KKU Journal for Public Health Research วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
Vol.15 No.1 January – March 2022 ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มีนาคม 2565

บทความปริทัศน์

การเปรียบเทียบเครื่องกรองอากาศระดับเมือง เพื่อกำจัดฝุ่น PM2.5

ดิลก เกียรติ์เลิศนภา[1]

วันที่ได้รับต้นฉบับ: 27 เมษายน 2564
วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 23 กันยายน 2564

(1) สำนักนวัตกรรมการสอนและการศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยพายัพ เชียงใหม่

บทคัดย่อ

ในหลายประเทศได้เริ่มพัฒนาใช้เครื่องกรองอากาศระดับเมือง (Metropolitan Air Purifier) เพื่อลดปริมาณหมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ในพื้นที่กลางแจ้ง โดยอาศัยหลักการ และเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการทำงาน ประสิทธิภาพ และความเหมาะสมของเครื่องกรองอากาศระดับเมือง 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) และเครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ (Venturi Scrubbers) โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องกรองอากาศต้นแบบที่มีการพัฒนาในปัจจุบัน โดยพิจารณา ประสิทธิภาพการกรอง PM10 และ PM2.5 ขนาด อัตราการกรอง พื้นที่การกรอง กำลังไฟฟ้า และ ราคา

ผลปรากฏว่า เครื่องต้นแบบของมูลนิธิราชประชานุเคราะห์มีประสิทธิภาพในการกรอง PM2.5 ได้มากกว่าเครื่องกรองอากาศ Smog Free Tower และเมื่อเทียบอัตราการกรอง เครื่องกรองอากาศ Xi'an Model มีอัตราการกรองสูงที่สุด รองลงมาคือ Smog Free Tower และ BMA Model ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตัวเครื่องปรากฏว่า เครื่องกรองอากาศ IonFresh มีอัตราการกรองที่สูงที่สุด รองลงมาคือ Smog Free Tower และ BMA Model ตามลำดับ ความสามารถในการกรองครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างที่สุดคือเครื่องกรอง Xi'an Model รองลงมาคือ เครื่องกรองต้นแบบของมูลนิธิราชประชานุเคราะห์ และ Smog Free Tower ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาร่วมกับมูลค่าการลงทุนแล้ว เครื่องกรอง Xi'an Model นั้นมีการลงทุนที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ครอบคลุมของการกรอง รองลงมาคือ เครื่องต้นแบบของรังสรรค์ และ BMA Model ตามลำดับ ทั้งนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงานในการกรอง เนื่องจากมีเพียงเครื่องกรองอากาศ Smog Free Tower เท่านั้นที่ระบุกำลังไฟฟ้า

คำสำคัญ: *ฝุ่นละอองขนาดเล็ก, เครื่องกรองอากาศ, แผ่นกรองเฮปป้า, ไฟฟ้าสถิต, เวนทูรี่สคับเบอร์*

KKU Journal for Public Health Research วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
Vol.15 No.1 January – March 2022 ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มีนาคม 2565

Review Article

Comparative Guide of PM2.5 Metropolitan Air Purifier

Dilok Kiatlertnapha[(1)]

Received Date: April 27, 2021
Accepted Date: September 23, 2021

(1) Teaching Innovation and General Education Office, Payap University, Chiangmai

Abstract

Many countries are developing metropolitan air purifier to reduce level of smog, toxic fumes, and small particulate matter (PM2.5) in outdoor areas by using various techniques. This article has analyzed process, efficiency, and suitability of three types of metropolitan air purifier: HEPA filter air purifier, Electrostatic air purifier, and Venturi Scrubbers air purifier. A prototype of each type is accessed by considering its efficiency of filtering PM10 and PM2.5, size, filtration rate, coverage area, electric power consumption, and price.

The results show that Rajaprajanugron Foundation's prototype has higher efficiency of PM2.5 filtration than Smog Free Tower. Concerning filtration rates, the Xi'an Model has the highest filtration rates, followed by the Smog Free Tower and the BMA Model respectively. However, when consider their sizes, IonFresh has the highest filtration rates, followed by Smog Free Tower and BMA Model respectively. Concerning coverage area, Xi'an Model has the widest, followed by Rajaprajanugron Foundation's prototype and Smog Free Tower respectively. When considering coverage area together with investment, Xi'an Model requires lowest investment comparing to filtration coverage area, followed by Rangsan's prototype and BMA Model. However, it is not possible to compare power consumption because only Smog Free Tower specifies its electric power.

Keywords: *PM2.5, HEPA Filter, Electrostatic, Venturi Scrubbers*

บทนำ

หมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็กมีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน โดยเฉพาะผู้สูงอายุ เด็กเล็ก หญิงตั้งครรภ์ และผู้มีโรคประจำตัว เช่น โรคทางเดินหายใจ โรคเยื่อบุตาอักเสบ โรคผิวหนัง โรคหัวใจและหลอดเลือด เป็นต้น ฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) จะสามารถเข้าไปในระบบทางเดินหายใจได้ ส่วนอนุภาคที่เล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) จะเข้าสู่กระแสเลือดได้ทันที ซึ่งอนุภาคทั้งสองชนิดส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสุขภาพ

การป้องกันอันตรายจากหมอกควัน ควันพิษ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 คือ อยู่ในอาคาร บ้านเรือน ที่ปิดประตูหน้าต่างมิดชิด เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นละอองจากภายนอก เข้ามาในอาคาร บ้านเรือน และหากต้องการลดปริมาณฝุ่นละอองภายในอาคาร บ้านเรือน ควรติดตั้งเครื่องกรองอากาศภายในอาคาร หากมีความจำเป็นที่จะต้องออกนอกอาคาร บ้านเรือน ควรสวมหน้ากากอนามัย หรือหน้ากากกันฝุ่นที่มีประสิทธิภาพ (N95) ซึ่งการสวมหน้ากากกันฝุ่นนั้นอาจทำให้รู้สึกอึดอัด เพราะหายใจได้ลำบากกว่าปกติ ทั้งนี้ภาครัฐและภาคเอกชนได้พยายามร่วมมือกันดำเนินการต่างๆ เพื่อลดอันตรายจากหมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 ในพื้นที่โล่ง เช่น การประกาศปิดโรงเรียนและสถานศึกษาต่างๆ การฉีดพ่นละอองน้ำในอากาศ ทั้งการฉีดในพื้นที่โล่ง และการฉีดลงมาจากอาคารสูงของเอกชน

ทั้งนี้ในหลายประเทศ เริ่มมีการใช้เครื่องกรองอากาศระดับเมือง (Metropolitan Air Purifier) เพื่อกำจัดหมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 ในพื้นที่กลางแจ้ง ซึ่งเครื่องกรองอากาศระดับเมืองนี้จะต้องมีความสามารถในการบำบัดอากาศให้สะอาดได้ในปริมาณที่มาก รวดเร็ว และคุ้มค่า ซึ่งแบ่งเป็นประเภทต่างๆ หลายประเภท เช่น

1) เครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA
2) เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)
3) เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ (Venturi Scrubbers)

ในเอกสารฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการทำงาน ประสิทธิภาพ และความเหมาะสมของเครื่องกรองอากาศระดับเมืองทั้ง 3 ประเภท เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนานำไปใช้ต่อไป

เครื่องกรองอากาศแบบต่าง ๆ

1. เครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA

เครื่องกรองอากาศประเภทนี้เป็นเครื่องกรองอากาศที่มีหลักการทำงานที่ง่ายที่สุด คือใช้พัดลมดูดอากาศที่ไม่บริสุทธิ์ ผ่านไปยังแผ่นกรอง HEPA (High Efficiency Particulate Air) ที่มีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นที่สูงกว่าแผ่นกรองแบบปกติ สามารถดักจับฝุ่นที่มีอนุภาค 0.3 ไมครอน ได้อย่างน้อย 99.97% ด้วยวัสดุที่ทำจากเทคโนโลยีเส้นใยขั้นสูง ทำให้สามารถดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ แม้แต่แบคทีเรียและเชื้อราที่ลอยอยู่ในอากาศได้ เครื่องกรองอากาศประเภทนี้เริ่มพัฒนาและนำมาใช้ในห้อง Clean Room ในห้องผ่าตัดในโรงพยาบาล อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์บางประเภท

เครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA เหมาะกับการใช้กรองอากาศภายในอาคารหรือพื้นที่ปิดมากกว่าใช้นอกอาคารหรือพื้นที่เปิด แต่กรุงเทพมหานครฯ ได้พัฒนาและติดตั้งเครื่องกรองอากาศระดับเมืองขึ้น โดยสร้างเป็นหอ กรองอากาศชนิดที่ใช้แผ่นกรอง HEPA ขนาดความสูง 4 เมตร บริเวณหน้าห้างสรรพสินค้าแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ ดังแสดงในรูปที่ 1 ในโครงการนำร่องเพื่อต่อสู้กับ PM2.5 หรือฝุ่นละอองขนาดเล็ก ปกคลุมเมือง (Bangkok Post Public Company, 2019) เครื่องกรองอากาศนี้มีอัตราการบำบัดอากาศ 17,000 ลบ.ม./ชั่วโมง ครอบคลุมพื้นที่ 1,000 ตารางเมตร พัฒนาและ

ร่วมลงทุนโดยบริษัทเอกชนและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในราคา 5.3 ล้านบาท

ข้อจำกัดของเครื่องกรองอากาศประเภทนี้คือ แผ่นกรองอากาศจะต้านความเร็วลมที่ไหลผ่าน และเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ฝุ่นละอองที่ถูกดักจับอยู่ในเส้นใยที่ผสานกันอย่างหนาแน่นจะทำให้เกิดการอุดตัน และทำให้อากาศไหลผ่านแผ่นกรองได้ช้าลง การทำงานของมอเตอร์พัดลมดูดอากาศต้องทำงานหนักมากขึ้น (ใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น) เพื่อพยายามดูดอากาศให้ผ่านแผ่นกรองที่เริ่มอุดตัน โดยปกติแล้วแผ่นกรองอากาศ HEPA จะมีอายุการใช้งานประมาณ 4–5 ปี และด้วยแผ่นกรองอากาศ HEPA ทำมาจากวัสดุไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) จึงไม่สามารถทำความสะอาดได้ด้วยการซักล้าง ด้วยผงซักฟอกหรือน้ำยาทำความสะอาดได้ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศ HEPA ใหม่เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด ทำให้เครื่องกรองอากาศประเภทนี้มีต้นทุนเพิ่มในการเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศใหม่เมื่อแผ่นกรองอุดตัน ซึ่งจะมีระยะเวลาประมาณ 1–2 ปี

ในขณะที่เมืองซีอาน มณฑลส่านซี ประเทศจีน ได้สร้างเครื่องกรองอากาศชนิดที่ใช้แผ่นกรอง HEPA เป็นหอคอยขนาดใหญ่ มีความสูง 100 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถกรองหมอกควัน ควันพิษ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก และ PM2.5 ในพื้นที่ 10 ตารางกิโลเมตร ในอัตราประมาณ 10 ล้าน ลบ.ม./วัน โดยใช้พลังงานไฟฟ้าในการดูดอากาศเพียงเล็กน้อย พัฒนาโดยนักวิจัยของสถาบันสิ่งแวดล้อมโลกที่ Chinese Academy of Sciences หอคอยนี้ลงทุนพัฒนาและก่อสร้างด้วยเงินประมาณ 63 ล้านบาท (Chen, 2018) หลักการทำงานของหอคอยขนาดใหญ่นี้คือ อากาศเสียจะถูกดูดเข้าไปในโรงเรือนขนาดใหญ่ (ประมาณครึ่งหนึ่งของสนามฟุตบอล) รอบๆ ฐานของหอคอย โดยอาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบกับหลังคาของโรงเรือน อากาศร้อนในโรงเรือนจะลอยผ่านขึ้นไปบนหอคอยในขณะเดียวกันอากาศที่อยู่รอบโรงเรือนด้านนอกจะถูกดูดเข้าไปแทนที่ อากาศที่ไหลผ่านขึ้นไปบนหอคอยจะผ่านแผ่นกรอง HEPA หลายชั้นซึ่งสามารถกรอง PM10 และ PM2.5 เพื่อบำบัดอากาศให้สะอาด และปล่อยออกมาทางปลายยอดของปล่อง

ถึงแม้เครื่องกรองอากาศระดับเมืองที่เมืองซีอาน มณฑลส่านซี ประเทศจีน จะมีข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งานของแผ่นกรองอากาศที่จะต้องเปลี่ยนทุกๆ 4-5 ปี เหมือนกับเครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA ทั่วไป แต่การออกแบบการทำงานของหอคอยให้สามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ถือว่าเป็นการสร้างเครื่องกรองอากาศระดับเมืองที่คุ้มค่าและยั่งยืนในระยะยาว อีกทั้งยังเป็นจุดแลนด์มาร์คของเมืองที่สามารถพัฒนาเป็นสถานที่ท่องเที่ยวต่อไปได้

2. เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)

เครื่องกรองอากาศประเภทนี้ใช้แรงทางไฟฟ้าในการแยกอนุภาคออกจากอากาศที่ไม่บริสุทธิ์ โดยใส่ประจุไฟฟ้าให้อนุภาคที่ปะปนอยู่ในอากาศเสีย (Ionizer) และเมื่ออากาศเสียไหลผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้า อนุภาคเหล่านั้นจะถูกแรงทางไฟฟ้าดูดให้เคลื่อนเข้าหาแผ่นเก็บที่มีศักย์ไฟฟ้าตรงข้ามกับอนุภาค (Collector) และถูกเก็บไว้บนแผ่นเก็บซึ่งสามารถถอดไปล้างทำความสะอาดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เครื่องกรองอากาศประเภทนี้ไม่ต้านการไหลของอากาศในการดูดกรองฝุ่นละออง เนื่องจากแผ่นเก็บฝุ่นมีระยะห่างกัน ทำให้อากาศผ่านได้ง่าย ส่งผลดีให้พัดลมดูดอากาศทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า เครื่องกรองอากาศประเภทนี้เริ่มพัฒนาและนำมาใช้เพื่อดักจับฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้า เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้าชีวมวล โรงไฟฟ้าขยะ มีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ได้มากกว่า 99.5% (Chang, Kelly, & Crowley, 2018; Mizuno, 2000; Parker, 1997; White, 1963)

ทีมวิจัยศูนย์เทคโนโลยีเพื่อความมั่นคงของประเทศและการประยุกต์เชิงพาณิชย์ สวทช. ได้พัฒนาเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ไอออนเฟรซ (IonFresh) (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2562) สำหรับใช้งานภายนอกอาคาร ซึ่งได้ทดลองนำไปติดตั้งที่บริเวณใต้ต้นคริสต์มาส Magical Christmas Tree ลานสยามดิส คัฟเวอรี่พลาซ่า จำนวน 4 เครื่อง เมื่อเดือนธันวาคม 2562 สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ในอัตราการกรองอากาศรวมกัน 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และหลังจากนั้นได้ย้ายไปทดลองติดตั้งบริเวณสกายวอล์ก สี่แยกปทุมวัน โดยเพิ่มอีก 2 เครื่อง สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ในอัตราการกรองอากาศรวมกัน 9,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จากนั้นทีมวิจัยศูนย์เทคโนโลยีเพื่อความมั่นคงของประเทศและการประยุกต์เชิงพาณิชย์ สวทช. ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบไอออนเฟรซ มีขนาดความกว้าง 1 เมตร สูง 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 มีอัตราการกรองอากาศประมาณ 10,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (เดอะสแตนดาร์ดทีม, 2563; พรนภา สวัสดี, 2563) และได้ทดลองนำไปติดตั้งใช้งานในงาน Maker Faire Bangkok 2020 ระหว่างวันที่ 18-19 มกราคม พ.ศ. 2563 ณ ลานหน้าศูนย์การค้าเดอะสตรีท รัชดา ในการทดลองนั้น ยังไม่มีผลการทดลองอย่างชัดเจนว่าสามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ได้เท่าใด และเหมาะในการนำไปใช้งานครอบคลุมพื้นที่เปิดอย่างไร ซึ่งเครื่องกรองอากาศประเภทนี้จะต้องคำนึงถึงการล้างทำความสะอาดและบำรุงรักษาแผ่นเก็บฝุ่นละออง ซึ่งถ้ามีการพัฒนาเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อนำไปใช้ในพื้นที่เปิดที่กว้างขึ้น ควรจะต้องมีระบบการล้างทำความสะอาดแผ่นเก็บฝุ่นละอองอัตโนมัติ เพื่อให้เครื่องกรองอากาศระดับเมือง ใช้ได้อย่างยั่งยืนในระยะยาว

ในต่างประเทศนั้น มีการพัฒนาเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตที่มีขนาดใหญ่กว่าไอออนเฟรซ ชื่อว่าสม็อก ฟรีทาวเวอร์ (Smog Free Tower) (Studio Roosegaarde, 2019) ออกแบบและพัฒนาโดย นายดาน โรสิการ์ดิ (Daan Roosegaarde) ชาวดัชท์ เครื่องกรองอากาศสม็อกฟรีทาวเวอร์ นี้มีลักษณะเป็นหอคอยทำจากอลูมิเนียม ความสูง 7 เมตร สามารถกรองอากาศได้ในอัตรา 30,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 1,170 วัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 เครื่องกรองอากาศสม็อกฟรีทาวเวอร์ ได้มีการทดลองและติดตั้งครั้งแรกที่เมืองรอตเตอร์ดัม ประเทศเนเธอร์แลนด์ เมื่อปี ค.ศ. 2015 และดำเนินการทดลองติดตั้งในประเทศต่างๆ เช่น เกาหลีใต้ จีน โปแลนด์ เป็นต้น

จากการทดลองในเมืองปักกิ่ง ประเทศจีน พบว่าสามารถกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 ได้ 70% และเมื่อปล่อยอากาศที่ผ่านการกรองแล้วไปยังบริเวณรอบๆ ทำให้ผลของการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 สุทธิเท่ากับ 45% ส่วนการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 นั้นยังกรองได้เพียง 25% เท่านั้น โดยเครื่องกรองอากาศสม็อกฟรีทาวเวอร์ นี้สามารถกรองอากาศโดยรอบได้ครอบคลุมรัศมี 20 เมตร ห่างจากตัวเครื่อง ซึ่งเหมาะกับสวนสาธารณะที่มีพื้นที่ไม่กว้างมาก ผู้ออกแบบได้ให้ความเห็นว่า หากต้องการนำไปติดตั้งบริเวณที่โล่งกว้างมากๆ จะต้องนำเครื่องกรองอากาศสม็อกฟรีทาวเวอร์ มาวางเรียงต่อกันเป็นโครงข่าย ในระยะห่าง 20 เมตร ซึ่งจะต้องใช้งบประมาณเพิ่มขึ้นในการผลิตและติดตั้ง

รังสรรค์ ตันจันทร์พงศ์ (2563) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ที่เพิ่มระบบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) เพื่อนำไปใช้ในโรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่จำนวน 2 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยติดตั้งภายในห้องโล่ง ที่มีพื้นที่ประมาณ 200-250 ตารางเมตร ซึ่งนอกจากจะสามารถกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ได้แล้วยังสามารถกำจัดเชื้อโรค ไวรัส และไอสารระเหย (VOCs) ได้อีกด้วย เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตดังกล่าว

สามารถกรองอากาศได้ในอัตราเครื่องละ 6,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยใช้งบประมาณเครื่องละ 125,000 บาท

เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต เป็นเครื่องกรอกอากาศที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ได้สูงถึง 99.5% โดยแรงทางไฟฟ้าสถิตจะกระทำต่ออนุภาคเพียงอย่างเดียวจึงไม่มีผลต่อการไหลของอากาศ และมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ อายุการใช้งานยาวนานถึง 20 ปี อย่างไรก็ตามเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตนั้นอาจมีก๊าซโอโซนเกิดขึ้นในขั้นตอนใส่ประจุไฟฟ้าให้อนุภาคที่ปะปนอยู่ในอากาศเสีย ซึ่งควรจะต้องติดตั้งระบบดูดซับโอโซนซึ่งเป็นก๊าซพิษที่สามารถทำอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจได้ (มณีรัตน์ องค์วรรณดี, 2563) ส่วนการเดินเครื่องและบำรุงรักษาจะต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ ความเข้าใจ และให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากต้องทำงานกับกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง

3. เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ (Venturi Scrubbers)

เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ (Venturi Scrubbers) มีหลักการทำงานคือ ดูดอากาศที่ต้องการกรองให้ไหลผ่านเข้าไปในบริเวณที่เป็นคอคอดเพื่อเพิ่มความเร็วจากประมาณ 60 เมตรต่อวินาที เป็น 200 เมตรต่อวินาที เพื่อไหลผ่านฟิล์มน้ำจนทำให้แตกออกเป็นละอองน้ำขนาดจิ๋ว หมอกควัน ควันพิษ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 ในอากาศจะถูกละอองน้ำจับไว้ และจะไหลออกไปในถังทรงกระบอกเพื่อแยกอากาศที่บำบัดจนสะอาดแล้วออกจากละอองน้ำที่จับฝุ่นละออง โดยการบังคับให้อากาศไหลวนเพื่อเหวี่ยงให้เกิดแรงสู่ศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้ละอองน้ำที่มีน้ำหนักมากกว่าอากาศแยกตัวไปเกาะที่ผนังถังทรงกระบอกและรวมตัวเป็นหยดน้ำไหลตกลงไปด้านล่าง ละอองน้ำบางส่วนที่ยังไม่ควบแน่นจะไหลต่อไปยังอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำที่มีลักษณะเป็นครีบรูปร่างซิกแซ็กวางตัวถี่ ๆ เพื่อจับละอองน้ำที่ยังคงเหลือ ก่อนปล่อยอากาศที่สะอาดออกไปภายนอก ส่วนน้ำที่จับกับหมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 จะถูกนำไปบำบัดก่อนทิ้งลงสู่ระบบน้ำทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 6 เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี สครับเบอร์ นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อกรองอากาศเสียและฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยการดักจับอนุภาคขนาดเล็กในอากาศที่มีขนาด 1 ไมครอนหรือเล็กกว่า เช่น ฝุ่นควัน และสารพิษที่สามารถละลายน้ำได้ (Cooper & Alley, 2011; เจนจิรา มีแสง, 2557; นพภาพร พานิช และคณะ, 2550; ปราโมช เชี่ยวชาญ, 2551)

มูลนิธิราชประชานุเคราะห์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้ใช้หลักการทำงานของเครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สคับเบอร์ มาพัฒนาสร้างเครื่องกรองอากาศระดับเมืองต้นแบบ เพื่อลดปัญหาหมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 ดังแสดงในภาพที่ 7 เครื่องกรองอากาศดังกล่าวมีอัตราการกรองอากาศเฉลี่ย 150,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ครอบคลุมพื้นที่ 50,000 ตารางเมตร มีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ได้ 85% และเมื่อปล่อยอากาศที่ผ่านการกรองแล้วไปยังบริเวณรอบๆ ทำให้ผลของการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 สุทธิเท่ากับ 42.5%

สำหรับพื้นที่เปิดขนาดใหญ่ ผู้ออกแบบได้กำหนดรูปแบบการบำบัดอากาศโดยตีเส้นกริดโซน หนึ่งหน่วยกริดโซนจะใช้เครื่องบำบัด 4 เครื่อง ตั้งจุดบำบัดที่มุมทั้งสี่ของตารางกริด ขนาดหน่วยตารางกริดสามารถกำหนดได้ตามวัตถุประสงค์ เช่น 1 ตารางกิโลเมตรต่อหนึ่งตารางกริด 4 เครื่อง จะบำบัดอากาศได้ 0.7 ตารางกิโลเมตร ในเวลาปฏิบัติงาน 12 ชั่วโมงต่อวัน ทั้งนี้ การพัฒนารูปแบบทิศทางและจุดของการดูดอากาศที่จะบำบัดและการปล่อยอากาศที่บำบัดแล้วนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและสภาวะเงื่อนไขทางกายภาพของพื้นที่

ที่จะบำบัด เช่น พื้นที่ในเมือง เขตโรงพยาบาล โรงเรียน สนามบิน พื้นที่แอ่งกระทะมีภูเขาล้อมรอบ เป็นต้น การเลือกกำหนดรูปแบบการดูดและปล่อยออกนี้สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้อย่างมาก เครื่องขนาดเล็กแต่เมื่อนำหลักการของรูปแบบต่าง ๆ ไปประยุกต์ใช้จะทำให้สามารถบำบัดอากาศได้ในพื้นที่เปิดที่มีเงื่อนไขทางภาพที่แตกต่างกันได้เป็นอย่างดี (ประพันธ์ สุขทะใจ, 2563)

บทวิเคราะห์

เครื่องกรองอากาศระดับเมือง เพื่อกำจัดหมอกควัน ควันพิษ และ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 ในพื้นที่โล่งกว้างนั้น ควรจะต้องมีความสามารถในการบำบัดอากาศให้สะอาดได้ในปริมาณที่มาก รวดเร็ว และคุ้มค่า ซึ่งจากการเก็บรวบรวมข้อมูล สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรอง PM10 และ PM2.5 รวมถึงขนาด อัตราการกรอง กำลังไฟฟ้า และราคา ได้ตามตารางที่ 1

ในส่วนของประสิทธิภาพการกรอง PM10 และ PM2.5 นั้น เครื่องต้นแบบของมูลนิธิราชประชานุเคราะห์มีประสิทธิภาพในการกรอง PM2.5 ได้มากกว่าเครื่องกรองอากาศ Smog Free Tower โดยเครื่องต้นแบบของมูลนิธิราชประชานุเคราะห์มีประสิทธิภาพในการกรอง PM2.5 ได้ 85% และเมื่อปล่อยอากาศที่ผ่านการกรองแล้วไปยังบริเวณรอบ ๆ ทำให้ผลของการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 สุทธิเท่ากับ 42.5% และในส่วนอัตราการกรองนั้น เครื่องกรองอากาศ Xi’an Model มีอัตราการกรองสูงที่สุด (10 ล้าน ลบ.ม./วัน) รองลงมาคือ Smog Free Tower และ BMA Model ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตัวเครื่องปรากฏว่า เครื่องกรองอากาศ IonFresh มีอัตราการกรองต่อขนาดของตัวเครื่องสูงที่สุด (10,000 ลบ.ม./ชม./ม.) รองลงมาคือ Smog Free Tower และ BMA Model ตามลำดับ

ความสามารถในการกรองครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างที่สุดคือเครื่องกรอง Xi’an Model (10 ตร.กม.) รองลงมาคือ เครื่องกรองต้นแบบของมูลนิธิราชประชานุเคราะห์ และ Smog Free Tower ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาร่วมกับมูลค่าการลงทุนแล้ว เครื่องกรอง Xi’an Model นั้นมีการลงทุนที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ครอบคลุมของการกรอง (6.3 ล้านบาท/ตร.กม.) รองลงมาคือ เครื่องต้นแบบของรังสรรค์ และ BMA Model ตามลำดับ

สรุป

เครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA เป็นเครื่องกรองอากาศที่มีหลักการทำงานที่ง่ายที่สุด ประสิทธิภาพการกรองขึ้นอยู่กับความละเอียดของแผ่นกรอง HEPA และอายุการใช้งานของแผ่นกรอง เนื่องจากแผ่นกรอง HEPA ทำหน้าที่เก็บสะสมฝุ่นละอองไว้ เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งแล้วจะต้องเปลี่ยนแผ่นกรอง HEPA อัตราการกรองขึ้นอยู่กับกำลังของพัดลมดูดอากาศภายในเครื่องกรอง ซึ่งหากต้องการอัตราการกรองที่สูงจะต้องเพิ่มขนาดกำลังของพัดลมดูดอากาศ ทำให้ราคาต้นทุนของเครื่องกรองสูงขึ้น ส่วนเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตนั้น ใช้แรงทางไฟฟ้าในการแยกอนุภาคออกจากอากาศ ประสิทธิภาพการกรองของเครื่องกรองขึ้นอยู่กับ การออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อควบคุมการสร้างสนามไฟฟ้าในการปล่อยประจุไฟฟ้า และการดักจับอนุภาคอย่างเหมาะสม ทั้งนี้เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตจะต้องสามารถกำจัดก๊าซโอโซนซึ่งเป็นก๊าซพิษที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการประจุไฟฟ้าออกได้อย่างสมบูรณ์ โดยเครื่องกรองอากาศทั้ง 2 ประเภทนี้ เหมาะที่จะใช้ภายในอาคาร หรือพื้นที่โล่งที่ภายนอกอาคาร

เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ มีหลักการทำงานที่แตกต่างจาก เครื่องกรองอากาศ 2 ประเภทแรก คือใช้ละอองน้ำเป็นตัวจับฝุ่นละอองในอากาศ ทำให้จะต้องมีระบบบำบัดน้ำที่จับกับฝุ่นละออง

ก่อนที่จะไปทิ้งลงสู่ระบบน้ำทิ้งหรือก่อนที่จะหมุนเวียนกลับมาใช้ต่อ ประสิทธิภาพการกรองขึ้นอยู่กับกำลังของพัดลมดูดอากาศที่จะต้องสอดคล้องกับประมาณละอองน้ำที่ใช้ในการจับฝุ่นละออง โดยระบบดังกล่าวนี้เหมาะที่จะออกแบบเป็นระบบขนาดใหญ่ และใช้ภายนอกอาคารหรือพื้นที่โล่ง

การพัฒนาเครื่องกรองอากาศระดับเมืองทั้ง 3 แบบ ให้มีอัตราการกรองมากขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ดักจับฝุ่นละอองในเครื่องกรองให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าเครื่องกรองอากาศทั้ง 3 แบบ มีอัตราการกรองต่อขนาดของเครื่องใกล้เคียงกัน แต่เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตนั้นมีต้นทุนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการกรองที่เท่ากัน ขณะที่อัตราการกรองต่อพื้นที่ครอบคลุมของเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิตมีสูงที่สุด รองลงมาคือ เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ ส่วนเครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA มีน้อยที่สุด

แม้ว่าจะมีการนำเครื่องกรองอากาศระดับเมืองประเภทต่างๆ มาใช้อย่างจริงจัง ในการลดปริมาณหมอกควัน ควันพิษ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 แล้วก็ตาม แต่ก็เป็นเพียงการบรรเทาปัญหาความเดือดร้อนของประชาชนในระยะสั้นเท่านั้น การแก้ปัญหาคุณภาพอากาศในระยะยาว จะต้องแก้ปัญหาที่ต้นเหตุอย่างเร่งด่วน คือ การลดการปล่อยหมอกควัน ควันพิษ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก จากการเผาในที่โล่ง จากโรงงานอุตสาหกรรม และจากการคมนาคมขนส่ง นอกจากนั้นประชาชนทุกคนจำเป็นต้องมีส่วนร่วมในการลดปริมาณหมอกควัน ควันพิษ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก ที่เกิดจากชีวิตประจำวัน เช่น เดินหรือใช้จักรยานในการเดินทางระยะใกล้ ลดการใช้ยานพาหนะส่วนตัว เดินทางโดยใช้ระบบขนส่งมวลชนหรือรถโดยสารสาธารณะ หรือใช้รถร่วมกันเพื่อไปในสถานที่เดียวกัน ควรเปลี่ยนไปใช้ยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงสะอาดที่มีการปล่อยมลพิษต่ำหรือรถยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งเรียนรู้การดำรงชีวิตประจำวันอยู่กับปัญหาคุณภาพอากาศดังกล่าวนี้ไปในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

เจนจิรา มีแสง. (2557). **ประสิทธิภาพของระบบป้องกันฝุ่นละอองจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน จากค่าการตรวจวัดความทึบแสง: กรณีศึกษา ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี.** การศึกษาอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

เดอะสแตนดาร์ดทีม. (2563, 21 มกราคม). **กระทรวงการอุดมศึกษาฯ เปิดตัว 'ไอออนเฟรช' เครื่องฟอกอากาศนอกอาคาร พร้อมขอมหาวิทยาลัยเปิดสอนออนไลน์หนีฝุ่น.** ค้นเมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2564, จาก https://thestandard.co/ion-fresh-electrostatic-air-purifier/

นพภาพร พานิช และคณะ. (2550). **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประพันธ์ สุขทะใจ. (2563, 23 มกราคม). **ในหลวง ทรงมีพระบรมราโชบาย ให้ติดตั้งเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบใน กทม.** ค้นเมื่อ 2 มีนาคม 2564, จาก https://www.naewna.com/local/468186/preview?fbclid=IwAR0L0KlNJk0iBe-apRPR2Ir6vSd_lTSiToMgTfHtBDhN1EPU3hp_rZt2QFU

ปราโมช เชี่ยวชาญ. (2551). อาชีวอนามัยความปลอดภัยในงานอุตสาหกรรม. ใน มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. **เอกสารการสอนชุดวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย52305 หน่วยที่ 8-15** (พิมพ์ครั้งที่ 6., หน้า 406). นนทบุรี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

พรนภา สวัสดี. (2563, 24 มกราคม). เครื่องฟอกอากาศระบบไฟฟ้าสถิต. **กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม**. ค้นเมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2563, จาก https://www.mhesi.go.th/index.php/news-and-announce-all/news-all/903-2020-01-24-07-25-26.html

มณีรัตน์ องค์วรรณดี. (2563). ถอดเกร็ดความรู้จากการสัมมนาวิชาการ My building is killing me: How to grow fresh indoor air. **วารสารสิ่งแวดล้อม**, **24**(1), 1-8.

รังสรรค์ ตันจันทร์พงศ์. (2563). **เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ระบบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพื่อนำไปใช้ในโรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่.** [ม.ป.ท.: ม.ป.พ.].

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2562). **สวทช. อว. ผนึก สยามพิวรรธน์ พีทีทีจีซี โชว์เครื่องกรองอากาศ 'IonFresh' ต้นคริสต์มาสรักษ์โลก ใจกลางเมือง โครงการ Circular Living Campaign 2019.** ค้นเมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2564, จาก from https://www.nstda.or.th/home/news_post/nstda-newsletter-5y9-news8/

Bangkok Post Public Company. (2019, October 1). **BMA to test air purification tower.** Retrieved February 23, 2021, from https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1762664/bma-to-test-air-purification-tower

Chang, J. S., Kelly, A. J., & Crowley, J. M. (2018). **Handbook of electrostatic processes.** Retrieved February 23, 2021, from https://www.taylorfrancis.com/books/handbook-electrostatic-processes-jen-shih-chang-arnold-kelly-joseph-crowley/e/10.1201/9781315214559

Chen, S. (2018, December 21). **China built a tower that acts like the world's biggest air purifier, and it actually works: Business insider.** Retrieved September 7, 2021, from https://www.businessinsider.com/china-builds-worlds-biggest-air-purifier-2018-12

Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2011). **Air pollution control: a design approach** (4th ed.). Long Grove, Ill: Waveland Press.

Mizuno, A. (2000). Electrostatic precipitation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, **7**(5), 615-624.

Parker, K. R. (Ed.). (1997). **Applied electrostatic precipitation.** Retrieved February 23, 2021, from https://www.springer.com/gp/book/9780751402667

SLY Inc. [n.d.]. **Venturi wet scrubbers.** Retrieved September 7, 2021, from https://www.slyinc.com/products/wet-scrubbers/venturi-wet-scrubber/

Studio Roosegaarde. (2019, April 29). **Smog free tower.** Retrieved February 23, 2021, from https://www.studioroosegaarde.net/project/smog-free-tower

The Nation. (2020). **Four wet scrubber prototypes to be installed in capital to deal with air pollution.** Retrieved September 7, 2021, from https://www.nationthailand.com/in-focus/30380880

White, H. J. (1963). **Industrial electrostatic precipitation**. Reading, MA.: Addison-Wesley.

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการของเครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต และเครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สคับเบอร์

ประเภท	เครื่องต้นแบบ/เครื่องกรองอากาศ	ประสิทธิภาพการกรอง PM10*	ประสิทธิภาพการกรอง PM2.5**	ขนาด	อัตราการกรอง	ครอบคลุมพื้นที่	กำลังไฟฟ้า	ราคา
เครื่องกรองอากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA	BMA Model	NA	NA	สูง 4 เมตร	17,000 ลบ.ม./ชม.	1,000 ตารางเมตร	NA	5.3 ล้านบาท
	Xi'an Model	NA	NA	สูง 100 เมตร	10 ล้าน ลบ.ม./วัน	10 ตารางกิโลเมตร	NA	63 ล้านบาท
เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)	IonFresh	NA	NA	สูง 1 เมตร กว้าง 1 เมตร	10,000 ลบ.ม./ชม	NA	NA	NA
	Smog Free Tower	70%(45%)	25%	สูง 7 เมตร	30,000 ลบ.ม./ชม.	รัศมี 20 เมตร	1,170 วัตต์	NA
	เครื่องต้นแบบของรังสรรค์	NA	NA	สูง 1.8 เมตร	6,000 ลบ.ม./ชม.	200-250 ตารางเมตร (2 เครื่อง)	NA	125,000 บาท (1 เครื่อง)
เครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ (Venturi Scrubbers)	เครื่องต้นแบบของมูลนิธิราชประชานุเคราะห์	NA	85%(42.5%)	สูง 3 เมตร	150,000 ลบ.ม./วัน	50,000 ตารางเมตร	NA	NA

*, ** ประสิทธิภาพการกรองของเครื่อง (ประสิทธิภาพการกรองเมื่อคิดรวมกับมลภาวะรอบตัวเครื่อง)

ภาพที่ 1 เครื่องฟอกอากาศด้านหน้า Central World เพื่อลด PM2.5 (Bangkok Post Public Company, 2019)

KKU Journal for Public Health Research
Vol.15 No.1 January – March 2022
วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มีนาคม 2565

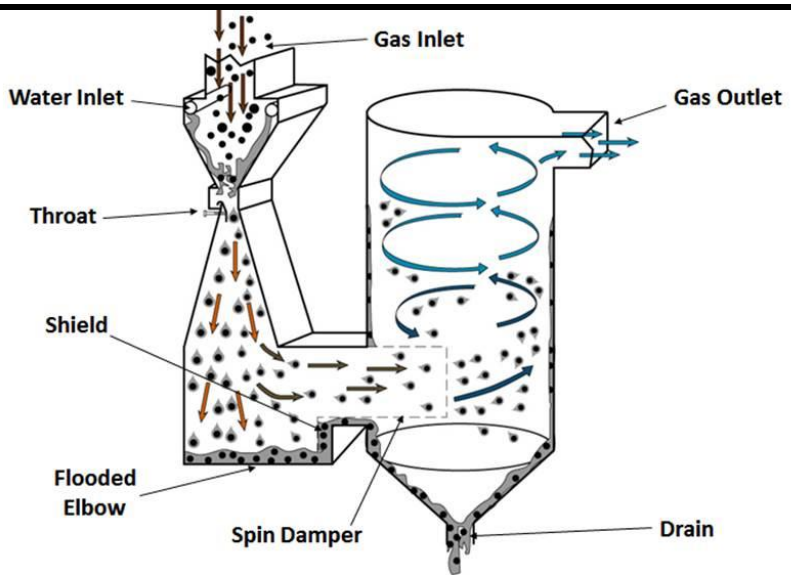
ภาพที่ 2 หอคอยเป็นเครื่องกรองอากาศที่ใหญ่ที่สุดในโลก ในประเทศจีน (Chen, 2018)

ภาพที่ 3 เครื่องต้นแบบไอออนเฟรซ (IonFresh) เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (เดอะสแตนดาร์ดทีม, 2563)

KKU Journal for Public Health Research
Vol.15 No.1 January – March 2022
วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มีนาคม 2565

ภาพที่ 4 เครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (Smog Free Tower) พัฒนาโดย Roosegaarde (Studio Roosegaarde, 2019)

ภาพที่ 5 ภาพด้านหลังของเครื่องกรองอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ที่เพิ่มระบบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (รังสรรค์ ตันจันทร์พงศ์, 2563)



ภาพที่ 6 หลักการทำงานของเครื่องกรองอากาศแบบเวนทูรี่ สครับเบอร์ (Venturi Scrubbers) (SLY Inc., n.d.)

ภาพที่ 7 เครื่องกรองอากาศต้นแบบ มูลนิธิราชประชานุเคราะห์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ (The Nation, 2020)