



# การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดหมุนได้สำหรับกำจัดฝุ่นละอองจากอากาศภายในอาคาร

## Feasibility Study in Develop the Rotating Electrodes, Electrostatic Air Cleaner for Removal Particulate Matter from Indoor Air

วิสูตร อาสนวิจิตร<sup>1,\*</sup>, กรพจน์ มะโนใจ<sup>2</sup>, พานิช อินต๊ะ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50220

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

Visut Asanavijit<sup>1,\*</sup>, Kornpod Manojai<sup>2</sup>, Panich Intra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chaing Mai 50300

Received 29 July 2021; Received in revised 25 February 2022; Accepted 30 March 2022

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้คือเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดหมุนได้สำหรับกำจัดฝุ่นละอองจากอากาศภายในอาคาร เครื่องต้นแบบประกอบด้วยตัวตกตะกอนอนุภาคไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดหมุน แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงและระบบควบคุมการไหลของอากาศ ในระบบนี้พัดลมจะดึงอากาศตัวอย่างเข้าสู่ระบบผ่านตัวตกตะกอนอนุภาคไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดหมุนสำหรับการอัดประจุและการตกตะกอนอนุภาคเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศให้สะอาด การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบกับเครื่องกำเนิดอนุภาคละอองลอยภายในห้องทดสอบขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 2 x 2 x 2 เมตร โดยการเก็บตัวอย่างมวลละอองลอยด้วยวิธีกราวิเมตริกในช่วงเวลาที่ทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดของเครื่องต้นแบบจากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดละอองลอยของต้นแบบเครื่องฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคโรนาและเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น โดยต้นแบบเครื่องฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคได้ถึง 91.20 เปอร์เซ็นต์ในเวลาที่ทดสอบ 60 นาที และพบว่าคิบัทำความสะอาดจานหมุนทำความสะอาดตัวเองสามารถนำไปใช้งานร่วมกับในระบบบำบัดอากาศด้วยการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้ดี ซึ่งสามารถลดการบำรุง

รักษาใช้งานของแผ่นตกตะกอนได้

**คำสำคัญ:** อนุภาค; ฝุ่น; อิเล็กโทรดหมุน; ไฟฟ้าสถิต; เครื่องฟอกอากาศ

## Abstract

This paper aims to conduct a feasibility study to develop the rotating electrodes and electrostatic air cleaner to remove particulate matter from indoor air. An electrostatic air cleaner prototype consists of a rotating electrostatic particle collector, a DC high voltage power supply, and an airflow control system. In this system, a fan draws a sample air into the system through the rotating electrostatic particle collector to charge and collect the particulate matter to improve the clean air quality. In this study, the collection efficiency of particulate matter of the prototype was tested by the aerosol particle generator inside the 2 x 2 x 2 m test chamber. The gravimetric air sampling method was used for sampling the mass of particulate matter inside the test chamber for the testing time of 15, 30, 45, and 60 min. It was found from the experiment that high corona voltage and long testing time increased the collection efficiency of particulate matter of the prototype. It was shown that the prototype of the developed air cleaner could effectively remove particulate matter up to 91.20% at the testing time of 60 minutes. It was also found that the rotating electrodes and self-cleaning system can be used with electrostatic precipitation air cleaner systems, which can reduce the operational maintenance of the collection electrode plates.

**Keywords:** Particle; Dust; Rotating Electrode; Electrostatic; Air cleaner

## 1. บทนำ

จากสถานการณ์ไวรัสโควิด 19 ตัวเลขผู้ติดเชื้อไวรัสยังสูงขึ้นตั้งแต่ปลายปี 2019 จนถึง ต้นปี 2021 รวมแล้วกว่า 100 ล้านรายทั่วโลก และมีผู้เสียชีวิตจากภาวะแทรกซ้อนระบบทางเดินหายใจกว่า 2 ล้านคน [1] โดยพบว่าการไอจาม ตะโกน หรือร้องเพลง ยังก่อให้เกิดละอองฝอยขนาดเล็กที่อาจปะปนด้วยไวรัสกว่า 40,000 หยด (เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 ไมครอน) ซึ่งละอองขนาดนี้สามารถลอยได้ไกลถึง 4 เมตร อยู่ในอากาศได้นานกว่า 45 นาที การอยู่ร่วมกันในสถานที่ปิด เช่น บ้าน ห้องประชุม ห้องสมุด และร้าน

อาหาร แม้รักษาระยะห่างแต่ไวรัสก็อาจลอยไปถึงได้ ระบบวิศวกรรมฟอกอากาศแบบห้องแรงดันต่างๆ ที่ใช้ในทางการแพทย์ และเครื่องฟอกอากาศประสิทธิภาพสูง จึงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถช่วยลดการแพร่กระจายในรูปแบบนี้ได้ ดังนั้นเครื่องฟอกอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Cleaner) จึงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับสถานที่ทำงาน [1-7] โรงพยาบาลโดยเฉพาะห้องปลอดเชื้อ และที่พักอาศัย โดยเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารจะช่วยในการกำจัดปัญหาเรื่องฝุ่น PM2.5 และเชื้อโรคได้ โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย ควันบุหรี่ ฝุ่นและกลิ่นต่างๆ สามารถกำจัดอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็ก 0.01

ไมครอน ที่ปะปนอยู่ในอากาศ [8] ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของโรคทางเดินหายใจ เช่น โรคภูมิแพ้ โรคหอบหืด โรคปอดอักเสบ จากงานวิจัยของ Leiva G et al [6] และคณะได้รายงานว่าอันตรายของ PM2.5 กับโรคหลอดเลือดสมอง ในรายงานพบว่าทุกๆ ความเข้มข้นของ PM2.5 ที่เพิ่มขึ้น 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเสี่ยงของการเข้ารับการรักษาฉุกเฉินเนื่องจากสาเหตุของหลอดเลือดสมองเพิ่มขึ้น 1.29 เปอร์เซ็นต์ เป็นอันตรายต่อชีวิตได้

เครื่องฟอกอากาศภายในอาคารในปัจจุบันมีทั้งแบบที่เหมาะสมกับภายในอาคารทั่วไปและอุตสาหกรรม [9-10] มีลักษณะโครงสร้าง เทคนิค วิธีการทำงาน และราคาแตกต่างกันไป ซึ่งเครื่องฟอกอากาศที่มีใช้งานในประเทศส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคในการกรองฝุ่นด้วยแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง (High-Efficiency Particulate Air) หรือ HEPA Filter ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นที่สูงถึง 99.97 เปอร์เซ็นต์ ที่อนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน และยังมีแผ่นกรองระดับ HyperHEPA [1] ที่ผลิตจากใยแก้วมีความละเอียดถึง 0.003 ไมครอน นำมาใช้งานกรองฝุ่นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองเหล่านี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่อปีที่สูงโดยเฉลี่ย 3,000 – 6,000 บาทต่อปี สำหรับการเปลี่ยนแผ่นกรองปีละ 1–2 ครั้ง อีกทั้งแผ่นกรองนี้ยังทำให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อ ซึ่งเสี่ยงต่อการสัมผัสเชื้อของผู้ทำความสะอาดได้ ดังนั้นเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Air Cleaner) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากให้ประสิทธิภาพกรองอนุภาคสูงเทียบเท่าแผ่นกรองแบบ HEPA

โดยงานวิจัยต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตทั้งภาคทฤษฎีและการทดลองในปัจจุบันมีอยู่ค่อนข้างแพร่หลาย ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องยาวนานจากงานวิจัย [5-11] โดยพบว่าสามารถกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99 ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขนาดอนุภาคต่ำกว่า 1 ไมครอน และในประเทศไทยได้มีการ

ศึกษาและวิจัยอย่างต่อเนื่องโดย Intra et al. [3] ได้ทำการออกแบบ พัฒนา และทดสอบสมรรถนะต้นแบบเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยการผสมผสานเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตและการกรอง ในงานวิจัยได้รายงานว่าคุณสมบัติการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที และ Tintachart et al. [12] ได้ทำการปรับปรุงต้นแบบเครื่องฟอกอากาศของ Intra et al. [3] ในงานวิจัยได้รายงานว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 96.4 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 6.6 นาที ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิต จะต้องมีการลดล้างทำความสะอาดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นมีแผ่นเพลตคอลเลกชันอิเล็กโทรด (Collection Electrode) เพื่อจะทำให้ระบบการทำงานรักษาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงจึงต้องมีการการลดล้างทำความสะอาดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตตามรอบการทำงานที่ได้กำหนดสอดคล้องกับผลวิจัยของ Kalasee et al. [5] โดยในงานวิจัยได้มีข้อเสนอแนะว่าควรมีระบบในการกำจัดฝุ่นภายในเครื่องเพื่อช่วยในการลดปัญหาดังกล่าวเพื่อแก้ปัญหาเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารได้กล่าวมาในช่วงต้น จากรายงานผลวิจัยของ Okubo et al. [13] ได้ทำการทดสอบเครื่องฟอกอากาศที่นำเอาแบบพลาสมาและตกตะกอนไฟฟ้าสถิตมาใช้งานร่วมกัน พบว่าเครื่องฟอกอากาศสามารถกำจัดอนุภาคและกลิ่นในอากาศได้โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคที่ทดสอบขนาด 0.3 ไมโครเมตร และ 0.6 ไมโครเมตร ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในรายงานได้กล่าวถึงการสะสมตัวของแผ่นเพลตที่มีการตกตะกอนสะสมของอนุภาคส่งผลทำให้อัตราการไหลของอากาศลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการกรองของเครื่องฟอกอากาศลดลง สอดคล้องกับผลวิจัยของ Joon Kim et al. [14] ที่ได้ทำการประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิตที่ใช้ร่วมกับแผ่นกรองคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล พบว่าได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องฟอกอากาศเชิง

พาณิชย์ที่มีแผ่นกรอง HEPA และเมื่อด่านกัมมันต์ จะให้ค่าอัตราการปล่อยอากาศสะอาด CADR ที่สูงกว่า โดยพบว่าเมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะมีผลของอัตราการไหลของอากาศที่ลดลงจากการสะสมของอนุภาคที่แผ่นเพลต จึงต้องมีการทำความสะอาด เพื่อให้มีประสิทธิภาพการกรองอากาศที่สูงดั้งเดิม และจากรายงานผลวิจัยของ Afshari et al. [15] ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารด้วยเทคนิคตกตะกอนไฟฟ้าสถิตทั้งแบบพกพาและระบบท่อในอาคารที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศยุโรปและในประเทศแถบเอเชีย ประกอบด้วย 8 มาตรฐาน มีวิธีการตกตะกอนของอนุภาค 2 วิธี คือแบบ Pull-down และแบบ Single-pass โดยมีการทดสอบช่วงขนาดอนุภาค 0.1-11.5 ไมโครเมตร พบว่าปัจจัยการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีอิทธิพลต่อสภาพการใช้งาน ประกอบด้วยชนิดและข้อของโคโรนา ความหนาแน่นกระแส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอิเล็กโทรด ความเข้มข้นของไอออน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ รูปทรงโดยรวมของเครื่องฟอกอากาศ และแผ่นเพลตที่มีการตกตะกอนสะสมของอนุภาคส่งผลทำให้อัตราการไหลของอากาศลดลง และส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฟอกอากาศจึงลดลงตาม ซึ่งจากผลของการศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยการสะสมของอนุภาคที่แผ่นเพลตต้องได้มีการศึกษาและแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจะมีการออกแบบจะยึดแผ่นเพลตอิเล็กโทรดไว้อยู่กับที่ไม่ให้มีการเคลื่อนไหว ซึ่งยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการทำแผ่นเพลตอิเล็กโทรดให้มีการหมุนได้เพื่อช่วยในการทำให้อนุภาคที่สะสมบนแผ่นเพลตหลุดตกออกมา ซึ่งจะลดการสะสมของอนุภาคในแผ่นเพลตลงได้ ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องฟอกอากาศหลักการใช้ไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดหมุนได้สำหรับกำจัดฝุ่นละอองจากอากาศภายในอาคาร เพื่อแก้ไขปัญหาการใช้แผ่นกรองและลดการสัมผัสเชื้อโรคจากการเปลี่ยนแผ่นกรอง และเพื่อช่วยในการลดการสะสมของอนุภาคที่แผ่นเพลต

ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฟอกอากาศลงได้ โดยจะมีการทดสอบศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต ทดสอบการตกตะกอนของอนุภาค และทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศ ซึ่งผลทดสอบที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดอนุภาคฝุ่น และสามารถขยายผลไปใช้งานของระบบบำบัดอากาศภายในอาคารสำนักงานและห้องปลอดเชื้อที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้ทั่วไปต่อไปได้

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การออกแบบเครื่องฟอกอากาศต้นแบบ

#### 2.1.1 เป้าหมายในการออกแบบเครื่องฟอกอากาศ

กระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการแยกอนุภาคออกจากอากาศโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตภายใต้สนามไฟฟ้า (Figure 1) สนามไฟฟ้าจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด และคอลเลกชันอิเล็กโทรด เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรดโดยใช้คอลเลกชันอิเล็กโทรดเป็นกราวด์จะทำให้เกิดโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) ที่ดิสชาร์จอิเล็กโทรด ไอออน (Ion) และอิเล็กตรอน (Electron) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณที่เกิดโคโรนาดิสชาร์จและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับคอลเลกชันอิเล็กโทรด เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคแขวนลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างจะทำให้เกิดการอัดประจุอนุภาค คือการเกาะติดของไอออน (Ion Attachment) บนพื้นที่ผิวของอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในกลุ่มของแก๊สไอออน (Gaseous Ions) โดยจำนวนของประจุของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค (Particle Size) ความหนาแน่นของไอออน (Ion Density) และเวลาในการอัดประจุ (Charging time) และส่งผลทำให้อนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่วิถีโค้งด้วยแรงไฟฟ้าสถิตไปตกบนคอลเลกชันอิเล็กโทรดและถูกสะสมตัวอยู่บนคอล

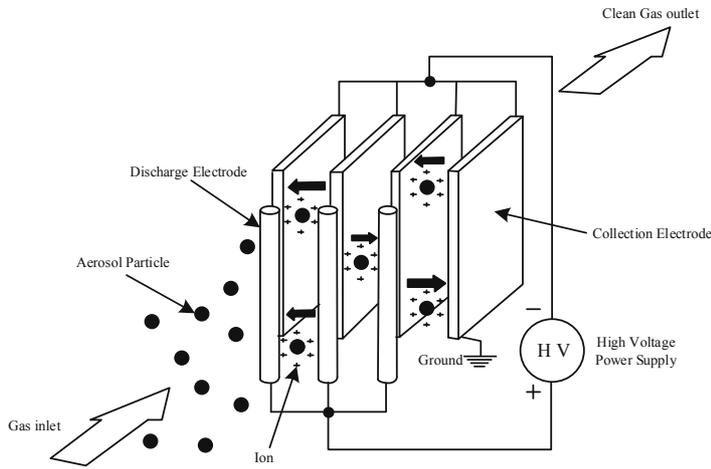


Figure 1 Principle of electrostatic precipitation of particle [16].

เลขชั้นอิเล็กโทรด จากกฎของนิวตัน (Newton’s law) ของอนุภาคจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ [17-18]

เมื่อ  $m_p$  คือมวลของอนุภาค(กรัม)  $n_p$  คือจำนวนประจุของอนุภาค  $e$  คือค่าประจุของอิเล็กตรอน(คูลอมบ์)  $E$  คือความเข้มสนามไฟฟ้า(โวลต์ต่อเมตร)  $\mu$  คือความหนืด

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

ของของไหล (มีค่าเท่ากับ  $1.846 \times 10^{-5}$  ตารางเมตรต่อนาที่ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)  $d_p$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค(เมตร)  $w$  คือความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังคอลเลขชั้นอิเล็กโทรด(เมตรต่อนาที่)  $C_c$  คือตัวประกอบการปรับแก้สลิปคันทันนิ่งแฮม  $g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาที

กำลังสอง)  $\rho_p$  คือความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.1614 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ  $t$  คือเวลาในการเคลื่อนที่(นาที่) การเคลื่อนที่ที่อนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าคือ เมื่อ  $r$  คือระยะในแนวรัศมี(เมตร)  $z$  คือระยะในแนว

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

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

แกน(เมตร) และ  $v(r)$  คือความเร็วของของไหล(เมตร ต่อวินาที) ทำการรวมสมการที่ 4 และ 5 และทำการหาปริพันธ์จะได้ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนาม

ไฟฟ้าคือ

เมื่อสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วเล็กโทรดสามารถคำนวณได้

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

จาก [19] ดังนี้

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

เมื่อ  $V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับดิสชาร์จจิลเล็กโทรด(โวลต์)  $r_o$  คือรัศมีของดิสชาร์จจิลเล็กโทรด(เมตร)

และ  $d$  คือรัศมีทรงกระบอกสมมูล(เมตร) หาได้จากสมการ

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

เมื่อ  $s$  คือระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับคอลเล็กชันเล็กโทรด(เมตร) และ  $c$  คือระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวด(เมตร) สมมุติให้ความเร็วของการไหลในแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $v_r = 0$ )

และความเร็วของของไหลในแนวแกนมีค่าเท่ากับ  $v(r) = v_z$  ดังนั้นจะได้ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าดังนี้

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

จากสมการข้างต้นที่อธิบายถึงกระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งนำมาใช้สำหรับเป้าหมายในการออกแบบของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นละอองแบบแผ่นอิเล็กโทรดหมุนได้ ใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบพัลส์ 10 กิโลโวลต์ ถึง 25 กิโลโวลต์ ความถี่ใช้งานที่ 10 กิโลเฮิร์ต ถึง 30 กิโลเฮิร์ต ใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตขนาด 12 โวลต์ อุปกรณ์ที่ใช้สร้างสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้จึงได้มีการกำหนดรายละเอียด (Table 1) ต้นแบบเครื่องฟอกอากาศจะประกอบด้วยอุปกรณ์

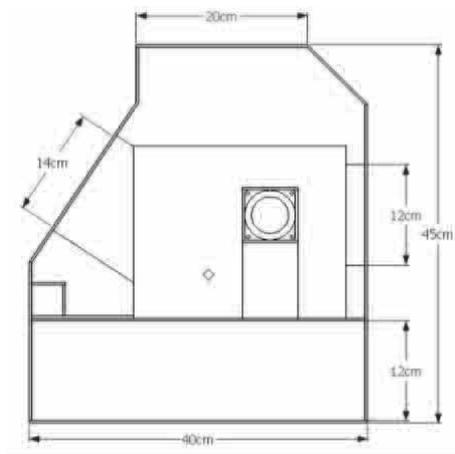
ต่างๆ (Figure 2a) โครงสร้างภายนอกมีขนาดกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 54 เซนติเมตร สูง 45 เซนติเมตร ทำจากแผ่นอะคริลิกสีใสหนา 3 มิลลิเมตร ด้านหน้ามีช่องทางเข้าอากาศขนาดกว้าง 12 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ภายในมีตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Figure 2b) ซึ่งมีดิสชาร์จใช้งานแบบเส้นลวดตรงขนาด 0.38 มิลลิเมตร จำนวน 14 เส้น มีอิเล็กโทรดใช้งานแบบแผ่นอะลูมิเนียมกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร จำนวน 8 แผ่น มีตัว crib ทำความสะอาดทำจากยางสีส้มหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 8 แผ่น ทำหน้าที่ทำความสะอาดแผ่นตกตะกอนให้สะอาดตลอดเวลา มีฉนวนป้องกัน

ไฟฟ้าที่ทำจากซูเปอร์ลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร โดยจะมีแกนหมุนทำจากท่อสแตนเลสขนาด 5 มิลลิเมตร ยาว 240 มิลลิเมตรเพื่อทำการยึดมอเตอร์และแผ่นอะลูมิเนียมกลมให้แน่นโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่น 15 มิลลิเมตร ต่อมาจะเป็นชุดควบคุมการใช้งานเครื่องฟอกอากาศต้นแบบ(Figure 2c) ประกอบด้วย สวิตช์ควบคุมการทำงานประกอบด้วย สวิตช์สีแดงเป็น สวิตช์ควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สวิตช์สีเขียวจำนวน 2 ตัว ควบคุมการทำงาน

ของพัดลมดูดอากาศ และควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบ 5 รอบต่อวินาที ทำหน้าที่หมุนแผ่นตกตะกอนตลอดเวลาขณะทำงานบำบัดอากาศ ทางด้านหลังจะมีช่องระบายอากาศขาออก หลังมีการบำบัดอากาศแล้วขนาดกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และช่องสำหรับใส่ถาดรองรับฝุ่นละอองจากกระบวนการบำบัดอากาศสามารถดึงออกมาจากแผ่นอิเล็กทรอนิกส์หมุนทำความสะอาดตัวเอง เพื่อที่จะนำฝุ่นละอองที่หล่นลงมาแล้วนำไปกำจัดทิ้งต่อไป

Table 1 Specification of the developed air cleaner.

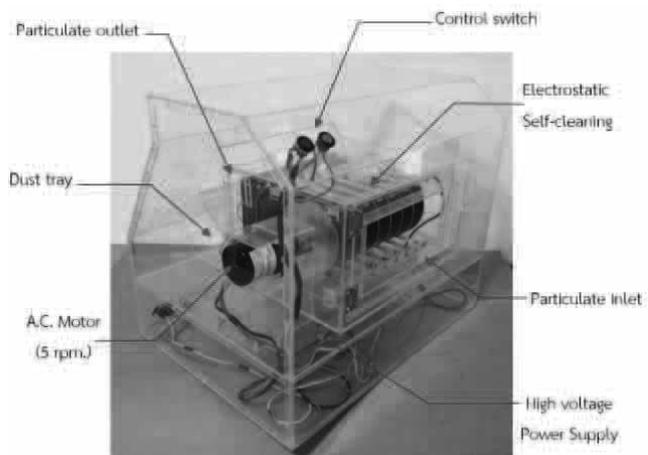
| Specification               | This research         |
|-----------------------------|-----------------------|
| Technique                   | Electrostatic         |
| Number of collector         | 1 Stages              |
| Collection Electrode        | Plate (Circle)        |
| Discharge Electrode         | Wire 0.38 mm          |
| Electrostatic Self-cleaning | Rubber 1mm            |
| Input Voltage               | 220 VAC 50 Hz         |
| Output Voltage              | 10 - 25 kV            |
| Power                       | 120 W                 |
| Frequency                   | 10 – 30 kHz           |
| Dimension size              | 40 cm x 54 cm x 45 cm |
| Flow velocity               | 10 L/min              |
| Fan                         | Size 120x120 mm       |
| Room size                   | 2 m x 2 m x 2 m       |



(a) Schematic



(b) Collection electrode



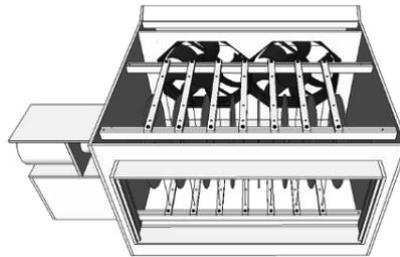
(c) Prototypes air cleaner

Figure 2 The developed air cleaner.

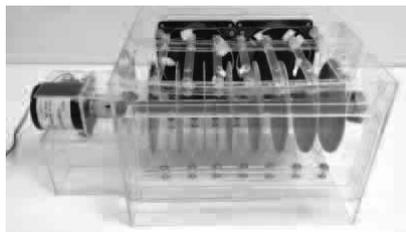
**2.1.2 รายละเอียดในการออกแบบชุดตัวตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิต**

ลักษณะภายในของต้นแบบเครื่องฟอกอากาศแบบจานหมุน (Figure 3) ที่ประกอบด้วยดิสชาร์จใช้งาน (Discharge Electrode) แบบเส้นลวดตรงขนาด 0.38 มิลลิเมตร จำนวน 14 เส้น ทำหน้าที่ในการรับ

ไฟฟ้าแรงดันสูงที่เป็นขั้วบวก แผ่นจานตกตะกอน (Collection Electrode) แต่ละแผ่นจะถูกต่อกับกราวด์ที่เปรียบเสมือนขั้วลบ เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่เป็นขั้วบวก กับขั้วดิสชาร์จใช้งานจะทำให้เกิดโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) ที่ดิสชาร์จจี้เล็กโทรดไอออน (Ion



(a) Schematic of the electrostatic self-cleaning



(b) Prototypes electrostatic self-cleaning

**Figure 3** The developed electrostatic self-cleaning.

และอิเล็กตรอน (Electron) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณที่เกิดโคโรนาดิสชาร์จและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จจี้เล็กโทรดกับคอลเลกชันอิเล็กโทรด [20-21] เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคแขวนลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างจะทำให้เกิดการอัดประจุอนุภาคเป็นผลทำให้อนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่วิถีโค้งด้วยแรงไฟฟ้าสถิตไปตกบนคอลเลกชันอิเล็กโทรด และถูกสะสมตัวอยู่บนคอลเลกชันอิเล็กโทรด และจะมีตัวคีบสำหรับทำความสะอาดทำหน้าที่ปิดอนุภาคฝุ่นที่สะสมตัวบนคอลเลกชันอิเล็กโทรด ให้ตกลงไปยังช่องรองรับ

อนุภาคฝุ่นลงในถาดรองฝุ่น โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 14 วัตต์ รุ่น 60KTYZ Synchronous Motor ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต มีความเร็วรอบต่ำ 5 รอบต่อนาที ต่อเข้ากับมีแกนหมุนทำจากท่อสแตนเลสขนาด 5 มิลลิเมตร ยาว 240 มิลลิเมตร เพื่อทำการยึดมอเตอร์และแผ่นอะลูมิเนียมกลมให้อยู่แน่นโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่น 15 มิลลิเมตร โดยจะหมุนทำความสะอาดกำจัดอนุภาคฝุ่นที่สะสมที่อิเล็กโทรดหมุนได้ด้วยตัวเองทำให้สามารถลดการซ่อมบำรุง รักษาและยืดอายุการใช้งานของเครื่องฟอกอากาศต้นแบบได้

## 2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.2.1 การทดสอบคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต

ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Characteristics) ของเครื่องฟอกอากาศต้นแบบที่มีชุด ตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ประกอบด้วยดิสชาร์จอิเล็กโทรด และคอลเลกชันอิเล็กโทรด และศึกษาความสะอาดคอลเลกชันอิเล็กโทรด จากผลงานวิจัยของต่างประเทศและในประเทศ [23-24] พบว่าสมรรถนะการทำงานของชุดตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะเกิดจากกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค และกระบวนการดิสชาร์จไอออน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกอากาศได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสดิสชาร์จ (Discharge Current) ของชุดตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ได้สร้างขึ้น (Figure 4) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จที่

ชั่วดิสชาร์จของการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค การดิสชาร์จไอออน และชุดตัวตักตะกอนจะถูกวัดโดยตรงด้วยมัลติมิเตอร์ของ Fluke โมเดล 289 True-rms และอิเล็กโทรมิเตอร์แบบดิจิตอลของบริษัท Keithley โมเดล 6517A ผ่านชุดตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชั่วดิสชาร์จในช่วง 1 ถึง 25 กิโลโวลต์ ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบปรับค่าได้ของบริษัท Leybold Didactic โมเดล 521721 โดยจะทำการทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงชั่ววอกที่อุณหภูมิความดันห้องทดสอบปกติ 25 องศาเซลเซียส และทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคปของ GW Instek โมเดล GD5-1052-U วัดผ่านโพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อ 10 กิโลโวลต์

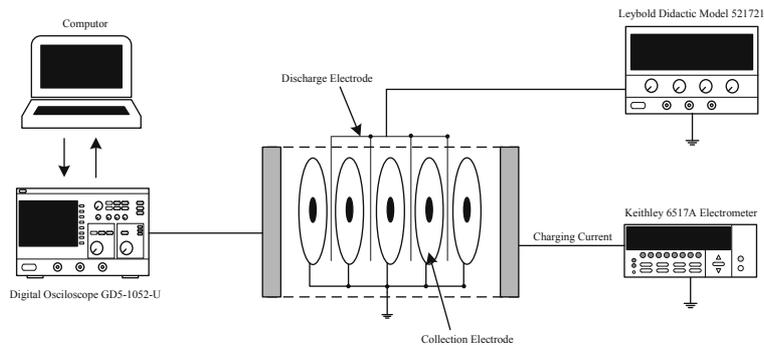


Figure 4 Schematic diagram for electrostatic characteristics.

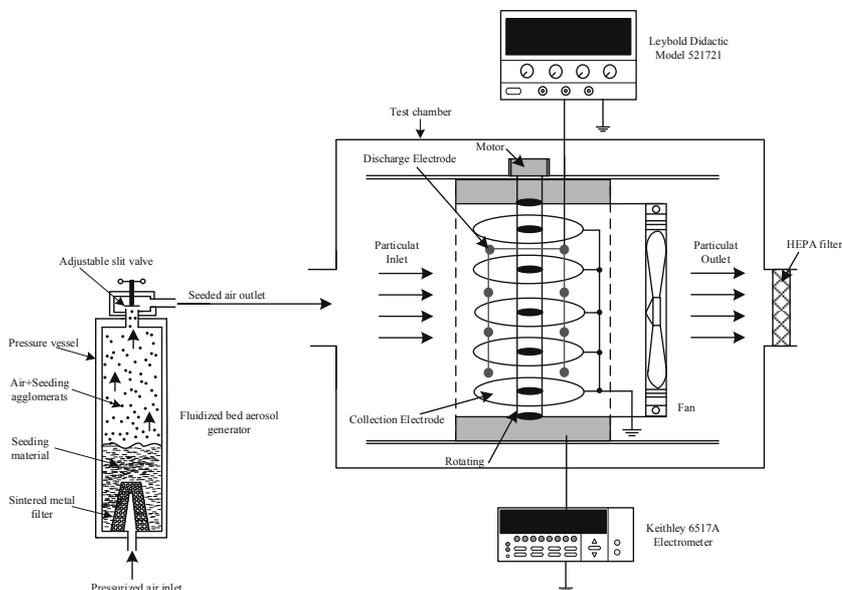
### 2.2.2 ทดสอบการตกตะกอนของคอลเลกชันอิเล็กโทรด

ในการศึกษานี้เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในของการทำงานของอิเล็กโทรดหมุนได้สำหรับกำจัดอนุภาคฝุ่นที่ตกตะกอนสะสมที่แผ่นเพลต โดยจะศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่ากระแสดิสชาร์จอิเล็กโทรดและแรงดัน โครโมนาที่ใช้งาน และทดสอบการตกตะกอนของคอลเลกชันอิเล็กโทรดแบบหมุนได้ โดยการทดสอบนี้ได้เลือกนำอนุภาคที่มีใช้งานอยู่ทั่วไปมาใช้

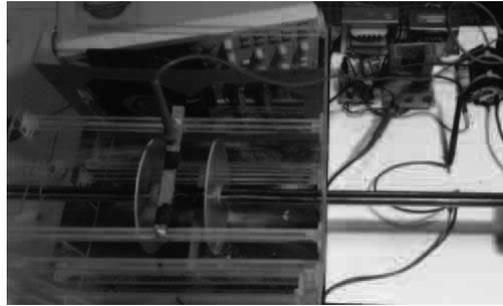
เป็นตัวแทนอนุภาคเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาดังนี้ การทดสอบการตกตะกอนของคอลเลกชันอิเล็กโทรดโดยมีไดอะแกรมดัง (Figure 5a) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จที่ชั่วดิสชาร์จของชุดตัวตักตะกอนจะถูกวัดโดยตรงด้วย อิเล็กโทรมิเตอร์แบบดิจิตอลของบริษัท Keithley โมเดล 6517A ผ่านชุดตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชั่วดิสชาร์จอยู่ในช่วง 1 ถึง 25 กิโลโวลต์ ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบปรับค่าได้ ของบริษัท Leybold Didactic โมเดล

521721 โดยจะทำการทำสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งชั่ว  
 วงที่อุณหภูมิและความดันห้องทดสอบปกติจะทำการ  
 ปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า 10 ถึง 40 กิโลเฮิร์ต  
 และรอบการทำงานที่ (Duty cycle) 55, 60 และ 65  
 เปอร์เซ็นต์ โดยได้จัดวางและอุปกรณ์ทดสอบคอลเล็ก  
 ชันอิเล็กทรอนิกส์ได้ (Figure 5b) โดยทดสอบนำเอา  
 อนุภาคฝุ่นจำลอง (Particulates Inlet) ขนาดเส้นผ่าน  
 ศูนย์กลางต่างๆ ที่อยู่ในช่วงประมาณ 2.5-10 ไมโครเมตร  
 ได้แก่ สีสผสมอาหาร ผงแป้ง และเศษเชือก ซึ่งเป็นวัสดุ  
 ที่พบเจอได้ภายในอาคารบ้านเรือนที่ทำให้เกิดอนุภาค  
 ฝุ่นขึ้นได้ และสามารถหาได้ง่ายจึงนำมาใช้แทนอนุภาค  
 สำหรับการทดสอบเบื้องต้นนี้ เข้าสู่เครื่อง Fluidized  
 bed aerosol generator ทำให้เกิดการฟุ้งภายในและ  
 แยกอนุภาคสำหรับนำไปใช้ในการทดสอบในตัวทดสอบ  
 (Test Chamber) โดยทำการควบคุมอัตราการไหล  
 ของอากาศที่ 10 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ต่อ

การทดสอบใน 1 รอบ เพื่อทดสอบชุดตกตะกอนเชิง  
 ไฟฟ้าสถิต ซึ่งวิธีการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ  
 Kalasee et al. [5] ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่อง  
 ตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิตแบบชนิดขั้วเดียวในการดักจับ  
 อนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้ง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่าง  
 อนุภาคฝุ่นที่ตกตะกอนบนแผ่นตกตะกอน (Collection  
 Electrode) มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบ  
 ดิจิตอลของ Mettler Toledo โมเดล PB302 เปรียบ  
 เทียบผลน้ำหนักก่อนและหลังจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแส  
 ตรงให้กับชุดตัวตกตะกอนที่มีระยะห่างระหว่างขั้วปล่อย  
 ประจุกับแผ่นตกตะกอนเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร โดยมีการ  
 ควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 5 รอบต่อนาที บันทึกผล  
 การทดสอบและภาพลักษณะทางกายภาพของอนุภาค  
 ที่สะสมบนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดหมุนและอนุภาคที่ตกลงบน  
 ถาดรอง



(a) Schematic diagram for evaluating



(b) Collection electrode

Figure 5 Experimental setup for evaluating the particle collection efficiency.

### 2.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศ

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบจะดำเนินการตามมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 และ JIS Z 2801: 2000 และการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric Method) คือการวัดปริมาณสารที่ตกค้างอยู่บนแผ่นรองรับด้วยการชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงความเป็นไปได้เบื้องต้นของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ได้สำหรับกำจัดฝุ่นละอองจากอากาศภายในอาคาร โดยการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคฝุ่นควันจะดำเนินการภายในห้องจำลองมีโต๊ะกรรมการทดสอบ (Figure 6a) และ (Figure 6b) แสดงการทดสอบการตกตะกอนภายในห้องจำลองขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 2×2×2 เมตร โดยวิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดอากาศนี้เป็นแบบวิธีการสู่มตัวอย่างนำมาทำการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric Method) ซึ่งภายในห้องจำลองจะมีเครื่องสร้างอนุภาคฝุ่นควัน (Particle Generator) ทำหน้าที่พ่นอนุภาคฝุ่นควันตัวอย่างการเผาไหม้แพร่ กระจายแบบราบเรียบ (Laminar Diffusion Burner) ด้วยน้ำมันที่สภาวะก่อนการเป็นเขม่า โดยห้องจำลองนี้จะสร้างจากโครงสร้างท่อ PVC และคลุมด้วยพลาสติกใสเพื่อให้มีการมองเห็นควันอนุภาคได้ง่าย ซึ่งระหว่างการพ่นอนุภาคตัวอย่าง

ได้มีการเก็บตัวอย่างอากาศที่ความสูง 1.5 m โดยใช้ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละอองที่สอดคล้องกับงานวิจัย [3,22] ประกอบด้วย ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาค (Aerosol Sampler) ภายในมีแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) โดยการศึกษานี้ได้ใช้แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงของ Whatman Grade EPM 2000 Air Sampling Filter ผลิตจากแก้วบอร์ซิลิเกตบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถวิเคราะห์สารเคมีโดยละเอียดของสารมลพิษในปริมาณน้อยโดยมีการรบกวนน้อยที่สุด ประสิทธิภาพการกักเก็บอากาศ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ของอนุภาคขนาด 0.3 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร หนา 330 ไมโครเมตร [25] มีชุดหัววัด PM2.5 (PM2.5 impactor) ที่ทำหน้าที่ในการคั่นอนุภาค PM2.5 ก่อนเข้าสู่ระบบทดสอบโดยชุดหัววัดนี้มีหลักการทำงานตามงานวิจัยของ Intra et al. [26] ชุดวัดและควบคุมการไหลของอากาศ (Air Flow Meter and Controller) ของ Dwyer และปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) แบบโรตารีของ Busch โมเดล SV 1003 เก็บที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที จะเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นทุก 15 นาที เป็นเวลา 60 นาที โดยไม่มีการเปิดเครื่องฟอกอากาศต้นแบบ เพื่อเก็บตัวอย่างอากาศขณะที่ยังไม่มี การบำบัดอากาศ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองใหม่โดยพ่นอนุภาคควันตัวอย่าง แต่ครั้งนี้จะทำการเปิดเครื่องฟอกต้นแบบ และทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคทุก 15 นาที

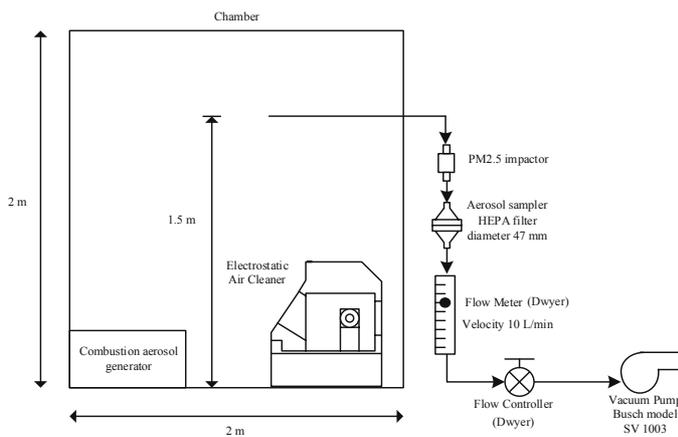
เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำอนุภาคที่สะสมตัวบนแผ่นกรองอนุภาคทั้งสองนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลของ Mettler Toledo โมเดล PB302 ขนาด 300 กรัม โดยมีความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของเครื่องฟอกอากาศต้นแบบ โดยการคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต จะหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด (Overall

Collection Efficiency)  $\eta_{overall}$  ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง สามารถประเมินได้จากมวลของอนุภาคที่แผ่นกรองทดสอบวัดได้ทางขาเข้าและทางขาออก ทั้งก่อนผ่านและหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่จ่ายให้กับขั้วขั้วอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงสำหรับดักจับควัน สามารถคำนวณจากสมการดังนี้ [3,12]

$$\eta_{overall} = \frac{c_{inlet} - c_{outlet}}{c_{inlet}} \times 100\% \tag{10}$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาค (Particulate Mass Concentration (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)) และ  $c_{inlet}$  คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางเข้า  $c_{outlet}$

คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



(a) Schematic diagram



(b) Testing the collection efficiency

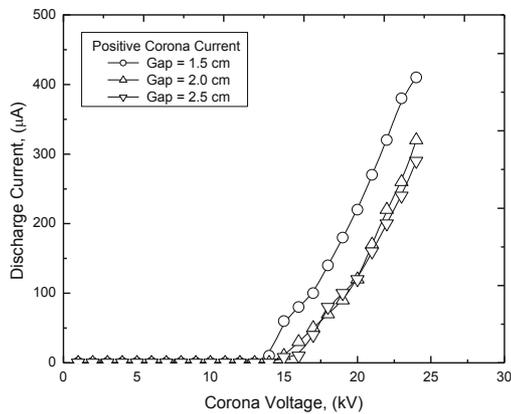
Figure 6 Experimental setup for testing the collection efficiency.

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

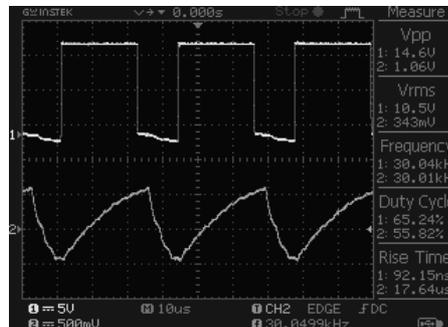
#### 3.1 คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าสถิต

ในการศึกษาถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิต เพื่อให้เข้าใจถึงสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์สำหรับการออกแบบชุดตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตของอนุภาคฝุ่น โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า (Figure 7a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบโคโรนาบวกซึ่งได้ทำการทดสอบกับดิสชาร์จ อิเล็กโทรดแบบเส้นลวดตรงขนาด 0.38 มิลลิเมตร ทดสอบจ่ายระดับแรงดันโคโรนาในช่วง 1 ถึง 25 กิโล-

โวลต์ จากกราฟพบว่าค่ากระแสดิสชาร์จ (Discharge Current) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันโคโรนา (Corona Voltage) ที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona Onset Voltage) จะอยู่ที่ 14, 15 และ 16 กิโลโวลต์ สำหรับระยะห่างแผ่นคอลเล็กชันอิเล็กโทรด 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยพบว่าจะให้ค่ากระแสดิสชาร์จสูงสุดอยู่ในช่วง 10 ถึง 410 ไมโครแอมป์ 10 ถึง 320 ไมโครแอมป์ และ 8 ถึง 290 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ สอดคล้องกับผลวิจัยที่ผ่านมาของ Intra et al. [3] และผลวิจัยของ Tintachart et al. [12]



(a) Current-voltage relationship



(b) Output voltage -duty cycle and frequency

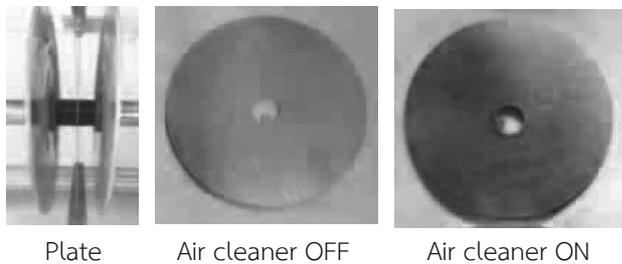
Figure 7 Electrostatic characteristics.

ผลของการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งได้ด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคปของบริษัท GW Instek โมเดล GD5-1052-U วัดผ่านโพรปัดไฟฟ้าแรงดันสูง ที่มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อ 10 กิโลโวลต์ (Figure 7b) พบว่าที่รอบการทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ยอดคลื่นสูงสุด ( $V_{p-p}$ ) 14.6 กิโลโวลต์ ซึ่งผลการทดสอบนี้จึงได้นำมาใช้งานจริงกับชุดตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตของเครื่องฟอกอากาศต้นแบบนี้

**3.2 ผลทดสอบการตกตะกอนของคอลเล็กชันอิเล็กโทรด**

ในการศึกษาผลทดสอบการตกตะกอนของคอลเล็กชันอิเล็กโทรดที่ได้สร้างขึ้น จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่ากระแสตีสชาร์จอิเล็กโทรดและแรงดันโคโรนา เมื่อเปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์โคโรนาตีสชาร์จ (Corona Discharge) ขึ้น

โดยรอบๆ ชั่วตีสชาร์จไอออน (Ions) และอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนา โดยผลการทดสอบวัดค่าแรงดันโคโรนา (Corona Voltage) ที่ตีสชาร์จอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดตรงขนาด 0.38 มิลลิเมตร ระยะห่างของแผ่นคอลเล็กชันอิเล็กโทรด 1.5 เซนติเมตร โดยการปรับความถี่ใช้งาน 10 ถึง 40 กิโลเฮิร์ต และรอบการทำงานที่ 55, 60 และ 65 เปอร์เซ็นต์ (Figure 8b) พบว่าที่รอบการทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นจุดเหมาะสมที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ในวงจรเกิดอุณหภูมิร้อน ผลทดสอบการตกตะกอนโดยการใช้อุณหภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ที่อยู่ในช่วงประมาณ 2.5-10 ไมโครเมตร ได้แก่ สีผสมอาหาร ผงแป้ง และเศษเชื้อ (Figure 8a) แสดงการสะสมตัวของอนุภาคสีผสมอาหารบนแผ่นคอลเล็กชันอิเล็กโทรดหมุนได้ด้วยหลักการเชิงไฟฟ้าสถิตและใน



(a) Food coloring in the plate

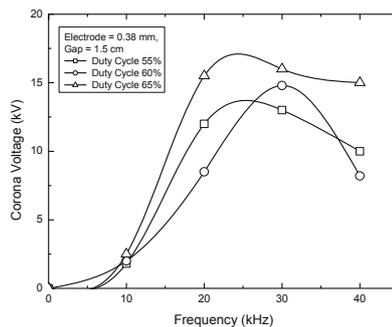


Figure 8 The precipitated particle weight and corona voltage - frequency.

(Table 2) พบว่าเมื่อนำแผ่นจานตกตะกอน (Collection Electrode) มาชั่งน้ำหนักน้ำหนักอนุภาคที่ตกตะกอนเท่ากับ 0.2, 0.1 และ 0.4 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักอนุภาคที่ตกตะกอนในแผ่นจานเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 กรัม และพบว่าอนุภาคของฝุ่นที่เป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบทั้ง 3 ชนิด ได้ตกลงบนถาดรองที่อยู่ด้านล่างของเครื่องฟอก

อากาศต้นแบบจากการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์และมีตัวครีบทำความสะอาดทำจากยางสีส้มหนา 1 มิลลิเมตร โดยนำมาชั่งน้ำหนักของอนุภาคบนถาดรองเท่ากับ 19.8, 19.9 และ 19.6 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักอนุภาคที่ถาดรองเฉลี่ยเท่ากับ 19.7 กรัม

**Table 2** The precipitated particle weight.

| Test No.                                     | Weight of particles in the plate (g) |                | Precipitated particle weight on plate (g) | Precipitated particle weight on dust tray (g) |
|--|--------------------------------------|----------------|---|---|
|  | Air cleaner OFF                      | Air cleaner ON |   |   |
| 1. Food coloring                             | 58.7                                 | 58.9           | 0.2                                       | 19.8  |
| 2. Powder                                    | 58.7                                 | 58.8           | 0.1                                       | 19.9  |
| 3. A piece of rope                           | 58.7                                 | 59.1           | 0.4                                       | 19.6  |
| Average weight of particles in the plate (g) |                                      |                | 0.2                                       | 19.7  |

### 3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศ

ผลการทดสอบสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ภายในห้องจำลองขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 2×2×2 เมตรด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดอากาศจากการดึงเอาบางส่วนของของไหลที่สนใจออกมาเพื่อวัดค่าโดยทำการศึกษาตามมาตรฐานของ US EPA (Environmental Protection Agency) โดยผ่านชุดเก็บตัวอย่างอนุภาค (Aerosol Sampler) ภายในมีแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Particulate-free Air Filter) จากนั้นจึงนำตัวอย่างอนุภาคควันที่แผ่นกรองไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน ผลการชั่งน้ำหนักตัวอย่างอนุภาคก่อนและหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาหามวลอนุภาคขาเข้า ( $C_{inlet}$ ) คือ น้ำหนักแผ่นกรองที่เครื่องกรองอากาศปิด Filter weight (Air Cleaner OFF) - น้ำหนักแผ่นกรอง (Filter weight) และมวลอนุภาค

ขาออก ( $C_{outlet}$ ) คือ น้ำหนักแผ่นกรองที่เครื่องกรองอากาศเปิด Filter weight (Air Cleaner ON) - น้ำหนักแผ่นกรอง (Filter weight) หลังจากนั้นจึงนำมาใช้คำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมดตามสมการที่ (10) ผลทดสอบที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เวลาทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที ของตัวตกตะกอนแบบเส้นลวดตรงเท่ากับ 90.2, 91.4, 91.5 และ 91.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ มีค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ย 91.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าตัวครีบทำความสะอาดทำหน้าที่บดอนุภาคฝุ่นที่สะสมตัวบนคอลเล็กชันอิเล็กทรอนิกส์ให้ตกลงไปยังช่องรองรับอนุภาคฝุ่นลงในถาดรองฝุ่นได้ดี โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการตกตะกอนทั้งหมด ( $n_{overall}$ ) ในช่วงเวลาที่ทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที จะได้ว่าค่าที่ประสิทธิภาพตกตะกอนทั้งหมดในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวครีบทำความสะอาดคอลเล็กชันอิเล็กทรอนิกส์ได้ด้วยตัวเอง

**Table 3** The removal particles of the developed air cleaner at testing time of 60 min.

| Time (min)                                 | Particulate mass concentration (mg/m <sup>3</sup> ) |                                 |  |                                |   | Overall collection efficiency ( $\eta_{overall}$ ) (%) |
|--|---|---------------------------------|--|--------------------------------|---|--|
|  | Filter weight                                       | Filter weight (Air cleaner OFF) | Particulate mass concentration ( $C_{inlet}$ ) | Filter weight (Air cleaner ON) | Particulate mass concentration ( $C_{outlet}$ ) |  |
| 15   | 22  | 44.5                            | 22.5   | 24.2                           | 2.2   | 90.2   |
| 30   | 22  | 50.2                            | 28.2   | 24.4                           | 2.4   | 91.4   |
| 45   | 22  | 49.2                            | 27.2   | 24.3                           | 2.3   | 91.5   |
| 60   | 22  | 49.8                            | 27.8   | 24.3                           | 2.3   | 91.7   |
| Particle collection efficiency average (%) |   |                                 |  |                                |   | 91.2   |

#### 4. สรุปผล

ในบทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดหมุนได้สำหรับกำจัดฝุ่นละอองจากอากาศภายในอาคาร ผลการศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าพบว่าค่ากระแสตีสหาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันโคโรนาที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาจะอยู่ที่ประมาณ 14, 15 และ 16 กิโลโวลต์ สำหรับระยะห่างของแผ่นคอลเล็กชันอิเล็กโทรด 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยพบว่าจะให้ค่ากระแสตีสหาร์จสูงสุดอยู่ในช่วง 10 ถึง 410 ไมโครแอมป์ ที่ระยะห่างของแผ่นคอลเล็กชันอิเล็กโทรด 1.5 เซนติเมตร ผลของการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพบว่าที่รอบการทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ยอดคลื่นสูงสุด ( $V_{pp}$ ) 14.6 กิโลโวลต์ เป็นจุดที่เหมาะสมกับการทำงานโดยไม่เกิดอุณหภูมิร้อน ผลทดสอบการตกตะกอนของคอลเล็กชันอิเล็กโทรด อนุภาคฝุ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ที่อยู่ในช่วงประมาณ 2.5-10 ไมโครเมตร ได้แก่ สีสผสมอาหาร ผงแป้ง และเศษเชื้อ โดยจะนำแผ่นจานตกตะกอนมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักอนุภาคที่ตกตะกอนพบว่าน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 กรัม ซึ่งน้ำหนักอนุภาคส่วนใหญ่จะตกไปอยู่ที่ถาดรองเฉลี่ยเท่ากับ 19.7 กรัม เนื่องจากการทำงานของ

อิเล็กโทรดหมุนกับคิบบ์ที่ทำให้อนุภาคตกลงบนถาดรองและได้ทำการทดสอบการตกตะกอนภายในห้องจำลองขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 2×2×2 เมตร โดยวิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดอากาศนี้เป็นแบบวิธีการสูบลตัวอย่างแบบที่มีจุลศาสตร์เท่ากันด้วยการดึงเอาบางส่วนของของไหลที่สนใจออกมาเพื่อวิเคราะห์น้ำหนัก (Gravimetric Method) ของอนุภาคที่ตกค้างอยู่บนแผ่นรองรับด้วยการชั่งน้ำหนักและนำมาหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 91.2 เปอร์เซ็นต์ การนำเทคโนโลยีการบำบัดอากาศแบบอิเล็กโทรดหมุนได้ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงพร้อมอิเล็กโทรดหมุนสามารถนำไปใช้งานในระบบบำบัดอากาศด้วยการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้ เพื่อแก้ปัญหาลดการใช้แผ่นกรองและลดการสัมผัสเชื้อโรคจากการเปลี่ยนแผ่นกรอง และเพื่อช่วยในการลดการสะสมของอนุภาคที่แผ่นเพลตซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฟอกอากาศลงได้ ผลการศึกษานี้ทำให้ได้แนวทางสำหรับการศึกษาต่อไปในอนาคต ซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดสอบในด้านต่างๆ ต่อไปดังนี้

4.1 ศึกษาและวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ขนาดแผ่นเพลตตกตะกอนต่อคุณลักษณะเชิงไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรด ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์

เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ปรับปรุงแก้ไขชุดตัวตักตะกอนให้สามารถลดการสะสมของอนุภาคที่แผ่นเพลตได้ดีขึ้นเพื่อนำไปใช้งานบำบัดอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

4.2 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบตามมาตรฐาน ASNI/AHAM AC-1-2015 และ JIS Z 2801: 2000 โดยทดสอบกับอนุภาคขนาดมาตรฐาน และวิเคราะห์ค่าอัตราการปล่อยอากาศสะอาด CADR (Clean Air Delivery Rate) เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบ

4.3 ทำการทดสอบวัดและเปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศกับเครื่องฟอกอากาศที่ใช้ภายในอาคารที่พักอาศัยที่มีใช้อยู่ตามท้องตลาด ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนภายใต้โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (Hands-on Researcher) งบประมาณประจำปี 2558 ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ

## 6. References

- [1] Iqualityair., 2021, Air purifiers protect against Covid 19, TH Robotics Company Limited, Bangkok, Thailand.
- [2] Intra, P., 2019, Electrostatic aerosol measurement and control technology, ChulaPress, Bangkok. Thai.
- [3] Intra, P., Yawootti, A., Asanavijit, V. and Vinitketkumnuen, U., 2012, Development of an indoor air cleaner for a non toxic room by electrostatic technique, KMUTT Research and Development Journal, 35(3): 361-382.
- [4] Jaworek, A., Krupa, A. and Czech, T., 2007, Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review, J. Electrostatics. 65: 33-155.
- [5] Kalasee, W., Srisang, N., Suppatkul, P. and Tekasakul, P., 2006, The Particles Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator Part I: Soot and Talcum Powder particles, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, 18-20 October, 75-79.
- [6] Leiva G, M.A., Santibañez, D.A., Ibarra E, S., Matus C, P. and Seguel, R., 2013, A five-year study of particulate matter (PM2.5) and cerebrovascular diseases, Environmental Pollution, 181:1-6.
- [7] 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 Transactions on Industry Applications, 29: 774-780.
- [8] 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, Journal of the Air Pollution Control Association, 30(3): 277-278.

- [9] Hinds, W.C., 1999, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York.
- [10] USEPA, 1998, PM 2.5 general information, Office of Air Quality Planning and Standards.
- [11] Okubo, M., Yamamoto, T., Kuroki, T., and Fukumoto, H., 2001, Electric air cleaner composed of nonthermal plasma reactor and electrostatic precipitator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37: 1505-1511.
- [12] Tintachart, K., Norkaew, W., Yawootti, A. and Intra, P., 2017, Modification and Field Testing of an Indoor Electrostatic Air Purifier, *Journal of KMUTNB*, 27(1): 31-46.
- [13] Okubo, M., Yamamoto, T. and Kuroki, T., 2001, Electric Air Cleaner Composed of Non-thermal Plasma Reactor and Electrostatic Precipitator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(5): 1505-1511.
- [14] Joon Kim, H., Han, B., Woo, C., Jin Kim, Y., Taek Lim. and Gyu Shin, W., 2001, Air cleaning performance of a novel electrostatic air purifier using activated carbon fiber filter for passenger cars, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(6): 5867-5874.
- [15] Afshari, A., Ekberg, L., Forejt, L., Mo, J., Rahimi, S., Siegel, J., Chen, W., Wargocki, P., Zurami, S. and Zhang, J., 2020, Electrostatic Precipitators as an Indoor Air Cleaner-A Literature Review, *Sustainability*, 12(21): 2-22.
- [16] saVRee 3D Interactive Media, 2020, Electrostatic precipitator (ESP), Available Source: <https://savree.com/en/encyclopedia/electrostatic-precipitator-esp>
- [17] Parker, K.R., 1997, *Applied Electrostatic Precipitation*, Blackie Academic & Professional, New York.
- [18] White, H.J., 1963, *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- [19] Chang, J., Kelly, A.J. and Crowley, J.M., 1995, *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [20] Asanavijit, V. and Kornpod, M., 2017, Prototype Development of a Closed-Loop Control Type Electrostatic Precipitator for Smoke Removal of Incinerators, *Journal of Innovative Technology Research*, 1(1): 71-82.
- [21] Asanavijit, V., Premrudeepreechacharn, S., Yawootti, A. and Intra, P., 2011, Current-voltage characteristics of positive corona pulsed electrostatic precipitator, pp. 359-363, *The 9<sup>th</sup> PSU Engineering Conference*, Phuket, 2-3 May.
- [22] Srisang, N., Chaiypong, S., Kuson, P. and Kalasee, W., 2006, Efficiency of chalk particle trapping of electrostatic precipitators, *Naresuan Research Conference*, Phitsanulok, 26-28 July.
- [23] Tippayawong, N. and Kunanoppadon, J., 2003, Application of electrostatic technique to diesel particulate aftertreatment, *PSU-UNS International Conference Energy and the Environment*, Hat-Yai, Songkhla, December 11-12.
- [24] Nair, S.A., Pemen, A.J.M., Yan, K., van Heesch, E.J.M., Ptasiński, K.J. and Drinken-

- burg, A.A.H., 2004, Tar removal from biomass derived fuel gas by pulsed corona discharges a chemical kinetic study, *Ind. Eng. Chem. Res.* 43: 1649-1658.
- [25] Cytivalifesciences, 2022, Whatman Grade EPM 2000 Air Sampling Filter, Available Source: [https://www.cytivalifesciences.com/en/us/shop/whatman-laboratory-filtration/glass-and-quartz microfi-](https://www.cytivalifesciences.com/en/us/shop/whatman-laboratory-filtration/glass-and-quartz-microfiber-filter/binderless-glass-microfiber-filter/whatman-grade-epm-2000-air-sampling-filter-p-00698)
- ber-filter/binderless-glass-microfiber-filter/whatman-grade-epm-2000-air-sampling-filter-p-00698
- [26] Intra, P., Yawootti, A., Vinitketkumnun, U. and Tippayawong, N., 2012, Development of a PM2.5 sampler with inertial impaction for sampling airborne particulate matter, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29: 1044–1049.