

■ Research Article



การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาค ความต่างของความดันและการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติ

Development and Evaluation of the Particle Filtration Efficiency, the Pressure Difference and the Total Inward Leakage of the 3D High Efficiency Fabric Mask

พัชรินทร์ พงษ์สุระ¹, พัชรีย์ บัวอินทร์¹, จินตนา อุ่เงิน¹, วิสาขน์ภัสร์รัตนจันทร์², วณิสสุดา คำพุฒ², วราภรณ์ ต้นใส² และ พานิช อินต๊ะ^{2*}

¹ บริษัท แลโบทาติก ออแกนิค บิวตี้ จำกัด 79 หมู่4 ตำบลบวกค้าง อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ 50130

² หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 98 หมู่8 ตำบลป่าป้อ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

บทคัดย่อ

ปัญหาการขาดแคลนหน้ากากอนามัยแบบใช้แล้วทิ้งในช่วงที่โควิด-19 ระบาดในประเทศไทย บางคนอาจต้องการใช้วัสดุผ้าทั่วไปในการป้องกันระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนหรือความสามารถในการจ่าย วัตถุประสงค์ของงานนี้คือเพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาค ความต่างของความดันและการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติ เพื่อความสวยงามและการสวมใส่ที่สบาย งานนี้ได้ออกแบบให้มีรูปทรงหน้ากากที่สวยงามโอรับกับใบหน้ามีโครงสร้าง 3 ชั้น คือ 1) ผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติกันน้ำและละอองฝอยขนาด 3 – 10 ไมครอนได้ 2) ผ้าเมลต์โบลนนอนวูฟเวน (Meltblown non-wovens) ที่มีคุณสมบัติในการกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.3 ไมครอนได้ และ 3) ผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติดูดซับสารคัดหลั่งและยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่มาจากผู้ใช้ หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นมีค่าด้านการหายใจต่ำจะทำให้ผู้สวมใส่ไม่รู้สึกเหนื่อยในขณะสวมใส่ โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ EN14683 เพื่อหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและความต่างของความดัน ในส่วนการประเมินการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากได้อ้างอิงวิธีการทดสอบจาก OSHA Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134 ผลการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 97.89% ค่าความต่างของความดันของหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 5.18 mmH₂O/cm² โดยหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพความพอดี การรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากและปัจจัยความพอดีมีค่าเท่ากับ 79.39%, 20.61% และ 4.85 ตามลำดับ หน้ากากที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ถือว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของหน้ากาก FFP1 ตามมาตรฐาน EN149:2001 ได้ข้อมูลที่ได้จากงานนี้จะประโยชน์ต่อผู้ประกอบการผลิตหน้ากากผ้าในการพัฒนาด้านแบบหน้ากากเพื่อใช้ในการป้องกันระบบทางเดินหายใจจากการระบาดของโควิด-19 และฝุ่น PM2.5 และการสวมใส่ที่สบายและสวยงาม

คำสำคัญ: วัสดุผ้า; ละอองลอย; การผ่านทะลุอนุภาค; การป้องกันระบบทางเดินหายใจ; ประสิทธิภาพการกรอง

Received:
22 September 2022
Revised:
8 January 2023
Accepted:
19 January 2023
Published:
20 January 2023

***Corresponding Author:**
rmutil.uee@gmail.com

Copyright:
© Rajamangala
University of
Technology Lanna.
All right reserved

ISSN
Print: 2586-8500
Electronic: 2586-8632

Abstract

A shortage of disposable surgical masks can be expected during the COVID-19 pandemic in Thailand. Some individuals may want to use common fabric materials for respiratory protection because of shortage or affordability reasons. The aim of this work is to develop and evaluate the particle filtration efficiency, the pressure difference and the total inward leakage of the 3D high efficiency fabric mask for a beautiful and comfortable wearing. This work has been designed to have a beautiful mask shape that hugs the face with a 3-layer structure: 1) Microfiber cloth that is waterproof and aerosol 3-10 microns in diameter; 2) Meltblown nonwoven fabric that has the ability to filter aerosol particles smaller than 0.3 microns and 3) Microfiber cloth that has the ability to absorb secretions and inhibit bacteria from users. The developed 3D high-efficiency fabric mask has a low breathing resistance so the wearer will not feel tired while wearing it. Test methods according to ASTM F2299-03 and EN14683 to determine particle filtration efficiency and pressure difference. The total inward leak assessment of the mask is based on testing methods from OSHA Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134. The test results showed that the particle filtration efficiency of the developed 3D high efficiency fabric mask was about 97.89%. The pressure difference of the developed fabric mask was about 5.18 mmH₂O/cm². Fit efficiency, total inward leakage and fit factors of developed masks were about 79.39%, 20.61% and 4.85, respectively. It was showed that the developed masks are considered to be within the acceptable limits of the FFP1 mask in accordance with EN149:2001. Addition, The information obtained from this event will benefit fabric mask manufacturers in developing a prototype mask for use in respiratory protection from the COVID-19 outbreak and PM2.5 and comfortable wearing and beautiful.

Keywords: fabric material; aerosol; particle penetration; respiratory protection; filtration efficiency.

1. บทนำ

การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกด้วยยอดผู้ติดเชื้อถึง 42,916,332 ราย และเสียชีวิต 1,154,301 ราย สำหรับประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อ 3,731 ราย และเสียชีวิต 59 ราย ข้อมูลจากกรมควบคุมโรคกระทรวงสาธารณสุข Department of Disease Control (2002) ณ วันที่ 26 ตุลาคม 2563 อีกทั้งในช่วงที่มีการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ได้เกิดปัญหาหมอกควันมีค่าฝุ่น PM2.5 เกินค่ามาตรฐานทั้งในกรุงเทพและหลายจังหวัดในภาคเหนือ ทำให้มีค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI (Air Quality Index) ของประเทศไทยสูงเป็นอันดับต้น ๆ ของโลกต่อเนื่องหลายวัน (Thepnuan et al., 2020) โดยแหล่งกำเนิดของฝุ่น PM2.5 โรงงานอุตสาหกรรม โรงงานไฟฟ้า เขม่าควันจากไอเสียของเครื่องยนต์และการเผาหรือเผาชีวมวลในที่โล่ง (Fushimi et al., 2008) ได้แสดงให้เห็นว่าบนถนนที่มีการจราจรหนาแน่นจะมีการแพร่กระจายของอนุภาคนาโนขนาดเล็กระดับซับไมครอน (Submicron particles) หรืออนุภาคระดับนาโน (Nanoparticles) โดยมีการกระจายของจำนวนอนุภาค (Particle count distribution) สูงสุดที่ 100–200 nm (0.1–0.2 μm) ซึ่งอนุภาคไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเขม่าคาร์บอนแบล็ก (Black carbonaceous soot) ที่มีอนุภาคระดับซับไมครอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 30 – 500 nm (0.03–0.5 μm) และมีสอดคล้องกับ (Intra and Siri-achawawath, 2019) ได้ทำการตรวจวัดการกระจายขนาดอนุภาคในอากาศที่เชียงใหม่ในช่วงที่มีปัญหาหมอกควันไฟป่า พบว่าอนุภาคในอากาศในช่วงที่ทำการตรวจวัดมีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงขนาดประมาณ 11.5 ถึง 365.2 nm (0.0115–0.365 μm) ซึ่งอนุภาคในช่วงขนาดดังกล่าวนี้เป็นส่วนประกอบหลักของอนุภาคขนาดเล็กหรือฝุ่น PM2.5 ข้อมูลเกี่ยวกับฝุ่น PM2.5 ในอากาศมีส่วนทำให้เชื้อไวรัสโควิด-19 แพร่หรือระบาดได้ดีขึ้นได้นำเสนอโดย Srivastava (Srivastava, 2021) พบว่าฝุ่น PM2.5 ที่มีเชื้อไวรัสโควิด-19 ที่เกิดจากการจามและเป็นตัวกลางสำคัญในการแพร่กระจายของไวรัสเข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจ ทำให้เชื้อไวรัสโควิด-19 แพร่หรือระบาดได้ดีขึ้น จากรายงานการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในประเทศจีนที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะมีจำนวนผู้ติดเชื้อไวรัสโควิด-19 รายวันในประเทศจีนเพิ่มขึ้น 2.24% นอกจากนี้ Leiva et al., 2013 ยังได้รายงานถึงผลกระทบของโรคหลอดเลือดสมองจากฝุ่น PM2.5 ว่าความเข้มข้นของ PM2.5 ที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีความเสี่ยงของการได้รับการรักษาฉุกเฉินเนื่องจากสาเหตุของหลอดเลือดสมองเพิ่มขึ้นถึง 1.29%

จากการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 และปัญหาฝุ่น PM2.5 ดังกล่าวได้ส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยเฉพาะหน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (disposable surgical masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) ทำให้ความต้องการหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ 2–3 เท่า ส่งผลให้ราคาหน้ากากอนามัยสูงขึ้นหลายเท่า ทำให้เกิดขาดแคลนหน้ากากอนามัยสำหรับบุคลากรทางการแพทย์และผู้ป่วยในโรงพยาบาลทั่วประเทศ เนื่องจากโรงงานผู้ผลิตหน้ากากอนามัยไม่สามารถส่งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ให้กับโรงพยาบาลได้ตามปกติ ในขณะที่ความต้องการหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ของประชาชนเพื่อใช้ในการป้องกันทั้งไวรัสโควิด-19 และฝุ่น PM2.5 ก็สูงขึ้นจนเกิดสถานการณ์ตึงเครียดไปทั่วประเทศ จากปัญหาการขาดแคลนหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุผ้าทั่วไปในการป้องกันระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากหน้ากากผ้าอาจเป็นทางเลือกเดียวสำหรับบางคน ในช่วงที่มีการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 และปัญหาฝุ่น PM2.5 มีงานวิจัยที่แนะนำเกี่ยวกับวัสดุป้องกันระบบทางเดินหายใจอื่น ๆ รวมถึงวัสดุผ้าทั่วไป เช่น เสื้อยืด

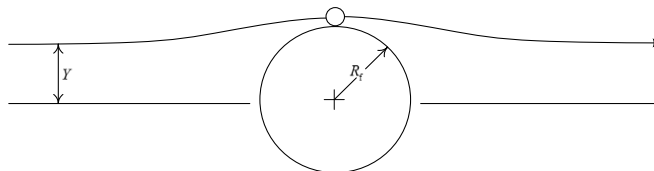
ผ้าเช็ดหน้าและผ้าพันคอ (O'Down et al., 2020; El-Atab et al., 2020; Sickbert-bennett et al., 2020; Konda et al., 2020; Aydin et al., 2020; Rengasamy et al., 2010) ในกรณีที่ไม่มีหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 บางคนอาจใช้วัสดุผ้าทั่วไปชั่วคราว เพื่อป้องกันระบบทางเดินหายใจขณะเข้าสู่สภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนไวรัสและฝุ่น PM2.5 เช่น เมื่อดูแลสุขภาพในครอบครัวที่ติดเชื้อมันที่บ้านหรือโรงพยาบาล การออกไปทำงานข้างนอกบ้านที่ต้องเผชิญทั้งฝุ่น PM2.5 และเสี่ยงต่อการติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ในที่ชุมชนหรือที่ทำงาน วัสดุที่ใช้ในครัวเรือนเหล่านี้ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อการป้องกันระบบทางเดินหายใจและการใช้งานอาจให้ความรู้สึกที่ผิดในการป้องกัน เนื่องจากยังไม่มีเข้าใจที่ดีถึงประสิทธิภาพของอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็กรวมถึงไวรัส ซึ่งบ่งชี้ว่าจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากผ้า และวัสดุผ้าทั่วไปกับอนุภาคขนาดต่างๆ รวมถึงอนุภาคขนาดของไวรัสหลายชนิดและฝุ่น PM2.5 ความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองของวัสดุผ้าทั่วไปสำหรับอนุภาคขนาดเล็กมีค่อนข้างจำกัด ในต่างประเทศได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากผ้าและวัสดุผ้าทั่วไปกับอนุภาคขนาดเล็ก (Rengasamy et al., 2010) และประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทั่วไปที่ใช้ในหน้ากากผ้าทางเดินหายใจ (Srivastava et al., 2021) มีการศึกษาประสิทธิภาพของผ้าสำหรับทำหน้ากากอนามัยแบบผ้าด้วยตัวเอง (Leiva et al., 2013)

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาค ความต่างของความดันและการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติ เพื่อความสวยงามและการสวมใส่ที่สบาย ข้อมูลที่ได้จากงานนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการผลิตหน้ากากผ้าในการพัฒนาต้นแบบหน้ากากเพื่อใช้ในการป้องกันระบบทางเดินหายใจจากการระบาดของโควิด-19 และฝุ่น PM2.5 และการสวมใส่ที่สบายและสวยงาม

3. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีการกรอง (Filtration theory) เป็นการอธิบายการกรองอนุภาคของตัวกรองเส้นใยไฟเบอร์ (Fibrous filter) ที่พิจารณาการดักจับอนุภาคด้วยเส้นใยเดี่ยว (Single fiber) ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว (Single-fiber efficiency) จะถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่กระทบเส้นใยต่อจำนวนอนุภาคที่จะกระทบหากเส้นกระแส (Streamlines) ไม่ถูกเบี่ยงเบนไปรอบเส้นใย ถ้ารัศมีของเส้นใย R_f ทำจัดทุกอนุภาคที่อยู่ภายในชั้นความหนา Y ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกรองอนุภาคของตัวกรองเส้นใยไฟเบอร์ (Willeke and Baron, 1993)

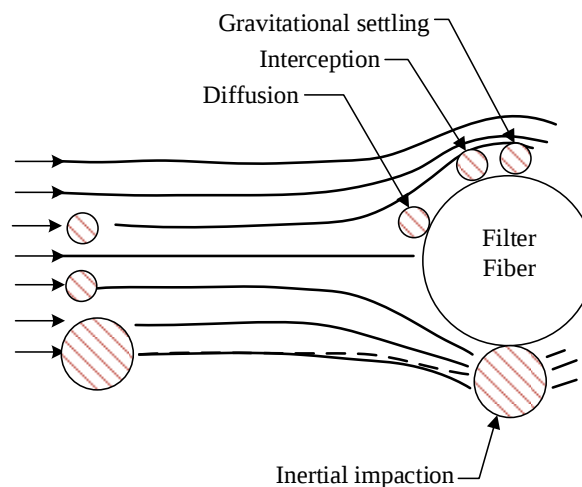
ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว η จะถูกนิยามเป็น (Willeke and Baron, 1993)

$$\eta = \frac{Y}{R_f} \quad (1)$$

ประสิทธิภาพโดยรวมหรือประสิทธิภาพรวม E ของตัวกรองที่ประกอบด้วยหลายเส้นใยในแผ่นสามารถอธิบายตามความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยวได้ คือ (Willeke and Baron, 1993)

$$E = 1 - \exp \left[\frac{-4\eta\alpha L}{\pi d_f (1 - \alpha)} \right] \quad (2)$$

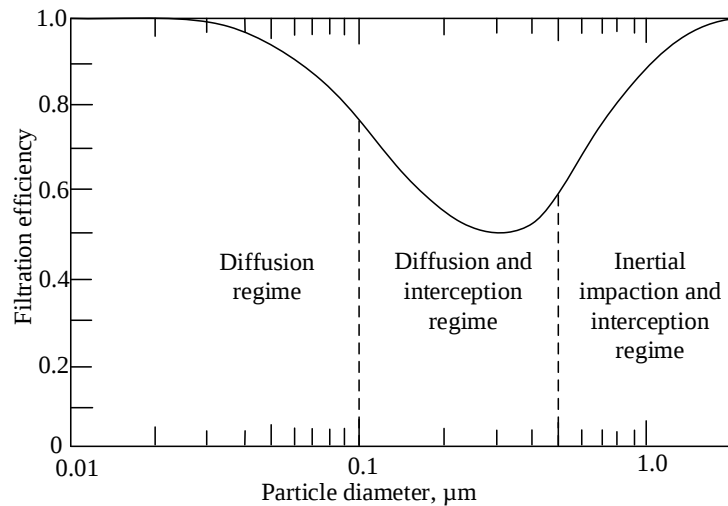
เมื่อ α คือความแข็งหรือความหนาแน่นของตัวกรอง ($1 -$ ความพรุน (porosity)) L คือความลึกหรือความหนาของตัวกรองและ d_f คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย



รูปที่ 2 กลไกการดักอนุภาคของเส้นใยแบบนอนวูฟเวน

ปกติแล้วเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกเบี่ยงเบนจากเส้นกระแสเนื่องจากหลายกลไกผลที่ตามมาคืออนุภาคจะชนกับพื้นผิวของเส้นใยและจะเกาะติดหรือสะสมอยู่บนเส้นใย โดยกลไกสำคัญที่ทำให้อนุภาคเกาะติดหรือสะสมตัวอยู่บนเส้นใยแบบนอนวูฟเวน (Nonwoven) คือการแพร่ (Diffusion) การกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย (Inertial impaction) การสกัดกั้น (Interception) และการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravitational settling) ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้น ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว η สามารถสมมติด้วยการประมาณที่ประกอบด้วยผลรวมเลขคณิตของประสิทธิภาพแต่ละตัวจากกลไกการแพร่ η_{diff} กลไกการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย η_{imp} กลไกการสกัดกั้น η_{inter} และกลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง η_{grav} โดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัดกั้นเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคขนาดใหญ่กว่า $0.5 \mu m$ การสกัดกั้นและการแพร่กระจายเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคขนาดในช่วง $0.1 \mu m$ ถึง $0.5 \mu m$ และการแพร่กระจายเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu m$ (Reineking and Porstendörfer, 1986) ซึ่งในแผ่นกรองเส้นใยบางชนิดที่สร้างจากเส้นใยที่มีประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic charge) จะมีกลไกเสริมการแพร่กระจายในการดักดูดอนุภาคขนาดเล็กกว่า $0.3 \mu m$ แผ่นกรองทุกชนิดจะมีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นต่ำในช่วงอนุภาคขนาด 0.1 ถึง $0.5 \mu m$ เนื่องจากเป็นช่วงขนาดอนุภาคที่กลไกการ

แพร่กระจาย การกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัดกั้นดักกรองได้ต่ำ โดยขนาดอนุภาคที่สามารถผ่านทะลุแผ่นกรองได้ดีที่สุด (Most penetrating particle size) คืออนุภาคขนาด $0.3\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.3\ \mu\text{m}$ เป็นขนาดอนุภาคที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองตามมาตรฐานของหน้ากากกรองอากาศหรือฝุ่นและอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.3\ \mu\text{m}$ ยังเป็นส่วนประกอบหลักของอนุภาคขนาดเล็กหรือฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ที่เป็นตัวกลางสำคัญในการแพร่กระจายไวรัสโควิด-19 เข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเทียบกับอนุภาคขนาดต่าง ๆ (Willeke and Baron, 1993)



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านขวา



(ค) ด้านซ้าย

รูปที่ 4 ภาพถ่ายหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น

4. วิธีดำเนินการวิจัย

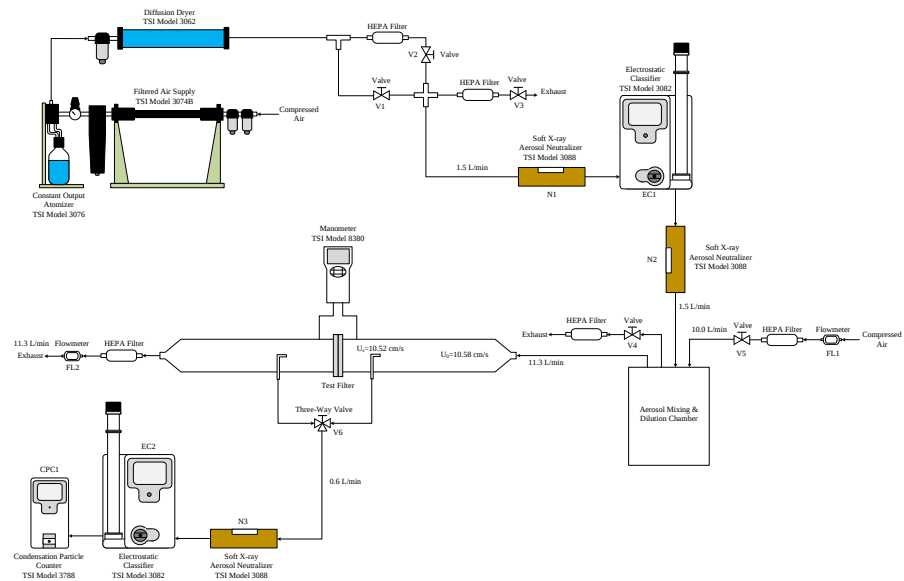
4.1 หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติเพื่อความสวยงามและการสวมใส่ที่สบาย

รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นได้ออกแบบให้มีรูปทรงหน้ากากที่สวยงามโอบรับกับใบหน้ามีโครงสร้าง 3 ชั้น คือ 1) ผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติกันน้ำและละอองฝอยขนาด 3 – 10 ไมครอนได้ 2) ผ้าเมลต์โบลนนอนวูฟเวน (Meltblown nonwovens) ที่มีคุณสมบัติในการกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.3 ไมครอนได้ และ 3) ผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติดูดซับสารคัดหลั่งและยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่มาจากผู้ใช้ หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นมีค่าต้านการหายใจต่ำจะทำให้ผู้สวมใส่ไม่รู้สึกเหนื่อยในขณะสวมใส่ หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติ 5 ข้อดังนี้

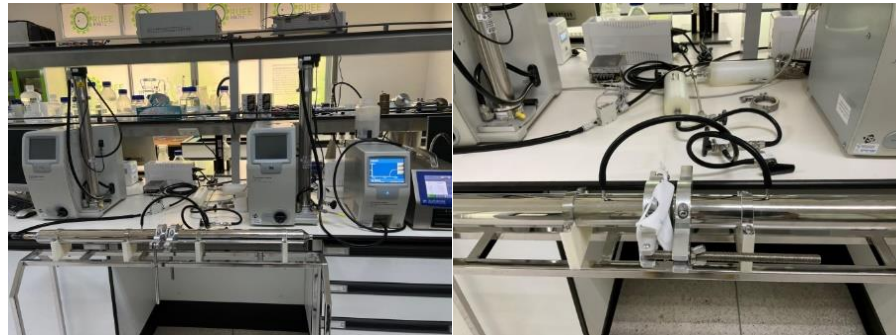
1. ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก (Particle filtration efficiency) ที่กรองฝุ่นและละอองฝอยจากเสมหะ ขนาดเล็กระดับ 0.1-10 ไมครอนได้
2. สามารถป้องกันการซึมผ่านของละอองฝอยเสมหะ หรือสารคัดหลั่งที่เป็นของเหลว (Fluid resistance) จากภายนอกสู่ผู้สวมใส่และจากเสมหะผู้สวมใส่สู่ภายนอกได้
3. มีความกระชับของหน้ากาก (Fit test) สามารถสวมใส่ได้แนบกับใบหน้า ป้องกันอากาศจากภายนอกเข้าได้
4. มีการซึมผ่านของอากาศได้ดี (Permeability Test) ทำให้มีการระบายของอากาศได้ดีและไม่ทำให้การหายใจลำบาก
5. สามารถซักล้างและนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่า 30 ครั้ง โดยจะไม่เสียคุณสมบัติพื้นฐานด้านการกรองฝุ่นและเชื้อโรค

4.2 การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาค

ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 μm ของวัสดุผ้าตามวิธีการทดสอบมาตรฐานของมาตรฐาน ASTM F2299-03 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อุปกรณ์ทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) (ASTM F2299/F2299M-03, 2017) วัสดุผ้าสำหรับทำหน้ากากที่ใช้ในการทดสอบจะถูกตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.76 cm รูปที่ 5 แสดงแผนภาพอุปกรณ์การทดลองสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุผ้าในการศึกษานี้ วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย ประกอบด้วย อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex spheres) แหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ตัวไล่ความชื้นแบบแพร่ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง (aerosol neutralizer) ชุดวาล์วปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment valve) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic size classifier) เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning Mobility Particle Sizer) มาโนมิเตอร์ (Manometer) ห้องทดสอบ (Test chamber) ห้องผสมและเจือจางละอองลอย



(ก) แผนภาพ



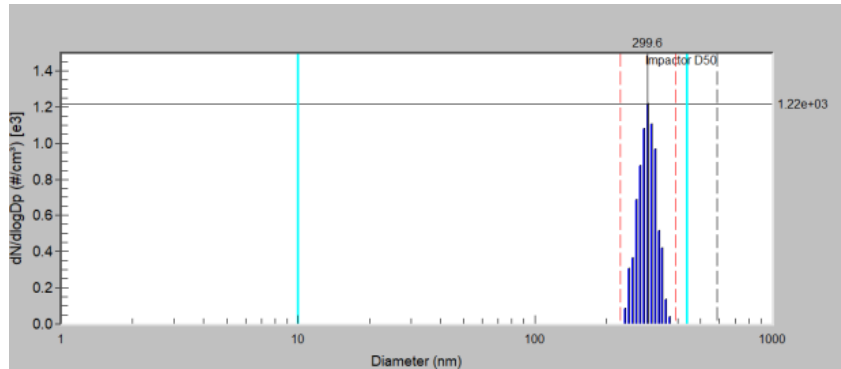
(ข) ภาพถ่าย

รูปที่ 5 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลองประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก
สำหรับการศึกษา

(Aerosol mixing and dilution chamber) มาตรวัดการไหล (Flow meter) และตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ และเครื่องมือการทดลองสำหรับการศึกษา ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองนี้ ใช้อนุภาครองกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 nm หรือ 0.3 μm ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต (geometric standard deviation) 1.6 % ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยจ่ายอนุภาครองกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ที่ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วน 1000 : 1 จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล่ความชื้นแบบแพร่ (Model 3062, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับให้เหมาะสมได้ด้วยชุดวาล์วปรับความเข้มข้นด้านหลังตัวไล่ความชื้น หลังจากชุดวาล์วปรับความเข้มข้น อนุภาคจะถูกทำให้มีสมดุลประจุบ็อลทซ์มัน (Boltzmann equilibrium

charge equivalent) ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อคัดแยกขนาดอนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) ด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยทำการแยกอนุภาคตกค้าง (Residual particles) ที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำออกให้ได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 μm รูปที่ 6 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ 0.3 μm ที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต มีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (median diameter) เท่ากับ 303.2 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mean diameter) เท่ากับ 304.3 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (geometric mean diameter) เท่ากับ 303.6 nm เส้นผ่าศูนย์กลางฐานนิยม (mode diameter) เท่ากับ 299.6 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (geometric standard deviation) เท่ากับ 1.07

หลังจากคัดแยกขนาดแล้วอนุภาคพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ 0.3 μm ถูกทำให้มีสภาพประจุเป็นกลางด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อป้องกันการสูญเสียอนุภาค (Particle losses) ในระบบหรือในท่อและห้องทดสอบตัวอย่างและเพื่อหลีกเลี่ยงผลของประจุไฟฟ้าสถิตที่จะเกิดขึ้นในขณะทดสอบประสิทธิภาพการกรองของวัสดุผ้า (Liu and Pui, 1974) ในการศึกษาใช้ท่อซิลิโคนนำไฟฟ้า (Conductive silicone tube) และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel tube) เป็นท่อนำส่งและการเก็บตัวอย่างอนุภาคเพื่อป้องกันการสูญเสียของอนุภาคในระบบทดสอบ โดยท่อซิลิโคนนำไฟฟ้าและท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าการทะลุผ่านของอนุภาคระหว่าง 100 – 300 nm มากกว่า 95% (Timko et al., 2009) หลังจากผ่านตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง อนุภาคเข้าไปยังห้องผสมและเจือจางละอองลอยเพื่อเจือจางกับอากาศให้ได้อัตราการไหลและความเข้มข้นของอนุภาคที่ต้องการ สำหรับการทดสอบหน้ากาก N95 ตาม 42 CFR 84 ของสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติสหรัฐ (National Institute for Occupational Safety and Health) หรือ NIOSH เป็นการจำลองในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst-case) ที่อาจพบได้ในสภาพแวดล้อมการทำงานทั่วไปคือทำให้เกิดการผ่านทะลุหรือแทรกซึมตัวกรองสูงสุด (Maximum filter penetration) จึงกำหนดอัตราการไหลของอากาศในการทดสอบที่อัตราการทำงานสูง (High work rate) ของมนุษย์คือ 85 หรือ 95 ลิตรต่อนาที (Janssen et al., 2005) ใน 42 CFR 84 จึงกำหนดอัตราการไหลในการทดสอบคือ 85 ลิตรต่อนาที สำหรับพื้นที่ผิว (Surface area) ของหน้ากากหรือแผ่นกรองประมาณ 135 cm^2 จะได้ความเร็วด้านหน้า (Face velocity) เท่ากับ 10.6 cm/s ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงใช้ความเร็วด้านหน้าเดียวกับการทดสอบหน้ากาก N95 คือ 10.6 cm/s สำหรับการทดสอบนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับความเร็วด้านหน้าประมาณ 10.6 cm/s ในการทดสอบนี้ได้กำหนดอัตราการไหลอนุภาคที่ประมาณ 11.3 L/min และพื้นที่ในการทดสอบประมาณ 17.8 cm^2 โดยมีตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) เท่ากับ 332.48 และตัวเลขสโตกส์ (Stoke's number) เท่ากับ 0.41 โดยกำหนดให้อัตราการไหลอนุภาคจากเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคกำหนดคงที่ที่ 1.5 L/min อัตราการไหลของอากาศสะอาดผ่านตัวกรองประสิทธิภาพสูงเพื่อเจือจาง 10.0 L/min และอัตราการไหลของอากาศปล่อยทิ้ง 0.2 L/min



รูปที่ 6 การกระจายขนาดอนุภาคพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ 0.3 μm

จากนั้นอัตราการไหลที่ต้องการสำหรับการทดสอบของอนุภาคขนาด 0.3 μm ที่ 11.3 L/min จะผ่านเข้าไปยังห้องทดสอบ (Test chamber) ซึ่งมีแผ่นวัสดุทดสอบอยู่ภายใน ในส่วนของห้องทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.76 cm ยาว 100 cm ซึ่งตัวอย่างวัสดุ (Material specimen) จะอยู่ห่างจากทางเข้าอนุภาค (Particle inlet) 10 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Duct diameters) โดยหัวเก็บตัวอย่างอนุภาค (Particle sampling probe) ก่อนแผ่นกรองจะห่างจากตัวอย่างวัสดุ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (9.52 cm) และหัวเก็บตัวอย่างอนุภาคหลังแผ่นกรองจะห่างจากตัวอย่างวัสดุ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (14.28 cm) หัวเก็บตัวอย่างทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 cm การเก็บตัวอย่างอนุภาคในการทดสอบนี้จะเป็นการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ทิศทางของของไหลที่ทางเข้าหัววัดและแกนของหัวเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกันคือขนานกับเส้นการไหลของของไหลและความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าหัววัดมีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอกคือประมาณ 10.6 cm/s ที่อัตราการไหลอนุภาค 0.6 L/min โดยที่หัวเก็บตัวอย่างมีตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 76.40 และตัวเลขสโตกส์เท่ากับ 1.77 ในขณะที่ทดสอบได้มีการวัดค่าความต่างความดันของแผ่นวัสดุผ้าด้วยมาโนมิเตอร์ (Model 8380, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)

โดยการหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุผ้าในการศึกษานี้จะทำการวัดการกระจายขนาดอนุภาคเชิงจำนวน (Number weighted particle size distribution) ทั้งก่อน (Up stream) และหลังผ่าน (Down stream) วัสดุผ้าทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้หรือ SMPS ที่ประกอบด้วย ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบควมแน่น (Model 3788, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) สำหรับการสูญเสียของอนุภาคภายใน SMPS มีการใช้อัลกอริทึมการสูญเสียการแพร่กระจาย (Diffusion loss algorithm) ในซอฟต์แวร์ควบคุมการวัดของ SMPS เมื่อขนาดอนุภาคละอองลอยเล็กกว่า 100 nm (Reineking and Porstendörfer, 1986) โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นวัสดุผ้าที่ทดสอบ η_{exp} จะสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{C_{\text{inlet}} - C_{\text{outlet}}}{C_{\text{inlet}}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ C_{inlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนผ่านของตัวกรองและ C_{outlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคหลังผ่านของตัวกรอง และค่าการทะลุผ่านอนุภาค (Particle penetration) ของตัวกรองจะสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{exp} = 100 - \eta_{exp} \quad (4)$$

ตารางที่ 2 แสดงช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบ ในการทดสอบนี้จะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบที่ 25°C และ 55 %RH ตามลำดับ ในการทดสอบจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งกับ 1 ชิ้นตัวอย่างและทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นตัวอย่างทดสอบแล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2 ช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบ

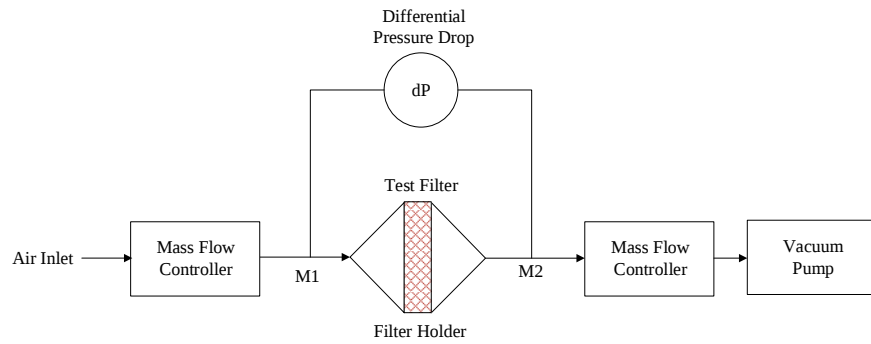
Variable	Range
Particle type	Polystyrene Latex spheres
Particle number concentration	$1.1 - 2.9 \times 10^3$ particles/cm ³
Particle size	0.3 μ m
Filter Test Area	17.8 cm ²
Flow rate	11.3 L/min
Face velocity	10.6 cm/s
Operating relative humidity	55 %RH
Operating pressure	1 atm
Operating temperature	25°C

4.3 การประเมินค่าความต่างของความดัน

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบความต่างของความดันของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน EN14683 ดังแสดงในรูปที่ 7 ที่ประกอบด้วย ฟังก์ชันเจอร์ทดสอบ ตัววัดความดันแตกต่าง ตัววัดและควบคุมอัตราการไหล ป้อนสุญญากาศ ระบบการไหลอากาศในการทดสอบจะถูกวัดและควบคุมให้คงที่ด้วยตัววัดอัตราการไหลเชิงมวลและป้อนสุญญากาศ มีพื้นที่การทดสอบ (Test Area) 4.9 cm² หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างทดสอบ 2.5 cm โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหลทดสอบคงที่ที่ 8 ± 0.2 L/min โดยค่าความต่างของความดันของหน้ากากต่อพื้นที่ $\Delta P / \text{cm}^2$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta P / \text{cm}^2 = (X_{M1} - X_{M2}) / 4.9 \quad (5)$$

เมื่อ X_{M1} คือค่าความดัน (Pressure) ที่วัดได้ที่มาโนมิเตอร์ M_1 (มีหน่วยเป็น Pa.) X_{M2} คือค่าความดันที่วัดได้ที่มาโนมิเตอร์ M_2 และ 4.9 คือพื้นที่ในการทดสอบของหน้ากากตัวอย่างหน่วยเป็น cm² โดยในการทดสอบจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งกับ 1 ชิ้นตัวอย่างและทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นตัวอย่างทดสอบแล้วหาค่าเฉลี่ย



(ก) แผนภาพ



(ข) ภาพถ่าย

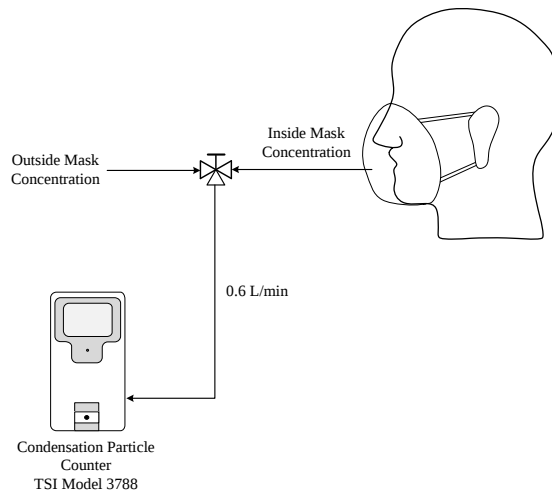
รูปที่ 7 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบความต่างของความดันของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน EN14683

4.4 การประเมินการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากาก

ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและความพอดีหรือการรั่วเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากกรองอากาศรวม โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคบอกความสามารถกรองอนุภาคของหน้ากากในช่วงขนาดที่กำหนดซึ่งรวมถึงไวรัส (Virus) และอนุภาคขนาดเล็กระดับซับไมครอน (Submicron particles) อื่น ๆ ส่วนความพอดีหรือการรั่วในขณะสวมใส่บอกความสามารถป้องกันการรั่วของหน้ากากบริเวณใบหน้า โดยประสิทธิภาพของหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากกรองอากาศรวม (Total efficiency) η_{total} หาได้จาก

$$\eta_{total} = \eta_{filtration} - TIL \quad (6)$$

เมื่อ $\eta_{filtration}$ คือประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากกรองอากาศและ TIL คือการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากกรองอากาศ รูปที่ 8 แสดงแผนภาพการประเมินการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากและตัวชี้หน้ากาก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากาก โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบจาก OSHA Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134 กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 5 คน ที่มีรูปหน้าตามขนาดของหน้ากาก ใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบควบแน่น (Model 3788, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)



(ก) แผนภาพ



(ข) ภาพถ่าย

รูปที่ 8 อุปกรณ์และเครื่องมือการประเมินการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้า
ประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น

ในการนับความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคภายในและภายนอกหน้ากากที่อัตราการไหล 1.5 L/min ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการขนาด 3 x 3 x 3 m ที่มีการควบคุมปริมาณอนุภาคละอองลอยในอากาศให้คงที่โดยแต่ละตัวอย่างจะทำการทดสอบโดยการหายใจเข้าและออกปกติเป็นเวลา 60 วินาที และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลอง ความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคภายในและภายนอกหน้ากากใช้คำนวณหาค่าปัจจัยความพอดี (Fit factor) และค่าประสิทธิภาพความพอดี (Fit efficiency) โดยปัจจัยความพอดีหาได้จากสมการ

$$FTT = \frac{C_{outside}}{C_{inside}} \quad (7)$$

เมื่อ $C_{outside}$ คือค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคภายนอกหน้ากากและ C_{inside} คือค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคภายในหน้ากาก และคำนวณค่าประสิทธิภาพความพอดี η_{fit} จากสมการ

$$\eta_{fit} = \frac{C_{outside} - C_{inside}}{C_{outside}} \times 100 \quad (8)$$

และการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากกรองอากาศหาได้จาก

$$TIL = 100 - \eta_{fit} \quad (9)$$

5. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอนของ หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นจากตารางจะเห็นความแตกต่าง ของความเข้มข้นจำนวนอนุภาคก่อน (Upstream) และหลังผ่าน (Downstream) หน้ากากทดสอบ โดยค่าความเข้มข้นรวมของอนุภาคก่อนผ่านจะมีค่าที่สูงกว่าหลัง ผ่าน เนื่องจากอนุภาคบางส่วนถูกดักกรองหรือสะสมตัวอยู่บนเส้นใยของวัสดุผ้า กรอง จากตารางพบว่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคก่อนและหลังผ่านหน้ากากทดสอบ เท่ากับ 5993.2 อนุภาค และ 125.4 อนุภาค ตามลำดับ คำนวณค่าประสิทธิภาพการ กรองอนุภาคตามสมการที่ 3 จะได้เท่ากับ 97.89% และคำนวณค่าการผ่านทะลุของ อนุภาคตามสมการที่ 4 จะได้เท่ากับ 2.11% ซึ่งผลการทดลองการทะลุผ่านและ ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคที่ได้จากการศึกษานี้สอดคล้องกับที่รายงานไว้ใน (Rengasamy et al., 2010) พบว่าการทะลุผ่านอนุภาคเกลือ (NaCl) ขนาดในช่วง 0.02 ถึง 1 μm ของวัสดุผ้าหลายชนิดที่ใช้ในการทดสอบของ (Rengasamy et al., 2010) สูงกว่าการทะลุผ่านของวัสดุกรองหน้าก N95 โดยค่าการทะลุผ่านของ อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 ถึง 1 μm ที่รายงานโดย (Rengasamy et al., 2010) จะอยู่ในช่วง 40 – 97% โดยมาตรฐาน ASTM F2100-19e1 ได้ กำหนดให้วัสดุกรองที่นำมาใช้ทำหน้ากากอนามัยจะต้องมีประสิทธิภาพการกรอง อนุภาคมากกว่าหรือเท่ากับ 95%, 98% และ 98% ในระดับการป้องกันที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (ASTM F2100-19e1, 2019) ซึ่งประสิทธิภาพการกรองของหน้ากาก โดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค คุณสมบัติของวัสดุตัวกรองและความเร็ว ด้านหน้า ซึ่งลักษณะการทอ ความพรุน (Porosity) ขนาดรูพรุน (Pore size) และ ความหนาของวัสดุผ้าเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาค โดยวัสดุผ้า ที่มีความพรุนต่ำสุดและขนาดรูพรุนเล็กจะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคสูง วัสดุ ผ้าที่มีความพรุนสูงสุดและขนาดรูพรุนใหญ่จะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคต่ำ และวัสดุผ้าที่มีความพรุนสูงและขนาดรูพรุนเล็กจะให้ต้านทานการไหลของอากาศสูง ปกติแล้ววัสดุผ้าทั่วไปจะมีความพรุนและขนาดรูพรุนที่ใหญ่ (มากกว่า 10 μm หรือ เท่ากับ 100 μm) ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคขนาด 0.3 μm ที่ใช้ในการทดสอบในการศึกษา นี้ จึงทำให้อนุภาคขนาด 0.3 μm ทะลุผ่านได้ง่ายโดยมีการแพร่กระจายและการสกด กันกับเส้นใยของวัสดุผ้าน้อย จากสมการที่ 2 จะสามารถอธิบายถึงผลของความหนา ของวัสดุกรองต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคคือความหนาของวัสดุผ้าจะเป็น พังค์ชันของประสิทธิภาพการกรองอนุภาค โดยวัสดุกรองที่มีความหนาจะสามารถ กรองอนุภาคได้ดีกว่าวัสดุกรองที่มีความบางกว่า สำหรับผลของความเร็วด้านหน้า นั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 μm โดยที่ความเร็วด้านหน้า สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 μm ของวัสดุผ้าสูงขึ้น ค่อนข้างเชิงเส้น (Linear) เนื่องจากความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นจะส่งผลให้มีโมเมนตัม (Momentum) หรือแรงเฉื่อยสูงขึ้นตาม จึงสามารถดักกรองอนุภาคด้วยกลไกการ สกกดกันกับเส้นใยของวัสดุผ้าได้ง่ายขึ้น ในส่วนของผลประจุไฟฟ้าสถิตในวัสดุกรอง หน้ากาก N95 จะมีไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าที่เส้นใยจึงทำให้ดักกรองอนุภาคขนาด

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอนของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น

Sample No.	Test Area (cm ²)	Upstream Concentration (particles/cm ³)	Downstream Concentration (particles/cm ³)	Particle Filtration Efficiency (%)
1	17.8	5379	129	97.60
2	17.8	5988	153	97.44
3	17.8	6106	115	98.12
4	17.8	5987	134	97.76
5	17.8	6506	96	98.52
Average		5993.2	125.4	97.89

ตารางที่ 4 ความต่างของความดันของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น

Sample No.	Test Area (cm ²)	ΔP (inH ₂ O)	ΔP (mmH ₂ O)	ΔP (mmH ₂ O/cm ²)
1	4.9	1.00	25.40	5.18
2	4.9	1.00	25.40	5.18
3	4.9	1.00	25.40	5.18
4	4.9	1.00	25.40	5.18
5	4.9	1.00	25.40	5.18
Average		1.00	25.40	5.18

ตารางที่ 5 การรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น

Sample No.	Outside Concentration (µg/m ³)	Inside Concentration (µg/m ³)	Fit Efficiency (%)	Total Inward leakage (%)	Fit Factor
1	44.50	9.20	79.33	20.67	4.84
2	43.60	9.10	79.13	20.87	4.79
3	44.20	9.30	78.96	21.04	4.75
4	44.10	8.90	79.82	20.18	4.96
5	44.40	9.00	79.73	20.27	4.93
Average		9.10	79.39	20.61	4.85

เล็กกว่า $0.3\ \mu\text{m}$ ได้ดีกว่าวัสดุผ้าที่เกิดผลไฟฟ้าสถิตน้อยกว่า โดยไฟฟ้าสถิตบนเส้นใยจะช่วยเสริมประสิทธิภาพการกรองด้วยแรงดึงดูดและผลึกทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ระหว่างอนุภาคและเส้นใยจึงให้สามารถดักกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า $0.3\ \mu\text{m}$ ได้ดีขึ้น (ASTM F2100-19e1, 2019)

ตารางที่ 4 แสดงความต่างของความดันของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น จากตารางจะพบว่าค่าความต่างของความดันของหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ $1.00\ \text{inH}_2\text{O}$, $25.40\ \text{mmH}_2\text{O}$ และ $5.18\ \text{mmH}_2\text{O}/\text{cm}^2$ สำหรับมาตรฐาน ASTM F2100:2019 กำหนดให้ค่าความต่างของความดันของหน้ากากอนามัยในระดับการป้องกันที่ 1, 2 และ 3 ต้องน้อยกว่า 5.0, 6.0 และ $6.0\ \text{mmH}_2\text{O}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ และในมาตรฐาน 42 CFR 84 ของ NIOSH กำหนดให้ค่าการต้านการหายใจเข้าและออกของหน้ากาก N95 ต้องน้อยกว่า 35 และ $25\ \text{mmH}_2\text{O}$ ตามลำดับซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้ในการศึกษาจะเห็นว่าหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าความต่างของความดันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของทั้ง 2 มาตรฐานดังกล่าว โดยทั่วไปแล้ววัสดุกรองที่มีความพรุนสูงและขนาดรูพรุนเล็กจะให้ต้านทานการไหลของอากาศสูงหรือค่าความต่างความดันสูง และวัสดุกรองที่มีความหนาจะมีค่าความต่างของความดันที่สูงกว่าวัสดุกรองที่มีความบางกว่า

ตารางที่ 5 แสดงการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น จากตารางพบว่าค่าคำนวณค่าประสิทธิภาพความพอดี การรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากและปัจจัยความพอดีมีค่าเท่ากับ 79.39%, 20.61% และ 4.85 ตามลำดับ ทั้งนี้ในปัจจุบันคณะกรรมการบริหารงานความปลอดภัยและสุขภาพอนามัย การประกอบอาชีพ (Occupational Safety and Health Administration หรือ OSHA) ของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดค่า มาตรฐานของปัจจัยความพอดีมีค่าเท่ากับ 100 สำหรับหน้ากาก N95 และหน้ากาก Half-face และค่าปัจจัยความพอดีเท่ากับ 500 สำหรับหน้ากาก Full-face ตาม OSHA Respiratory Protection Standard 29CFR1910.134 ประกาศเมื่อวันที่ 8 มกราคม ค.ศ.1998 นอกจากนี้ มาตรฐาน GB2626-2019 และ KMOEL-2017-64 ได้กำหนดให้การรั่วเข้าด้านในรวมผ่านหน้ากาก KN95 และ KF94 ต้องไม่เกิน 8% และมาตรฐาน EN149:2001 ได้กำหนดให้การรั่วเข้าด้านในรวมผ่านหน้ากาก FFP1, FFP2 และ FFP3 ต้องไม่เกิน 22%, 8% และ 2% ตามลำดับ ซึ่งหน้ากากที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ถือว่ามีค่าการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของหน้ากาก FFP1 ตามมาตรฐาน EN149:2001 โดยจุดรั่วหลักของหน้ากากทั่วไปมี 2 จุดคือบริเวณดั้งจมูกและแก้ม ซึ่งบริเวณข้างแก้มสามารถแก้ไขได้โดยการปรับแต่งสายให้สามารถรัดได้แน่นและฟิตพอดีขึ้นหรือการใช้สายแบบรัดศีรษะจะช่วยให้มีความฟิตพอดีในขณะสวมใส่ช่วยลดการรั่วเข้าหรือออกขณะสวมใส่ได้ ส่วนการรั่วบริเวณดั้งจมูกสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วัสดุประเภทโฟมหรือฟองน้ำที่มีความพรุนต่ำรูพรุนเล็กติดเสริมบริเวณแถบดั้งจมูกจะช่วยให้หน้ากากแนบสนิทกับใบหน้าบริเวณดั้งจมูกและร่องแก้มมากขึ้นทำให้การรั่วต่ำลงได้ นอกจากนี้ควรมีการทดสอบความพอดีกับใบหน้ารายบุคคลก่อนใช้งานเพื่อที่จะได้ทราบถึงค่าการรั่วเข้ารวมของหน้ากากที่ใช้

6. บทสรุป

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคความต่างของความดันและการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติ เพื่อความสวยงามและการสวมใส่ที่สบาย งานนี้ได้ออกแบบให้มีรูปทรงหน้ากากที่สวยงามโอรับกับใบหน้ามีโครงสร้าง 3 ชั้น คือ 1) ผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีความสมบัติกันน้ำและละอองฝอยขนาด 3 – 10 ไมครอนได้ 2) ผ้าเมลต์โบลนบนวูฟ

เวน (Meltblown nonwovens) ที่มีคุณสมบัติในการกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.3 ไมครอนได้ และ 3) ผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติดูดซับสารคัดหลั่งและยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่มาจากผู้ใช้ หน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นมีค่าต้านการหายใจต่ำจะทำให้ผู้สวมใส่ไม่รู้สึกเหนื่อยในขณะสวมใส่ โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ EN14683 เพื่อหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและความต่างของความดัน ในส่วนการประเมินการรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากได้อ้างอิงวิธีการทดสอบจาก OSHA Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134 ผลการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากผ้าประสิทธิภาพสูงแบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 97.89% ค่าความต่างของความดันของหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 5.18 mmH₂O/cm² โดยหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพความพอดี การรั่วเข้าด้านในรวมของหน้ากากและปัจจัยความพอดีมีค่าเท่ากับ 79.39%, 20.61% และ 4.85 ตามลำดับ หน้ากากที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ถือว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของหน้ากาก FFP1 ตามมาตรฐาน EN149:2001 ได้ ข้อมูลที่ได้จากงานนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการผลิตหน้ากากผ้าในการพัฒนาต้นแบบหน้ากากเพื่อใช้ในการป้องกันระบบทางเดินหายใจจากการระบาดของโควิด-19 และฝุ่น PM2.5 และการสวมใส่ที่สบายและสวยงาม ในงานวิจัยต่อไปจะได้มีการวิจัยและพัฒนาต่อยอดในปรับปรุงรูปทรงของหน้ากากให้มีความกระชับเหมาะกับรูปหน้าของคนไทยและคนเอเชียเพื่อลดการรั่วเข้าด้านในของหน้ากากให้สามารถใช้งานได้เทียบเคียงกับหน้ากาก N95/KN95/KF94/FFP2 ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีเพื่ออุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบทั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- ASTM F2100-19e1, (2019). Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM F2299 / F2299M-03(2017), (2017). Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydin, O., Emon, B., Cheng, S., Hong, L., Chamorro, L. P., Saif, M. T. A., (2020). Performance of Fabrics for Home-made Masks Against the Spread of COVID-19 through Droplets: A Quantitative Mechanistic Study. *Extreme Mechanics Letters*, 40; 100924
- Department of Disease Control, COVID-19 situation report, Available Source: <https://covid19.ddc.moph.go.th/>, October 24, 2020. (in Thai)
- El-Atab, N., Qaiser, N., Badghaish, H. Shaikh, S. F. and Hussain, M. M., (2020). Flexible Nanoporous Template for the Design and

- Development of Reusable Anti-COVID-19 Hydrophobic Face Masks. *ACS Nano*, 14 (6); 7659–7665.
- Fushimi, A, Hasegawa, S, Takahashi, K, Fujitani, Y, Tanabe, K, Kobayashi, S., (2008). Atmospheric Fate of Nuclei-mode Particles Estimated from the Number Concentrations and Chemical Composition of Particles Measured at Roadside and Background Sites. *Atmospheric Environment*, 42; 949–59.
- Intra, P. and Siri-achawawath, T., (2019). Development of an Online Particulate Monitoring System for Measurement of the Mass and Number Concentrations and Size Distributions of Ambient PM₁₀, PM_{2.5} and sub-400 nm Particles. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 41(6), 1339-1347.
- Janssen, L.L., Anderson, N.J., Cassidy, P.E., Weber, R.A. and Nelson, T.J., (2005). Interpretation of Inhalation Airflow Measurements for Respirator Design and Testing. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 22; 122–141.
- Konda, A., Prakash, A., Moss, G. A., Schmoldt, M., Grant, G. D. and Guha, S., (2020). Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks. *ACS Nano*, 14 (5); 6339-6347.
- Leiva, G.M.A., Santibañez, D.A., Ibarra, S., Matus, P., Seguel, R., (2013). A Five-year Study of Particulate Matter (PM_{2.5}) and Cerebrovascular Diseases. *Environmental Pollution*, 181; 1-6.
- Liu, B.Y.H and Pui, D.Y.H., (1974). Equilibrium bipolar charge distribution of aerosols. *Journal of Colloid and Interface Science*, 49 (2); 305–312.
- O'Dowd, K., Nair, K.M., Forouzandeh, P., Mathew, S., Grant, J., Moran, R., Bartlett, J., Bird, J. and Pillai, S.C., (2020). Face Masks and Respirators in the Fight Against the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials, Advances and Future Perspectives. *Materials*, 13; 3363
- Reineking, A. and Porstendörfer, J., (1986). Measurements of Particle Loss Functions in a Differential Mobility Analyzer (TSI, Model 3071) for Different Flow Rates. *Aerosol Science and Technology*, 5; 483-486.
- Rengasamy, S., Eimer, B. and Shaffer, R.E., (2010). Simple Respiratory Protection—Evaluation of the Filtration Performance of Cloth Masks and Common Fabric Materials Against 20–1000 nm Size Particles. *The Annals of Occupational Hygiene*, 54 (7); 789–798.
- Sickbert-Bennett E. E., Samet J. M., Clapp P. W., et al. (2020). Filtration Efficiency of Hospital Face Mask Alternatives Available for Use During the COVID-19 Pandemic. *JAMA Intern Med*, Published online August 11.

- Srivastava, A., (2021). COVID-19 and Air pollution and Meteorology-an Intricate Relationship: A Review. *Chemosphere*, 263, 128297.
- Thepnuan, D., Yabueng, N., Chantara, S., Prapamontol, T. and Tsai, Y.I. (2020). Simultaneous Determination of Carcinogenic PAHs and Levoglucosan Bound to PM_{2.5} for Assessment of Health Risk and Pollution Sources during a Smoke Haze Period. *Chemosphere*, 257; 127154.
- Timko, M.T., Yu, Z., Kroll, J., Jayne, J.T., Worsnop, D.R., Miake-Lye, R.C., Onasch, T.B., Liscinsky, D., Kirchstetter, T.W., Destailats, H., Holder, A.L., Smith, J.D. and Wilson, K.R., (2009) Sampling Artifacts from Conductive Silicone Tubing. *Aerosol Science and Technology*, 43(9); 855-865.
- Willeke, K. and Baron, P.A., (1993). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, John Wiley & Sons, New York.