

การพัฒนาและการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศ หลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นละอองและไบโอเอโรซอล จากอากาศภายในอาคาร

Development and Performance Evaluation of an Electrostatic Air Cleaner for Removing Particulate Matter and Bioaerosol from Indoor Air

พานิช อินต๊ะ*

หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตำบลป่าป้อง อำเภอต๋อยสะแกด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

ธเนศวร ศิริอาชวะวัฒน์ และวุฒิพงษ์ เงินพือก

บริษัท อินโนเวทีฟ อินสตรูเมนต์ จำกัด

7/139 ซอยสันตินคร 11 ตำบลบางแก้ว อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

Panich Intra*

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

Thanesvorn Siri-achawawath and Wuttiiphong Ngoenthok

Innovative Instrument Co., Ltd.,

7/139 Suintinakorn 11, Bang Kaew, Bang Phli, Samut Prakan 10540

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ออกแบบ พัฒนา และทดสอบต้นแบบเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต สำหรับกำจัดฝุ่นละอองและไบโอเอโรซอลจากอากาศภายในอาคาร ต้นแบบประกอบด้วยตัวตกตะกอนอนุภาคไฟฟ้าสถิต แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง และระบบควบคุมการไหลของอากาศ ระบบนี้พัฒนาเพื่อจัดการกับฝุ่นละอองและไบโอเอโรซอลที่เข้าสู่ระบบผ่านตัวเก็บอนุภาคไฟฟ้าสถิต 2 ชั้น สำหรับการอัดประจุและการตกตะกอนอนุภาคและไบโอเอโรซอลเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศให้สะอาด ทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคและไบโอเอโรซอลของเครื่องต้นแบบด้วยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2002 กับเครื่องกำเนิดอนุภาคละอองลอยและไบโอเอโรซอลภายในห้องทดสอบขนาด 6×6×3 m ใช้เครื่องวัดฝุ่นและเครื่องตรวจนับการปนเปื้อนอนุภาคเชื้อวัดค่า

ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคและไบโอเอโรซอลภายในห้องทดสอบ ผลการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคและไบโอเอโรซอลของต้นแบบเครื่องฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคโรนาและเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น โดยต้นแบบเครื่องฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคได้ถึง 99.60 % ในเวลาทดสอบ 70 นาที และสามารถลดจำนวนความเข้มข้นของไบโอเอโรซอลลงถึง 87.42 % ในเวลาทดสอบ 60 นาที

คำสำคัญ : อนุภาค; ฝุ่น; แบคทีเรีย; ไฟฟ้าสถิต; เครื่องบำบัดอากาศ

Abstract

This research aims to design, develop and evaluate a prototype of an electrostatic air cleaner for the removal of particulate matter and bioaerosols from indoor air. An electrostatic air cleaner prototype consists of an electrostatic particle collector, a DC high voltage power supply, and a flow control system. In this system, a fan draws a sample air into the system through the two states electrostatic particle collector for charging and collecting the particulate matter and bioaerosols to improve the clean air quality. In this study, the collection efficiency of particulate matter and bioaerosols of the prototype was tested by the ASNI/AHAM AC-1-2002 standard test method with the aerosol particle and bioaerosol generators inside the 6 x 6 x 3 m test chamber. The real-time particulate matter and viable particle counters were used to measure the number of particulate matter concentrations and bioaerosols inside the test chamber. It was found from the experiment that high corona voltage and long testing time resulted in an increase in the collection efficiency of particulate matter and bioaerosols of the prototype. It was shown that the prototype of the developed air cleaner could be effective in removing particulate matter up to 99.60 % at the testing time of 70 minutes and could be reduced the number of concentrations of bioaerosols down to about 87.42 % for the testing time of 60 minutes.

Keywords: particle; dust; bacteria; electrostatic; air cleaner

1. บทนำ

ในช่วงปัญหาหมอกควันหรือฝุ่น PM2.5 และการแพร่ระบาดของโควิด 19 ในประเทศไทย เครื่องฟอกอากาศภายในอาคาร (indoor air cleaner) มีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากสำหรับสถานที่ทำงาน โรงพยาบาล โดยเฉพาะห้องปลอดเชื้อและที่พักรักษา ซึ่งเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารจะช่วยในการกำจัด

ปัญหาเรื่องฝุ่น PM2.5 และเชื้อโรคได้ โดยเฉพาะแบคทีเรีย ควันบุหรี่ ฝุ่น และกลิ่นต่าง ๆ สามารถกำจัดอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็ก 0.01 ไมครอน ที่ปะปนอยู่ในอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของโรคทางเดินหายใจ เช่น โรคภูมิแพ้ โรคหอบหืด โรคปอดอักเสบ [1,2] ปัจจุบันเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารมีการใช้งานในจำนวนที่จำกัด ยังไม่สามารถขยายให้มีการใช้งานในส่วน

สำนักงาน พื้นที่งาน โรงพยาบาล และที่พักอาศัยมากขึ้น เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูงอยู่ในหลักหลายหมื่นบาท และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและบริการจากตัวแทนจำหน่ายในราคาค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาวิจัยเครื่องฟอกอากาศให้มีความเหมาะสมทั้งราคาและการใช้งานสำหรับในประเทศ

เครื่องฟอกอากาศภายในอาคารในปัจจุบันมีทั้งแบบที่เหมาะสมกับพาณิชย์กรรมและอุตสาหกรรม มีลักษณะโครงสร้าง เทคนิค วิธีการ การทำงาน และราคาต่างกันไป เครื่องฟอกอากาศที่มีการใช้งานในประเทศส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคในการกรองฝุ่นด้วยแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง (high-efficiency particulate air, HEPA filter) ซึ่งมีประสิทธิภาพการกรองฝุ่นที่สูงถึง 99.97 % ที่อนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองเหล่านี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่อปีที่สูง โดยเฉลี่ย 3,000-6,000 บาทต่อปี สำหรับการเปลี่ยนแผ่นกรองปีละ 1-2 ครั้ง (https://www.khaosod.co.th/pr-news/news_3313589) อีกทั้งเครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองนี้ยังทำให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อหากใช้ในโรงพยาบาลที่มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งขยะแผ่นกรองเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่และต้องกำจัดด้วยวิธีการเผา ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศตามมามาก ดังนั้นเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิต (electrostatic air cleaner) จึงเป็นหลักการทางเลือก เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคสูงเทียบเท่าแผ่นกรองแบบ HEPA สามารถกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียด้วยสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นระบบที่ไส้กรองสามารถถอดล้างทำความสะอาดบ่อยครั้งตามที่ต้องการ จึงไม่เป็นที่สะสมของสิ่งสกปรกและเชื้อโรค ช่วยประหยัดวัสดุสิ้นเปลือง ประหยัดค่าใช้จ่าย และไม่ก่อให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติด

เชื้อ ซึ่งการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิตมีอยู่ค่อนข้างกว้างขวาง [3-8]

งานวิจัยที่ผ่านมาของ Intra และคณะ [7] ได้ออกแบบ พัฒนา และทดสอบสมรรถนะต้นแบบเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษ โดยการผสมผสานเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตและการกรอง ซึ่งรายงานประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองสูงถึง 99 % ที่ระยะเวลาการบำบัดอากาศ 70 นาที ต่อมา Tintachart และคณะ [8] ได้ปรับปรุงต้นแบบเครื่องฟอกอากาศของ Intra และคณะ [7] และได้ทดสอบภาคสนามในการกำจัดฝุ่นและฆ่าแบคทีเรีย ซึ่งพบว่าเครื่องฟอกอากาศต้นแบบมีประสิทธิภาพในการฆ่าแบคทีเรีย 18.75-98.69 % ที่ระยะเวลาการฆ่าเชื้อ 1-10 นาที และให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองสูงถึง 96.4 % ที่ระยะเวลาการบำบัดอากาศ 6.6 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อนำเครื่องต้นแบบไปทดสอบใช้งานจริงมีข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องต้นแบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น คือ การปรับปรุงขนาดและมิติของเครื่องต้นแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย การบำรุงรักษาคำ และประหยัดพลังงาน รวมทั้งการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคแต่ละชนิดที่วนลอยในอากาศ ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ แบคทีเรียก่อโรคระบบทางเดินหายใจ (เช่น เชื้อก่อโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ เชื้อก่อโรคปอดบวม) เป็นต้น

เพื่อแก้ปัญหาเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบต้นแบบเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นละอองและไบโอเอโรซอลจากอากาศภายในอาคาร โดยใช้เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และเพื่อให้ได้เงื่อนไขของระบบบำบัดอากาศภายในอาคาร

สำนักงานและห้องปลอดเชื้อที่เหมาะสมต่อการทำงาน
ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตของอนุภาค

การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการการแยกอนุภาคออกจากกระแสของอากาศ โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตภายใต้สนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 1 สนามไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด (discharge electrode) และคอลเลกชันอิเล็กโทรด (collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรดโดยใช้คอลเลกชันอิเล็กโทรดเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ที่ดิสชาร์จอิเล็กโทรด ไอออน (ion) และ

อิเล็กตรอน (electron) จะสร้างขึ้นบริเวณที่เกิดโคโรนาดีสชาร์จ และทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับคอลเลกชันอิเล็กโทรด เมื่อมีอากาศที่ม้อนุภาคแขวนลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างจะทำให้เกิดการอัดประจุอนุภาค เป็นผลทำให้อนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่วิถีโค้งด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ไปตกบนคอลเลกชันอิเล็กโทรดและสะสมตัวอยู่บนคอลเลกชันอิเล็กโทรด การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตของอนุภาคในสนามไฟฟ้าจำเป็นต้องรู้สมดุลของแรงทั้งหมดที่กระทำบนอนุภาค ซึ่งประกอบด้วยแรงโมเมนตัม (momentum force) $\mathbf{F}_T$ แรงไฟฟ้า (electrical force) $\mathbf{F}_E$ และแรงต้าน (drag force) $\mathbf{F}_D$ โดยผลรวมของแรงที่กระทำบนอนุภาคทั้งหมดจะเท่ากับศูนย์ดังสมการ [9]

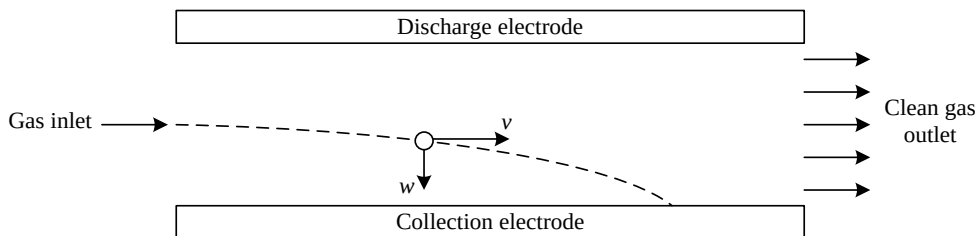


Figure 1 Principle of electrostatic precipitation of particle

$$\mathbf{F}_T + \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_D = 0 \quad (1)$$

จากกฎของนิวตัน (Newton's law) ของอนุภาคจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือ [9]

$$m_p \frac{dw}{dt} = n_p e E + \frac{1}{C_c} 3\pi\mu d_p w + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho} \quad (2)$$

เมื่อ m_p คือ มวลของอนุภาค n_p คือ จำนวนประจุของอนุภาค e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า μ คือ ความหนืดของของไหล (มีค่า $1.846 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 20 °C) d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค w คือ ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังคอลเลกชันอิเล็กโทรด C_c

คือ ตัวประกอบการปรับแก้สลิปคันนิ่งแฮม g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (มีค่า 1.1614 kg/m^3) และ t คือ เวลาในการเคลื่อนที่ โดยความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังคอลเลกชันอิเล็กโทรดสามารถหาได้จาก [9]

$$w = \frac{n_p e E C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (3)$$

และการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า คือ

$$\frac{dr}{dt} = \frac{n_p e C_c E(r)}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dt} = v(r) \quad (5)$$

เมื่อ r คือ ระยะในแนวรัศมี z คือ ระยะในแนวแกน และ $v(r)$ คือ ความเร็วของของไหล รวมสมการที่ 4 และ 5 และหาปริพันธ์จะได้ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า คือ

$$z = \frac{3\pi\mu d_p}{n_p e C_c} \int_{r_1}^r \frac{v(r)}{E(r)} dr \quad (6)$$

เมื่อสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสามารถคำนวณจาก [10]

$$E = \frac{V}{r_o \ln(d / r_o)} \quad (7)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรด r_o คือ รัศมีของดิสชาร์จอิเล็กโทรด และ d คือ รัศมีทรงกระบอกสมมูล (equivalent cylindrical radius) หาได้จาก

$$d = 4s / \pi \text{ สำหรับ } s / c \leq 0.6 \quad (8)$$

เมื่อ s คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับคอลเล็กชันอิเล็กโทรด และ c คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวด สมมติให้ความเร็วของการไหลในแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบมีค่าเท่ากับศูนย์ ($v_r = 0$) และความเร็วของของไหลในแนวแกนมีค่าเท่ากับ $v(r) = v_z$ ดังนั้นจะได้ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า คือ

$$z = \frac{3\pi\mu d_p v \ln(d / r_1)(d^2 - d_i^2)}{2n_p e C_c V} \quad (9)$$

ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาค (particle collection efficiency) ของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต สามารถคำนวณจากปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคก่อนผ่านและหลังผ่านตัวตกตะกอนไฟฟ้าสถิต คือ

$$\eta = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \quad (10)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมทั้งหมด

ของเครื่องตกตะกอน m_{out} คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคหลังผ่านตัวตกตะกอน และ m_{in} คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคก่อนผ่านตัวตกตะกอน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคยังสามารถคำนวณเชิงทฤษฎีจากสมการของ Deutsch คือ [11]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{wL}{vs}\right) \quad (11)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของคอลเล็กชันอิเล็กโทรด และ v คือ ความเร็วของของไหล

2.2 การอัดประจุอนุภาค

การอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค (particle charging) เป็นกลไกหนึ่งที่สำคัญสำหรับการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation) ของอนุภาค วัตถุประสงค์ของการอัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาค คือ เพื่อกำหนดประจุสุทธิที่รู้ค่าแน่นอนให้กับอนุภาค เนื่องจากในการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตของอนุภาคจำเป็นต้องรู้ประจุของอนุภาคแต่ละขนาด โดยประสิทธิภาพในการอัดประจุอนุภาคสูงจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงตามไปด้วย การอัดประจุอนุภาค คือ การเกาะติดของไอออน (ion attachment) บนพื้นที่ผิวของอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในกลุ่มของแก๊สไอออน (gaseous ion) โดยจำนวนของประจุของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค (particle size) ความหนาแน่นของไอออน (ion density) และเวลาในการอัดประจุ (charging time) ปัจจุบันมีกลไกในการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคหลายแบบ ได้แก่ การอัดประจุแบบเปลวไฟ (flame charging) การอัดประจุแบบการปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่ (static electrification) การอัดประจุแบบแพร่กระจาย (diffusion charging) และการอัดประจุแบบสนาม (field charging) [12] อย่างไรก็ตาม การอัดประจุแบบแพร่กระจายและสนามเป็นกลไกที่ได้รับ

ความนิยมและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคสูงกว่ากลไกอื่น [13]

2.2.1 การอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบแพร่กระจาย สำหรับกรณีที่ไม่มีความเร็วไฟฟ้าใด ๆ ปรากฏอนุภาคจะถูกอัดประจุแบบแพร่กระจายด้วยการเคลื่อนที่ไร้ทิศทางบราวเนียน (Brownian random motion) ของไอออนไปยังอนุภาค ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ค่าจำนวนประจุเฉลี่ย n_d ของการอัดประจุไฟฟ้าแบบแพร่กระจายในช่วงเวลา t และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค d_p สามารถหาจาก [12]

$$n_d = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT} \right) \quad (12)$$

เมื่อ $\bar{c}_i$ คือ ความเร็วเชิงความร้อนเฉลี่ยของไอออน (ion mean thermal speed) k คือ ค่าคงที่ของโบลทมานน์ (Boltzmann's constant) (มีค่า 1.380658×10^{-23} J/K) T คือ อุณหภูมิทำงานของระบบ e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่า 1.6×10^{-19} C) N_i คือ ความเข้มข้นของไอออน t คือ เวลาที่ใช้ในการอัดประจุ และ K_E คือ [12]

$$K_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (13)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศหรืออากาศว่าง

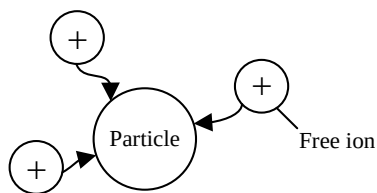


Figure 2 Diffusion charging of particle

2.2.2 การอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบสนามไฟฟ้า เป็นการอัดประจุไฟฟ้าด้วยไอออนแบบยูนิโ

ลาร์ (unipolar ion) ในสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง ค่าจำนวนประจุเฉลี่ยบนอนุภาคที่ได้มาในสนามไฟฟ้า n_f จะสามารถหาได้จาก [12]

$$n_f = \left(1 + \frac{2\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (14)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของวัสดุอนุภาค E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า และ Z_i คือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน [12]

2.3 สลายแบคทีเรียด้วยโคโรนาพลาสมาพลังงานต่ำ

การสลายแบคทีเรียด้วยเทคโนโลยีพลาสมาดิสชาร์จ (plasma discharge) หรือ Low-temperature non-equilibrium (non-thermal) plasma discharge เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการกำจัดแบคทีเรียและไวรัส และยังย่อยสลายโมเลกุลของสารก่อมลพิษ เช่น ซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sox) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs, polycyclic aromatic hydrocarbon) โลหะหนัก (heavy metal) โดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสสลับที่มีความถี่สูงช่วยให้กับข้อจำกัด (ดังรูปที่ 3) เพื่อสร้างไอออนไนซ์ (ionization) พลังงานที่เกิดจากการไอออนไนซ์จะออกซิไดซ์ลดหรือย่อยสลายแบคทีเรีย ไวรัส และโมเลกุลของสารก่อมลพิษด้วยการแยกตัวจากการชนของอิเล็กตรอน (electron-impact dissociation) กระตุ้น (excitation) และไอออนไนซ์ของแก๊สทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) โดยสนามไฟฟ้าแบบกระแสสลับที่มีความถี่สูงนี้จะส่งผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุน (pore) เล็ก ๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการ

การตายของเซลล์ (programmed cell death) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณจาก

$$V_{\text{cell}} = f r_{\text{cell}} E_{\text{cell}} \quad (15)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมที่เยื่อหุ้มเซลล์ f คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์ r_{cell} คือ รัศมีวงนอกสุดของเยื่อหุ้มเซลล์ และ E_{cell} คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์

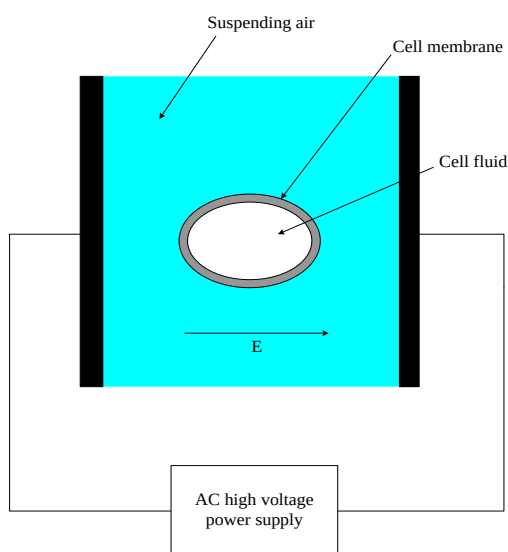


Figure 3 Inactivation of bacteria with low energy corona plasma

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ต้นแบบเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต

เครื่องฟอกอากาศต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้องค์ความรู้และเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยอาศัยการทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic technique) รูปที่ 4 แสดงลักษณะโครงสร้างเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารที่พัฒนาขึ้น โดยได้ปรับปรุงต้นแบบเดิมตามข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อให้ได้

เงื่อนไขของการใช้งานในโรงพยาบาล คริวเรือนสำนักงานทั่วไปที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย สวยงามเหมาะกับการใช้งานในอาคารและห้องพัก มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำและประหยัดพลังงาน ให้ประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อโรค และต้องมีราคาถูกและทนทาน ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารที่พัฒนาขึ้น รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายของเครื่องต้นแบบ ต้นแบบประกอบด้วยแผ่นกรองหยาบ (pre-filter) ตัวสร้างประจุไฟฟ้า (ionizer) ตัวสะสมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (collector) ตัวสลายแบคทีเรียแบบโคโรนาพลาสมาเย็น (non-thermal plasma) พัดลม (fan) แผ่นกรองละเอียด (fine-filter) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage power supply) แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) และหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (electronic control unit) การทำงานของเครื่องต้นแบบจะเริ่มต้นด้วยการดึงการอากาศผ่านเข้ามายังเครื่องด้วยพัดลมดูดอากาศ โดยผ่านเข้ามายังแผ่นกรองหยาบเพื่อกรองฝุ่นหยาบของก่อน แล้วอากาศจะไหลผ่านเข้ามายังตัวอัดประจุอนุภาค การวิจัยนี้จะใช้วิธีการอัดประจุอนุภาคแบบสนามและแพร่กระจาย (diffusion and field charging) ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2 เพื่ออัดประจุให้อนุภาคฝุ่นมีประจุไฟฟ้าบวก สำหรับการวิจัยนี้ตัวอัดประจุอนุภาคจะมีลักษณะเป็นแบบเส้นลวดดิสชาร์จกับแผ่นราบ (discharge wire-to-plate-field) โดยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset voltage) และต้องไม่เกินค่าแรงดันจะสร้างประกายโคโรนา (spark-over corona voltage) การวิจัยนี้ใช้ 6-7 kV สำหรับขั้วของแรงดันไฟฟ้าในการวิจัยนี้ใช้ขั้วบวก (positive) เนื่องจากแรงดันโคโรนาบวกสร้างโอโซนต่ำ (O_3) กว่าแรงดันโคโรนาลบและเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานภายในอาคาร โดย

อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะผ่านเข้าไปยังตัวเก็บรวบรวมอนุภาค เพื่อเก็บรวบรวมอนุภาคฝุ่นบนแผ่นเก็บรวบรวม ตัวเก็บรวบรวมอนุภาคประกอบด้วยแผ่นเก็บรวบรวมอนุภาคขนานซ้อนกันหลายแผ่น โดยจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับแผ่นเก็บรวบรวมและให้อีกแผ่นเป็นกราวด์ จากนั้นอากาศก็จะผ่านไปยังตัวสลายแบคทีเรียแบบโคโรนาพลาสมาพลังงานต่ำ ลักษณะโครงสร้างของตัวสลายแบคทีเรียเป็นแบบเดียวกับตัวเก็บรวบรวมอนุภาค แต่จะมีการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสสลับความถี่สูง (แรงดัน 10 kV และความถี่ 30 kHz) ให้เพื่อสร้างไอออนไนซ์ (ionization) โดยพลังงานที่เกิดจากการไอออนไนซ์จะออกซิไดซ์ลดหรือย่อยสลายแบคทีเรีย ไวรัส และโมเลกุลของสารก่อมลพิษ

ด้วยการแยกตัวจากการชนของอิเล็กตรอนกระตุ้นและไอออนไนซ์ของแก๊สทำให้ผนังเซลล์ของแบคทีเรียและไวรัสถูกทำลาย แล้วอากาศจะผ่านไปยังแผ่นกรองละเอียดก่อนปล่อยอากาศออกจากเครื่องต้นแบบ



Figure 5 Photo of the developed air cleaner

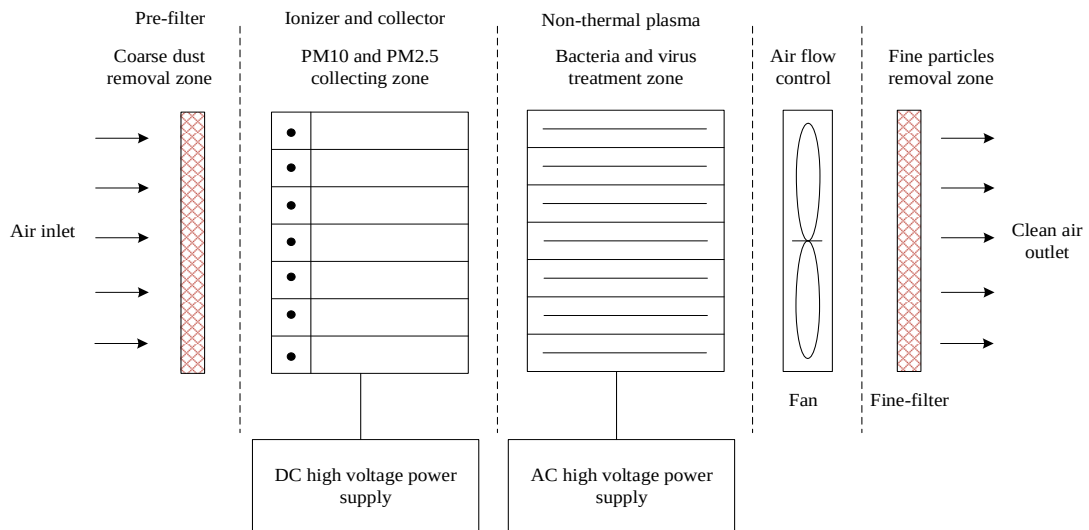


Figure 4 Schematic diagram of the developed air cleaner

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบ

รูปที่ 6a แสดงแผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบ การทดสอบการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบนี้ ทดสอบที่ความเข้มข้นละอองลอย 2 ระดับ คือ ที่ความเข้มข้น

สูง ($20-40 \text{ mg/m}^3$) ใช้เครื่องกำเนิดหมอกควบแน่น (condensation fog generator) ของบริษัท TOPAS โมเดล CFG290 ในการสร้างอนุภาคหมอกควันในการทดสอบ และที่ความเข้มข้นต่ำกว่า $100 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ใช้เครื่องกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (atomizer aerosol generator) ของบริษัท TSI โมเดล

3076 สร้างอนุภาค di-ethyl-hexyl-sebacat (DEHS) ในการทดสอบ รูปที่ 7 แสดงกราฟการกระจายขนาดอนุภาค DEHS ที่วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (scanning mobility particle sizer) จากรูปอนุภาค DEHS มีการกระจายขนาดในช่วงขนาดเล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$ โดยที่ความเข้มข้นสูงจะเป็น การทดสอบเพื่อหาภาระโหลดของเครื่องต้นแบบ ส่วนที่ความเข้มข้นต่ำเป็นการทดสอบการใช้งานทั่วไปที่มีค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองลอยภายในห้องไม่เกิน $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ การวิจัยนี้ได้ทดสอบเครื่องต้นแบบภายในห้องจำลองขนาดมิติ $6\times 6\times 3$ เมตร สร้างละอองลอยภายในห้อง โดยภายในห้องมีการวัดความเข้มข้นละอองลอยที่ความสูงประมาณ 1.2 เมตร ด้วยเครื่องวัดฝุ่น Dust Trak DRX Aerosol Monitor (Model 8533, TSI Incorporated) ที่อัตราการไหลการเก็บตัวอย่าง $1.0\ \text{L}/\text{min}$ โดยวัดฝุ่น $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{4.0}$ และ PM_{10} ทุก 1 นาที เป็นเวลา 120 นาที โดยไม่มีการเปิดเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบ เพื่อวัดความเข้มข้นละอองลอย $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{4.0}$ และ PM_{10} ขณะที่ยังไม่มีการบำบัดอากาศ จากนั้นจึงเริ่มทดสอบโดยพ่นอนุภาคตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่าเดิม โดยเปิดเครื่องบำบัดต้นแบบและวัดความเข้มข้นละอองลอย $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{4.0}$ และ PM_{10} ทุก 1 นาที เป็นเวลา 120 นาที และนำข้อมูลการวัดความเข้มข้นละอองลอยทั้งเชิงมวลและจำนวนที่ได้จากการวัดขณะที่เครื่องต้นแบบปิดและเปิดหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดหรือการกำจัดอนุภาคของเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบกับเวลาการบำบัด และทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 การทดลอง รูปที่ 6b แสดงรูปถ่ายขณะทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบตามมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 และ JIS Z 2801: 2000 ประสิทธิภาพในการบำบัดอากาศและการฆ่าเชื้อโรคในอากาศ

ของเครื่องทดสอบกำหนดให้ต้องไม่ต่ำกว่า 99 % จึงจะยอมรับตามมาตรฐานนี้ โดยสมรรถนะของเครื่องฟอกอากาศสามารถประเมินด้วยค่า CADR (clean air delivery rate) ตามมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 โดยค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศสามารถคำนวณจาก

$$CADR = V(k_t - k_n) \quad (16)$$

เมื่อ V คือ ขนาดของห้องทดสอบ (ft^3) k_t คือ การสลายตัวของฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศ และ k_n คือ การสลายตัวของฝุ่นตามธรรมชาติ (natural decay) โดยค่าการสลายตัวของฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศและการสลายตัวของฝุ่นตามธรรมชาติสามารถคำนวณจาก

$$k = \frac{\left(\sum_1^n t_i \ln C_i\right) - \frac{\left(\sum_1^n t_i\right)\left(\sum_1^n \ln C_i\right)}{n}}{\sum_1^n t_i^2 - \frac{\left(\sum_1^n t_i\right)^2}{n}} \quad (17)$$

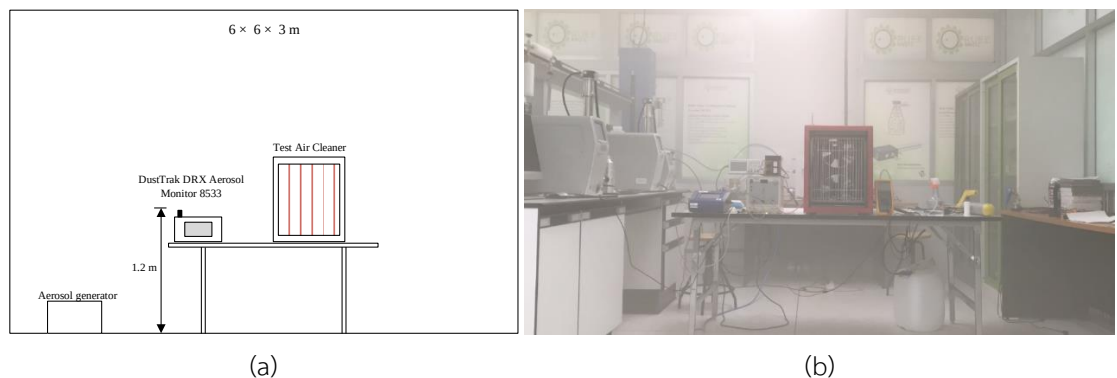
เมื่อ C_t คือ ความเข้มข้นของฝุ่นที่เวลา t และ n คือ จำนวนของจุดข้อมูลที่ใช้ในการถดถอย (regression) ซึ่งค่า k คือ ค่าคงที่การสลายตัว (decay constant) มีหน่วยเป็น min^{-1} และ t คือ เวลา มีหน่วยเป็นนาที

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ

การทดสอบการกำจัดไปโอเอโรซอลทดสอบกับแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และแกรมลบ (*E. coli*) ซึ่งการวิจัยนี้ใช้เป็นตัวแทนของแบคทีเรียก่อโรกระบบทางเดินหายใจ เช่น เชื้อก่อโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ เชื้อก่อโรคปอดบวม การทดสอบนี้ทดสอบในห้องจำลองขนาดมิติ $3\times 3\times 3$ เมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) มีระบบไหลเวียนอากาศและมีการกรองอากาศก่อนเข้าห้องทดสอบด้วย HEPA filter สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องในช่วง $20\text{--}30\ ^\circ\text{C}$ สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องในช่วง $50\text{--}70\ %\text{RH}$

Table 1 Specification of the developed air cleaner

Characteristic	Specification
Technique	Electrostatic
Number of collector	2 stages
Particle size	0.01-10 μm (PM10, PM4.0, PM2.5 and PM1.0)
Particle collection efficiency	99 % at cleaning time of about 70 min
Bioaerosol removal	99 % at cleaning time of about 70 min
Room size	100 m^3
Flow velocity	0.5-1.5 CFM (14.15-42.45 L/min)
CADR (clean air delivery rate)	62.40-194.32
Voltage	220 VAC 50 Hz
Power	100 W
size	40x40x50 cm

**Figure 6** Experimental setup for evaluating the particle collection efficiency of the developed air cleaner (a) Schematic diagram and (b) Photo**Table 2** Ranges and values of variables investigated

Variables	Ranges
Particle type	Di-ethyl-hexyl-sebacat
Particle mass concentration	0.1-50 mg/m^3
Particle size	PM0.1, PM2.5, PM4.0 and PM10
Operating relative humidity	50-70 % RH
Operating pressure	1 atm
Operating temperature	25 $^{\circ}\text{C}$

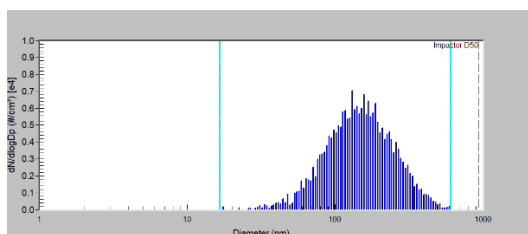


Figure 7 Particle size distribution of DEHS

มีระบบส่องสว่างภายในห้องในช่วง 1,000-1,700 Lux ควบคุมความดันภายในห้องเป็นแบบบวก (positive pressure) มีระบบแสดงผลอุณหภูมิ ความชื้นและความดัน สามารถล้างทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคภายในได้ง่าย เพื่อป้องกันการปนเปื้อนและแพร่กระจายเชื้อสู่ภายนอก รูปที่ 8 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพกำจัดไบโอเอโรซอลของเครื่องต้นแบบสำหรับการเตรียมไบโอเอโรซอลในการทดสอบนี้ซึ่งอ้างอิงวิธีการของ Hoenig และคณะ [6] โดยละอองลอย *S. aureus* และ *E. coli* ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 3-5 μm สร้างโดยเครื่องฉีดพ่นละอองลอย (atomizer aerosol generator) ด้วยน้ำกลั่นที่มีสารละลาย *S. aureus* และ *E. coli* ความเข้มข้น 10^8 CFU/mL ที่อัตราการไหล 70-300 L/hr การไหลเชิงมวลสูงสุด 2.5 g/hr [6] โดยวัดเชื้อทุก 1 นาที เป็นเวลา 120 นาที ด้วยเครื่องตรวจนับการปนเปื้อนอนุภาคเชื้อ BioTrak ของบริษัท TSI โมเดล 9510-BD โดยไม่มีการเปิดเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบเพื่อตรวจหาเชื้อขณะที่ยังไม่มีการบำบัดอากาศ แล้วจึงเริ่มทดลองใหม่โดยพ่นเชื้อ โดยแต่ละครั้งจะเปิดเครื่องต้นแบบและวัดเชื้อทุก 1 นาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำข้อมูลการตรวจวัดปริมาณเชื้อที่ได้จากการวัดขณะที่เครื่องต้นแบบปิดและเปิดหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดไบโอเอโรซอลของเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบกับเวลาการบำบัด และทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 การทดลอง



Figure 8 Experimental setup for evaluating the removal of bioaerosol of the developed air cleaner

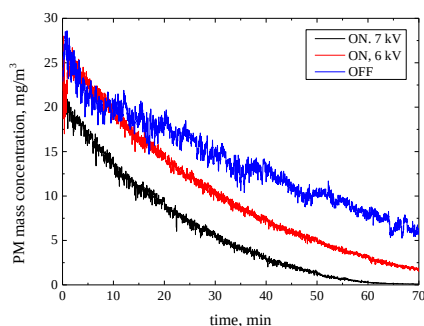


Figure 9 Variation of PM₁₀, PM_{4.0}, PM_{2.5} and PM_{1.0} mass concentration and testing time at difference corona voltages

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของแรงดันโคโรนาที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนภายใน

เครื่องต้นแบบ 6-7 kV รูปที่ 9 แสดงการลดลงของปริมาณฝุ่นรวมภายในห้องทดสอบในขณะที่ปิดเครื่องต้นแบบและที่แรงดันโคโรนา 6 และ 7 kV ในช่วงเวลา 1-70 นาที กรณีที่ปิดเครื่องปริมาณฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ 22.9 mg/m^3 และเมื่อเวลาผ่านไป 70 นาที ฝุ่นรวมลดลงเหลือ 5.95 mg/m^3 เนื่องจากการตกตะกอนของฝุ่นโดยธรรมชาติจากกลไกการแพร่กระจายของอนุภาค (particle diffusion) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu\text{m}$ และการแพร่กระจายกับการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) ของอนุภาคสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.1 \mu\text{m}$ ที่แรงดันไฟฟ้า 6 kV ปริมาณฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ 22.5 mg/m^3 และเมื่อเวลาผ่านไป 70 นาที ฝุ่นรวมลดลงเหลือ $143 \mu\text{g/m}^3$ และที่แรงดันไฟฟ้า 7 kV ปริมาณฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ 21.6 mg/m^3 และเมื่อเวลาผ่านไป 70 นาที ฝุ่นรวมลดลงเหลือ $75 \mu\text{g/m}^3$ โดยค่าการลดลงของฝุ่นรวมจะแปรผันตรงกับแรงดันโคโรนาและระยะเวลาการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นจะหาได้จากสัดส่วนระหว่างมวลของอนุภาคตัวอย่างในขณะที่ปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลาต่าง ๆ

รูปที่ 10 และ 11 แสดงประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องต้นแบบที่รวมและไม่รวมผลการแพร่กระจายและการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคโรนาและเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงกับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนและการอัดประจุอนุภาค ส่วนเวลาการทดสอบที่นานขึ้นจะช่วยทำให้อนุภาคไหลเวียนเข้าไปในเครื่องต้นแบบได้นานขึ้น จึงช่วยในการตกตะกอนได้ดีขึ้น กรณีที่ไม่รวมผลการแพร่กระจายและการตกตะกอน โดยแรงโน้มถ่วงให้ประสิทธิภาพการตกตะกอน

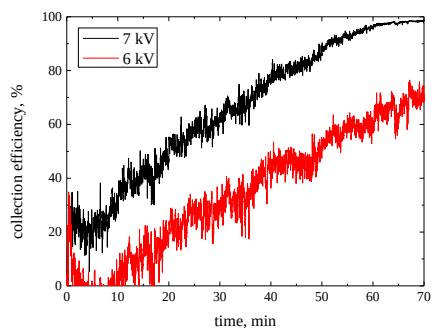


Figure 10 Collection efficiency without diffusion and gravitational settling effects

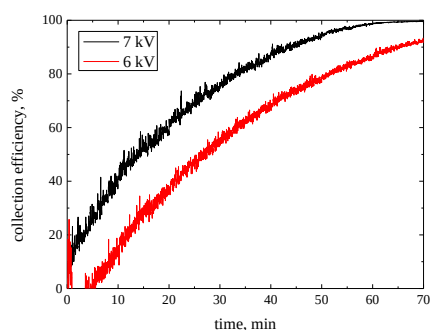
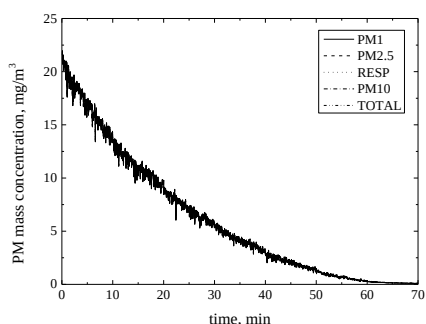


Figure 11 Collection efficiency with diffusion and gravitational settling effects

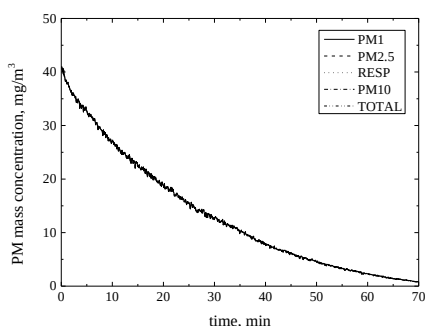
อนุภาคฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศสูงสุด คือ 98.5 และ 74.9 % ที่ 70 นาที สำหรับแรงดันโคโรนา 7 และ 6 kV ตามลำดับ และกรณีที่รวมผลการแพร่กระจายและการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงจะให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศสูงสุด คือ 99.6 และ 93.7 % ที่ 70 นาที สำหรับแรงดันโคโรนา 7 และ 6 kV ตามลำดับ ซึ่งสมการที่ 16 และ 17 จะได้ค่า CADR ของเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบ คือ 194.32 และ 62.40 ที่ 70 นาทีสำหรับแรงดันโคโรนา 7 และ 6 kV ตามลำดับ

การศึกษานี้ยังได้ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบจะทดสอบกับฝุ่น

PM10, PM4.0, PM2.5 และ PM1.0 ที่มีค่าความเข้มข้นสูง 2 ระดับ คือ 20 และ 40 mg/m^3 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของฝุ่น รูปที่ 12a และ 12b แสดงการลดลงของปริมาณฝุ่น PM10, PM4.0, PM2.5 และ PM1.0 ภายในห้องทดสอบในช่วงเวลา 1-70 นาที ที่ความเข้มข้น 20 และ 40 mg/m^3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณฝุ่น PM10, PM4.0, PM2.5 และ PM1.0 ภายในห้องทดสอบลดลงเมื่อเปิดเครื่องบำบัดเป็นเวลาประมาณ 70 นาที ปริมาณฝุ่น PM10, PM4.0, PM2.5 และ PM1.0 ที่ความเข้มข้น 20 และ 40 mg/m^3 ลดลงเหลือ 15 และ 594 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ



(a) 20 mg/m^3



(b) 40 mg/m^3

Figure 12 Variation of PM10, PM4.0, PM2.5 and PM1.0 mass concentration and testing time at corona voltage of 7 kV

การศึกษานี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคมีชีวิต (viable particle) หรือและไบโอเอโรซอลของเครื่องต้นแบบด้วยการวัดเชื้อในอากาศแบบเวลาจริงด้วยเครื่อง BioTrak กรณีที่ปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบ ผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถลดจำนวนและไบโอเอโรซอลลงถึง 87.42 % โดยความเข้มข้นจำนวนของไบโอเอโรซอลลดลงเฉลี่ยจาก 10,848/ m^3 เหลือ 1,364/ m^3 ในเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3 การลดลงของและไบโอเอโรซอลเกิดจากพลังงานการไอออนไนซ์ภายในตัวตกตะกอนของเครื่องต้นแบบทำให้เกิดการออกซิไดซ์ลดหรือย่อยสลายแบคทีเรีย ไวรัสและโมเลกุลของสารก่อมลพิษด้วยการแยกตัวจากการชนของอิเล็กตรอน (electron-impact dissociation) กระตุ้น (excitation) และไอออนไนซ์ของแก๊ส [6,7] ผลการทดสอบแสดงว่าเครื่องต้นแบบสามารถลดปริมาณและไบโอเอโรซอลที่แขวนลอยอยู่ในอากาศลงและมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นเครื่องฟอกอากาศสำหรับกำจัดเชื้อภายในอาคาร

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพต้นแบบเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตภายในอาคาร เครื่องต้นแบบที่ได้จากการศึกษานี้ประกอบด้วยตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง และระบบควบคุมการไหลของอากาศที่มีขนาดมิติ 40×40×50 cm เครื่องต้นแบบทำงานด้วยการใช้พัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังของตัวเก็บรวบรวมอนุภาคเพื่อดึงอากาศจากด้านหน้าผ่านเข้าตัวอัดประจุอนุภาคและตัวเก็บรวบรวมอนุภาคก่อนปล่อยออกสู่อาคาร โดยตัวเก็บรวบรวมอนุภาคสามารถถอดประกอบเพื่อทำความสะอาดง่าย ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการตก

ตกตะกอนอนุภาคของเครื่องต้นแบบ พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคของเครื่องฟอกอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคโรนาและเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น กรณีที่ไม่รวมผลการแพร่กระจายและการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงจะให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกอากาศสูงสุด คือ 98.5 และ 74.9 % ที่ 70 นาที สำหรับแรงดันโคโรนา 7 และ 6 kV ตามลำดับ และกรณีที่รวมผลการแพร่กระจายและการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงจะให้

ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกอากาศสูงสุด คือ 99.6 และ 93.7 % ที่ 70 นาทีสำหรับแรงดันโคโรนา 7 และ 6 kV ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASNI/AHAM AC-1-2002 และ JIS Z 2801: 2000 ยอมรับที่ 99 % และได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไบโอเอโรซอลของเครื่องต้นแบบ พบว่าสามารถลดจำนวนไบโอเอโรซอลลงถึง 87.42 % โดยจำนวนไบโอเอโรซอลลดลงจาก 10,848/m³ เหลือ 1,364/m³ ในเวลา 1 ชั่วโมง

Table 3 The removal of bioaerosol of the developed air cleaner at testing time of 60 min

Test no.	Bioaerosol number concentrations (particles/m ³)		Efficiency (%)
	Air cleaner OFF	Air cleaner ON	
1	10,408	1,296	87.54
2	11,170	1,430	87.19
3	10,965	1,367	87.53
Average	10,848	1,364	87.42

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม จากฝ่ายบริหารคลัสเตอร์และโปรแกรมวิจัย ด้านบริหารจัดการการวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2560 ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรมวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ในการทดสอบครั้งนี้

7. References

[1] US EPA, 1998, PM_{2.5} General Information, Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Analysis Group,

Research Triangle Park, NC.

- [2] Intra, P., 2019, Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology, Chula Press, Bangkok. (in Thai)
- [3] Masuda, S., Hosokawa, S., Tu, X.L., Tsutsumi, M., Ohtani, T., Tsukahara, T. and Matsuda, N., 1993, The performance of an integrated air purifier for control of aerosol, microbial, and odor, IEEE Trans. Ind. Appl. 29: 774-780.
- [4] Okubo, M., Yamamoto, T., Kuroki, T. and Fukumoto, H., 2001, Electric air cleaner composed of nonthermal plasma reactor and electrostatic precipitator, IEEE Trans. Ind. Appl. 37: 1505-1511.

- [5] Park, C.W. and Hwang, J., 2013, Susceptibility constants of airborne bacteria to dielectric barrier discharge for antibacterial performance evaluation, *J. Hazard. Mater.* 244-245: 421-428.
- [6] Hoenig, S.A., Sill, G.T., Kelley, L.M. and Garvey, K.J., 2012, Destruction of bacteria and toxic organic chemicals by a corona discharge, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 30: 277-278.
- [7] Intra, P., Yawootti, A., Asanavijit, V. and Vinitketkumnien, U., 2012, Development of an indoor air cleaner for a non toxic room by electrostatic technique, *KMUTT Res. Develop. J.* 35: 361-382.
- [8] Tintachart, K., Norkaew, W., Yawootti, A. and Intra, P., 2017, Modification and field testing of an indoor electrostatic air purifier, *J. KMUTNB* 27: 31-46.
- [9] Parker, K.R., 1997, *Applied Electrostatic Precipitation*, Blackie Academic & Professional, New York, NY.
- [10] Chang, J., Kelly, A.J. and Crowley, J.M., 1995, *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- [11] White, H.J., 1963, *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison- Wesley, Reading, MA.
- [12] Hinds, W.C., 1999, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [13] Intra, P. and Tippayawong, N., 2009, Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review, *J. Electrostat.* 67: 605-615.