วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ต.ค.–ธ.ค. 2561
The Journal of KMUTNB., Vol. 28, No. 4, Oct.–Dec. 2018

บทความวิจัย

แผ่นกรองต้านแบคทีเรียจากผืนเส้นใยนาโนผสมระหว่างพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ชลดา สุวรรณบูรณ์
ศูนย์วิจัยบูรณาการนาโน สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นพวรรณ ชนัญพานิช*
ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศูนย์วิจัยบูรณาการนาโน สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กนกวรรณ กิตตินิยม
ภาควิชาจุลชีววิทยาคลินิกและเทคโนโลยีประยุกต์ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0–2555–2000 ต่อ 4808, 1538 อีเมล: noppavan.c@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.008
รับเมื่อ 3 สิงหาคม 2560 ตอบรับเมื่อ 15 ธันวาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 17 กันยายน 2561
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ผืนเส้นใยนาโนพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ผสมสารต้านแบคทีเรีย สามารถนำไปผลิตแผ่นกรองที่มีคุณสมบัติกรองและยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียในน้ำได้ แต่ประสิทธิภาพยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจาก PVDF มีคุณสมบัติดูดซึมน้ำต่ำ จึงมีข้อจำกัดให้สารต้านแบคทีเรียแพร่ออกมา ในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มคุณสมบัติการเปียกน้ำโดยผลิตแผ่นกรองที่มีการผสมผสานระหว่างเส้นใยนาโน PVDF กับเส้นใยนาโนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ได้แผ่นกรอง FA ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นกรองลดลงจาก 126 องศา (แผ่นกรอง PVDF) เป็น 78 องศา และใช้เวลาในการซึมน้ำเพียง 1 นาที 20 วินาที แผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M มีความหนา 60±3 ไมโครเมตร รูพรุน 0.40 ไมโครเมตร และความพรุน 70±3% เมื่อนำไปกรองเชื้อแบคทีเรียเปรียบเทียบกับแผ่นกรองเชิงพาณิชย์ (Nitrocellulose Membrane) ที่มีรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตร และความหนาเท่ากับ 125 ไมโครเมตร พบว่า แผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M มีประสิทธิภาพในการแยกเชื้อแบคทีเรียออกจากน้ำได้เช่นเดียวกัน และยังพบว่าแผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M ยังสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้ ถึงแม้จะเติมสารต้านแบคทีเรีย $AgNO_3$ และเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (BKC) เพียง 0.1% ของน้ำหนักพอลิเมอร์

คำสำคัญ: เมมเบรนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย, เมมเบรน PVDF/PVA, แผ่นเส้นใยนาโน PVDF/PVA, การทดสอบแบบ Disk Diffusion, สารต้านเชื้อแบคทีเรีย $AgNO_3$ และ Benzalkonium Chloride

การอ้างอิงบทความ: ชลดา สุวรรณบูรณ์ นพวรรณ ชนัญพานิช และ กนกวรรณ กิตตินิยม, "แผ่นกรองต้านแบคทีเรียจากผืนเส้นใยนาโนผสมระหว่างพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 4, หน้า 881–891, ต.ค.–ธ.ค. 2561.

Research Article

Antibacterial Membrane from Mixed Poly (*vinylidene fluoride*) Nanofiber and Poly (*vinyl alcohol*) Nanofiber

Chonlada Suwanboon

Integrated Nanoscience Research Center, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Noppavan Chanunpanich*

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Integrated Nanoscience Research Center, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Kanokwan Kittiniyom

Department of Clinical Microbiology and Applied Technology, Faculty of Medical Technology, Mahidol University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0–2555–2000 Ext. 4808, 1538, E–mail: noppavan.c@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.008
Received 3 August 2017; Accepted 15 December 2017; Published online: 17 September 2018
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Antibacterial Poly (*vinylidene fluoride*) (PVDF) nanofibers can be used to produce filter with the property of liquid filtering and bacteriostatic effect. However, its present efficiency is still dissatisfied due to the low absorption of PVDF causing the limitation of antibacterial substances diffusion. In this study, the researcher introduced hydrophilic membrane by spinning with Poly (*vinyl alcohol*) nanofiber (PVA) to produce FA filter. The contact angle of FA filter has been reduced from 126 deg to 78 deg with the water absorption duration only of 1 minute and 20 seconds. The FA 8M antibacterial filter has the thickness of 60±3 micrometers, a pore size of 0.40 micrometer, and the porosity of 70±3%. The FA 8M antibacterial filter was compared with the commercial nitrocellulose membrane filter with the thickness of 125 micrometers and a pore size of 0.45 micrometers showing that the FA 8M antibacterial filter can effectively separate the bacteria from the water and still contain bacteriostatic effect though $AgNO_3$ and BKC (Benzalkonium Chloride) added only 0.1% of the polymer weight.

Keywords: Antibacterial Membrane, PVDF/PVA Membrane, PVDF/PVA Nanofiber Mat, Disk Diffusion Technique, $AgNO_3$ and Benzalkonium Chloride Antibacterial

Please cite this article as: C. Suwanboon, N. Chanunpanich, and K. Kittiniyom, "Antibacterial membrane from mixed poly (*vinylidene fluoride*) nanofiber and poly (*vinyl alcohol*) nanofiber," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, pp. 881–891, Oct.–Dec. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

ผืนเส้นใยนาโนเป็นวัสดุที่น่าสนใจในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะเส้นใยมีพื้นที่ผิวสูงเทียบกับน้ำหนัก (High Surface to Weight Ratio) รูพรุนมีลักษณะต่อเนื่อง มีปริมาตรรูสูง (High Pore Volume) จึงใช้ทำเป็นแผ่นกรองกันมากขึ้น ทั้งในรูปการกรองอนุภาคและการกรองอากาศ [1]–[5] ข้อเสียของการใช้เส้นใยนาโนคือ เส้นใยนาโนมีความเบา ทำให้ต้องใช้เส้นใยนาโนซ้อนทับกันให้หนามากพอที่จะเกิดความแข็งแรงและสะดวกต่อการใช้งาน ข้อเสียนี้กลับกลายเป็นข้อดีของการนำผืนเส้นใยนาโนไปใช้ทำแผ่นกรอง เพราะแต่ละชั้นของการซ้อนทับกันของเส้นใยนาโนเปรียบเสมือนมีตะแกรงซ้อนกันเป็นจำนวนมาก จึงกรองอนุภาคที่มีขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตรได้ แผ่นกรองจากเส้นใยนาโนจึงมีความเบาและบางกว่าแผ่นกรองเชิงพาณิชย์ พอลิเมอร์ที่ใช้ด้านการกรอง ได้แก่ พอลิอะคริโลไนไตรล์ (Polyacrilonitrile; PAN) [6] ไนลอน 6 (Nylon 6) [7] เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate; CA) [8], [9] และพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Poly (*vinylidene fluoride*); PVDF) [1], [10]–[12] จากประสบการณ์การผลิตผืนเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่า PVDF สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโนค่อนข้างง่ายและแยกผืนเส้นใยนาโนออกแผ่นอะลูมิเนียมได้สะดวกกว่าผืนเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น แต่เนื่องจาก PVDF มีคุณสมบัติการดูดซึมน้ำต่ำ ทำให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ระหว่างการกรอง การแก้ปัญหาที่ง่ายที่สุดคือ การผสม PVDF กับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความชอบน้ำ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (*vinylidene fluoride*); PVA) ข้อดีของ PVA คือ ละลายน้ำได้ ไม่มีความเป็นพิษ เส้นใยนาโน PVA ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยนาโน PVDF (เส้นใยนาโน PVDF มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 640 นาโนเมตร ในขณะที่เส้นใยนาโน PVA มีขนาด 200 นาโนเมตร) [13]–[15] จึงน่าช่วยทำให้ผืนเส้นใยนาโน PVDF มีรูพรุนเล็กลง นอกจากนี้ PVA สามารถเกิดโครงข่ายทางกายภาพ (Physical Crosslink) เมื่อได้รับความร้อน [16] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการการผลิตแผ่นกรองจากเส้นใยนาโนด้วย ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ผลิตแผ่นกรองจากเส้นใยนาโน PVDF ผสมเส้นใยนาโน PVA หรือแผ่นกรอง FA โดยศึกษาผลของความหนาของแผ่นกรองต่อคุณสมบัติของแผ่นกรอง เช่น รูพรุน ความพรุน จากนั้นศึกษาผลของปริมาณสารต้านแบคทีเรียในแผ่นกรองต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยใช้สารต้านแบคทีเรีย 2 ตัว คือ เงินไนเตรต ($AgNO_3$) ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้ยับยั้งแบคทีเรีย และเบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (Benzalkonium Chloride; BKC) ซึ่งเป็นสารยับยั้งแบคทีเรียทางการแพทย์และสาธารณสุข

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยมาจากบริษัท Acros ได้แก่ เบนซาลโคเนียมคลอไรด์ (Benzalkonium Chloride; BKC) และไดเมทิลอะเซตาไมด์ (DMAc) จากบริษัท Lab Scan ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA; Mw = 89,000–98,000) และอะซิโตน (Acetone) ส่วนเงินไนเตรต ($AgNO_3$) ได้จากบริษัท Merck พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF; Kynar761; Mw = 440,000) จากบริษัท Benebiz จำกัด พอลิสไตรีนลาเท็กซ์ (Styrene Latex; สูตร NH-50C1; size 0.1–0.9 μm) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยนันวูเว่น จำกัด สุดท้าย อาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ Tryptic Soy Agar (TSA) Tryptic Soy Broth (TSB) และ Mueller Hinton Agar (MHA) จากบริษัท Becton, Dickinson

2.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

สารละลาย PVDF ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก ในตัวทำละลาย DMAc กับ Acetone อัตราส่วน 4 : 6 โดยน้ำหนัก เตรียมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และสารละลาย PVA ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เตรียมในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สารต้านแบคทีเรีย (เงินไนเตรต และเบนซาลโคเนียมคลอไรด์) จะเติมลงในสารละลายพอลิเมอร์ให้มีความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์

2.3 การขึ้นรูปฝืนเส้นใยนาโนและการผลิตแผ่นกรอง

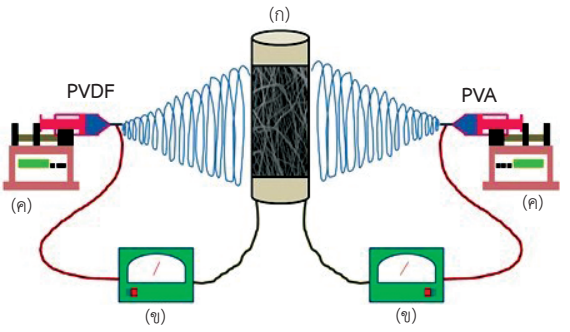
ฝืนเส้นใยนาโน PVDF ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตบนแผ่นอะลูมิเนียม (Al Foil) ที่พันรอบลูกกลิ้ง ลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 เซนติเมตร ความกว้าง 30 เซนติเมตร หมุนด้วยความเร็วผิว (Surface Speed) 45±5 เมตรต่อนาที ความกว้างของฝืนเส้นใยนาโนปรับด้วยรางเลื่อนซึ่งเป็นที่วางระบบฉีดสารละลายพอลิเมอร์ โดยให้รางเลื่อนเคลื่อนซ้ายขวาเป็นระยะทาง 14 เซนติเมตร และเคลื่อนด้วยอัตราเร็ว 6±0.3 เมตรต่อนาที ส่วนสภาวะการขึ้นรูปฝืนเส้นใยนาโนคือ ใช้ศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากปลายเข็มถึงฉากรับ 10 เซนติเมตร อัตราการไหลของสาร 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ฝืนเส้นใยนาโน PVA จะขึ้นรูปที่สภาวะศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากปลายเข็มถึงฉากรับ 13 เซนติเมตร อัตราการไหลของสาร 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เส้นใยนาโนแต่ละฝืนขึ้นรูปเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ฝืนเส้นใยนาโนความกว้าง 18 เซนติเมตร ความยาว 51 เซนติเมตร ในกรณีขึ้นรูปเส้นใยนาโนผสมระหว่างเส้นใยนาโน PVDF กับเส้นใยนาโน PVA จะอาศัยหลักการฉีดขึ้นรูปด้วยสภาวะเดียวกันกับสภาวะที่กล่าวมา แต่ให้เส้นใยนาโนทั้งสองชนิดสะสมบนลูกกลิ้งเดียวกัน ดังรูปที่ 1 ฝืนเส้นใยนาโนที่ได้จะเรียกว่า ฝืนเส้นใยนาโน FA

ความหนาของแผ่นเส้นใยนาโน FA เตรียมได้จากการนำฝืนเส้นใยนาโน FA มาซ้อนทับกันและกดด้วยแรงอัด 100 psi ที่อุณหภูมิ 130°ซ เป็นเวลา 3 นาที (Preheat) จากนั้นเพิ่มแรงอัดเป็น 800 psi เป็นเวลา 7 นาที แผ่นกรอง FA ได้จากการนำแผ่นเส้นใยนาโน FA ที่ความหนาต่างๆ มาตัดให้เป็นวงกลมขนาด 25 มิลลิเมตร

2.4 การหาความพรุน (Porosity) ของแผ่นกรอง FA

นำแผ่นกรอง FA มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง และวัดความหนาของแผ่นกรองจำนวน 5 ตำแหน่งด้วยไมโครมิเตอร์ จากนั้นคำนวณหาค่าความหนาแน่นปรากฏ (ρ_{mat}) ตามด้วยความพรุน (Porosity) ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\rho_{mat}(g/cm^3) = \frac{Mass}{Volume} = \frac{Mass}{Area \times Thickness} \quad (1)$$



รูปที่ 1 การติดตั้งเครื่องขึ้นรูปฝืนเส้นใยนาโน FA ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (ก) ลูกกลิ้งรับ ฝืนเส้นใยนาโน FA (ข) ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (ค) ระบบฉีดสารละลายพอลิเมอร์

$$Porosity(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{mat}}{(\rho_{PVDF} + \rho_{PVA})_{powder}}\right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ $Mass$ คือ น้ำหนักของแผ่นกรอง FA (กรัม)
$Volume$ คือ ปริมาตรของแผ่นกรอง FA (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$Area$ คือ พื้นที่ของแผ่นกรอง FA (ตารางเซนติเมตร)
$Thickness$ คือ ความหนาของกรอง FA (เซนติเมตร)
ρ_{mat} คือ ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นกรอง FA (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
ρ_{PVDF} คือ ความหนาแน่นของ PVDF (1.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
ρ_{PVA} คือ ความหนาแน่นของ PVA (0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.5 การหาขนาดรูพรุน (Pore Size) ของแผ่นกรอง FA

นำแผ่นกรอง FA ไปประกอบกับ Filter Holder และกรองด้วยสารแขวนลอยพอลิสไตรีน (Polystyrene Latex) ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร (1% จาก Stock) นำฟิลเทรตไปหาขนาดอนุภาคพอลิสไตรีนด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Nanosizer) แผ่นกรองแต่ละความหนาทำการทดลองจำนวน

3 ครั้ง ค่ารูพรุนได้จากขนาดอนุภาคที่เริ่มไม่พบในฟิลเทรต ตัวอย่างเช่น อนุภาคที่ 0.35 ไมโครเมตร ยังพบอนุภาคจำนวน 0.1% ส่วนอนุภาคที่ 0.40 ไมโครเมตร ไม่พบอนุภาคในฟิลเทรต จะรายงานรูพรุนของแผ่นกรองเท่ากับ 0.40 ไมโครเมตร

2.6 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองและการยับยั้งแบคทีเรียบนแผ่นกรอง

แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบมีจำนวน 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *Escherichia coli* ATCC 25922, *Stapphylococcus aureus* ATCC 25923, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27835, *Enterrococcus faecalis* ATCC 29212 และ *Bacillus subtilis* ATCC 6633 (จาก Stock เชื้อเก็บที่อุณหภูมิ –80°C คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล)

นำเชื้อทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการเพาะเชื้อบน Blood Agar (TSA ที่เติม 3–5% Human Pack Red Cell) และบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาปรับให้ปริมาณเชื้อในช่วง 10^6 ถึง 10^8 CFU/mL โดยหาปริมาณเชื้อเริ่มต้นด้วยวิธี 6×6 Drop Plate [17] และนำมากรอง โดยใช้ Syringe ดูดเชื้อ 5 มิลลิลิตร และกรองเชื้อผ่านหัวกรองที่มีแผ่นกรอง FA-8M และแผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร นำน้ำที่ผ่านการกรองมาตรวจนับเชื้อด้วยวิธี Spread Plate บน Tryptic Soy Agar (TSA) บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง บันทึกจำนวนโคโลนี และคำนวณหาความเข้มข้นของเชื้อ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของเชื้อก่อนและหลังกรอง สุดท้ายนำแผ่นกรองที่ผ่านการกรองเชื้อมาใส่ในหลอดที่มีน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เติม Tryptic Soy Broth (TSB) เข้มข้น 2 เท่า และนำไปบ่มด้วยเครื่องอบเพาะเชื้อแบบเขย่า ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเร็ว 180 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำแช่แผ่นกรองขุ่น นับปริมาณเชื้อที่มีชีวิตรอดอยู่บนแผ่นกรองด้วยวิธี Spread Plate คำนวณค่าเฉลี่ยปริมาณเชื้อที่นับได้เป็น CFU/mL จากการทดลองสองครั้ง

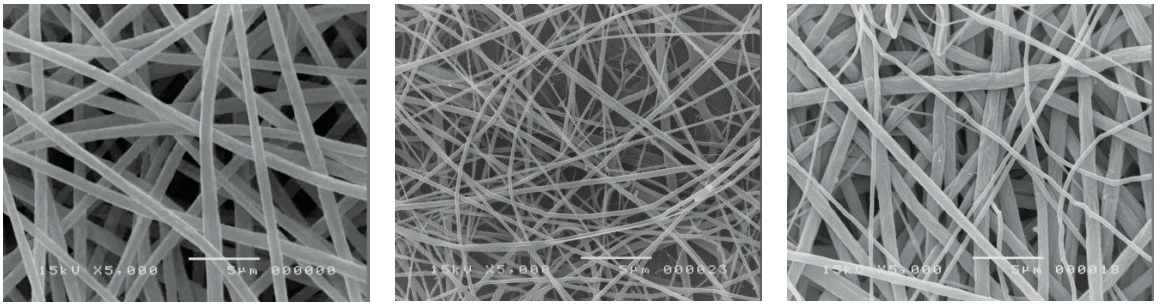
2.7 การทดสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียด้วยวิธี Disk Diffusion

นำเชื้อทั้ง 5 สายพันธุ์ มาเพาะเลี้ยง 2 ครั้ง บน Blood Agar และบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18–24 ชั่วโมง ก่อนปรับเชื้อด้วยน้ำเกลือ ให้มีความขุ่นเท่ากับ 0.5 McFarland Standard นำไม้พันสำลีป้ายเชื้อบน Mueller Hinton Agar (MHA) ให้ทั่วทับกันอย่างน้อย 3 ระนาบ จากนั้น นำแผ่นกรอง FA-8M และแผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M ปลอดเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร มาวางบน MHA Plate ที่มีเชื้ออย่างละ 6 แผ่น วางควบคู่ไปกับ Disk ยา Gentamicin (10 µg) ที่ใช้เป็นตัวควบคุมในแต่ละครั้งของการทดสอบ บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และบันทึกผลการยับยั้งโดยวัดโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) เป็นมิลลิเมตร ทำการทดลอง 3 ครั้ง (Triplicate) หาค่าเฉลี่ยและ SD

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การผลิตผืนเส้นใยนาโน FA

ผืนเส้นใยนาโน FA พัฒนาขึ้นเพื่อทำให้ผืนเส้นใยนาโน PVDF ซึ่งขึ้นรูปด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต มีสมบัติการเปียกน้ำ (Wettability) เพื่อวัตถุประสงค์ผลิตเป็นแผ่นกรองสำหรับสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยไม่ทำให้การกรองเกิดความดันลด (Pressure Drop) รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยนาโน PVDF มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 600–1,200 นาโนเมตร ในขณะที่เส้นใยนาโน PVA มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 50–450 นาโนเมตร จึงเห็นได้ชัดว่าผืนเส้นใยนาโน FA เป็นการผสมผสานระหว่างเส้นใยนาโน PVDF กับ เส้นใยนาโน PVA โดยความหนาแน่นของเส้นใยนาโน PVA มีน้อยกว่าเส้นใยนาโน PVDF เพราะใช้อัตราการฉีดสารละลายน้อยกว่านั่นเอง ดังนั้นเมื่อนำไปทำเป็นแผ่นกรอง เส้นใยนาโน PVA ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก น่าจะทำให้แผ่นกรอง FA มีขนาดรูพรุน (Pore Size) เล็กลง



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2 SEM ของเส้นใยนาโน (ก) PVDF (ข) PVA และ (ค) FA

3.2 การผลิตแผ่นกรอง FA

เนื่องจากเส้นใยนาโนมีขนาดเล็กมาก ทำให้ฝืนเส้นใยนาโนมีความบางและเบา ไม่สะดวกต่อการใช้งาน จึงอาศัยความร้อนและแรงอัด โดยความร้อนช่วยให้เส้นใยนาโน FA อ่อนตัว และแรงอัดทำให้เส้นใยนาโนแต่ละฝืนติดกันได้เป็นแผ่นเส้นใยนาโน FA ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นตามจำนวนฝืนเส้นใยนาโน FA ที่เพิ่มขึ้นตามตารางที่ 1 สมบัติที่น่าสนใจคือ ค่าความพรุน (Porosity) ของแผ่นเส้นใยนาโน FA พบว่าไม่แตกต่างมากนักถึงแม้จะนำฝืนเส้นใยนาโน FA มาซ้อนกันถึง 16 ชั้นก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เพราะแผ่นเส้นใยนาโนมีรูเปิดต่อเนื่องกัน (Interconnectivity Pore) นั่นเอง [18], [19] จากตารางที่ 1 ยังพบว่า แผ่นเส้นใยนาโน FA มีรูพรุนเล็กลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น และที่ความหนา 60±3 ไมโครเมตร ให้ค่ารูพรุนที่เหมาะที่จะใช้กรองเชื้อแบคทีเรียได้ (แผ่นกรองเชิงการพาณิชย์สำหรับกรองเชื้อแบคทีเรียมีค่ารูพรุนเท่ากับ 0.45 ไมโครเมตร) ดังนั้น แผ่นเส้นใยนาโน FA ที่เหมาะทำเป็นแผ่นกรองต้านเชื้อแบคทีเรียคือ แผ่นเส้นใยนาโน FA-8M ที่มีการซ้อนกันของฝืนเส้นใยนาโน FA จำนวน 8 แผ่น มีความหนา 60±3 ไมโครเมตร ความพรุนมีค่าเท่ากับ 70±3% และรูพรุนมีค่าเท่ากับ 0.40 ไมโครเมตร

รูปที่ 3 แสดงพื้นผิวของแผ่นกรอง FA-8M จากภาพ SEM พบว่า หลังได้รับความร้อนและแรงอัด ยังพบเส้นใยนาโน PVDF (ขนาดเส้นใหญ่) และเส้นใยนาโน PVA (ขนาดเส้นเล็ก) แสดงว่าความร้อนและแรงอัดไม่ทำให้เส้นใยนาโนของพอลิเมอร์ทั้งสองเปลี่ยนแปลง ผู้วิจัยเคยทดลองขึ้นรูปฝืนเส้นใยนาโน PVA และตั้งทิ้งไว้ในห้องปฏิบัติการพบว่าเส้นใยนาโน PVA หลอม ทั้งนี้เพราะเส้นใยนาโน PVA มีขนาดเล็กมากจึงสัมผัสกับความชื้นในอากาศได้ดี ด้วยเหตุนี้

รูปที่ 3 แผ่นเส้นใยนาโน FA หลังผ่านการอัดที่ความดัน 800 psi ที่อุณหภูมิ 130°C

ตารางที่ 1 ความหนา ความพรุน (Porosity) และรูพรุน (Pore Size) ของแผ่นกรอง FA

Membrane	Thickness (µm)	Pore size (µm)	Porosity (%)
FA-2M	30±1	0.95±0	80±0
FA-4M	40±3	0.82±0	75±1
FA-8M	60±3	0.40±0	70±3
FA-12M	80±5	0.25±0	65±3
FA-16M	125±5	0.25±0	65±3

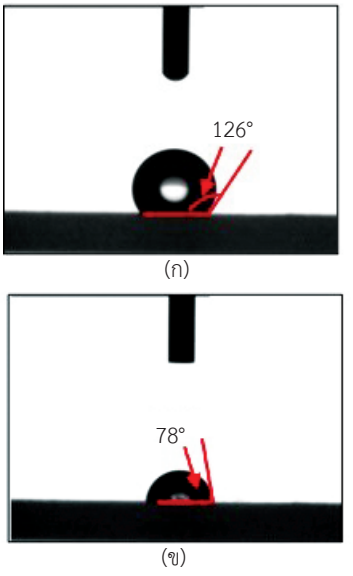
จึงมีงานวิจัยลดปัญหานี้ โดยทำให้เส้นใยนาโน PVA เกิดโครงข่ายโดยให้ผืนเส้นใยนาโน PVA สัมผัสกับสารละลายหรือไอของกลูตาแรลดีไฮด์ [20], [21] นอกจากนี้ยังพบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C แก่ผืนเส้นใยนาโน PVA เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจุ่มแผ่นเส้นใยนาโนลงในเมทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้เกิดโครงข่ายทางกายภาพ [22] ส่วน Lee *et al.* [16] รายงานว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 10 นาที โดยไม่ต้องจุ่มเมทานอลก็ทำให้เส้นใยนาโน PVA เกิดโครงข่ายทางกายภาพได้เช่นกัน แต่ในงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จทำให้เส้นใยนาโน PVA เกิดโครงข่ายทางกายภาพที่อุณหภูมิ 130°C (ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ จะทำให้เส้นใยนาโน PVDF หลอม) และแรงอัด 800 psi เป็นเวลา 7 นาที

3.3 การทดสอบสมบัติการเปียกน้ำ (Wettability) ของแผ่นกรอง FA-8M

จากการทดสอบมุมสัมผัสของแผ่นกรอง PVDF และแผ่นกรอง FA โดยใช้น้ำปริมาตร 10 ไมโครลิตร หยดบนแผ่นกรอง (ใช้ Microsyringe) ดังรูปที่ 4 พบว่า มุมสัมผัสของแผ่นกรอง PVDF มีค่าเท่ากับ 126 องศา ในขณะที่มุมสัมผัสของแผ่นกรอง FA มีค่าเพียง 78 องศา แสดงให้เห็นว่า แผ่นกรอง FA-8M มีความเปียกน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นกรอง FA-8M สามารถดูดซึมหยดน้ำได้หมดภายในเวลาเพียง 1 นาที 20 วินาที ในขณะที่แผ่นกรอง PVDF ใช้เวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความดันลดเมื่อนำแผ่นกรอง PVDF ไปกรองสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย

3.4 ประสิทธิภาพการกรองและการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียบนแผ่นกรอง

จากการทดสอบการกรองเชื้อแบคทีเรียจำนวน 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. faecalis* และ *B. subtilis* ซึ่งเป็นตัวแทนเชื้อแกรมต่างๆ ที่มักพบได้บ่อยในน้ำและสิ่งแวดล้อม จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการกรองไปตรวจหาเชื้อด้วยวิธี Spread Plate พบว่า ไม่พบเชื้อแบคทีเรีย แสดงว่าแผ่นกรองจากเส้นใยนาโนทุกชนิด



รูปที่ 4 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของน้ำบน (ก) แผ่นกรอง PVDF (ข) แผ่นกรอง FA

(แผ่นกรอง FA-8M และแผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M) สามารถกรองเชื้อทั้ง 5 สายพันธุ์นี้ได้เช่นเดียวกับแผ่นกรองเชิงพาณิชย์ Nitrocellulose ที่มีรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลการทดลองการหาค่ารูพรุนได้ค่าเท่ากับ 0.40 ไมโครเมตร และสังเกตว่าแผ่นกรอง FA-8M ที่ผลิตมีความหนาเพียง 60 ไมโครเมตร ในขณะที่แผ่นกรองเชิงพาณิชย์มีความหนา 125 ไมโครเมตร

ตามเป้าหมายแผ่นกรองควรยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้ด้วย เพื่อตรวจสอบสมมติฐานนี้จึงนำแผ่นกรองที่ผ่านการกรองเชื้อแล้วแช่ในน้ำ เพื่อให้แบคทีเรียหลุดออกจากแผ่นกรอง เติมอาหารเลี้ยงเชื้อ เพาะบ่ม แล้วนำน้ำไปตรวจสอบการเจริญของแบคทีเรียที่มีชีวิตรอดได้ผลดังตารางที่ 2 พบว่า แผ่นกรอง FA-8M และแผ่นกรอง Nitrocellulose พบแบคทีเรียเจริญจำนวนมาก (มากกว่า 3×10^4 CFU/ml) ทั้งนี้เพราะแผ่นกรองทั้งสองไม่มีสารต้านแบคทีเรีย ($AgNO_3$, BKC) แบคทีเรียที่ค้างบนแผ่นกรองจึงสามารถเจริญได้ สิ่งที่น่าสนใจคือแผ่นกรองถึงแม้จะมีสารต้านแบคทีเรียเพียง 0.1% ก็สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้ ยกเว้น *E. faecalis* ที่ต้องการสารต้านจุลชีพมากขึ้น คือ 0.5% ขึ้นไป สอดคล้องกับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียบนแผ่นกรอง FA-8M

ชื่อแผ่นกรอง	การพบเชื้อในน้ำแช่แผ่นกรอง				
	E. coli	*S. aureus*	*P. aeruginosa*	*E. faecalis*	*B. subtilis*
FA-8M	+	+	+	+	+
FA-8M + 0.1% BKC	-	-	-	+	-
FA-8M + 0.5% BKC	-	-	-	-	-
FA-8M + 1.0% BKC	-	-	-	-	-
FA-8M + 1.5% BKC	-	-	-	-	-
FA-8M + 2.0% BKC	-	-	-	-	-
FA-8M + 0.1% Ag	-	-	-	+	-
FA-8M + 0.5% Ag	-	-	-	-	-
FA-8M + 1.0% Ag	-	-	-	-	-
FA-8M + 1.5% Ag	-	-	-	-	-
FA-8M + 2.0% Ag	-	-	-	-	-
nitrocellulose	+	+	+	+	+

หมายเหตุ 1. “+” คือพบเชื้อ; “-” คือไม่พบเชื้อ
2. Nitrocellulose with Pore Size of 0.45 µm
3. เปอร์เซ็นต์ของ Ag หมายถึง ปริมาณ $AgNO_3$ ที่คำนวณให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของ Ag

งานวิจัยของ Zhang *et al.* ที่พบว่า แผ่นเมมเบรนที่มีเงินในปริมาณน้อย เวลาสัมผัส (Contact Time) 60 นาทีจะยับยั้งเชื้อได้มากกว่าเวลา 30 นาที ถึง 2 log [23]

เมื่อนำแผ่นกรอง FA-8M และแผ่นกรองต้านแบคทีเรีย FA-8M ไปทดสอบด้วยวิธี Disk Diffusion ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียเบื้องต้น พบว่าแผ่นกรองที่มี BKC จะยับยั้งเชื้อกลุ่มแกรมบวก (*S. aureus* และ *B. subtilis*) ยกเว้น *E. faecalis* ได้ดีกว่าเชื้อแกรมลบ ซึ่งต้องใช้ BKC อย่างน้อย 1% ในการยับยั้งการออกฤทธิ์ต่อกลุ่มเชื้อให้ผลสอดคล้องกับการใช้ BKC เคลือบสายสวนหัวใจ [24] ตรงข้ามกับ $AgNO_3$ ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งได้ดีกับแบคทีเรียรูปแท่งทั้งแกรมบวกและแกรมลบ (*E. coli*, *P. aeruginosa* และ *B. subtilis*) และใช้เพียง 0.1% ส่วน *S. aureus* และ *E. faecalis* ต้องใช้อย่างน้อย 0.5% (ตารางที่ 3) น่าสนใจว่าในการยับยั้ง *E. faecalis* ทั้งจากแผ่นกรองเชื้อและ Disk Diffusion ต้องใช้เปอร์เซ็นต์ Ag และ BKC มากกว่าเชื้ออื่นๆ อาจเนื่องจากเชื้อนี้มีขนาดเล็กกว่าเชื้ออื่น และขนาดของอนุภาคนาโนของสารต้านแบคทีเรียยิ่งเล็กยิ่งมีประสิทธิภาพดีในการเข้าและทำลายเชื้อ ดังนั้นจึงอาจต้องการสารและไอออนในปริมาณมากกว่าเชื้ออื่น [25]

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบสารต้านแบคทีเรียพบว่า $AgNO_3$ เป็นสารต้านแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้สูงกว่าการใช้ BKC เงินทั้งรูปแบบไอออนและอนุภาคนาโน จัดเป็นสารต้านจุลชีพที่มีประสิทธิภาพครอบคลุมการยับยั้งในช่วงกว้างทั้งแบคทีเรีย เชื้อราและไวรัส เป็นพิษน้อยต่อเซลล์มนุษย์ และมีฤทธิ์อยู่นาน [26], [27] การออกฤทธิ์โดยเงินไอออนจะไปทำลายโปรตีนและผนังเซลล์ของจุลชีพ ยับยั้งระบบการหายใจของเซลล์จุลชีพ ยับยั้งการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ และกระตุ้นโปรแกรมการตายของเซลล์ นอกจากปริมาณไอออนแล้ว ขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของอนุภาคนาโนล้วนมีผลต่อความเป็นพิษของเงิน [28]

นอกจากนี้การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนแผ่นกรองมีประสิทธิภาพสูงกว่า ใช้สารน้อยกว่าวิธี Disk Diffusion เนื่องจากสารต้านแบคทีเรียออกฤทธิ์โดยตรงกับเชื้อบนแผ่นกรอง (Direct Contact) ต่างจากวิธี Disk Diffusion ที่มีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง เช่นการแพร่ผ่านของสารต้านแบคทีเรียที่อยู่ใน Disk ไปในอาหารทดสอบ ถ้าสารต้านแบคทีเรียนั้น

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญของจุลชีพด้วยวิธี Disk Diffusion

ชื่อแผ่นกรอง	Inhibition Zone (mm) mean ± SD				
	E. coli	*S. aureus*	*P. aeruginosa*	*E. faecalis*	*B. subtilis*
FA-8M	8 ± 0	8 ± 0	8 ± 0	8 ± 0	8 ± 0
FA-8M + 0.1% BKC	8 ± 0	11 ± 0.4	8 ± 0	8 ± 0	13.3 ± 0.5
FA-8M + 0.5% BKC	8 ± 0	11.7 ± 0.5	8 ± 0	8 ± 0	15.5 ± 1.1
FA-8M + 1.0% BKC	12 ± 0	18.3 ± 0.5	10.5 ± 1.8	17 ± 0.8	21 ± 1.4
FA-8M + 1.5% BKC	13 ± 0	20.3 ± 0.8	10.8 ± 2.0	18.7 ± 0.5	22 ± 0.8
FA-8M + 2.0% BKC	15 ± 0.8	22.2 ± 0.6	12.7 ± 3.3	20.3 ± 0.5	24 ± 1.4
FA-8M + 0.1% Ag	9.3 ± 0.5	8.2 ± 0.2	10.2 ± 1.0	8 ± 0	9.3 ± 0.5
FA-8M + 0.5% Ag	12.5 ± 1.9	14.5 ± 0.7	14.7 ± 1.9	11.2 ± 1.0	11.3 ± 1.2
FA-8M + 1.0% Ag	13 ± 1.6	13.8 ± 0.8	15.3 ± 0.5	11.3 ± 1.0	12 ± 0.8
FA-8M + 1.5% Ag	14 ± 0.8	13.8 ± 0.8	15.5 ± 1.1	11.8 ± 0.8	13 ± 0.8
FA-8M + 2.0% Ag	14.5 ± 0.4	16.7 ± 0.2	17.5 ± 0.7	12.5 ± 0.7	14.3 ± 0.9

หมายเหตุ Inhibition Zone คำนวณจากค่าเฉลี่ยและ SD ในการทดลองสามครั้ง แผ่นกรองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm

สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ จะเห็นเป็น Inhibition Zone กว้างตามระยะทางของสารต้านจุลชีพที่แพร่ออกไปที่ยังคงมีความเข้มข้นพอที่จะยับยั้งเชื้อได้ ดังนั้นความสามารถในการซึมซับน้ำของแผ่นกรอง จึงมีผลต่อการละลายออกของสารต้านแบคทีเรีย

4. สรุป

แผ่นกรอง FA เป็นแผ่นกรองที่มีเส้นใยนาโนพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ผสมผสานกับเส้นใยนาโนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผลิตด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แผ่นกรอง FA-8M ที่มีความหนา 60±3 ไมโครเมตร มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.40 ไมโครเมตร มีความพรุน 70±3% มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าแผ่นกรอง PVDF สามารถกรองเชื้อแบคทีเรียได้ดีเทียบเท่าแผ่นกรองเชิงพาณิชย์ Nitrocellulose (Pore Size = 0.45 µm) อีกทั้งแผ่นกรอง FA-8M ที่มีสารต้านแบคทีเรีย ($AgNO_3$, BKC) ยังสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้ด้วย ดังนั้นแผ่นกรองชนิดนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อการประยุกต์ใช้ในการกรองให้ปลอดเชื้อทั้งของเหลว และอากาศ น่าจะช่วยยืดอายุการใช้งานของแผ่นกรอง และลดการสะสมของเชื้อที่อาจแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม อากาศหรือแหล่งน้ำได้อีก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ผ่าน วช) ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบ และภาควิชาจุลชีววิทยาคลินิกและเทคโนโลยีประยุกต์ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทดสอบการเจริญของแบคทีเรีย

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Gopal, S. Kaur, Z. Maa, C. Chanc, S. Ramakrishna, and T. Matsuura, “Electrospun nanofibrous filtration membrane,” *Journal of Membrane Science*, vol. 281, pp. 581–586, 2006.

[2] R. S. Barhatea and S. Ramakrishna, “Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials,” *Journal of Membrane Science*, vol. 296, pp. 1–8, 2007.

[3] R. S. Barhate, C. K. Loong, and S. Ramakrishna,

"Preparation and characterization of nanofibrous filtering media," *Journal of Membrane Science*, vol. 283, pp. 209–218, 2006.

[4] G. Ward, "Nanofibres: Media at the nanoscale," *Filtration and Separation*, vol. 42, pp. 22–24, 2005.

[5] C. Feng, K. C. Khulbe, T. Matsuura, S. Tabe, and A. F. Ismail, "Preparation and characterization of electrospun nanofiber membranes and their possible applications in water treatment," *Separation and Purification Technology*, vol. 102, pp. 118–135, 2013.

[6] G. M. Kim, G. H. Michler, and P. Potschke, "Deformation processes of ultrahigh porous multiwalled carbon nanotubes/polycarbonate composite fiber prepared by electrospinning," *Polymer*, vol.46, pp. 7346–735, 2005.

[7] D. Aussawasathien, C. Teerawattananon, and A. Vongachariya, "Separation of micron to sub-micron particles from water: Electrospun nylon-6 nanofibrous membranes as pre-filters," *Journal of Membrane Science*, vol. 315, pp. 11–19, 2008.

[8] Y. Sueyoshi, C. Fukushima, and M. Yoshikava, "Molecularly imprinted nanofiber membranes from cellulose acetate aimed for chiral separation," *Journal of Membrane Science*, vol. 357, pp. 90–97, 2010.

[9] Y. Tian, M. Wu, R. Liu, Y. Li, D. Wang, J. Tan, R. Wu, and Y. Huang, "Electrospun membrane of cellulose acetate for heavy metal ion adsorption in water treatment," *Carbohydrate Polymers*, vol. 83, pp. 743–748, 2011.

[10] F. Liu, N. A. Hashim, Y. Liu, M. R. Mogahareh Abed, and K. Li, "Progress in the production and modification of PVDF membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 375, pp. 1–27, 2011.

[11] L. Yuan, W. Rong, T. Miao, Q. Changquan, and G. F. Anthony, "Fabrication of polyvinylidene fluoride (PVDF) nanofiber membranes by electrospinning for direct contact membrane distillation," *Journal of Membrane Science*, vol. 425–426, pp. 30–39, 2013.

[12] G. D. Kang and Y. M. Cao, "Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes-A review," *Journal of Membrane Science*, vol. 463, pp. 145–165, 2014.

[13] A. M. Hamza, E. D. Alhtheal, and A. K. Shakir, "Enhancement the efficiency of ZnO nanofiber mats aantibacterial using Novel PVA/Ag nanoparticles," *Energy Procedia*, vol. 119, pp. 615–621, 2017.

[14] S.-S. Choi, Y. S. Lee, C. W. Joo, S. G. Lee, Jong K. Park, and K.-S. Han, "Electrospun PVDF nanofiber web as polymer electrolyte or separator," *Electrochimica Acta*, vol. 50, pp. 339–343, 2004.

[15] J. A. Prince, D. Rana, G. Singh, T. Matsuura, T. J. Kai, and T. S. Shanmugasundaram, "Effect of hydrophobic surface modifying macromolecules on differently produced PVDF membranes for direct contact membrane distillation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 242, pp. 387–396, 2014.

[16] S. Y. Lee, D. H. Jang, Y. O. Kang, O. B. Kim, L. Jeong, H. K. Kang, S. J. Lee, C. H. Lee, W. H. Park, and B. M. Min, "Cellular response to poly (vinyl alcohol) nanofibers coated with biocompatible proteins and polysaccharides," *Applied Surface*

Science, vol. 258, pp. 6914–6922, 2012.

[17] C. Chen, G. W. Nace, and P. L. Irwin, "A 6×6 drop plate method for simultaneous colony counting and MPN enumeration of Campylobacter jejuni, listeria monocytogenes, and escherichia coli," *Journal of Microbiological Methods*, vol. 55, pp. 475–479, 2003.

[18] F. E. Ahmed, B. S. Lalia, and R. Hashaikeh, "A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications," *Desalination*, vol. 356, pp. 15–30, 2015.

[19] Z. Zhu, W. Cui, X. Li, and Y. Jin, "Electrospun fibrous mats with high porosity as potential scaffolds for skin tissue engineering," *Biomacromolecules*. pp. 1795–1801, 2008.

[20] J. M. C. Puguan, H. S. Kim, K. J. Lee, and H. Kim, "Low internal concentration polarization in forward osmosis membranes with hydrophilic crosslinked PVA nanofibers as porous support layer," *Desalination*, vol. 336, pp. 24–31, 2014.

[21] Y. Zhao, Y. Zhou, X. Wu, L. Wang, L. Xu, and S. Wei, "A facile method for electrospinning of Ag nanoparticles/poly (vinyl alcohol)/ carboxymethyl-chitosan nanofibers," *Applied Surface Science*, vol. 258, pp. 8867–8873, 2012.

[22] J. A. Park, and S. B. Kim, "Antimicrobial filtration with electrospun poly(vinyl alcohol) nanofibers containing benzyl triethylammonium chloride: immersion, leaching, toxicity, and filtration tests," *Chemosphere*, vol. 167, pp. 469–477, 2017.

[23] L. Zhang, J. Luo, T. J. Menkhaus, H. Varadaraju, Y. Sun, and H. Fong, "Antimicrobial nano-fibrous membranes developed from electrospun polyacrylonitrite nanofibers," *Journal of Membrane Science*, vol. 369, pp. 499–505, 2011.

[24] G. Donelli and I. Francolini, "Efficacy of antiadhesive, antibiotic and antiseptic coatings in preventing catheter-related infections: Review," *Journal of Chemotherapy*, vol. 13, no. 6, pp. 595–606, 2001.

[25] V. Arumugam, S. K. Vasaviah, and R. Krishna, "The MIC and MBC of silver nanoparticles against enterococcus faecalis- A facultative anaerobe," *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*," vol. 6, no. 3, pp. 1–4, 2015.

[26] H. Bao, X. Yu, C. Xu, X. Li, Z. Li, D. Wei, and Y. Lui. (2015, March). New toxicity mechanism of silver nanoparticles: promoting appoptosis and inhibiting proliferation. *PLOS ONE* [Online]. *10 (3)*. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4378976

[27] R. B. Wakshlak, R. Pedahzur, and D. Avnir, "Antibacterial activity of silver-killed bacteria: The "Zombies" effect," *Science Reports*, vol. 5, no. 9555, April 2015.

[28] Y. H. Hsueh, K. S. Lin, W. J. Ke, C. T. Hsieh, C. L. Chiang, D. Y. Tzou, and S. T. Lui. (2015, December). The antimicrobial properties of silver nanoparticles in Bacillus subtilis are mediated by released Ag+ ions. *PLOS ONE*. [Online]. *10 (12)*. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4682921