

## ห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม

### Modular Negative Pressure Isolation Room for Field Hospital

มานพ พิพัฒน์หัตถกุล\* และ วิริยะ บริสุทธิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถ.พระราม 1 ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Email: manop@pit.ac.th

**Manop Pipathattakul\* and Wiriya Borisut**

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

833 Rama 1 Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

Email: manop@pit.ac.th

#### บทคัดย่อ

การแพร่ระบาดของโรคทางเดินหายใจแบบเฉียบพลันรุนแรง Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) ได้รับการประเมินว่ามีความเสี่ยงสูงมากในระดับโลกโดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งปัจจุบันถูกเรียกว่าโรคระบาด COVID-19 จึงมีความพยายามในการพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อช่วยบรรเทาการระบาดของ COVID-19 อย่างเร่งด่วน เพื่อปกป้องบุคลากรทางการแพทย์ให้ดียิ่งขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการออกแบบห้องแยกส่วนความดันลบที่เคลื่อนที่ได้ง่าย ระบบระบายอากาศออกแบบตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASHRAE 170:2017 โดยมีข้อกำหนดขั้นต่ำประกอบด้วย อัตราการเติมอากาศ 2 ACH, อัตราการระบายอากาศ 12 ACH, จำนวนและประสิทธิภาพชุดกรองของพัดลมระบายอากาศ และความดันลบไม่น้อยกว่า (-ve) 2.5 Pa ห้องแยกส่วนความดันลบที่ทำการออกแบบและสร้างมีขนาด 3 x 3 x 2.4 เมตร ประกอบด้วยห้องพักแยกเดี่ยวขนาด 2.3 x 3 x 2.4 เมตร และห้องโถงรอกขนาด 0.7 x 3 x 2.4 เมตร ระบบระบายอากาศประกอบด้วยพัดลมเติมอากาศและพัดลมระบายอากาศที่มีชุดกรองอากาศประสิทธิภาพสูง ทำการทดลองในช่วงความเร็วของพัดลมระบายอากาศตั้งแต่ 30 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ เงื่อนไขการทดสอบแบ่งเป็นสองกรณี คือ ไม่มีผู้ปฏิบัติงานและมีผู้ปฏิบัติงานสองคน เข้า-ออก จากห้อง จากผลการทดลองพบว่าความเร็วพัดลมระบายอากาศที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราการถ่ายเทอากาศ 19.71 ถึง 26.04 ACH พัดลมเติมอากาศทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ที่สามารถให้อัตราการถ่ายเทอากาศเป็น 7.2 ACH ห้องพักแยกเดี่ยวมีความดันลบในช่วง (-ve) 6.0 ถึง 16.0 Pa ในขณะที่มีผู้ปฏิบัติงานสองคนเดินเข้า ห้องพักแยกเดี่ยวสามารถรักษาระดับความดันในห้องอยู่ในช่วง (-ve) 4.5 ถึง 9.0 Pa โดยความดันภายในห้องสามารถกลับสู่สภาวะสมดุลได้ภายในช่วงเวลา 121 ถึง 231 วินาที จากการทดสอบด้วยควัน

ไม่พบการรั่วซึมและจุดอับอากาศภายในห้อง การปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมของ COVID-19 อาจเป็นเส้นทางของการแพร่เชื้อไวรัส แต่อย่างไรก็ตามสามารถทำให้ลดลงได้โดยห้องแยกส่วนความดันลบ

**คำสำคัญ:** ห้องแยกเดี่ยว; ความดันลบ; การระบายอากาศ; โควิด-19; เคลื่อนย้ายได้

## Abstract

The outbreak of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) has been evaluated as very high risk at the global level by the World Health Organization (WHO). Currently, COVID-19 is labeled as a pandemic. Therefore, efforts have been undertaken to develop equipment to help mitigate the outbreak of COVID-19 rapidly to protect healthcare workers better. In this study, the negative pressure isolation room design with high mobility and the designed ventilation system meets ASHRAE 170:2017 standard. The minimum requirements consist of outdoor air change rate by 2 ACH, total air change rate by 12 ACH, quantity and efficiency of exhaust fan filters, and pressurized at least (-ve) 2.5 Pa. A negative pressure isolation room was designed and fabricated using dimensions as 3 x 3 x 2.4 meters, including an isolation room as 2.3 x 3 x 2.4 meters and an anteroom as 0.7 x 3 x 2.4 meters. Makeup fan and exhaust fan with high-efficiency filter were installed as ventilation system elements. The experiments were conducted by adjusting exhaust fan speed from 30 to 60% with an increment of 10%, and test conditions performed in two cases as without and with two workers to enter and leave from a room. From the experimental results, it is found that exhaust fan speed from 45 to 55% is optimal to make air change rate from 19.71 to 26.04 ACH, makeup fan by the fixed speed can make air change rate about 7.2 ACH, an isolation room is negatively pressurized from (-ve) 6.0 to 16.0 Pa. While two workers open the entrance, an isolation room can maintain the pressure within (-ve) 4.5 – 9.0 Pa. The room pressure can return to equilibrium within 121 to 231s. The smoke test does not detect the leakage and confined space of air in an isolation room. Environmental contamination of SARS-CoV-2 may be a route of viral transmission. However, it can be minimized by a negative pressure isolation room.

**Keywords:** Isolation room; Negative pressure; Ventilation; Covid-19, Mobility

## 1. บทนำ

การแพร่ระบาดของโรคทางเดินหายใจแบบเฉียบพลันรุนแรง Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) ซึ่งต่อมาได้แพร่กระจายออกไปในหลายภูมิภาคทั่วโลกโดยปัจจุบันถูกเรียกว่าโรคระบาด COVID-19 นอกเหนือจากการแพร่ระบาดในชุมชน การติดเชื้อยังขยายตัวไปยังสถานพยาบาลอย่างต่อเนื่อง จนทำให้เกิดความกังวลว่า การส่งผ่าน

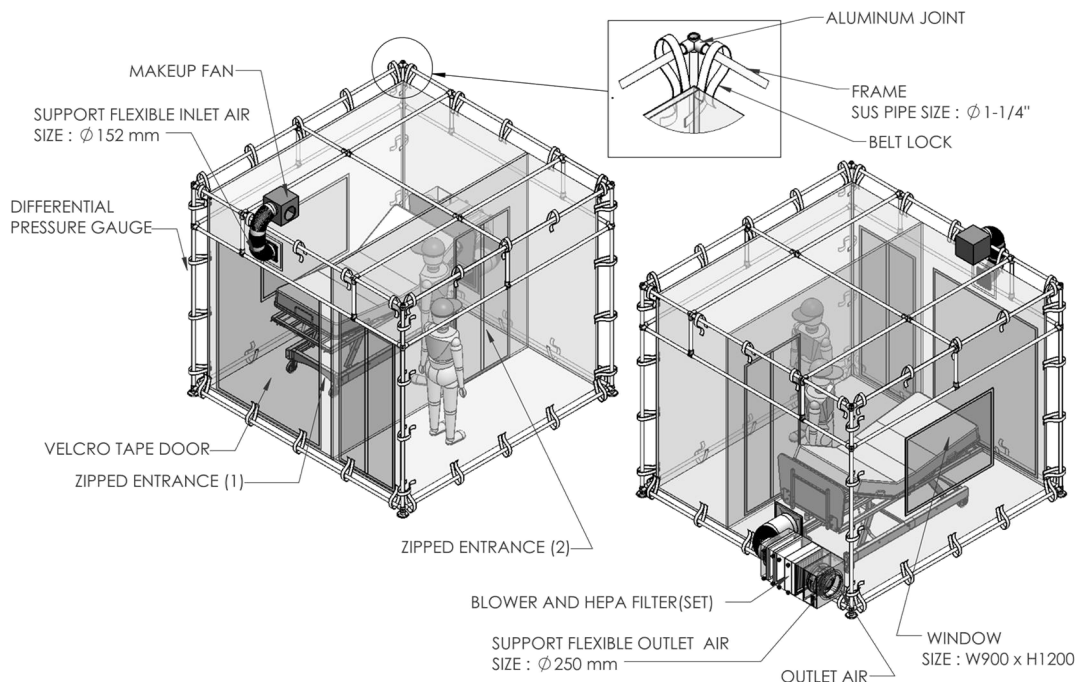
เชื่ออาจไม่เพียงแก่การสัมผัสโดยตรงผ่านสารคัดหลั่งจากผู้ป่วยเท่านั้น แต่สามารถส่งผ่านการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม หรือส่งผ่านละอองอากาศ [1] การศึกษาเกี่ยวกับ Coronavirus กลุ่มอาการโรคทางเดินหายใจในตะวันออกกลาง (MERS-CoV) พบว่ามีการปนเปื้อนของไวรัสในอากาศและสิ่งแวดล้อมในการระบาดของ MERS-CoV [2] อีกทั้ง การศึกษาเมื่อเร็ว ๆ นี้เกี่ยวกับ COVID-19 ยังพบว่าสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนเป็นสื่อกลางในการแพร่เชื้อ [3] ดังนั้น COVID-19 สามารถแพร่จากคนสู่คนผ่านทางละอองน้ำมูก น้ำลาย จากจมูกหรือปากซึ่งออกมาเมื่อผู้ป่วย ไอ จามหรือพูด การรับเชื้อได้จากการหายใจเอาละอองเหล่านี้เข้าไปจากผู้ป่วย ละอองเหล่านี้ยังตกลงสู่วัตถุและ พื้นผิวต่างๆ เช่น โต๊ะ ลูกบิดประตู ราวจับ อื่นๆ และเกิดการติดเชื้อเมื่อมีการสัมผัสกับสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้นแล้ว นำเข้าสู่ร่างกายผ่านทาง ตา จมูกหรือปาก [4] เพื่อช่วยลดความเสี่ยงเหล่านี้ ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment, PPE) อย่างเร่งด่วนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเดิม เพื่อป้องกัน ผู้ปฏิบัติงาน แต่อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันที่ไม่มีความดันลบนั้นจำกัด ทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีความเสี่ยงในการได้รับอนุภาคในอากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [5, 6] ดังนั้นการจำกัดการปนเปื้อนในอากาศไม่ทำให้แพร่กระจายโดยให้บริเวณพื้นที่ควบคุมมีความดันลบ หรือที่เรียกว่าห้องแยกส่วนความดันลบ จึงมีส่วนช่วย สนับสนุนการทำงานของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การแพร่ระบาดของ COVID-19 ในภูมิภาคต่างๆ ซึ่งมีผู้ติดเชื้อเพิ่มจำนวนมากขึ้น โดยสามารถแบ่งระดับความรุนแรงของผู้ป่วยเป็น 3 ระดับ คือ ไม่แสดงอาการ มีอาการเล็กน้อย – มาก และผู้ป่วยขั้นวิกฤต ซึ่งในการรักษาผู้ป่วยแต่ละระดับ มีพื้นที่ให้บริการในการรักษาต่างกัน จากความรุนแรงน้อยไปมาก คือ โรงพยาบาลสนาม รักษาในสถานพยาบาล และห้องผู้ป่วยวิกฤต ซึ่งปัจจุบันด้วย จำนวนผู้ป่วยที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่สถานพยาบาลมีพื้นที่จำกัด จึงมีการขยายพื้นที่การรับผู้ป่วยอย่างเร่งด่วน อาทิ เช่น ปรับปรุงหอผู้ป่วยภายในโรงพยาบาล หรือจัดตั้งโรงพยาบาลสนามขึ้นในหลายๆ พื้นที่ ดังนั้นการใช้ห้องแยก ส่วนความดันลบ สามารถช่วยป้องกันการแพร่เชื้อได้ แต่อย่างไรก็ดี ห้องแยกส่วนความดันลบโดยส่วนใหญ่ถูก ติดตั้งอย่างถาวรในสถานพยาบาลเพื่อประสิทธิภาพในการป้องกันโดยแบ่งพื้นที่ห้องออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วน ของผู้ป่วยและส่วนสำหรับการเตรียมเครื่องมือของผู้ปฏิบัติงาน โดยส่วนของผู้ป่วยนั้นจำเป็นต้องมีการรักษา ระดับความดันลบไว้อย่างสม่ำเสมอและมีการระบายอากาศที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนในอากาศ [7-10] แต่ด้วยข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลา และงบประมาณ หลายงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สร้างความดัน ลบที่สามารถติดตั้งได้รวดเร็ว เคลื่อนย้ายได้ง่ายและใช้งบประมาณไม่มาก โดยมีลักษณะเป็นฝาครอบทำจากโครง ท่อ PVC หุ้มด้วยแผ่นพลาสติก ใช้ครอบบริเวณศีรษะของผู้ป่วย มีพัดลมดูดอากาศและชุดกรองอากาศปนเปื้อน จากผู้ป่วย [11-13] หรือมีลักษณะเป็นแบบเต็นท์กระโจมครอบผู้ป่วย มีช่องเปิดสำหรับให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถ ให้บริการทางการแพทย์กับผู้ป่วยได้ [14] โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานอุปกรณ์ทั้งสองลักษณะทั้งด้าน ประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งานซึ่งผลจากศึกษาแสดงให้เห็นว่า เต็นท์กระโจมมีประสิทธิภาพและ การใช้งานที่เหมาะสมกว่าแบบฝาครอบ แต่อย่างไรก็ดี อุปกรณ์ต่างๆ ดังที่กล่าวมานั้นถูกนำมาใช้อย่างเร่งด่วน ซึ่ง มีข้อจำกัดในด้านต่างๆ อาทิเช่น ด้านความแข็งแรง การป้องกันน้ำและฝุ่น เป็นต้น [15]

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อทำการออกแบบและสร้างห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม ที่สามารถติดตั้งได้ง่าย มีระบบบำบัดอากาศปนเปื้อนภายในห้องก่อนปล่อยสู่ภายนอก มีการติดตั้งพัดลมเติมอากาศและระบายอากาศเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ป่วยและผู้ปฏิบัติงานเป็นส่วนสำคัญ

## 2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 ข้อกำหนดและการออกแบบ

ข้อกำหนดเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเป็นห้องแยกส่วนความดันลบสำหรับการใช้งานในโรงพยาบาลสนามหรือในบริเวณที่มีระบบไฟฟ้า, แสงสว่าง และมีการปรับอากาศเบื้องต้นมาแล้ว ภายในห้องแบ่งเป็นห้องพักแยกเดี่ยว (Isolation Room) และห้องโถงรอ (Anteroom) มีประตูกั้นระหว่างทั้งสองห้องเพื่อป้องกันไม่ให้ความดันภายในห้องพักแยกเดี่ยวเปลี่ยนแปลงแบบกะทันหันสามารถรองรับผู้ป่วย 1 เตียงและผู้ปฏิบัติงาน 2 คน โครงสร้างเป็นวัสดุที่ไม่เป็นสนิม สามารถถอดประกอบเคลื่อนย้ายได้ง่าย ผนังเป็นผ้าใบชนิดดุนลมนิรภัย ทนต่อการฉีกขาด กันน้ำ กันฝุ่นและใช้บประมาณไม่มาก



รูปที่ 1 ภาพสามมิติห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม

ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS 2017 เพื่อพิจารณาองค์ประกอบและตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ โดยห้องมีขนาด 3 m x 3 m x 2.4 m (ปริมาตร 762 ft<sup>3</sup>) แบ่งเป็นห้องพักแยกเดี่ยว (Isolation

Room) ขนาด 2.3 m x 3 m x 2.4 m และห้องโถงรอ (Anteroom) ขนาด 0.7 m x 3 m x 2.4 m มีประตูแบบซิปล็อก (Zip Lock) กั้นระหว่างห้องและภายนอกขนาด 0.8 m x 2 m ประตูด้านหน้าสำหรับเคลื่อนย้ายเตียงผู้ป่วย ขนาด 1.5 m x 2 m และช่องมองใสขนาด 0.9 m x 1.2 m ติดตั้งพัดลมเติมอากาศบริเวณด้านหน้าส่วนบน และพัดลมระบายอากาศบริเวณด้านหลังส่วนล่างของห้อง ดังรูปที่ 1

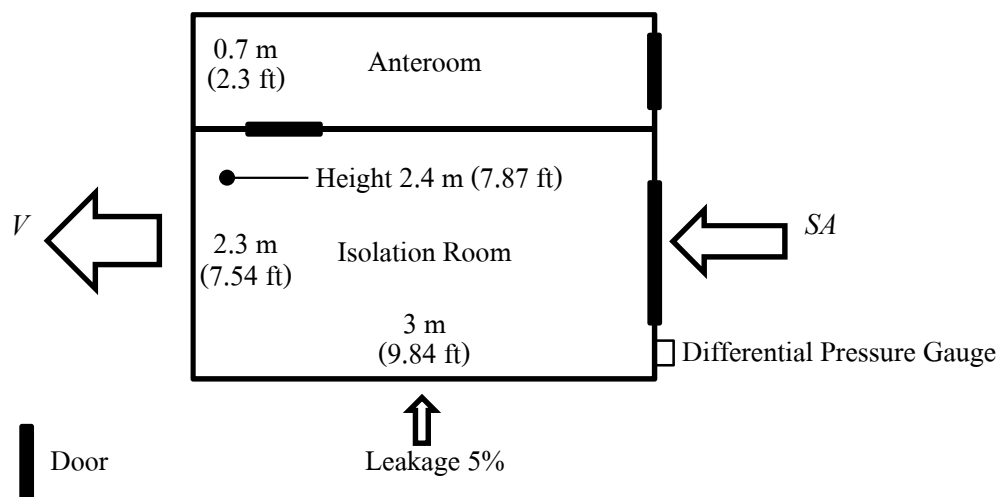
ศูนย์ควบคุมและป้องกันเชื้อโรคของสหรัฐอเมริกา (Centers for Disease Control and Prevention, U.S.A : CDC) และ ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017, Ventilation of Health Care Facilities [16, 17] ได้ให้คำแนะนำรวมถึงจัดทำข้อกำหนดต่างๆ สำหรับห้องความดันลบไว้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดหรือข้อแนะนำและพารามิเตอร์ออกแบบสำหรับห้องความดันลบ

	Required Parameters <sup>(1)</sup>	Design Parameters <sup>(2)</sup>
Pressure Relationship to Adjacent Areas (n):	Minimum (-ve) 2.5 Pa	(-ve) 15 Pa
Minimum Outdoor ACH:	2	5
Minimum Total ACH:	12	15
All Room Exhaust Directly to Outdoor (j):	Yes	Yes
Air Recirculated by Means of Room Units (a):	No	No
Design Relative Humidity (k), %:	Max 60	40–60
Design Temperature (l), °C	21–24	23–27

Note: <sup>(1)</sup> เป็นพารามิเตอร์ตามข้อกำหนดหรือข้อแนะนำ, <sup>(2)</sup> เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบ

(1 Pa = 0.004 In W.G.)



รูปที่ 2 Schematic Diagram สำหรับการออกแบบห้องความดันลบ (มุมมองด้านบน)

จากรูปที่ 2 เป็น Schematic Diagram สำหรับการออกแบบห้องความดันลบ โดยห้องมีปริมาตร ( $V_{room}$ ) เท่ากับ  $762 \text{ ft}^3$  อัตราการระบายอากาศรวม (Total Outlet Air Flow :  $V$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$V = (EA + SA + AF) \times SF \quad (1)$$

เมื่อ

$V$  คือ อัตราการระบายอากาศรวม (Cubic Feet Per Minute: cfm)

$EA$  คือ อัตราการระบายอากาศ (cfm)

$SA$  คือ อัตราการเติมอากาศ (cfm)

$AF$  คือ อัตราการระบายอากาศเพิ่ม (cfm)

$SF$  คือ Safety Factor = 1.2

อัตราการระบายอากาศ ( $EA$ ) และ อัตราการเติมอากาศ ( $SA$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3)

$$EA = \frac{\text{Minimum Total ACH}^{(2)} \times V_{room}}{60} \quad (2)$$

$$SA = \frac{\text{Minimum Outdoor ACH}^{(2)} \times V_{room}}{60} \quad (3)$$

สำหรับการออกแบบห้องที่มีความดันลบ (Negative Pressure : -ve)  $V$  ต้องมีค่ามากกว่า  $SA$  อย่างน้อย 100 cfm ขึ้นไปเนื่องจากไม่สามารถป้องกันการรั่วซึมตามรอยขอบและช่องเปิดต่างๆ ภายในห้องได้อย่างสมบูรณ์ [18] สำหรับเงื่อนไขค่าความแตกต่างความดันระหว่างภายนอกและภายในห้อง ( $\Delta P_{room}$ ) กำหนดไว้ที่ (-ve) 15 Pa และสมมติให้ ความดันบรรยากาศ ( $P_{atm}$ ) เท่ากับ 101.325 kPa สามารถคำนวณ ความดันรวม ( $P_{total}$ ) และ ปริมาตรรวม ( $V_{total}$ ) ได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$P_{total} = P_{atm} + \Delta P_{room} \quad (4)$$

$$\frac{P_{total}}{P_{atm}} = \frac{V_{total}}{V_{room}} \quad (5)$$

ค่าความแตกต่างระหว่างปริมาตรห้องและปริมาตรรวม ( $\Delta V$ ) ก็คือ ปริมาตรของอากาศที่ต้องถูกระบายออกไปเพื่อให้ห้องมีความดัน (-ve) 15 Pa ตามเงื่อนไขการออกแบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\Delta V = V_{room} - V_{total} \quad (6)$$

โดยกำหนดให้การรั่วซึม (Leakage) เท่ากับ 5% และระยะเวลาในการสร้างความดันลบเท่ากับ 5s สามารถคำนวณอัตราการระบายอากาศเพิ่ม ( $AF$ ) ได้จากสมการที่ (7)

$$AF = \left( \frac{\Delta V \times 1.05}{5} \right) \times 60 \quad (7)$$

จากการคำนวณทำให้สามารถเลือกขนาดของพัดลมระบายอากาศและพัดลมเติมอากาศได้โดยพัดลมระบายอากาศขนาด 450 cfm และพัดลมเติมอากาศขนาด 100 cfm ตามลำดับ โดยพิจารณาควบคู่กับข้อมูลทางเทคนิคของผู้ผลิตที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

## 2.2 อุปกรณ์การทดลอง

จากข้อกำหนดและการออกแบบรวมถึงแนวคิดต่างๆ ทำให้สามารถออกแบบห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม ดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 ห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม

ตารางที่ 2 อุปกรณ์ห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม

List	Dimensions	Material / Class / Model
Frame	1-1/4" (32 mm) x 1.5 mm	Stainless Steel 201
Joints	32.8 mm	Aluminum
Canvas	2.4 m x 30 m x 0.3 mm	Nylon – 66: Polyester (50: 50 %)
Makeup Air Filter	6" (152 mm)	G4
Exhaust 1 <sup>st</sup> Stage Air Filter	296 mm x 296 mm x 44 mm	G4
Exhaust 2 <sup>nd</sup> Stage Air Filter	296 mm x 296 mm x 44 mm	M13
Exhaust Final Stage Air Filter	296 mm x 296 mm x 44 mm	HEPA (H14)
Makeup Fan	258 m <sup>3</sup> /h (152 cfm)	PANASONIC: Model FY-12CG1
Exhaust Fan	450 cfm	AstroPure 450
Flexible Air Duct	6" (152 mm) x 10 m	AERODUCT
Flexible Air Duct	10" (254 mm) x 10 m	AERODUCT

โครงสร้าง (Frame) ของห้องเป็นท่อกลมสแตนเลสตีล 201 (Stainless Steel 201) ยึดด้วยข้อต่ออลูมิเนียม (Aluminum Joints) ตามจุดต่างๆ ผืนผ้าใบ (Canvas) ตัดเย็บแบบเดินตะเข็บ 4 คู่ คล้องติดกับโครงสร้างด้วยสายไนลอนและหัวเข็มขัดพลาสติก บริเวณคานหน้าส่วนล่างของห้องสามารถถอดออกได้เพื่อความสะดวกสำหรับการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ ประตูห้องเป็นแบบซิปล็อคพร้อมกับเทปตีนตุ๊กแก (Velcro Tape) เพื่อป้องกันการรั่วซึม บริเวณด้านหลังมีช่องสำหรับเชื่อมต่อแผงควบคุมไฟฟ้า (Power Panel) บริเวณด้านหน้าส่วนบนของห้องติดตั้งพัดลมเติมอากาศ (Makeup Fan) และชุดกรองอากาศเข้า (Makeup Air Filter) Class G4 บริเวณด้านหลังส่วนล่างของห้องติดตั้งพัดลมระบายอากาศ (Exhaust Fan) โดยพัดลมแต่ละชุดเชื่อมต่อกับฝาครอบช่องระบายอากาศ (Air Grill) ด้วยท่ออลูมิเนียมฟลักซ์อ่อน (Flexible Air Duct) สำหรับพัดลมระบายอากาศเป็นระบบปิดมีช่อง (Slot) สำหรับติดตั้งชุดกรองอากาศ 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 หรือ Pre Filter (Exhaust 1<sup>st</sup> Stage Air Filter) เป็นชุดกรอง Class G4, ชั้นที่ 2 หรือ Medium Filter (Exhaust 2<sup>nd</sup> Stage Air Filter) เป็นชุดกรอง Class M13 และชุดกรองสุดท้าย (Exhaust Final Stage Air Filter) เป็นชุดกรอง HEPA Filter Class H14 โดยมีตำแหน่งสำหรับวัดความดันตกคร่อมของชุดกรองอากาศแต่ละชุด การใช้งานเริ่มจากการประกอบ โครงสร้างส่วนด้านบนให้เป็นกรอบรูปสี่เหลี่ยมก่อน จากนั้นนำส่วนที่เป็นเสาทั้ง 4 เสียบตั้งขึ้นเพื่อเลื่อนชุดครอบสี่เหลี่ยมที่ได้ประกอบไว้แล้วขึ้นด้านบน ทำการยึดข้อต่อตามจุดต่างๆ รวมถึงขาตั้งให้แข็งแรง จากนั้นนำผ้าใบคลื่อนออกแขวนคลื่อนยึดกับโครงสร้าง ซึ่งการติดตั้งจนพร้อมใช้งานใช้เวลาประมาณ 30 – 40 min

### 2.3 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองห้องแยกส่วนความดันลบ ในพื้นที่ขนาด 14 m x 6 m x 2.8 m ที่มีเครื่องปรับอากาศขนาด 36,000 BTU จำนวน 2 เครื่อง โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ดังตารางที่ 3 ทำการทดลองในช่วงความเร็วของพัดลมระบายอากาศตั้งแต่ 30 – 60 เปอร์เซ็นต์ (%) เพิ่มขึ้นครั้งละ 10% โดยเริ่มจากติดตั้งอุปกรณ์ห้องความดันลบ ตรวจสอบแนวประตูและเทปตีนตุ๊กแกให้ปิดสนิท จากนั้นเปิดพัดลมระบายอากาศปรับความเร็วพัดลมที่ 30% อากาศที่อยู่ภายในห้องถูกระบายออกจนความดันภายในห้องมีค่าลดลง โดยสามารถอ่านค่าความแตกต่างความดันระหว่างภายในห้องและภายนอกได้จากเกจวัดความแตกต่างความดัน (Differential Pressure Gauge) จนกระทั่งห้องมีความแตกต่างความดัน (-ve) 2.5 Pa จากนั้นเปิดพัดลมเติมอากาศจนความดันของห้องเข้าสู่ภาวะสมดุล บันทึกค่าความแตกต่างความดันระหว่างภายในห้องและภายนอก บันทึกเวลาที่ทำให้ความดันภายในห้องเข้าสู่ภาวะสมดุล วัดความเร็วอากาศที่ตำแหน่ง 12, 3, 6, 9 ตามเข็มนาฬิกาและกึ่งกลางของท่อพัดลมเติมอากาศ และพัดลมระบายอากาศ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเร็วอากาศ ( $V_{avg}$ ) ด้วยเครื่องวัดความเร็วแบบใบพัด (Anemometer) ตามลำดับ บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องจากเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิทัล (Thermometer & Hygrometer) บันทึกค่าความดันที่ตกคร่อมชุดกรองอากาศจากเครื่องวัดค่าความแตกต่างความดันแบบพกพา (Portable Differential Pressure Meter) โดยในแต่ละความเร็วพัดลมระบายอากาศทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย เมื่อทำการบันทึกค่าต่างๆ สามารถคำนวณ อัตราการถ่ายเทอากาศ (Air Change Rate Per Hour : ACH) ได้จากสมการที่ (8) – (10)



$$Q = V_{avg} A \quad (8)$$

$$CFM = Q \times 60 \quad (9)$$

$$ACH = \frac{CFM}{V_{room}} \times 60 \quad (10)$$

เมื่อ

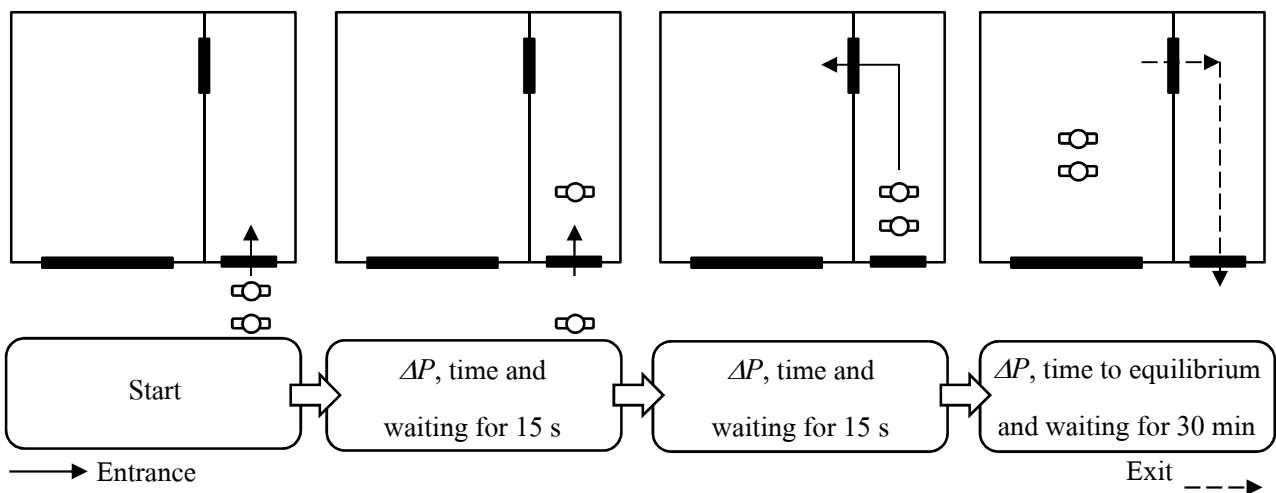
$CFM$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (cfm)

$ACH$  คือ อัตราการถ่ายเทอากาศ ( $h^{-1}$ )

$Q$  คือ อัตราการไหลของอากาศต่อวินาที ( $ft^3/s$ )

$V_{avg}$  คือ ความเร็วอากาศเฉลี่ย ( $ft/s$ )

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศ ( $ft^2$ )



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทดลองเมื่อมีผู้ปฏิบัติงาน

จากนั้นทำการทดลองในกรณีที่มีการเดินเข้า-ออก ของผู้ปฏิบัติงาน 2 คน โดยเริ่มจับเวลาให้ผู้ปฏิบัติงาน คนที่ 1 เปิดประตูทางด้านห้องโถงรอ เดินเข้าจากนั้นปิดประตู บันทึกความแตกต่างความดันภายในห้อง บันทึก เวลาที่ใช้ จากนั้นรอ 15s จึงให้ผู้ปฏิบัติงานคนที่ 2 เปิดประตูทางด้านห้อง โถงรอ เดินเข้าจากนั้นปิดประตู บันทึก ความแตกต่างความดันภายในห้อง บันทึกเวลาที่ใช้ จากนั้นให้ผู้ปฏิบัติงาน 2 คนรอ 15s จึงเปิดประตูเข้าสู่ห้องพัก แยกเดี่ยวจากนั้นปิดประตู รอจนความดันของห้องกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกความแตกต่างความดันภายใน ห้อง บันทึกเวลาที่ห้องกลับสู่สภาวะสมดุล และให้ผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในห้อง 30 min โดยมีการพูดคุยกับ บุคคลภายนอกห้อง เพื่อประเมินสภาพอากาศภายในห้องจากความรู้สึกของผู้ปฏิบัติงาน เช่นอากาศที่ไหลผ่านตัว การหายใจ ความสะดวกในการเดิน และอื่นๆ ดังรูปที่ 4 จากนั้นในขั้นตอนการออกจากห้อง กระทำเช่นเดียวกับการเข้าห้องแต่ย้อนกลับ

ตารางที่ 3 อุปกรณ์เครื่องมือวัด

List	Brand	Model	Range
Differential Pressure Gauge	SAFE GAUGE	J-5300-120 Pa	60-0-60 Pa
Thermometer & Hygrometer	LXSZRPH	HY-1	(-40)-70°C, 20-90%RH
Anemometer	UNI-T	UT363	0-30 m/s (0.1 m/s)
Differential Pressure Meter	OUTEST	GM511	± 10 kPa

จากนั้นทำการตรวจสอบการรั่วซึมและทิศทางการไหลของอากาศ (Direction of Flow) โดยวิธีการทดสอบด้วยควัน (Smoke Test) ด้วยเครื่องสร้างหมอกอัลตราโซนิค 12 หัว ของ OEM รุ่น HGFCY0006 โดยนำเครื่องสร้างหมอกใส่ลงในอ่างพลาสติกบรรจุน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (De-ionized Water) วางที่พื้นบริเวณด้านหน้าของห้องคังรูปที่ 5 รอจนควันเริ่มกระจาย จากนั้นเปิดพัดลมระบายอากาศและพัดลมเติมอากาศตามลำดับ สังเกตการรั่วซึมตามแนวขอบต่างๆ รวมถึงทิศทางการไหลของควันที่เกิดขึ้นภายในห้อง เมื่อการทดลองเสร็จสิ้น ทำการอบห้องด้วยก๊าซโอโซนเป็นระยะเวลา 30 min จากนั้นเปิดพัดลมระบายอากาศและพัดลมเติมอากาศเพื่อระบายก๊าซโอโซนออกจากห้อง

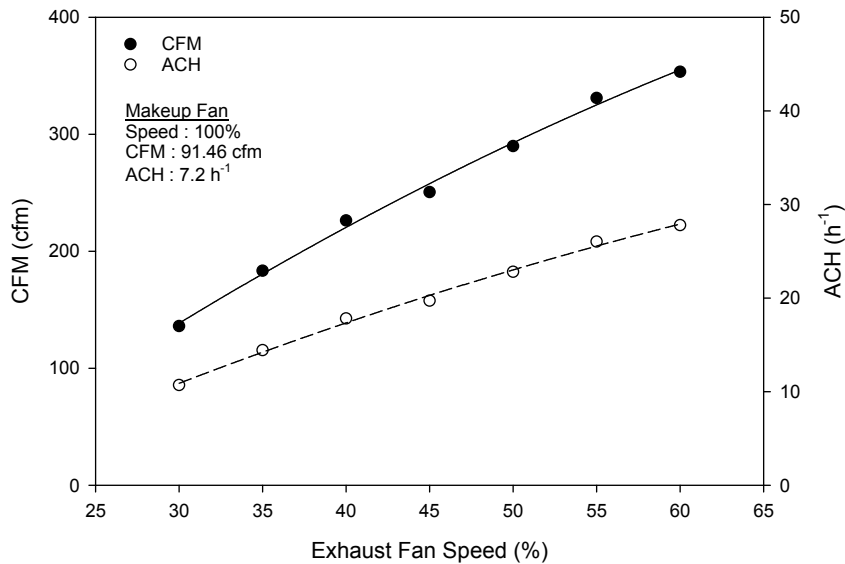


รูปที่ 5 การทดสอบการไหลของอากาศด้วยเครื่องสร้างหมอกอัลตราโซนิค

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

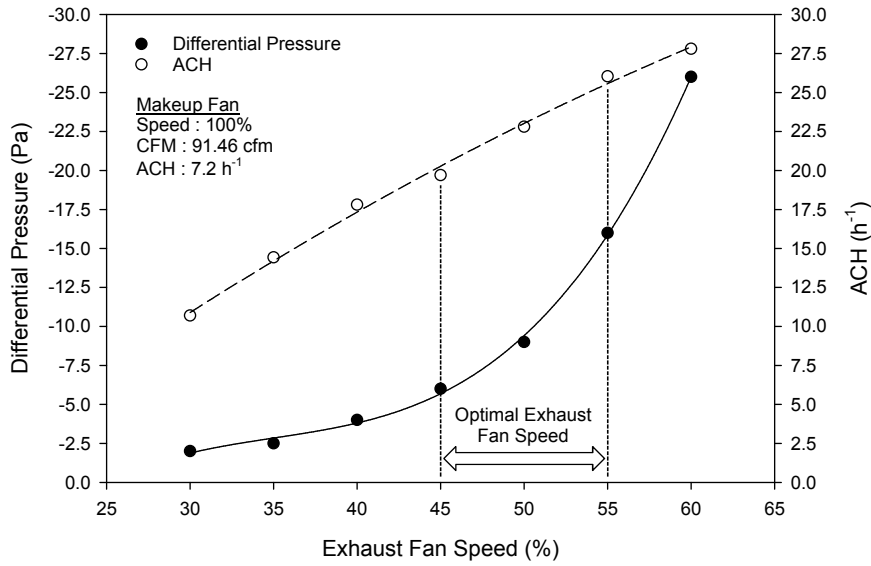
ห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม โดยกำหนดเงื่อนไข ตามมาตรฐาน ASHRAE 170-2017 เมื่อพัดลมเติมอากาศทำงานที่ความเร็ว 100% ได้อัตราการไหล 91.46 cfm และอัตราการถ่ายเทอากาศ 7.2 ACH สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำ (Minimum Outdoor ACH = 2) คิดเป็น 3.6 เท่า ส่วนทางด้านพัดลมระบายอากาศ จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและอัตราการถ่ายเทอากาศกับความเร็วของพัดลมระบายอากาศ เห็นได้ว่าอัตราการไหลและอัตราการถ่ายเทอากาศ แปรผันโดยตรงกับความเร็วของพัดลม

ระบายอากาศ โดยอัตราการถ่ายเทอากาศต่ำสุดเป็น 10.69 ACH ที่ความเร็วพัดลม 30% และอัตราการถ่ายเทอากาศสูงสุดเป็น 27.8 ACH ที่ความเร็วพัดลม 60% ซึ่งหากพิจารณาเงื่อนไขตามข้อกำหนดขั้นต่ำ อัตราการถ่ายเทอากาศรวมของห้องต้องไม่น้อยกว่า 12 ACH (Minimum Total ACH = 12) เห็นได้ว่าจำเป็นต้องใช้ความเร็วของพัดลมระบายอากาศตั้งแต่ 35% ขึ้นไปเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขขั้นต่ำตามที่กำหนด



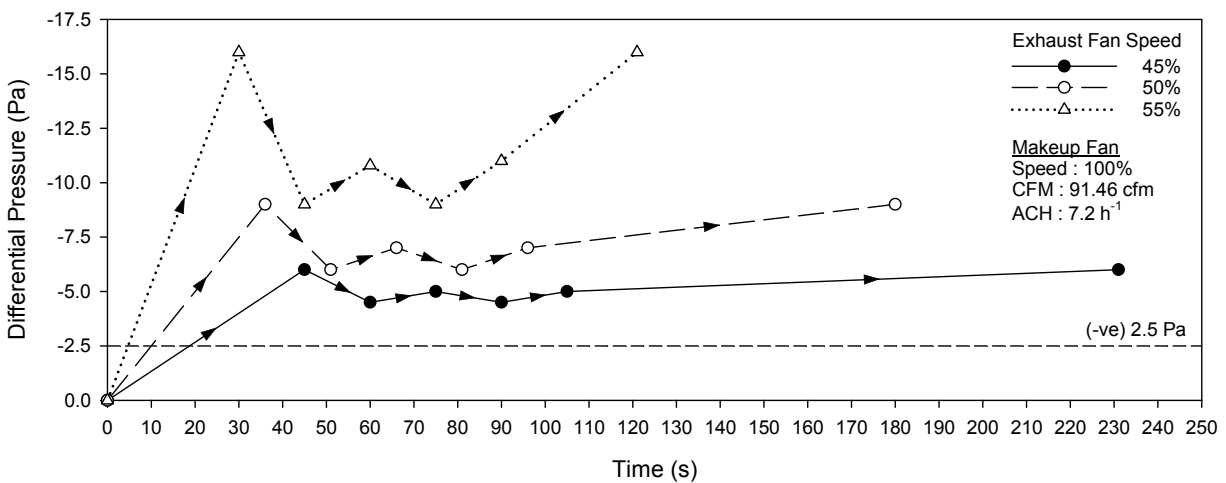
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและอัตราการถ่ายเทอากาศกับความเร็วของพัดลมระบายอากาศ

ในกรณีไม่มีผู้ปฏิบัติงานความดันลบของห้องในสภาวะสมดุล อัตราการถ่ายเทอากาศ และความเร็วพัดลมระบายอากาศ แสดงดังรูปที่ 7 จากข้อกำหนดขั้นต่ำความดันลบของห้องต้องไม่น้อยกว่า (-ve) 2.5 Pa และไม่ควรมากเกิน (-ve) 20 Pa เพราะเมื่อมีการเปิดประตู เข้า-ออก ทำให้ความเร็วอากาศที่ไหลผ่านช่องเปิดต่างๆ สูงกว่าที่ความดัน (-ve) 2.5 Pa ถึง 215% ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองทั้งพลังงานและระยะเวลาในการทำให้ห้องกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง [19] จากผลการทดลองเห็นได้ว่าที่ความเร็วพัดลมระบายอากาศ 35 – 40% ได้อัตราการถ่ายเทอากาศ 14.43 และ 17.81 ACH และความดันภายในห้องเป็น (-ve) 2.5 – 4.0 Pa ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดขั้นต่ำ แต่หากพิจารณาในกรณีที่มีผู้ปฏิบัติงานเดิน เข้า-ออก ทำให้ห้องเกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน โดยจากการทดลองเมื่อมีผู้ปฏิบัติงาน 2 คน เดินเข้า-ออก ที่ความเร็วพัดลมระบายอากาศต่ำกว่า 45% ไม่สามารถรักษาระดับความดันภายในห้องให้ไม่น้อยกว่า (-ve) 2.5 Pa ไปได้ ในขณะที่ความเร็วพัดลมระบายอากาศ 60% ความดันเกินกว่า (-ve) 20 Pa ดังนั้น ความเร็วพัดลมระบายอากาศที่เหมาะสม (Optimal Exhaust Fan Speed) สำหรับการดำเนินงานอยู่ในช่วงระหว่าง 45 – 55% โดยอัตราการถ่ายเทอากาศเป็น 19.71 – 26.04 ACH สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำคิดเป็น 1.64 – 2.17 เท่า และความดันภายในห้องเป็น (-ve) 6.0 – 16.0 Pa สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำคิดเป็น 2.4 – 6.4 เท่าตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันและอัตราการถ่ายเทอากาศกับความเร็วของพัดลมระบายอากาศ

สำหรับความเร็วพัดลมระบายอากาศ 45 – 55% จากรูปที่ 8 เห็นได้ว่า ระยะเวลาสำหรับการทำให้ความดันของห้องเข้าสู่ภาวะสมดุลใช้เวลาในช่วง 30 – 45s ซึ่งระยะเวลาน้อยลงเมื่อความเร็วพัดลมระบายอากาศเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อให้ผู้ปฏิบัติงาน 2 คนเดิน เข้า-ออก ตามขั้นตอนการทดลอง เห็นได้ว่าความดันภายในห้องมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง (-ve) 4.5 – 9.0 Pa ซึ่งยังคงสามารถรักษาระดับความดันลบขั้นต่ำของห้องได้ไม่น้อยกว่า (-ve) 2.5 Pa ตามข้อกำหนด โดยใช้เวลารวมทั้งสิ้นในช่วง 121 – 231s (ประมาณ 2 – 4 min) สำหรับการทำให้ความดันภายในห้องกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลอีกครั้ง ซึ่งผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในห้องเป็นระยะเวลา 30 min ไม่ปรากฏอาการไม่พึงประสงค์แต่อย่างใด เนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทอากาศที่ดี และอยู่ในช่วงความดันลบที่เหมาะสม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันและเวลาที่ทำให้ห้องกลับสู่ภาวะสมดุลเมื่อมีผู้ปฏิบัติงาน

อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้อง และความดันตกคร่อมชุดกรองพัฒนาผลระยะบายอากาศ ในกรณีที่มีผู้ปฏิบัติ 2 คน จากตารางที่ 4 เห็นได้ว่า อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้องอยู่ในช่วง 23 – 27°C และ 40 – 60 %RH ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบ ดังนั้น ห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับโรงพยาบาลสนาม สามารถติดตั้งใช้งานในพื้นที่ ที่มีการปรับอากาศเบื้องต้นมาแล้วเช่นภายในอาคารหรือบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศอย่างเหมาะสม อีกทั้งความดันตกคร่อมชุดกรองแต่ละชั้น แปรผันโดยตรงกับความเร็วพัฒนาผลระยะบายอากาศ ซึ่งจากข้อเสนอแนะของผู้ผลิตความดันที่ตกคร่อมชุดกรอง ชั้นที่ 1 (Pre Filter) ชั้นที่ 2 (Medium Filter) และชั้นที่ 3 (HEPA Filter) ต้องไม่เกิน 250, 250 และ 500 Pa ตามลำดับ ดังนั้นการปรับความเร็วพัฒนาผลระยะบายอากาศอย่างเหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง อีกทั้งเป็นการยืดอายุการใช้งานของชุดกรองอากาศอีกด้วย

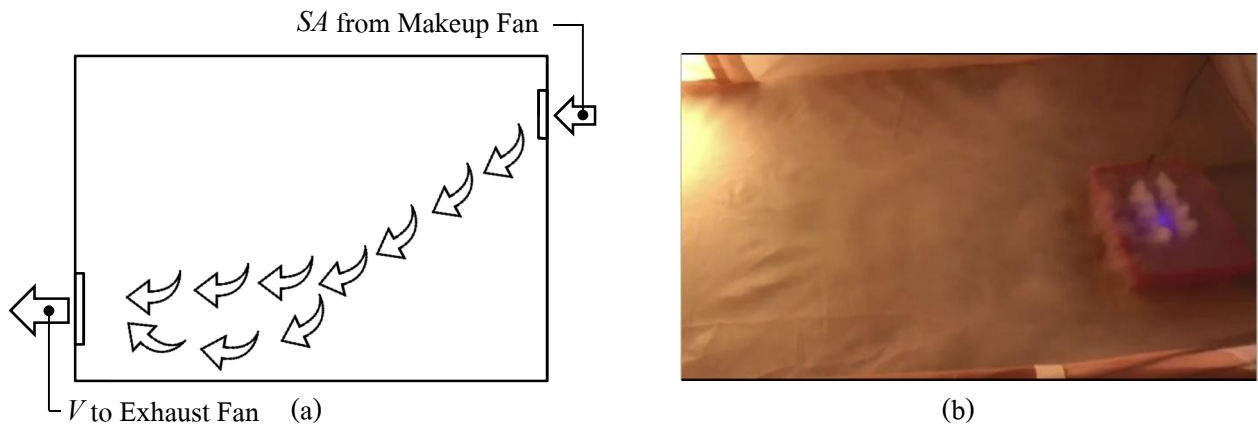
ตารางที่ 4 อุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันตกคร่อมชุดกรองพัฒนาผลระยะบายอากาศ

Exhaust Fan Speed (%)	Room Temp <sup>(1)</sup> (°C)	Room RH <sup>(1)</sup> (%)	Pressure Drop in Exhaust Air Filter <sup>(2)</sup> (Pa)		
			1 <sup>st</sup> Stage	2 <sup>nd</sup> Stage	Final Stage
30	25.000	40.000	1.0	20.0	50.0
35	25.000	41.000	1.0	24.0	60.0
40	24.700	41.000	4.0	28.0	70.0
45	24.900	41.000	5.0	35.0	90.0
50	24.800	41.000	8.0	40.0	100.0
55	24.400	41.000	12.0	44.0	120.0
60	24.100	40.000	15.0	52.0	140.0

Note : <sup>(1)</sup>Design Parameters for Room Temp and RH are 23 – 27 °C and 40 – 60 %RH

<sup>(2)</sup>Filter Pressure Drop Should Not Exceed 250, 250 and 500 Pa for 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and Final Stage Respectively.

จากนั้นทำการ Smoke Test เพื่อตรวจสอบการรั่วซึมและทิศทางการไหลของอากาศภายในห้อง จากผลการทดลองพบว่าไม่มีควันที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่ารั่วซึมออกจากตามแนวขอบรอยต่อต่างๆ ของห้อง เนื่องจากความแตกต่างความดันระหว่างภายในห้องและภายนอกเป็นลบ จากรูปที่ 9 (a) แสดงภาพ Sketch ลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้อง โดยอากาศจากพัดลมเดิมอากาศทางด้านบน ไหลผ่านฝาครอบช่องระบายอากาศที่มีแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง เพื่อผ่านไปยังพัฒนาผลระยะบายอากาศเมื่อถึงบริเวณใกล้กับทางออกช่องระบายอากาศ อากาศบางส่วนไหลเข้าไปยังช่องระบายอากาศโดยตรง ในขณะที่อากาศบางส่วนเคลื่อนที่ลงปะทะพื้นห้องแล้วจึงไหลเข้าสู่ช่องระบายอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการไหลของกลุ่มควันในรูปที่ 9 (b) โดยไม่มีกลุ่มควันตกค้างเนื่องมาจากอากาศไม่เคลื่อนที่หรือจุกอับอากาศเกิดขึ้นในบริเวณห้อง



รูปที่ 9 ลักษณะการไหลของอากาศ (a) Sketch (b) Smoke Test

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบห้องแยกส่วนความดันลบ ที่มีลักษณะถอดประกอบได้ง่าย ติดตั้งใช้งานได้อย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีการปรับอากาศเบื้องต้นมาแล้ว เพื่อป้องกันการปนเปื้อนผ่านละอองอากาศจากผู้ป่วยติดเชื้อ โดยห้องแยกส่วนความดันลบแบ่งเป็นห้องพักแยกเดี่ยวและห้องโถงรอ มีระบบระบายอากาศประกอบด้วยพัดลมเติมอากาศและพัดลมระบายอากาศ ทำการทดลองทั้งในสถานะไม่มีผู้ปฏิบัติงานและมีผู้ปฏิบัติงาน โดยกำหนดเงื่อนไขตามมาตรฐาน ASHRAE 170-2017 พบว่า

1. อัตราการถ่ายเทอากาศของพัดลมเติมอากาศเป็น 7.2 ACH สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำ (2 ACH) คิดเป็น 3.6 เท่า
2. ความเร็วพัดลมระบายอากาศตั้งแต่ 35% ขึ้นไป สามารถให้อัตราการถ่ายเทอากาศสูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำ (12 ACH)
3. ความเร็วพัดลมระบายอากาศ 35 – 40% ในกรณีมีผู้ปฏิบัติงาน ไม่สามารถรักษาระดับความดันภายในห้องให้สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำที่ (-ve) 2.5 Pa ไปได้ ในขณะที่ความเร็วพัดลมระบายอากาศ 60% ความดันเกินกว่า (-ve) 20 Pa
4. ความเร็วพัดลมระบายอากาศที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45 – 55% โดยสามารถให้อัตราการถ่ายเทอากาศเป็น 19.71 – 26.04 ACH สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำคิดเป็น 1.64 – 2.17 เท่า และความดันภายในห้องเป็น (-ve) 6.0 – 16.0 Pa สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำคิดเป็น 2.4 – 6.4 เท่าตามลำดับ ซึ่งสามารถรักษาระดับความดันภายในห้องให้สูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำ ในกรณีมีผู้ปฏิบัติงาน 2 คนเดิน เข้า-ออกได้ โดยความดันภายในห้องเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง (-ve) 4.5 – 9.0 Pa และความดันสามารถกลับเข้าสู่สถานะสมดุลได้ในช่วงเวลา 121 – 231s (ประมาณ 2 – 4 min)
5. ผู้ปฏิบัติงาน 2 คน อยู่ภายในห้องเป็นระยะเวลา 30 min ไม่ปรากฏอาการไม่พึงประสงค์

6. ไม่เกิดการรั่วซึมและตำแหน่งจุดอับอากาศภายในห้องจากการ Smoke Test และห้องสามารถใช้งานได้  
ได้ในบริเวณที่มีการปรับอากาศเบื้องต้นมาแล้ว

ห้องแยกส่วนความดันลบแบบเคลื่อนย้ายได้ มีส่วนสำคัญในการป้องกันสิ่งปนเปื้อนในอากาศจากผู้ป่วย  
ในกรณีฉุกเฉินได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถพัฒนาให้ห้องมีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผนังเบาสำเร็จรูป  
(Knockdown) และมีระบบประตูแบบอัตโนมัติเพื่อลดการสัมผัสโดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาและงบประมาณ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] World Health Organization, Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions [Online], Available: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions> [July 9, 2020].
- [2] S.H. Kim, S.Y. Chang, M. Sung, J.H. Park, H. Bin Kim, H. Lee, J.P. Choi, W.S. Choi and J.Y. Min, “Extensive viable Middle East Respiratory Syndrome (MERS) coronavirus contamination in air and surrounding environment in MERS isolation wards,” *Clinical Infectious Diseases*, Vol. 63, No. 3, 2016, pp. 363-369.
- [3] S.W.X. Ong, Y.K. Tan, P.Y. Chia, T.H. Lee, O.T. Ng, M.S.Y. Wong and K. Marimuthu, “Air, Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) From a Symptomatic Patient,” *JAMA.*, Vol. 323, No. 16, 2020, pp. 1610-1612.
- [4] World Health Organization, Coronavirus disease (COVID-19) questions and answers [Online], Available: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19> [May 13, 2021].
- [5] D.M. Turer, C.H. Good, B.K. Schilling, R.W. Turer, N.R. Karlowsky, L.A. Dvoracek, H. Ban, J.S. Chang and J.P. Rubin, “Improved testing and design of intubation boxes during the COVID-19 pandemic,” *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 77, No. 1, 2021, pp. 1-10.
- [6] U.S. FOOD & DRUG ADMINISTRATION (FDA), Protective Barrier Enclosures Without Negative Pressure Used During the COVID-19 Pandemic May Increase Risk to Patients and Health Care Providers - Letter to Health Care Providers [Online], Available: <https://www.fda.gov/medical-devices/letters-health-care-providers/protective-barrier-enclosures-without-negative-pressure-used-during-covid-19-pandemic-may-increase> [Aug 21, 2020].
- [7] กรมควบคุมโรค, โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) [Online], Available: <https://ddc.moph.go.th/viralpneumonia> [6 มิถุนายน 2564].

- [8] S. Jacob, S.S. Yadav and B.S. Sikarwar, "Design and Simulation of Isolation Room for a Hospital," In *Advances in Fluid and Thermal Engineering*, P. Saha, P. Subbarao and B. Sikarwar (Ed.), Springer, Singapore, 2019, pp. 75-93.
- [9] สถาบันบำราศนราดูร กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข, คู่มือการปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในสถานพยาบาล, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์อักษรกราฟฟิคแอนดี้ไซน์, กรุงเทพฯ, 2560.
- [10] S.L. Miller, D. Mukherjee, J. Wilson, N. Clements and C. Steiner, "Implementing a negative pressure isolation space within a skilled nursing facility to control SARS-CoV-2 transmission," *American Journal of Infection Control*, Vol. 49, No. 4, 2021, pp. 438-446.
- [11] P.H. Fang, Y.Y. Lin and C.H. Lin, "A Protection Tent for Airway Management in Patients With COVID-19 Infection," *Annals of emergency medicine*, Vol. 75, No. 6, 2020, pp. 787-788.
- [12] M.L. Martel and R.F. Reardon, "Aerosol Barrier Hood for Use in the Management of Critically Ill Adults With COVID-19," *Annals of emergency medicine*, Vol. 76, No. 3, 2020, pp. 370-371.
- [13] N.L. Haas, B.S. Bassin, H. A Puls and K.R. Ward, "Use of a negative pressure procedural tent in the Emergency Department during the COVID-19 pandemic," *The American journal of emergency medicine*, Vol. 48, 2021, pp. 354-356.
- [14] C.-H. Weng, P.-W. Chiu, C.-L. Kao, Y.-Y. Lin and C.-H. Lin, "Combating COVID-19 during Airway Management: Validation of a Protection Tent for Containing Aerosols and Droplets," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 16, 2021, 7245.
- [15] K.W. Wong, R.P.K. Lam, W.C. Sin, M.G. Irwin and T.H. Rainer, "Comparison of the Efficiency and Usability of Aerosol Box and Intubation Tent on Intubation of a Manikin Using Personal Protective Equipment: A Randomized Crossover Study," *The Journal of Emergency Medicine*, In Press, Corrected Proof, 2021, pp. 1-10.
- [16] Centers for Disease Control and Prevention (U.S.A: CDC), *Interim Infection Prevention and Control Recommendations for Healthcare Personnel During the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic* [Online], Available: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/infection-control-recommendations.html> [Feb 23, 2021].
- [17] ASHRAE, *Standard 170: Ventilation of Health Care Facilities*, ASHRAE. Inc., Atlanta, 2017.
- [18] J. Francis, *Isolation Rooms: Design, Assessment, and Upgrade*, Institutional Consultation Services, 1999.
- [19] Z. Xu and B. Zhou, *Three Misunderstandings for Design of Negative Pressure Ward*. In: *Dynamic Isolation Technologies in Negative Pressure Isolation Wards*, Springer, Singapore, 2017.