



## เส้นใยนาโนและการประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากอนามัย

ดร.ภญ.นวินดา ชินะตั้งกูร และ นศภ.ร่มฟ้า บุญสุข

คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

รหัสกิจกรรม: 1014-1-000-002-04-2564

วันที่รับรอง: 8 เมษายน 2564

วันที่หมดอายุ: 7 เมษายน 2565

จำนวนหน่วยกิต: 2

### บทคัดย่อ:

ในช่วงที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบปัญหาจากมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และปัญหาจากโรคระบาดของไวรัสโคโรนา (COVID-19) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการใช้หน้ากากอนามัยเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเส้นใยนาโนด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสติ้ง โดยเส้นใยที่ได้จะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองและความสามารถในการดักจับอนุภาคเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคและดักจับเชื้อที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว หน้ากากเส้นใยนาโนยังมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ ได้แก่ สามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลว สามารถระบายอากาศได้ดี หายใจได้สะดวก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความแนบกระชับกับใบหน้า และมีความแข็งแรงทนทาน

**คำสำคัญ:** หน้ากากอนามัย เส้นใยนาโน อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสติ้ง ไวรัสโคโรนา PM2.5

**จุดประสงค์:**

1. เพื่อรวบรวมข้อมูลงานวิจัยด้านการพัฒนาเส้นใยนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากอนามัยในปัจจุบัน
2. เพื่อนำองค์ความรู้ดังกล่าวไปพัฒนาต่อยอดงานวิจัยต่อไป

### บทนำ

ในช่วงที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบปัญหาจากมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ซึ่งสามารถแพร่ผ่านเข้าสู่ถุงลมในปอด ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของปอดลดลง เพิ่มความเสี่ยงในการเกิดโรคระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหอบหืด และโรคมะเร็งปอด เป็นต้น นอกจากนี้ปัญหาจากโรคระบาดของไวรัสโคโรนา (COVID-19) ยังส่งผลให้ผู้ป่วยมีอาการปอดอักเสบรุนแรงจนถึงชีวิต และสามารถแพร่กระจายจากคนสู่คนจากการไอ จาม หรือสัมผัสกับสารคัดหลั่งของผู้ป่วย ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการใช้หน้ากากอนามัยเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเส้นใยนาโนด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสติ้ง โดยเส้นใยที่ได้จะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เส้นใยมีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองและความสามารถในการดักจับอนุภาคเพิ่มสูงขึ้น โดยบทความนี้มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อรวบรวมข้อมูลงานวิจัยด้านการพัฒนาเส้นใยนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากอนามัยในปัจจุบัน สำหรับนำองค์ความรู้ดังกล่าวไปพัฒนาต่อยอดงานวิจัยต่อไป

## เส้นใยนาโน (nanofibers)

เส้นใยนาโน คือ เส้นใยขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 นาโนเมตร และเนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรจึงส่งผลให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง และมีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูง จึงทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้เส้นใยนาโนยังมีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง มีความแข็งแรงและทนทาน ปัจจุบันเส้นใยนาโนสามารถผลิตได้จากหลากหลายวิธี เช่น การดึงยืด (drawing) การสังเคราะห์ด้วยแม่พิมพ์ (template synthesis) การแยกวัฏภาค (phase separation) การจัดเรียงตัวตัวเอง (self-assembly) และอิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning)<sup>(1)</sup>

## อิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning)

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่ไม่มีความซับซ้อน อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสามารถหาได้ง่ายและมีราคาไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถเพิ่มอัตราการผลิตเส้นใยนาโนสู่ระดับอุตสาหกรรม โดยวิธีนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ หลักการของเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง คือ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงเข้าไปที่ปลายเข็มที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของสารละลายพอลิเมอร์ เกิดเป็นแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ทำให้สารละลายพอลิเมอร์เกิดการยืดออกจากปลายเข็มเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า กรวยของเทเลอร์ (Taylor's cone) และเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิว (surface tension) ของสารละลายพอลิเมอร์ จะเกิดแรงผลักที่เพิ่มขึ้น ทำให้สารละลายพอลิเมอร์เกิดการยืดยาวออกจากปลายเข็มเป็นสายอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งไปสะสมที่วัสดุรองรับซึ่งมีประจุตรงกันข้าม โดยในขณะที่สารละลายพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ไปสะสมที่วัสดุรองรับ จะเกิดการระเหยของตัวทำละลาย ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็ก<sup>(1)</sup>

## พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนสามารถสังเคราะห์ได้จากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ทั้งจากธรรมชาติ เช่น เจลาติน (gelatin), ไคโตซาน (chitosan), เด็กซ์แทรน (dextran), อัลจิเนต (alginate), เซลลูโลสไหมไฟโบรอิน (silk fibroin), แชลแล็ก (shellac) และคอลลาเจน (collagen) และจากการสังเคราะห์ เช่น polylactic acid (PLA), polyurethane (PU), polystyrene (PS), Poly( $\epsilon$ -caprolactone) (PLC), polyvinyl chloride (PVC), poly (vinylpyrrolidone) (PVP), poly (methyl methacrylate) (PMMA), poly (lactic-coglycolic acid) (PLGA), poly (ethylene-co-vinylacetate) (PEVA), poly (ethylene terephthalate) (PET), poly (ethylene oxide) (PEO), polyacrylonitrile (PAN) และ cellulose acetate (CA) เป็นต้น<sup>(2-8)</sup> เนื่องจากพอลิเมอร์ธรรมชาติมีข้อดี คือ ความเป็นพิษต่ำ ไม่ทำปฏิกิริยาต่อร่างกายมนุษย์ แต่ราคาค่อนข้างสูง ความบริสุทธิ์ต่ำ และอาจผลิตเส้นใยนาโนที่มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ปัจจุบันพอลิเมอร์สังเคราะห์จึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากหาง่าย ราคาไม่แพง และผลิตเส้นใยนาโนที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ กัน ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่าง PLC ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่เข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์ (biocompatible) และสามารถย่อยสลายได้ในร่างกาย

มนุษย์ (biodegradable) และ poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพอลิเมอร์ที่ไวต่ออุณหภูมิ (thermoresponsive polymer) และมีค่า lower critical solution temperature (LCST) อยู่ในช่วงระหว่าง 32 ถึง 33 องศาเซลเซียส โดยถ้าอุณหภูมิสูงกว่าค่า LCST พอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าค่า LCST พอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทั้งนี้จากการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ดังกล่าว ส่งผลให้เส้นใยนาโนที่ได้มีคุณสมบัติเพิ่มความสามารถในการเกาะติดของเซลล์ และสามารถลอกออกได้ง่าย ซึ่งเหมาะต่อการใช้งานสำหรับเป็นวัสดุปิดแผลบนผิวหนัง<sup>(9)</sup>

### การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน

จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น จึงมีการนำเส้นใยนาโนมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน เช่น ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ด้านวัสดุตกแต่งบาดแผล ด้านระบบการขนส่งยา และด้านการกรอง

#### ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering)

การนำเส้นใยนาโนไปใช้ในด้านการแพทย์และสุขภาพ มักเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเข้ากันได้กับร่างกาย และสามารถย่อยสลายได้ในร่างกายมนุษย์ ตัวอย่างเช่น โคลิโดซาน, polycaprolactone (PCL), poly L-lactic acid (PLLA) และ poly ethylene-co-vinyl acetate (PEVA) เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยนาโนมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ extracellular matrix (ECM) และมีพื้นที่ผิวสูง จึงสามารถนำเส้นใยนาโนไปใช้เป็นโครงร่างรองรับเนื้อเยื่อ เนื่องจากมีพื้นที่ให้เซลล์ยึดเกาะได้มาก ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้อเยื่อ

#### ด้านวัสดุตกแต่งบาดแผล (wound dressing)

เนื่องจากเส้นใยนาโนมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และมีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูง ส่งผลให้เส้นใยนาโนมีคุณสมบัติสามารถห้ามเลือดได้ โดยไม่ต้องใช้สารห้ามเลือด (haemostatic agent) และเนื่องจากเส้นใยนาโนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง จึงส่งผลให้เส้นใยนาโนมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารคัดหลั่งสูง เมื่อเทียบกับวัสดุตกแต่งบาดแผลที่เป็นแผ่นฟิล์ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน กรณีถ้าเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ แผ่นเส้นใยนาโนที่ผลิตได้ย่อมมีคุณสมบัติในการดูดซับสารคัดหลั่งที่ดี ลักษณะความเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากของเส้นใยนาโน ยังส่งผลให้เส้นใยนาโนมีคุณสมบัติเลือกผ่าน (semi-permeability) โดยจะลดอัตราการสูญเสียน้ำออกจากแผล เพื่อคงสภาพทำให้แผลชุ่มชื้น ระบายอากาศได้ดี และป้องกันไม่ให้เชื้อจากภายนอกผ่านเข้าไปได้ และเนื่องจากเส้นใยนาโนมีขนาดเล็ก ความละเอียดสูง จึงทำให้เส้นใยนาโนที่ผลิตได้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถเข้ากับลักษณะแผลได้ทุกรูปแบบ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการปกคลุมแผลและป้องกันการติดเชื้อจากภายนอก<sup>(2)</sup> และจากที่กล่าวมาข้างต้น เส้นใยนาโนมีประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้อเยื่อ ส่งผลให้เกิดการซ่อมแซมแผลก่อนที่จะเกิดเป็นสะเก็ดปกคลุมแผล<sup>(2,10-12)</sup> นอกจากนี้ยังมีการบรรจุสารออกฤทธิ์ต่างๆ เช่น ยาปฏิชีวนะ, vasodilator เช่น minoxidil, growth factor เช่น FGF, EGF and TGF และเซลล์ เช่น keratinocyte เป็นต้น ลงไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุตกแต่งบาดแผล<sup>(2)</sup>

#### ด้านระบบการขนส่งยา (drug delivery system)

เนื่องจากเส้นใยนาโนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและมีน้ำหนักเบา ส่งผลให้มีความสามารถในการบรรจุยาสูง จึงนิยมนำมาใช้ในด้านระบบการขนส่งยา<sup>(13)</sup> ทั้งนี้การที่เส้นใยนาโนมีลักษณะความเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ยังส่งผลให้ระยะเวลาในการปลดปล่อยของยาลดลงและอัตราการละลายของยาเพิ่ม

สูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพสูง<sup>(14,15)</sup> นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบการปลดปล่อยของยา โดยเลือกใช้พอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการผลิตเส้นใยนาโน เช่น การเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพองตัว อาจส่งผลให้การปลดปล่อยของยาเกิดขึ้นอย่างช้าๆ<sup>(16)</sup>

### ด้านการกรอง (filtration)

เส้นใยนาโนมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และความต้านทานของอากาศต่ำ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองและความสามารถในการดักจับอนุภาคเพิ่มสูงขึ้น<sup>(17)</sup> ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเส้นใยนาโนด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากอนามัยเพิ่มมากขึ้น

### คุณสมบัติของหน้ากากอนามัยที่ผลิตจากเส้นใยนาโน

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัย พบว่า หน้ากากอนามัยที่ผลิตจากเส้นใยนาโนมีประสิทธิภาพตรงตามคุณสมบัติมาตรฐานของหน้ากากอนามัยตามเกณฑ์ของสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (American Society for Testing and Materials; ASTM International) ดังนี้

#### 1. สามารถกรองอนุภาคขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาของ Li, X. และ Gong, Y. (2015)<sup>(18)</sup> พบว่า เส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ polysulfone ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง สามารถกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ซึ่งมีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 2.5 ไมครอน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความสามารถในการกรองฝุ่น PM2.5 ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคที่ไม่ผ่านหน้ากาท่อปริมาณอนุภาคในอากาศทั้งหมด มากกว่า 90% ในขณะที่หน้ากากอนามัยธรรมดา (surgical mask) ที่ผลิตจากแผ่นใยสังเคราะห์ มีค่าความสามารถในการกรองฝุ่น PM2.5 เท่ากับ 32.9% ส่วนหน้ากาก R95 ซึ่งใช้สำหรับงานพ่นสีและกันกลิ่น มีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น PM2.5 สูงสุดถึง 99.9% และจากการศึกษาของ Skaria, S.D. และ Smaldone, G.D. (2014)<sup>(19)</sup> เมื่อทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการกรองของหน้ากาก โดยคำนวณจากปริมาณของอนุภาคที่ยังคงอยู่ที่ผิวของหน้ากาก ไม่สามารถแพร่ผ่านหน้ากาท่อได้ ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า หน้ากากอนามัย N95 สามารถกรองอนุภาคได้ถึง 84.47% ส่วนหน้ากากอนามัยธรรมดากรองได้เพียง 22.7-49.21% ขึ้นอยู่กับความกระชับของหน้ากาก ส่วนหน้ากากอนามัยที่ใช้เส้นใยนาโนเป็นแผ่นกรองสามารถกรองได้เพิ่มขึ้นจากปกติเป็น 65.03% ทั้งนี้คุณสมบัติการกรองและดักจับอนุภาคจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้เส้นใยนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและรูพรุนที่มีขนาดเล็ก<sup>(20)</sup>

#### 2. สามารถกรองและดักจับแบคทีเรียหรือเชื้ออื่นๆได้

นอกจากคุณสมบัติพิเศษที่ส่งผลให้หน้ากากเส้นใยนาโนมีประสิทธิภาพในการกรองและมีความสามารถในการดักจับอนุภาคแล้ว เส้นใยนาโนยังมีความสามารถในการบรรจุสารต่างๆ เช่น สารต้านจุลชีพ เพื่อลดโอกาสการเกิด biofilm ของเชื้อที่พื้นผิวของหน้ากาก ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองของหน้ากากลดลง จากการศึกษาของ Hashmi, M. และคณะ (2019)<sup>(21)</sup> ได้พัฒนาหน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ PAN และมีการบรรจุอนุภาคนาโนของ copper oxide (CuO) เป็นสารต้านจุลชีพ พบว่า หน้ากากเส้นใยนาโนที่เตรียมได้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสังเกตได้จากบริเวณที่เกิดการยับยั้งเชื้อ (clear zone) ที่เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ

Karthick, S.A. และ Gobi, N. (2017)<sup>(22)</sup> ได้พัฒนาหน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ PAN เช่นกัน แต่มีการบรรจุอนุภาคนาโนของเงิน (Ag) เป็นสารต้านจุลชีพ พบว่า หน้ากากเส้นใยนาโนที่เตรียมได้สามารถกรองอนุภาคขนาด 0.3-10 ไมครอน ได้ถึง 99% และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 3. สามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลว

คุณสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของหน้ากากส่งผลต่อการซึมผ่านของของเหลวและเชื้อโรค โดยหน้ากากที่ดีควรมีคุณสมบัติสามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลวจากความชื้นและละอองฝอยของน้ำลาย ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแพร่ผ่านของเชื้อและยังส่งผลให้เชื้อเจริญเติบโตได้ดี จากการศึกษาของ Ullah, S. และคณะ (2020)<sup>(23)</sup> พบว่า ทั้งหน้ากากอนามัย N95 และหน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ PET และ poly(vinylidene fluoride) (PVDF) มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งแสดงได้จากค่า water contact angle ที่มากกว่า 90° ดังนั้นจึงไม่เกิดการซึมผ่านของของเหลว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hashmi, M. และคณะ (2019)<sup>(21)</sup> ที่เลือกใช้พอลิเมอร์ PAN ในการผลิตหน้ากากเส้นใยนาโน เนื่องจากมีค่า water contact angle เท่ากับ 124° ซึ่งแสดงคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ

### 4. สามารถระบายอากาศได้ดี หายใจได้สะดวก

Li, X. และ Gong, Y. (2015)<sup>(18)</sup> ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติการไหลผ่านของอากาศระหว่างหน้ากาก R95, หน้ากากอนามัย N95, หน้ากากอนามัยธรรมดา และหน้ากากเส้นใยนาโน ซึ่งแสดงเป็นค่าการต้านการไหลของอากาศ หรือ pressure drop ( $\Delta P$ ) จากการศึกษา พบว่า หน้ากากอนามัยธรรมดาแสดงค่า  $\Delta P$  ต่ำที่สุด หมายถึง อากาศสามารถไหลผ่านได้ดี ส่วนหน้ากาก R95 แสดงค่า  $\Delta P$  สูงที่สุด ซึ่งหมายถึงอากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ ในขณะที่ผลการทดสอบหน้ากากเส้นใยนาโน พบว่า อากาศสามารถไหลผ่านได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Skaria, S.D. และ Smaldone, G.D. (2014)<sup>(19)</sup> ซึ่งพบว่าค่า  $\Delta P$  ของหน้ากากอนามัยธรรมดา เท่ากับ 0.0010 cmH<sub>2</sub>O ส่วนค่า  $\Delta P$  ของหน้ากากอนามัย N95 เท่ากับ 0.2664 cmH<sub>2</sub>O ในขณะที่หน้ากากเส้นใยนาโน มีค่า  $\Delta P$  เท่ากับ 0.0311 cmH<sub>2</sub>O

นอกจากค่าการต้านการไหลของอากาศที่ต่ำแล้ว หน้ากากที่ดีควรมีความสามารถในการแพร่ผ่านของอากาศ ไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เพื่อให้ผู้สวมใส่หายใจได้สะดวก จากการศึกษาของ Ullah, S. และคณะ (2020)<sup>(23)</sup> ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการแพร่ผ่านของ CO<sub>2</sub> ระหว่างหน้ากากอนามัย N95 และหน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ PET และ PVDF พบว่า หน้ากากเส้นใยนาโนมีความสามารถในการแพร่ผ่านของ CO<sub>2</sub> ที่ดีกว่า สามารถระบายความร้อนได้มากกว่า ส่งผลให้ผู้สวมใส่หายใจได้สะดวกมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยนาโนมีขนาดรูพรุนประมาณ 50-100 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลอากาศ (~4 นาโนเมตร) แต่เล็กกว่าขนาดของอนุภาคปนเปื้อนในอากาศรวมถึงแบคทีเรียและไวรัส โดยเฉพาะไวรัสโคโรนาซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 80-160 นาโนเมตร<sup>(24)</sup>

### 5. ไม่มีความสามารถในการติดไฟ

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตหน้ากากเส้นใยนาโนมีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ตัวอย่างเช่น PAN สามารถทนความร้อนได้ถึง 300 °C<sup>(21)</sup>, cellulose diacetate (CDA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ และ PVDF ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ มีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้ดีเช่นกัน<sup>(20)</sup>

นอกจากนี้หน้ากากเส้นใยนาโนยังมีคุณสมบัติเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

## 6. การนำกลับมาใช้ใหม่ (reusability)

ในช่วงที่ผ่านมา ปริมาณความต้องการใช้หน้ากากอนามัย N95 เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากหน้ากากอนามัย N95 มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศสูง แต่เนื่องจากมีรายงานว่า ไวรัสโคโรนาสามารถติดอยู่บนพื้นผิวชั้นนอกของหน้ากากเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงไม่ควรนำหน้ากากอนามัยที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ จากการศึกษาของ Ullah, S. และคณะ (2020)<sup>(23)</sup> ซึ่งทำการทดสอบคุณสมบัติของหน้ากากอนามัย N95 และหน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ PET และ PVDF หลังจกผ่านการทำความสะอาดด้วยการจุ่มและสเปรย์ด้วย 75% ethanol พบว่า ประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากอนามัย N95 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากเส้นใยนาโนไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของการทดสอบความปลอดภัยต่อผู้ใช้ พบว่า หน้ากากอนามัย N95 ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยการจุ่มและสเปรย์ด้วย 75% ethanol อาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ จึงไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งหน้ากากอนามัย N95 และหน้ากากเส้นใยนาโน สามารถคงสภาพคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ hydrophobicity ป้องกันการซึมผ่านของน้ำลายและเชื้อโรคได้ดี

## 7. ความกระชับของหน้ากาก

จากการศึกษาของ Skaria, S.D. และ Smaldone, G.D. (2014)<sup>(19)</sup> พบว่า มีการรั่วไหลของอากาศรอบๆ หน้ากากอนามัยธรรมดาค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงถึงความไม่กระชับของหน้ากาก ในขณะที่การรั่วไหลของอากาศรอบๆ หน้ากากเส้นใยนาโนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับหน้ากากอนามัยธรรมดา ส่วนหน้ากากอนามัย N95 มีการรั่วไหลของอากาศน้อยที่สุด แสดงถึงความแนบกระชับของหน้ากากกับใบหน้า ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยนาโนมีขนาดเล็ก ความละเอียดสูง จึงทำให้เส้นใยนาโนที่ผลิตได้มีความยืดหยุ่นสูง

## 8. ความแข็งแรงทนทาน

คุณสมบัติเชิงกล (mechanical property) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของหน้ากาก เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุและการทนต่อแรงดึงจนกระทั่งฉีกขาดขณะใช้งาน จากการศึกษาของ Cao, L. และคณะ (2020)<sup>(25)</sup> พบว่า หน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจาก polyamide 66 (PA66) มีความแข็งแรงทนทานสูง โดยมีค่าการทนแรงดึง (tensile strength) มากกว่า 6.63 MPa และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) มากกว่า 21.65% โดยเมื่อทดสอบด้วยการดึง พบว่า เส้นใยนาโนจะเกิดการยืดในทิศทางเดียวกับแรงที่ใช้ในการทดสอบจนกระทั่งเกิดการขาด ส่งผลให้เส้นใยนาโนมีความแข็งแรงทนทานสูง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างของเส้นใยนาโนยังส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย และจากการวิจัยของ Hashmi, M. และคณะ (2019)<sup>(21)</sup> พบว่า การบรรจุอนุภาคโนนาของ CuO ในหน้ากากเส้นใยนาโนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ PAN ส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นผลึก (crystallinity) ของเส้นใยนาโนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เส้นใยนาโนที่ผลิตได้มีค่าการทนแรงดึงที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

## วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของหน้ากากเส้นใยนาโน

### 1. การเพิ่มจำนวนชั้นของหน้ากากเส้นใยนาโน

จากการศึกษาของ Tan, N.P. และคณะ (2019)<sup>(20)</sup> พบว่า หน้ากากอนามัยที่ประกอบด้วยแผ่นกรองเส้นใยนาโนหลายชั้นมีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 สูงกว่าหน้ากากอนามัยที่ประกอบด้วยแผ่นกรองเส้นใยนาโนชั้นเดียว

ในทางกลับกัน ความสามารถในการไหลผ่านของอากาศก็จะลดลงเช่นกัน แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความหายใจปกติของผู้ใช้ เนื่องจากค่า  $\Delta P$  ไม่สูงมากนัก

## 2. การเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบนพื้นผิวของแผ่นกรองเส้นใยนาโน

จากผลการศึกษาของ Leung, W. และ Sun, Q.<sup>(26)</sup> พบว่าการเพิ่มประจุบนพื้นผิวของแผ่นกรองเส้นใยนาโนที่ผลิตจาก PVDF โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าสถิต สามารถทำให้อนุภาคขนาดเล็กและเชื้อที่อยู่ในอากาศมาเกาะติดบนพื้นผิวของแผ่นกรองเส้นใยนาโน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคขนาดเล็กของหน้ากากอนามัย

### สรุปบทความ

เนื่องจากเส้นใยนาโนมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กส่งผลให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง จึงมีการนำเส้นใยนาโนมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน โดยเฉพาะด้านการกรอง เนื่องจากหน้ากากอนามัยที่ผลิตจากเส้นใยนาโนมีความสามารถในการกรองอนุภาคขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถกรองและดักจับแบคทีเรียหรือเชื้ออื่นๆได้ดี สามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลว สามารถระบายอากาศได้ดี หายใจได้สะดวก มีความกระชับของหน้ากากกับใบหน้า สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีความแข็งแรงทนทาน ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเส้นใยนาโนด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากอนามัยเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปัญหาสุขภาพจากมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และปัญหาจากโรคระบาดของไวรัสโคโรนา (COVID-19)

### เอกสารอ้างอิง

1. Ramakrishna S. An introduction to electrospinning and nanofibers. World Scientific; 2005. 382 p.
2. Zahedi P, Rezaeian I, Ranaei-Siadat S-O, Jafari S-H, Supaphol P. A review on wound dressings with an emphasis on electrospun nanofibrous polymeric bandages. Polym Adv Technol. 2009 Feb;21(2):n/a-n/a.
3. Unnithan AR, Barakat NAM, Tirupathi Pichiah PB, Gnanasekaran G, Nirmala R, Cha Y-S, et al. Wound-dressing materials with antibacterial activity from electrospun polyurethane–dextran nanofiber mats containing ciprofloxacin HCl. Carbohydr Polym. 2012 Nov;90(4):1786–93.
4. Unnithan AR, Gnanasekaran G, Sathishkumar Y, Lee YS, Kim CS. Electrospun antibacterial polyurethane–cellulose acetate–zein composite mats for wound dressing. Carbohydr Polym. 2014;102:884–92.
5. Vasita R, Katti DS. Nanofibers and their applications in tissue engineering. Int J Nanomedicine. 2006 Mar;1(1):15–30.
6. Liao N, Unnithan AR, Joshi MK, Tiwari AP, Hong ST, Park C-H, et al. Electrospun bioactive poly ( $\epsilon$ -caprolactone)–cellulose acetate–dextran antibacterial composite mats for wound dressing applications. Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp. 2015 Mar;469:194–201.
7. Hadipour-Goudarzi E, Montazer M, Latifi M, Aghaji AAG. Electrospinning of chitosan/sericin/PVA nanofibers incorporated with in situ synthesis of nano silver. Carbohydr Polym. 2014 Nov;113:231–9.

8. Chinatangkul N, Pengon S, Limmatvapirat C, Limmatvapirat S. Design of Experiment Approach for Fabrication Process of Electrospun Shellac Nanofibers Using Factorial Designs. *Key Eng Mater.* 2017;757:120–4.
9. Pawar MD, Rathna GVN, Agrawal S, Kuchekar BS. Bioactive thermoresponsive polyblend nanofiber formulations for wound healing. *Mater Sci Eng C.* 2015;48:126–37.
10. Pelipenko J, Kocbek P, Janković B, Rošic R, Baumgartner S, Kristl J. The Topography of Electrospun Nanofibers and Its Impact on the Growth and Mobility of Keratinocytes. Vol. 84, *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics : official journal of Arbeitsgemeinschaft fur Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V.* 2012.
11. Engel E, Michiardi A, Navarro M, Lacroix D, Planell JA. Nanotechnology in regenerative medicine: the materials side. *Trends Biotechnol.* 2008;26(1):39–47.
12. Leung V, Hartwell R, Yang H, Ghahary A, Ko F. Bioactive Nanofibres for Wound Healing Applications. Vol. 4, *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics.* 2011. 1–14 p.
13. Muthuraman A, Kaur J. Chapter 6 - Antimicrobial Nanostructures for Neurodegenerative Infections: Present and Future Perspectives. In: Fikai A, Grumezescu AMBT-N for AT, editors. *Micro and Nano Technologies.* Elsevier; 2017. p. 139–67.
14. Potrč T, Baumgartner S, Roškar R, Planinšek O, Lavrič Z, Kristl J, et al. Electrospun polycaprolactone nanofibers as a potential oromucosal delivery system for poorly water-soluble drugs. *Eur J Pharm Sci.* 2015;75:101–13.
15. Braghirolli DI, Steffens D, Pranke P. Electrospinning for regenerative medicine: a review of the main topics. *Drug Discov Today.* 2014;19(6):743–53.
16. Kajdič S, Planinšek O, Gašperlin M, Kocbek P. Electrospun nanofibers for customized drug-delivery systems. *J Drug Deliv Sci Technol.* 2019;51:672–81.
17. Sundarrajan S, Tan KL, Lim SH, Ramakrishna S. Electrospun Nanofibers for Air Filtration Applications. *Procedia Eng.* 2014;75:159–63.
18. Li X, Gong Y. Design of Polymeric Nanofiber Gauze Mask to Prevent Inhaling PM2.5 Particles from Haze Pollution. *J Chem.* 2015 Aug;2015:1–5.
19. Skaria SD, Smaldone GC. Respiratory source control using surgical masks with nanofiber media. *Ann Occup Hyg.* 2014/04/15. 2014 Jul;58(6):771–81.
20. Tan NPB, Paclijan SS, Ali HNM, Hallazgo CMJS, Lopez CJF, Eborá YC. Solution Blow Spinning (SBS) Nanofibers for Composite Air Filter Masks. *ACS Appl Nano Mater [Internet].* 2019 Apr 26;2(4):2475–83. Available from: <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00207>
21. Hashmi M, Ullah S, Kim IS. Copper oxide (CuO) loaded polyacrylonitrile (PAN) nanofiber membranes for antimicrobial breath mask applications. *Curr Res Biotechnol.* 2019;1:1–10.
22. Karthick A, Nallathambi G. Nano silver incorporated electrospun polyacrylonitrile nanofibers and spun bonded polypropylene composite for aerosol filtration. *J Ind Text.* 2017 Jan;46:1342–61.
23. Ullah S, Ullah A, Lee J, Jeong Y, Hashmi M, Zhu C, et al. Reusability Comparison of Melt-Blown vs Nanofiber Face Mask Filters for Use in the Coronavirus Pandemic. *ACS Appl Nano Mater.* 2020



Jul;3(7):7231–41.

24. Guy JS, Breslin JJ, Breuhaus B, Vivrette S, Smith LG. Characterization of a coronavirus isolated from a diarrheic foal. *J Clin Microbiol* [Internet]. 2000 Dec;38(12):4523–6. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11101590>
25. Cao J, Cheng Z, Kang L, Lin M, Han L. Patterned nanofiber air filters with high optical transparency, robust mechanical strength, and effective PM2.5 capture capability. *RSC Adv* [Internet]. 2020;10(34):20155–61. Available from: <http://dx.doi.org/10.1039/D0RA01967D>
26. Leung WW-F, Sun Q. Charged PVDF multilayer nanofiber filter in filtering simulated airborne novel coronavirus (COVID-19) using ambient nano-aerosols. *Sep Purif Technol* [Internet]. 2020;245:116887. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620313617>