

## การพัฒนาเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคาร สำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต

พานิช อินต๊ะ<sup>1\*</sup> อาทิตย์ ยาวุฑฒิ<sup>2</sup> วิสูตร อาสนวิจิตร<sup>2</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220  
และ อุษณีย์ วิณิชเขตค่านวม<sup>3</sup>  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมือง เชียงใหม่ 50200

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ พัฒนา และทดสอบสมรรถนะต้นแบบเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคาร สำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต โดยต้นแบบประกอบด้วย ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดตกตะกอนอนุภาค ชุดสร้างไอออน พัดลมดูดอากาศ ตัวควบคุมความเร็ว ตัวตั้งเวลา และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งการทำงานของเครื่องต้นแบบฯจะใช้พัดลมดูดอากาศเข้าภายในระบบโดยผ่านชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบเส้นลวด-แผ่นเพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคจะทำให้อนุภาคฝุ่นละอองเกิดประจุไฟฟ้า หลังจากนั้นฝุ่นละอองและอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าสถิตเหล่านี้จะถูกนำเข้าไปยังชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อที่ประกอบด้วยท่อตกตะกอนและขั้วดิสชาร์จจิวเล็กโทรด โดยดิสชาร์จจิวเล็กโทรดจะถูกจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ในขณะที่ท่อตกตะกอนมีศักย์เป็นกราวด์จะทำให้เกิดสนามโคโรนาดิสชาร์จขึ้นบริเวณรอบขั้วดิสชาร์จจิวเล็กโทรด เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองที่ถูกอัดประจุเข้ามาในชุดตกตะกอนนี้จะตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่ผนังด้านในของท่อตกตะกอนและอากาศที่สะอาดผ่านออกมาผ่านชุดดิสชาร์จเพื่อดิสชาร์จให้อากาศมีความเป็นกลางของประจุไฟฟ้าและเพื่อเพิ่มคุณภาพอากาศที่กรองออกมาให้บริสุทธิ์เป็นธรรมชาติ ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต วิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคและทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบฯ จากผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าสูงถึง 99 % เมื่ออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.5, 7 และ 18  $\mu\text{m}$  ที่ความเร็วของอากาศ 0.1, 0.5 และ 1 m/s ตามลำดับ สำหรับแรงดันโคโรนา 10 kV และจากผลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดยังแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99 % ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที

**คำสำคัญ :** ฝุ่นละออง / มลพิษทางอากาศ / เครื่องบำบัดอากาศในอาคาร / ไฟฟ้าสถิต

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน E-mail : panich\_intra@yahoo.com

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

<sup>2</sup> อาจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

<sup>3</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์

## Development of an Indoor Air Cleaner for a Non Toxic Room by Electrostatic Technique

Panich Intra<sup>1\*</sup>, Artit Yawootti<sup>2</sup>, Visut Asanavijit<sup>2</sup>

Rajamangala University of Technology Lanna, Doi Saket, Chiang Mai 50220

and Usanee Vinitketkumnuen<sup>3</sup>

Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50200

### Abstract

In this paper, an indoor air cleaner for a non-toxic room by electrostatic technique was designed, developed and tested. The cleaner prototype consists of a particle charger, a particle collector, an ionizer, a fan, a speed controller, a timer and a high voltage power supply. In this system, a fan draws a sample air into the system through a wire-to-plate particle charger to set a charge on the particulate. After the particle charger, the charged particulates then enter the multiple-tube particle collector that consist multiple-tubes and corona discharge electrodes. In the collector, the discharge electrodes are high voltage power supply, while the multiple-tube is grounded. The corona discharge field inside the collector will be caused around the discharge electrodes. When charged particulates flow into the collector to collect and deposit with the electrostatic force on the inner walls of the outer tube and the air without particulate then passes out through a ionizer to discharge air and the charge neutrality to improve the clean air quality. In this study, an electrostatic characteristic as well as a collection and treatment efficiencies were analytically and experimentally studied. It was report that the collection efficiency of the collector is up to 99 % at the particle diameter of about 1.5, 7 and 18  $\mu\text{m}$  with the air velocity of 0.1, 0.5 and 1 m/s, respectively, for corona voltage of 10 kV. It was also showed that the developed prototype will be effective in the removal of particulate up to 99% at the time of treatment for 70 minutes.

**Keywords :** Particulate Matter / Air Pollution / Indoor Air Cleaner / Electrostatic

---

\* Corresponding author E-mail : panich\_\_intra@yahoo.com

<sup>1</sup> Assistant Professor, College of Integrated Science and Technology.

<sup>2</sup> Lecturer, College of Integrated Science and Technology.

<sup>3</sup> Professor, Department of Biochemistry, Faculty of Medicine.

## 1. บทนำ

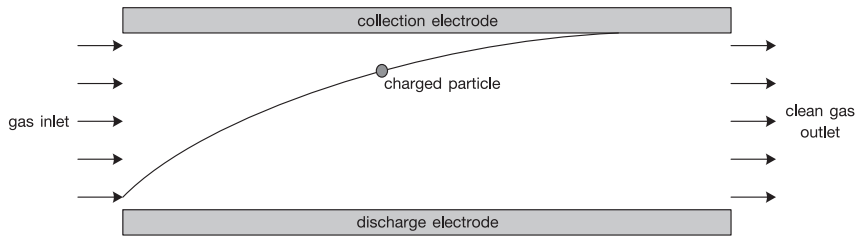
คุณภาพอากาศ (air quality) เป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับทุกคนทั่วโลกกำลังให้ความสนใจและให้ความสำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของประชากรและต่อประสิทธิภาพการทำงานของคนทำงาน เป็นที่ยอมรับว่าคุณภาพอากาศจะดีต่อสุขภาพหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับระดับหรือปริมาณมลพิษที่ปนเปื้อนในอากาศ สารมลพิษที่สำคัญคืออนุภาคฝุ่นละอองลอยขนาดเล็ก (particulate matter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5  $\mu\text{m}$  หรือที่เรียกว่า PM 2.5 ฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กคือการรวมกันของโมเลกุล (molecular) หรือกลุ่มโมเลกุลของสารหรือสารประกอบต่างๆ รวมไปถึงสารมลพิษชีวภาพที่อาจจะเป็นเชื้อรา ไวรัส หรือแบคทีเรีย ที่ลอยอยู่บนกับฝุ่นละอองในอากาศที่เราหายใจเข้าไป [1 – 3] เนื่องจาก PM 2.5 จะมีการตกตะกอนค่อนข้างช้าถึงช้ามาก (ระดับชั่วโมง ถึง วัน) จนในบางครั้งถือว่าเป็นประเภทลอยในอากาศอย่างถาวร จึงสามารถแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดหรือบรรยากาศเข้าสู่ที่พักอาศัย สำนักงาน โรงพยาบาล รวมไปถึงสถานศึกษา และส่งผลต่อสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงานดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นได้

ซึ่งผลกระทบต่อสุขภาพของมลพิษทางอากาศจาก PM 2.5 มาจากองค์ประกอบทางเคมีต่างชนิดปนเปื้อนอยู่ สารเคมีบางตัวมีคุณสมบัติออกซิเดนท์ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น สารโลหะที่มีคาร์บอน กรดเกลือ สารมลพิษอินทรีย์ รวมไปถึงสารมลพิษชีวภาพที่อาจจะเป็นเชื้อรา ไวรัส หรือแบคทีเรีย ซึ่งจากผลการวิจัยจากต่างประเทศรายงานถึงกลไกการกระตุ้นการหลังสารกระตุ้นการอักเสบ โดยอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจะสามารถเร่งให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระและทำให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชั่น ทำให้เกิดการทำลายเม็ดเลือดขาวในปอด ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลันต่อปอดทำให้ปอดอักเสบ ทั้งนี้ในบุคคลที่มีสุขภาพแข็งแรงและปกติกลไกการป้องกันในร่างกายจะช่วยป้องกันความเสียหายได้

แก่บุคคลที่มีปัญหาทางเดินหายใจ เช่นผู้ที่ เป็นโรคหอบหืด ผู้ที่เป็นโรคภูมิแพ้เรื้อรังหรือมีการอักเสบทางเดินหายใจ หรือผู้ที่หายใจเอาสารมลพิษในอากาศ เช่น คาร์บอนหรือ สูดไอโซน ความสามารถในการป้องกันตนเองอาจจะไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจำทำให้เสี่ยงต่อการที่ปอดจะเสียหาย และเป็นอันตรายจากสารมลพิษอากาศได้ [3]

ดังนั้น เครื่องบำบัดอากาศภายในอาคาร (indoor air cleaner) จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับสถานที่ทำงาน โรงพยาบาลโดยเฉพาะห้องปลอดความเป็นพิษ และที่พักอาศัย โดยเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารจะช่วยในการจัดการปัญหาเรื่องเชื้อโรค โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย คาร์บอน ฝุ่นและกลิ่นต่างๆ สามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็ก 0.01  $\mu\text{m}$  ที่ปะปนอยู่ในอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ โรคปอดอักเสบ และโรคทางเดินหายใจอื่นๆ เช่น โรคภูมิแพ้ โรคหอบหืด เป็นต้น [4 - 9] จากการสำรวจและสอบถามเบื้องต้นจากผู้ที่เกี่ยวข้องและหน่วยงานของภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำนักงานและที่พักอาศัย พบว่าเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารที่มีจำหน่ายในประเทศไทยยังมีราคาค่อนข้างสูงอยู่ในหลักหลายหมื่นบาท และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและบริการจากตัวแทนจำหน่ายในราคาค่อนข้างสูง จึงทำให้มีการใช้งานในจำนวนที่จำกัดทำให้ไม่สามารถขยายให้มีการใช้งานในส่วนสำนักงานพื้นที่ทำงานหรือที่พักอาศัยได้มากขึ้น

ในบทความฉบับนี้จะได้นำเสนอการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคาร สำหรับห้องปลอดความเป็นพิษด้วยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตที่ใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และเพื่อให้ได้เงื่อนไขของระบบบำบัดอากาศภายในอาคารสำนักงาน และห้องปลอดเชื้อที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์



รูปที่ 1 หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต [3]

## 2. หลักการและทฤษฎี

### 2.1 หลักการของการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคือเป็นวิธีการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองออกจากกระแสของแก๊ส โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จ (discharge electrode) และขั้วตกตะกอน (collection electrode) [10] เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดิสชาร์จและให้ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ขึ้น โดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ ไอออน (ions) และอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนา และทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นละอองแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้ จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน (ion to particle collisions) ไอออนจะเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นเป็นผลทำให้อนุภาคได้รับประจุ (particle charging) และอนุภาคที่มีประจุ (charged particle) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต จากนั้นอนุภาคที่ตกตะกอนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนด้วยวิธีการเคาะที่ขั้วตกตะกอน ซึ่งประสิทธิภาพการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (collection efficiency) จะขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุที่อนุภาคได้รับ ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเร็วของการไหลของอากาศภายในตัวตกตะกอน

### 2.2 สนามไฟฟ้าและการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field strength)  $E(r)$  ที่ระยะรัศมีใดๆ สามารถคำนวณได้จาก [11]

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(r_1/r_2)} \quad (1)$$

เมื่อ  $E(r)$  คือความเข้มสนามไฟฟ้า  $r$  คือระยะรัศมี  $r_2$  คือรัศมีของขั้วตกตะกอน  $r_1$  คือรัศมีของขั้วดิสชาร์จ และ  $V$  คือแรงดันไฟฟ้า สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset field strength) สามารถคำนวณได้จาก [12]

$$E_0 = E_s (\delta + A\sqrt{\delta/r_1}) \quad (2)$$

เมื่อ  $E_s$  คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (breakdown field) ในอากาศที่สภาวะปกติ ( $3.126 \times 10^6$  V/m สำหรับความดันบรรยากาศที่  $20^\circ\text{C}$ )  $A$  คือค่าคงที่เท่ากับ  $0.0266 \text{ m}^{1/2}$  และ  $\delta$  คือความหนาแน่นของอากาศที่ความดันบรรยากาศ ถ้าตัวตกตะกอนเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนบกันและไม่คิดผลของประจุค้าง (space charge effect) ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา  $V_0$  สามารถคำนวณได้จาก

$$V_0 = E_0 r_1 \ln(r_2/r_1) \quad (3)$$

และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วดิสชาร์จสามารถคำนวณได้จาก [12]

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0 Z_i V(V - V_0)}{r_2^2 \ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m และ  $Z_i$  คือค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออน (electrical mobility of ions) มีค่าเท่ากับ  $1.15 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/V s [2]

### 2.3 การอัดประจุอนุภาค

ในกรณีที่ไม่มีความเร็วไฟฟ้าใดๆ ปรากฏ อนุภาคจะถูกอัดประจุแบบแพร่กระจาย (diffusion charging) ดังนั้น ค่าประจุเฉลี่ย  $n_p$  ของการอัดประจุแบบแพร่กระจายสามารถหาได้จาก [2]

$$n_p = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln \left( 1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT} \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $d_p$  คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  $k$  คือค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ  $1.3806 \times 10^{-23}$  J/<sup>o</sup>K  $T$  คืออุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน  $K_E$  คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมบ์ (มีค่าเท่ากับ  $9.0 \times 10^9$  N.m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>)  $\bar{c}_i$  คือค่าความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากผลของอุณหภูมิของไอออน (mean thermal speed of ion) มีค่าเท่ากับ 240 m/s ที่สภาวะมาตรฐาน  $e$  คือค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ  $1.61 \times 10^{-19}$  C)  $N_i$  คือค่าความเข้มข้นของไอออน (ion number concentration) และ  $t$  คือเวลาในการอัดประจุ (charging time) โดยค่า  $N_i t$  สามารถคำนวณได้จาก [13]

$$N_i t = \frac{I(r_2^2 - r_1^2)}{2r Z_i e E Q} \quad (6)$$

เมื่อ  $Q$  คืออัตราการไหลของของไหล ส่วนในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าปรากฏภายในตัวตกตะกอนอนุภาคจะได้รับการอัดประจุด้วยสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก [2]

$$n_p = \left( \frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left( \frac{E d_p^2}{4K_E e} \right) \left( \frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (7)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวน (dielectric constant) ของอนุภาคและ  $E$  คือสนามไฟฟ้าภายในตัวตกตะกอน

### 2.4 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค

การเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle motion) ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประกอบด้วยแรงโมเมนตัม (momentum force)  $\vec{F}_T = -m\vec{a}$  แรงทางไฟฟ้า (electrical force)  $\vec{F}_E = n_p e \vec{E}$  และแรงเสียดลาก (drag force)  $\vec{F}_D = 3\pi\mu d_p w / C_c$  เมื่อ  $m$  คือมวลของอนุภาค  $\vec{a}$  คืออัตราเร่ง  $\mu$  คือความหนืดของของไหล  $w$  คือความเร็วไฟฟ้าสถิตปลาย (terminal electrostatic velocity) และ  $C_c$  คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม (Cunningham correction factor) โดยผลรวมของแรงที่กระทำบนอนุภาคทั้งหมดจะเท่ากับศูนย์  $\vec{F}_T + \vec{F}_E + \vec{F}_D = 0$  จากกฎของนิวตัน (Newton's law) ของอนุภาคจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ [13]

$$m \frac{dw}{dt} = n_p e E - 3\pi\mu d_p w \quad (8)$$

เมื่อ  $t$  คือเวลา โดยพิจารณาให้มวลของอนุภาคมีค่าน้อยมากๆ และเวลามีค่ามากกว่า  $10^{-2}$  s จะได้ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนคือ [13]

$$w = \frac{n_p e E C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (9)$$

### 2.5 การตกตะกอนของอนุภาค

ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค (collection efficiency)  $\eta$  ของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคือสัดส่วนของความแตกต่างระหว่างมวลของอนุภาค (particle mass) ที่ทางเข้า (inlet) และทางออก (outlet) ของตัวตกตะกอนต่อมวลของอนุภาคที่ทางเข้าของตัวตกตะกอน ถ้าสมมุติให้อนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (uniform) ตลอดทางเข้าของตัวตกตะกอนจะสามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch คือ [11]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{wA}{Q}\right) \quad (10)$$

เมื่อ  $A$  คือพื้นที่สำหรับการตกตะกอนอนุภาคของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

### 3. การออกแบบเครื่องบำบัดอากาศ

#### 3.1 เป้าหมายในการออกแบบเครื่องบำบัดอากาศ

ในบทความฉบับนี้มีเป้าหมายเพื่อออกแบบสร้าง และทดสอบสมรรถนะระบบบำบัดอากาศภายในอาคารและห้องปลอดความเป็นพิษโดยการใช้เทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต โดยใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และให้ได้เงื่อนไขของระบบบำบัดอากาศภายในอาคารสำนักงานและห้องปลอดเชื้อที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์ ดังนั้น

เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ เครื่องต้นแบบฯ ที่จะทำการพัฒนาขึ้นดังกล่าวจะต้องสามารถกำจัดฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5) ในอากาศภายในอาคารโดยให้มีระดับความเข้มข้นเชิงมวลลดลงได้ถึง 0.025  $\text{mg}/\text{m}^3$  (พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535) นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดเชื้อโรคต่างๆ เช่น แบคทีเรีย ไวรัส เชื้อรา สปอร์ สารตะกั่ว ควันทูหรี ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ช่วยสลายและทำลายก๊าซพิษบางชนิดดับกลิ่นเหม็นและกลิ่นอับชื้นได้ สามารถบำบัดอากาศได้เป็นระยะเวลายาวนานโดยไม่มีช่อมบำรุงหรือการถอดล้าง/เปลี่ยนอุปกรณ์ในขณะที่ทำงาน โดยต้นแบบฯ นี้ควรมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทนทาน เคลื่อนย้ายได้ง่าย เครื่องเดินเรียบ เสียงรบกวนน้อย และมีราคาต้นทุนในการสร้างถูก ตารางที่ 1 แสดงเกณฑ์ในการออกแบบโดยรวมของเครื่องบำบัดฯ ที่จะทำการพัฒนา

ตารางที่ 1 เกณฑ์ในการออกแบบโดยรวมของเครื่องบำบัดอากาศฯ

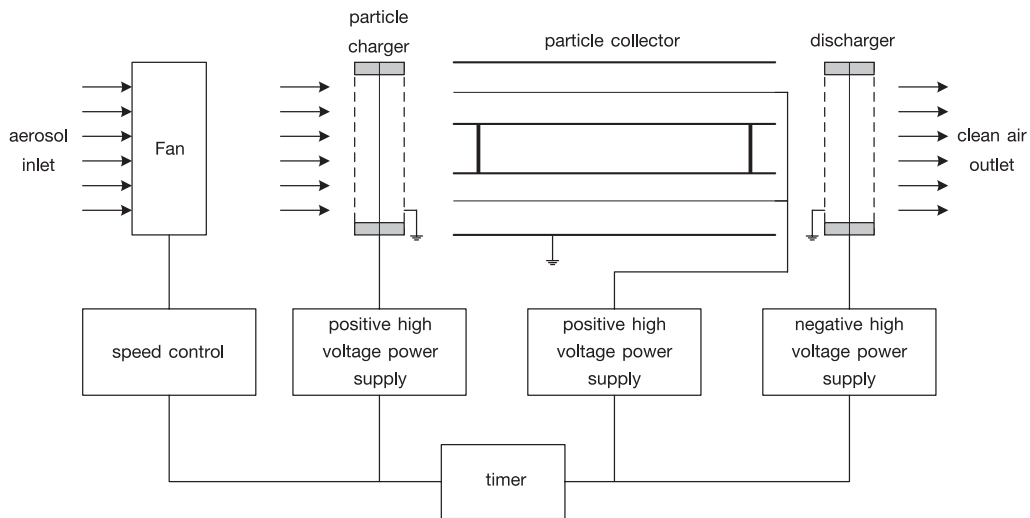
เกณฑ์ในการออกแบบ	คุณสมบัติ
วิธีการบำบัด	ไฟฟ้าสถิต
จำนวนชั้นตัวกรองอากาศ	3 ชั้น
การกำจัดอนุภาคฝุ่น	สามารถกำจัดอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า PM2.5
ขนาดห้องที่เหมาะสม	50 $\text{m}^2$
ตัวตั้งเวลาการใช้งาน	มี
ตัวปรับความเร็วของพัดลม	มี
แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	ไม่เกิน 8 kV
ขั้วแรงดันสูง	บวกลบ
แหล่งจ่ายไฟฟ้า	220 VAC 50 Hz
การใช้พลังงาน	ไม่เกิน 100 W
ขนาดมิติ	มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทนทาน เคลื่อนย้ายได้ง่าย
ราคา	ต่ำกว่า 10,000 บาท

รูปที่ 2 แสดงหลักการทำงานของต้นแบบบำบัดอากาศภายในอาคารและห้องปลอดความเป็นพิษที่จะทำการพัฒนาขึ้น เครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารฯ ที่จะพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองทางทฤษฎีสูงถึง 99 ถึง 99.99% สำหรับฝุ่นละอองระดับต่ำกว่า 2.5  $\mu\text{m}$  และมีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ โดยเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศ (fan)

ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค (particle charger) ชุดตกตะกอนอนุภาค (particle collector) และชุดดีสชาร์จ (discharger) ซึ่งการทำงานของเครื่องต้นแบบฯ จะใช้พัดลมดูดอากาศเข้าภายในระบบโดยผ่านชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบเส้นลวด-แผ่น (wire-to-plate type) เพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคจะทำให้อนุภาคฝุ่นละอองเกิดประจุไฟฟ้า (charged particles) หลังจากนั้นฝุ่นละอองและอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าสถิตเหล่านี้จะถูกนำเข้าไปยัง

ชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อ (multiple-tube type) ที่ประกอบด้วยขั้วตกตะกอนและขั้วดิสชาร์จ โดยขั้วดิสชาร์จจะถูกจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ในขณะที่ขั้วตกตะกอนมีศักย์เป็นกราวด์จะทำให้เกิดสนามโคโรนาดิสชาร์จขึ้นบริเวณรอบๆขั้วดิสชาร์จ เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองที่ถูกอัดประจุเข้ามาในชุดตกตะกอนนี้จะตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ที่ผนังด้านในของขั้วตกตะกอนและอากาศที่สะอาดผ่านออกมาผ่านชุดดิสชาร์จ

เพื่อดิสชาร์จให้อากาศมีความเป็นกลางของประจุไฟฟ้า และเพื่อเพิ่มคุณภาพอากาศที่กรองออกมาให้บริสุทธิ์เป็นธรรมชาติ ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้สามารถปรับความเร็วของอากาศได้และตั้งเวลาการทำงานได้ 24 ชั่วโมง และสามารถถอดล้างทำความสะอาดชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดตกตะกอนอนุภาค และชุดดิสชาร์จได้ตลอดอายุการใช้งาน โดยต้นแบบที่นำเสนอนี้ สามารถใช้งานง่ายและมีราคาถูก โดยค่าใช้จ่ายทั้งหมดประมาณ 10,000 บาท



รูปที่ 2 หลักการทำงานของต้นแบบบำบัดอากาศภายในอาคารและห้องปลอดความเป็นพิษที่จะพัฒนาขึ้น

### 3.2 รายละเอียดในการออกแบบ

#### 3.2.1 ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคและดิสชาร์จประจุไฟฟ้า

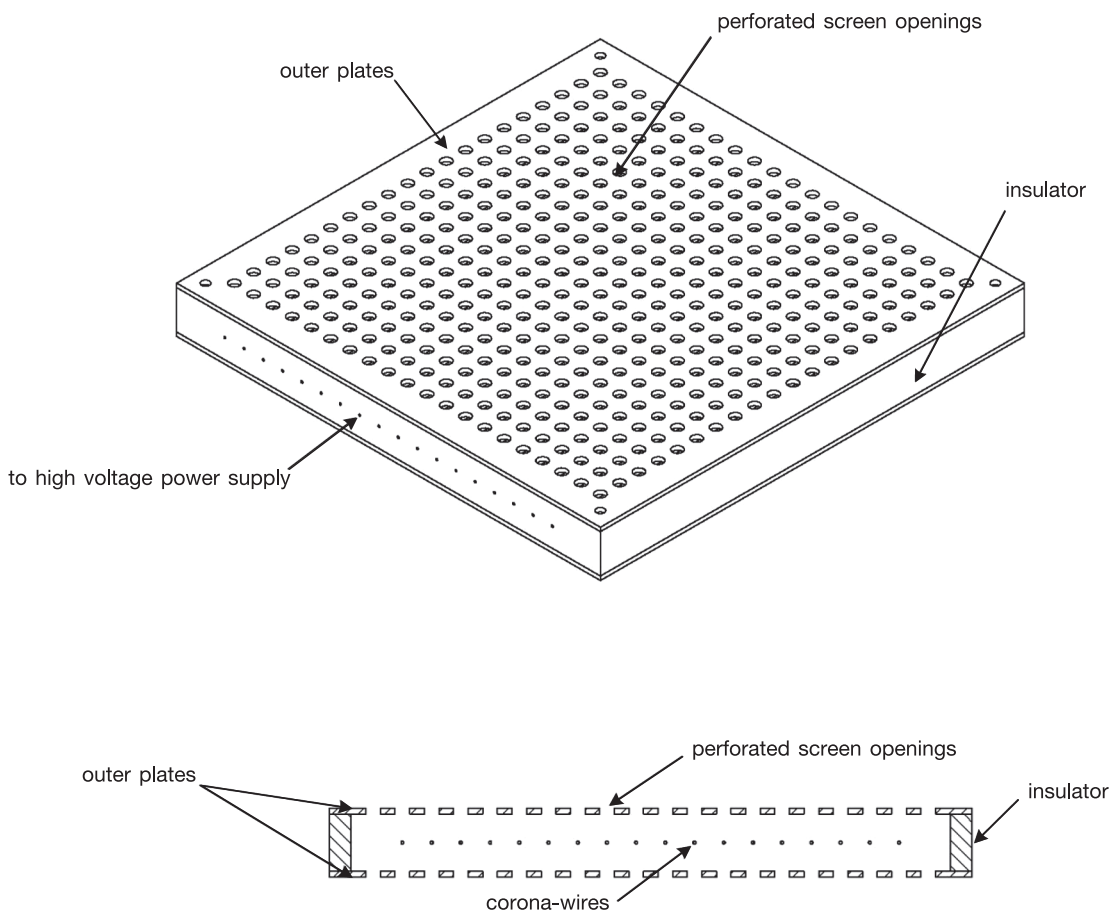
ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคจะทำหน้าที่ในการอัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคฝุ่นละอองเพื่อให้ฝุ่นละอองมีสภาพความเป็นประจุไฟฟ้าสูงสามารถตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตได้ง่าย ส่วนชุดดิสชาร์จประจุไฟฟ้าจะทำหน้าที่ในการดิสชาร์จอากาศที่ผ่านการตกตะกอนฝุ่นละอองไปแล้วให้มีสภาพเป็นกลางของประจุไฟฟ้า ซึ่งค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงไฟฟ้าสถิตของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนที่เป็นฟังก์ชันของประจุไฟฟ้าของอนุภาคและสนามไฟฟ้า [2, 10] ดังนั้นในการออกแบบชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคจึงต้องการให้ระดับประจุที่สูงประกอบด้วยมีความเข้มข้นของไอออนที่สูงและค่อนข้างคงที่ เนื่องจากมีการ

ให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (high voltage supply) จ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้กับเส้นลวดโคโรนาที่อยู่ด้านในเพื่อสร้างสนามโคโรนา (corona field) ที่มีความเครียดสูงภายในชุดให้ประจุฝุ่นละออง โดยอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูงสามารถป้องกันได้โดยการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงไว้ต่างหาก และการใช้วัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้าและการลัดวงจรไฟฟ้า

รูปที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้างของชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคและดิสชาร์จประจุไฟฟ้า โดยชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคและดิสชาร์จประจุไฟฟ้าในการศึกษานี้จะมีลักษณะเป็นแบบแผ่นขนานเส้นลวดที่ประกอบด้วยเส้นลวดสแตนเลสขนาด 1 mm จำนวน 18 เส้น วางขนานกับแผ่นสแตนเลสที่มีลักษณะเป็นรูปท่อนขนาด 5 mm

จำนวน 2 แผ่น โดยมีฉนวน Teflon เป็นตัวจับยึดเส้นลวดให้ตึงและแยกออกจากกันทางไฟฟ้า (electrical isolation) ระยะห่างระหว่างเส้นลวดเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นขนานเท่ากับ 10 mm โดยมีแหล่งไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงจ่ายแรงดันสูงให้กับเส้นลวดทั้งหมดและต่อกราวด์ให้กับแผ่นขนานทั้งสองแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงและทำให้เกิดการโคโรนาดิสชาร์จ เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองไหลผ่านเข้าไปในชุดอัดประจุไฟฟ้านี้ อนุภาคจะได้รับการอัดประจุอนุภาคโดยการแพร่และสนามไฟฟ้าโดยอนุภาคจะได้รับประจุจากการสัมผัสและเกาะติดของไอออนซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนไร้ทิศทาง (Brownian random motion)

และอนุภาคจะได้รับประจุโดยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ในลักษณะที่เส้นสนามไฟฟ้าจะวิ่งตัดกับอนุภาค โดยไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายไปตามเส้นสนามไฟฟ้าจะกระทบกับอนุภาคและเกาะติดกับอนุภาคด้วยแรงของประจุจินตภาพ (image charge force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับอนุภาคเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จำนวนประจุบนอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ที่เกิดจากประจุบนอนุภาคทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าเดิมจนเส้นสนามไฟฟ้าเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป เมื่อสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้น ไอออนจะไม่กระทบกับอนุภาคอีก และจะไม่เกิดการเพิ่มขึ้นของประจุบนอนุภาคอีก



(ข) ภาพตัดขวาง

รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างของชุดอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคและดิสชาร์จประจุไฟฟ้า

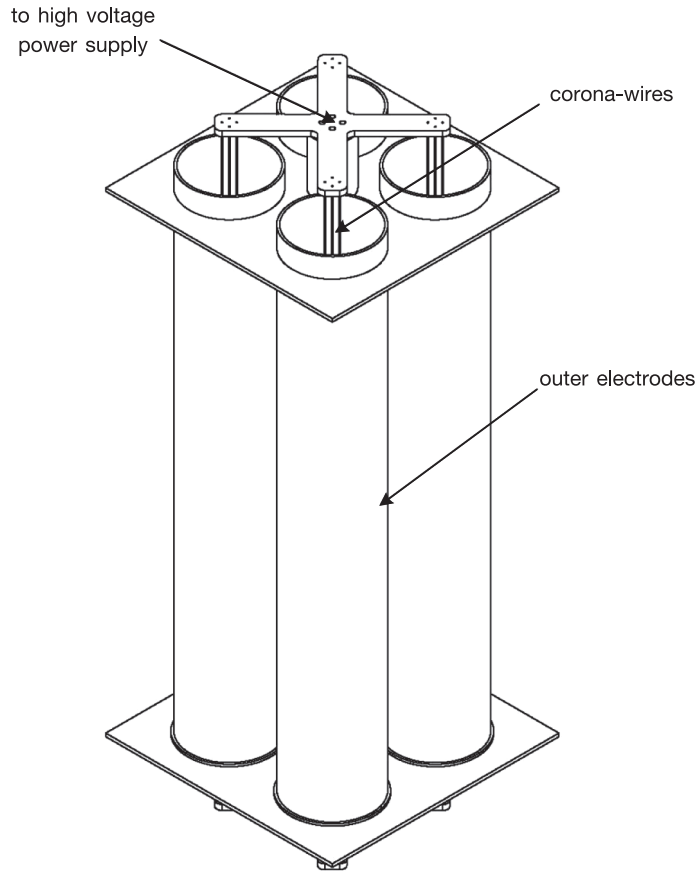


### 3.2.2 ชุดตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิต

หลักการดำเนินงานพื้นฐานของชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคือเป็นวิธีการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองออกจาก การไหลของแก๊ส โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จและขั้วตกตะกอน เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดิสชาร์จและให้ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จขึ้น โดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ ไอออนและอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนา และทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นละอองแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้ จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออนและไอออนจะเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นเป็นผลทำให้อนุภาคได้รับประจุและอนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการเคาะที่ขั้วตกตะกอน

ความต้องการขั้นพื้นฐานของการออกแบบชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในการศึกษานี้คือชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะต้องมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่สูงโดยไม่มี การสูญเสียของความดันอากาศ (pressure drop) ภายในและสามารถทำงานได้ตามคุณสมบัติที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้นได้ ชุดตกตะกอนที่จะสร้างขึ้นนี้จะต้องมีการป้องกันหรือความปลอดภัยจากอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูง

ด้วยการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ ไฟฟ้าแรงสูงใดๆ ออกจากกัน และการใช้วัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้าและการลัดวงจรไฟฟ้า ในการออกแบบชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในการศึกษานี้จะเป็นชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (wire-to-cylinder type) ที่ประกอบด้วยท่อตกตะกอนซึ่งมีลักษณะเป็นการนำท่อหลายอันมารวมกันวางเรียงกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการตกตะกอน (collection area) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้ทำจากท่อ สเตนเลสที่ประกอบด้วยท่อตกตะกอนแบบหลายท่อ (multiple-tube type) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 72.20 mm มีความยาว 500 mm จำนวน 4 ท่อ ซึ่งจะมีพื้นที่ในการตกตะกอนเท่ากับ 0.11 m<sup>2</sup> และแต่ละท่อตกตะกอนจะมีและขั้วดิสชาร์จที่ทำจากสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 mm มีความยาว 600 mm วางซ้อนกันแบบแกนร่วม (coaxial) ในการศึกษานี้จะออกแบบให้ขั้วดิสชาร์จ 4 เส้น ต่อ 1 ท่อตกตะกอน เพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและทำให้สนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดแนวระยะรัศมี [13] มีระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอนเท่ากับ 32.7 mm โดยขั้วดิสชาร์จจะถูกเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้าทุกขั้วและต่อเข้ากับขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่แยกออกจากกันทางไฟฟ้าด้วยฉนวน Teflon โดยขั้วดิสชาร์จจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงผ่านสายไฟฟ้าแรงสูงและขั้วตกตะกอนจะถูกต่อลงกราวด์



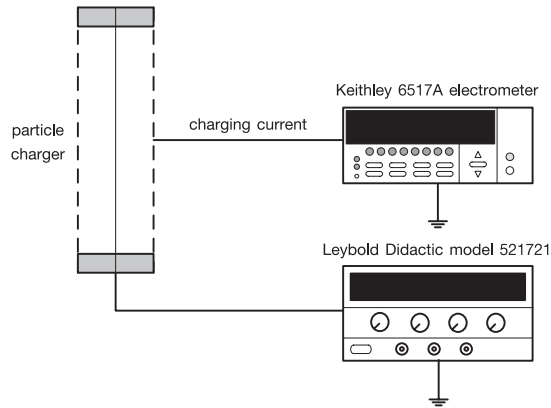
รูปที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ได้ออกแบบขึ้น

#### 4. ระเบียบวิธีการวิจัย

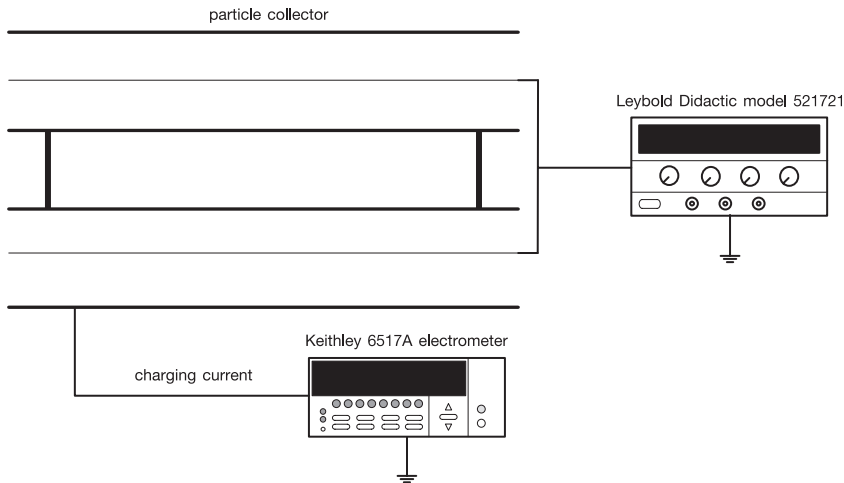
##### 4.1 การศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic characteristics) ของเครื่องต้นแบบฯ ที่ประกอบด้วย ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดิสชาร์จไอออน และชุดตกตะกอน จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นว่าสมรรถนะการทำงานของชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดิสชาร์จไอออน และชุดตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนภายในชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดิสชาร์จไอออน และชุดตกตะกอนและจากสมการที่ 6 จะเห็นค่า  $N/t$  จะเป็นฟังก์ชันของกระแสของไอออนหรือดิสชาร์จด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสไอออนหรือ

ดิสชาร์จ จากชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดิสชาร์จไอออน และชุดตกตะกอนที่ได้สร้างขึ้น รูปที่ 5 แสดงไดอะแกรมการศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จที่ขั้วดิสชาร์จของชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดิสชาร์จไอออน และชุดตกตะกอนจะถูกวัดโดยตรงด้วยมัลติมิเตอร์ของ Fluke โมเดล 289 True-rms และ อิเล็กโทรมิเตอร์แบบดิจิทัลของบริษัท Keithley โมเดล 6517A ผ่านขั้วตกตะกอนฯ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วดิสชาร์จอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 kV ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบปรับค่าได้ของบริษัท Leybold Didactic โมเดล 521721 และจะทำการทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่อุณหภูมิและความดันห้องทดลอง



(ก) ชุดอัดประจุไฟฟ้าและชุดดิสชาร์จไอออน



(ข) ชุดตกตะกอน

รูปที่ 5 โดอะแกรมการศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต

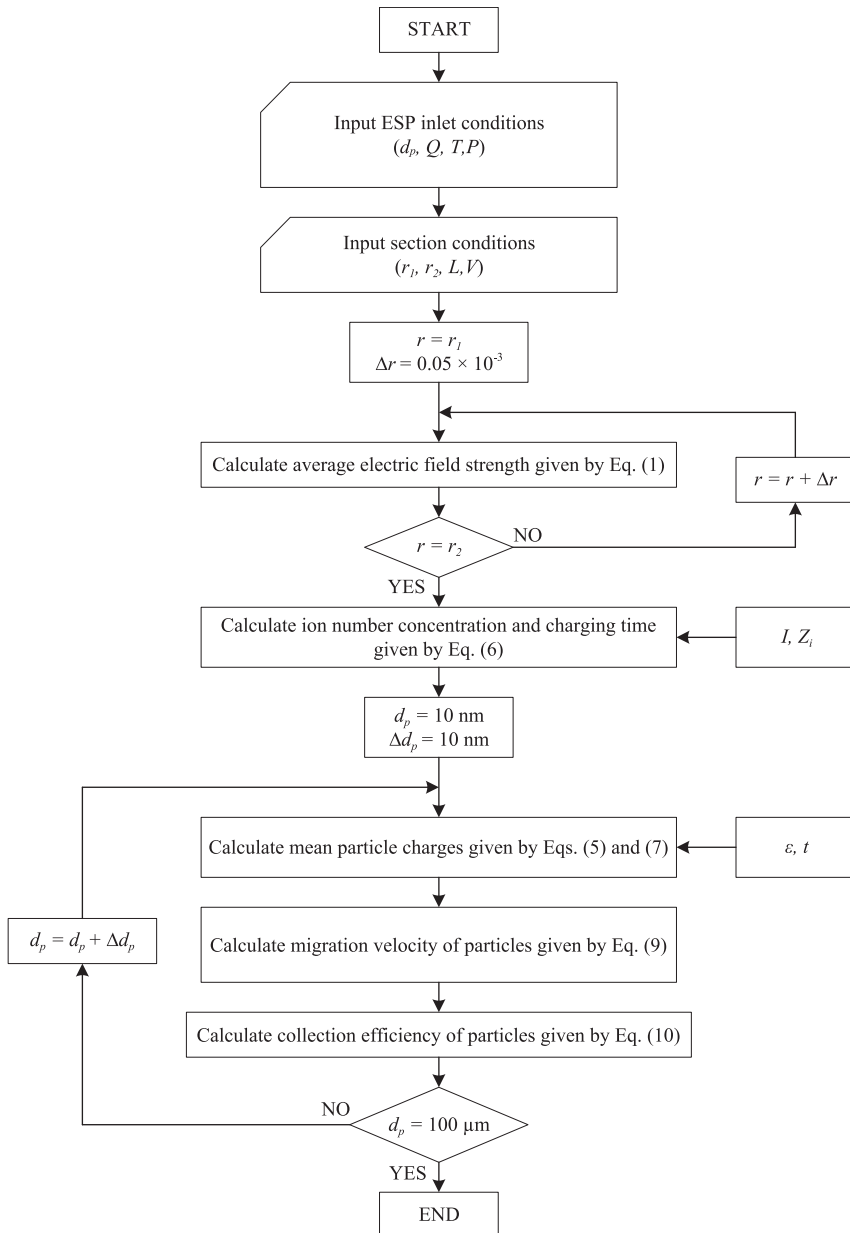
#### 4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค

ในการวิเคราะห์นี้จะสมมุติให้อากาศมีความหนาแน่น (density) เท่ากับ  $1.1614 \text{ kg/m}^3$  ความหนืดเท่ากับ  $1.846 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  และมีอุณหภูมิเท่ากับ  $30^\circ\text{C}$  และสมมุติให้ความเร็วของแก๊สทางเข้ามีค่าอยู่ในช่วง  $0.1 - 1 \text{ m/s}$  และรูปร่างของความเร็วของของไหลสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและให้อนุภาคมีประจุเป็นประจุบวก ในการวิเคราะห์ผลนี้จะใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ ซึ่งโดอะแกรมลำดับขั้นตอน

การวิเคราะห์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยอันดับแรกจะต้องกำหนดเงื่อนไขด้านขาเข้าของตัวตกตะกอนคือความเร็วในการไหลของแก๊ส ความดันและอุณหภูมิขณะทำงาน จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขภายในตัวตกตะกอน คือขนาดเรขาคณิตของเครื่องตกตะกอน แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดและสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าตลอดระยะรัศมีของตัวตกตะกอนด้วยสมการที่ 1 ต่อไปจะทำการคำนวณหาผลคูณของเวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับความเข้มข้นจำนวนของไอออนจากค่ากระแสไอออน ( $I$ ) และความ

สามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของไอออน ( $Z_i$ ) ด้วยสมการที่ 6 ต่อจากนั้นกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเริ่มต้นที่ 10 nm และคำนวณหาค่าการอัดประจุของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในตัวตกตะกอนจากสมการที่ 5 กับ 7 และทำการคำนวณความเร็วของอนุภาคและ

ประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ หลังจากนั้นจะเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นครั้งละ 10 nm ไปจนถึงขนาด 10,000 nm หรือ 10  $\mu\text{m}$  และคำนวณซ้ำจนครบ

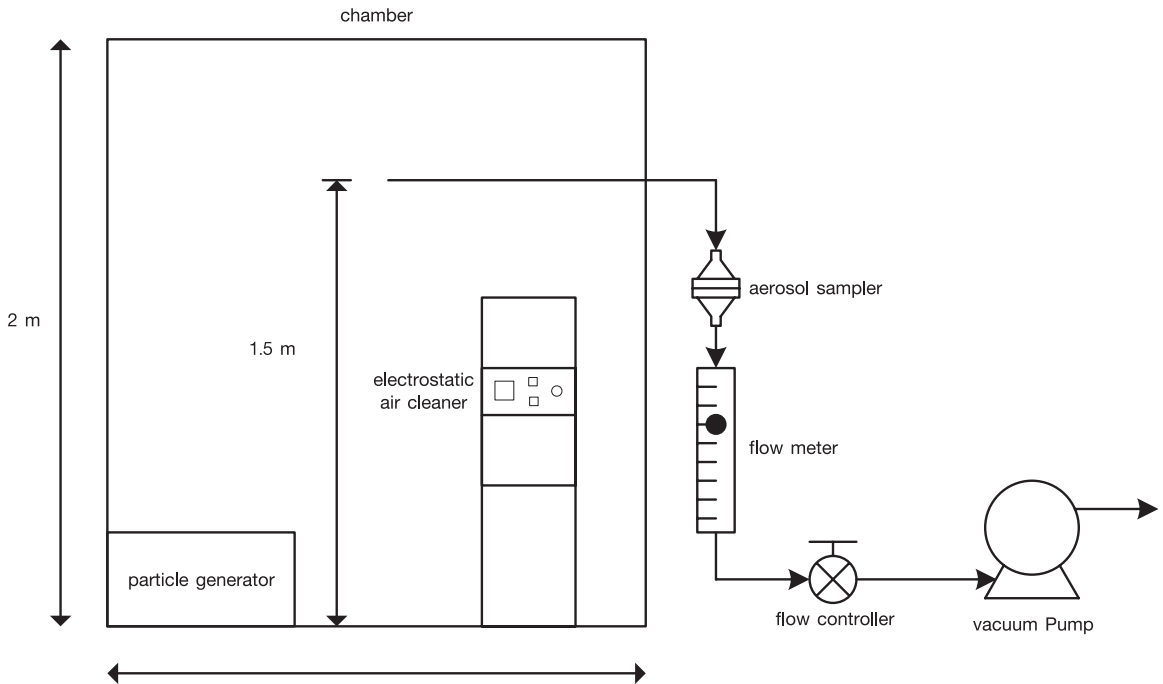


รูปที่ 6 ไตอะแกรมลำดับขั้นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอน

### 4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศ

โดยในการศึกษานี้ได้วางเครื่องต้นแบบฯ ภายในห้องจำลองขนาดมิติ 2 x 2 x 2 m (กว้าง x ยาว x สูง) ที่สร้างจากโครงสร้างท่อ PVC และคลุมด้วยพลาสติกใส เพื่อให้มีการมองเห็นควันอนุภาคฝุ่นได้ง่าย รูปที่ 7 แสดงไดอะแกรมการประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบฯ โดยอนุภาคฝุ่นควันตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพนี้จะเป็นการสร้างอนุภาคตัวอย่างจากการเผาไหม้ (combustion aerosol generator) แบบแพร่กระจายราบเรียบ (laminar diffusion burner) ด้วยน้ำมันที่สภาวะก่อนการเป็นเขม่า (presooting condition) โดยภายใต้สภาวะนี้เขม่าจะถูกสร้างโดยเปลวที่กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งจะให้ความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ต่ำมากๆ โดยการไหลของอากาศที่ตัดผ่านปลายของเปลวไฟ จะช่วยในการสร้างอนุภาคที่มีความเข้มข้นสูงและอากาศยังช่วยพาอนุภาคให้เคลื่อนที่ออกจากห้องเผาไหม้ โดยไอเสียจากเปลวไฟจะถูกผสมกับอากาศอย่างรวดเร็วโดยการใช้เครื่องเป่าอากาศ เพื่อทำให้เกิดอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงโดยปกติแล้วละอองลอยที่ได้จะมีความเข้มข้นจำนวนประมาณ  $10^{14}$  particles/m<sup>3</sup> โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยประมาณที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะอยู่ในช่วงขนาดเล็กกว่า 1  $\mu\text{m}$  ไปจนถึง 10  $\mu\text{m}$  [14] ในการทดสอบจะทำการพ่นหรือปล่อยอนุภาคฝุ่นควันตัวอย่างบริเวณมุมห้องทดสอบและปล่อยให้อนุภาคฝุ่นควันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วห้องทดสอบ โดยใช้เวลาในการพ่นประมาณ

10 นาที สำหรับการวัดและเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นภายในห้องทดสอบจะใช้วิธีมาตรฐานของ USEPA (40 CFR Parts 50 Appendix L) ซึ่งเป็นวิธีการอ้างอิงสำหรับการวัดของฝุ่นละออง PM<sub>2.5</sub> ในบรรยากาศ [15] โดยอนุภาคฝุ่นจะถูกเก็บตัวอย่างอากาศที่ความสูงประมาณ 1.5 เมตร โดยใช้ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละอองที่ประกอบด้วย ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาค (filter holder) แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง HEPA (high efficiency particulate-free air) ของบริษัท Whatman โมเดล EPM 2000 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm มีอัตราการในการกักเก็บอนุภาค (particle retention rating) ที่ 98% ที่ 0.3  $\mu\text{m}$  ชุดวัดและควบคุมการไหลของอากาศของ Dwyer และปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) และเก็บตัวอย่างที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที โดยจะเก็บตัวอย่างอนุภาคทุก 10 นาทีเป็นเวลา 70 นาที โดยไม่มีการเปิดเครื่องบำบัดอากาศฯ ต้นแบบ เพื่อเก็บตัวอย่างอากาศขณะที่ยังไม่มีการบำบัดอากาศ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองใหม่โดยพ่นอนุภาคตัวอย่าง แต่ครั้งนี้จะทำการเปิดเครื่องบำบัดต้นแบบฯ และทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคทุก 10 นาทีเป็นเวลา 70 นาที หลังจากนั้นจะนำอนุภาคที่สะสมตัวบนแผ่นกรองอนุภาคทั้งสองนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลของ Sartorius รุ่น Ohaus DV215CD semi microbalance ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิกรัม/ 0.1 มิลลิกรัม เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดหรือการกำจัดอนุภาคของเครื่องต้นแบบเทียบกับเวลาและทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 การทดลอง



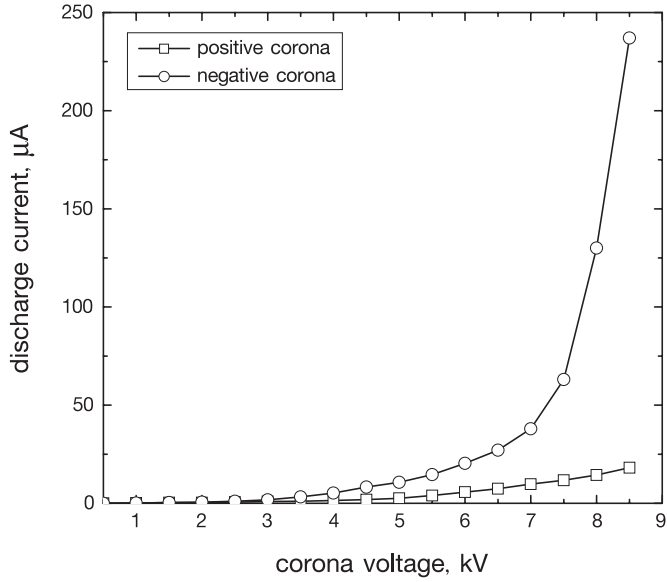
รูปที่ 7 โดอะแกรมการประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบฯ

## 5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

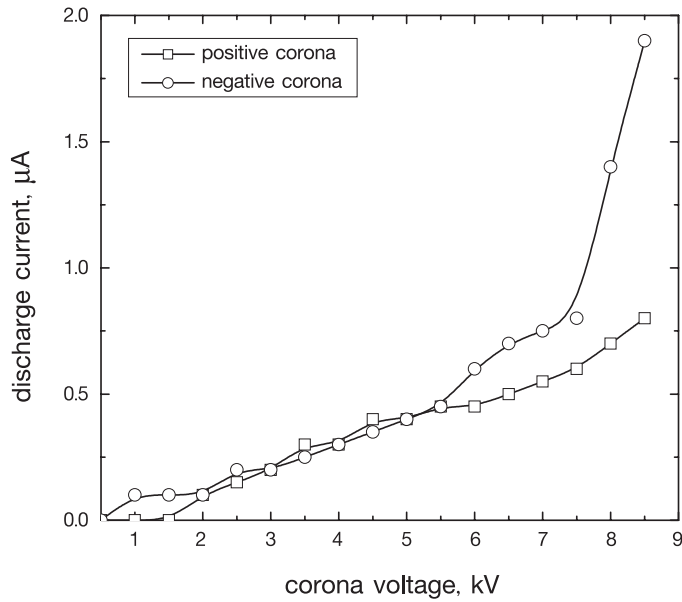
### 5.1 คุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต

ในการออกแบบชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคฝุ่น ชุดดิสชาร์จ และชุดตกตะกอนอนุภาคจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตเพื่อให้เข้าใจถึงสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์ดังกล่าว โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตจะบ่งบอกด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า (current-voltage relationship) ของชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคและชุดดิสชาร์จทั้งแบบโคโรนาบวกและลบที่แรงดันโคโรนาในช่วง 0 ถึง 9 kV จากรูปจะแสดงให้เห็นว่าค่ากระแสดิสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันโคโรนาที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 และ 4 kV สำหรับโคโรนาลบและบวก ตามลำดับ โคโรนาลบจะให้ค่ากระแสดิสชาร์จสูงกว่าโคโรนาบวกเนื่องจากโคโรนาลบมีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (electrical

mobility of ions) สูงกว่าโคโรนาบวกประมาณ 2 เท่า โดยค่ากระแสดิสชาร์จสูงสุดที่พบคือประมาณ 230 และ 40  $\mu\text{A}$  ที่แรงดันโคโรนาเท่ากับ 8.5 kV สำหรับโคโรนาลบและบวก ตามลำดับ รูปที่ 9 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของชุดตกตะกอนอนุภาคฝุ่น โดยค่ากระแสดิสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคโรนามีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปยังแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาของชุดตกตะกอนอนุภาคจะอยู่ที่ประมาณ 1.0 และ 1.5 kV สำหรับโคโรนาลบและบวก ตามลำดับ เนื่องจากค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออนลบมากกว่าไอออนที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจึงทำให้พบว่าค่ากระแสดิสชาร์จสูงสุดที่พบคือประมาณ 1.9 และ 0.75  $\mu\text{A}$  ที่แรงดันโคโรนาเท่ากับ 8.5 kV สำหรับโคโรนาลบและบวก โดยค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้จากชุดอัดประจุไฟฟ้า ชุดดิสชาร์จ และชุดตกตะกอนอนุภาคจะถูกนำมาใช้ประกอบการคำนวณหาประสิทธิภาพการอัดประจุไฟฟ้าและการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นต่อไป



รูปที่ 8 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคฝุ่น

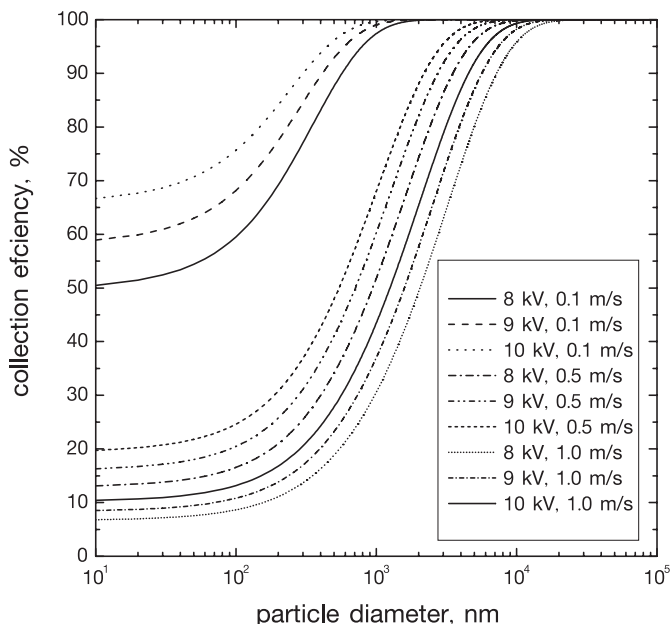


รูปที่ 9 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของชุดตกตะกอนอนุภาคฝุ่น

## 5.2 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค

รูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วดิสชาร์จ 8, 9 และ 10 kV และความเร็วของอากาศ 0.1, 0.5 และ 1 m/s ตามลำดับ จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงขึ้นตาม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงกับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในตัวตกตะกอนและจำนวนประจุของอนุภาค แต่แรงดันจะเพิ่มสูงขึ้นมากเกินไปอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown) ขึ้นระหว่างขั้วดิสชาร์จและขั้วตกตะกอน (แรงดันเบรกดาวน์ประมาณ 30 kV/cm ที่อุณหภูมิ

20°C และความดันบรรยากาศ 1 bar) จากรูปยังพบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมากขึ้นเนื่องจากจำนวนประจุบนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น และเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าลดลงเนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาคจึงทำให้จำนวนประจุที่อนุภาคได้รับมีค่าลดลงตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าสูงกว่า 99% เมื่ออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.5, 7 และ 18  $\mu\text{m}$  ที่ความเร็วของอากาศ 0.1, 0.5 และ 1 m/s ตามลำดับ



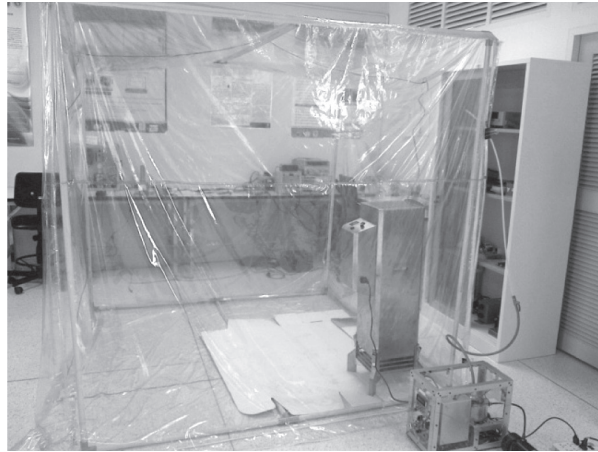
รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการตกตะกอนเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

## 5.3 ประสิทธิภาพการบำบัดอากาศ

รูปที่ 11 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคฝุ่นควันภายในห้องจำลองที่ตั้งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3 โดยรูปที่ 11 (ก) แสดงภาพถ่ายห้องจำลองในขณะที่ยังไม่มีการปล่อยอนุภาคควันเข้าไปในห้อง รูปที่ 11 (ข) แสดงภาพความเข้มของอนุภาคควันในห้องจำลองขณะยัง

ไม่ได้เปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 70 นาที และรูปที่ 11 (ค) แสดงภาพถ่ายห้องจำลองเมื่อขณะเปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 70 นาที ซึ่งจากรูปจะทำให้ทราบว่าเครื่องบำบัดอากาศสามารถลดความเข้มของอนุภาคควันภายในห้องจำลองลงได้

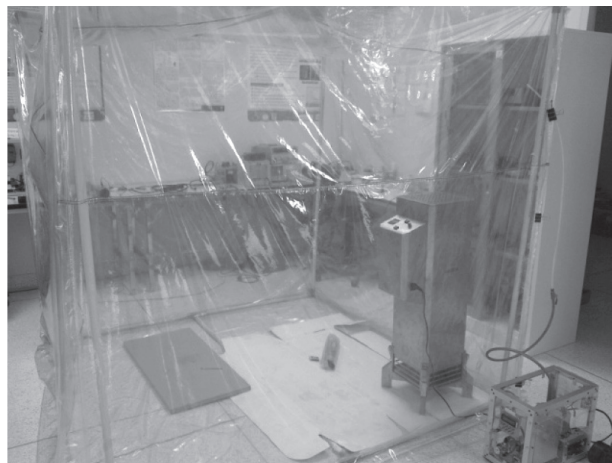




(ก) ก่อนทำการปล่อยอนุภาคควัน

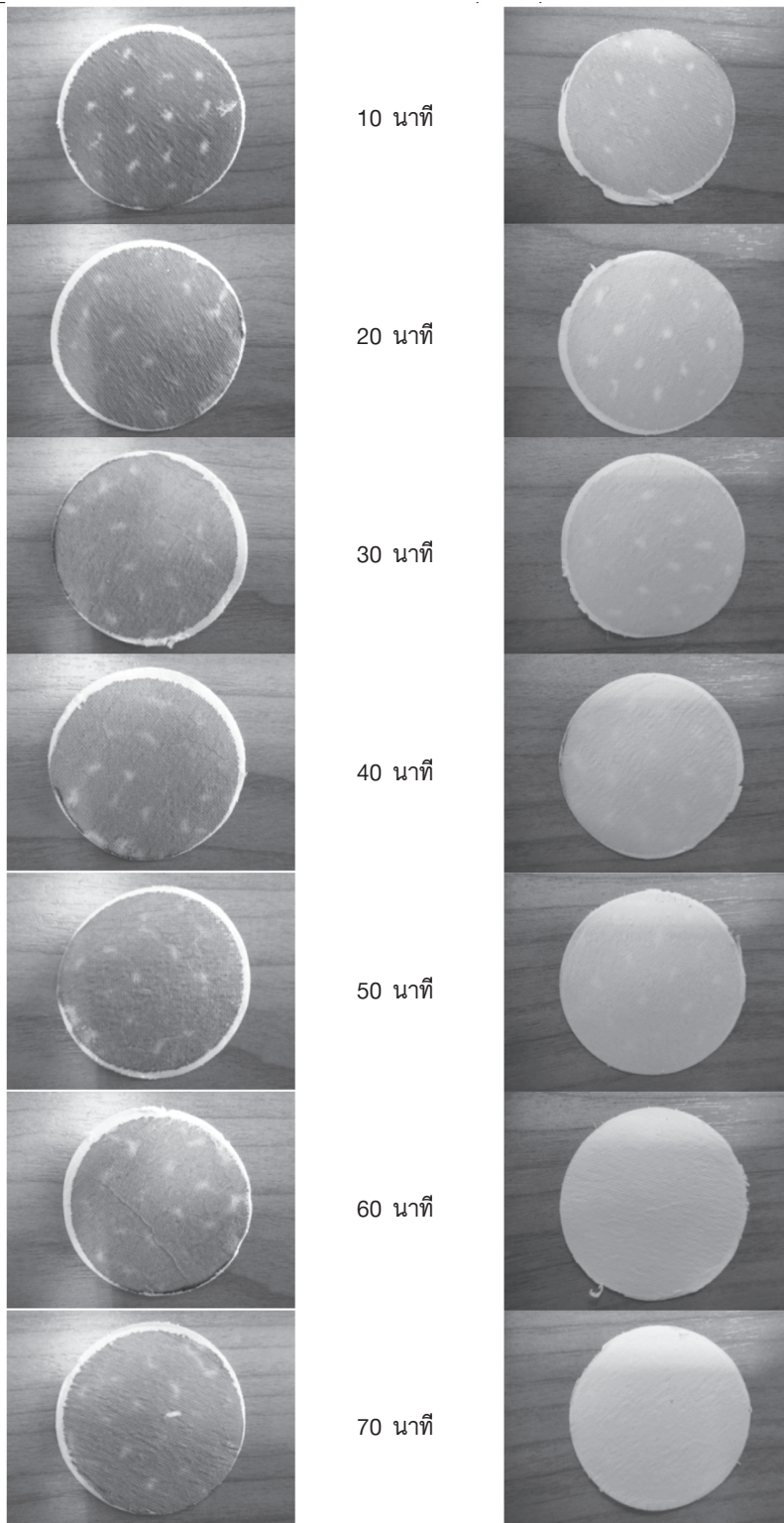


ข) ขณะยังไม่ได้เปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 70 นาที



(ค) ขณะเปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 70 นาที

รูปที่ 11 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคฝุ่นควันของเครื่องต้นแบบ



ก) ปิดเครื่องบำบัดอากาศฯ

ข) เปิดเครื่องบำบัดอากาศฯ

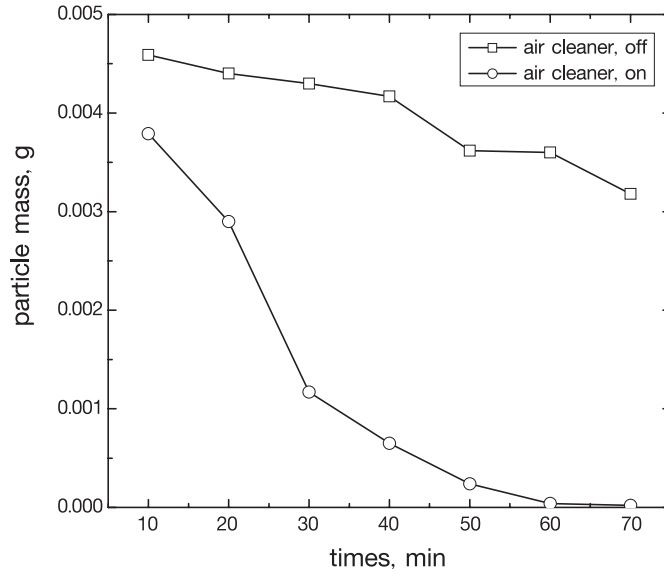
รูปที่ 12 การสะสมตัวของอนุภาคบนแผ่นกรองที่เวลาต่างๆ ขณะปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศฯ

รูปที่ 12 (ก) แสดงการสะสมตัวของอนุภาคบนแผ่นกรองที่เวลาต่างๆ ขณะปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ จากรูปจะสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้ว่าความเข้มข้นของอนุภาควันที่สะสมบนแผ่นกรองอนุภาคไม่ได้ลดลงตามเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง และรูปที่ 12 (ข) แสดงการสะสมตัวของอนุภาคบนแผ่นกรองที่เวลาต่างๆ ขณะเปิดเครื่องบำบัดอากาศเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ จากรูปจะสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้ว่าความเข้มข้นของอนุภาควันที่สะสมบนแผ่นกรองอนุภาคมีการลดลงอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับมวลของอนุภาคที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 รูปที่ 13 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของอนุภาควันที่เทียบกับเวลาขณะปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ จากรูปพบว่าในขณะที่ปิดเครื่องบำบัดอากาศมวลของอนุภาคที่เก็บตัวอย่างได้ในแต่ละเวลามีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งการลดลงของมวลอนุภาคที่เล็กน้อยนี้อาจจะเนื่องมาจากการแพร่กระจายไปเกาะและสะสมตัวที่ผิวด้านในของพลาสติกที่คลุมและมีการตกตะกอนด้วย

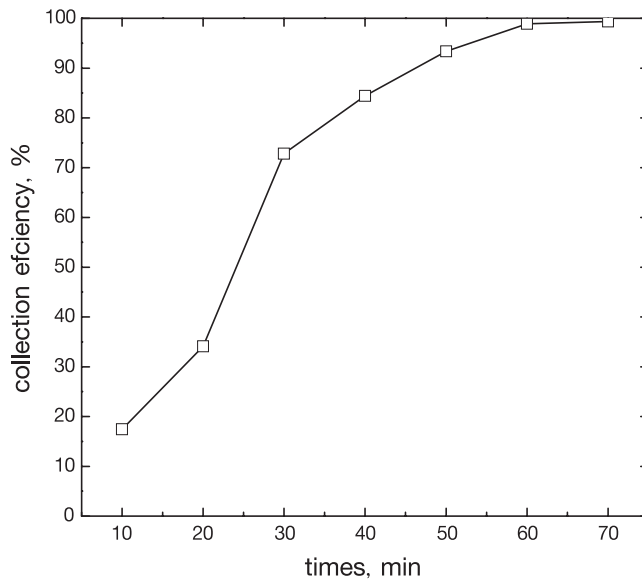
แรงโน้มถ่วงของโลกลงบนพื้นของห้องจำลอง โดยมวลของอนุภาควันที่พบมีค่าเท่ากับ 0.00459, 0.00440, 0.00430, 0.00417, 0.00362, 0.00360 และ 0.00318 g ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ และในขณะที่เปิดเครื่องบำบัดอากาศ พบว่ามวลของอนุภาควันที่เก็บตัวอย่างได้มีค่าลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมวลของอนุภาควันที่มีค่าเท่ากับ 0.00379, 0.00290, 0.00117, 0.00065, 0.00024, 0.00004 และ 0.00002 g ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ รูปที่ 14 แสดงกราฟประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องบำบัดอากาศเทียบกับเวลา ซึ่งค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคจะหาได้จากสัดส่วนระหว่างมวลของอนุภาคตัวอย่างในขณะที่ปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลาต่างๆ จากรูปพบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องบำบัดอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น โดยเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะให้ประสิทธิภาพในตกตะกอนหรือการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99% ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที

ตารางที่ 2 มวลของอนุภาควันที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง

เวลา (นาที)	ขณะปิดเครื่อง			ขณะเปิดเครื่อง		
	แผ่นกรอง เปล่า	แผ่นกรอง อนุภาคแล้ว	มวลอนุภาค	แผ่นกรอง เปล่า	แผ่นกรอง อนุภาคแล้ว	มวลอนุภาค
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
10	0.06073	0.06532	0.00459	0.05812	0.06191	0.00379
20	0.06029	0.06469	0.00440	0.05890	0.06180	0.00290
30	0.05849	0.06279	0.00430	0.05843	0.05960	0.00117
40	0.05848	0.06265	0.00417	0.05875	0.05940	0.00065
50	0.05896	0.06258	0.00362	0.05801	0.05825	0.00024
60	0.05882	0.06242	0.00360	0.05906	0.05910	0.00004
70	0.05851	0.06169	0.00318	0.05852	0.05854	0.00002



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของอนุภาคควันเทียบกับเวลาขณะปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศ



รูปที่ 14 กราฟประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องบำบัดอากาศเทียบกับเวลา

## 6. สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบ พัฒนา และทดสอบสมรรถนะต้นแบบเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต โดยต้นแบบประกอบด้วย ชุดอัดประจุไฟฟ้า อนุภาค ชุดตกตะกอนอนุภาค ชุดสร้างไอออน พัฒลมุดอากาศ ตัวควบคุมความเร็ว ตัวตั้งเวลา และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิต วิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคและทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบ จากการศึกษาการทดลองคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าสถิตพบว่าค่ากระแสดีสชาร์จที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันโคโรนาที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 และ 4 kV สำหรับโคโรนาลบและบวก ตามลำดับ โคโรนาลบจะให้ค่ากระแสดีสชาร์จสูงกว่าโคโรนาลบโดยค่ากระแสดีสชาร์จสูงสุดที่พบคือประมาณ 230 และ 40  $\mu\text{A}$  ที่แรงดันโคโรนาเท่ากับ 8.5 kV สำหรับโคโรนาลบและบวก ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วดีสชาร์จและความเร็วของอากาศพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงขึ้น โดยค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมากขึ้นและเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าลดลง โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนมีค่าสูงกว่า 99% เมื่ออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.5, 7 และ 18  $\mu\text{m}$  ที่ความเร็วของอากาศ 0.1, 0.5 และ 1 m/s ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคฝุ่นควันภายในห้องจำลองขนาดมิติ 2 x 2 x 2 m ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะให้ประสิทธิภาพในตกตะกอนหรือการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99% ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที

ซึ่งต้นแบบเครื่องบำบัดอากาศฯ ที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในโรงพยาบาลที่ต้องการขยายหรือเพิ่มจำนวนห้องปลอดความเป็นพิษให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ป่วย และในที่พักอาศัยของประชาชน

หรือผู้ที่เจ็บป่วยด้วยโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ โรคปอดอักเสบ และโรคทางเดินหายใจอื่นๆ เช่น โรคภูมิแพ้ โรคหอบหืด สำหรับแนวทางในการพัฒนาวิจัยต่อไปในอนาคต คณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาทั้งในส่วนของทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรค โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย และกลิ่นต่างๆ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องบำบัดอากาศฯ ต้นแบบกับเครื่องเครื่องบำบัดอากาศฯ ที่มีขายในท้องตลาดเพื่อเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบมากยิ่งขึ้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ รหัสโครงการ MT-RD-2554-03

## 8. เอกสารอ้างอิง

1. USEPA, 1998, "PM 2.5 General Information", Office of Air Quality Planning and Standards.
2. Hinds, W.C., 1999, "Aerosol Technology", John Wiley and Sons, New York.
3. Intra, P., 2010, "Electrostatic System for Clean Air", NSTDA Northern Network, Chiang Mai. (in Thai)
4. 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*, Vol. 29, pp. 774 – 780.
5. Haslerm P. and Nussbaumer, T.H., 1999, "Gas Cleaning for IC engine Applications from Fixed Bed Biomass Gasification", *Biomass & Bioenergy*, Vol. 16, 385 – 395.
6. Kim, S.H. and Lee, K.W., 1999, "Experimental Study of Electrostatic Precipitator Performance and Comparison with Existing Theoretical Prediction",

*Journal of Electrostatics*, Vol. 48, pp. 3 – 25.

7. Mizuno, A., 2000, "Electrostatic Precipitation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7(5), pp. 615 – 624.

8. Okubo, M., Yamamoto, T., Kuroki, T., Fukumoto, H., 2001, "Electric Air Cleaner Composed of Nonthermal Plasma Reactor and Electrostatic Precipitator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, pp. 1505 - 1511.

9. Jaworek, A., Krupa, A. and Czech, T., 2006, "Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning: A Brief Review", *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, pp. 133 – 155.

10. White, H.J., 1963, "Industrial Electrostatic Precipitation", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

11. Chang, J., Kelly, A.J., and Crowley, J.M., 1995, "Handbook of Electrostatic Processes", Marcel Dekker, Inc., New York.

12. Parker, K.R., 1997, "Applied Electrostatic Precipitation", Blackie Academic & Professional, New York.

13. Intra, P., Limueadphai, P. and Tippayawong, N., 2010, "Particulate Emission Reduction from Biomass Burning in Small Combustion Systems with a Multiple Tubular Electrostatic Precipitator", *Particulate Science and Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 547 – 565.

14. Yawootti, A., Intra, P. and Tippayawong, N., 2010, "A Combustion Aerosol Generator for Submicron Aerosol Production", *3<sup>rd</sup> Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Nong Khai, Thailand, 4 – 6 March.

15. USEPA, 1997, "40 CFR Parts 50 Appendix L; Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM<sub>2.5</sub> in the Atmosphere", *Federal Register*, Vol. 62, No. 138, pp. 38714 - 38752.