

การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดย เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิต

Evaluation of the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks by Electrostatic and Light Scattering Particle Counters

พานิช อินตะ* วิสูตร อาสนวิจิตร และ วิสาขน์ภัสร์ รัตนจันทร์

หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ป่าป้อง ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220

Panich Intra* Visut Asanavijit and Wisanapat Rattanachan

Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna, Papong, Doisaket, Chiangmai, 50220, Thailand

*Corresponding Author E-mail: panich.intra@rmutl.ac.th

Received: Jan 28, 2022; Revised: Mar 08, 2022; Accepted: Apr 19, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับจำนวนอนุภาคของเครื่องแบบกระเจิงแสงและแบบไฟฟ้าสถิต สำหรับใช้ประเมินประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ผ่านการรับรองจาก ออย. สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กับอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s พื้นที่ทดสอบเท่ากับ 17.8 cm^2 ทำการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวนก่อนและหลังผ่านหน้ากากตัวอย่างด้วยเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่อง จากผลการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่องอยู่ในช่วงค่า 95.38–98.61% โดยความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.99, 2.03, 1.84 และ 1.79 สำหรับอนุภาคขนาด 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสามารถใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงตามที่มาตรฐาน ASTM F2299-03 กำหนดไว้

คำสำคัญ: โควิด19, หน้ากากอนามัย, เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง, เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

Abstract

The goal of this study was to use light scattering and electrostatic particle counters to evaluate the particle filtration efficiency of surgical masks. Samples of surgical masks that have been approved by the FDA were chosen for testing in this study. Particle filtration efficiency was measured using polystyrene latex spherical particles with diameters of 0.1, 0.5, 1.0, and 1.5 μm at a face velocity of 10.6 cm/s and a test area of 17.8 cm^2 according to the ASTM F2299-03 standard. The

light scattering and electrostatic particle counters were used to measure the upstream and downstream particle number concentrations of the test mask in order to evaluate the measured particle filtration efficiency of both counters. The particle filtration efficiency of the two counters was found to be similar based on the experimental results. It was shown that the particle filtration efficiency that obtained from both counters were in the range of 95.38–98.61%, the difference in the mean absolute percentage error of the particle filtration efficiency between the light scattering and electrostatic particle counts was about 0.99, 2.03, 1.84 and 1.79 for particles 0.1, 0.5, 1.0, and 1.5 μm , respectively. The results of the comparison suggest that electrostatic particle counters may be used to measure particle filtration efficiency in a way that is comparable to the ASTM F2299-03 standard for light scattering particle counters.

Keyword: COVID19, Surgical Mask, Light scattering particle counters, Electrostatic particle counters

1. บทนำ

การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกทำให้ยอดผู้ติดเชื้อสะสมสูงหลายล้านคน ทำให้หน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) มีความต้องการสูงเพื่อใช้ในการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโควิด-19 จากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลวและละอองลอยแบคทีเรียจากปากและจมูก [1],[2] โดยในช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทยทั้ง 4 รอบเกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยเฉพาะหน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 จากปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตหน้ากากดังกล่าว ได้มีงานวิจัยที่แนะนำเกี่ยวกับวัสดุป้องกันระบบทางเดินหายใจเพื่อเป็นทางเลือกในการใช้ในช่วงที่หน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขาดแคลน [3–10] และยังมีนำเข้าหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 จากต่างประเทศมาจำหน่ายในประเทศ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้ออกมาตรฐาน มอก. 2424–2562 หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวและ มอก. 2480–2563 หน้ากาก N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ขึ้นเพื่อกำหนดมาตรฐานและคุณภาพให้กับหน้ากากอนามัยที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยหน้ากากที่จำหน่ายจะต้องผ่าน มอก. นี้ จากความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 เพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดโรงงานผลิตหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขึ้นใน

ประเทศมากกว่า 100 โรงงาน ซึ่งในกระบวนการผลิตหน้ากากจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากทุกล็อตการผลิต แต่เนื่องจากค่าตรวจสอบวิเคราะห์ในปัจจุบันยังมีราคาสูงหากส่งตรวจต่างประเทศ อีกทั้งห้องปฏิบัติการทดสอบในประเทศยังมีจำกัดไม่เพียงพอต่อความต้องการในการทดสอบ จึงทำให้โรงงานมีความต้องการเครื่องมือทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของโรงงาน

แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตรวจสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพยังมีราคาสูงอยู่ในหลักหลายล้านบาท จึงทำให้โรงงานผลิตหน้ากากส่วนใหญ่ยังไม่มีการตรวจสอบคุณภาพได้ตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ในปัจจุบันการพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติที่มีการนำเข้ามีลักษณะโครงสร้าง เทคนิค วิธีการ การทำงาน และราคาแตกต่างกันออกไป เช่น TSI 8130A AUTOMATED FILTER TESTER ของบริษัท TSI ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกำหนดอนุภาคโพสิทีฟไดรินลาเท็กซ์, NaCl, Emery Oil, DEHS ช่วงการวัดความเข้มข้นของอนุภาค 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถปรับอัตราการไหลของอนุภาคทดสอบได้ในช่วง 5–90 L/min สามารถวัดความดันแตกต่างได้ 0–250 mmH₂O สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 6 ล้านบาท [11] TSI 3610 AUTOMATED FILTER TESTER ของบริษัท TSI ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการ

กรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยแบบอัดโนมิติตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 สามารถกักนิโคอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์, NaCl, Emery Oil, DEHS สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 8 ล้านบาท [12] Automatically Particular Filtration Efficiency Tester รุ่น G506 บริษัท QINSUN/STANDARD ประเทศจีน เป็นเครื่องที่ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัดโนมิติตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกักนิโคอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์, NaCl, Emery Oil, DEHS ช่วงการวัดความเข้มข้นของอนุภาค 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถปรับอัตราการไหลของอนุภาคทดสอบได้ในช่วง 5–90 ลิตรต่อนาที สามารถวัดความดันแตกต่างได้ 0–250 mmH₂O สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 2.6 ล้านบาท [13]

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีมีการวิจัยและพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัดโนมิติต จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบ และจัดหาเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้ต้นแบบที่สามารถทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคได้ทั้งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ได้ตามมาตรฐาน มอก. 2424–2562 และ มอก. 2480–2562 สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้ในรายละเอียดการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.1 μm ตามหัวข้อที่ 4.6 รายการที่ 3 ของ มอก. 2424–2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน ASTM F2100 [14] ซึ่งเป็นการกำหนดมาตรฐานสำหรับประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) [15] และในมาตรฐาน ASTM F2100 ได้มีการอ้างมาตรฐาน ASTM F2299-03 [16] วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อุณหภูมิของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อุณหภูมิของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อนุภาคทรงกลมชนิดโพลีสไตรีน ลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex, PSL) รายละเอียดในมาตรฐาน ASTM F2299-03 ได้กำหนดให้ทดสอบกับอนุภาคทรงกลมชนิดโพลีสไตรีน ลาเท็กซ์ แบบ

ขนาดเดี่ยว (Monodispersed aerosol) ขนาดอนุภาคที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0.1–5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าทดสอบได้ในช่วง 0.5–25 cm/s โดยใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง (Light scattering particle counter) เป็นตัวนับจำนวนอนุภาค มอก. 2480–2562 เป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หน้ากากใช้ครั้งเดียวชนิด N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามหัวข้อที่ 4.3 รายการที่ 1 ของ มอก. 2424–2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) ของสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของประเทศสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) [16] รายละเอียดการทดสอบหน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) นี้กำหนดอัตราการไหลอากาศในการทดสอบที่อัตราการทำงานสูงของมนุษย์คือ 85 หรือ 95 L/min กับอนุภาคเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Count Median Diameter, CMD) เท่ากับ $0.075 \pm 0.02 \mu\text{m}$ หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (Mass Median Aerodynamic Diameter, MMAD) เท่ากับ 0.3 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (Geometric Standard Deviation, GSD) ไม่เกินกว่า 1.86% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคในมาตรฐาน 42 CFR 84 ได้กำหนดให้เป็นตัวนับจำนวนอนุภาคแบบโฟโตมิเตอร์กระเจิงแสง (Light scattering photometer) หรือเครื่องมือแบบเทียบเคียง (Equivalent instrumentations) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ของมาตรฐานทั้ง 2 โดยได้กำหนดให้ตัวนับจำนวนอนุภาคเป็นแบบกระเจิงแสงหรือเทียบเคียง แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงสำหรับนับจำนวนอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.1 หรือ 0.3 μm ที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันยังมีราคาสูงในหลักหลายแสนถึงล้านบาท ดังนั้นการใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตจึงเป็นเครื่องมือทางเลือกในการใช้เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบเทียบเคียงตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 ได้ เนื่องจากเป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่สามารถนับ

จำนวนอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง โดย Intra et al. [17–20] ได้รายงานประสิทธิภาพการนับอนุภาคของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตว่าอยู่ที่ประมาณ 99.60 ถึง 100 % และ 99.55 ถึง 100 % สำหรับอนุภาค DEHS และ NaCl ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 50 ถึง 500 nm ตามลำดับ และหลักการวัดอนุภาคหรือฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ได้ออกเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มอก. 3030-2563 เครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองลอยหลักการไฟฟ้าสถิตโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานเครื่องวัดฝุ่นละอองลอย PM1.0, PM2.5 และ PM10 ขึ้นในประเทศไทย อีกทั้งเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตนี้ยังสามารถพัฒนาและสร้างขึ้นเองได้ภายในประเทศทำให้มีราคาถูกกว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงจึงทำให้ต้นทุนของเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติมีราคาถูกกว่าเครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ

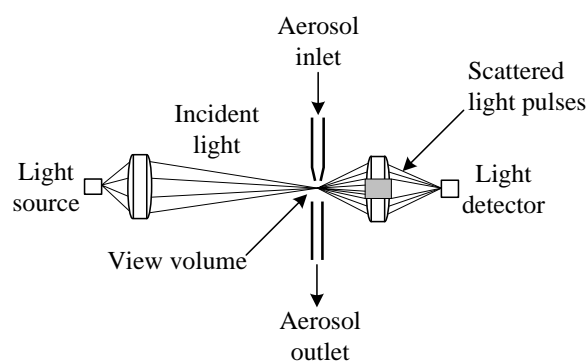
ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับจำนวนอนุภาคของเครื่องแบบกระเจิงแสงและแบบไฟฟ้าสถิต สำหรับใช้ประเมินประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ โดยเลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ผ่านการ

รับรองจาก อย. สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กับอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s กับพื้นที่ทดสอบเท่า 17.8 cm^2 โดยข้อมูลผลการศึกษาในบทความวิจัยนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขึ้นในประเทศให้ทันต่อความต้องการเครื่องทดสอบตัวกรองอนุภาค ในการศึกษาวิจัยทางประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทย

2. หลักการเครื่องนับจำนวนอนุภาค

2.1. เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการกระเจิงแสง (Scattered light) มีความไวในการวัดมากสำหรับการวัดความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า 1 μm ไปจนถึง 20 μm ลักษณะโครงสร้างและการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยการผลิตสัญญาณแสงรังสีหักเหที่ตรวจจับได้จากเคลื่อนที่ของอนุภาคตัด



รูปที่ 1 Principle of the light scattering particle counting

ผ่านแสงเพื่อนำไปแปลงค่าเป็นจำนวนของอนุภาค หลักการกระเจิงแสงมีข้อดีคือมีการรบกวนจากการไหลของอนุภาคน้อยมากและให้ข้อมูลการวัดทันทีซึ่งเหมาะสำหรับการวัดอย่างต่อเนื่อง ข้อเสียของหลักการกระเจิง

แสงนี้คือการกระเจิงแสงอาจมีความไวในการเปลี่ยนแปลงน้อยของดัชนีการหักเห (Refractive index) เมื่อมุมการกระจัดกระจายแสง [21]ขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความไม่ชัดเจนหรือผล

การวัดที่ไม่ถูกต้อง หลักการกระเจิงแสงจะมีความแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์คือไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำการถ่ายภาพของอนุภาคและหลักการนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ 0.03–20 μm ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 10^5 particles/cm³ ด้วยเวลาการตอบสนองเป็น 1 วินาที โดยความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค N_p สามารถคำนวณได้จาก [22]

$$N_p = \frac{n}{Qt} \quad (1)$$

เมื่อ n คือจำนวนอนุภาคที่นับได้ทั้งหมด (Total particle count) Q คืออัตราการไหลของอนุภาคและ t คือเวลาในการนับจำนวนอนุภาค

2.2. เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

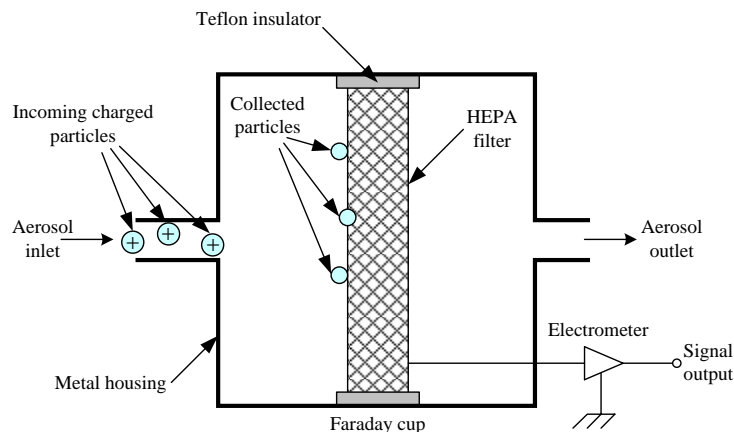
เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตที่ใช้ลูกถ้วยฟาราเดย์ (Faraday cup) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการวัดประจุอนุภาค รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของลูกถ้วยฟาราเดย์ ภายในลูกถ้วยฟาราเดย์ประกอบด้วย ตัวกรองอากาศปลอดอนุภาคประสิทธิภาพสูง (High efficiency particulate-free air filter) หรือ ที่เรียกว่าตัวกรองอากาศ HEPA ที่วางอยู่ภายในที่ยึดตัวกรอง (Filter holder) ที่ทำ

จากโลหะตัวนำไฟฟ้าบรรจุอยู่ในลูกถ้วยโลหะตัวนำไฟฟ้า โดยที่ยึดตัวกรองจะถูกแยกออกจากกันทางไฟฟ้าจากลูกถ้วยด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี โดยทั่วไปนิยมใช้เทฟลอน (Teflon) ซึ่งเทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและมีผลของเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) น้อย สำหรับตัวเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-noise connector) จะใช้ในการเชื่อมต่อเข้ากับที่ยึดตัวกรองอนุภาคเพื่อส่งถ่ายประจุอนุภาคหรือไอออนที่สะสมบน ตัวกรองไปยังมิเตอร์กระแสต่ำที่สุดหรือวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ ปกติแล้วค่าสัญญาณกระแสประจุอนุภาคที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 0–10 pA โดยค่าสัญญาณกระแสประจุของอนุภาค I_p จะเป็นฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นประจุค้าง (Space-charge density) ρ อัตราการไหลอนุภาค Q_a ผ่านตัวกรองอนุภาคดังสมการคือ [21]

$$I_p = \rho Q_a \quad (2)$$

เมื่อ

$$\rho = n_p e N_p \quad (3)$$



รูปที่ 2 Principle of the electrostatic particle counting

n_p คือจำนวนประจุของอนุภาค e คือประจุพื้นฐานของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19} C และ N_p คือค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค โดยกระแสประจุอนุภาคที่วัดได้จะถูกแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นจำนวนของ

อนุภาค N_p สำหรับอนุภาคที่แพร่กระจายแบบเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ดังสมการต่อไปนี้ [21]

$$N_p = \frac{I_p}{g(n_p, d_p) n_p e Q_a} \quad (4)$$

เมื่อ $g(n, d_p)$ คือความน่าจะเป็น (Probability) ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p ที่ได้รับประจุ n_p และสำหรับในกรณีของอนุภาคที่แพร่กระจายแบบหลากหลาย (polydisperse aerosol) สมการความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคในสมการที่ 4 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ [21]

$$N_p(d_p) = \sum_{i=1}^M \frac{I_p}{g(n_{pi}(d_{pi}), d_{pi}) n_{pi}(d_{pi}) e Q_a} \Delta d_{pi} \quad (5)$$

เมื่อ M คือจำนวนของช่องขนาดอนุภาค d_{pi} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยใน i ของช่องขนาดและ Δd_{pi} คือความกว้างของช่องขนาดอนุภาค i ดังสมการที่ 4 และ 5 การวัดด้วยวิธีนี้จะสมมุติให้ตัวกรองอนุภาคสามารถกรองอนุภาคแขวนลอยทั้งหมดที่ผ่านมากับอากาศตัวอย่างซึ่งประสิทธิภาพของตัวกรองอนุภาค HEPA จะมีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคและไอออนได้ประมาณ 99.97 % แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ก็คือการเกิดความดันตกระหว่างตัวกรองอนุภาคซึ่งจำเป็นต้องให้มีอัตราการไหลอากาศตัวอย่างที่สูงพอ

2.3. การพัฒนาปรับปรุงเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ

ไฟฟ้าสถิตของ Intra et al. [17–21]

ในปัจจุบันเครื่องนับจำนวนอนุภาคทั้งสองหลักการได้มีวิจัยและพัฒนาเพื่อการใช้งานอย่างกว้างขวางในระดับการวิจัยและระดับเชิงพาณิชย์ เช่น เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบการควบแน่น (Condensation Particle Counter, CPC) [23] โดยทั่วไปถูกใช้เป็นที่เครื่องมือสำหรับการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาครวมทั้งหมดโดยไม่คำนึงถึงขนาดอนุภาค ดังนั้นมันจึงไม่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดอนุภาค ขณะที่อนุภาคตัวอย่างเข้าไปใน CPC จะมีการเปลี่ยนสัญญาณเป็น ความร้อนจ่ายให้กับอ่างแอลกอฮอล์จนทำให้แอลกอฮอล์กลายเป็นไอลอยผ่านขึ้นไปยังท่อควบแน่น ไอระเหยแอลกอฮอล์จะเกาะตัวลงบนอนุภาคและควบแน่นเป็นหยดอิมิตัวซึ่งมีขนาดประมาณ 12 ไมโครเมตร หยดของอนุภาคที่มีแอลกอฮอล์ควบแน่นอยู่จะถูกส่งให้เคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ และใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจายของแสงเพื่อนำไปแปลงค่าเป็นจำนวนของอนุภาคต่อไป ตัวอย่าง CPC ที่นิยมมากคือ

โมเดล TSI 3025A สามารถ ตรวจสอบอนุภาคได้เล็กถึง 3 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 10^5 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนองเป็น 1 วินาที และ โมเดล 3022A สามารถวัดอนุภาคได้เล็กถึง 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 10^7 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนอง 12 วินาที

Electrical Aerosol Detector หรือ EAD [24] เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่อาศัยการอัดประจุอนุภาคแบบแพร่และการตรวจหาละอองลอยผ่านวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง โดยละอองลอยเข้าไปในเครื่องตรวจหาด้วยอัตราการไหล 2.5 L/min การไหลจะถูกแยกผ่านไปยังตัวกรองและตัวสร้างไอออน (Ionizer) 1 L/min และละอองลอย 1.5 L/min และการไหลทั้งหมดจะถูกรวมกันใหม่ในห้องการผสม (Mixing chamber) เมื่ออนุภาคในการไหลของละอองลอยถูกผสมกับไอออนทำให้อนุภาคมีสถานะประจุ (Charge state) จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังตัวดักจับไอออนเพื่อกำจัดไอออนที่มีความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้าสูงออกจากการไหล และเคลื่อนที่เข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ทำให้อนุภาคถูกสะสมตัวบนตัวกรองอนุภาคที่เชื่อมต่อเครื่องวัดกระแสตัวอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการวัดกระแสประจุอนุภาค ซึ่งกระแสประจุอนุภาคที่วัดได้จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นจำนวนอนุภาค

Diffusion Charging Electrometer (DCE) [25–26] เป็นเครื่องตรวจหาความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค ที่ประกอบด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาค ตัวกรองไอออน (Ion filter) และตัวกรองอนุภาคที่มีประจุโดย DCE จะทำงานโดยอาศัยการอัดประจุให้กับอนุภาคด้วยคอโรนาดีสชาร์จเมื่ออนุภาคได้รับการอัดประจุจะถูกผ่านเข้าไปยังตัวกรองอนุภาค เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการเก็บรวบรวมอนุภาคบนตัวกรองโดยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่สะสมตัวอยู่บนตัวกรอง

Ultrafine Particle Measurement System (UPMS) คือระบบการวัดอนุภาคขนาดเล็กมากด้วยการใช้เทคนิคการควบแน่นร่วมการอัดประจุอนุภาคที่พัฒนาขึ้นโดย Park et al. [27] ประกอบด้วย 5 ส่วน คือ 1) ส่วนจำแนกขนาด

อนุภาคทางเข้า 2) ส่วนการเติบโตอนุภาค (Particle growth)
 3) ส่วนประจุละออง 4) ส่วนการเก็บรวบรวมอนุภาค และ
 5) ส่วนการวัดกระแสไฟฟ้า การทำงานของ UPMS เริ่มต้น
 โดยการจำแนกขนาดอนุภาคที่ต้องการวัดก่อน จากนั้น
 อนุภาคจะถูกนำเข้าไปในส่วนการเติบโตอนุภาค เพื่อ
 ควบคุมอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและอนุภาคจะถูกอัด
 ประจุด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบคอโรนาดีสชาร์จ
 อนุภาคที่มีประจุจะเข้าไปในส่วนของลูกถ้วยฟาราเดย์
 และอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำประมาณ
 10 pA ที่เกิดจากการถ่ายเทประจุโดยอนุภาคที่มีประจุ
 สะสมตัวบนตัวกรองอนุภาคในลูกถ้วย ฟาราเดย์และ
 สัญญาณกระแสไฟฟ้าจะถูกเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์
 สำหรับแสดงผลข้อมูลอนุภาคในเวลาจริง โดยค่า
 กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำไปแปลงผันไปเป็นความ
 เข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Epiphaniometer [28] เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความ
 เข้มข้นของอนุภาค การทำงานของ Epiphaniometer จะ
 ขึ้นอยู่กับการวัดอัตราการเกาะติด (Attachment rate) ของ
 อะตอม ^{211}Pb ธรรมชาติบนพื้นผิวของอนุภาค โดยอะตอม
 ของ ^{211}Pb ถูกสร้างขึ้นที่อัตราคงที่โดยการย่อยสลาย
 (decay) ของ Short-lived radon isotope (^{219}Rn) ที่พุ่งออก
 จาก Long-lived artificial actinium source (^{227}Ac) ที่ถูก
 วางในห้องการเกาะติด (Attachment chamber) ของ
 Epiphaniometer อะตอมของ ^{211}Pb จะเกาะติดกับอนุภาค
 ละอองลอยที่ถูกผ่านเข้าไป และผ่านเข้าไปยังตัวกรอง โดย
 อัตราการเกาะติดจะหาได้โดย α -Spectroscopy ผ่าน
 การย่อยสลายของอะตอมของ ^{211}Pb ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับ
 จำนวนทั้งหมดของอะตอมที่เกาะติดบนพื้นผิวของ
 อนุภาคเครื่องนับจำนวนอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrical
 Particle Detector) หรือ EPD [29] โครงสร้างของ EPD
 ประกอบด้วย ตัวจำแนกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ เครื่องอัด
 ประจุอนุภาคแบบคอโรนาดีสชาร์จ ตัวดักจับไอออน ลูก
 ถ้วยฟาราเดย์ เครื่องตรวจหากระแสระดับต่ำ การทำงาน
 ของ EPD นี้เริ่มต้นโดยการดูดตัวอย่างละอองลอยที่
 ต้องการวัดผ่านท่อเก็บตัวอย่าง และผ่านเข้าไปยังตัว
 จำแนกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เพื่อจำแนกอนุภาคที่มี

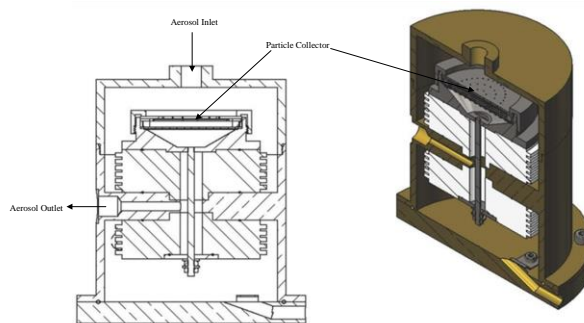
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าช่วงขนาดที่ต้องการวัด
 ออกด้วยหลักการทางอากาศพลศาสตร์ และจากนั้น
 อนุภาคจะถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการแพร่และสนาม
 จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังตัวดักจับไอออน
 เพื่อกำจัดไอออนอิสระที่มีความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้าสูง
 เจือปนมากับอนุภาคที่มีประจุออกก่อน เพื่อป้องกันการ
 เจือปนสัญญาณทางไฟฟ้าของอนุภาคขณะทำการวัด เมื่อ
 อนุภาคที่มีประจุออกจากตัวดักจับไอออนแล้วก็จะผ่าน
 เข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ อนุภาคที่มีประจุทั้งหมดจะถูก
 เก็บรวบรวมบนตัวกรองประสิทธิภาพสูง HEPA บรรจุ
 อยู่ในที่จับยึดตัวกรองในลูกถ้วยฟาราเดย์ และ
 เชื่อมต่อเข้ากับตัววัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำหรืออิเล็กทรอนิกส์
 เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่เก็บรวบรวมบน
 ตัวกรอง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จะ
 สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคที่ผ่านเข้าไป
 ยังลูกถ้วยฟาราเดย์

อย่างไรก็ตาม เครื่องนับจำนวนอนุภาคเหล่านี้มีความ
 เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันและมีความไว
 และความละเอียดในการนับอนุภาคแตกต่างกันในแต่ละ
 เทคนิคการนับ โดยเครื่องนับจำนวนอนุภาคบางหลักการ
 มีการใช้กัมมันตรังสีหรือรังสีมาช่วยในการนับยังมีความ
 อันตรายถึงผลกระทบจากการใช้งาน บางเครื่องมีขนาด
 ใหญ่และระบบมีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากมีการใช้
 น้ำหรือแบบควบคุมความชื้นมาช่วยในการนับจำนวนอนุภาคจำ
 ทำให้มีราคาสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการ
 นับจำนวนอนุภาคสำหรับเครื่องทดสอบประสิทธิภาพ
 การกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัย ซึ่งจะทำให้ระบบ
 การทดสอบมีขนาดใหญ่และราคาสูง ซึ่งในผลงานที่ผ่านมา
 โดย Intra et al. [17–21] ได้พัฒนาและประเมิน
 สมรรถนะเครื่องตรวจวัดประจุไฟฟ้าไอออนและอนุภาค
 ละอองลอยที่มีช่วงการวัดกระแสในช่วง 1–500 pA จะ
 สอดคล้องกับจำนวนความเข้มข้นของประจุไอออนและ
 อนุภาคละอองลอยในช่วงประมาณ 10^6 ถึง 10^9 อนุภาค
 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และนำไปประยุกต์ใช้ในการ
 ตรวจวัดฝุ่น PM2.5 ในอากาศได้ในช่วง 0.1–5,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 อย่างไรก็ตาม สำหรับในงานการทดสอบประสิทธิภาพ

ในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ส่วนใหญ่จะใช้ความเข้มข้นจำนวนอนุภาคต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อนุภาคขนาดต่ำสุดคือ 100 nm ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงช่วงการวัดให้กว้างขึ้นและให้สามารถนับอนุภาคที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความไวและความละเอียดของเครื่องนับจำนวนให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถให้นับอนุภาคได้ต่ำสุดถึง 100 nm สำหรับในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM F2299-03

ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตให้สามารถนับความเข้มข้นจำนวนอนุภาคต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการผสมผสานใช้หลักการการตกกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคร่วมกับลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในส่วนตัวคัดกรองอนุภาค (Particle collector) ที่มีการปรับปรุงตามรูปที่ 3 จะประกอบด้วย แผ่นช่องเร่ง (Acceleration nozzle plate) แผ่นตกกระทบ (Impaction plate) ตะแกรงละเอียด แผ่นกรองประสิทธิภาพสูงและตะแกรงหยาบทั้งสองแผ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร อนุภาคละอองลอยไหลผ่านเข้า ในเครื่องจะผ่านช่องเร่งอนุภาคละอองลอยที่มีขนาดใหญ่จะมีความเฉื่อยสูงจะตกกระทบที่แผ่นกระทบเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่อ้อมผ่านแผ่นกระทบไปได้ ส่วนอนุภาคละอองลอยที่มีขนาดเล็กพอจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกระทบไปได้พร้อมกับกระแสการไหลของของไหลและไปสะสมตัวอยู่บนแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง ด้านล่างของแผ่นกระทบ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละอองลอยที่ถูกแยกออกเรียกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาค (Particle cut-point diameter) ในการประดิษฐ์นี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดฝุ่นละอองมีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครเมตรที่อัตราการไหลของฝุ่นละอองเท่ากับ 7 ลิตรต่อ นาที และได้มีการปรับแต่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถวัดกระแสระดับต่ำคือ 10 mV ต่อกระแสอินพุตเท่ากับ 10 fA ได้ ทำให้มีความไวและความละเอียดสูงในการนับจำนวนอนุภาคในช่วงความเข้มข้นจำนวน 10^1 ถึง

10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคขนาดต่ำสุดคือ 100 nm และมีราคาถูกเนื่องจากมีใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ



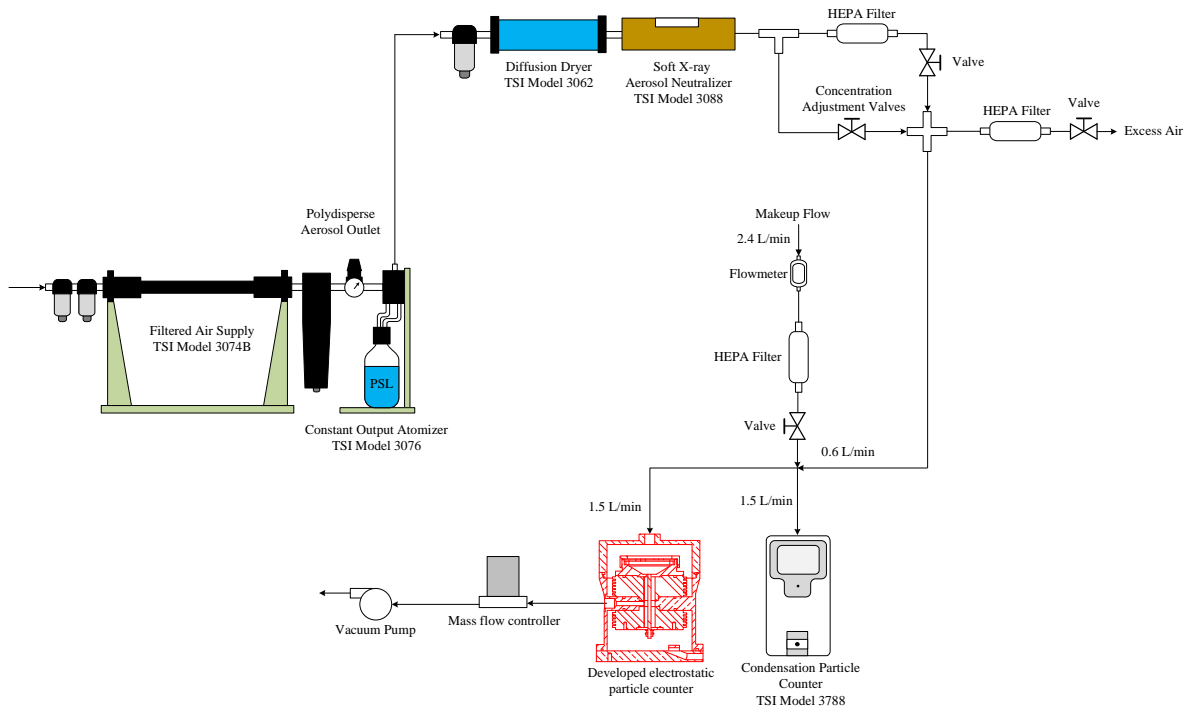
รูปที่ 3 Schematic of the modified aerosol detector.

3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

ส่วนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการศึกษานี้ได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและ 2) ทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง รูปที่ 4 แสดงแผนภาพการทดสอบเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ ที่ความเข้มข้นจำนวนต่าง ๆ อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ ตัวไล่ความชื้นแบบแพร่ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง (Aerosol neutralizer) แบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) ชุดวาล์วปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment valve) เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการทดสอบนี้เลือกใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคกระเจิงแสงแบบควมแน่นของบริษัท

TSI Inc., St. Paul, MN, USA โมเดล 3788 ที่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ในช่วง 2.5 nm ถึง 3 μm และเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นโดย Intra et al. [17–20] ที่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ในช่วง 10 nm ถึง 50 μm สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตในหน่วย mV/cm^3 สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคใน

หน่วย $\text{particles}/\text{cm}^3$ ในการทดสอบนี้ทำการเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์โดยการปรับความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่หาค่าแล้วปรับความเข้มข้นในช่วง 0–12,000 $\text{particles}/\text{cm}^3$ แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear correlation) ระหว่าง 2 หลักการนับจำนวนอนุภาค



รูปที่ 4 Experimental setup for comparative study of particle counting between electrostatic and light scattering particle counters.

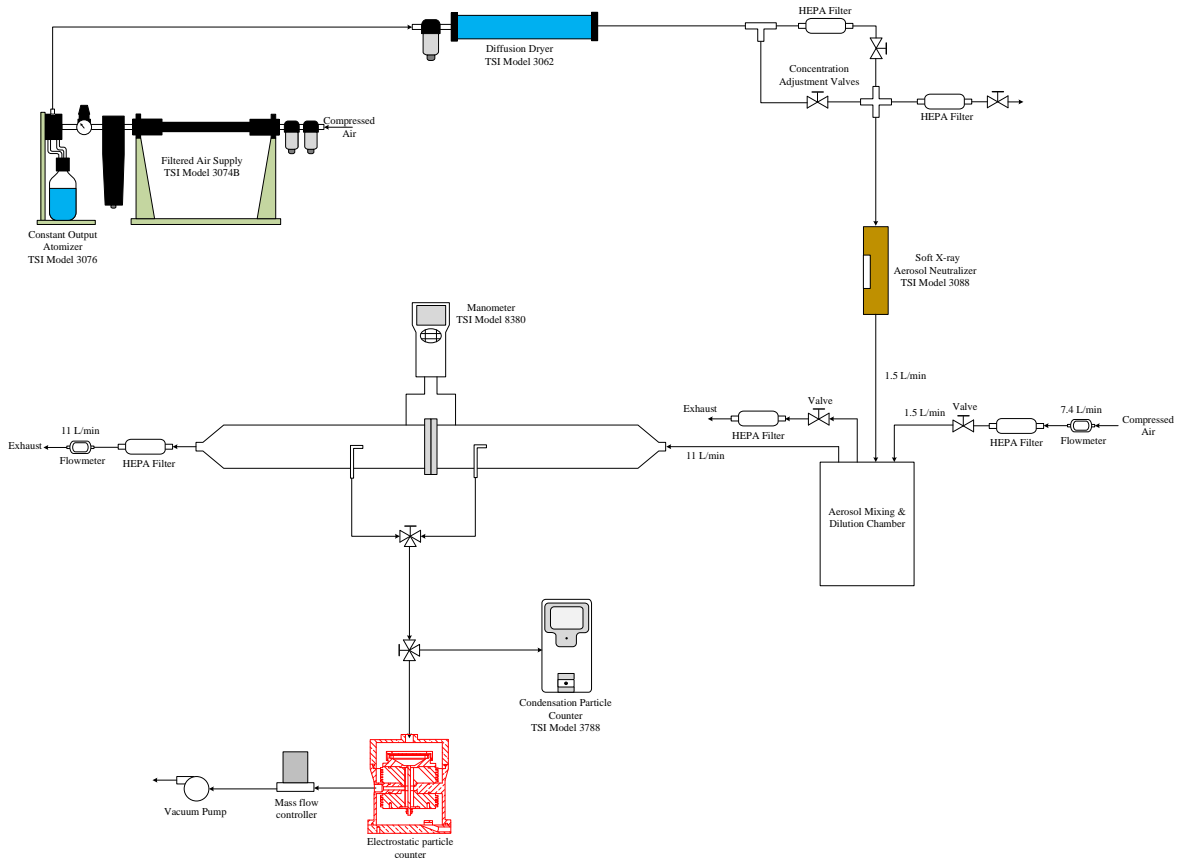
รูปที่ 5 แสดงการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการเลือกหน้ากากตัวอย่างสำหรับการทดสอบนี้จะเลือกซื้อหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่มีขายตามท้องตลาด มีการสุ่มตัวอย่างหน้ากากตามที่มีท้องตลาดชนิดละ 5 ชิ้น โดยหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ต้องได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือได้มาตรฐาน ASTM F2100 ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือได้มาตรฐาน มอก 2424–2562 จากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ ได้รับการรับรองให้นำเข้า/ผลิต/จำหน่ายจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบตามวิธีการทดสอบมาตรฐานของมาตรฐาน ASTM F2299–03 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) [15] วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย ประกอบด้วยอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ แหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ แหล่งจ่ายอากาศสะอาด เครื่องอัดอากาศตัวไล่ความชื้นแบบแพร์

ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง ชุดควาล์วปรับความเข้มข้น เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

(Electrostatic size classifier) มาโนมิเตอร์ (Manometer) ห้องทดสอบ (Test chamber) ห้องผสมและเจือจางละอองลอย (Aerosol mixing and dilution chamber) มาตรวัดการไหล (Flow meter) และตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองนี้ใช้อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1,

0.5, 1.0 และ 1.5 μm ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต (Geometric standard deviation) 1.6% ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ของประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 5 Experimental setup for comparative study of particle filtration efficiency between electrostatic and light scattering particle counters.

โดยอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ที่ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วน 1000:1 โดยอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ถูกจ่ายด้วยแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล้ความชื้นแบบแพร์ (Model 3062, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับให้เหมาะสมได้ด้วยชุดวาล์วปรับความเข้มข้นด้านหลังตัวไล้ความชื้น หลังจากชุดวาล์วปรับความเข้มข้น อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์จะถูกทำให้มีสมดุลประจุบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann equilibrium

charge equivalent) ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อป้องกันการสูญเสียอนุภาค (Particle losses) ในระบบหรือในท่อและห้องทดสอบตัวอย่าง ในการศึกษานี้ใช้ท่อซิลิโคนนำไฟฟ้า (Conductive silicone tube) และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel tube) เป็นท่อสำหรับนำส่งและการเก็บตัวอย่างอนุภาคเพื่อป้องกันการสูญเสียของอนุภาคในระบบที่ทำการทดสอบ [30] จากนั้นอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์จะผ่านเข้าไปยังห้องทดสอบซึ่งมีแผ่นกรองหน้ากาทดสอบอยู่ภายใน ในส่วนของห้องทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.76 cm ยาว 100 cm ซึ่งตัวอย่าง

วัสดุ (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) ทิศทางของของไหลที่ทางเข้าหัววัดและแกนของหัวเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกันคือขนานกับเส้นการไหลของของไหลและความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าหัววัดมีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอก โดยในขณะที่ทดสอบได้มีการวัดค่าความต่างความดันของแผ่นวัสดุผ้าด้วยมาโนมิเตอร์ (Model 8380, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบแสดงตามตารางที่ 1 ซึ่งการทดสอบนี้จะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบที่ 25°C และ 55 %RH ตามลำดับ ในการทดสอบได้ทำการนับจำนวนอนุภาค โพลีสไตรีน ลาเท็กซ์ทั้งก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองหน้ากากตัวอย่างพร้อมกันทั้ง 2 เครื่อง

ตารางที่ 1 Ranges and values of variables investigated.

Variable	Range
Particle type	Polystyrene Latex spheres
Particle number concentration	1–1.2 × 10 ⁴ particles/cm ³
Particle size	0.1, 0.5, 1.0 and 1.5 μm
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

จากนั้นนำความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเพื่อเปรียบเทียบค่าความต่างระหว่าง 2 หลักการนับจำนวนอนุภาค โดยค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (Particle filtration efficiency) ของแผ่นกรองของหน้ากาก η สามารถคำนวณได้จาก [22]

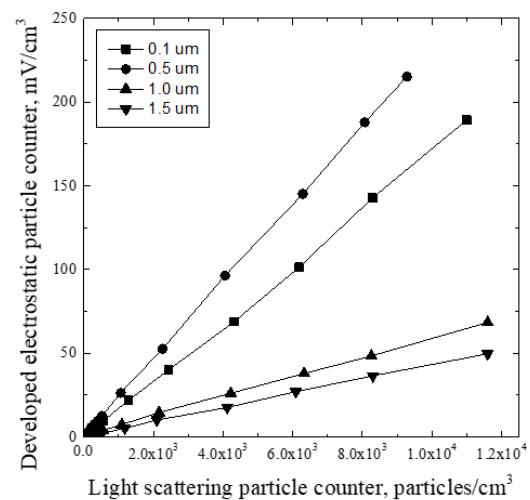
$$\eta = \frac{c_{inlet} - c_{outlet}}{c_{inlet}} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ c_{inlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนผ่านของตัวกรองและ c_{outlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคหลังผ่านของตัวกรอง และค่าการทะลุผ่านอนุภาค (Particle penetration) ของตัวกรอง P จะสามารถคำนวณได้จาก [22]

$$P = 100 - \eta \quad (7)$$

4. ผลการทดลอง

รูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณในหน่วย mV ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³ ของเครื่องนับ



รูปที่ 6 Comparison of particle counting between electrostatic and light scattering particle counters.

จำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง จากรูปพบว่าสัญญาณในหน่วย mV และความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคในหน่วย particles/cm³ ของอนุภาค โพลีสไตรีน ลาเท็กซ์มีความสัมพันธ์กันได้ดีแบบเชิงเส้น โดยค่าสัญญาณ mV มี

ค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค สัญญาณ mV มีค่าลดลงที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเป็นผลของจำนวนประจุต่ออนุภาคและการสูญเสียภายในเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตของ

อนุภาคแต่ละขนาดมีความแตกต่างกัน จากตารางที่ 2 พบว่า อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.1 μm , 0.5 μm , 1.0 μm และ 1.5 μm มีค่าสัญญาณ mV/cm³ ในช่วง 0.12–189.4, 0.16–215.2, 0.111–68.4 และ 0.14–49.68 mV/cm³ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 Comparison of particle counting between electrostatic and light scattering particle counters.

Particle diameter	mV/cm ³	particles/cm ³	Intercept	Slope	R ²	particles/cm ³ per mV/cm ³
0.1 μm	0.12 – 189.4	0 – 11,000	-0.5028	0.0170	0.9989	58.42
0.5 μm	0.16 - 215.2	0 – 9,280	0.6528	0.0231	0.9998	41.33
1.0 μm	0.111 – 68.4	0 – 11,600	0.6593	0.0058	0.9992	150.78
1.0 μm	0.14 – 49.68	0 – 11,600	0.1699	0.0043	0.9992	224.20

มีความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³ อยู่ ในช่วง 0–11,000, 0–9,280, 0–11,600 และ 0–11,600 particles/cm³ ตามลำดับ มีค่า Intercept เท่ากับ -0.5028, 0.6528, 0.6593 และ 0.1699 ตามลำดับ มีค่า Slope เท่ากับ 0.0170, 0.0231, 0.0058 และ 0.0043 ตามลำดับ มีค่า R² เท่ากับ 0.9989, 0.9998, 0.9992 และ 0.9992 ตามลำดับ และมีสัดส่วนระหว่าง particles/cm³ ต่อ mV/cm³ เฉลี่ย เท่ากับ 58.42, 41.33, 150.78 และ 224.20 ตามลำดับ ตารางที่ 3–6 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงโดยทำการทดสอบที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s กับพื้นที่ทดสอบเท่า 17.8 cm² จากผลในตารางที่ 3 พบว่าค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ 0.1 μm ก่อนและหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,020 และ 294.40 particles/cm³ ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามสมการที่ 6 แล้วจะ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.33% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ย

เท่ากับ 186.60 และ 6.78 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 96.36% แสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.1 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่า 0.99 ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ 0.5 μm ก่อนและหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10,200 และ 268.40 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.36% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 207.56 และ 9.58 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 95.38% มีความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.5 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเท่ากับ 2.03 ตารางที่ 5 แสดงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ 1.0 μm ก่อนและหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,840 และ

254.60 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.85% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.09 และ 3.05 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 96.05% มีความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 1.0 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเท่ากับ 1.84 และตารางที่ 6 แสดงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ 1.5 μm ก่อนและหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,000 และ 173.20 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 98.61% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.19 และ 1.39 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 96.84% มีความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 1.5 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ

กระเจิงแสงเท่ากับ 1.79 โดยความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของเทคนิคการวัดอนุภาค ในเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงจะผลิตสัญญาณแสงหักเหที่สามารถตรวจจับอนุภาคได้ การกระเจิงแสงมีความไวในการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหที่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาคและมุมการกระจัดกระเจิงแสง

ถ้าอนุภาคที่มีรูปร่างหรือรูปทรงต่างกันจะให้ค่าการกระเจิงแสงหรือดัชนีการหักเหต่างกัน ซึ่งค่าการกระเจิงแสงจะมีผลต่อจำนวนของอนุภาคที่นับได้ ส่วนเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตเป็นการอาศัยหลักการวัดประจุ

ไฟฟ้าของอนุภาคและแปลงค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคไปเป็นจำนวนของอนุภาค ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดต่างกันก็จะมีจำนวนประจุไฟฟ้าต่างกันหรืออนุภาคขนาดเดียวกันแต่รูปร่างหรือรูปทรงต่างกัน เช่น ทรงกลม (Sphere) ทรงกระบอกหรือไม่เป็นทรงกลม (Non-sphere) ก็จะมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคที่ต่างกัน เมื่อมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคต่างกันอาจมีผลต่อจำนวนอนุภาคที่นับได้จากวิธีการทางไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 3 Comparison of filtration efficiency of 0.1 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	11200.00	293.00	97.38	188.50	6.90	96.34	1.07
2	10800.00	291.00	97.31	186.30	7.10	96.19	1.15
3	11100.00	295.00	97.34	189.20	6.40	96.62	0.74
4	11300.00	301.00	97.37	181.40	7.00	96.14	1.26
5	10700.00	292.00	97.27	187.60	6.50	96.54	0.75
Average	11020.00	294.40	97.33	186.60	6.78	96.36	MAPE = 0.99

ตารางที่ 4 Comparison of filtration efficiency of 0.5 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

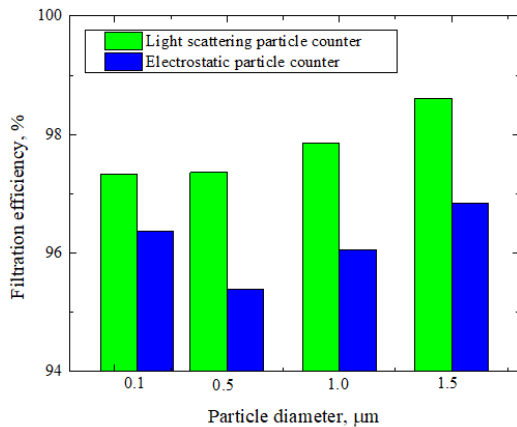
Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	10200.00	271.00	97.34	210.00	9.68	95.39	2.00
2	10100.00	269.00	97.33	205.10	9.50	95.37	2.01
3	10000.00	270.00	97.30	209.60	9.35	95.54	1.81
4	10400.00	267.00	97.43	204.40	9.73	95.24	2.25
5	10300.00	265.00	97.42	208.70	9.64	95.38	2.09
Average	10200.00	268.40	97.36	207.56	9.58	95.38	MAPE = 2.03

ตารางที่ 5 Comparison of filtration efficiency of 1.0 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	11400.00	256.00	97.75	78.78	3.73	95.27	2.54
2	11500.00	257.00	97.77	76.15	3.00	96.06	1.75
3	12200.00	255.00	97.91	77.60	2.80	96.39	1.55
4	11900.00	253.00	97.87	77.30	2.74	96.46	1.44
5	12200.00	252.00	97.93	75.60	2.98	96.06	1.91
Average	11840.00	254.60	97.85	77.09	3.05	96.05	MAPE = 1.84

ตารางที่ 6 Comparison of filtration efficiency of 1.5 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	11100.00	155.00	98.60	44.11	1.53	96.53	2.10
2	11300.00	157.00	98.61	44.28	1.34	96.97	1.66
3	11700.00	160.00	98.63	44.49	1.23	97.24	1.41
4	11600.00	161.00	98.61	43.25	1.49	96.55	2.09
5	11500.00	162.00	98.59	44.82	1.38	96.92	1.69
Average	11000.00	173.20	98.61	44.19	1.39	96.84	MAPE = 1.79



รูปที่ 7 Comparison of filtration efficiency between electrostatic and light scattering particle counters.

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองระหว่างตัวนับอนุภาคไฟฟ้าสถิตและการกระเจิงของแสง พบว่าขนาดอนุภาคที่ผ่านทะลุง่ายที่สุด (Most penetrating particle size) สำหรับตัวนับอนุภาคแบบกระเจิงของแสง (Light scattering particle counters) คือ 0.1 ไมโครเมตร และสำหรับตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counters) คือ 0.5 ไมโครเมตร

5. อภิปรายผลและสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตในการหาค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ผ่านการรับรองจาก อย. ในการทดสอบ ในการศึกษานี้ได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือการเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง และในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคได้ทำตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กับอนุภาคทรงกลมชนิดโพลีสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s กับพื้นที่ทดสอบเท่า 17.8 cm^2 ทำการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวน

ก่อนและหลังผ่านหน้ากากตัวอย่างด้วยเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่อง จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณในหน่วย mV ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคในหน่วย particles/ cm^3 ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์มีความสัมพันธ์กันได้ดีแบบเชิงเส้น โดยค่าสัญญาณ mV มีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค และจากการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่องพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.99, 2.03, 1.84 และ 1.79 สำหรับอนุภาคขนาด 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสามารถใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงตามที่มาตรฐาน ASTM F2299-03 กำหนดได้ ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขึ้นในประเทศให้ทันต่อความต้องการเครื่องทดสอบตัวกรองอนุภาคในการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีววิทยาศาสตร์ (TCELS) ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยภายใต้โครงการวิจัยรหัส TC-A (ERP) 15/2564 และผู้วิจัยขออุทิศส่วนบุญส่วนกุศลจากผลงานวิจัยนี้ให้กับนางเอ๊ย กันต๊ะ ผู้ล่วงลับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] COVID-19 situation report, Department of Disease Control, Jan. 4, 2022. [Online]. Available: <https://covid19.ddc.moph.go.th/>

- [2] K. O’Dowd, K. M. Nair, P. Forouzandeh, S. Mathew, J. Grant, R. Moran, J. Bartlett, J. Bird and S. C. Pillai, “Face Masks and Respirators in the Fight Against the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials, Advances and Future Perspectives,” *Materials*, vol. 13, no. 15, pp. 1–27, 2020, doi: 10.3390/ma13153363.
- [3] N. El-Atab, N. Qaiser, H. Badghaish, S. F. Shaikh and M. M Hussain, “Flexible Nanoporous Template for the Design and Development of Reusable Anti-COVID-19 Hydrophobic Face Masks,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 6, pp. 7659–7665, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c03976.
- [4] E. E Sickbert-Bennett, J. M. Samet, P. W. Clapp, H. Chen, J. Berntsen, K. L. Zeman, H. Tong, D. J. Weber and W. D. Bennett, “Filtration Efficiency of Hospital Face Mask Alternatives Available for Use During the COVID-19 Pandemic,” *JAMA Internal Medicine*, vol. 180, no. 12, pp.1607–1612, 2020, doi: 10.1001/jamainternmed.2020.4221.
- [5] A. Konda, A. Prakash, G. A. Moss, M. Schmoldt, G. D. Grant and S. Guha, “Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 5, pp.6339–6347, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c03252.
- [6] O. Aydin, B. Emon, S. Cheng, L. Hong, L. P. Chamorro, M. T. A. Saif, “Performance of Fabrics for Home-made Masks Against the Spread of COVID-19 through Droplets: A Quantitative Mechanistic Study,” *Extreme Mechanics Letters*, vol. 40, 2020, Art. no. 100924, doi: 10.1016/j.eml.2020.100924.
- [7] S. Rengasamy, B. Eimer and R. E. Shaffer, “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*, vol. 54, no. 7, pp.789–798, 2010, doi: 10.1093/annhyg/meq044.
- [8] H. Whiley, T. P. Keerthirathne, M. A. Nisar, M. A. F. White and K. E. Ross, “Viral Filtration Efficiency of Fabric Masks Compared with Surgical and N95 Masks,” *Pathogens*, vol. 9, no. 9, pp.762–769, 2020, doi: 10.3390/pathogens9090762.
- [9] C. M. Dugdale and R. P. Walensky, “Filtration Efficiency, Effectiveness, and Availability of N95 Face Masks for COVID-19 Prevention,” *JAMA Intern Medicine*, vol. 180, no. 12, pp.1612–1613, 2020,doi: 10.1001/jamainternmed.2020.4218.
- [10] P. Intra, “Filtration efficiency of surgical masks, fabric masks and respirators available for use during the COVID-19 pandemic in Thailand,” *Thai Science and Technology Journal*, vol.29, no.5, pp.904–918, 2021.
- [11] Automated Filter Tester Model 8130A, TSI Inc., Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://tsi.com/products/filter-testers/automated-filter-tester-8130a/>
- [12] Automated Filter Tester Model 3160, TSI Inc., Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://tsi.com/products/filter-testers/automated-filter-tester-3160/>
- [13] G506 Mask Automatic Filter Performance Tester, Qinsun Instruments Co., Ltd., Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <http://www.testerinlab.com/products/Others/2018/0316/200.html>
- [14] *Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks*, ASTM F2100-19e1, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [15] *42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices*, NIOSH, Mar. 4, 1997. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/pt84abs2.html>
- [16] *Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres*, ASTM

- F2299/F2299M-03(2017), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [17] P. Intra and N. Tippayawong, "Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 527–530, 2011, doi: 10.1007/s11814-010-0378-1.
- [18] P. Intra, A. Yawootti and N. Tippayawong, "An electrostatic sensor for continuous monitoring of particulate air pollution," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 30, no. 12, pp.2205–2212, 2013, doi: 10.1007/s11814-013-0168-7.
- [19] P. Intra and N. Tippayawong, "Development and evaluation of a Faraday cup electrometer for measuring and sampling atmospheric ions and charged aerosols," *Particulate Science and Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 257–263, 2015, doi: 10.1080/02726351.2014.952392.
- [20] P. Intra and N. Tippayawong, "Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer," *Chiang Mai Journal of Science*, vol. 36, no. 1, pp. 110–119, 2009.
- [21] P. Intra, "Electrical aerosol measurement," in *Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology*, Bangkok, Thailand: Chula Press, 2019, ch. 10, pp. 177–194.
- [22] K. Willeke and P.A. Baron, "Filter collection," in *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, New York, USA: John Wiley & Sons, 1993, ch. 10, pp. 179–205.
- [23] TSI 3756 Ultrafine Condensation Particle Counter User's Guide, TSI Incorporated, Minnesota, USA, 2022, pp. 1–62.
- [24] Model 3068B Aerosol Electrometer User's Manual, TSI Incorporated, Minnesota, USA, 2022, pp. 1–61.
- [25] M. Fierz, S. Weimer and H. Burtscher, "Design and performance of an optimized electrical diffusion battery," *Journal of Aerosol Science*, vol. 40, no.2, pp.152–163, 2008, doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.09.007.
- [26] M. Fierz, L. Scherrer and H. Burtscher, "Real-Time Measurement of Aerosol Size Distributions with an Electrical Diffusion Battery," *Journal of Aerosol Science*, vol. 33, no.7, pp. 1049–1060, 2002, doi: 10.1016/S0021-8502(02)00057-5.
- [27] S. S. Park, C. J. Lee, S. W. Kim, S. B. Lee, G. N. Bae and K. C. Moon, "A Novel Ultrafine Particle Measurement System with an Electrometer," in *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Covington, KY, USA, Aug. 2005, pp. 227–230, doi: 10.1109/MWSCAS.2005.1594080.
- [28] H. W. Gäggeler, U. Baltensperger, M. Emmenegger, D. T. Jost, A. Schmidt-Ott, P. Haller and M. Hofmann, "The Epiphaniometer, a New Device for Continuous Aerosol Monitoring," *Journal of Aerosol Science*, vol. 20, no. 5, pp. 557–564, 1989, doi: 10.1016/0021-8502(89)90101-8.
- [29] T. Johnson, S. Kaufman and A. Medved, "Response of an Electrical Aerosol Detector based on a Corona Jet Charger," in *6th International ETH Conference on Nanoparticle Measurement*, Aug. 2002, Zurich, Switzerland, pp. 1–12.
- [30] S. Kimoto, K. Mizota, M. Kanamaru, H. Okuda, D. Okuda and M. Adachi, "Aerosol Charge Neutralization by a Mixing-Type Bipolar Charger using Corona Discharge at High Pressure," *Aerosol Science and Technology*, vol. 43, no.9, pp.872–880, 2009, doi: 10.1080/02786820902998381.