

ตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2

ไปยังบุคลากรทางการแพทย์

Positive Pressure Screening Cabinet for Reducing the Spread of SARS-CoV-2 to Healthcare Workers

สมมาส แก้วล้วน^{1*}, สงกรานต์ วิริยะศาสตร์¹, สุรัชย์ ภูมิศรีจันทร์² และพิลดา หวังพานิช³

Sommas Kaewluan^{1*}, Songkarn Wiriyasart¹, Surachai Phoomsrijun² and Pilada Wangphanich³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

²คลินิกคัดกรองโรคทางเดินหายใจ โรงพยาบาลศูนย์การแพทย์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²ARI Clinic, HRH Princess MahaChakri Sirindhorn Medical Center, Srinakharinwirot University

³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

³Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

*Corresponding author: sommas@g.swu.ac.th

Received: March 9, 2023

Revised: May 5, 2023

Accepted: May 12, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ ตู้คัดกรองความดันบวกมีพื้นที่ภายใน 1.44 m² และมีความสูง 2 m ภายในติดตั้งเครื่องปรับอากาศอินเวอร์เตอร์ ด้านหลังตู้คัดกรองติดตั้งชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและฆ่าเชื้อโรคในอากาศ มีพัดลมชนิดปรับความเร็วรอบได้ดูดอากาศจากภายนอกผ่านชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและฆ่าเชื้อโรคและส่งอากาศสะอาดเข้าสู่ตู้คัดกรอง พัดลมภายในเครื่องปรับอากาศซึ่งปรับอัตราการไหลได้ 3 ระดับ เป่าอากาศเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 26 °C โดยมีทิศทางลมตรงไปยังบุคลากรทางการแพทย์ อากาศไหลออกจากตู้สู่ภายนอกผ่านรอยรั่วของตู้ที่จัดไว้ 3 ระดับ คือ 187 220 และ 253 cm² ความดันอากาศภายในตู้สามารถควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 5-15 Pa ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อนเข้าสู่ตู้มีค่าอยู่ในช่วง 150-335 m³/h โดยอัตราการไหลอากาศต่ำสุดที่ 150 m³/h สอดคล้องกับการทำงานของพัดลมภายในเครื่องปรับอากาศที่อัตราการไหลต่ำสุดและอัตราการไหลสูงสุดที่ 335 m³/h สอดคล้องกับการปรับรอบรั้วของตู้สูงสุดที่ 253 cm² และความดันภายในตู้สูงสุด 15 Pa ดังนั้นระดับการทำงานของพัดลมภายในเครื่องปรับอากาศต้องตั้งไว้ที่ตำแหน่งเบาสุดเท่านั้นเพื่อป้องกันกระแสอากาศภายในตู้ไหลวนกลับเข้าสู่เครื่องปรับอากาศ เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานพบว่า เครื่องปรับอากาศใช้พลังงานสูงสุด รองลงมาเป็นพัดลมป้อนอากาศ หลอดไฟฆ่าเชื้อและระบบแสงสว่างที่ร้อยละ 46 35 11 และ 8 ตามลำดับ เมื่อใช้งานตู้คัดกรองต่อเนื่องเป็นเวลา 26 สัปดาห์ พบว่า มีฝุ่นละอองและสิ่งปนเปื้อนอุดตันแผ่นกรองมากขึ้นส่งผลให้ความดันตกคร่อมชุดกรองมากขึ้นประมาณ 20 -30 Pa ซึ่งทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับตู้คัดกรองใหม่

คำสำคัญ: ตู้คัดกรองความดันบวก โควิด-19 ยูวีซี กรองสิ่งปนเปื้อนและเชื้อโรคในอากาศ

Abstract

This research aims to design and build a Positive Pressure Screening Cabinet (PPS-cabinet) to reduce the spread of COVID-19 among healthcare workers. The PPS cabinet has an internal area of 1.44 m² and a height of 2 m. It is equipped with an inverter air conditioner. Behind the PPS cabinet is a set of decontamination and disinfection units. The variable-speed fan draws outside air through the decontamination and disinfection unit and sends clean air into the PPS cabinet. The 3-speed fan inside the air conditioner blows cold air at about 26 °C directly to the healthcare workers. The air then flows from the cabinet to the outside through the leaks of the cabinets, arranged in three levels: 187, 220, and 253 cm². The air pressure inside the cabinet can be controlled to a value in the range of 5–15 Pa. The results showed that the appropriate fresh air flow rate to be fed into the PPS-Cabinet must have a flow rate in the range of 150–335 m³/h. The minimum fresh air flow rate of 150 m³/h corresponds to the fan operation inside the air conditioner at the lowest speed, while the maximum air flow rate of 335 m³/h corresponds to the maximum leakage area of the cabinet of 253 cm² making the pressure inside the PPS cabinet not more than 15 Pa. Therefore, to ensure that no air flow inside the cabinet returns to the air conditioner under all operating conditions, the fan flow rate in the air conditioner should be adjusted to the lowest speed. In terms of energy consumption, air conditioners use the most energy, followed by fans, disinfection lamps, and lighting at 46%, 35%, 11%, and 8%, respectively. When the PPS cabinet was used for 26 weeks, more dust and contaminants were clogging the filters. This results in an increase in the pressure drop across the filter unit by approximately 20–30 Pa, resulting in 15% more energy consumption compared to the new PPS-Cabinet.

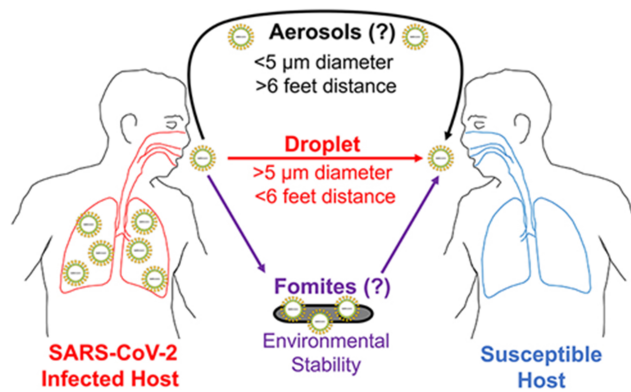
Keywords: positive pressure screening cabinet, COVID-19, UVC, ultra-low penetration air filter



บทนำ

โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) คือ โรคทางเดินหายใจซึ่งเกิดจากเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 (Severe Acute Respiratory Syndrome-Coronavirus-2--SARS-CoV-2) พบการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสครั้งแรกในช่วงเดือนธันวาคมปี 2019 ในเมืองอู่ฮั่น ประเทศจีน หลังจากนั้นเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 ได้มีการกลายพันธุ์เป็นหลากหลายสายพันธุ์และมีการแพร่ระบาดไปทั่วโลก ผู้ที่ติดเชื้อบางรายอาจไม่มีอาการ สำหรับผู้ที่มีอาการ ความเจ็บป่วยอาจมีตั้งแต่เล็กน้อยไปจนถึงรุนแรง ผู้ใหญ่อายุ 65 ปีขึ้นไปและคนทุกวัยที่มีโรคประจำตัวมีความเสี่ยงสูงต่อการเจ็บป่วยที่รุนแรง เชื้อไวรัส SARS-CoV-2 สามารถแพร่กระจายจากผู้ที่ติดเชื้อ (infected host) ไปยังผู้รับเชื้อ (susceptible host) ได้

3 วิธีที่เป็นไปได้ วิธีแรกเชื้อถูกส่งจากคนสู่คน (สัมผัสรับเชื้อทางตรง) ผ่านละอองทางเดินหายใจ (droplet) จากการไอหรือจาม ละอองเหล่านี้สามารถเดินทางเป็นระยะทางไม่เกิน 6 ฟุตในอากาศ วิธีที่สอง เชื้อ SARS-CoV-2 มีแนวโน้มที่จะส่งผ่านวัตถุที่เป็นพาหะนำโรค (fomites) ซึ่งเป็นการรับเชื้อทางอ้อมในช่วงระยะเวลาที่เชื้อสามารถทำงานได้บนพื้นผิวของสิ่งแวดล้อม วิธีที่สาม มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผ่านละอองทางเดินหายใจในรูปแบบละอองลอย (aerosols) จากการไอ จาม พูดคุย หรือการหายใจ ซึ่งเป็นการรับเชื้อทางอ้อมในระยะทางที่ยาวกว่า 6 ฟุตในอากาศ โดยเชื้อ SARS-CoV-2 ต้องไปถึงจุดรับเชื้อ (ตา จมูก หรือปาก) ของผู้รับเชื่อก่อนและเข้าสู่ทางเดินหายใจ โดยวิธีการแพร่เชื้อแสดงในภาพ 1



ภาพ 1 การแพร่เชื้อ SAR-CoV-2

Note. From Does COVID-19 Spread Through Droplets Alone?, by T. Galbadage, B. M. Peterson and R. S. Gunasekera, 2020, *Public Health*, 8(163), 1-4. Copyright by Frontiers Media S.A. All rights reserved

ในสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส SAR-CoV-2 ในประเทศไทยทำให้มีจำนวนผู้ติดเชื้อและป่วยเป็นโรค COVID-19 เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยข้อมูลในวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2565 มียอดผู้ติดเชื้อป่วยเป็นโรค COVID-19 สูงถึง 24,932 ราย (Department of Disease Control, 2022) ส่งผลให้ในแต่ละวันมีประชาชนที่มีอาการป่วยขอเข้าตรวจคัดกรองที่คลินิกโรคติดเชื้อทางเดินหายใจ (ARI Clinic) ศูนย์การแพทย์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ผู้เข้ารับบริการส่วนใหญ่เดินทางมาจากจังหวัดนครนายก ปทุมธานี ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี และสระบุรี ในขณะที่อุปกรณ์สำหรับป้องกันการติดเชื้อของบุคลากรทางการแพทย์ของแผนกยังไม่เพียงพอ โดยเฉพาะโต๊ะคัดกรองที่มีเพียงฉากพลาสติกใสกัน 3 ด้าน แสดงดังภาพ 2 ส่งผลให้บุคลากรทางการแพทย์ติดเชื้อและนำไปสู่การปิดคลินิกโรคติดเชื้อทางเดินหายใจชั่วคราวเพื่อทำความสะอาดสถานที่รวมถึงการจัดเตรียมอุปกรณ์และมาตรการป้องกันการติดเชื้อของบุคลากร เนื่องจากโรค COVID-19 เป็นโรคอุบัติใหม่ซึ่งเป็นโรคติดต่ออันตรายที่เกิดจากเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ที่แพร่กระจายผ่านการสัมผัส (contact) หรือผ่านละอองฝอยขนาดใหญ่ (droplet) หรือผ่านฝอยละอองขนาดเล็ก (aerosol) (Sakkawong et al. 2021) การสูดดมอากาศที่มีละอองขนาดเล็กมากและอนุภาคละอองลอยที่มีเชื้อไวรัสมีความเสี่ยงต่อการแพร่เชื้อจะมากที่สุดภายในระยะสามถึงหกฟุตจากแหล่งที่มีเชื้อ (Centers of Disease Control and prevention, 2022) การเปลี่ยนจากโต๊ะคัดกรองเป็นตู้คัดกรองผู้ป่วยติดเชื้อจึงเป็นแนวทางที่ป้องกันบุคลากรทางการแพทย์ที่ปฏิบัติหน้าที่คัดกรองจากการติดเชื้อจากผู้ป่วยได้มีประสิทธิภาพมากกว่า อย่างไรก็ตามภายในตู้คัดกรอง

จะต้องจัดให้มีสภาวะที่ปลอดภัยและมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกเพื่อให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถปฏิบัติงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยตู้คัดกรองต้องเป็นตู้ความดันบวกเพื่อให้สามารถป้องกันเชื้อจากภายนอกเข้าสู่ภายในโดยภายในตู้มีบุคลากรทางการแพทย์ปฏิบัติงานอยู่ (Aroom et al., 2022) โดยความดันแตกต่างระหว่างพื้นที่ความดันบวกและพื้นที่ภายนอกควรมีค่ามากกว่า 2.5 Pa อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (Air changes per hour--ACH) ควรมีค่ามากกว่า 12 อากาศใหม่ป้อนเข้าห้องควรรองด้วยฟิลเตอร์ที่มีประสิทธิภาพร้อยละ 99.97 ที่ขนาดอนุภาค 0.3 μm (Centers of Disease Control and prevention, 2003) และการฉายรังสี UV-C เพื่อฆ่าเชื้อในอากาศสำหรับระบบอากาศไหลในท่อทั่วไปอยู่ที่ 1,000 ถึง 10,000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (ASHRAE, 2019) ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านพัฒนาตู้คัดกรองความดันบวกและความดันลบ (Nair et al. 2020) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้แผ่นกรองดักจับอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA) ร่วมกับการใช้หลอดฆ่าเชื้อ UVC ในขณะที่งานวิจัยนี้มุ่งที่จะใช้แผ่นกรองอนุภาคละเอียดมาก (ultra-low penetrating air filter-U15) มีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 99.9995% ที่ขนาดอนุภาค 0.12 μm และมีการออกแบบสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เพื่อให้ได้สภาวะอากาศภายในตู้คัดกรองความดันบวกที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานของบุคลากรทางการแพทย์ได้อย่างต่อเนื่อง ตลอดจนมีการประเมินการใช้พลังงานเมื่อตู้คัดกรองความดันบวกที่ผ่านการใช้งานมาระยะเวลาหนึ่งเพื่อเป็นดัชนีชี้วัดประกอบการวางแผนบำรุงรักษาและเปลี่ยนชิ้นส่วนที่สำคัญต่อไป



ภาพ 2 ลักษณะโต๊ะคัดกรองผู้ติดเชื้อป่วยเป็นโรค COVID-19 และประกาศปิดทำการ ARI CLINIC

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างตู้คัดกรองความดันบวกโดยพัฒนาต่อยอดตู้คัดกรองความดันบวกต้นแบบที่ได้สร้างให้ศูนย์การแพทย์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ใช้ในช่วงสถานการณ์วิกฤติ

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของตู้คัดกรองความดันบวก

เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายในการสร้างตู้ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในสถานการณ์ที่บุคลากรทางการแพทย์ต้องปฏิบัติงานใกล้ชิดกับผู้ติดเชื้อจำนวนมาก เช่นการคัดกรองผู้ติดเชื้อ ผู้ติดเชื้อมีโอกาสสูงที่จะแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังผู้ปฏิบัติงานทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะการแพร่เชื้อทางอ้อมผ่านละอองลอย (aerosols) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเล็กกว่า $50\text{ }\mu\text{m}$ ละอองลอยสามารถลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานานก่อนจะตกลงพื้นหรือไปยังผู้คนที่อยู่ใกล้ ละอองลอยมีอนุภาคไวรัสติดเชื่อน้อยกว่าเนื่องจากมีขนาดเล็ก นักวิทยาศาสตร์ยังไม่ทราบจำนวนอนุภาคของ SARS-CoV-2 ซึ่งเป็นไวรัสที่ทำให้เกิดโรค COVID-19 ที่จำเป็นในการแพร่เชื้อให้กับคนรอบข้าง

แต่การหายใจเอาละอองลอยที่มีเชื้อไวรัสเข้าไปจำนวนมาก เชื้อไวรัสนั้นอาจรวมกันเป็นละอองที่ติดเชื้อมากขึ้น นอกเหนือจากนี้การอานามัยโลกและศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคระบุว่า การแพร่ระบาดในอากาศ (airborne transmission) สามารถเกิดขึ้นได้ โดยสถานการณ์ที่เป็นไปได้มากที่สุดสำหรับการแพร่ระบาดทางอากาศคือการอยู่ในพื้นที่ในร่มที่มีผู้คนหนาแน่นและมีการระบายอากาศไม่ดีเป็นเวลานาน (Stadnytskyi et.al., 2020). ดังนั้นเพื่อลดโอกาสในการติดเชื้อของผู้ที่ต้องปฏิบัติงานใกล้ชิดกับผู้ติดเชื้อจึงต้องแยกผู้ปฏิบัติงานออกจากผู้ป่วยโดยให้ผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในปริมาตรควบคุมที่ออกแบบสำหรับการป้องกันสิ่งปนเปื้อนจากภายนอกปริมาตรควบคุม (สิ่งแวดล้อม) เข้ามาภายในปริมาตรควบคุม (ระบบควบคุมปริมาตร) โดยการทำให้ภายในปริมาตรควบคุมมีความดันสูงกว่าภายนอกปริมาตรควบคุม และถ้าภายนอกปริมาตรควบคุมมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศดังนั้นภายในปริมาตรควบคุมจึงมีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศหรือเรียกว่าความดันบวก อีกทั้งจะต้องมีอากาศสะอาดป้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุมในอัตราที่จะรักษาความดันบวกในห้องปริมาตรควบคุมนั้นไว้ได้ตลอดเวลา

ความดันภายในห้องที่เป็นบวกที่ประมาณ 5-20 Pa เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการไหลเวียนของอากาศจากภายในห้องออกสู่ภายนอก ดังนั้นเพื่อรักษาความดันภายในห้องความดันบวกให้คงที่จึงต้องเติมอากาศเข้าสู่ห้องความดัน

บวกและอากาศที่เดิมเข้าสู่ห้องมาจากอากาศภายนอกห้อง และอาจเป็นอากาศที่ปนเปื้อนเชื้อ ดังนั้นจะต้องมีหน่วยจัดการอากาศเพื่อให้ได้อากาศที่สะอาดปราศจากเชื้อก่อนส่งเข้าสู่ห้องความดันบวก

ความดันอากาศภายในห้องความดันบวกต้องควบคุมอย่างระมัดระวังให้มีค่าสูงกว่าความดันอากาศภายนอกตู้เพื่อป้องกันการรั่วของอากาศจากภายนอกตู้เข้ามาภายในตู้ โดยค่าแนะนำควรอยู่ในช่วง 5-20 Pa (ISO 14644-4) แต่ค่าที่เหมาะสมมักจะควบคุมไว้ที่ 8-10 Pa (และห้ามต่ำกว่า 2.5 Pa เนื่องจากกรณีลมกรรโชกแรงอาจทำให้ลมพัดพาเชื้อรั่วเข้าภายในห้องได้ หรือกรณีเปิดประตูตู้ความดันบวก อาจมีความเสี่ยงที่เชื้อจะเล็ดลอดเข้าไปภายในตู้ได้)

ปริมาณอากาศสะอาดที่ป้อนเข้าสู่ห้องความดันบวกเพื่อใช้ควบคุมความดันภายในห้องจะมีค่าเท่ากับอัตราการรั่วของอากาศจากห้องความดันบวก โดยอัตราการรั่วของอากาศแปรผันตามความแตกต่างของความดันภายในและภายนอกห้องความดันบวกและพื้นที่รอยรั่ว โดยสามารถหาได้จากการทดลองหรือเป็นจากความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ 1 (Gadgil et al., 2006)

$$Q = CA(\Delta P)^n \quad (1)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการรั่วของอากาศจากห้องความดันบวก (m^3/s)
 ΔP คือ ความดันแตกต่างระหว่างภายในและภายนอกห้อง (Pa)
 C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลมรั่ว $C = 0.84$ (Pharmaceuticalhvac, 2020)

A คือ พื้นที่รอยรั่ว (m^2)

n คือ มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 1.0

การกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง

การนำอากาศจากภายนอกมาป้อนเข้าสู่ตู้คัดกรองความดันบวกจำเป็นต้องทำให้อากาศสะอาดปราศจากเชื้อซึ่งนิยมใช้การกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA

& ULPA High Quality Filters) โดย HEPA ย่อมาจาก High-Efficiency Particulate Air filtration คือ สิ่งที่ยืนยันว่าตัวกรองมีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคในอากาศที่สูงกว่าแบบปกติ และ ULPA ย่อมาจาก Ultra-Low Particulate Air คือ สิ่งที่ยืนยันว่าอากาศที่ผ่านตัวกรอง ULPA จะสะอาดมาก โดยมีอนุภาคของสารมลพิษ สารก่อภูมิแพ้ และสิ่งอื่น ๆ ที่คุณไม่ต้องการหายใจ

ตัวกรอง HEPA และ ULPA ทำจากเส้นใยซิลิเกตชั้นเย็บ ซึ่งทำให้สารปนเปื้อนเกาะติดอยู่ผ่านแรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิต มีรูปร่างและขนาดแตกต่างไปจากตัวกรองที่ออกแบบมาสำหรับการใช้ HVAC ในบ้านโดยสิ้นเชิง ตัวกรองทั้งสองพบได้ทั่วไปในห้องผ่าตัดของโรงพยาบาล สิ่งอำนวยความสะดวกด้านชีวการแพทย์และห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ ตัวกรอง HEPA สามารถกำจัดอนุภาคในอากาศได้ 99.97% ที่มีขนาดเล็กถึง $0.3 \mu\text{m}$ ในขณะที่ตัวกรอง ULPA จะกำจัดอนุภาคในอากาศอย่างน้อย 99.9995% ที่มีขนาดเล็กถึง $0.1 \mu\text{m}$ ดังนั้นการกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง: HEPA/ULPA จึงเป็นการกรองเพื่อแยกอนุภาคในอากาศหรือสิ่งสกปรกที่มีขนาดตั้งแต่ $0.1 \mu\text{m}$ ลงมา (เช่น ไวรัส เชื้อโรค ฝุ่นพิษ) เพื่อให้ได้อากาศที่สะอาดป้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

การฆ่าเชื้อในท่อส่งอากาศด้วย UVC (UV-C In-Duct Air Disinfection)

กลุ่มของหลอด UVC ที่ติดตั้งภายในหน่วย HVAC หรือในระบบท่อ (ASHRAE, 2021) โดยตำแหน่งการวางกลุ่มหลอดอาจตั้งฉากหรือขนานกับกระแสการไหลของอากาศ ต้องใช้ปริมาณรังสี UVC ที่เพิ่มขึ้นเพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ในทันทีเมื่อผ่านเขตการฆ่าเชื้อ เนื่องจากเวลาในการรับแสงจำกัด ดังนั้นการติดตั้งกลุ่มหลอด UVC ควรปฏิบัติตามแนวทางเหล่านี้:

- ปริมาณรังสี UVC เป้าหมายขั้นต่ำ $1,500 \mu\text{W-s}/\text{cm}^2$ ($1,500 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)
- ออกแบบมาสำหรับกระแสลมที่เคลื่อนที่ช้ากว่า 500 fpm (2.54 m/s) หรือช้ากว่า
- เขตการฉายรังสีขั้นต่ำสองฟุต (0.6 m)

- เวลาเปิดรับแสง UV ขั้นต่ำ 0.25 s
- การฆ่าเชื้อในท่อส่งอากาศด้วย UVC ควรใช้ร่วมกับ การกรองทางกล (high quality filters)

กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ถูกออกแบบ และสร้างตามความต้องการของบุคลากรทางการแพทย์ มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ

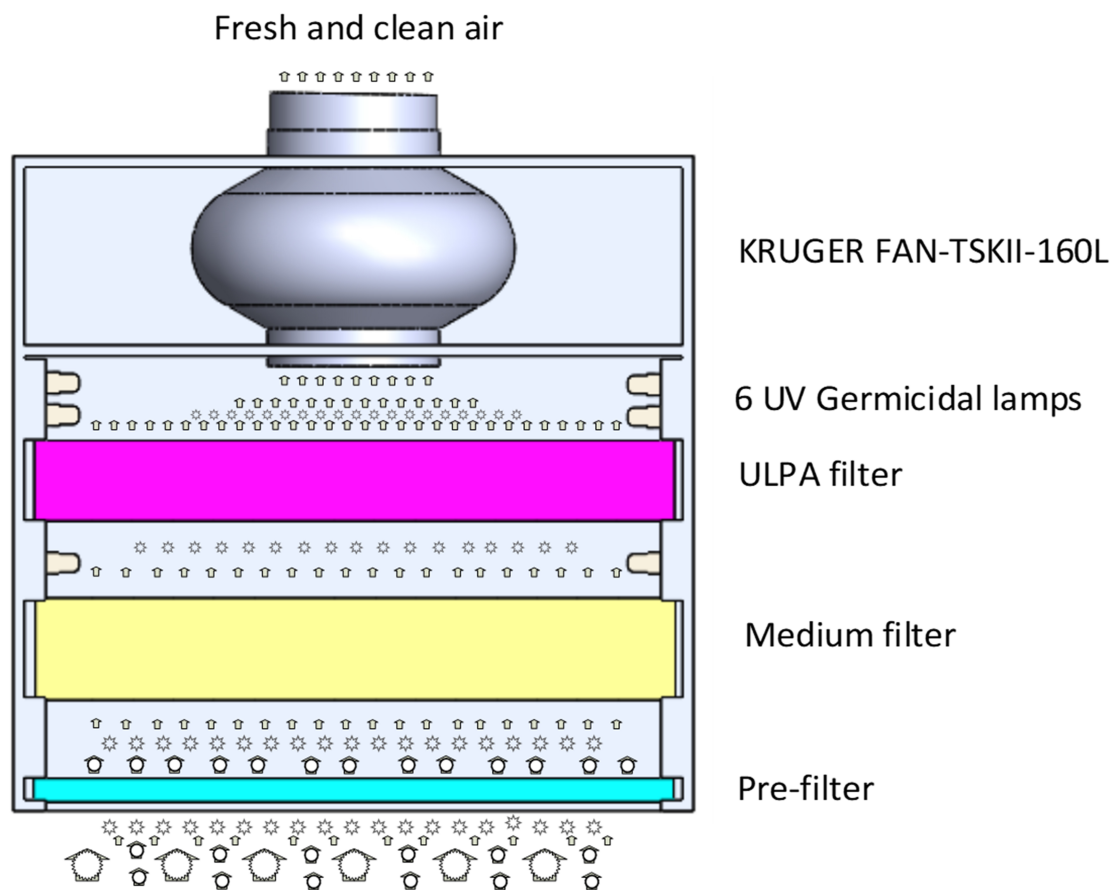
ส่วนที่ 1 ผู้คัดกรองความดันบวก พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1.44 m^2 ตู้อ่าง 2 m ปริมาตรตู้ 2.88 m^3 ทำหน้าที่เป็นห้องทำงานของบุคลากรทางการแพทย์ โครงสร้างทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ขนาด $30 \times 30 \text{ mm}$ ผนังด้านหน้าทำจากอะคริลิกใสพร้อมเจาะช่องสำหรับติดตั้งถุงมือจำนวน 2 ช่อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm ผนังส่วนที่เหลือทำจากวัสดุพลาสติก โดยผนังด้านขวามีการเจาะช่องสำหรับติดตั้งประตูขนาดกว้าง 0.75 m และสูง 2.00 m ผนังด้านซ้ายติดตั้งเกวียนความดันภายในตู้ มีปุ่มควบคุมการทำงานของพัดลมป้อนอากาศสะอาดเข้าสู่ตู้และควบคุมความดันภายในตู้ มีสวิตช์เปิด-ปิดหลอดฆ่าเชื้อ (UVGI lamps) ไฟแสงสว่างภายในตู้และหน้าต่าง มีเต้ารับไฟฟ้า และมีเครื่องสื่อสารกับผู้รับบริการ (inter-communication) ผนังด้านหลังมีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์พร้อมรีโมทควบคุม บริเวณเหนือเครื่องปรับอากาศมีการเจาะช่องจ่ายอากาศสะอาดจากภายนอกเข้าสู่ตู้ และบริเวณส่วนล่างของผนังมีการเจาะช่องปล่อยอากาศที่เข้าสู่ภายนอก ตู้ตั้งอยู่บนฐานที่มีล้อที่สามารถเข็นเคลื่อนที่ได้และภายในตู้ยังมีโต๊ะซึ่งเป็น ที่ทำงานและวางเอกสารทางการแพทย์อีกด้วย

ส่วนที่ 2 ชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและฆ่าเชื้อโรคในอากาศพร้อมพัดลมส่งอากาศสะอาดเข้าสู่ผู้คัดกรองความดันบวก ทำหน้าที่นำอากาศจากภายนอกเข้าสู่กระบวนการ

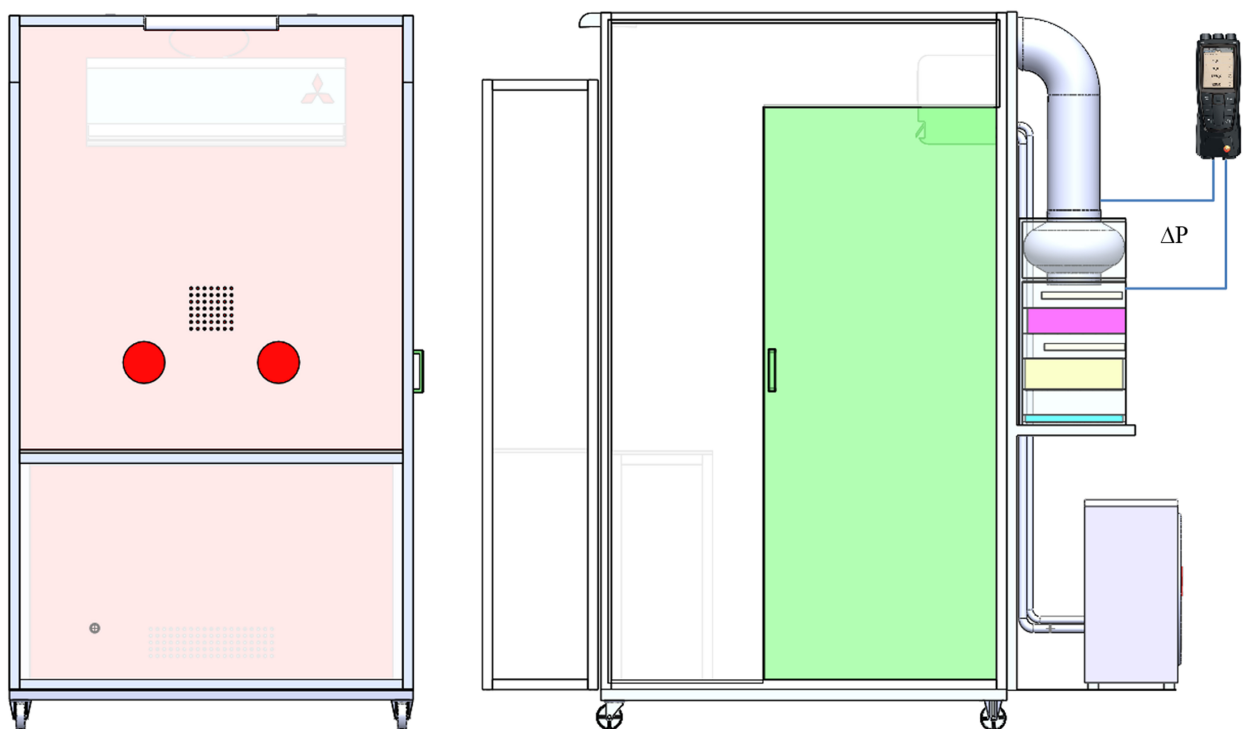
กรองสิ่งสกปรกและฆ่าเชื้อโรคด้วยแผ่นกรองที่มีความละเอียดในการกรอง 3 ช่วง คือ แผ่นกรองหยาบ (pre filter-MERV5-6) มีประสิทธิภาพ 30-35% ที่ขนาดอนุภาค $3-10 \mu\text{m}$ แผ่นกรองละเอียดปานกลาง (medium filter-merv15) มีประสิทธิภาพในการกรอง 90-95% ที่ขนาดอนุภาค $0.3-1 \mu\text{m}$ และแผ่นกรองละเอียดมาก (ultra-low penetrating air filter-U15) มีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 99.9995% ที่ขนาดอนุภาค $0.12 \mu\text{m}$ และมีการติดตั้งหลอดฆ่าเชื้อชนิด UVGI (ultraviolet germicidal irradiation lamp) ขนาด $6\text{W} \times 6\text{ชุด}$ เพื่อฆ่าเชื้อโรค จากนั้นพัดลมจะดูดและส่งอากาศสะอาดเข้าสู่ผู้คัดกรองความดันบวก โดยพัดลม (KRUGER-TSKII-160L) ทำงานแบบปรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้ตามความต้องการความดันในตู้คัดกรองความดันบวก

ส่วนที่ 3 เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศแบบอัดไอที่ติดตั้งไว้ด้านหลังของผู้คัดกรองความดันบวก ทำหน้าที่ปรับสภาวะอากาศภายในตู้คัดกรองความดันบวกให้อยู่ในระดับอุณหภูมิสบายที่ช่วยให้บุคลากรทางการแพทย์ปฏิบัติงานได้นานขึ้น

ส่วนที่ 4 โต๊ะแบบมีผนังกั้นที่ติดตั้งไว้ด้านหน้าผู้คัดกรองความดันบวก เพื่อเป็นที่พักแขนหรือวางเอกสารของผู้เข้ารับการคัดกรอง โดยมีผนังกั้นบังตาข้างแบบทึบ โดยผนังบังตามีความกว้าง 35 cm และสูง 180 cm พื้นโต๊ะสูงจากพื้น 65 cm และสามารถปรับสูงต่ำได้



ภาพ 3 ชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและฆ่าเชื้อโรคในอากาศ



ภาพ 4 ตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ทดลองหาความสัมพันธ์ของขนาดพื้นที่รอยรั่วของตู้คัดกรองเมื่อทำงานร่วมกับพัดลมป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรอง เพื่อรักษาความดันภายในตู้คัดกรองไว้ที่ 3 ระดับ คือ 5 10 และ 15 Pa โดยเริ่มทดสอบที่อัตราการป้อนอากาศสูงสุดของพัดลมและหาค่ารอยรั่วสูงสุดของตู้คัดกรองที่สามารถรักษาความดันภายในตู้ที่ 15 Pa อัตราการป้อนอากาศสูงสุดเข้าสู่ตู้คัดกรองหาได้จากการวัดความดันตกคร่อมพัดลมและกราฟคุณลักษณะของพัดลม (fan-curve) และทำการคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลเข้าสู่ตู้คัดกรองเมื่อช่องทางป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่ 119 cm^2 อีกทั้งยังสามารถกำหนดจุดวัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ตู้คัดกรองซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลของอากาศที่ได้จากกราฟคุณลักษณะของพัดลม ในขณะที่พื้นที่รอยรั่วต่ำสุดกำหนดไว้ที่ 187 cm^2 (รอยรั่วขอบประตู) และอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองที่ความเร็วรอบพัดลมที่ต่ำกว่าความเร็วสูงสุดหาได้จากผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ตู้คัดกรองคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าสู่ตู้คัดกรอง และกำหนดให้อัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองมีค่าเท่ากับอัตราการรั่วของอากาศออกจากตู้คัดกรอง

2. ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของพัดลมป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อให้ได้ความดันภายในตู้ที่กำหนดที่ 5 10 และ 15 Pa เมื่อพื้นที่รอยรั่วของตู้มี 3 ขนาด คือ 187 220 และ 253 cm^2 ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะมีการปรับค่าความเร็วรอบของพัดลมป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองเพื่อให้ได้ค่าความดันภายในตู้ที่กำหนด และวัดค่าความดันตกคร่อมพัดลมเพื่อประเมินหาอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองและคำนวณหาอัตราการหมุนเวียนอากาศ (ACH) ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับพัดลมป้อนอากาศ

3. ทดสอบสภาวะการทำงานของตู้คัดกรองความดันบวกโดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศที่ 26°C และพัดลมภายในเครื่องปรับอากาศทำงานที่อัตราการไหลต่ำสุด (ตำแหน่งปรับพัดลม “Lo” และควบคุมค่าความดันภายในตู้คัดกรองความดันบวกไว้ที่ 10 Pa และที่รอยรั่วของ

ตู้ที่ 220 cm^2 โดยทำการปรับค่าความเร็วรอบของพัดลมป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองและวัดค่าความดันตกคร่อมพัดลมเพื่อประเมินหาอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองและคำนวณหาอัตราการหมุนเวียนอากาศ (ACH) ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับพัดลมป้อนอากาศ กำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องปรับอากาศ กำลังไฟฟ้าสำหรับหลอดไฟฆ่าเชื้อ UVC และกำลังไฟฟ้าสำหรับหลอดไฟแสงสว่าง ตลอดจนวัดค่าสภาวะภายในตู้คัดกรองความดันบวกประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความเข้มแสง ความเร็วอากาศปะทะตัว ความเข้มแสง และค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทดสอบตู้คัดกรองความดันบวกสร้างใหม่และตู้คัดกรองความดันบวกที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 เดือน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องวัด Testo 480 ที่ภายในมีเซ็นเซอร์วัดความดัน-ความดันแตกต่าง และมีเซ็นเซอร์ภายนอกประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ-ความชื้น เซ็นเซอร์วัดความเร็วลม-อัตราการไหล เซ็นเซอร์วัดแสง

1.1 โพรบวัดอัตราการไหลและความชื้นของอากาศ (thermal air flow measuring head and humidity probe) ช่วงการวัดความเร็วลม 0-20 m/s ความละเอียดในการวัด 0.03 m/s ช่วงการวัดอุณหภูมิ $-20-70^\circ\text{C}$ ความละเอียดในการวัด 0.5°C ช่วงการวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0-100 %RH ความละเอียด 1.8 %RH

1.2 โพรบวัดดัชนีคุณภาพอากาศ (IAQ probe) ช่วงการวัด CO_2 0-10,000 ppm ความละเอียด 75 ppm ช่วงการวัดอุณหภูมิ $0-50^\circ\text{C}$ ความละเอียดในการวัด 0.5°C ช่วงการวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0-100 %RH ความละเอียด 1.8 %RH

2. อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger WISCO AI210) พร้อมเซ็นเซอร์วัดกระแส Current Transducer

3. อุปกรณ์วัดทางไฟฟ้า (Sonoff รุ่น Pow Elite 16A สวิตช์ควบคุม WiFi แบบเรียลไทม์) สามารถกำลังไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และสามารถดูประวัติการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลังได้ 6 เดือน

4. เครื่องวัดความเข้มแสงยูวี (UVC Meter รุ่น RGM-UVC) ช่วงการวัด 0-1,999 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

ผลการวิจัย

ผลการประเมินอัตราการรั่วของอากาศออกจากตู้คัดกรอง

จากการทดลองควบคุมความดันภายในตู้คัดกรอง ความดันบวกที่ 3 ระดับ คือ 5 10 และ 15 Pa เพื่อหาอัตราการรั่วของอากาศออกจากตู้เมื่อกำหนดให้พื้นที่รอยรั่วมี 3 กรณี คืออากาศรั่วออกจากช่องว่างขอบประตู และอากาศรั่วออกจากช่องว่างขอบประตูร่วมกับช่องระบายอากาศ โดยช่องระบายอากาศมี 2 ช่องที่สามารถเปิดปิดได้โดยอัตราการรั่วของอากาศวัดจากอัตราการป้อนอากาศใหม่เข้าสู่ตู้คัดกรอง ผลการทดลองแสดงดังภาพ 5 จากผลการทดลองพบว่า อัตราการรั่วของอากาศเพิ่มขึ้นตามความดันภายในตู้และพื้นที่รอยรั่วที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการรั่วสูงที่สุดมีค่า 330.2 m^3/h เมื่อความดันภายในตู้สูงที่สุดที่ 15 Pa และพื้นที่รอยรั่วสูงที่สุดที่ 253 cm^2 และอัตราการรั่วต่ำสุดมีค่า 134.9 m^3/h เมื่อความดันภายในตู้ต่ำสุดที่ 5 Pa และพื้นที่รอยรั่วต่ำสุดที่ 187 cm^2 โดยระดับความดันบวกภายในตู้คัดกรองที่กำหนดสอดคล้องกับมาตรฐาน 5-20 Pa (ISO 14644-4) และความดันภายในตู้ห้ามต่ำกว่า 2.5 Pa โดยพบว่า ค่าการระบายอากาศมีค่าต่ำสุด 46 เท่าของปริมาตรห้องใน 1 h ซึ่งสอดคล้องกับค่าการระบายอากาศต้องมากกว่า 12 เท่าของปริมาตรห้องใน 1 h

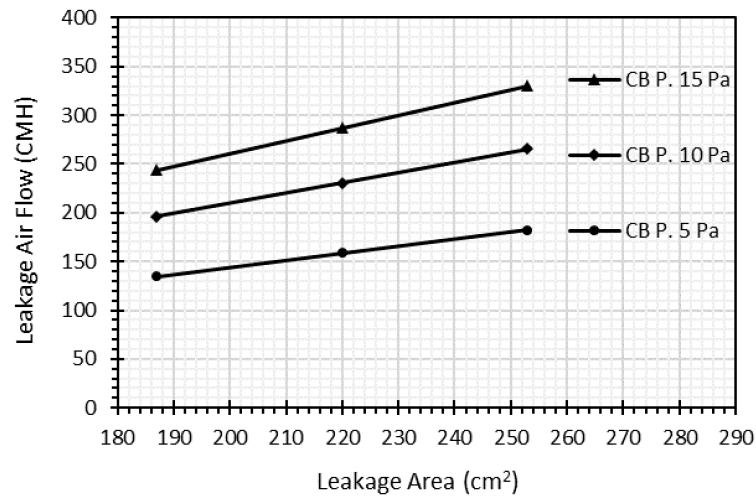
ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของพัดลมป้อนอากาศเข้าตู้คัดกรอง

จากการทดลองปรับความเร็วรอบของพัดลมเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ตู้คัดกรองกับความดันแตกต่างระหว่างความดันในตู้และความดันตกจากชุดกรอง เมื่อพื้นที่รอยรั่วของตู้มี 3 ขนาด คือ 187 220 และ 253 cm^2 และอายุการใช้งานชุดกรอง 2 ช่วง คือ 0 และ 6 เดือน ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพ 6 จากผลการทดลองพบว่า พัดลมทำงานที่ความเร็วรอบสูงขึ้นตามความดันภายในตู้ที่สูงขึ้นและพื้นที่รอยรั่ว

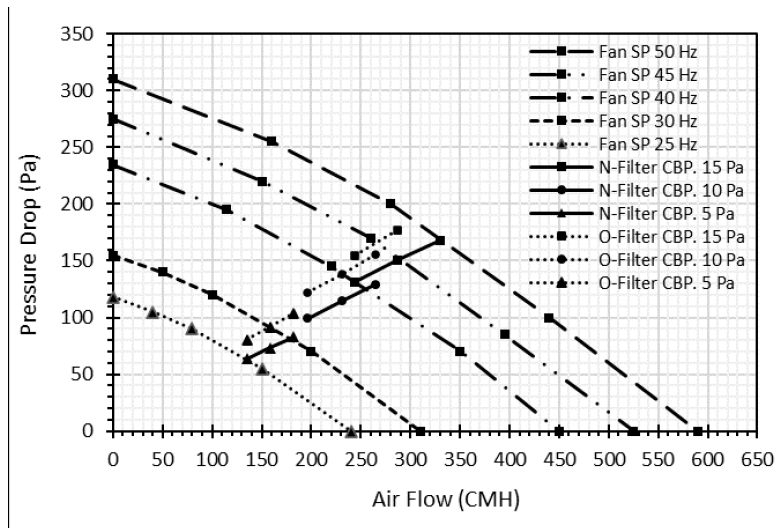
สูงขึ้นและเมื่อชุดกรองถูกใช้งานเป็นเวลา 6 เดือนพบว่าพัดลมต้องทำงานที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 Hz เมื่อปรับพื้นที่รอยรั่วของตู้ที่ 253 cm^2 พบว่า ไม่สามารถรักษาความดันตู้ลดลงจาก 15 Pa เหลือ 12 Pa

ผลศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

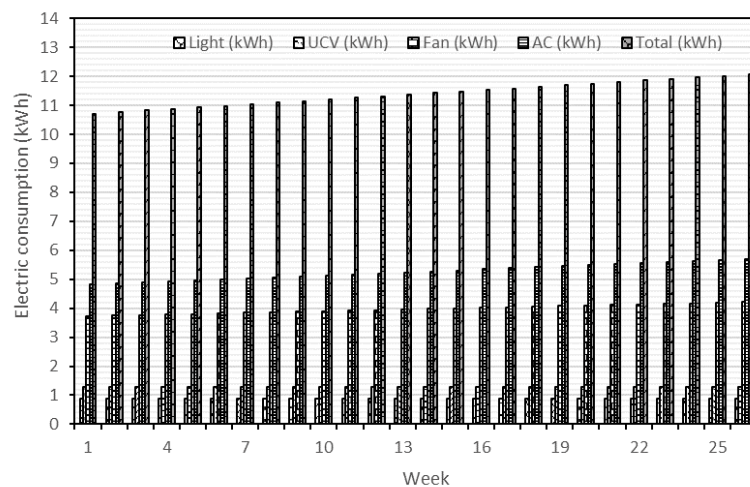
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าของตู้คัดกรอง โดยอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดคือเครื่องปรับอากาศ รองลงมา คือ พัดลมและหลอด UVC ภายในชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและเชื้อโรคในอากาศ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ ระบบแสงสว่าง โดยเครื่องปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามความร้อนของตู้คัดกรองและความสามารถในการรับความร้อนและระบายความร้อนของอีวาพอเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ ซึ่งสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองที่สะสมบริเวณแผงระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ (COP) และทำให้แนวโน้มอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากเครื่องปรับอากาศแล้วพัดลมภายในชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและเชื้อโรคในอากาศก็เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่มีปัจจัยมาจากการอุดตันแผ่นกรองทำให้ความดันตกคร่อมแผ่นกรองเพิ่มขึ้นและการปรับตั้งความดันภายในตู้คัดกรองและการเปิดช่องระบายอากาศ โดยผลการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าสภาพใช้งานจริงรายสัปดาห์ แสดงในภาพ 7



ภาพ 5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่อากาศรั่วและอัตราการรั่วของอากาศที่ความดันภายในตู้แตกต่างกัน 3 ระดับ



ภาพ 6 กราฟแสดงสภาวะการทำงานของพัดลมที่ความดันภายในตู้ 3 ระดับและอัตราการรั่วของอากาศจากตู้ 3 ระดับเมื่อใช้ชุดกรองใหม่และชุดกรองที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 เดือน



ภาพ 7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารายสัปดาห์

ผลการทดสอบสภาวะการทำงานของตู้คัดกรองความดันบวก

จากการทดสอบสภาวะการทำงานของตู้คัดกรองความดันบวกเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศที่ 26 °C และปรับระดับการทำงานของพัดลมภายในเครื่องปรับอากาศที่ตำแหน่ง “Lo” และควบคุมค่าความดันภายในตู้คัดกรองความดันบวกไว้ที่ 10 Pa โดยพื้นที่รอยรั่วของตู้ที่ 220 cm² ผลการทดสอบแสดงในตาราง 1 จากผลการทดลองพบว่า ค่าคุณภาพอากาศภายในตู้คัดกรองสอดคล้องกับค่ามาตรฐานห้องความดันบวกดังนี้ ค่ามาตรฐานด้านแสงสว่างภายในโรงพยาบาล แผนกการรักษาโรค ส่วนซักถามกำหนดระดับความสว่างต่ำสุดไว้ที่ 300 Lux (international commission on illumination) คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality–IAQ) ถ้าความเข้มข้นของ CO₂ ภายในอาคารมีค่า 300 ppm ภายในอาคารจะมีค่าความเข้มข้นของ CO₂ ไม่เกิน 1,000 ppm (ASHRAE Standard 62) อุณหภูมิภายในห้องมีค่ามาตรฐานที่ 24-26 °C ความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 65% ความเร็วลม 0.1-0.3 m/s (0.25 m/s: (ASHRAE Standard 55)

ตาราง 1

สภาวะการทำงานของตู้คัดกรองความดันบวกที่อายุการใช้งาน 0 และ 6 เดือน

สภาวะอากาศภายในตู้คัดกรอง	ตู้คัดกรองใหม่	ตู้คัดกรองอายุ 6 เดือน	ค่ามาตรฐานห้องความดันบวก
ความดันภายในตู้ (Pa)	10	10	5-20
อัตราการหมุนเวียนอากาศ (ACH)	46	46	>12
อุณหภูมิอากาศ (°C)	22.4	22.5	22-26
ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	57.8-59.4	50	>65
ความเร็วอากาศปะทะตัว (m/s)	< 0.21	0.1-0.3	0.1-0.3
ความเข้มแสงภายในตู้ (Lux)	350	350	Min 300
คาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)	629-641	629	<1,000
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง (W)	306	339	-

การประมาณเงินลงทุนและค่าใช้จ่าย

ในการสร้างตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ มีรายละเอียดของเงินลงทุนประกอบด้วย ส่วนโครงสร้างตู้คัดกรอง เครื่องปรับอากาศ ชุดกรองที่มีวัสดุกรองติดตั้งไว้ภายใน หลอดฆ่าเชื้อพัดลมป้องกันอากาศเข้าสู่ เกจวัดความดันบวก ระบบสื่อสารอินเทอร์เน็ต ระบบแสงสว่างและเต้ารับ โดยมีรายละเอียดแสดงในตาราง 2 ในขณะที่ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการนำตู้คัดกรองไปใช้งาน โดยใช้จ่ายแยกออกเป็น 2 ส่วน คือค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าบำรุงรักษา โดยค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น โดยผู้รับผิดชอบชุดกรองทำให้อัตราการใช้ไฟฟ้าของพัดลมดูดอากาศเพิ่มขึ้น โดยแผ่นกรองฝุ่นมีอายุประมาณ 2 ปี และการอุดตันของฝุ่นที่ชุดระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้น จึงควรทำความสะอาดแผงระบายความร้อนเครื่องปรับอากาศทุก ๆ 6 เดือน

ตาราง 2

แสดงรายละเอียดเงินลงทุน

รายการ	บาท
1. วัสดุก่อสร้างตู้คัดกรอง (1.2 m x 1.2 m x 2 m)	30,000
2. เครื่องปรับอากาศ Mitsubishi heavy duty inverter (DXK/C10-YXP-W1)	18,000
3. ชุดกรองประสิทธิภาพสูง AIRMAX (UML-U15-12243-G2-E2, MF2-CB-915, PP-STD-110)	5,500
4. ชุดหลอดฆ่าเชื้อ Philips UV-C-T5 (TUV 6W x 6 หลอด)	3,600
5. อุปกรณ์พัดลม KRUGER (TSK-II-160L)	3,500
6. อุปกรณ์วัดความดัน High Precision Air Differential Pressure Gauge (-30 to 30 Pa)	2,000
7. เครื่องสื่อสาร	2,000
8. ไฟแสงสว่างและเต้ารับ	1,000
รวม	65,600

การอภิปรายผล

จากการออกแบบและสร้างตู้คัดกรองความดันบวก เพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ และมีการนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานในสถานการณ์จริง ณ คลินิกคัดกรองโรคทางเดินหายใจ โรงพยาบาลศูนย์การแพทย์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ถนน รังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120 และทางคณะผู้วิจัยได้ติดตามความถี่ในการใช้งานพบว่า ตั้งแต่เดือน มกราคม 2565 ถึงเดือน มิถุนายน 2565 มีผู้ป่วย ATK รวม 2537 ราย ผู้ป่วยที่เข้าเกณฑ์กลุ่ม 608 ต้องใช้เวลารายละเอียดมากกว่า 15 นาที ส่วนผู้ป่วยที่ไม่เข้าเกณฑ์ 608 ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที ในการซักประวัติรวมถึงจ่ายยา

จากการทดลองหาค่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของตู้คัดกรองความดันบวก โดยความดันภายในตู้คัดกรอง กำหนดตามคำแนะนำที่เหมาะสมในการใช้งานซึ่งมีค่าอยู่ที่ 10 Pa (ASHRAE, 2019) เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดพื้นที่รอยรั่วของตู้จาก 187 เป็น 220 และ 253 cm² พบว่า อัตราการป้อนอากาศใหม่ (fresh air) เข้าสู่ตู้คัดกรองความดันบวก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการรั่วของลมเมื่อนำสมการที่ 1 มาพิจารณา พบว่าสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ n เท่ากับ

0.54 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.5-1.0 (Gadgil et. al., 2006) อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนอากาศใหม่เข้าสู่ตู้ส่งผลต่อการใช้พลังงานของพัดลมป้อนอากาศ อีกทั้งยังลดอายุการใช้งานของชุดกรองอีกด้วย แม้ว่าในการกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงจะกำหนดให้ใช้แผ่นกรอง HEPA แต่เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้แผ่นกรอง ULPA (U15) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 99.9995% ที่ขนาดอนุภาค 0.12 μm (Thai Engineering Specialists Co., Ltd., 2022) อีกทั้งการค่าเชื้อด้วย UVC ที่กำหนดค่าปริมาณรังสี UVC เป้าหมายขั้นต่ำไว้ที่ 1,500 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าปริมาณรังสี UVC ที่ 3,300 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$

สรุปผลการทดลอง

ตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ที่ออกแบบและสร้างมีพื้นที่ภายใน 1.44 m² และมีความสูง 2 m คิดเป็นปริมาตรตู้ 2.88 m³ ภายในติดตั้งเครื่องปรับอากาศอินเวอร์เตอร์ที่มีความสามารถในการทำความเย็นในช่วง 2,729-10,557 BTU/h โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 26 °C พัดลมภายในเครื่องปรับอากาศตั้งค่าให้ทำงานที่อัตราการไหล 150 m³/h เป่าอากาศเย็นออกโดยมีทิศทางลมตรงไปยัง

บุคลากรทางการแพทย์ ผู้คัดกรองความดันบวกมีพื้นที่รอยรั่ว
ปรับได้ 3 ระดับคือ 187 220 และ 253 cm² เพื่อให้ได้
ความดันบวกภายในตู้คัดกรองมีค่า 10 Pa จึงต้องป้อน
อากาศจากภายนอกเข้าสู่ตู้ที่อัตราการไหลสอดคล้องกับ
พื้นที่รอยรั่วคือ 196.1 230.7 และ 265.3 m³/h อากาศ
จากภายนอกไหลผ่านชุดกรองสิ่งปนเปื้อนและเชื้อโรคใน
อากาศที่ประกอบด้วยกรองหยาบ (MERV5-6) กรองหยาบ
ปานกลาง (MERV15) กรองละเอียดมาก (U15) พร้อม
ติดตั้งหลอดฆ่าเชื้อแสงยูวี (UVC) ที่ความเข้มของแสงยูวี
ที่ 3,300 µJ/cm² ฝุ่นละอองและสิ่งปนเปื้อนอุดตันแผ่น
กรองมากขึ้นตามเวลาการใช้งาน เมื่อใช้ชุดกรองต่อเนื่อง
เป็นเวลา 6 เดือนส่งผลให้ความดันตกคร่อมชุดกรองมาก
ขึ้นประมาณ 20-30 Pa ซึ่งทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ
15 แผ่นกรองมีอายุการใช้งานประมาณ 2 ปี การใช้พลังงาน
ของเครื่องปรับอากาศใช้พลังงานสูงสุด รองลงมาเป็นพัดลม
ป้อนอากาศ หลอดไฟฆ่าเชื้อและระบบแสงสว่างตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

การใช้ตู้คัดกรองความดันบวกควรควบคุมความดัน
อากาศภายในตู้ไว้ไม่ต่ำกว่า 5 Pa อย่างไรก็ตามศูนย์ควบคุม
และป้องกันโรค (CDC) แนะนำความแตกต่างของแรงดัน
ขั้นต่ำที่จำเป็นระหว่างห้องควบคุมความดันกับสภาพ
แวดล้อมภายนอกควรเท่ากับหรือมากกว่า 2.5 Pa ดังนั้น
จึงควรมีระบบควบคุมความดันที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติ
และมีสัญญาณเตือนเมื่อความดันต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือ
มีอุปกรณ์ใดทำงานผิดปกติ

องค์ความรู้ใหม่และผลที่เกิดต่อสังคม

ต้นแบบตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่
เชื้อ SARS-CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ ถูกพัฒนา
ขึ้นเพื่อใช้ในสถานการณ์ฉุกเฉินช่วงที่โรคติดเชื้อโควิด-19
ระบาดอย่างรุนแรง โดยหนึ่งในขั้นตอนสำคัญของการ
พัฒนาเครื่องต้นแบบ คือ การให้ผู้ใช้งานจริงมาทดลองใช้
เครื่องและร่วมปรับปรุงแบบให้ตรงกับการใช้งานจริง และ
ปัจจุบันเครื่องต้นแบบได้ถูกนำไปใช้จริงที่ศูนย์การแพทย์
สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารีแล้วจำนวน
3 ตู้ โดยมีอายุการใช้งาน 1 ปี (สิงหาคม 2564) จำนวน 1 ตู้

อายุการใช้งาน 6 เดือน (กุมภาพันธ์ 2565) จำนวน 1 ตู้
และตู้คัดกรองติดตั้งใหม่ จำนวน 1 ตู้ (กันยายน 2565)
ตู้คัดกรองรุ่นแรกถูกปรับปรุงให้เหมาะสมสำหรับการรักษา
ความดันบวกในช่วงที่เหมาะสมมากขึ้นโดยการเปลี่ยนพัดลม
เดิมอากาศใหม่เข้าสู่ตู้จากพัดลม KRUKER รุ่น TSKII-125L
เป็น รุ่น TSKII-160L และติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบ
พัดลมเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถควบคุมความดันภายในตู้ให้
อยู่ในช่วง 5-15 Pa ได้ และชุดกรองอากาศได้ใช้งานได้นาน
ขึ้น 2 เท่า จาก 1 ปี เป็น 2 ปี

ตู้คัดกรองความดันบวกเพื่อลดการแพร่เชื้อ SARS-
CoV-2 ไปยังบุคลากรทางการแพทย์ มีการนำไปติดตั้งเพื่อ
ใช้งานในสถานการณ์จริง ณ คลินิกคัดกรองโรคทางเดินหายใจ
โรงพยาบาลศูนย์การแพทย์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ
สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ถนน รังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก
26120 และทางคณะผู้วิจัยได้ติดตามการใช้งานและความถี่
ในการใช้งานพบว่า มีบุคลากรทางการแพทย์ 3 กลุ่มใช้
ตู้คัดกรอง คือ แพทย์ พยาบาล และผู้ช่วยพยาบาล โดย
ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ประกอบด้วย (1) ใช้คัดกรอง/
ซักประวัติ ผู้ป่วยที่มีผล ATK เป็นบวก (2) ใช้ลงข้อมูล/ลง
ระบบ เกี่ยวกับประวัติการรักษาของผู้ป่วยโควิด 19 (3) ใช้
แจก/จ่าย ยา ของผู้ป่วยโควิด-19 (4) ใช้ป้องกันการแพร่
กระจายเชื้อจากผู้ป่วยสู่บุคลากร ตั้งแต่เดือนมกราคม 2565
ถึงเดือนมิถุนายน 2565 โดยมีผู้ป่วยที่ผลตรวจ ATK เป็น
บวก รวม 2537 ราย ผู้ป่วยที่เข้าเกณฑ์กลุ่ม 608 ต้องใช้
เวลารายละมากกว่า 15 นาที ส่วนผู้ป่วยที่ไม่เข้าเกณฑ์ 608
ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาทีในการซักประวัติรวมถึงจ่ายยา

โดยตลอดระยะเวลาที่มีบุคลากรทางการแพทย์
ใช้ตู้คัดกรองความดันบวก ไม่พบบุคลากรทางการแพทย์
ติดเชื้อจากผู้ป่วยซึ่งแตกต่างจากเหตุการณ์ก่อนหน้านี้ คือ
ช่วงกรกฎาคม 2564 บุคลากรทางการแพทย์ของแผนก ARI
ติดเชื้อโควิด-19 จากผู้ป่วยที่มาตรวจคัดกรอง เป็นเหตุให้
ต้องปิดแผนก เป็นการชั่วคราว และกลับมาเปิดดำเนินการ
ใหม่พร้อมกับต้นแบบตู้คัดกรองความดันบวกที่นำเข้าติด
ตั้งเพื่อใช้งาน



References

- Aroom, K., Ge, J., Al-Zogbi, L., White, M., Trustman, A., Greenbaum, A., Farley, J., and Krieger, A. (2022). Positive pressure testing booths development and deployment in response to the COVID-19 outbreak. *About Journal of Medical Devices*, 16(1), 011001. <https://doi.org/10.1115/1.4052515>
- ASHRAE. (2019). *ASHRAE handbook-hvac applications-chapter 62 ultraviolet air and surface treatment*. Retrieved from https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/i-p_a19_ch62_uvairandsurfacetreatment.pdf
- ASHRAE. (2021). *Technical resources: Filtration-disinfection*. Retrieved from <https://www.ashrae.org/technical-resources/filtration-disinfection>
- Centers of Disease Control and prevention. (2003). *Guidelines for environmental infection control in health-care facilities*. Retrieved from <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/background/air.html>
- Centers of Disease Control and prevention. (2022). *Sars-Cov-2-transmission*. Retrieved from <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>
- Department of Disease Control. (2022). *Covid-19-daily*. Retrieved from <https://data.go.th/en/dataset/covid-19-daily>
- Department of Disease Control. (2022). *Timeline-cases-by-provinces*. Retrieved from <https://covid19.ddc.moph.go.th/api/Cases/timeline-cases-by-provinces>
- Gadgil, A., Price, P. N., Shehabi, A., & Chan, R. (2006). *Indoor-outdoor air leakage of apartments and commercial buildings. CEC-500-2006-111*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://www.energy.ca.gov/2006publications/CEC-500-2006-111/CEC-500-2006-111.PDF>.
- Galbadage, T., Peterson, B. M., & Gunasekera, R. S. (2020). Does COVID-19 spread through droplets alone? *Front. Public Health*, 8(163), 1-4. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00163>
- International Standard. (2001). *Cleanrooms and associated controlled Environments, Part 4: Design, construction and start-up (ISO 14644-4)*. Retrieved from http://www.driso.ir/standards/iso/ISO_14644_4_2001_,_Cleanrooms_and.pdf
- Nair, S. S., Prajapati, A. K., Venkatesan, R. B., Vayalappil, M. C., & Kishore, A. (2020). Design and Evaluation of Chitra Swab Collection Booths for Health Professionals in COVID-19 Pandemic. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 2020, 1-6. doi:10.1007/s41403-020-00167-x

- Pharmaceuticalhvac. (2020). *Leakages calculation*. Retrieved from <https://www.pharmaceuticalhvac.com/leakages-calculation/>
- Sakkawong, S., Kullatam, P., Kumsang, W., & Chunate, Y. (2021). Guidelines for the prevention of COVID-19 transmission from using medical tools and equipment in patient care. *Siriraj Medical Bulletin (SMB)*, 14(1), 41-49. (in Thai)
- Stadnytskyi, V., Bax, C. E., Bax, A., & Anfinrud, P. (2020). The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(22), 11875-11877. <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2006874117>
- Thai Engineering Specialists Co., Ltd. (2022). *ULPAMax: Ultra low penetrating air*. Retrieved from [www. Airmaxthai.com](http://www.Airmaxthai.com)

