เครื่องทดสอบแผ่นกรองอัตโนมัติที่ใช้ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95

An Automated Filter Tester Based on an Electrostatic Particle Counter for Testing the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks and N95 Masks

วิสูตร อาสนวิจิตร[1] และ พานิช อินต๊ะ[1,*]

[1]หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ป่าป้อง ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220

Visut Asanavijit[1] and Panich Intra[1,*]

[1]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 21, 2022; **Revised:** Jul 20, 2022; **Accepted:** Aug 03, 2022

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้คือการพัฒนาและประเมินเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติโดยอิงจากตัวนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตเพื่อหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพของตัวกรองและความดันตกของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ต้นแบบของเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติถูกสร้างขึ้นตามมาตรฐาน มอก. 2424-2562 และ มอก. 2480-2562 และทำการทดสอบเชิงการทดลองต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอย ตัวทำให้อนุภาคเป็นกลาง ตัวทำความร้อนอากาศ ถังผสม ห้องทดสอบ ตัวนับจำนวนอนุภาค ตัววัดความดันแตกต่าง ตัวอัดอากาศ ตัววัดอัตราการไหล และชุดประมวลผลและแสดงผลการทดสอบ ในเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นอนุภาค PSL และ NaCl สามารถสร้างขึ้นด้วยความเข้มข้นเชิงจำนวนตั้งแต่ 1 ถึง 20,000 particles/cm^3 โดยเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นได้รับการออกแบบมาให้ทำงานที่อัตราการไหลของอนุภาคทดสอบที่ประมาณ 5 ถึง 100 L/min ที่ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคสูงถึง 99.999% ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคจากเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นกับผลที่ได้จากเครื่องทดสอบตัวกรองที่ใช้เทคนิคการนับอนุภาคแบบกระเจิงแสง และจากการเปรียบเทียบพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และ อนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ระหว่างเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องทดสอบตัวกรองที่ใช้เทคนิคการนับอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ 0.35% และ-0.47% ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องทดสอบตัวกรองแบบอัตโนมัติได้และการทดสอบต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นผลที่ดีในการหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคและความดันตกของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95

คำสำคัญ: โควิด-19, เครื่องทดสอบตัวกรอง, ประสิทธิภาพการกรอง, หน้ากากอนามัย, หน้ากากกรองอากาศ

Abstract

The aim of this study is to develop and evaluate an automated filter tester based on an electrostatic counter for determining penetration or filter efficiency and pressure drop of surgical masks and N95 masks. The prototype of the automated filter tester was

built based on the TIS 2424-2562 and TIS 2480-2562 standards and experimentally tested. The developed filter tester consisted of an aerosol atomizer, an air heater, a filtered air supply, an aerosol neutralizer, a mixing chamber, a heater, a filter holder, a pressure transducer, a diffusion dryer, an electrostatic particle counter, a mass flow meter and controller and a vacuum pump. In the developed filter tester, PSL and NaCl particles could be generated with number concentration ranging from about 1 to 20,000 particles/cm^3. The developed filter tester was designed to operate at a test aerosol flow rate of about 5 to 100 L/min with particle filtration efficiency up to 99.999%. In this study, the particle filtration efficiency from the developed filter tester was compared with that obtained from the light scattering particle counting filter tester and good agreement was found from the comparison, the difference in the filtration efficiency of 0.1 μm PSL particles and 0.264 μm NaCl particles between the developed filter tester and the scattering particle counting filter tester was approximately 0.35% and -0.47%, respectively. It was shown that the developed prototype can be used in the automated filter tester and testing of a prototype of the automated filter tester showed promising results for determining penetration or filtration efficiency of particles and pressure drop of surgical masks and N95 masks.

Keywords: COVID-19, Filter Tester, Filtration Efficiency, Surgical Mask, Respirator

1. บทนำ

การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกทำให้ยอดผู้ติดเชื้อสะสมสูงถึง 163,161,728 ราย และเสียชีวิตสะสมสูงถึง 3,381,269 ราย สำหรับประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อสะสม 111,082 ราย และเสียชีวิตสะสม 614 ราย ข้อมูล ณ วันที่ 18 พฤษภาคม 2564 [1] ทำให้หน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) มีความต้องการสูงเพื่อใช้ในการป้องกันการแพร่ กระจายของเชื้อโควิด-19 จากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลวและละอองลอยแบคทีเรียจากปากและจมูก [2] โดยในช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทยทั้ง 3 รอบเกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยเฉพาะหน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) ทำให้ความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าปกติหลายเท่า จึงทำให้ราคาหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 สูงขึ้นหลายเท่าตัว เกิดการขาดแคลนหน้ากากอนามัยสำหรับบุคลากรทางการแพทย์และผู้ป่วยในโรงพยาบาลทั่วประเทศ เนื่องจากสภาวะขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตหน้ากาก โรงงานผู้ผลิตหน้ากากจึงไม่สามารถผลิตและส่งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ให้กับโรงพยาบาลได้ตามความต้องการปกติ ในขณะที่ความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 ของประชาชนทั่วไปก็สูงขึ้นตามไปด้วย

จากปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตหน้ากากดังกล่าว ได้มีงานวิจัยที่แนะนำเกี่ยวกับวัสดุป้องกันระบบทางเดินหายใจอื่นๆ รวมไปถึงวัสดุผ้าทั่วไป เช่น เสื้อยืด ผ้าเช็ดหน้าและผ้าพันคอสำหรับทำหน้ากากผ้าที่เป็นทางเลือกในการใช้ในช่วงที่หน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขาดแคลน [2–7] แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีนำเข้าหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ที่ไม่ผ่านมาตรฐานหรือไม่มีคุณภาพจากต่างประเทศมาจำหน่ายในประเทศเป็นวงกว้าง ซึ่งหน้ากากที่ไม่ได้มาตรฐานดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพการกรองที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดจึงไม่สามารถป้องกันการแพร่กระจายของโรคทางเดินหายใจจากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลวและละอองลอยแบคทีเรียจากปากและจมูกของผู้สวมใส่ได้ ในช่วงที่มีการระบาดของโควิด-19 รอบแรก Sickbert-Bennett et al. [4] ได้ประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากเพื่อเป็นทางเลือกใช้ป้องกันการติดเชื้อ โดยได้เลือกหน้ากากอนามัยจำนวน 29 แบบที่ทดสอบกับผู้ชาย 1 คนและผู้หญิง 1 คน โดยพบว่าประสิทธิภาพของหน้ากาก N95 ที่มีขนาดไม่เหมาะสมกับใบหน้ามีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยคือ 90% ถึง 95% และหน้ากากอนามัยมี

ประสิทธิภาพในการกรองที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับหน้ากาก N95 (มีประสิทธิภาพ 98.5%) โดยหน้ากากอนามัยมีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 38.1% Whiley et al. [8] ได้ใช้วิธีมาตรฐานในการประเมินประสิทธิภาพของหน้ากากแบบผ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อกรองไวรัสเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไปแล้วหน้ากากผ้าที่มีอยู่จะมีประสิทธิภาพในการกรองไวรัสอย่างน้อย 50% ส่วนหน้ากากอนามัยจะมีประสิทธิภาพ 99.9% และหน้ากาก N95 มีประสิทธิภาพ 99.9% เมื่อทดสอบกับอนุภาคที่มีขนาดเฉลี่ย 6.0 μm Dugdale and Walensky [9] ได้รายงานประสิทธิภาพการกรอง ประสิทธิผลและความพร้อมใช้งานของหน้ากาก N95 สำหรับการป้องกัน COVID-19 โดยพบว่าหน้ากาก N95 ที่หลายคนซื้อหรือบริจาคให้กับโรงพยาบาลในสหรัฐอเมริกามีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตั้งแต่ 53% ถึง 85% และหน้ากากอนามัยแบบสายรัดหูมีประสิทธิภาพในการกรองต่ำกว่ามากถึง 37% ถึง 69% เนื่องจากมีแผ่นกรองที่บางกว่าและสวมใส่สบายกว่า สำหรับในประเทศไทย Intra [10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95/KN95/FFP1/FFP2 ที่มีใช้ในช่วงที่โควิด-19 ระบาดในประเทศไทยรอบแรก โดยในการศึกษานี้ได้สุ่มเก็บตัวอย่างหน้ากากที่มีขายในท้องตลาดจำนวน 259 ตัวอย่าง ประกอบด้วย หน้ากากอนามัยจำนวน 67 ตัวอย่าง หน้ากากผ้าจำนวน 71 ตัวอย่างและหน้ากาก N95/KN95/FFP1/FFP2 จำนวน 121 ตัวอย่าง ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM F2299–03 เพื่อหาประสิทธิภาพการกรองกับอนุภาค ผลการศึกษาของ Intra [10] พบว่าหน้ากากอนามัยมีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเฉลี่ย ต่ำสุด สูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 50.50%, 2.50%, 95.90% และ 26.34% ตามลำดับ หน้ากากผ้ามีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเฉลี่ย ต่ำสุด สูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 39.10%, 5.93%, 87.55% และ 19.64% ตามลำดับ และหน้ากาก N95/KN95/FFP1/FFP2 มีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเฉลี่ย ต่ำสุด สูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 72.21%, 8.92%, 99.97% และ 26.65% ตามลำดับ

จากคุณภาพของหน้ากากอนามัยดังกล่าวสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้ออกมาตรฐาน มอก.2424-2562 หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว และ มอก.2480-2563 หน้ากาก N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ขึ้นเพื่อกำหนดมาตรฐานและคุณภาพให้กับหน้ากากอนามัยที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยหน้ากากที่จำหน่ายจะต้องผ่าน มอก. นี้และจากความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 เพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดโรงงานผลิตหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขึ้นในประเทศมากกว่า 100 โรงงาน ซึ่งในกระบวนการผลิตหน้ากากจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากทุกล็อตการผลิต แต่เนื่องจากค่าตรวจสอบวิเคราะห์ในปัจจุบันยังมีราคาสูงหากส่งตรวจต่างประเทศ อีกทั้งห้องปฏิบัติทดสอบในประเทศยังมีจำกัดไม่เพียงพอต่อความต้องการในการทดสอบ จึงทำให้โรงงานมีความต้องการเครื่องมือทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของโรงงาน แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตรวจสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพยังมีราคาสูงอยู่ในหลักหลายล้านบาท จึงทำให้โรงงานผลิตหน้ากาส่วนใหญ่ยังไม่มีการตรวจสอบคุณภาพได้ตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ในปัจจุบันการพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติที่มีการนำเข้ามีลักษณะโครงสร้าง เทคนิค วิธีการ การทำงาน และราคาแตกต่างกันออกไป เช่น TSI 8130A AUTOMATED FILTER TESTER ของบริษัท TSI ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกำเนิดอนุภาค PSL, 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 ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยแบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน

ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 สามารถกำเนิดอนุภาค PSL, NaCl, Emery Oil, DEHS สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 8 ล้านบาท [12] Automatically Particular Filtration Efficiency Tester รุ่น G506 ของบริษัท QINSUN/STANDARD ประเทศจีน เป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกำเนิดอนุภาค PSL, NaCl, Emery Oil, DEHS ช่วงการวัดความเข้มข้นของนุภาค 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถปรับอัตราการไหลของอนุภาคทดสอบได้ในช่วง 5–90 ลิตรต่อนาที สามารถวัดความดันแตกต่างได้ 0–250 mmH2O สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 2.6 ล้านบาท [13] สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติ จึงจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบ และจัดหาเครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ ที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้ต้นแบบที่สามารถทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคได้ทั้งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ได้ตามมาตรฐาน มอก. 2424-2562 และ มอก. 2480-2562 สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติ ซึ่งได้อาศัยหลักวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299 เป็นแนวทางดังข้อมูลใน**ตารางที่ 1** โดยใช้เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ ที่พัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศให้ได้ต้นแบบที่สามารถทดสอบได้ตามเงื่อนไขของมาตรฐาน มอก.2424-2562 และ มอก.2480-2562 โดยข้อมูลผลการศึกษาในบทความวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อโรงงานผลิตหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ในประเทศและทันต่อความต้องการเครื่องทดสอบตัวกรองอนุภาคในการศึกษาวิจัยทางประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทยและเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขึ้นในประเทศ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการทดสอบหน้ากากมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299

รายละเอียดตัวแปรทดสอบ	**หน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42 CFR 84** [14]	**หน้ากากอนามัย ตามมาตรฐาน ASTM F2299** [15]
อนุภาคทดสอบ	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), CMD = 0.075 ± 0.02 μm MMAD = 0.3 μm GSD ≤ 1.86%	อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.1–5.0 μm GSD ≤ 1.6%
ความเข้มข้นของอนุภาค	ไม่เกิน 200 mg/m^3	ช่วง 10^7 – 10^8 particles/m^3
อัตราการไหลทดสอบ	85 ± 4 L/min (ตัวกรองเดี่ยว) 42.5 ± 2 L/min (ด้านใดด้านหนึ่งตัวกรองคู่)	-
ความเร็วการไหล	10.6 cm/s ที่พื้นที่ทดสอบ (Test Area) 135 cm2	ช่วง 0.5 – 25 cm/s
ที่ใส่ตัวอย่าง (Specimen holder)	-	มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5–15 cm
การเก็บตัวอย่าง	-	แบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling)

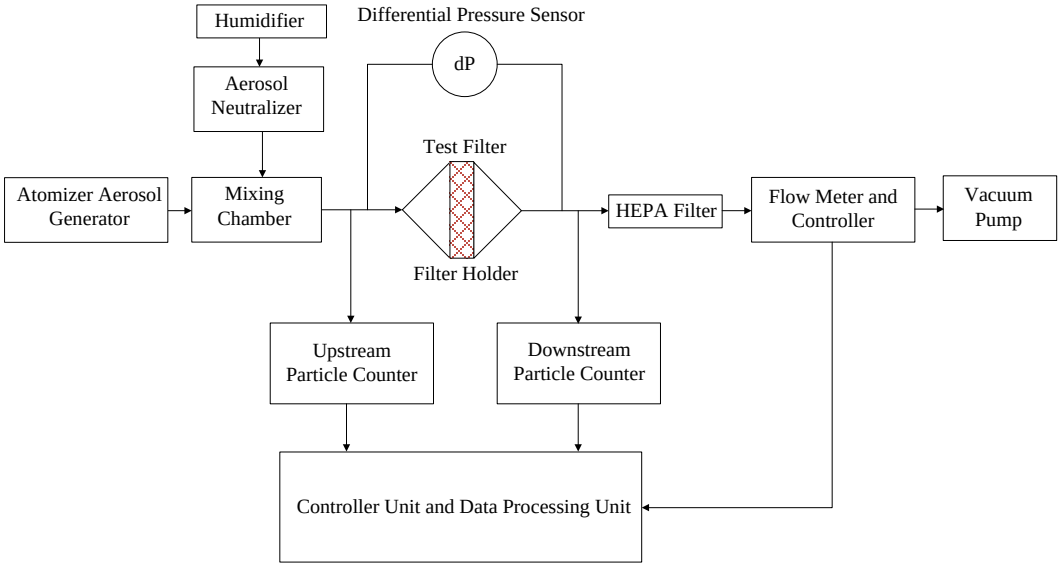
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการทดสอบหน้ากากมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299 (ต่อ)

รายละเอียดตัวแปรทดสอบ	หน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42 CFR 84 [14]	หน้ากากอนามัย ตามมาตรฐาน ASTM F2299 [15]
อนุภาคทำให้มีสมดุลประจุบ็อลทซ์มัน (Boltzmann Equilibrium Charge Equivalent)	ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ (Aerosol Neutralizer)	ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ (Aerosol Neutralizer)
ระบบการไหลอากาศ	แรงดันลบด้วยปั๊มสุญญากาศ	แรงดันบวกด้วยเครื่องอัดอากาศ
อุณหภูมิขณะทดสอบ	25 ± 5°C	21 ± 3°C
ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทดสอบ	30 ± 10%RH	30 – 50 ± 5%RH

2. ต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติที่ใช้ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

เงื่อนไขในการออกแบบต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองในงานนี้คือต้นแบบต้องสามารถทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ได้ตามมาตรฐาน มอก.2424-2562 และ มอก.2480-2562 ในเครื่องเดียวและเป็นระบบอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ในการสร้างที่สามารถหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ ต้นแบบที่สร้างขึ้นต้องใช้งานง่าย มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องต่ำ รวมถึงราคาของต้นแบบต้องมีราคาต่ำกว่าเครื่องทดสอบตัวกรองที่มีการนำเข้าจากต่างประเทศ มาตรฐาน มอก.2424-2562 เป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวที่ออกโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม ในรายละเอียดการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.1 μm ตามหัวข้อที่ 4.6 รายการที่ 3 ของ มอก.2424-2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน ASTM F2100 ซึ่งเป็นข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) [16] และในมาตรฐาน ASTM F2100 ได้มีการอ้างมาตรฐาน ASTM F2299-03 วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex, PSL) รายละเอียดในมาตรฐาน ASTM F2299-03 ได้กำหนดให้ทดสอบกับอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ แบบขนาดเดี่ยว (Monodispersed aerosol) ขนาดอนุภาคที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0.1–5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าทดสอบได้ในช่วง 0.5–25 cm/s โดยใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง (Light scattering particle counter) หรือเครื่องมือแบบเทียบเคียง (Equivalent instrumentations) เป็นตัวนับจำนวนอนุภาค ดังแสดงตาม**ตารางที่ 1** ส่วน มอก.2480-2562 เป็นมาตรฐานผลิต ภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากใช้ครั้งเดียว ชนิด N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ ในการทดสอบประสิทธิ ภาพในการกรองอนุภาคตามหัวข้อที่ 4.3 รายการที่ 1 ของ มอก.2424-2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) ของสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของประเทศสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) รายละเอียดการทดสอบหน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) นี้จะเป็นการจำลองในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst-case) ที่อาจพบได้ในสภาพแวดล้อมการทำงานทั่วไปคือทำให้เกิดการผ่านทะลุตัวกรองสูงสุด จึงกำหนดอัตราการไหลอากาศในการทดสอบที่อัตราการทำงานสูงของมนุษย์คือ 85 หรือ 95 L/min กับอนุภาคเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Count median diameter, CMD) เท่ากับ 0.075 ± 0.02 μm หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (Mass median aerodynamic diameter, MMAD) เท่ากับ 0.3 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (Geometric standard deviation, GSD) ไม่เกินกว่า 1.86% (**ตารางที่ 1**) สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคในมาตรฐาน 42 CFR 84 ได้กำหนดให้เป็นตัวนับจำนวนอนุภาค

แบบโฟโตมิเตอร์กระเจิงแสง (Light scattering photometer) หรือเครื่องมือแบบเทียบเคียง (Equivalent instrumentations) ดังนั้น ในการออกแบบเครื่องต้นแบบส่วนประกอบหลักได้แสดงไดอะแกรมใน**รูปที่ 1** และภาพถ่ายอุปกรณ์หลักที่ใช้แสดงใน**รูปที่ 2** ซึ่งได้อาศัยหลักของวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299 เป็นแนวทางเพื่อให้ครอบคลุมการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากทั้ง 2 ชนิดในระบบการทดสอบเดียว



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้น

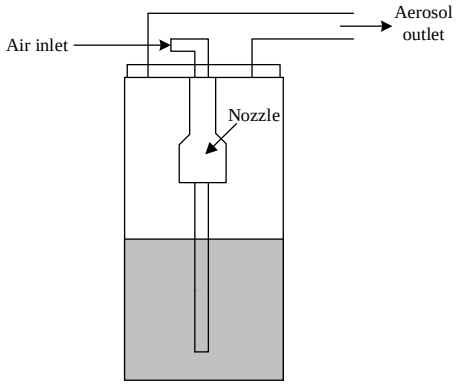
(ก) เครื่องต้นแบบ

(ข)

(ค) จอแสดงผลการทดสอบ

รูปที่ 2 ภาพถ่ายต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ **(ก)** เครื่องต้นแบบ **(ข)** พื้นที่ทดสอบและตัวยึดแผ่นกรอง **(ค)** จอแสดงผลการทดสอบ

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพส่วนประกอบหลักของต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้น โดยต้นแบบประกอบด้วย ชุดแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) ชุดทำให้อนุภาคเป็นกลาง (Aerosol neutralizer) ชุดควบคุมความชื้น (Humidifier) ถังผสม (Mixing chamber) ตัวยึดแผ่นกรอง (Filter holder) ตัวนับจำนวนอนุภาค (Particle counter) ชุดวัดความแตกต่างของความดัน (Differential pressure sensor) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ชุดวัดและควบคุมอัตราการไหล (Flow meter and controller) ชุดควบคุมการทำงานและประมวลผล (Controller unit and data processing unit) **รูปที่ 2(ก)** แสดงภาพถ่ายต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นในงานนี้ โดยประกอบด้วยพื้นที่ทดสอบและตัวยึดแผ่นกรอง แสดงใน **รูปที่ 2(ข)** และจอแสดงผลการทดสอบแสดงใน**รูปที่ 2(ค)** ซึ่งต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นสามารถกำเนิดอนุภาคพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL particles) อนุภาคเกลือ (NaCl particles) และอนุภาคน้ำมัน (Oil particles) ได้ ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเครื่องต้นแบบนี้ทำการสร้างอนุภาค PSL หรือ NaCl จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ดังแสดงใน**รูปที่ 3**



รูปที่ 3 แหล่งกำเนิดละอองลอยเป็นแบบอะตอมไมเซอร์

จากนั้นอนุภาค PSL หรือ NaCl จะผ่านเข้าไปยังถังผสมเพื่อผสมและเจือจางอนุภาคกับอากาศสะอาดที่มีประจุสมดุลหรืออนุภาคที่เป็นกลาง (Neutralized particle) ซึ่งอากาศสะอาดที่เข้าถึงผสมนี้ถูกผ่านตัวทำความร้อนและตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบโคโรนาไอออไนเซชั่น (Corona ionization) [17] หลังจากถังผสมจะได้อุณหภูมิขณะทดสอบ 25 ± 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทดสอบ 30 ± 10 %RH อัตราการไหลทดสอบในช่วง 5–90 L/min และความเข้มข้นของอนุภาคในช่วงไม่เกิน 20,000 particles/cm^3 หรือไม่เกิน 200 mg/m^3 เพื่อป้องกันการสูญเสียอนุภาค (Particle losses) ในระบบหรือในท่อและตัวยึดแผ่นกรอง (Filter holder) ในการศึกษานี้ใช้ท่อซิลิโคนนำไฟฟ้า (Conductive silicone tube) และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel tube) เป็นท่อสำหรับนำส่งและการเก็บตัวอย่างอนุภาคเพื่อป้องกันการสูญเสียของอนุภาคในระบบทดสอบ จากนั้นอนุภาค PSL หรือ NaCl จะผ่านเข้าไปยังตัวยึดแผ่นกรอง ซึ่งมีแผ่นกรองทดสอบอยู่ภายใน การเก็บตัวอย่างอนุภาคในต้นแบบนี้จะเป็นการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ทิศทางของของไหลที่ทางเข้าหัววัดและแกนของหัวเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกันคือขนานกับเส้นการไหลของของไหลและความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าหัววัดมีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอก โดยในขณะทดสอบได้มีการวัดค่าความต่างของความดันของแผ่นกรองในหน่วย mmH_2O ด้วยมาโนมิเตอร์เซ็นเซอร์ แผ่นกรองหน้ากากที่ใช้ในการทดสอบจะถูกตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 13 cm มีพื้นที่ในการทดสอบประมาณ 132.73 cm^2 ดัง**รูปที่ 2(ข)**

โดยการหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองจะทำการนับจำนวนอนุภาคทั้งก่อน (Upstream) และหลังผ่าน (Downstream) แผ่นกรองทดสอบด้วยเครื่องนับจำนวนอนุภาค เมื่อได้ค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองจากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแล้วจะสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (Particle filtration efficiency) ของแผ่นกรองของหน้ากาก η ได้จากสมการ

$$\eta = \frac{c_{\text{inlet}} - c_{\text{outlet}}}{c_{\text{inlet}}} \times 100 \qquad (1)$$

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

$$P = 100 - \eta \quad (2)$$

สำหรับในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counter) ที่พัฒนาขึ้นโดย Intra et al. [18–20] เนื่องจากเป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง สามารถพัฒนาและสร้างขึ้นเองได้ภายในประเทศและมีราคาถูกกว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง จึงทำให้ต้นทุนของเครื่องต้นแบบมีราคาถูกกว่าเครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ ที่ใช้ลูกถ้วยฟาราเดย์ (Faraday cup) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการวัดประจุอนุภาค สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์ในหน่วย mV/cm3 สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคในหน่วย particles/cm3 โดยแรงดันไฟฟ้าของประจุอนุภาคที่วัดได้จะถูกแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค N_p สำหรับละอองลอยที่แพร่กระจายแบบเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ดังสมการต่อไปนี้ [20]

$$N_p = \frac{V_p}{n_p e Q_a R_{in}} \quad (3)$$

เมื่อ V_p คือแรงดันไฟฟ้าของประจุอนุภาค n_pคือจำนวนประจุของอนุภาค e คือประจุพื้นฐานของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19} C Q_aอัตราการไหลอนุภาคและR_f คือความต้านทานภายในของวงจรอิเล็กโทรมิเตอร์ ซึ่งหลักการวัดอนุภาคหรือฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ได้มีออกเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มอก. 3030-2563 เครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองลอยหลักการไฟฟ้าสถิตโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานเครื่องวัดฝุ่นละอองลอย PM1.0, PM2.5 และ PM10 ขึ้นในประเทศไทยอีกด้วย

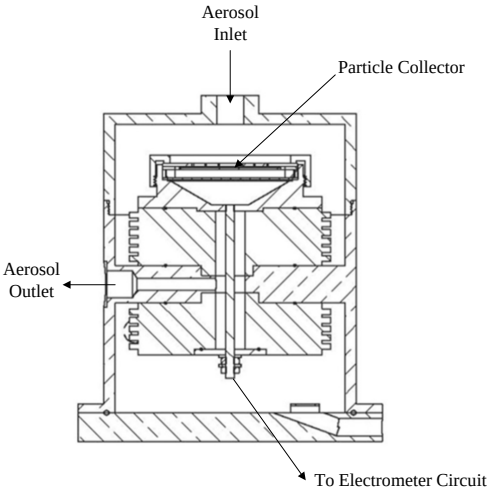
เพื่อให้เป็นการประยุกต์ใช้งานเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counter) ที่พัฒนาขึ้นโดย Intra et al. [18–20] สำหรับการนับจำนวนอนุภาคสำหรับเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัย ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตให้สามารถนับความเข้มข้นจำนวนอนุภาคต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบากศก์เซนติเมตร โดยการผสมผสานใช้หลักการการตกกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคร่วมกับลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กโทรมิเตอร์ ซึ่งในส่วนตัวคัดกรองอนุภาค (Particle collector) ที่มีการปรับปรุงตาม**รูปที่ 4** 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 ลิตรต่อนาที และได้มีการปรับแต่งวงจรอิเล็กโทรมิเตอร์ให้สามารถวัดกระแสระดับต่ำคือ 10 mV ต่อกระแสอินพุตเท่ากับ 10 fA ได้ ทำให้มีความไวและความละเอียดสูงในการนับจำนวนอนุภาคในช่วงความเข้มข้นจำนวน 10^1 ถึง 10^6 อนุภาคต่อลูกบากศก์เซนติเมตร อนุภาคขนาดต่ำสุดคือ 100 nm และมีราคาถูกเนื่องจากมีใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ โดย Intra et al. [21] ได้รายงานว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตอยู่ในช่วงค่า 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

เนื่องจากการสร้างอนุภาค PSL ด้วยอะตอมไมเซอร์จะมีอนุภาคตกค้าง (Residual particles) ที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุ

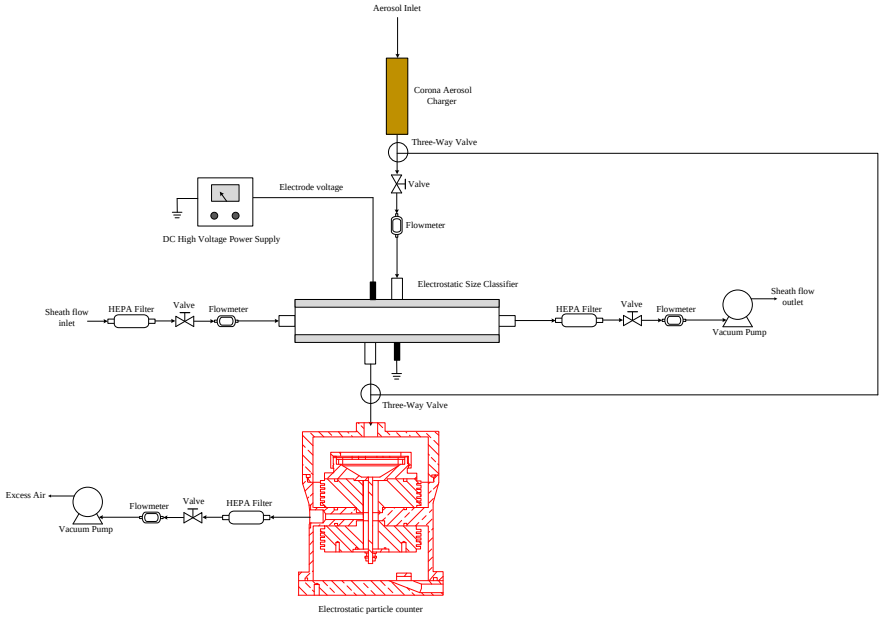
ของน้ำขนาดเล็กกว่า 0.1 μm และอนุภาคประจุทวีคูณ (Multiply charged particles) ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 μm เจือปนกับอนุภาค PSL ซึ่งอนุภาคตกค้างและอนุภาคประจุทวีคูณเหล่านี้จะมีผลต่อการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุกรองในช่วงขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่กว่า 0.1 μm เพื่อหลีกเลี่ยงผลของอนุภาคตกค้างและอนุภาคประจุทวีคูณดังกล่าวต้องมีการคัดแยกขนาดอนุภาคก่อนด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) เพื่อคัดแยกอนุภาคตกค้างที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำและอนุภาคประจุทวีคูณออกให้ได้เฉพาะอนุภาค PSL ที่มีขนาดเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 μm ในการศึกษานี้ได้ใช้เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต [23–24] ทำการคัดแยกขนาดอนุภาคก่อนเข้าเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตดังแสดงใน**รูปที่ 5** ซึ่งเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคที่ได้ในการศึกษานี้ได้มีการพัฒนาปรับปรุงจากงานเดิมของ Intra and Tippayawong [23–24] เพื่อให้สามารถคัดแยกขนาดอนุภาค PSL ได้ในช่วงขนาด 0.05–0.14 μm สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค PSL ได้ โดยระบบการวัดประกอบด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบโคโรนา (Corona particle charger) เครื่องแยกขนาดอนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility size classifier) และเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counter) โดยอนุภาคตัวอย่างจะถูกอัดประจุโดยเครื่องอัดประจุแบบโคโรนาเข็ม จากนั้นอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุจะถูกนำเข้าในเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค โดยเครื่องคัดแยกในการศึกษานี้ได้มีการปรับปรุงในส่วนการคัดแยกขนาดดังแสดงใน**รูปที่ 6** ที่มีลักษณะเป็นแผ่นอิเล็กโทรดคู่ขนานสองแผ่นคั่นด้วยช่องว่างที่โซนการคัดแยกขนาดอนุภาค (Size classification zone) โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกให้แผ่นอิเล็กโทรดด้านบนและให้แผ่นอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นกราว์ด และให้การไหลของอนุภาคที่เข้ามาถูกนำเข้าที่ด้านบนสุดของเครื่องคัดแยก จากนั้นผ่านช่องทางการไหลรูปสามเหลี่ยม (Triangular-shaped) ก่อนเข้าสู่โซนการคัดแยกขนาดอนุภาคผ่านช่องทางเข้าด้านบน โดยอนุภาคที่มีขนาดที่เหมาะสมกับแรงดันของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นวิถีโค้งเข้าหาช่องทางออกด้านล่างเครื่องคัดแยกซึ่งต่อกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคไฟฟ้าสถิตเพื่อนับจำนวนอนุภาค โดยความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้าของอนุภาค Z_p ที่เป็นฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนที่อนุภาคภายในเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคนี้สามารถหาได้จาก

$$Z_p(z) = -\frac{y}{Vz}\left(-\frac{h^2}{2\mu}\frac{dp}{dz}\left(\frac{y}{4}-\frac{y^3}{3h^2}\right)\right) \qquad (3)$$

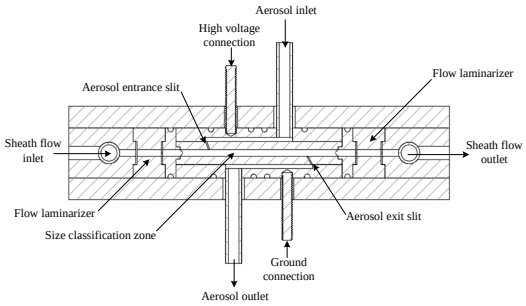
เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด z คือระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากช่องทางเข้าและทางออก $\frac{dp}{dz}$ คือค่าคงที่ของความดันแกรเดียนท์ (Pressure gradient) y คือความกว้างของแผ่นอิเล็กโทรด h คือระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดและ μ คือความหนืดของแก๊ส **รูปที่ 7** แสดงการเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีและการทดลองของแรงดันอิเล็กโทรดการแยกขนาดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค PSL ที่คัดแยกในช่วง 0.05–0.14 μm ได้



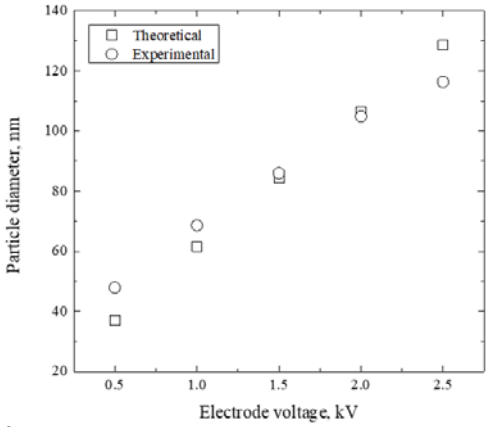
รูปที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 5 ระบบการวัดแยกขนาดอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นสำหรับการนับจำนวนอนุภาคขนาดในช่วง 0.05-0.15 μm



รูปที่ 6 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคที่ได้พัฒนาปรับปรุงขึ้นในการศึกษานี้



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีและการทดลองของแรงดันอิเล็กโทรดการแยกขนาดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่คัดแยกได้

สำหรับในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน 42 CFR 84 จะเป็นการทดสอบกับอนุภาค NaCl หลายขนาด (Polydisperse aerosol) ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (Geometric standard deviation, GSD) ไม่เกินกว่า 1.86% จึงไม่จำเป็นต้องมีการคัดแยกขนาดอนุภาคก่อนนับจำนวนอนุภาค ดังนั้นในการทดสอบจะมีการข้ามผ่าน (by pass) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยวาล์ว 3 ทางเพื่อให้อนุภาค NaCl สามารถนับจำนวนได้โดยตรงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาค

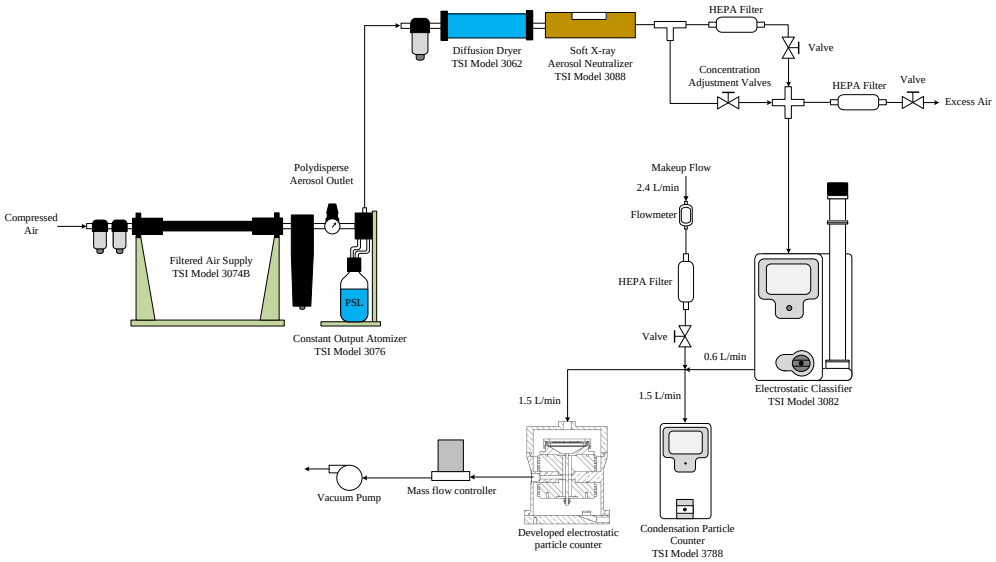
สำหรับระบบการไหลอากาศของต้นแบบจะถูกวัดและควบคุมให้คงที่ด้วยตัววัดอัตราการไหลเชิงมวลและปั๊มสุญญากาศ สำหรับการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติและประมวลผลข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบนี้จะถูกควบคุมและประมวลผลด้วยตัวควบคุมลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Programmable logic controller, PLC) ให้สามารถใช้งานได้ง่าย โดยจอแสดงผลจะแสดงผลการทดสอบให้อ่านง่ายและเห็นชัดเจน แสดงค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและสภาวะทดสอบ เช่น ประสิทธิภาพการกรอง อัตราการไหล ความต่างความดัน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และมีการแจ้งเตือนความผิดพลาดของระบบ และมีระบบป้องกันการปรับแต่งเครื่องหรือการปรับแต่งโดยไม่ตั้งใจจากผู้ใช้งาน แสดง**รูปที่ 2(ค)**

3. ระเบียบวิธีวิจัย

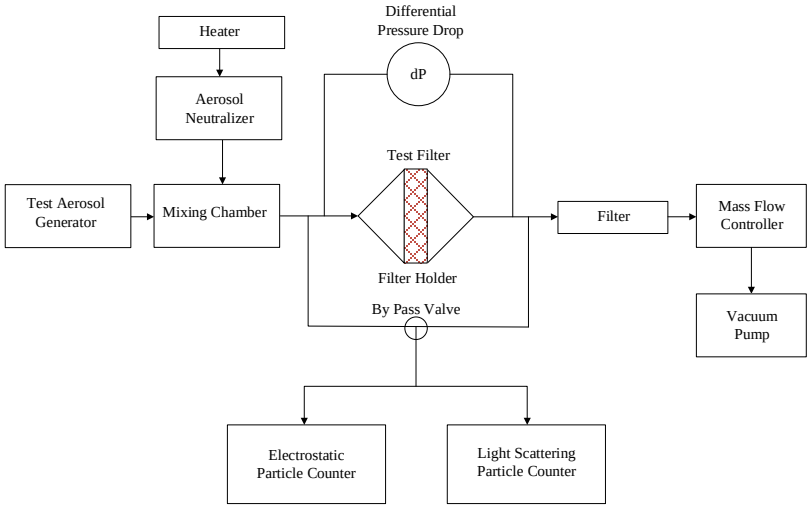
ในการวิจัยนี้ได้แบ่งการสอบเครื่องต้นแบบออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกคือการศึกษาการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์เพื่อทำให้ทราบถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวลและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 กำหนดหรือไม่ และส่วนที่สองคือการศึกษาเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเพื่อเป็นการยืนยันว่าทั้งสองหลักการนี้สามารถเทียบเคียงกันได้ การศึกษาการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต 1.6 % ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วน 1000 : 1 สำหรับอนุภาคเกลือใช้เกลือ 2% ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน โดยทำการวัดการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning mobility particle sizer, SMPS) ที่ประกอบด้วย ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic size classifier, Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) และเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบควบแน่น (Condensation particle counter, Model 3788, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) ค่าการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือที่วัดได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่มาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 กำหนด

ส่วนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการศึกษานี้ได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและ 2) ทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง **รูปที่ 8** แสดงแผนภาพการทดสอบเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือที่ความเข้มข้นจำนวนต่างๆ 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) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการทดสอบนี้ใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคกระเจิงแสงแบบควบแน่นของบริษัท TSI Inc., St. Paul, MN, USA Model 3788 สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ในช่วง 2.5 nm ถึง 3 μm ทำการเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm MMAD โดยปรับ ความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ชุดวาล์วปรับความ เข้มข้นในช่วง 0–12,000 particles/cm^3 แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อหาสหสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear correlation) ระหว่าง 2 เทคนิคการนับจำนวนอนุภาค **รูปที่ 9** แสดงการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้า กาก N95ทางการแพทย์ ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการทดสอบใช้หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ตาม มอก 2424-2562 และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ตาม มอก 2480-2563 ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจำนวน 5 ตัวอย่าง หรือ 5 ยี่ห้อ ที่ได้รับรองมาตราฐานจาก มอก และ อย จากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกาหรือได้มาตรฐาน ASTM F2100 ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ ได้รับการรับรองให้นำเข้า/ผลิต/

จำหน่ายจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา หรือหน้ากากที่มีเอกสารผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่น่าเชื่อถือ โดยซื้อมาจำนวน 1 กล่องต่อตัวอย่าง ใน 1 กล่องบรรจุ 50 ชิ้น และในแต่ละกล่องได้สุ่มตัวอย่างมา 10 ชิ้น สำหรับนำมาทดสอบ เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการทดสอบทำการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือทั้งก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองหน้ากากตัวอย่างพร้อมกันทั้ง 2 เครื่อง จากนั้นนำความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามสมการที่ (1) เพื่อเปรียบเทียบหาค่าความต่างระหว่าง 2 หลักการนับจำนวนอนุภาค สำหรับผลของอัตราการไหลอากาศต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ตามลำดับ



รูปที่ 8 อุปกรณ์ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง



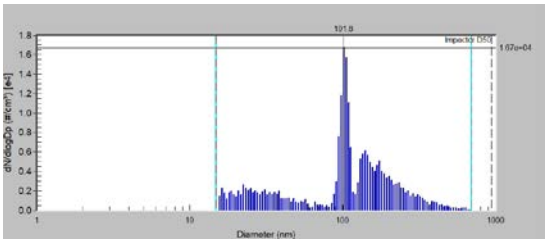
รูปที่ 9 แผนภาพทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

ในการวิจัยนี้ได้มีการทดสอบโดยการปรับอัตราการไหลอากาศ 2 ช่วงคือ 28.3 และ 85 L/min โดยในแต่ละการทดสอบจะทำการทดสอบ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง โดยใช้เวลาทดสอบ 1 นาทีต่อ 1 ชิ้นการทดสอบ โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่ง เน้นทดสอบตาม

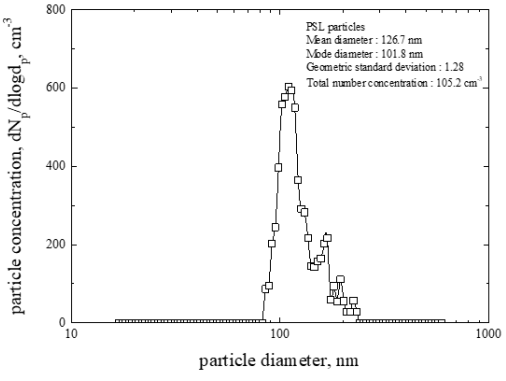
มาตรฐาน มอก 2424-2562 ดังนั้น การทดสอบจึงต้องทดสอบกับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์เท่านั้น และทดสอบตามมาตรฐาน มอก 2480-2562 จึงต้องทดสอบกับหน้ากาก N95 ทางการแพทย์เท่านั้น จะไม่มีการทดสอบกับหน้ากากชนิดอื่นนอกเหนือจากมาตรฐาน มอก ของหน้ากากทั้ง 2 แบบนี้ เนื่องจากในการออกแบบพื้นที่ทดสอบ (Test area) จะออกแบบพื้นที่ทดสอบตามมาตรฐาน มอก ทั้ง 2 กำหนด หากเป็นหน้ากากชนิดอื่นจะมีความแตกต่างกับพื้นที่ทดสอบ และมีความหลากหลายมากเกินไป อีกอย่างการทดสอบต้องใช้ตัวอย่างหลากหลายมากเกินจะทำให้เกิดความแปรปรวนของข้อมูลสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ได้รับมาตรฐาน มอก และรับรองจาก อย. เป็นตัวอย่างในการทดสอบ อีกทั้งปัจจุบัน อย. และ มอก เข้ามาควบคุมและกำกับดูและเรื่องคุณภาพดังนั้นหน้ากากที่มีขายหรือจำหน่ายในท้องตลาดจึงต้องมีมาตรฐานและการรับรองจาก อย. ซึ่งการซื้อหน้ากากที่ไม่มีการรับรอง หรือไม่มีคุณภาพมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบจึงหาได้ยากในปัจจุบัน ดังนั้นในการเลือกสำหรับนำมาใช้ในการทดสอบหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ระดับ 2 ต้องมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือเท่ากับ 95% และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ที่มาใช้ในการทดสอบ ต้องมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือเท่ากับ 98%

4. ผลการทดลอง

รูปที่ 10 แสดงการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือ จาก**รูปที่ 10(ก)** พบว่าอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ของเครื่องต้นแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Median diameter) เท่ากับ 0.107 μm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean diameter) เท่ากับ 0.128 μm เส้นผ่านศูนย์ กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter) เท่ากับ 0.096 μm เส้นผ่านศูนย์กลางฐานนิยม (Mode diameter) เท่ากับ 0.101 μm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิตเท่ากับ 2.29 และในรูปยังพบอนุภาคตกค้าง (Residual particles) ที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำขนาดเล็กกว่า 0.1 μm และอนุภาคประจุทวีคูณขนาดใหญ่กว่า 0.1 μm เจือปนกับอนุภาค PSL โดยอนุภาคตกค้างและอนุภาคประจุทวีคูณของอนุภาค PSL มีผลต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้า กากอนามัยทางการแพทย์จึงจำเป็นที่ต้องมีการคัดแยกขนาดก่อนทำการนับจำนวนอนุภาค **รูปที่ 10** (ข) แสดงการกระจายขนาดอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค มีเส้นผ่านศูนย์ กลางเฉลี่ย เท่ากับ 0.126 μm เส้นผ่าน ศูนย์กลางฐานนิยม เท่ากับ 0.101μm และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต เท่ากับ 1.28 ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดอนุภาค PSL ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กำหนดคือมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.61 ส่วนการกระจายขนาดอนุภาคเกลือที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ของเครื่องต้นแบบใน**รูปที่ 11(ก)–(ข)** มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (CMD) ของอนุภาคเกลือเท่ากับ 57.4 nm หรือ 0.0574 μm และเมื่อแปลง CMD ไปเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (MMAD) จะเท่ากับ 0.264 μm โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิตของ CMD และ MMAD ประมาณ 1.83 และ1.84 ตาม ลำดับ ซึ่งเป็นไปการกระจายขนาดอนุภาค NaCl ที่ได้

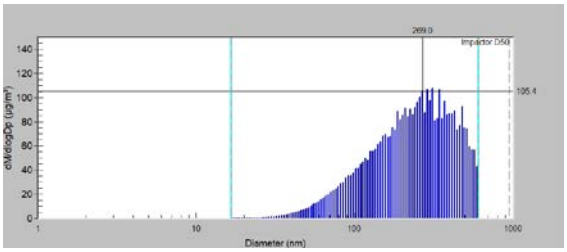


(ก)

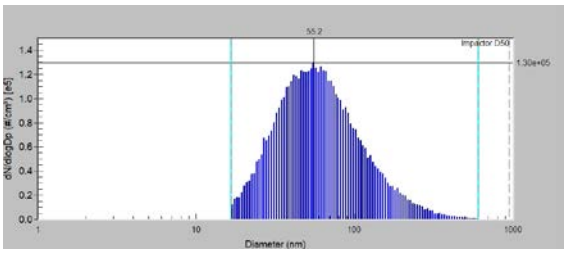


(ข)

รูปที่ 10 การกระจายขนาดอนุภาค PSL (**ก**) อนุภาค PSL ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (**ข**) อนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ที่คัดแยกด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค



(ก)

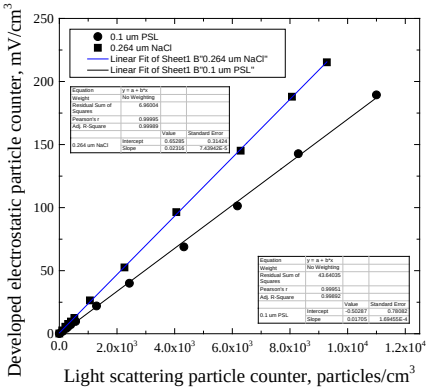


(ข)

รูปที่ 11 การกระจายขนาดอนุภาคเกลือ NaCl ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (**ก**)0.264 µm (MMAD) (**ข**) 0.0574 µm (CMD)

เป็นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน 42 CFR 84 คืออนุภาค NaCl ต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (CMD) เท่ากับ 0.075 ± 0.02 µm หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (MMAD) ประมาณ 0.3 µm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต ไม่เกินกว่า 1.86 ดังแสดงตาม **ตารางที่ 1**

รูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณในหน่วย mV ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นและความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm3 ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง จากรูปพบว่าสัญญาณในหน่วย mV และความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm3 ของอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือมีความสัมพันธ์กันได้ดีแบบเชิงเส้น โดยอนุภาค PSL มีค่าสัญญาณ mV/cm3 ในช่วง 0.12–189.4 mV/cm3 สอดคล้องกับความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm3 ในช่วง 0–11,000 particles/cm3 มีค่า Intercept เท่ากับ -0.50288, Slope เท่ากับ 0.01705 และ R2 เท่ากับ 0.99892 และสัดส่วนระหว่าง particles/cm3 ต่อ mV/cm3 เฉลี่ยเท่ากับ 58.42 ซึ่งหมายความว่า 1 mV/cm3 มีค่าเท่ากับ 58.42 particles/cm3 สำหรับอนุภาคเกลือมีค่าสัญญาณ mV/cm3 ในช่วง 0.16–215.2 mV สอดคล้องกับความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm3 ในช่วง 0–9,280 particles/cm3 มีค่า Intercept เท่ากับ 0.65285, Slope เท่ากับ 0.02316 และ R2 เท่ากับ 0.99989 และสัดส่วนระหว่าง particles/cm3 ต่อ mV/cm3 เฉลี่ยเท่ากับ 43.23 ซึ่งหมายความว่า 1 mV/cm3 มีค่าเท่ากับ 43.23 particles/cm3 โดย Slope ของสัญญาณ mV/cm3 ที่แตกต่างกันระหว่างอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือ เนื่องจากเป็นผลของประสิทธิภาพการอัดประจุต่อขนาดอนุภาคและการสูญเสียภายในเครื่องอัดประจุอนุภาคและเครื่องนับจำนวนอนุภาคของอนุภาคแต่ละขนาดมีความแตกต่างกัน ซึ่งในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบได้คิดรวมค่าประสิทธิภาพการอัดประจุและการสูญเสียของอนุภาคในระบบไว้แล้ว



รูปที่12 ผลเปรียบเทียบการนับอนุภาคระหว่างตัวนับอนุภาคไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับตัวนับอนุภาคแบบกระเจิงแสง

ตารางที่ 2–3 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 µm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 µm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ตามลำดับ ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงโดยทำการทดสอบที่อัตราการไหล 28.3 L/min จากผลใน**ตารางที่ 2** พบว่าค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค PSL ก่อนและหลังผ่านหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,000 และ 173.20 particles/cm^3 ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามสมการที่ (1) ได้ประสิทธิภาพใน

การกรองอนุภาคเท่ากับ 98.43% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นวัดได้สัญญาณ mV/cm3 ก่อนและหลังผ่านหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 187.38 และ 3.60 mV/cm3 ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 98.08% แสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลัก การไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ 0.35% สำหรับอนุภาคเกลือ 0.264 μm ใน**ตารางที่ 3** พบว่าค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคเกลือก่อนและหลังผ่านหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10,200 และ 271.20 particles/cm3 ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.34% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นวัดได้สัญญาณ mV/cm3 ก่อนและหลังผ่านหน้ากากหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 205.14 และ 4.50 mV/cm3 ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.81% แสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ -0.47% โดยความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของเทคนิคการวัดอนุภาค ในเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงจะผลิตสัญญาณแสงรังสีหักเหที่สามารถตรวจจับอนุภาคได้ การกระเจิงแสงมีความไวในการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหที่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาคและมุมการกระจัดกระเจิงแสง ถ้าอนุภาคที่มีรูปร่างหรือรูปทรงต่างกันจะให้ค่าการกระเจิงแสงหรือดัชนีการหักเหต่างกัน ซึ่งค่าการกระเจิงแสงจะมีผลต่อจำนวนของอนุภาคที่นับได้ ส่วนเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตเป็นการอาศัยหลักการวัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคและแปลงค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคไปเป็นจำนวนอนุภาค ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดต่างกันก็จะมีจำนวนประจุไฟฟ้าต่างกันหรืออนุภาคขนาดเดียวกันแต่รูปร่างหรือรูปทรงต่างกัน เช่น ทรงกลม ทรงกระบอกหรือไม่เป็นทรงกลม ก็จะมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคที่ต่างกัน เมื่อมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคต่างกันอาจมีผลต่อจำนวนอนุภาคที่นับได้จากวิธีการทางไฟฟ้าสถิตและทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง 2 หลักการวัดนี้ขึ้นได้ [20]

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์จำนวน 5 ตัวอย่างที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

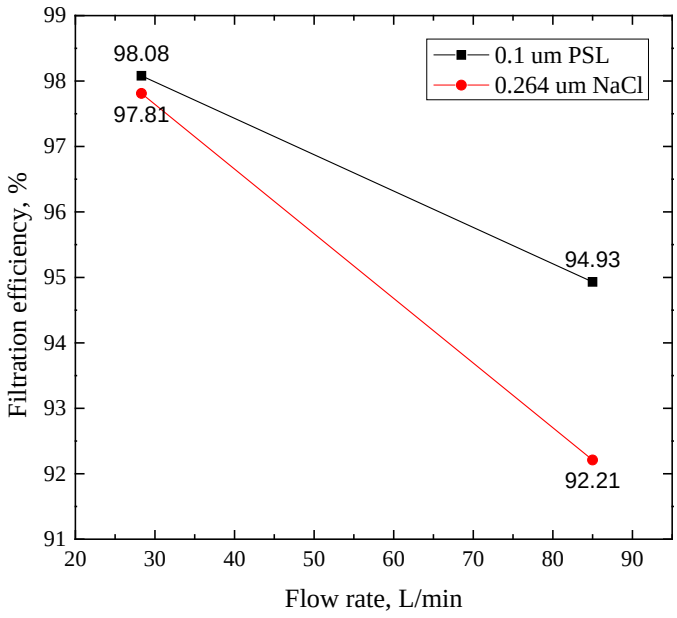
ตัวอย่างทดสอบ	เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง			เครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้น			ความแตกต่าง (%)
	ก่อนผ่าน (Particles/cm^3)	หลังผ่าน (Particles/cm^3)	ประสิทธิภาพ (%)	ก่อนผ่าน (mV/cm^3)	หลังผ่าน (mV/cm^3)	ประสิทธิภาพ (%)	
1	10700.00	172.00	98.39	187.60	3.20	98.29	0.10
2	11300.00	171.00	98.49	189.50	3.70	98.05	0.44
3	11100.00	178.00	98.40	188.30	3.80	97.98	0.41
4	11000.00	175.00	98.41	182.50	3.81	97.91	0.50
5	10900.00	170.00	98.44	189.00	3.50	98.15	0.29
เฉลี่ย	11000.00	173.20	98.43	187.38	3.60	98.08	0.35

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเกลือ NaCl ขนาด 0.264 μm ของหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ จำนวน 5 ตัวอย่างที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

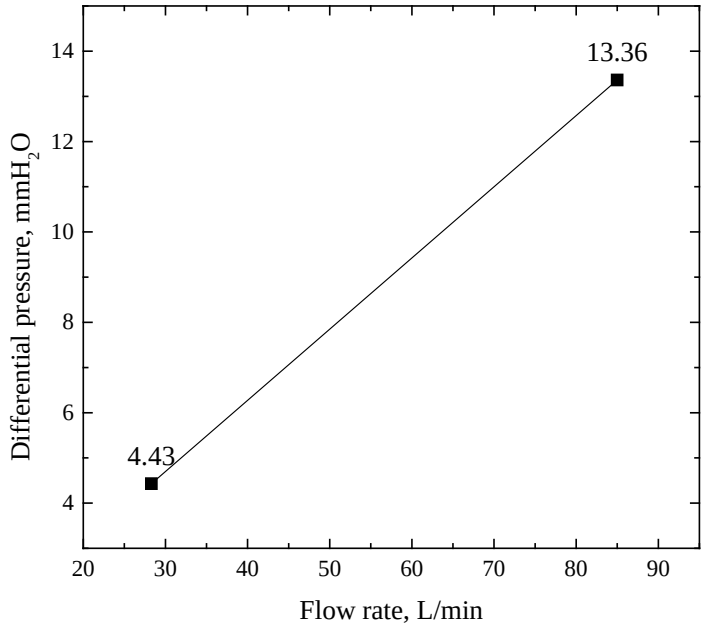
ตัวอย่างทดสอบ	เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง			เครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้น			ความแตกต่าง(%)
	ก่อนผ่าน (Particles/cm^3)	หลังผ่าน (Particles/cm^3)	ประสิทธิภาพ (%)	ก่อนผ่าน (mV/cm^3)	หลังผ่าน (mV/cm^3)	ประสิทธิภาพ (%)	
1	10100.00	271.00	97.32	202.10	4.30	97.87	-0.56
2	10000.00	270.00	97.30	204.40	4.78	97.66	-0.36
3	10200.00	273.00	97.32	209.10	4.51	97.84	-0.52
4	10300.00	270.00	97.38	204.80	4.60	97.75	-0.38
5	10400.00	272.00	97.38	205.30	4.30	97.91	-0.52
เฉลี่ย	10200.00	271.20	97.34	205.14	4.50	97.81	-0.47

รูปที่ 13 แสดงประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min จากรูปพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคมีค่าลดลงที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลอากาศสูงขึ้นความเร็วด้านหน้า (Face velocity) จะสูงขึ้นจะส่งผลให้มีโมเมนตัมหรือแรงเฉื่อยสูงจึงทำให้อนุภาคสามารถผ่านทะลุได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างเส้นใยที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบได้ง่ายหลายทิศทาง [22] โดยที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 L/min อนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 98.08 % ส่วนอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 97.81 % และที่อัตราการไหลอากาศ 85 L/min อนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 94.93 % ส่วนอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 92.21 % จากรูปยังสังเกตได้ว่าอนุภาค 0.1 μm มีประสิทธิภาพในการกรองสูงกว่าอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm เนื่องจากประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองแบบนอนวูฟเวนจะต่ำในช่วงอนุภาคขนาด 0.1 ถึง 0.5 μm เนื่องจากเป็นช่วงขนาดอนุภาคที่กลไกการแพร่กระจาย การกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัดกั้นดักกรองได้ต่ำ โดยขนาดอนุภาคที่สามารถผ่านทะลุแผ่นกรองแบบนอนวูฟเวนได้ดีที่สุด (Most penetrating particle size) คืออนุภาคขนาด 0.3 μm [22] จึงทำให้อนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ผ่านทะลุแผ่นกรองได้ง่ายกว่าอนุภาค PSL นอกจากนี้รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) ยังมีผลต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคอีกด้วย โดยที่อนุภาค PSL จะเป็นอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ที่เป็นรูปทรงกลม ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉายภาพทรงกลมเทียบเท่า (Equivalent sphere projected area diameter) ส่วนอนุภาคเกลือจะเป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นผลึกไม่เป็นรูปทรงกลม ซึ่งอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉายภาพทรงกลมเทียบเท่า โดยเมื่อเทียบขนาดทรงกลมปริมาตรเทียบเท่า (Equivalent volume sphere) ระหว่างอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมและอนุภาคทรงกลมจะมีค่าที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยของรูปร่างของอนุภาค (Shape factor) โดยที่อนุภาคที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมจะมีผลกระทบกับแรงเสียดลาก (Drag force) ในพื้นที่ผิวที่ต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถเคลื่อนตัวเชิงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic motion) ต่างกับอนุภาคที่เป็นทรงกลม [22] จึงมีผลต่อกลไกกระทบและกลไกการสกัดกั้นระหว่างอนุภาคกับเส้นใยของแผ่นกรองส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคทั้ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกัน **รูปที่ 14** แสดงค่าความต่างของความดันของหน้ากากอนามัยตัวอย่างที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min จากรูป

พบว่าค่าความต่างของความดันของหน้ากากมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลอากาศที่สูงขึ้น เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีผลทำให้ความเร็วด้านหน้าของแผ่นกรองสูงขึ้นและทำให้เกิดการต้านการไหลของอากาศที่แผ่นกรองหน้ากากสูงขึ้นตามโดยที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 L/min มีค่าความต่างของความดันเท่ากับ 4.43 mmH2O และที่อัตราการไหลอากาศ 85 L/min มีค่าความต่างของความดันเท่ากับ 13.36 mmH2O



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 µm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 µm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min



รูปที่ 14 ค่าความต่างของความดันของหน้ากากอนามัยตัวอย่างที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min

5. อภิปรายผลและสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและทดสอบต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติที่ใช้ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสำหรับหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพของตัวกรองและความดันตกของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ต้นแบบของเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติถูกสร้างและทดสอบเชิงการทดลองตามมาตรฐาน มอก.2424-2562 และ มอก.2480-2562 ต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอยตัวทำให้อนุภาคเป็นกลาง ถังผสม ห้องทดสอบ ตัวนับจำนวนอนุภาค ตัววัดความดันแตกต่าง ตัวอัดอากาศ ตัววัดอัตราการไหล และชุดประมวลผลและแสดงผลการทดสอบ ในเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างอนุภาค PSL และ NaCl ในช่วงความเข้มข้นเชิงจำนวนตั้งแต่ 1 ถึง 20,000 particles/cm^3 ต้นแบบได้ออกแบบให้ทำงานที่อัตราการไหลอากาศประมาณ 5 ถึง 100 L/min ที่ประสิทธิภาพการกรองอนุภาควัดได้สูงถึง 99.999% ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง โดยได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค และ 2) การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ 0.35% และค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ -0.47% และมีการทดสอบผลของอัตราการไหลอากาศต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ของหน้ากากอนามัยที่อัตราการไหลอากาศ 2 ช่วงคือ 28.3 และ 85 L/min พบว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลที่สูงขึ้นและค่าความต่างของความดันของหน้ากากมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลอากาศที่สูงขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้เห็นถึงค่าการทดสอบที่ใกล้เคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงของต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นในการหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคและความดันตกของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ แสดงให้เห็นว่าต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้เป็นเครื่องทดสอบตัวกรองแบบอัตโนมัติได้เทียบเคียงกับเครื่องทดสอบตัวกรองที่ใช้หลักการนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

[1] *COVID-19 situation report*, Department of Disease Control, May. 18, 2021. [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, 2020, Art. no. 3363, 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 and 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, 2020, Art. no. 762, 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 N95/KN95/FFP1/FFP2 Masks Available for Use during the COVID-19 Pandemic in Thailand," *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, 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] 42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices, National Institute for Occupational Safety and Health , Mar. 4, 1997. [Online]. Available: https://www.cdc.gov/niosh/ npptl/topics/respirators/pt84abs2.html

[15] 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.

[16] Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks, ASTM F2100-19e1, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.

[17] B. Y. H. Liu and D. Y. H. Pui, "Equilibrium bipolar charge distribution of aerosols," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol.49, no.2, pp.305–312, 1974, doi: 10.1016/0021-9797(74)90366-X.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] P. Intra, V. Asanavijit and W. Rattanachan, "Evaluation of the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks by Electrostatic and Light Scattering Particle Counters," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol.39, no. 2, pp. 53–69, 2022.

[22] K. Willeke and P. A. Baron, "Filter collection," in *Aerosol Measurement: Prnciples, Techniques, and Applications*, New York, USA: John Wiley & Sons, 1993, ch. 10, pp. 179–205.

[23] P. Intra, and N. Tippayawong, "Experimental characterization of a short electrical mobility spectrometer for aerosol size classification," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 26, no. 6, pp. 1770–1777, 2009, doi: 10.1007/s11814-009-0261-0.

[24] P. Intra, and N. Tippayawong, "Development of a fast-response, high-resolution electrical mobility spectrometer," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 279–286, 2011, doi: 10.1007/s11814-010-0326-0.