ISSN 3027-6357 (Print)
ISSN 3027-6365 (Online)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี Homepage : http://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj
ปีที่ 32 ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม 2567) หน้า [84-97]

แผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/ไคโตซาน/คอลลาเจน ที่บรรจุอิริโทรมัยซินเพื่อใช้ทำแผ่นปิดแผลต้านเชื้อแบคทีเรีย

Erythromycin-Loaded Poly (Vinyl Alcohol)/Chitosan/ Collagen Electrospun Fiber Mats as Antibacterial Wound Dressings

นรากร แพ่งโยธา, พัชราภรณ์ วุฒิเจริญมงคล*
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120
Narakorn Paengyotha, Patcharaporn Wutticharoenmongkol*
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat School of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani 12120
Received 27 May 2023; Received in revised 18 June 2024; Accepted 27 June 2024

บทคัดย่อ

เส้นใยอิเล็กโตรสปันจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ไคโตซาน (CS) และคอลลาเจน (CG) ที่อัตราส่วนต่างกันและบรรจุอิริโทรมัยซิน (EM) ถูกขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงและเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เพื่อประยุกต์ใช้ทำแผ่นปิดแผล โดยศึกษาปัจจัยทางสารละลายที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี การปลดปล่อย EM การต้านอนุมูลอิสระ และการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย พบว่าเส้นใยนาโนที่ได้มีลักษณะเรียบ สม่ำเสมอ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 164 - 218 นาโนเมตร หลังการเชื่อมขวางส่งผลให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นอยู่ในช่วง 182 - 228 นาโนเมตร ในการทดสอบมุมสัมผัสของน้ำพบว่าเมื่ออัตราส่วน CG เพิ่มขึ้น หรือ PVA ลดลง แผ่นเส้นใยมีความชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการบวมตัวและน้ำหนักที่สูญเสียหลังถูกจุ่มแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.4) เพิ่มขึ้น โดยแผ่นเส้นใยมีการปลดปล่อยสะสมของ EM สูงสุดอยู่ในช่วง 51.6 - 73.1% และมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดอยู่ในช่วง 65 - 70% นอกจากนี้แผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ซึ่งเห็นได้ว่าแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG - EM ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ทำแผ่นปิดแผล

คำสำคัญ: พอลิไวนิลแอลกอฮอล์; ไคโตซาน; คอลลาเจน; อิริโทรมัยซิน; อิเล็กโตรสปินนิง; แผ่นปิดแผล

***ผู้รับผิดชอบบทความ:** tpatchar@engr.tu.ac.th

Science32-N6 1.indd 84 12/12/2567 BE 13:51

Abstract

Electrospun fibers composed of poly (vinyl alcohol) (PVA), chitosan (CS), and collagen (CG) at different ratios and encapsulating erythromycin (EM) were fabricated using the electrospinning technique and crosslinked with glutaraldehyde for potential wound dressing applications. This study investigated the solution factors influencing fiber morphology, physical and chemical properties, EM release characteristics, antioxidant activity, and antibacterial properties. The obtained nanofibers were smooth and uniform, with diameters ranging from 164 to 218 nm. After crosslinking, the fiber diameters increased to a range of 182 to 228 nm. Contact angle measurements showed higher hydrophilicity of the fiber mats with increasing CG content or decreasing PVA content, resulting in a higher degree of swelling and weight loss after immersion in a phosphate buffer solution (pH 7.4). The maximum cumulative release of EM ranged from 51.6% to 73.1%, while the maximum antioxidant activity ranged from 65% to 70%. Additionally, the electrospun fiber mats showed antibacterial activity against both *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. These findings indicate that the electrospun PVA/CS/CG - EM fiber mats possessed suitable properties for use as wound dressings.

Keywords: Poly (vinyl alcohol); Chitosan; Collagen; Erythromycin; Electrospinning; Wound dressings

Science32-N6 1.indd 85 12/12/2567 BE 13:51

1. บทนำ

อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) เป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพ ที่สามารถใช้ขึ้นรูปเส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ขนาดนาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร [1] โดยสมบัติของเส้นใยที่ได้จะมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรมาก มีรูพรุนสูง ซึ่งขนาดและสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ได้จะแตกต่างกัน [2] ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้น ค่าความหนืด และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย ชนิดตัวทำละลาย ความชื้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น [3-4]

การนำเส้นใยอิเล็กโตรสปันมาประยุกต์ใช้ในด้านแผ่นปิดแผลเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งแผ่นปิดแผลที่ดี ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ไม่ระคายเคืองผิว สามารถดูดซึมและกักเก็บสารคัดหลั่งที่ออกมาจากแผลได้ สามารถให้น้ำและแก๊สซึมผ่านได้ง่าย มีลักษณะเป็นฉนวนความร้อน มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย และกระตุ้นการหายของบาดแผลได้ โดยแผ่นปิดแผลมีหลายชนิด ได้แก่ ก๊อซ ผ้าตาข่าย ฟิล์ม โฟม ไฮโดรเจล รวมไปถึงแผ่นเส้นใยที่มีพื้นที่ผิวสูง [5-6] ซึ่งแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันมีสมบัติที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีขนาดเล็ก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ไคโตซาน (CS) และคอลลาเจน (CG) ซึ่ง PVA มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีสมบัติเชิงกลที่สูง มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และยังง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง [7-8] ส่วน CG เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง [9] โดย Zhang และคณะ [10] ศึกษาการขึ้นรูปและประสิทธิภาพการนำส่งยาซาลิไซลิกจากเส้นใย PVA/CG แล้วเชื่อมขวางด้วยรังสียูวีและไอระเหยของกลูตาราลดีไฮด์ (GTA) เพื่อลดความเสียหายของเส้นใยเมื่อสัมผัสกับน้ำ และลดระดับของการปลดปล่อยของยาที่มากเกิน หลังเชื่อมขวางพบว่าเส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และมีการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ CS เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย และมีประสิทธิภาพในการต้านทานอนุมูลอิสระและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย [11] Wang และคณะ [12] ทำการศึกษาขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันจาก CS และ PVA ที่อัตราส่วนต่างกัน พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย ได้แก่ PVA/CS 50:50 ซึ่งแผ่นเส้นใยนี้ยังมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย นอกจากนี้จะทำการบรรจุอิรีโทรมัยซิน (EM) เข้าไปในแผ่นเส้นใยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย เนื่องจาก EM มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบ [13] Darbasizadeh และคณะ [14] ศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยจาก PVA คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และอนุภาคนาโนของเงิน โดยทำการบรรจุ EM แล้วทำการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยไอระเหยของ GTA และสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโนของเงินและ EM ส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย อีกทั้งแผ่นเส้นใยยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันจาก PVA CS และ CG ที่บรรจุ EM เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติของเส้นใยเพื่อประยุกต์ใช้ทำแผ่นปิดแผลต้านเชื้อแบคทีเรีย

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA; ระดับไฮโดรไลซิส 95.5 - 96.5%, น้ำหนักโมเลกุล 85,000 - 124,000 กรัม/โมล), ไคโตซาน (CS, น้ำหนักโมเลกุล 60,000 - 800,000 กรัม/โมล), กลูตาราลดีไฮด์ (GTA, 25% ในน้ำ) และอิรีโทรมัยซิน (EM, 98%) จาก ACROS Organics ประเทศสหรัฐอเมริกา, คอลลาเจน (CG, ของเหลวจากแกะ) จากเคมีภัณฑ์, เมทานอล (CH_3OH) จาก CARLO ERBA

Science32-N6 1.indd 86 12/12/2567 BE 13:51

Reagents ประเทศอิตาลี และ 2, 2 diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) จาก Sigma-aldrich ประเทศเยอรมนี

2.2 การขึ้นรูปแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

เตรียมสารละลาย PVA 10% โดยมวลต่อปริมาตร ที่ 80°C ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย สารละลาย CS 1% โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้กรดอะซิติก 0.1 M เป็นตัวทำละลาย ที่ 45°C จากนั้นผสมสารละลาย PVA CS และ CG ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 เติม EM 0.1% โดยมวล กวนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยนำสารละลายใส่ในหลอดพลาสติกที่ติดกับเข็มโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.90 มิลลิเมตร ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายไฟ Gamma High-Voltage Research (ES30P-5W) ขนาด 20 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างเข็มโลหะกับอุปกรณ์เก็บเส้นใย 15 เซนติเมตร โดยใช้อุปกรณ์เก็บเส้นใยแบบหมุนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที และใช้เวลาฉีดเส้นใย 10 ชั่วโมง

Table 1 The compositions of polymer solution in 100 grams.

Samples	Weight percent (wt%)			
	PVA	CS	CG	EM
PVA/CS/CG 6/3/1	60	30	10	-
PVA/CS/CG 6/1/3	60	10	30	-
PVA/CS/CG 7/2/1	70	20	10	-
PVA/CS/CG 7/1/2	70	10	20	-
PVA/CS/CG - EM 6/3/1	60	30	10	0.1
PVA/CS/CG - EM 6/1/3	60	10	30	0.1
PVA/CS/CG - EM 7/2/1	70	20	10	0.1
PVA/CS/CG - EM 7/1/2	70	10	20	0.1

2.3 การวัดความหนืด ความนำไฟฟ้า และแรงตึงผิวของสารละลาย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM

วัดความหนืดของสารละลายด้วยหลอดแก้ว Cannon-Fenske Routine ขนาด 450 มีค่าคงที่ 2.351 cSt/s ที่อุณหภูมิ 40°C วัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า Lutron CD-4318SD ที่อุณหภูมิ 25°C และวัดแรงตึงผิวของสารละลายด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (DataPhysics, OCA25) ที่อุณหภูมิ 25°C

2.4 การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันมาเชื่อมขวางด้วยสารละลาย GTA โดยวางแผ่นเส้นใยทิ้งไว้ในภาชนะปิดที่อิ่มตัวด้วยไอระเหยของ GTA ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วางแผ่นเส้นใยทิ้งไว้ในตู้ดูดไอระเหย 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัด GTA ที่หลงเหลืออยู่

2.5 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันที่ไม่เติมและเติม EM ก่อนและหลังการเชื่อมขวางมาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยถูกวัดจากภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Image J โดยแต่ละตัวอย่างจะทำการสุ่มวัดจำนวน 100 จุด รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Science32-N6 1.indd 87 12/12/2567 BE 13:51

2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันก่อนและหลังเชื่อมขวางมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (FT-IR) โหมด universal attenuated total reflectance (UATR) และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใยก่อนและหลังเติม EM โดยใช้เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปี (^{1}H-NMR) (Bruker, Ascend TM 600/ Advance III) ที่ 600 MHz โดยใช้ deuterated dimethyl sulfoxide (DMSO-d6) เป็นตัวทำละลาย

2.7 การทดสอบมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของแผ่นเส้นใยและฟิล์ม PVA/CS/CG-EM

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันและแผ่นฟิล์มที่มีองค์ประกอบเหมือนกับแผ่นเส้นใยซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อด้วยตัวทำละลาย (solvent-casting) มาศึกษาคุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) โดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส (DataPhysics, OCA25)

2.8 การศึกษาน้ำหนักที่สูญเสียและการบวมน้ำของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันมาศึกษาการบวมน้ำ (Swelling) และน้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) โดยเตรียมแผ่นเส้นใยขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น (M_i) จุ่มแช่ลงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.4) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการทดลองที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37°C บันทึกน้ำหนักเปียกของแผ่นเส้นใย (M) แล้วอบแผ่นเส้นใยที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นบันทึกน้ำหนักของแผ่นเส้นใยหลังจากอบแห้ง (M_d) โดยระดับการบวมตัวและน้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Degree of swelling (\%)} = \left(\frac{M - M_i}{M}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Weight loss (\%)} = \left(\frac{M_i - M_d}{M_i}\right) \times 100 \quad (2)$$

2.9 การศึกษาการปลดปล่อยยาอิริโทรมัยซิน (EM) จากแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

ทำการศึกษาการปลดปล่อย EM จากแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันโดยเตรียมแผ่นเส้นใยแล้วบันทึกน้ำหนักเริ่มต้น วางแผ่นเส้นใยลงบน Franz cell ที่บรรจุสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.4) ที่อุณหภูมิ 37°C ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เก็บสารละลายตัวอย่างบัฟเฟอร์ในช่วงเวลา 0 - 2880 นาที มาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี-วิสิเบิล (Hanon, I3) ที่ 215 นาโนเมตร ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของ EM ที่ปลดปล่อยออกมาโดยเปรียบเทียบกับกราฟคาลิเบรชันระหว่างความเข้มข้นสารละลาย EM และค่าการดูดกลืนแสง การปลดปล่อย EM สะสมสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$\text{Cumulative drug release (\%)} = \left(\frac{C_t}{C_{total}}\right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ C_{total} คือปริมาณ EM เริ่มต้น และ C_t คือปริมาณ EM ที่ปลดปล่อยสะสมในช่วงเวลา 0 - 2880 นาที

2.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

เตรียมแผ่นเส้นใยวางลงบน Franz cell ที่บรรจุสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.4) ที่อุณหภูมิ 37°C ปริมาณ 9 มิลลิลิตร เก็บสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ที่เวลา 1, 2, 4 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับ นำไปผสมกับสารละลาย 0.5 mM DPPH ในเมทานอล ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ในขณะเดียวกันเตรียมสารละลายควบคุม (control) คือ สารละลาย DPPH ปริมาตร 4 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บสารละลายตัวอย่างและสารละลายควบคุมในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระของแผ่นเส้นใยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$\text{Antioxidant (\%)} = \left(\frac{A_{control} - A_{sample}}{A_{control}}\right) \times 100 \quad (4)$$

โดย $A_{control}$ และ A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายควบคุมและสารละลายตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ตามลำดับ

Science32-N6 1.indd 88 12/12/2567 BE 13:51

2.11 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

ศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันด้วยวิธี Agar disc diffusion โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 10x10 ตารางมิลลิเมตร วางบนจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS L1902) โดยวัดระยะการต้านเชื้อ (Zone of inhibition) ที่เกิดขึ้น

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของความหนืด ความนำไฟฟ้า และแรงตึงผิวของสารละลาย

ค่าความหนืด ความนำไฟฟ้า และแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับค่าความหนืดพบว่าเมื่ออัตราส่วนคอลลาเจนเพิ่มมากขึ้น (เช่น PVA/CS/CG 6/3/1 และ 6/1/3) ค่าความหนืดของสารละลายจะลดลงทั้งกรณีสารละลายที่เติมและไม่เติม EM สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพบว่าสารละลายที่ผสม EM มีค่าความนำไฟฟ้ามากกว่าสารละลายที่ไม่ผสม EM โดยสารละลาย PVA/CS/CG - EM ที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.753 - 0.820 mS/cm ในขณะที่สารละลาย PVA/CS/CG ที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าความนำไฟฟ้าต่ำกว่าอยู่ในช่วง 0.700 - 0.783 mS/cm ในส่วนของแรงตึงผิวพบว่าเมื่อปริมาณคอลลาเจนเพิ่มขึ้น (เช่น PVA/CS/CG 7/2/1 และ 7/1/2) จะส่งผลให้แรงตึงผิวลดลงทั้งกรณีสารละลายที่เติมและไม่เติม EM

Table 2 The viscosity, electrical conductivity, and surface tension of polymer solutions and the average fiber diameters of electrospun fiber mats.

Samples	Viscosity (cSt)	Electrical Conductivity (mS/cm)	Surface tension (mN/m)	Average fiber diameters (nm)
PVA/CS/CG 6/3/1	71.40 ± 1.13	0.747 ± 0.006	52.70 ± 0.30	164 ± 53
PVA/CS/CG 6/1/3	45.26 ± 0.92	0.783 ± 0.015	49.67 ± 0.29	157 ± 57
PVA/CS/CG 7/2/1	93.01 ± 0.71	0.700 ± 0.010	52.33 ± 0.14	169 ± 50
PVA/CS/CG 7/1/2	83.99 ± 1.95	0.730 ± 0.010	50.36 ± 0.43	166 ± 32
PVA/CS/CG - EM 6/3/1	73.62 ± 0.16	0.790 ± 0.010	50.91 ± 0.34	176 ± 86
PVA/CS/CG - EM 6/1/3	48.29 ± 0.37	0.820 ± 0.020	48.29 ± 0.20	164 ± 55
PVA/CS/CG - EM 7/2/1	102.00 ± 0.19	0.753 ± 0.015	51.16 ± 0.10	218 ± 80
PVA/CS/CG - EM 7/1/2	84.86 ± 0.55	0.760 ± 0.010	49.66 ± 0.21	196 ± 51

3.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM

ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG - EM ที่อัตราส่วนแตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 1 แผ่นเส้นใยทั้งที่ไม่เติมและเติม EM ที่อัตราส่วน 7/2/1 และ 7/1/2 มีลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีเม็ดปม ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่อัตราส่วน 6/3/1 และ 6/1/3 มีลักษณะพื้นผิวเรียบเช่นเดียวกัน แต่มีเม็ดปมเกิดขึ้นเล็กน้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยแสดงในตารางที่ 2 และในรูปที่ 1

จากการทดสอบค่าความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า ค่าแรงตึงผิวของสารละลาย และการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ

Science32-N6 1.indd 89 12/12/2567 BE 13:51

คอลลาเจนเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายและแรงตึงผิวมีค่าลดลง ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง เช่น PVA/CS/CG 6/3/1 และ 6/1/3 มีค่าความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายลดลงจาก 71.40 เป็น 45.26 cSt และ 52.70 เป็น 49.67 mN/m ตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าลดลงจาก 164 ± 53 เป็น 157 ± 57 นาโนเมตร เนื่องจากเมื่อความหนืดลดลงจะส่งผลให้แรงวิสโคอิลาสติกซึ่งมีเป็นแรงต้านการยืดของเส้นใยมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับแรงตึงผิว เมื่อแรงต้านการดึงยืดมีค่าลดน้อยลง พอลิเมอร์สามารถดึงยืดได้มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลง [15-16] นอกจากนี้แผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันที่เติม EM มีแนวโน้มเช่นเดียวกับแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้เติม EM นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เติม EM มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่ไม่เติม EM เนื่องจากสารละลายที่เติม EM มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าสารละลายที่ไม่เติม EM (ตารางที่ 2) เมื่อค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) และแรงคูลอมบิก (Coulombic force) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น [17]

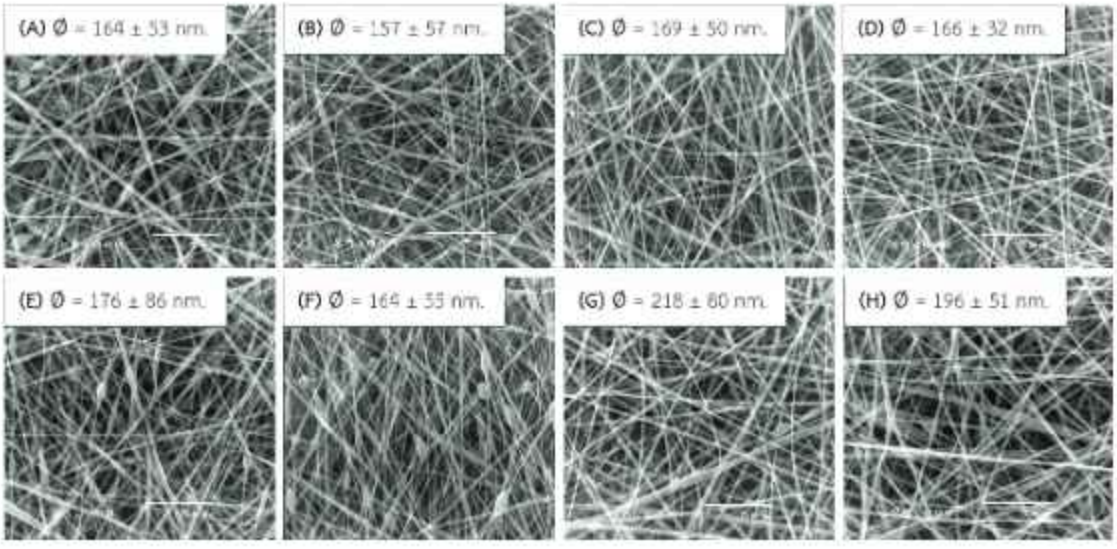

Figure 1 SEM images and average diameters (Ø) of the electrospun fiber mats before crosslinking of PVA/CS/CG at different ratios of (A) 6/3/1, (B) 6/1/3, (C) 7/2/1, (D) 7/1/2 and PVA/CS/CG - EM at ratios of (E) 6/3/1, (F) 6/1/3, (G) 7/2/1, and (H) 7/1/2. (A scale bar of 5 μm)

นอกจากนี้เมื่อทำการเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 ด้วยไอระเหย GTA และนำมาตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแสดงดังรูป พบว่าเส้นใยอิเล็กโตรสปันมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังจากทำการเชื่อมขวาง และมีจุดเชื่อมกันของเส้นใยในหลาย ๆ จุด ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย

Science32-N6 1.indd 90 12/12/2567 BE 13:51

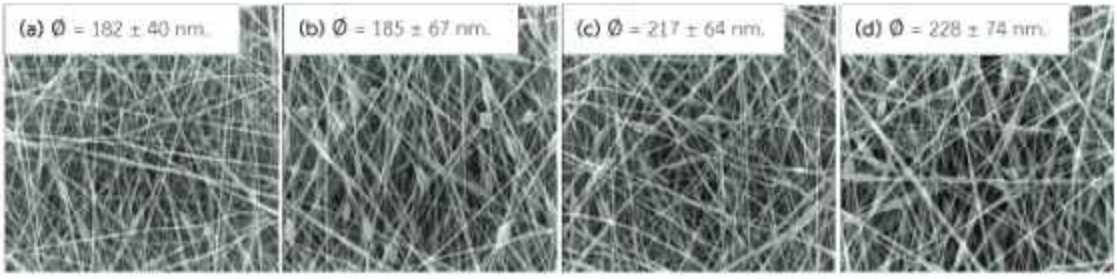

Figure 2 SEM images and average diameter (Ø) of the electrospun fiber mats crosslinking with glutaraldehyde of PVA/CS/CG - EM (a) 6/3/1, (b) 6/1/3, (c) 7/2/1, (d) 7/1/2. (A scale bar of 5 μm)

3.3 องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG และ PVA/CS/CG-EM

3.3.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (FT-IR)

แผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG - EM ก่อนและหลังถูกเชื่อมขวาง รวมถึงสารละลาย GTA ถูกนำมาทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อยืนยันว่าหลังจากทำการเชื่อมขวางแล้ว ไม่มี GTA หลงเหลืออยู่ในเส้นใย ปรากฏสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 3 โดย GTA เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3357, 2958 และ 1641 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของ O-H stretching, C-H stretching และ C = O stretching ตามลำดับ แผ่นเส้นใยที่ทำการเชื่อมขวางและไม่ได้เชื่อมขวางแสดงสเปกตรัมที่ตำแหน่งคล้ายคลึงกัน พบพีคที่ตำแหน่ง 3336, 2928, 1732, 1429 และ 1089 cm^{-1} ตรงกับตำแหน่งของ N-H และ O-H stretching, C-H stretching, C = O stretching, O-H bending และ C-O-H stretching ตามลำดับ ถึงแม้ว่าแผ่นเส้นใยจะเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2928 (C-H stretching) และ 1732 cm^{-1} (C = O stretching) แต่ตำแหน่งของ GTA ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2958 และ 1641 cm^{-1} กล่าวได้ว่าแผ่นเส้นใยหลังเชื่อมขวางไม่มี GTA หลงเหลืออยู่

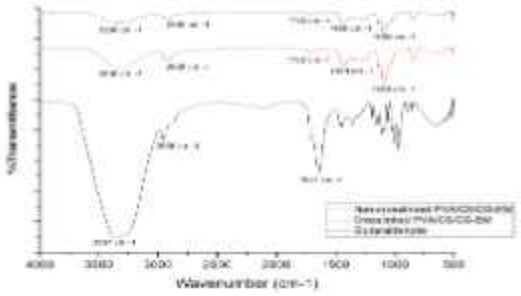

Figure 3 Spectra of FT-IR of non-crosslinked and crosslinked of PVA/CS/CG - EM electrospun nanofiber mats and glutaraldehyde solution.

3.3.2 เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปี (^{1}H-NMR)

เนื่องจากการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันเป็นการขึ้นรูปที่ผ่านการใช้สักย์ไฟฟ้าแรงสูง จึงอาจทำให้เกิดข้อสงสัยได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของสารต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวยา EM ที่เติมลงไปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดการเสียสภาพหรือไม่ จึงทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใยก่อนและหลังเติม EM และผง EM ด้วยวิธี ^{1}H-NMR โดยรูปที่ 4(a) แสดงสเปกตรัมของผง EM บริสุทธิ์ โดยรายละเอียดของแต่ละพีคสามารถพิจารณาได้จากงานวิจัยของ Bertha และคณะ [18] รูปที่ 4(b) สเปกตรัมของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG 7/2/1 และ 4(c) สเปกตรัมของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 7/2/1 พบว่าเมื่อเติม EM ลง

Science32-N6 1.indd 91 12/12/2567 BE 13:51

ในแผ่นเส้นใย (รูป 4(c)) พบพีคที่ตำแหน่ง 1.0, 2.3 และ 3.2 ppm ซึ่งเป็นพีคของ EM ซึ่งแตกต่างจากแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้เติม EM (รูป 4 (b)) แสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบของ EM อยู่จริงในแผ่นเส้นใยหลังจากการเติม แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่กล่าวไปข้างต้นมีพื้นที่ใต้พีคต่ำ เนื่องจาก EM ในแผ่นเส้นใยมีปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำมาก

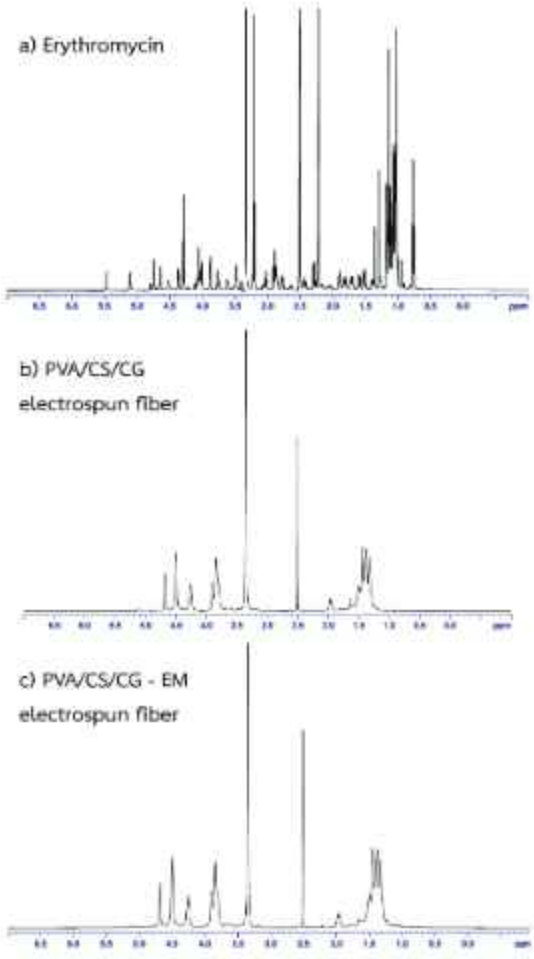

Figure 4 Spectra of ^{1}H-NMR of EM powder and electrospun fiber mats of PVA/CS/CG and PVA/CS/CG - EM.

3.4 มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นเส้นใยและฟิล์ม PVA/CS/CG-EM

จากการทดสอบมุมสัมผัสของน้ำของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 พบว่าหยดน้ำซึมลงบนเส้นใยอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นว่าเส้นใยทุกชนิดมีความชอบน้ำมาก และไม่สามารถหามุมสัมผัสของผิวน้ำจากแผ่นเส้นใยได้ อาจเนื่องจากแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันมีรูพรุนขนาดเล็กและเป็นรูที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected pore) อาจมีแรงคาพิลลารี (Capillary force) มาเกี่ยวข้องด้วย จึงนำแผ่นฟิล์มที่มีองค์ประกอบเดียวกันกับแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันมาทดสอบเพื่อศึกษาความชอบน้ำของวัสดุโดยแท้จริง พบว่ามุมสัมผัสของผิวน้ำของแผ่นฟิล์ม PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 คือ 64.8 ± 3.7°, 44.1 ± 0.1°, 89.2 ± 1.5° และ 85.5 ± 2.0° ตามลำดับ พบว่าแผ่นฟิล์มทุกตัวอย่างมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า 90° ซึ่งแสดงถึงความชอบน้ำเช่นเดียวกับเส้นใยที่ใช้วัสดุเดียวกัน

3.5 การบวมน้ำและน้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

จากการศึกษาพบว่าระดับการบวมน้ำและน้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 เพิ่มขึ้นทุกตัวอย่างเมื่อเวลามากขึ้น โดยรูปที่ 5(a) แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของแผ่นเส้นใยที่เวลา 2 ชั่วโมง คือ 252, 281, 241 และ 252% ตามลำดับ และที่เวลา 24 ชั่วโมง คือ 257, 291, 246 และ 270% ตามลำดับ และรูป 5(b) แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นเส้นใยที่เวลา 2 ชั่วโมง คือ 45, 57, 35 และ 43% ตามลำดับ และที่เวลา 24 ชั่วโมง คือ 72, 78, 59 และ 65% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1 กับ 6/1/3 และ PVA/CS/CG - EM 7/2/1 กับ 7/1/2 พบว่าแนวโน้มของการบวมตัวและน้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นเส้นใยเป็นไปในทางเดียวกัน เมื่ออัตราส่วนคอลลาเจนเพิ่มขึ้น แผ่นเส้นใยมีความชอบน้ำมากขึ้นจากการทดสอบ

Science32-N6 1.indd 92 12/12/2567 BE 13:51

มุมสัมผัสของผิวน้ำ ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำและน้ำหนักที่สูญเสียสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Laiprasert และคณะ [19] นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น แผ่นเส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีความชอบน้ำลดลง ทำให้มีการบวมตัวและน้ำหนักที่สูญเสียลดลงด้วยเช่นกัน

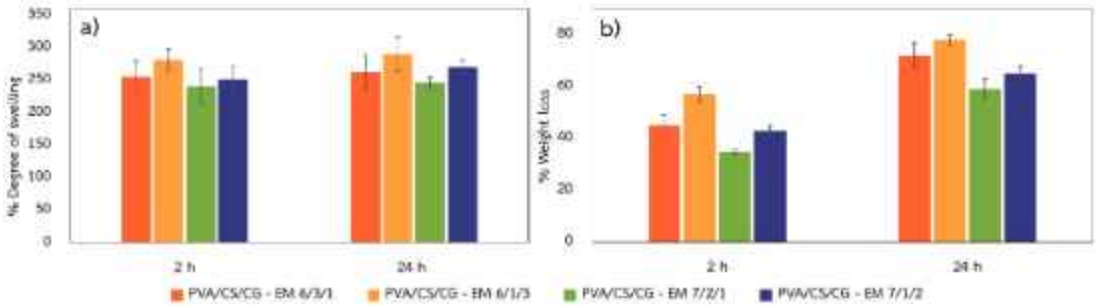

Figure 5 (a) The degree of swelling and (b) weight loss of the electrospun nanofiber mats at 2 and 24 h.

3.6 ลักษณะการปลดปล่อยยาอิริโทรมัยซินของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

ลักษณะการปลดปล่อยของยา EM จากแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 ถูกศึกษาในช่วงระยะเวลา 48 ชั่วโมง (0 - 2880 นาที) ปริมาณการปลดปล่อย EM สะสม แสดงดังรูปที่ 6 ในช่วงเริ่มต้นแผ่นเส้นใยทุกชนิดมีการปลดปล่อย EM อย่างรวดเร็ว และมีการปลดปล่อยสะสมของ EM เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงช่วงเวลา 720 นาที หลังจากนั้นแผ่นเส้นใยจะเริ่มเข้าสู่การปลดปล่อยยาช้า ๆ และค่อนข้างคงที่ โดยการปลดปล่อยสะสมสูงสุดของ EM จากแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 คือ 67.2 ± 0.1, 73.1 ± 0.6, 51.6 ± 0.3 และ 56.6 ± 0.7% ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ CG เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การปลดปล่อยสะสมของ EM เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับลักษณะความชอบน้ำและน้ำหนักที่สูญเสียของแผ่นเส้นใย เนื่องจากแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG -EM 6/1/3 มีความชอบน้ำและน้ำหนักที่สูญเสียมากกว่า PVA/CS/CG - EM 6/3/1 ทำให้มีปริมาณของ EM ที่ถูกปลดปล่อยมากกว่า เช่นเดียวกันกับแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG 7/1/2 ที่มีปริมาณการปลดปล่อยสะสมของ EM มากกว่าแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 7/2/1 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วน PVA ลดลงจะส่งผลให้การปลดปล่อยสะสมของของ EM เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

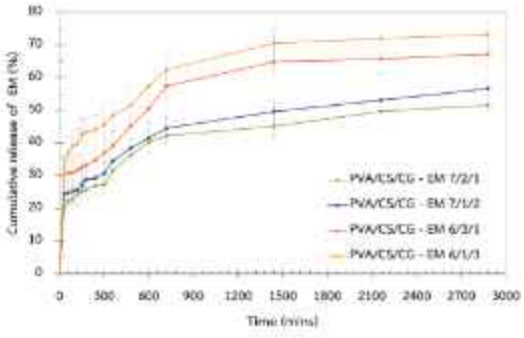

Figure 6 The cumulative release percentage of EM from electrospun nanofiber mats.

3.7 ประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

ประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG - EM ถูกทดสอบด้วยวิธี DPPH assay พบว่าแผ่นเส้นใยทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ และเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของแผ่นเส้นใยก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 7

Science32-N6 1.indd 93 12/12/2567 BE 13:51

Figure 7 The antioxidant activity of electrospun nanofiber mats by DPPH assay

ระดับการต้านอนุมูลอิสระของแผ่นเส้นใยที่เวลา 1, 2, 4 และ 24 ชั่วโมงของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1 คือ 23 ± 3, 37 ± 2.3, 49 ± 1.2 และ 67 ± 1.0% ตามลำดับ แผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/1/3 คือ 17 ± 1.4, 34 ± 1.2, 47 ± 1.1 และ 65 ± 0.5% ตามลำดับ แผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 7/2/1 คือ 24 ± 1.0, 44 ± 1.7, 53 ± 0.8 และ 70 ± 1.1% ตามลำดับ และแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 7/1/2 คือ 21 ± 1.7, 43 ± 2.2, 51 ± 1.8 และ 66 ± 0.6% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเส้นใยที่มีอัตราส่วนองค์ประกอบพอลิเมอร์แตกต่างกันพบว่าประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณการปลดปล่อย EM อาจกล่าวได้ว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระอาจไม่ได้มาจาก EM แต่เป็นผลมาจากชนิดของพอลิเมอร์ กล่าวคือผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่มีอัตราส่วนของ CS มากกว่าจะมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าเส้นใยที่มีอัตราส่วนของ CS น้อยกว่า [20] อาทิเช่น เส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1 มีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 23 - 67% แต่ PVA/CS/CG - EM 6/1/3 อยู่ในช่วง 17 - 65% เช่นเดียวกันกับเส้นใย PVA/CS/CG - EM 7/2/1 มีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 24 - 70% ในขณะที่ PVA/CS/CG - EM 7/1/2 มีค่าอยู่ในช่วง 21 - 66%

3.8 ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG-EM

ประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปันถูกศึกษาด้วยวิธี Agar disc พบว่าแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG 7/2/1 ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง *S. aureus* และ *E. coli* แสดงดังรูปที่ 8(a) ส่วนแผ่นเส้นใยที่บรรจุ EM สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง *S. aureus* และ *E. coli* แสดงดังรูปที่ 8(b) และ (c) ตามลำดับ

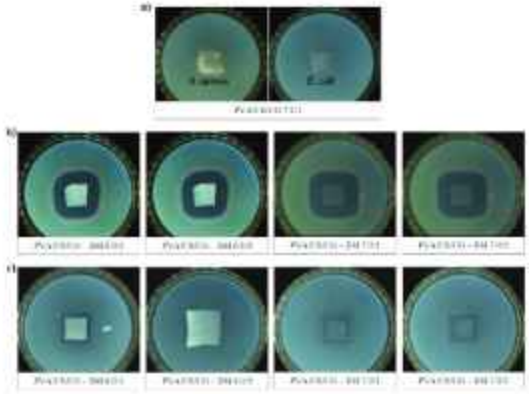

Figure 8 The antibacterial activity of a) PVA/CS/CG 7/2/1 against *S. aureus* and *E. coli* b) various ratios of PVA/CS/CG - EM against *S. aureus* and c) various ratios of PVA/CS/CG - EM against *E. coli*.

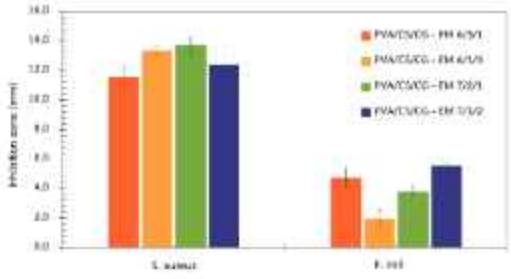

Figure 9 The size of inhibition zone of the electrospun nanofiber mats against *S. aureus* and *E. coli*.

Science32-N6 1.indd 94 12/12/2567 BE 13:51

รูปที่ 9 แสดงระยะการต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ของแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 คือ 11.57 ± 0.67, 13.33 ± 0.28, 13.70 ± 0.53 และ 12.40 ± 0.53 มิลลิเมตร ตามลำดับ และระยะการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* คือ 4.74 ± 0.68, 1.97 ± 0.55, 3.75 ± 0.36 และ 5.55 ± 0.36 มิลลิเมตรตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM ทุกชนิดมีประสิทธิภาพในด้านเชื้อแบคทีเรียค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *S. aureus* ได้มากกว่า *E. coli* ในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ Darbasizadeh et al. [11] ซึ่งพบระยะต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* เมื่อใช้แผ่นเส้นใย PVA/CMC ที่บรรจุ EM เท่ากับ 19.6 มิลลิเมตร โดยมีขนาดใหญ่กว่าระยะต้านเชื้อ *E. coli* ที่ 14.4 มิลลิเมตร ทั้งนี้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ค่อนข้างมากอาจมาจากปริมาณของ EM ที่บรรจุ 5% โดยมวล ซึ่งมากกว่าในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองนี้กล่าวได้ว่าแผ่นเส้นใยมีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบซึ่งเป็นหนึ่งในคุณสมบัติของแผ่นปิดแผลที่พึงมี ดังนั้นแผ่นเส้นใย PVA/CS/CG - EM จึงเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านแผ่นปิดแผลต่อไป

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PVA/CS/CG - EM 6/3/1, 6/1/3, 7/2/1 และ 7/1/2 เพื่อประยุกต์ใช้ทำแผ่นปิดแผล ได้ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา คุณสมบัติ และประสิทธิภาพของแผ่นเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ได้มีผิวเรียบ สม่ำเสมอ เมื่ออัตราส่วนของ CG เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง เมื่อนำแผ่นเส้นใยมาเชื่อมขวางด้วย GTA ทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยใหญ่ขึ้นจาก 164 - 218 เป็น 182 - 228 นาโนเมตร และเมื่ออัตราส่วนของ CG เพิ่มขึ้น หรืออัตราส่วน PVA ลดลง แผ่นเส้นใยมีความชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการบวมตัวและน้ำหนักที่สูญเสียสูงขึ้น ทำให้มีปริมาณของ EM ที่ถูกปลดปล่อยออกจากแผ่นเส้นใยมากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้แผ่นเส้นใยยังมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระและการต้านเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย กล่าวได้ว่าแผ่นเส้นใยทุกอัตราส่วนข้างต้นมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ทำแผ่นปิดแผลต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนเงินทุนการศึกษาและเงินทุนวิจัย รวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือวิจัยและสถานที่วิจัย และหน่วยวิจัยด้านรีโอโลยีและกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

6. References

[1] Lee J.K.Y., Chen N., Peng S., Li L., Tian L., Thakor N et al.,2018, Polymer-based composites by electrospinning: Preparation & functionalization with nanocarbons, Prog. Polym. Sci. 86: 40-84. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2018.07.002

[2] Ju T., Gaisford S., Williams GR., 2024, Ciprofloxacin-loaded electrospun nanofibres for antibacterial wound dressings, J. Drug Delivery Sci. Technol. 91.

[3] Drosou C, Krokida M., & Biliaderis CG, 2018, Composite pullulan-whey protein nanofibers made by electrospinning: impact of process parameters on fiber morphology and physical properties, Food Hydrocoll. 77: 726-735.

Science32-N6 1.indd 95 12/12/2567 BE 13:51

[4] Kopp A., Smeets R., Gosau M., et al., 2020, Effect of process parameters on additive-free electrospinning of regenerated silk fibroin nonwovens, Bioact Mater. 5: 241-252.

[5] Khorasani M. T., Joorabloo A., Moghaddam A., Shamsi H. & Mansoorimoghadam Z., 2018, Incorporation of ZnO nanoparticles into heparinised polyvinyl alcohol/ chitosan hydrogels for wound dressing application, Int. J. Biol. Macromol. 114: 1203-1215.

[6] Liang Y., He J., Guo B., 2021, Functional Hydrogels as Wound Dressing to Enhance Wound Healing, ACS Nano. 15(8): 12687-722.

[7] Onsri P., Janwised S., Chatkumpjunjalearn T., Kraisuwan W., 2024, Fabrication and characterization of chitosan derivative-poly (vinyl alcohol) blend films for food packaging applications, Thai Sci. Technol. J. 32(1): 33-48 (in Thai)

[8] Jia, Y. T., Gong, J., Gu, X. H., Kim, H. Y., Dong, J., & Shen, X. Y., 2007, Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method, Carbohydr. Polym. 67(3): 403-409.

[9] Ottania V., Raspantib M. & Ruggeria A., 2001 Collagen structure and functional implications, Micron. 32: 251-260

[10] Zhang X., Tang K., Zheng X., 2016, Electrospinning and crosslinking of COL/ PVA Nanofiber-microsphere Containing Salicylic Acid for Drug Delivery, J. Bionic Eng. 13(1): 143-9.

[11] Phromchan W., Rugkong., Chiarawipa R., 2022, Effects of chitosan films and temperature on shelf life of kratom (Mitragyna speciosa (Korth.) Havil) leaves, Thai Sci. Technol. J. 30(5): 80-91 (in Thai)

[12] Wang M., Roy AK., Webster TJ., 2016, Development of Chitosan/Poly (Vinyl Alcohol) Electrospun Nanofibers for Infection Related Wound Healing, Front Physiol. 7:683.

[13] J. H., Liang & Han X., 2013, Structure-activity relationships and mechanism of action of macrolides derived from erythromycin as antibacterial agents, Curr. Top. Med. Chem. 13(24): 3131-3164.

[14] Darbasizadeh B., Fatahi Y. Feyzi-Barnaji B. Arabi M., Motasadizadeh H., Farhadnejad H., et al.,2019, Crosslinked-polyvinyl alcohol-carboxymethyl cellulose/ZnO nanocomposite fibrous mats containing erythromycin (PVA-CMC/ZnO-EM): Fabrication, characterization and in-vitro release and anti-bacterial properties, Int J Biol Macromol. 141:1137-46.

[15] Thairin T, Wutticharoenmongkol P., 2021, Ciprofloxacin-loaded alginate/poly (vinyl alcohol)/gelatin electrospun nanofiber mats as antibacterial wound dressings, J. Ind. Text. 51(1_suppl): 1296S-322S.

[16] Sukmongkolwongs C., Sawasiticher P., Wutticharoenmongkol P., 2024, Electrospun Cellulose Acetate Nanofibers Containing Clinacanthus nutans (Phayayo) Crude Extract as Potential Wound Dressings, J. C. Sci. Tech. 14(1).

Science32-N6 1.indd 96 12/12/2567 BE 13:51

[17] Wang M., Wang L., Huang Y., 2007, Electrospun Hydroxypropyl Methyl Cellulose Phthalate (HPMCP)/ Erythromycin Fibers for Targeted Release in Intestine, J. Appl. Polym. Sci. 106:2177-2184. doi: 10.1002/app.25666.

[18] Bertho G., Ladam P., Gharbi-Benarous J., Delaforge M., Girault J., 1998, Solution conformation of methylated macrolide antibiotics roxithromycin and erythromycin using NMR and molecular modelling. Ribosome-bound conformation determined by TRNOE and formation of cytochrome P450-metabolite complex, Int. J. Biol. Macromol. 22:103-127.

[19] Laiprasert A, Thungrit W,Wutticharoenmongkol P., 2022, Chitosan/Poly (vinyl alcohol)/ Collagen hydrogel composites containing jackfruit axis extract for wound dressing application, Interdiscip. Res. Rev. 17(6): 1-8.

[20] Wan J, Jiang F, Xu Q, Chen D, Yu B, Huang Z, et al., 2017, New insights into the role of chitosan oligosaccharide in enhancing growth performance, antioxidant capacity, immunity and intestinal development of weaned pigs, RSC Advances. 7(16): 9669-79.

Science32-N6 1.indd 97 12/12/2567 BE 13:51