



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการใช้หลักการไฟฟ้าสถิตในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

A theoretical and experimental study on the use of electrostatic principle for removal of equivalent particle size of viruses for personal protective equipment applications

วิสูตร อาสนวิจิตร* พานิช อินต๊ะ

หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50220

Visut Asanavijit* Panich Intra

Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220

* Corresponding author.

E-mail: iamvisut@gmail.com; Telephone: 0 8504 01595

วันที่รับบทความ 1 พฤศจิกายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 8 มีนาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ 1 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

ในบทความนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการใช้หลักการไฟฟ้าสถิตในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล ตัวกรองไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบ สร้างและประเมินผล ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ขึ้นเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในตัวกรองไฟฟ้าสถิต ในการศึกษาได้ดำเนินการตรวจสอบเชิงทดลองสำหรับอนุภาคเป็นกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคเทียบเท่าของไวรัสที่แรงดันไฟฟ้าบวกที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านในอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 kV และอัตราการไหลของละอองลอยอยู่ระหว่าง 0.6 และ 1.5 ลิตรต่อนาที ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเป็นกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตรทั้งหมดสามารถตกตะกอนบนอิเล็กโทรดด้านนอกของตัวกรองไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 5 kV และอัตราการไหลของละอองลอยประมาณ 0.6 ลิตรต่อนาที การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของตัวกรองเพิ่มขึ้นสำหรับทุกอัตราการไหลของละอองลอย การทดลองยืนยันว่าประสิทธิภาพของตัวกรองไฟฟ้าสถิตสามารถเพิ่มขึ้นมากกว่า 90% ที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 5 kV สำหรับทุกอัตราการไหลของละอองลอย ตัวกรองไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่ากันไวรัสได้สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

คำสำคัญ

โควิด-19 ไวรัส ตัวกรองอนุภาค ไฟฟ้าสถิต อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

Abstract

In this paper, the use of electrostatic principle for removal of equivalent particle size of viruses for personal protective equipment applications was theoretical and experimental studied. The electrostatic collector used in this study was designed, constructed, and evaluated. An analytical model was developed to investigate particle transport inside the electrostatic collector. In this study, experimental investigations were carried out for neutralized particles of 100 nm in diameter that is an equivalent particle size of viruses, the positively applied voltage at the inner electrode ranged from 1 to 5 kV and aerosol flow rates ranged between 0.6 and 1.5 L/min. The calculation results showed that all neutralized

particles of 100 nm in diameter could precipitate on the outer electrode of the electrostatic collector at applied voltage of about 5 kV and aerosol flow rate of about 0.6 L/min. For all aerosol flow rates, an increase in applied voltage produced an increase in particle collection efficiency of the collector. Experiments confirmed that the efficiency of the electrostatic collector could increase over 90% at an applied voltage of about 5 kV for all aerosol flow rates. The developed electrostatic collector proved to be particularly useful in removing equivalent particle size of viruses for personal protective equipment applications.

Keywords

COVID-19; virus; particle collector; electrostatic; personal protective equipment

1. คำนำ

การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลก ทำให้ยอดผู้ติดเชื้อสะสมสูงถึง 219,456,675 ราย และเสียชีวิตสะสมสูงถึง 4,547,782 ราย สำหรับประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อสะสม 1,884,973 ราย และเสียชีวิตสะสม 19,006 ราย ข้อมูล ณ วันที่ 28 ตุลาคม 2564 [1] ทำให้หน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) มีความต้องการสูงเพื่อใช้ในการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโควิด-19 จากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลว ละอองลอยแบคทีเรียจากปาก และจมูก เนื่องจากหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่ใช้ครั้งเดียวทิ้งจึงทำให้เกิดขยะหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้นจำนวนมากในช่วงการระบาดของโรคโควิด-19 เฉพาะในพื้นที่กรุงเทพฯ มีขยะหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้นถึง 20 ตันต่อวัน [2] จึงทำให้เพิ่มความเสี่ยงต่อการระบาดขึ้นได้ เพราะขยะติดเชื้อทั้งหน้ากากอนามัย ของใช้ที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่งเมื่อไม่ได้ถูกแยกออก อีกทั้งเครื่องฟอกอากาศที่มีการใช้งานในอาคาร สำนักงาน โรงพยาบาลและบ้านพักอาศัยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการกรองอนุภาคด้วยแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง (High-efficiency particulate air) หรือ HEPA Filter ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นที่สูงถึง 99.97 % ที่อนุภาคขนาด 0.3 μm แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศเหล่านี้ต้องมีการเปลี่ยนแผ่นกรองปีละ 3-4 ครั้ง จึงทำให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อหากใช้ในโรงพยาบาลที่มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งขยะแผ่นกรองเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และต้องกำจัดด้วยวิธีการเผา ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและส่งผลกระทบต่ออันตรายทางระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ตามมา

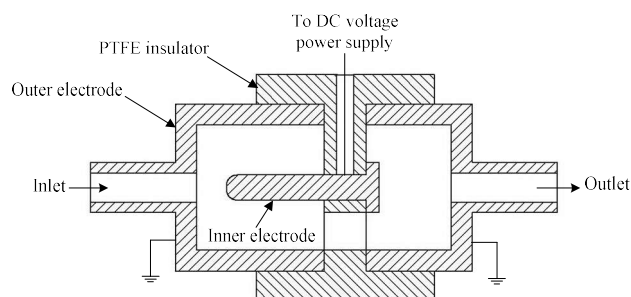
จึงทำให้มีการวิจัยอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่ไม่ใช้แผ่นกรองอนุภาคหรือวิธีการกรองอนุภาคด้วยเส้นใยมากขึ้นเพื่อลดปริมาณขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อจากหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 การดักจับอนุภาคด้วยหลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic collection) จึงเป็นหลักการทางเลือกเนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคสูงเทียบเท่าแผ่นกรองแบบ HEPA มีความต่างของความดันต่ำ สามารถกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียได้ด้วยสนามไฟฟ้าสถิตซึ่งเป็นระบบที่ใส่กรองสามารถถอดล้างทำความสะอาดได้บ่อยครั้งตามที่ต้องการ จึงไม่เป็นที่สะสมของสิ่งสกปรกและเชื้อโรค ช่วยประหยัดวัสดุสิ้นเปลืองและช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและไม่ก่อให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อ [3] ซึ่งการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการดักจับอนุภาคด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตมีอยู่ค่อนข้างกว้างขวาง [4 – 9] โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับเครื่องฟอกอากาศภายในอาคาร สำหรับการกำจัดฝุ่น PM2.5 และเชื้อโรคในอากาศในอาคาร ยังไม่มีการนำเอาหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสในอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล เช่น หน้ากากอนามัย หน้ากากกรองอากาศ เครื่องกรองอากาศสำหรับเครื่องช่วยหายใจ และยังขาดการศึกษาที่ชัดเจนเกี่ยวกับการดักกรองอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัส ซึ่งอนุภาคของไวรัสโคโรนา 2 (SARS-CoV-2) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 50 - 140 nm หรือ 0.05 – 0.14 μm [10] ในการศึกษาทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ตามมาตรฐาน ASTM F2100 กำหนดให้ทดสอบกับอนุภาคขนาด 0.1 μm และต้องได้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคไม่ต่ำกว่า 95% ที่ความต่างของความดันน้อยกว่า 4.0 mmH₂O/cm² [11]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการใช้หลักการไฟฟ้าสถิตในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล โดยทำการวิเคราะห์เส้นโคจรของอนุภาคขนาด 100 nm ด้วยสมการที่ (12) ที่แรงดันไฟฟ้า 1, 3 และ 5 kV และอัตราการไหลของของไหล 0.6 และ 1.5 L/min เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าและอัตราการไหลต่อเส้นโคจรของอนุภาคขนาด 100 nm และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาด 100 nm ด้วยสมการที่ (14) ข้อมูลการวิเคราะห์เส้นโคจรของอนุภาคและประสิทธิภาพการดักจับนี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเบื้องต้นกับอนุภาคขนาด 100 nm ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลองจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในพัฒนาชุดดักจับอนุภาคขนาดเทียบเท่ากันไวรัสด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลต่อไปได้

2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างต้นแบบชุดดักจับอนุภาคที่พัฒนาขึ้นอาศัยหลักการการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพื่อศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการใช้หลักการไฟฟ้าสถิตในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัส [10] ที่มีหลากหลายอยู่ระหว่าง 60-140 nm สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล โดยทำการวิเคราะห์เส้นโคจรของอนุภาคขนาด 100 nm ซึ่งมีโครงสร้างและหลักการของชุดดักจับอนุภาค ดังรูปที่ 1 ก แสดงลักษณะโครงสร้างของต้นแบบชุดดักจับอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล ต้นแบบชุดดักจับอนุภาคที่พัฒนาขึ้นนี้อาศัยหลักการการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitation) ที่มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Intra and Tippayawong [12] และ Intra et al. [13] แต่จะมีความแตกต่างที่มีการประยุกต์ใช้ในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเทียบเท่าไวรัสหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าต่ำกว่าไอออนบวกและลบซึ่งในงานของ Intra and Tippayawong [12] และ Intra et al. [13] ได้ใช้หลักการนี้ในการดักจับไอออนอิสระ (Free ions) ที่มีความสามารถในการ

เคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูงปนมากับอนุภาคที่มีประจุก่อนที่จะเข้าไปยังเครื่องวัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค (Particle charge detector) โดยต้นแบบได้ออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบา เหมาะสำหรับการใช้งานแบบพกพา ดังรูปที่ 1 ข



(ก) โดอะแกรมลักษณะโครงสร้าง

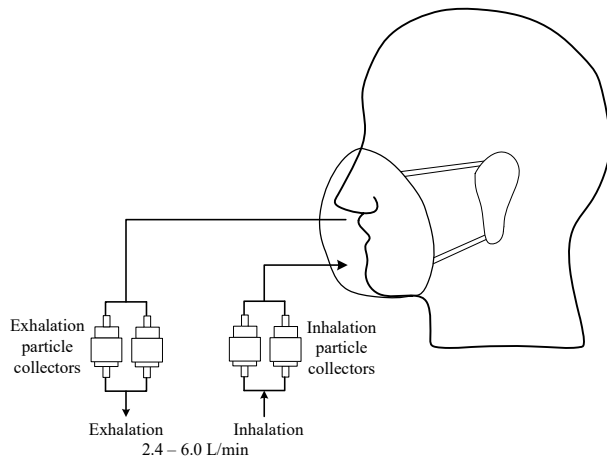


(ข) ภาพถ่าย

รูปที่ 1 ต้นแบบชุดดักจับอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

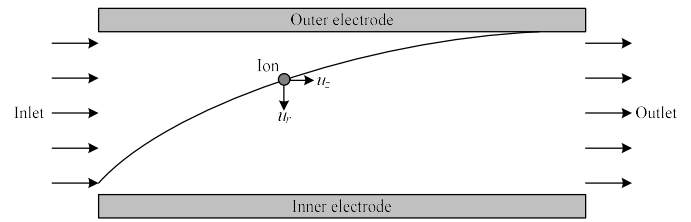
สำหรับแนวคิดในงานวิจัยนี้จะนำตัวดักจับอนุภาคที่ทำงานแบบคู่ขนาน เพื่อใช้ดักกรองอนุภาคการหายใจเข้าและออก ซึ่งมีคุณสมบัติที่ด้านการหายใจต่ำ โดยจะใช้ชุดดักจับอนุภาคทั้งหมด 4 ชุด แบ่งเป็นชุดสำหรับการหายใจเข้า 2 ชุด และหายใจออก 2 ชุด ดังรูปที่ 2 การออกแบบลักษณะนี้ทำให้สะดวกต่อการสับเปลี่ยนชุดกรอง หากชุดดักกรองใดมีความสกปรกที่ต้องการล้างทำความสะอาดก็สามารถถอดเปลี่ยนหรือล้างได้ โดยที่ชุดดักกรองอื่นยังสามารถทำงานต่อได้ ซึ่งตัวดักกรอง 1 ชุด สามารถทำงานที่อัตราการไหลในช่วง 0.6–1.5 L/min เมื่อนำมาต่อขนานกันจึงทำให้อัตราการไหลรวมในการหายใจเข้าในช่วง 1.2–3.0 L/min และอัตราการไหลรวมในการหายใจออกในช่วง 1.2–3.0 L/min เมื่อนำมารวมกันจะได้เท่ากับ 2.4–6.0 L/min ซึ่งโดยปกติทั่วไปการหายใจเข้าและ

ออกรวมของมนุษย์จะอยู่ในช่วง 3–6 L/min ต้นแบบชุดดักจับอนุภาคที่พัฒนาขึ้นนี้ชุดดักจับอนุภาคจะประกอบด้วยเส้นลวดอิเล็กโทรดด้านใน (Inner electrode) ที่วางแกนร่วมกับท่ออิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอก (Outer electrode) ด้วยฉนวนไฟฟ้าที่ทำจาก Polytetrafluoroethylene (PTFE) ท่ออิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอกทำมาจากสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm และยาว 15 mm ขั้วอิเล็กโทรดด้านในทำมาจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm และยาว 11.5 mm ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง (DC high voltage power supply) จ่ายเข้าที่เส้นลวดอิเล็กโทรดด้านใน ในขณะที่ท่ออิเล็กโทรดด้านนอกมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าปกติอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 kV มีทิศทางการไหลของอากาศดังแสดงในรูปที่ 1 ก และรูปที่ 1 ข แสดงรูปถ่ายของชุดดักจับอนุภาคที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2 การออกแบบชุดดักจับอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

รูปที่ 3 แสดงหลักการการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตของชุดดักจับอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัส โดยการเคลื่อนที่ในแนวแกนจะได้รับอิทธิพลจากการไหลในแนวแกนของของไหล ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจะได้รับอิทธิพลจากแรงทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงกระทำอื่นๆ เมื่ออนุภาคเข้าไปยังสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หลักการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [3]

อนุภาคจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า และจะมีความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า โดยสมมุติให้สนามการไหลและไฟฟ้ามีความสมมาตรกับแกน (Axisymmetric) และคงตัว (Steady) มีการไหลผ่านในจะต้องราบเรียบ (laminar) มีการพัฒนารูปร่างจากเดิมอย่างเต็มที่ (Fully developed) และไม่มีการอัดตัว (Incompressible) และไม่มีผลของประจุค้างภายใน (Space charge effect) และการแพร่กระจายของอนุภาค (Brownian diffusion effect) ดังนั้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในชุดดักจับ จะสามารถอธิบายโดยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation system) ซึ่งแสดงตามสมการดังนี้ คือ [3,6]

$$\frac{dr}{dt} = u_r + Z_p E_r \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = u_z + Z_p E_z \quad (2)$$

เมื่อ u_r และ u_z คือความเร็วในแนวรัศมีและแนวแกน E_r และ E_z คือสนามไฟฟ้าในแนวรัศมีและแนวแกน และ Z_p คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของอนุภาค (Electrical mobility of particles) ถ้าสมมุติให้การสูญเสียของสนามไฟฟ้าที่ขอบมุมของขั้วอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมากๆ และสนามไฟฟ้าภายในท่อทรงกระบอกสม่ำเสมอ (Uniform electric field) สนามไฟฟ้าจะหาได้จากความสัมพันธ์ [3,6]

$$E_r = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \text{ และ } E_z \approx 0 \quad (3)$$

เมื่อ r_1 และ r_2 คือขนาดรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอก และ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้ว

อิเล็กโทรดด้านใน ดังนั้นความเร็วในแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบมีค่าเท่ากับศูนย์ และความเร็วในแนวแกนเท่ากับความเร็วของของไหลในท่อทรงกระบอกซ้อนกันรวมคือ [3,6]

$$u_r = 0 \quad \text{และ} \quad u_z(r) = Ar^2 + B \ln(r) + C \quad (4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz}, \\ B &= -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \right), \\ C &= \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r_1) - r_1^2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

และ dp/dz คือค่าคงที่ของ Pressure gradient สามารถคำนวณได้จาก [3,6]

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\rho \bar{U}^2 f}{2D_h} \quad (6)$$

เมื่อ

$$D_h = 2r_2 (1 - (r_1/r_2)) \quad (7)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{1 + (r_1/r_2)^2}{(1 - (r_1/r_2))^2} + \frac{1 + (r_1/r_2)}{(1 - (r_1/r_2)) \ln(r_1/r_2)} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$\text{Re} = \frac{2r_2 (1 - (r_1/r_2)) \bar{U} \rho}{\mu} \quad (9)$$

D_h คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Hydraulic สำหรับพื้นที่การไหลแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม f คือปัจจัยการเสียดทาน (Friction factor) $\bar{U}$ คือความเร็วของการไหลในแนวแกนเฉลี่ย ρ คือความหนาแน่นของแก๊ส และ Re คือตัวเลขเรย์โนลด์ รวมสมการที่ (3) และ (4) ในสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ จะได้สมการเส้นโคจรของอนุภาคคือ [3,6]

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\frac{dr}{dt}}{\frac{dz}{dt}} = \frac{Z_p V}{ru_z(r) \ln(r_2/r_1)} \quad (10)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (10) จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ (Migration path) ของอนุภาคคือ [3,6]

$$\int_{r_m}^{r_2} ru_z(r) dr = \int_0^z \frac{VZ_p}{\ln(r_2/r_1)} dz \quad (11)$$

เมื่อ r_m คือตำแหน่งรัศมีที่อนุภาคเข้าไปยังชุดดักจับอนุภาค ดังนั้น ถ้าอนุภาคเข้าไปในชุดดักจับอนุภาคที่ตำแหน่งรัศมี r_m จะมีเส้นโคจรไปยังตำแหน่งแนวแกน z คือ [3,6]

$$z = -\frac{g(r_m) \ln(r_2/r_1)}{4VZ_p} \quad (12)$$

$$g(r_m) = \left(\frac{Ar_m^4 - Ar_m^4 + Br_m^2 - Br_m^2 + 2Br_m^2 \ln(r_2)}{-2Br_m^2 \ln(r_m) + 2Cr_m^2 - 2Cr_m^2} \right) \quad (13)$$

ประสิทธิภาพการดักจับหรือการตกตะกอน (Removal or trapping efficiency) ของอนุภาค คือ อัตราการของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นทางด้านทางเข้าและทางออกของชุดดักจับอนุภาค โดยสมมติให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทางเข้าสู่ชุดดักจับอนุภาค ดังนั้น ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค η สามารถประมาณค่าได้จากสมการของ Deutsch-Anderson คือ [14–15]

$$\eta = 1 - \exp \left(-\frac{2\pi r_2 LZ_p E}{Q_i} \right) \quad (14)$$

เมื่อ L คือความยาวของท่ออิเล็กโทรดด้านนอกของชุดดักจับอนุภาค E คือสนามไฟฟ้า และ Q_i คืออัตราการไหลของชุดดักจับอนุภาค ดังนั้น จำนวนความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางด้านทางออกชุดดักจับอนุภาค N_p หาได้จากสมการ [3,6]

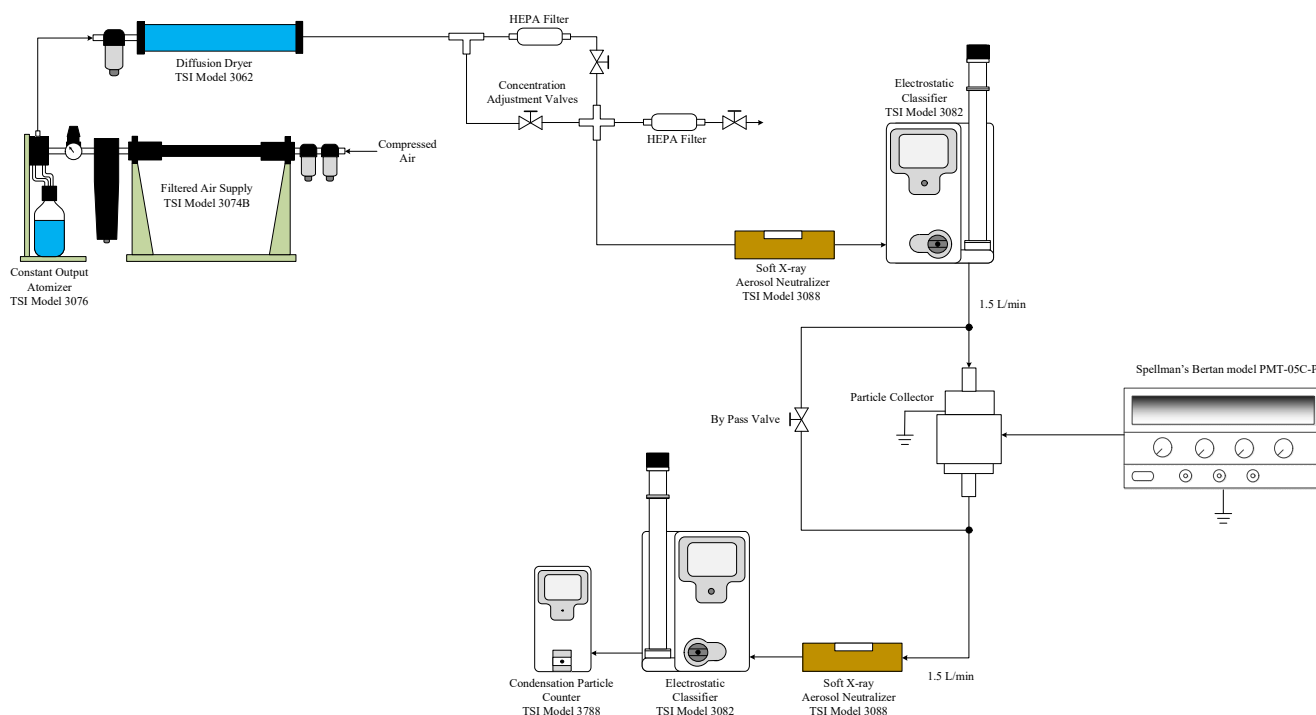
$$N_p = N_0 - N_0 \eta \quad (15)$$

เมื่อ N_0 คือจำนวนความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางด้านทางเข้าของชุดดักจับอนุภาค

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้สมมุติให้อนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 nm โดยทำการวิเคราะห์เส้นโคจรของอนุภาคขนาด 100 nm ในทางทฤษฎีด้วยสมการที่ (12) ที่แรงดันไฟฟ้า 1, 3 และ 5 kV และอัตราการไหลของของไหล 0.6 และ 1.5 L/min เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าและอัตราการไหลต่อเส้นโคจรของอนุภาคขนาด 100 nm และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาด 100 nm ด้วยสมการที่ (14) ข้อมูลการวิเคราะห์เส้นโคจรของอนุภาคและประสิทธิภาพการดักจับนี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเบื้องต้นกับอนุภาคขนาด 100 nm โดยในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นเฉพาะที่อัตราการไหลคงที่ 0.6

L/min และที่แรงดันไฟฟ้า 1, 3 และ 5 kV ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคที่อัตราการไหลต่ำสุดก่อนในเบื้องต้นและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการที่ (14) โดยแผนภาพการทดสอบเบื้องต้นประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาด 100 nm แสดงในรูปที่ 4 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วยต้นแบบชุดดักจับอนุภาค (Particle collector) อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex spheres) แหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ตัวไล่ความชื้นแบบแพร่ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง



รูปที่ 4 แผนภาพการทดสอบเบื้องต้นประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาด 100 nm

(Aerosol neutralizer) ชุดวาล์วปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment valve) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic size classifier) เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ใต้ (Scanning Mobility Particle Sizer) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองนี้ใช้อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 nm หรือ

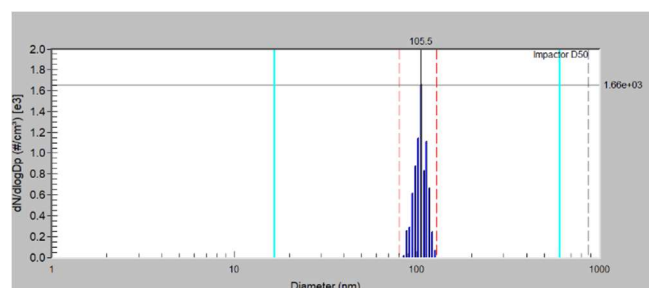
0.1 μm ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต (Geometric standard deviation) 1.6 % ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ของ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยจ่ายอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ที่ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

ในสัดส่วน 1000 : 1 จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล่ความชื้นแบบแพร์ (Model 3062, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับให้เหมาะสมได้ด้วยชุดวาล์วปรับความเข้มข้นด้านหลังตัวไล่ความชื้น หลังจากชุดวาล์วปรับความเข้มข้น อนุภาคจะถูกทำให้มีสมมูลประจุบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann equilibrium charge equivalent) ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อคัดแยกขนาดอนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) ด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยทำการแยกอนุภาคตกค้าง (Residual particles) ที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำออกให้ได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 nm รูปที่ 5 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ ที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต มีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Median diameter) เท่ากับ 105.5 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean diameter) เท่ากับ 108.6 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter) เท่ากับ 107.4 nm เส้นผ่านศูนย์กลางฐานนิยม (Mode diameter) เท่ากับ 105.1 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (Geometric standard deviation) เท่ากับ 1.07 หลังจากเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต อนุภาคขนาด 100 nm จะเข้าไปยังต้นแบบชุดดักจับอนุภาคที่ถูกจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรงชั่วคราว โดยการทดลองนี้สนใจศึกษาแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านใน 1–5 kV และให้อัตราการไหลคงที่ 0.6 L/min ซึ่งผลการทดสอบเบื้องต้นนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับของสมการที่ (14) โดยการหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของชุดดักจับต้นแบบในทดลอง จะทำการวัดค่าการกระจายขนาดอนุภาคเชิงจำนวน (Number weighted particle size distribution) ทั้งก่อน (Up stream) และหลังผ่าน (Down stream) ต้นแบบชุดดักจับด้วยเครื่องวัด

ขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning mobility particle sizer) ที่ประกอบด้วย ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบควมแน่น (Model 3788, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) และคำนวณหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาค η_{exp} ได้จาก [3,6]

$$\eta_{exp} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100 \quad (16)$$

เมื่อ C_{inlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนผ่านต้นแบบและ C_{outlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคหลังผ่านต้นแบบ ในการทดสอบนี้ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบที่ 25°C และ 55 %RH ตามลำดับ โดยได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

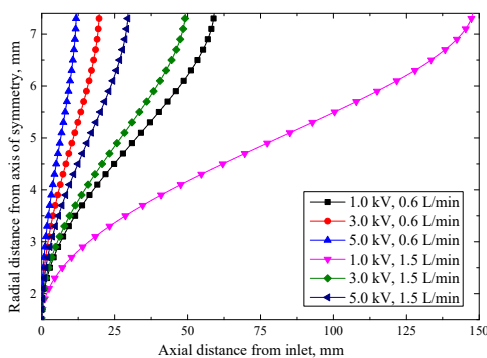


รูปที่ 5 การกระจายขนาดอนุภาค 100 nm ที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากรูปที่ 6 แสดงเส้นโคจรของอนุภาคภายในชุดดักจับอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เส้นลวดอิเล็กโทรดระหว่าง 1 และ 5 kV และอัตราการไหลระหว่าง 0.6 และ 1.5 ลิตร ในการวิเคราะห์นี้ได้กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าไวรัสที่ต้องการดักจับคือ 100 nm โดยอนุภาคจะถูกผลักด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตเข้าหาพื้นผิวด้านในของท่ออิเล็กโทรดด้านนอก จากการเปรียบเทียบพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เส้นลวดอิเล็กโทรดจะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าขึ้น และแรงดันไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ โดยที่แรงดันไฟฟ้าสูงอนุภาคจะมี

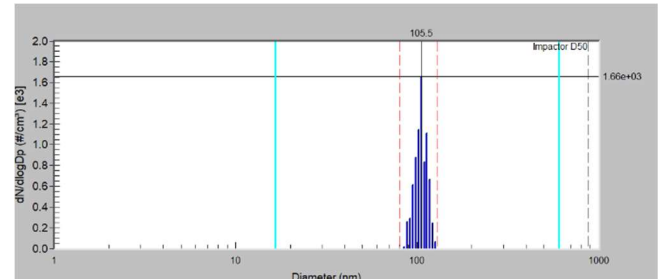
ระยะเส้นโคจรที่ใกล้กว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งหมายความว่าถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นมากอาจเกิดการเบรคดาวนขึ้นระหว่างข้ออิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกทำให้เกิดความเสียหายได้ สำหรับอากาศที่ 20°C และที่ความดันบรรยากาศ 1 บาร์ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน (Breakdown voltage) ประมาณ 30 kV/cm และจากรูปจะพบว่าอัตราการไหลของของไหลแปรผันตรงกับระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยที่อัตราการไหลต่ำๆ ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากทางเข้าไปถึงข้ออิเล็กโทรดด้านนอกจะใกล้กว่าที่อัตราการไหลที่สูงกว่าเนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำมีผลทำให้ความเร็วในแนวแกนมีค่าลดลงจึงทำให้อนุภาคเคลื่อนเข้าในแนวรัศมีได้ดีขึ้นตามสมการที่ (1) และ (2)



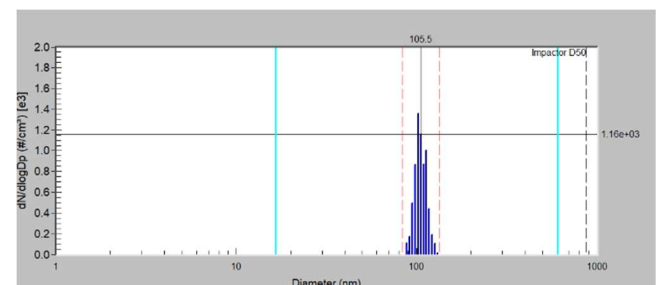
รูปที่ 6 เส้นโคจรของอนุภาคภายในชุดดักจับอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เส้นลวดอิเล็กโทรดระหว่าง 1 และ 5 kV และอัตราการไหลระหว่าง 0.6 และ 1.5 ลิตร

รูปที่ 7 แสดงการกระจายขนาดอนุภาค 100 nm ที่ทางออกของชุดดักจับอนุภาคที่แรงดันไฟฟ้า 0, 1, 3, และ 5 kV และอัตราการไหล 0.6 L/min จากรูปที่แรงดันไฟฟ้าที่ข้ออิเล็กโทรดด้านใน 0 kV จะมีค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค 100 nm ที่ทางออกชุดดักจับอนุภาคต้นแบบเท่ากับ 1.66×10^3 particles/cm³ เมื่อเพิ่มแรงดันที่ข้ออิเล็กโทรดด้านในสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค 100 nm ที่ทางออกของต้นแบบชุดดักจับอนุภาคมีค่าลดลงโดยที่แรงดันไฟฟ้า 1, 3, และ 5 kV จะมีค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค 100 nm ที่ทางออกเท่ากับ 1.16×10^3 , 634.1, 135 particles/cm³ ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ข้ออิเล็กโทรดให้สูงขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าภายในมี

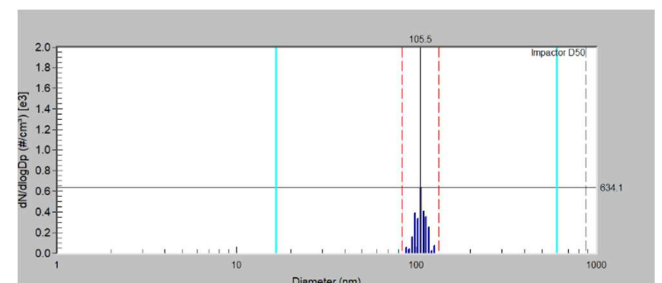
ค่าสูงขึ้นทำให้มีแรงทางไฟฟ้าสถิตตกตะกอนอนุภาคสูงขึ้นและทำให้อนุภาคตกตะกอนภายในชุดดักจับอนุภาคต้นแบบเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เส้นโคจรของอนุภาคในรูปที่ 6



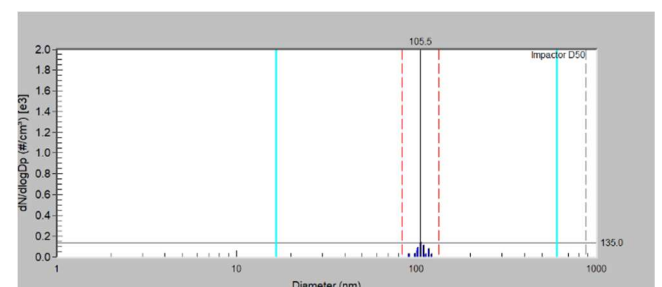
(น) 0 kV



(ข) 1 kV



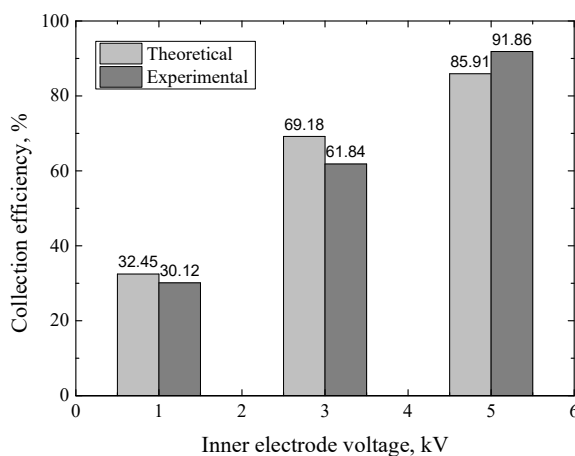
(ค) 3 kV



(ง) 5 kV

รูปที่ 7 การกระจายขนาดอนุภาค 100 nm ที่ทางออกของชุดดักจับอนุภาคที่แรงดันไฟฟ้า 0, 1, 3 และ 5 kV และอัตราการไหล 0.6 L/min

รูปที่ 8 แสดงกราฟประสิทธิภาพการตกตะกอนของต้นแบบชุดดักจับอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าระหว่างการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการของ Deutsch-Anderson และการทดลองที่อัตราการไหล 0.6 L/min จากรูปจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนของชุดดักจับอนุภาคเพิ่มขึ้นทั้งทฤษฎีและการทดลอง โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนทางการทดลองของชุดดักจับอนุภาคทางทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับ 32.45%, 69.18% และ 85.91% ที่แรงดันไฟฟ้า 1, 3 และ 5 kV ตามลำดับ และประสิทธิภาพการตกตะกอนทางการทดลองของชุดดักจับอนุภาคทางการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 30.12%, 61.84% และ 91.86 % ที่แรงดันไฟฟ้า 1, 3 และ 5 kV ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการของ Deutsch-Anderson ความแตกต่างของข้อมูลระหว่างการทดลองและการคำนวณเล็กน้อยอาจจะเนื่องมาจากว่าสมการของ Deutsch-Anderson ไม่ได้คิดรวมผลของการผสมกันปั่นป่วน (Turbulence mixing) โดยการพัดพาของสนามไฟฟ้า (Electric wind) และการแพร่กระจายของอนุภาค (Ion turbulent diffusion)



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของต้นแบบชุดดักจับอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าระหว่างการคำนวณทางทฤษฎี และการทดลองที่อัตราการไหล 0.6 L/min

5. สรุปผลการศึกษา

ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการใช้หลักการไฟฟ้าสถิตในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่าไวรัสสำหรับการ

ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล ตัวกรองไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบ สร้างและประเมินผล ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ขึ้นเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในตัวกรองไฟฟ้าสถิต สำหรับอนุภาคเป็นกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคเทียบเท่าของไวรัสที่แรงดันไฟฟ้าบวกที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านในอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 kV และอัตราการไหลของละอองลอยอยู่ระหว่าง 0.6 และ 1.5 ลิตรต่อนาที ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเป็นกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตรทั้งหมดสามารถตกตะกอนบนอิเล็กโทรดด้านนอกของตัวกรองไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 5 kV และอัตราการไหลของละอองลอยประมาณ 0.6 ลิตรต่อนาที การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของตัวกรองเพิ่มขึ้นสำหรับทุกอัตราการไหลของละอองลอย และในการศึกษานี้ได้ดำเนินการตรวจสอบเชิงทดลองสำหรับอนุภาคเป็นกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร ที่แรงดันไฟฟ้าบวกที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านในอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 kV และอัตราการไหลของละอองลอยอยู่ระหว่าง 0.6 ลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพของตัวกรองไฟฟ้าสถิตสามารถเพิ่มขึ้นมากรกว่า 90% ที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV สำหรับทุกอัตราการไหลของละอองลอย ตัวกรองไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการกำจัดอนุภาคขนาดเทียบเท่ากันไวรัสได้สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล ผลการศึกษานี้ทำให้ได้แนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต ซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดสอบในด้านความสัมพันธ์เส้นโคจรของอนุภาคที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลที่ครอบคลุมการหายใจของมนุษย์ในช่วงหายใจปกติและการหายใจช่วงที่มีการเดินหรือทำงานหนัก เพื่อจะได้นำไปใช้ในการออกแบบชุดดักจับอนุภาคให้เหมาะสมกับการใช้งานป้องกันส่วนบุคคลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเอื้อเพื่ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบทั้งนี้ และผู้วิจัยขออุทิศส่วนบุญส่วนกุศลจากผลงานวิจัยนี้ให้กับนางเอ้ย กันตะ ผู้ล่วงลับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Disease Control. COVID- 19 situation report. Available from: <https://covid19.ddc.moph.go.th/> [Accessed 18th May 2021].
- [2] Thai PBS. Thai PBS news. Available from: <https://news.thaipbs.or.th/content/303786> [Accessed 18th May 2021].
- [3] Intra P. *Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology*. Bangkok: ChulaPress Publishing; 2019.
- [4] Masuda S, Hosokawa S, Tu X.-L, Tsutsumi M, Ohtani T, Tsukahara T, Matsuda N. The performance of an integrated air purifier for control of aerosol, microbial, and odor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1993; 29(4): 774-780.
- [5] Okubo M, Yamamoto T, Kuroki T, Fukumoto H. Electric air cleaner composed of nonthermal plasma reactor and electrostatic precipitator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001; 37(5): 1505-1511.
- [6] Park CW, Hwang J. Susceptibility constants of airborne bacteria to dielectric barrier discharge for antibacterial performance evaluation. *Journal of Hazardous Materials*. 2013; 15 (244-245): 421-428.
- [7] Hoenig SA, Sill GT, Kelley LM, Garvey KJ. Destruction of bacteria and toxic organic chemicals by a corona discharge. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 2012;30(3): 277-278.
- [8] Intra P, Yawootti A, Asanavijit V, Vinitketkumnuen U. Development of an indoor air cleaner for a non toxic room by electrostatic technique. *KMUTT Research and Development Journal*. 2012; 35(3): 361-382.
- [9] Tintachart K, Norkaew W, Yawootti A, Intra P. Modification and Field Testing of an Indoor Electrostatic Air Purifier. *Journal of KMUTNB*. 2016; 26(2): 31-46.
- [10] News Medical Life Sciences. *The Size of SARS-CoV- 2 and its Implications*. Available from: <https://www.news-medical.net/health/The-Size-of-SARS-CoV-2-Compared-to-Other-Things.aspx> [Accessed 18th May 2021].
- [11] Intra P. 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*. 2021; 29(5): 904-918.
- [12] Intra P, Tippayawong N. Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol detector. *Journal of Electrostatics*. 2011; 69(4): 320-327.
- [13] Intra P, Yawootti A, Rattanadecho P. Numerical and experimental studies of collection efficiency of an ion electrostatic collector for a mini-volume electrical PM detector. *Journal of Electrostatics*. 2014; 72(6): 477-486.
- [14] Hinds WC. *Aerosol Technology*. New York: John Wiley & Sons Publishing; 1999.
- [15] White HJ. Particle charging in electrostatic precipitation. *AIEE Transactions*. 1951; 70(2): 1186-1191.