนสูง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเส้นใยที่ผลิตด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง [35] พื้นผิวของเส้นใยมีความเรียบสม่ำเสมอและไม่พบการเกิดเม็ดปิต ดังภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าสภาวะการเตรียมสารละลายและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอิเล็กโตรสปินนิงสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีพื้นผิวเรียบและไม่พบการเกิดเม็ดปิตได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่พบว่าการควบคุมสมบัติของสารละลายและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

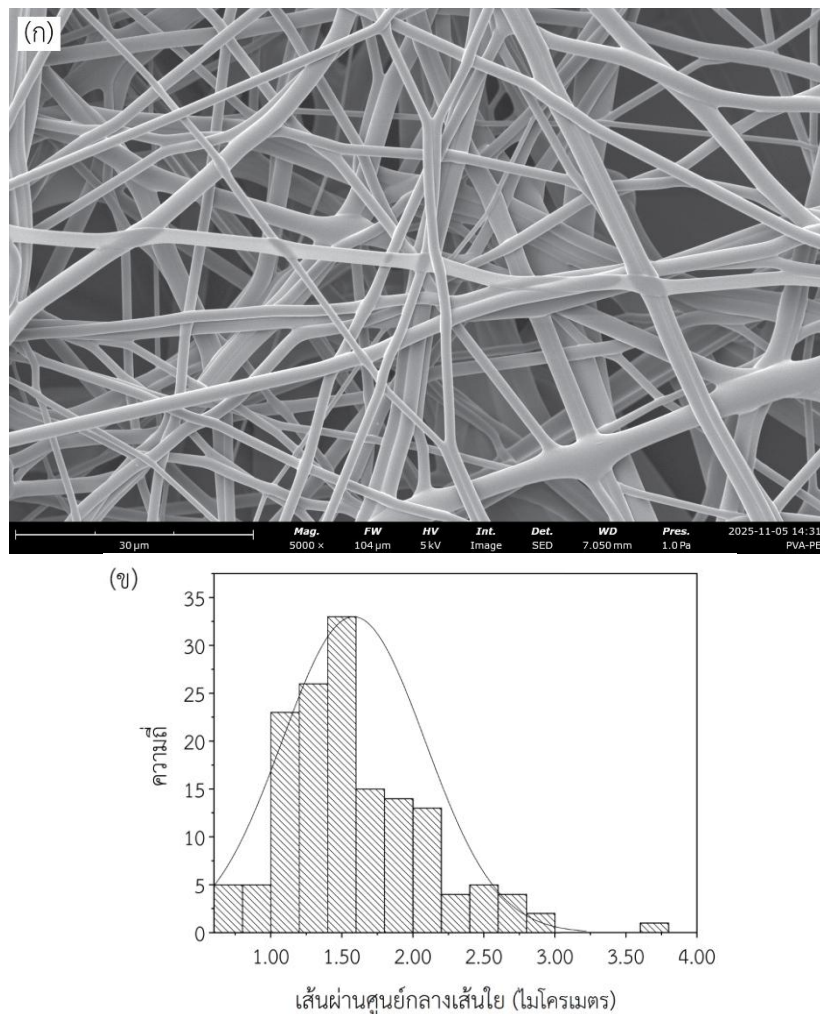
มีผลโดยตรงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและความสม่ำเสมอของเส้นใย [3, 13] ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ $0.53 \pm 0.08 \mu\text{m}$ และมีช่วงการกระจายตัวอยู่ระหว่าง $0.30\text{--}0.80 \mu\text{m}$ ซึ่งสะท้อนถึงความสม่ำเสมอของเส้นใยในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของขนาดเส้นใยอาจเกิดจากความไม่เสถียรของเจ็ทระหว่างกระบวนการปั่น เช่น การแกว่งตัวของเจ็ทและอัตราการระเหยของตัวทำละลาย [13]

ในขณะที่แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ $1.58 \pm 0.50 \mu\text{m}$ (ภาพที่ 6) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ประมาณ 3 เท่า พร้อมทั้งมีช่วงการกระจายตัวของขนาดเส้นใยกว้างขึ้นอยู่ระหว่าง $0.60\text{--}4.00 \mu\text{m}$ บ่งชี้ถึงความไม่สม่ำเสมอในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย การเพิ่มขึ้นของขนาดและช่วงการกระจายตัวของเส้นใยดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของสารละลายหลังการเติมสารสกัด โดยเฉพาะความหนืดและแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการยึดตัวของเจ็ทระหว่างการปั่นเส้นใย [14, 20] นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ FTIR ยังสอดคล้องกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะขามป้อมผ่านพันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาดังกล่าวอาจส่งผลให้โครงสร้างของสารละลายพอลิเมอร์มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงลดความสามารถในการยืดขยายตัวของเจ็ทระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยและนำไปสู่การเกิดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นรวมถึงเกิดการเชื่อมต่อกันที่จุดสัมผัสระหว่างเส้นใยมากขึ้น [34]

แม้ว่าการเติมสารสกัดหยาบมะขามป้อมจะส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นและมีความสม่ำเสมอลดลงเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ แต่โครงสร้างโดยรวมยังคงมีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติที่มีความพรุน และสามารถกักเก็บสารสกัดไว้ภายในโครงสร้างเส้นใย โดยสารออกฤทธิ์สามารถแพร่ออกสู่บริเวณโดยรอบได้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุนำส่งสารออกฤทธิ์สำหรับงานทางชีวการแพทย์



ภาพที่ 5 สัณฐานวิทยา (ก) และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ข)



ภาพที่ 6 สัณฐานวิทยา (ก) และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสม
สารสกัดหยาบ 40% (w/w) (ข)

สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ทำการสกัดสารสกัดหยาบมะขามป้อมและนำมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงแบบแกนหมุน ผลการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่ละลายในสารละลาย 5% DMSO สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก ได้แก่ *S. mutans* และ *S. sobrinus* ได้เมื่อมีความเข้มข้นตั้งแต่ 30% (w/v) ขึ้นไป ซึ่งสัมพันธ์กับการมีอยู่ของสารประกอบกลุ่มฟีนอลและแทนนินที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% (w/w) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโซนนับยังเชื้อ *S. mutans* เท่ากับ 12.52 ± 0.62 มิลลิเมตร และ *S. sobrinus* เท่ากับ 11.87 ± 0.41 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์มีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.53 ± 0.08 μm ขณะที่การเติมสารสกัดหยาบมะขามป้อมทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็น 1.58 ± 0.50 μm พร้อมทั้งพบการเชื่อมต่อกันระหว่างเส้นใยมากขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FTIR แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่าง

หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบพอลิฟีนอลในสารสกัดกับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผ่านพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเส้นใยภายหลังการขึ้นรูป

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุนำส่งสารออกฤทธิ์ที่มีสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านการดูแลสุขภาพช่องปาก โดยเฉพาะการควบคุมเชื้อก่อโรคฟันผุ เช่น *S. mutans* และ *S. sobrinus*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ให้กับทีมงานวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Iahnke A, Monte M L, Cadaval T R S A, Pinto L A A. Electrospinning of gelatin fine fibers loaded with hop waste extract: Development, characterization, and application as antioxidant chitosan bilayer films, *Journal of Molecular Liquids*. 2025; 426: 127364. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127364>
2. Aydogdu A, Sumnu G, Sahin S. Fabrication of gallic acid loaded hydroxypropyl methylcellulose nanofibers by electrospinning technique as active packaging material, *Carbohydrate Polymers*. 2019; 208: 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.065>
3. Zhang C, Yuan X, Wu L, Han Y, Sheng J. Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats, *European Polymer Journal*. 2005; 41(3): 423-432. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.027>
4. Kayaci F, Sen H S, Durgun E, Uyar T. Functional electrospun polymeric nanofibers incorporating geraniol-cyclodextrin inclusion complexes: High thermal stability and enhanced durability of geraniol, *Food Research International*. 2014; 62: 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.033>
5. Mehra M, Asadollahi M A, Nasri-Nasrabadi B, Ghaedi K, Salehi H, Dolatshahi-Pirouz A, Arpanaei A. Incorporation of mesoporous silica nanoparticles into random electrospun PLGA and PLGA/gelatin nanofibrous scaffolds enhances mechanical and cell proliferation properties, *Materials Science and Engineering: C*. 2016; 66: 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.04.031>
6. Sill T J, von Recum H A. Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering, *Biomaterials*. 2008; 29(13): 1989-2006. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.01.011>
7. Ren K, Wang Y, Sun T, Yue W, Zhang H. Electrospun PCL/gelatin composite nanofiber structures for effective guided bone regeneration membranes, *Materials Science and Engineering: C*. 2017; 78: 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.084>
8. Liu S-J, Kau Y-C, Chou C-Y, Chen J-K, Wu R-C, Yeh W-L. Electrospun PLGA/collagen nanofibrous membrane as early-stage wound dressing, *Journal of Membrane Science*. 2010; 355(1): 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.03.012>

9. Mutlu G, Calamak S, Ulubayram K, Guven E. Curcumin-loaded electrospun PHBV nanofibers as potential wound-dressing material, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2018; 43: 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.09.017>
10. Zhang Q, Young T M, Harper D P, Liles T, Wang S. Optimization of electrospun poly(vinyl alcohol)/cellulose nanocrystals composite nanofibrous filter fabrication using response surface methodology, *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2021; 2: 100120. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100120>
11. Coşkuner Filiz B, Basaran Elalmis Y, Bektaş İ S, Kantürk Figen A. Fabrication of stable electrospun blended chitosan-poly(vinyl alcohol) nanofibers for designing naked-eye colorimetric glucose biosensor based on GOx/HRP, *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021; 192: 999-1012. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.048>
12. Subrahmanya T M, Arshad A B, Lin P T, Widakdo J, H. K M, Austria H F M, Hu C-C, Lai J-Y, Hung W-S. A review of recent progress in polymeric electrospun nanofiber membranes in addressing safe water global issues, *RSC Advances*. 2021; 11(16): 9638-9663. <https://doi.org/10.1039/d1ra00060h>.
13. Bhardwaj N, Kundu S C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advances*. 2010; 28(3): 325-347. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
14. Soni N, Roy D, Patel D M, Dhandhukia P, Thakker J N. Study on electrospinning of polyvinyl alcohol nanofibers loaded with carotenoids for enhanced stability and its multifarious applications, *Discover Chemistry*. 2025; 2(1): 57. <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00132-z>
15. Temel-Soylu T M, Keçeciler-Emir C, Rababah T, Özel C, Yücel S, Basaran-Elalmis Y, Altan D, Kirgiz Ö, Seçinti İ E, Kaya U, and Altuğ M E. Green electrospun poly(vinyl alcohol)/gelatin-based nanofibrous membrane by incorporating 45S5 bioglass nanoparticles and urea for wound dressing applications: Characterization and in vitro and in vivo evaluations, (in eng), *ACS Omega*. 2024; 9(19): 21187-21203. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01102>
16. Adeli H, Khorasani M T, Parvazinia M. Wound dressing based on electrospun PVA/chitosan/starch nanofibrous mats: Fabrication, antibacterial and cytocompatibility evaluation and in vitro healing assay, *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019; 122: 238-254. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.115>
17. He S, Jiang L, Liu J, Zhang J, Shao W. Electrospun PVA/gelatin based nanofiber membranes with synergistic antibacterial performance, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022; 637: 128196. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128196>
18. Abdelgawad A M, Hudson S M, Rojas O J. Antimicrobial wound dressing nanofiber mats from multicomponent (chitosan/silver-NPs/polyvinyl alcohol) systems, *Carbohydrate Polymers*. 2014; 100: 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.12.043>

19. Khanzada H, Salam A, Qadir M B, Phan D N, Hassan T, Munir M U, Pasha K, Hassan N, Khan M Q, Kim I S. Fabrication of promising antimicrobial *Aloe vera*/PVA electrospun nanofibers for protective clothing, (in eng), Materials (Basel). 2020; 13(17): 3884. <https://doi.org/10.3390/ma13173884>
20. Kegere J, Ouf A, Siam R, Mamdouh W. Fabrication of poly(vinyl alcohol)/chitosan/*Bidens pilosa* composite electrospun nanofibers with enhanced antibacterial activities, ACS Omega. 2019; 4(5): 8778-8785. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00204>
21. Sarwar M N, Ali H G, Ullah S, Yamashita K, Shahbaz A, Nisar U, Hashmi M, Kim I S. Electrospun PVA/CuONPs/Bitter melon nanofibers with improved cytocompatibility and antibacterial properties: Application as antibacterial wound dressing, (in eng), Polymers (Basel). 2022; 14(7): <https://doi.org/10.3390/polym14071361>
22. Karim F-E, Islam M R, Alam M R, Jahan T, Raoha S, Haque S. Developing and screening of a bacteria-fighting and moisture-controlling *Coccinia grandis* and poly(vinyl alcohol) electrospun nanofibrous mat, ACS Omega. 2024; 9(28): 30926-30934. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03884>
23. Noga M, Milan J, Frydrych A, Jurowski K. Toxicological aspects, safety assessment, and green toxicology of silver nanoparticles (AgNPs)—critical review: State of the art, International Journal of Molecular Sciences. 2023; 24(6): 5133. <https://doi.org/10.3390/ijms24065133>
24. Thakur L, Ghodasra U, Patel N, Dabhi M. Novel approaches for stability improvement in natural medicines, (in eng), Pharmacogn Rev. 2011; 5(9): 48-54. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.79099>
25. Atazhanova G A, Levaya Y K, Badekova K Z, Ishmuratova M Y, Smagulov M K, Ospanova Z O, Smagulova E M. Inhibition of the biofilm formation of plant *Streptococcus mutans*, Pharmaceuticals. 2024; 17(12): 1613. <https://doi.org/10.3390/ph17121613>
26. Gul M, Liu Z-W, Iqbal H, Rabail R, Faheem F, Walayat N, Nawaz A, Shabbir M A, Munekata P E S, Lorenzo J M, and Aadil R M. Functional and nutraceutical significance of amla (*Phyllanthus emblica* L.): A review, Antioxidants. 2022; 11(5): 816. <https://doi.org/10.3390/antiox11050816>
27. Fatema P F, Sayful I M. *Phyllanthus emblica* linn. (amla) - a natural gift to humans: An overview, Journal of Diseases and Medicinal Plants. 2019; 5(1): 1-9. <https://doi.org/10.11648/j.jdmp.20190501.11>
28. Trentin D S, Silva D B, Amaral M W, Zimmer K R, Silva M V, Lopes N P, Giordani R B, Macedo A J. Tannins possessing bacteriostatic effect impair *Pseudomonas aeruginosa* adhesion and biofilm formation, PLOS ONE. 2013; 8(6): e66257. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066257>
29. Prananda A T, Dalimunthe A, Harahap U, Simanjuntak Y, Peronika E, Karosekali N E, Hasibuan P A Z, Syahputra R A, Situmorang P C, Nurkolis F. *Phyllanthus emblica*: A comprehensive review of its phytochemical composition and pharmacological properties, (in English), Frontiers in Pharmacology Review. 2023; 14: 1288618. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1288618>

30. Tiwana G, Cock I E, Cheesman M J. *Phyllanthus emblica*: Phytochemistry, antimicrobial potential with antibiotic enhancement, and toxicity insights, *Microorganisms*. 2025; 13(3): 611. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13030611>
31. Masfria S, Syahputra H, Witarman M. Formulation and evaluation of antibacterial and anti-inflammatory capsules containing *Phyllanthus emblica* L. Fruit nanoparticles, *Science and Technology Indonesia*. 2023; 8(4): 607-615. <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.4.607-615>
32. Suvandee W, Teeranachaideekul V, Jeenduang N, Nooeaid P, Makarasen A, Chuenchom L, Techasakul S, Dechtrirat D. One-pot and green preparation of *Phyllanthus emblica* extract/silver nanoparticles/polyvinylpyrrolidone spray-on dressing, *Polymers*. 2022; 14(11): 2205. <https://doi.org/10.3390/polym14112205>
33. Jia Y-T, Gong J, Gu X-H, Kim H-Y, Dong J, Shen X-Y. Fabrication and characterization of poly(vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method, *Carbohydrate Polymers*. 2007; 67(3): 403-409. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.010>
34. Fitaihi R, Altalal A, Alfaraj R, Alkathiri F, Alzhrani R F, Aldawsari S, Alorayyidh S, Alnefaie M, Al Fayez N, Altuwaijri N. Electrospun PVA nanofibers co-loaded with atorvastatin and zinc oxide for antibacterial and in vitro wound healing applications, *Biomedicines*. 2026; 14(3): 724. <https://doi.org/10.3390/biomedicines14030724>
35. Li D, Xia Y. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel?, *Advanced Materials*. 2004; 16(14): 1151-1170. <https://doi.org/10.1002/adma.200400719>