



# การศึกษาสภาวะอากาศและผลกระทบด้านพลังงานในระบบปรับอากาศจากการระบายอากาศในหอผู้ป่วยติดเชื้อโควิด-19

ภาวณิ ศักดิ์สุนทรศิริ<sup>1</sup> อธิภัทร์ เทศฤทธิ์<sup>1</sup> และ วสันต์ เจริญสุวรรณ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: wasan.t@mail.rmutk.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 เมษายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 15 กรกฎาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 10 กันยายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2567

**บทคัดย่อ:** การระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงพื้นที่ในโรงพยาบาลทั้งห้องความดันบวกหรือลบนั้นจะมีภาระความร้อนเพิ่มขึ้นจากการนำอากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีสูงเข้ามาสู่พื้นที่ภายในอาคารส่งผลต่อความสิ้นเปลืองในการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ และสภาวะอากาศภายใน การศึกษานี้ทำการศึกษาสภาวะอากาศภายในหอผู้ป่วยติดเชื้อโควิด-19 ที่ได้รับการออกแบบและปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานทั้งในกรณีที่เปิดระบบเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อของโควิด-19 ที่เติมอากาศสะอาด 6 ACH เข้าสู่พื้นที่ห้องความดันบวก และดึงอากาศออกจากห้องความดันลบ 12 ACH ติดตั้งอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อติดตามค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องต่าง ๆ ในหอผู้ป่วยที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในสภาวะอากาศภายนอกจริง และทำการวัดค่ากำลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศแบบต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อแบบ 100% กับกรณีที่ปิดระบบระบายอากาศใช้งานในหอผู้ป่วยเพื่อทำการรักษาคนไข้ ในกรณีที่ไม่มีมีการแพร่ระบาดผลการศึกษาพบว่า ในการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อนั้นส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องมาจากภาระความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการนำอากาศภายนอกมาใช้ในการเติมอากาศให้ห้องความดันบวก การรั่วเข้าของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องคนไข้ความดันลบและได้รับผลกระทบจากกิจกรรมที่เป็นประจำในการดูแลรักษาคนไข้ที่ต้องใช้น้ำมาเพิ่มความชื้นในห้องคนไข้ สภาวะอากาศในห้องความดันบวกอยู่ในสภาวะที่สุขสบาย สภาวะอากาศในห้องคนไข้อยู่นอกช่วงมาตรฐานเนื่องจากหอผู้ป่วยมิได้ติดตั้งระบบควบคุมความชื้นของอากาศ

**คำสำคัญ:** ภาระความร้อน; การระบายอากาศ; ห้องคนไข้ติดเชื้อ; พลังงาน; ระบบปรับอากาศ

# Study of Air Conditions and Energy Impact in Air Conditioning Systems from Ventilation in COVID-19 Patient Wards

Pawinee Suksuntornsiri<sup>1</sup>, Teerapat Teadrit<sup>1</sup> and Wasan Theansuwan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Krungthep, Bangkok

\* Corresponding Author, E-mail: wasan.t@mail.rmutk.ac.th

Received: 29 April 2024; Revised: 15 July 2024; Accepted: 10 September 2567

Online Published: 19 December 2024

**Abstract:** Enhanced ventilation from modified spaces in hospitals, including both positive and negative pressure rooms, leads to an increased thermal load due to the introduction of outside air with higher enthalpy into the building's interior, affecting the energy consumption of air conditioning systems. Additionally, the introduced outside air impacts the adjustment of indoor air conditions. This study investigates the indoor air conditions of COVID-19 patient wards that have been designed and modified to prevent the spread of infection within the treatment area. Continuous measurements of energy consumption in the air conditioning system, dry bulb temperature, and relative humidity of various rooms in the patient wards were conducted under real outdoor air conditions, introducing clean air at 6 air changes per hour (ACH) into positive pressure rooms and extracting air from negative pressure rooms at 12 ACH. Comparisons were made between scenarios of disease outbreaks necessitating 100% ventilation to prevent infection spread and scenarios where the ventilation system is turned off in patient wards for treatment in non-outbreak conditions. The study found that turning on the ventilation system to prevent infection transmission significantly increases the energy consumption of the air conditioning system. This is due to the increased thermal load from using outside air to pressurize positive pressure rooms, the infiltration of outside air into negative pressure patient rooms, and the impact of necessary patient care activities that add moisture to patient rooms. The air conditions in the positive pressure rooms were comfortable. However, the air conditions in the patient rooms were outside the standard range because the ward was not equipped with an air humidity control system.

**Keywords:** Thermal Load; Ventilation; Infectious Patient Rooms; Energy; Air Conditioning System



## 1. บทนำ

โควิด-19 หรือโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และโรคติดเชื้ออื่นๆ ที่สามารถแพร่กระจายผ่านทางอากาศ เช่น วัณโรค สามารถแพร่ผ่านฝอยละอองขนาดเล็ก (Infected Airborne) ที่ลอยได้ไกลและอยู่ในอากาศได้นาน ในขณะที่การแพร่กระจายผ่านละอองฝอยขนาดใหญ่ (Droplets) เช่น จากการไอหรือจาม มักจะเดินทางได้ไม่ไกลและอยู่ในอากาศได้ชั่วคราวเท่านั้น [1] ดังนั้นการระบายอากาศในสถานพยาบาลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดการติดเชื้อทางอากาศ การเพิ่มปริมาณการระบายอากาศสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการแพร่เชื้อได้

ระบบระบายอากาศมีจุดประสงค์เพื่อรักษาคุณภาพของอากาศภายในอาคารโดยการเปลี่ยนอากาศภายในอาคาร นำเอาอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกเข้ามา (Fresh air) และขับอากาศเสียออกไป (Exhaust Air) ระบบระบายอากาศมีสองวิธี คือ การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Ventilation) และการระบายอากาศแบบเชิงกล (Mechanical Ventilation) ปริมาณการระบายอากาศที่เหมาะสมอาจพิจารณาคำแนะนำจากองค์กรต่างๆ เช่น The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Centers for Disease Control and Prevention (CDC) และองค์การอนามัยโลก (WHO)

องค์การอนามัยโลก [2] ได้ให้แนวทางในการใช้ระบบการระบายอากาศในสถานพยาบาลเพื่อควบคุมการแพร่กระจายของ โควิด-19 การประเมินอัตราการระบายอากาศ การจัดการทิศทางการไหลของอากาศจากบริเวณสะอาดไปยังบริเวณที่สกปรก (Clean-To-Dirty) การใช้ระบบระบายอากาศทั้งแบบเชิงกลและแบบ

ธรรมชาติตามข้อกำหนดขั้นต่ำขององค์การอนามัยโลก การจัดการอากาศที่ระบายออกจากห้องให้ถูกต้อง การจัดวางตำแหน่งช่องดูดอากาศติดเชื้อที่ปลอดภัยต่อบุคลากรทางการแพทย์ [3] การกำจัดเชื้อในอากาศ [4] รวมถึงการใช้งานระบบระบายอากาศ การตรวจสอบบำรุงรักษา และทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ นอกเหนือจากการระบายอากาศแล้วยังต้องใช้มาตรการป้องกันและควบคุมการติดเชื้อที่ครอบคลุมอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย

การระบายอากาศในโรงพยาบาลมีความสำคัญต่อการควบคุมการติดเชื้อแต่ส่งผลต่อการเพิ่มการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญในการศึกษาของ Halloran [5] เกี่ยวกับต้นทุนพลังงานที่ใช้ในระบบระบายอากาศและปรับอากาศ (HVAC) ในการควบคุมฝอยละอองเชื้อโรคในอาคารสาธารณะ โดยการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศภายนอก การใช้เครื่องฟอกอากาศในห้องและการปรับปรุงระบบ HVAC พบว่าการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศภายนอกมีค่าใช้จ่ายพลังงานสูงที่สุด

ในการศึกษาของ Zheng et al. [6] ในประเทศจีน พบว่าการนำอากาศภายนอกมาใช้มีประโยชน์ในการลดการแพร่เชื้อ โดยอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศควรอย่างน้อย 3 ACH สามารถลดความเข้มข้นของฝอยละอองขนาดเล็กติดเชื้อได้ถึง 95% รูปแบบการไหลของอากาศช่องจ่ายอากาศ และช่องระบายอากาศ ควรห่างกันด้วยระยะที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของอากาศสภาวะอากาศที่เหมาะสมมีความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 40-60 % อุณหภูมิที่ 18-26 °C แต่จากการระบาดใหญ่ที่ผ่านมาส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบปรับอากาศและระบายอากาศเพิ่มมากขึ้นถึง 128%



Squire et al. [7] ได้ประเมินความต้องการพลังงานและต้นทุนทางเศรษฐกิจที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการติดเชื้อ โควิด-19 ในโรงพยาบาลในรัฐแมริแลนด์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในฤดูหนาวอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $-3^{\circ}\text{C}$  ถึง  $8^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70% ในฤดูร้อนอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $19^{\circ}\text{C}$  ถึง  $31^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 70-80% โดยใช้แบบจำลองการจัดการพลังงานในโรงพยาบาลเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ห้องความดันลบและอุปกรณ์ฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตพัลส์ซินนอนพบว่าโรงพยาบาลขนาดเล็ก กลาง และใหญ่มีการใช้พลังงานจากการใช้ห้องความดันลบ เพิ่มขึ้น 2.99% ถึง 7.10% ซึ่งการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้สัมพันธ์กับสภาวะอากาศในพื้นที่ศึกษาที่ระบบปรับอากาศและระบายอากาศต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงพยาบาล

การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นของระบบปรับอากาศในพื้นที่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศภายนอกของอาคาร [5] ซึ่งมีผลต่อภาระความร้อนจากการระบายอากาศและการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร สำหรับในประเทศไทยการนำอากาศภายนอกที่มีพลังงานสูงเข้ามาในการระบายอากาศ ส่งผลให้ภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้นมาก บทความนี้ศึกษาผลจากการปรับปรุงระบบระบายอากาศเพื่อลดการแพร่เชื้อและผลกระทบต่อการใช้พลังงานในหอผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศ โดยใช้เครื่องมือวัดเพื่อคำนวณการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็น การศึกษานี้มีประโยชน์ต่อการจัดการพลังงานของโรงพยาบาล โดยเฉพาะโรงพยาบาลของรัฐที่มีงบประมาณจำกัด และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมสภาวะ

อากาศในอาคารเพื่อสภาวะในการรักษาผู้ป่วยทั้งในช่วงที่มีการแพร่ระบาดของโรคแพร่ทางอากาศและในช่วงปกติ

หอผู้ป่วย (Cohort Ward) หมายถึงห้องรักษาผู้ป่วยที่รับเข้าไว้รักษาในโรงพยาบาล ประกอบด้วยเตียงคนไข้มากกว่า 1 เตียง เพื่อให้สามารถบริหารจัดการจำนวนทรัพยากรบุคลากรทางการแพทย์ให้เพียงพอต่อการรักษาผู้ป่วยจำนวนมาก ในช่วงการระบาดของโรคแพร่ทางอากาศที่มีผู้ติดเชื้อจำนวนมาก จำนวนบุคลากรทางการแพทย์ไม่เพียงพอต่อการจัดห้องพักแบบแยกโรคแบบห้องเดียว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดการรักษาแบบหอผู้ป่วย อนึ่งการปรับหอผู้ป่วยมาเป็นหอผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศ (Airborne Infected Cohort Ward) ซึ่งจะต้องมีความยืดหยุ่นต่อการปรับกลับไปใช้ในการรักษาในกรณีที่มีจำนวนผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศลดลง เพื่อให้สามารถทำการรักษาตามปกติของโรงพยาบาลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ หอผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศแบบปรับได้อย่างยืดหยุ่น (Flexible Cohort-Ward) จึงถูกออกแบบติดตั้งขึ้น โดยใช้หลักการระบายอากาศเพื่อลดการปนเปื้อน องค์ประกอบหลักประกอบไปด้วย ห้องความดันลบ และห้องความดันบวก

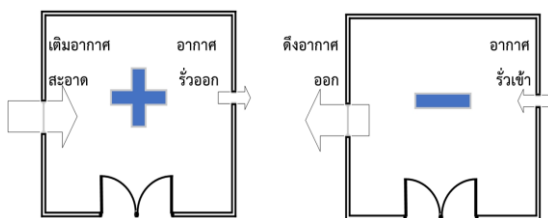
ห้องความดันบวก (Positive Pressure Room) (รูปที่ 1 ก.) เป็นห้องที่มีอากาศสะอาดที่ใช้สำหรับการรักษาผู้ป่วยที่ต้องดูแลป้องกันการติดเชื้อหรือรักษาความสะอาด เช่น ห้องคนไข้ที่ไวต่อการติดเชื้อห้องผ่าตัด ห้องเก็บเครื่องมือทางการแพทย์ ห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ โดยความดันในห้องความดันบวกจะต้องมีความดันสูงกว่าความดันพื้นที่โดยรอบห้องและมีอากาศที่สะอาดเพื่อป้องกันมิให้เชื้อจากภายนอกเข้ามาในห้อง โดยการเติมอากาศสะอาด (Fresh Air)



เข้ามา โดยนำอากาศภายนอกมาทำการกรองด้วยแผ่นกรองละเอียดป้อนเข้าสู่ห้อง เมื่อห้องความดันบวกมีช่องเปิดหรือมีการเปิดประตูหรือหน้าต่าง อากาศภายในห้องที่มีความดันสูงจะรั่วออกไปยังพื้นที่ที่มีความดันต่ำกว่า (Exfiltration)

ห้องความดันลบ (Negative Pressure Room) เป็นห้องที่ปรับความดันภายในห้องให้ต่ำกว่าความดันภายนอกเพื่อป้องกันมิให้อากาศติดเชื้อภายในห้องที่เกิดจากผู้ป่วยที่ติดเชื้อมาตามทางเดินอากาศ เช่น โควิด-19 วัณโรค หรือเชื้ออื่นๆ ที่เป็นละอองฝอยในอากาศ รั่วไหลแพร่เชื้อไปยังพื้นที่ข้างเคียง หลักการคือการดึงอากาศออกจากห้องให้มากกว่าอากาศไหลเข้าสู่ห้องตามที่แสดงในรูปที่ 1 ข. เนื่องจากอากาศภายในห้องเป็นอากาศที่ติดเชื้อ หากไม่สามารถนำอากาศไปทิ้งยังที่ปลอดภัยได้ ก่อนดึงอากาศเสียออกไปปล่อยทิ้งภายนอกห้องจะต้องกรองทำความสะอาดให้เป็นไปตามมาตรฐาน สำหรับอากาศภายนอกรั่วเข้าสู่ห้อง (Infiltration) ที่เข้ามาทางรูรั่วของห้องนั้นส่วนใหญ่เป็นอากาศที่ไม่สะอาด หรืออาจเติมอากาศเข้าไปโดยใช้พัดลมเติมอากาศที่ติดตั้งแผ่นกรองละเอียดเพื่อกรองทำความสะอาดอากาศก่อนเติมเข้าสู่ห้องได้

อัตราการระบายอากาศในหอผู้ป่วย นิยมใช้หน่วยอัตราการเปลี่ยนปริมาตรอากาศของห้องต่อชั่วโมง (Air Change Per Hour: ACH) ในการกำหนดอัตราการระบายอากาศเพื่อป้องกันและควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อโรคในสถานพยาบาลและเพื่อความสะดวกสบายของผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์ คำแนะนำตาม ANSI/ASHRAE Standard 170-2021 [8] ให้จัดให้ห้องแยกโรคคนไข้ที่ติดเชื้อ (Airborne Infection Isolation Room: AIIR) เป็นห้องความดันลบ เติมอากาศภายนอก



ก. ห้องความดันบวก

ข. ห้องความดันลบ

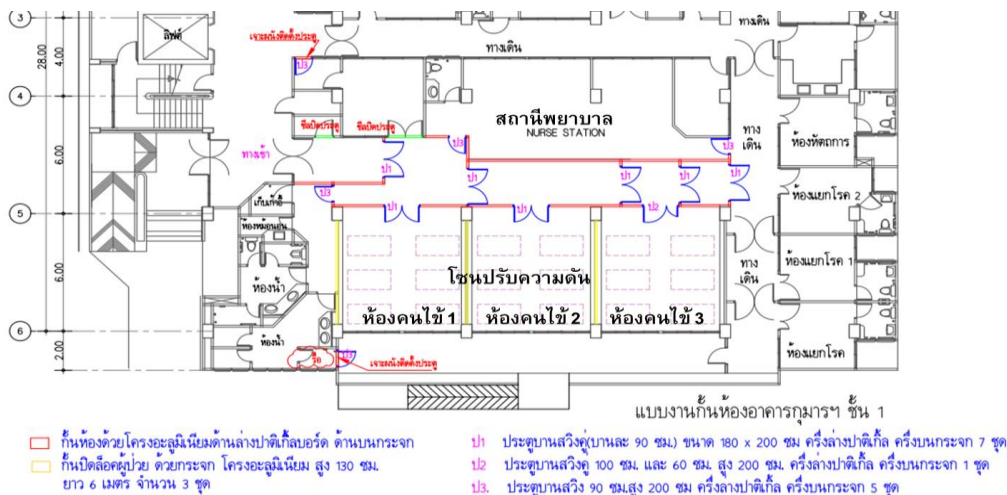
รูปที่ 1 การไหลของอากาศห้องความดันบวกและห้องความดันลบ

ไม่ต่ำกว่า 2 ACH มีการระบายอากาศทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 12 ACH อุณหภูมิ 21-24 °C ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60% สำหรับห้องปรับความดันหน้าห้องคนไข้ติดเชื้อ (Ante Room) มีการระบายอากาศทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 10 ACH ไม่ระบุสภาวะอากาศและการเติมอากาศ สำหรับห้องน้ำและห้องเบดแพน (Bed Pan Room) เป็นความดันลบ ให้นำอากาศออกไปทั้งหมด ไม่มีการหมุนวนอากาศ มีการระบายอากาศทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 10 ACH ไม่ระบุความชื้นสัมพัทธ์และการเติมอากาศภายนอก ระบุแต่เพียงอุณหภูมิห้องน้ำเท่านั้นคือ 22-26 °C ส่วนพื้นที่บริการที่เป็นพื้นที่สะอาดในโรงพยาบาล เป็นห้องความดันบวก เติมอากาศภายนอกไม่น้อยกว่า 2 ACH มีการระบายอากาศรวมไม่น้อยกว่า 4 ACH ไม่ระบุสภาวะอากาศภายในห้อง

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

### 2.1 หอผู้ป่วยติดเชื้อ

หอผู้ป่วยที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 2 เป็นหอผู้ป่วยที่เดิมเป็นหอผู้ป่วยสามัญสำหรับเด็ก ในช่วงของการแพร่ระบาดโควิด-19 ในเด็กที่กลับไปเรียนในที่ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นที่เพื่อรองรับการรักษาผู้ป่วยเด็กติดเชื้อมาตามทางเดินอากาศ โดยการกันโซนพื้นที่เพื่อปรับความดันอากาศของโซนต่างๆ เพื่อป้องกันการแพร่เชื้อ



รูปที่ 2 การปรับปรุงพื้นที่ห้องผู้ป่วยที่ทำการศึกษ

ประกอบด้วย

- 1) โซนห้องความดันบวก เป็นพื้นที่สะอาดสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ เช่น สถานีพยาบาล (Nurse Station) เพื่อสังเกตอาการของผู้ป่วยและเป็นห้องปฏิบัติการทางการบริหารการรักษในหอผู้ป่วยห้องเก็บอุปกรณ์สะอาดและห้องสวมชุดสะอาด
- 2) โซนห้องความดันลบ เป็นพื้นที่ที่เป็นแหล่ง (Source) ของเชื้อทางอากาศ (Infected Airborne) เช่น ห้องคนไข้ติดเชื้อแพร่ทางอากาศ ห้องสุชาผู้ป่วยติดเชื้อห้องเทเบตแพน ห้องขยะติดเชื้อในการศึกษาทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใน สถานีพยาบาล (Nurse Station) ห้องคนไข้ 1 (Patient 1) ห้องคนไข้ 2 (Patient 2) และห้องคนไข้ 3 (Patient 3)

## 2.2 ระบบระบายอากาศ

หอผู้ป่วยที่ทำการศึกษามีการเติมอากาศสะอาดเข้าสู่สถานีพยาบาลในอัตรา 6 ACH และดึงอากาศติดเชื้อ

ออกจากห้องอากาศติดเชื้อจากห้องคนไข้ 3 ห้องห้องน้ำคนไข้และห้องขยะในอัตรา 12 ACH มีการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบระบายอากาศและเครื่องปรับอากาศตามแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเครื่องระบายอากาศ

| อุปกรณ์                                                          | ข้อกำหนดเฉพาะของอุปกรณ์                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เครื่องเติมอากาศสะอาด สถานีพยาบาล                                | Camfill Air Cleaner CC410<br>Concealed-M AK-E2227 200-240 VAC 50/60Hz 1.45 A<br>effect<170W max. HEPA H13                                                                     |
| เครื่องดูดกรองอากาศติดเชื้อ ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 ห้องคนไข้ 3  | fan filter unit with UV-C<br>อนุสิทธิบัตร เลขที่ 18282<br>เครื่องดูดกรองอากาศติดเชื้อชนิดส่งลมออกสู่ภายนอกอาคารโดยตรง [9]<br>In-line centrifugal blower 0.14 kW max. HEPA H14 |
| เครื่องปรับอากาศ สถานีพยาบาล ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 ห้องคนไข้ 3 | 48,000 BTU/h + 18,000 BTU/h<br>60,000 BTU/h<br>60,000 BTU/h<br>60,000 BTU/h                                                                                                   |



### 2.3 การระความร้อนจากการระบายอากาศ

การระความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการระบายอากาศเพื่อลดการแพร่เชื้อ

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_a(h_o - h_i) \quad (1)$$

โดย  $\dot{m}_a$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องเพิ่มขึ้นจากการระบายอากาศเพื่อลดการแพร่เชื้อ (kg/s)

$h_o$  คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายนอกห้อง (kJ/kg<sub>da</sub>)

$h_i$  คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายในห้อง (kJ/kg<sub>da</sub>)

$h_o$  และ  $h_i$  ในสมการที่ (1) ประเมินได้จาก

$$h = h_{da} + w \cdot h_g \quad (\text{kJ/kg}_{da}) \quad (2)$$

โดย  $h$  คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศชื้นภายนอก ( $h_o$ ) หรือเอนทัลปีจำเพาะของอากาศชื้นภายในห้อง ( $h_i$ ) ทั้งนี้

$$h_g \approx 2501 + 1.86 \cdot t$$

$$h_{da} \approx 1.006 \cdot t$$

$t$  คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°C)

$w$  คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg/kg<sub>da</sub>)

ซึ่งประเมินได้จากสมการที่ (3)

$$w = 0.621945 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (3)$$

โดย  $p$  คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

$p_w$  คือ ความดันอากาศชื้น (kPa)

$p_w$  สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$p_w = \phi \cdot p_{ws} \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

โดย  $p_{ws}$  คือ ความดันอิ่มตัว ในหน่วย kPa

ทั้งนี้  $p_{ws}$  หาได้จาก [10]

ทั้งนี้การสร้างแผนภูมิไซโครเมตริกในการศึกษานี้เพื่อหาผลการติดตามสภาวะอากาศภายในห้องมาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้สมการที่ (2) ถึงสมการที่ (5) อากาศภายนอกใช้ความดันบรรยากาศมาตรฐานเท่ากับ 101.325 kPa สำหรับอากาศภายใน หอผู้ป่วยใช้ความดันสมบูรณ์จริงของแต่ละห้อง ในกรณีปกติความดันในหอผู้ป่วยเท่ากับความดันภายนอก

$$\ln p_{ws} = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T \quad (5)$$

โดย  $p_{ws}$  คือ ความดันอิ่มตัว สมการที่ (5) มีหน่วย Pa

$T$  คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งสัมบูรณ์ (K)

$$C_1 = -5.800 \ 220 \ 6 \ E+3$$

$$C_2 = 1.391 \ 499 \ 3 \ E+00$$

$$C_3 = -4.864 \ 023 \ 9 \ E-02$$

$$C_4 = 4.176 \ 476 \ 8 \ E-05$$

$$C_5 = -1.445 \ 209 \ 3 \ E-08$$

$$C_6 = 6.545 \ 967 \ 3 \ E+00$$

สำหรับในกรณีที่มีการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อ ความดันห้องสถานีพยาบาลจะมี ความดันสูงกว่าอากาศภายนอก 10 Pa และความดันในห้องคนไข้จะมีความดันต่ำกว่าอากาศภายนอก 30 Pa ดังนั้นความดันสมบูรณ์ของห้องความดันลบเท่ากับ 101.295 kPa และความดันสมบูรณ์ของห้องความดันบวกเท่ากับ 101.335 kPa

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องในสมการที่(1) คำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่วัดค่าได้หารด้วยปริมาตรจำเพาะของอากาศ

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}}{v_a} \quad (\text{kg/s}) \quad (6)$$



โดย  $\dot{V}$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ได้จากการวัดค่าอัตราการเติมอากาศเข้าสู่ห้องความดันบวกด้วยเครื่องมือวัดในตารางที่ 2  $v_a$  คือ ปริมาตรจำเพาะ ( $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{da}}$ ) ประเมินได้จากสมบัติของอากาศที่เติมเข้าสู่ห้องความดันบวกจากสมการที่ (7) [7] ดังนี้

$$v_a = \frac{0.287042(t + 273.15)(1 + 1.607858w)}{p} \quad (7)$$

## 2.4 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ในการติดตามค่าสภาวะอากาศ

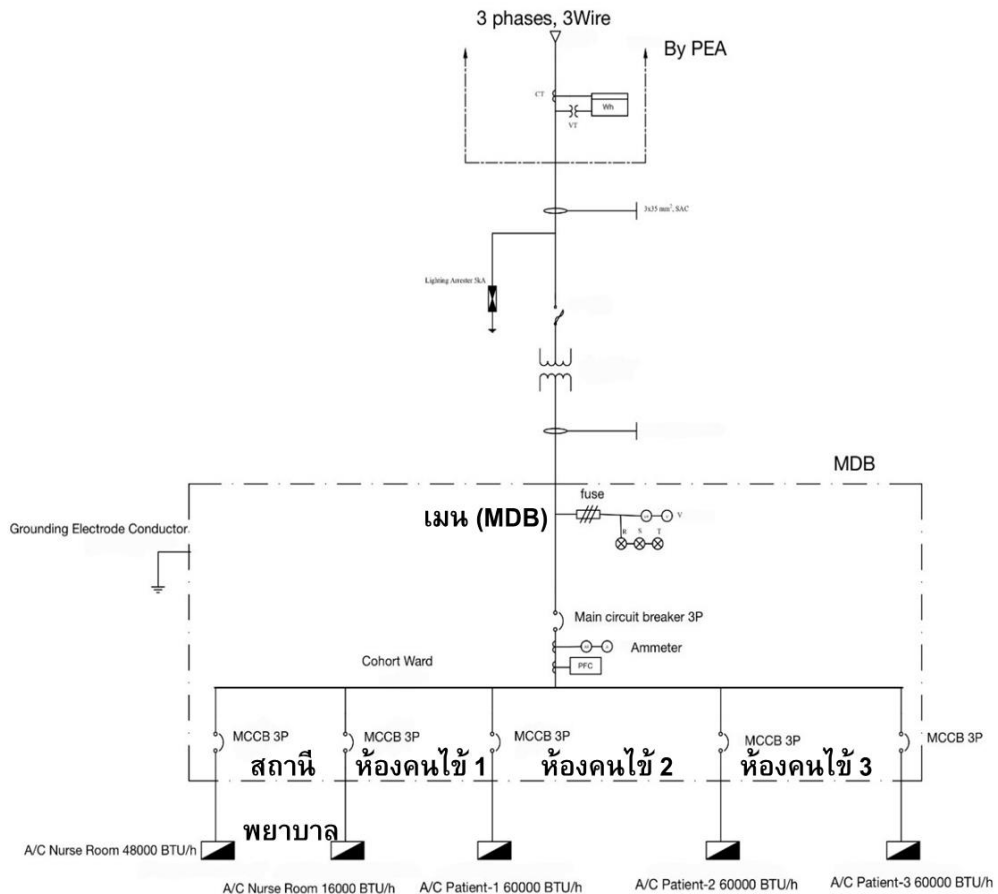
ในการเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาด้านสภาวะอากาศและการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก

การเพิ่มการระบายอากาศจะต้องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์เพื่อพลอตแผนภูมิไซโครเมตริกของสภาวะอากาศในและนอกหอผู้ป่วย รวมทั้งวัดค่าอัตราการไหลของอากาศเพื่อทำการคำนวณภาระความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มการระบายอากาศตามที่อธิบายในหัวข้อ 3.3 รวมทั้งติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศที่เกิดขึ้นจริง โดยตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า อัตราการไหลของอากาศ และอุปกรณ์ในการติดตามค่าสภาวะอากาศ การวัดค่ากำลังไฟฟ้าทำการวัดที่เมนไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบปรับอากาศของหอผู้ป่วยตามที่แสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ในการติดตามค่าสภาวะอากาศ

| อุปกรณ์วัด                                                           | รายละเอียดข้อกำหนดของอุปกรณ์                                                                                                                                                                             | ตำแหน่งที่ใช้วัดค่า                                                              |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์ IoT<br>วัดค่าอุณหภูมิ<br>กระเปาะแห้ง และ<br>ความชื้นสัมพัทธ์ | Sensor DHT22, 0-100% RH, -40-80 °C, Acc. +/- 2%RH +/-0.5 °C<br>Arduino IDE Node MCU ESP32, w/ WIFI 802.11 b/g/n and Bluetooth 4.2 Base for ESP32, LCD I2C 16*2AIS home WIFI<br>Firebase MIT App Inventor | อากาศภายนอกหอผู้ป่วย<br>สถานีพยาบาล<br>ห้องคนไข้ 1<br>ห้องคนไข้ 2<br>ห้องคนไข้ 3 |
| เครื่องมือวัดค่า<br>กำลังไฟฟ้าแบบ<br>ต่อเนื่อง                       | ELITE PRO XC Power Meter & Recorder<br>0.25 – 3,000 A, 4 Channel Voltage 3 เฟส 0-600 V AC/DC<br>Acc.<1% Ro Coil CT USB port                                                                              | เมน (MDB) กำลังไฟฟ้า<br>ของเครื่องปรับอากาศใน<br>หอผู้ป่วย                       |
| เครื่องมือวัดค่าอัตราการ<br>ไหลของอากาศ                              | Testo 420 40-4000 $\text{m}^3/\text{h}$ Acc.+/-3% +12 $\text{m}^3/\text{h}$<br>@22°C,1013 hPa                                                                                                            | อัตราการไหลของเครื่อง<br>ระบายอากาศ                                              |





รูปที่ 3 Single Line Diagram ระบบปรับอากาศ

ในการติดตามค่าสภาวะอากาศอย่างต่อเนื่องภายในห้องสถานีพยาบาล ภายในห้องคนไข้ และสภาวะอากาศภายนอกหอผู้ป่วย ได้จากการเก็บข้อมูลของแต่ละพื้นที่ด้วยอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ( $t$ ) และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH,  $\phi$ ) เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น ( $w$ ) จากสมการที่ (3) สมการที่ (4) และสมการที่ (5) ทั้งนำไปคำนวณเอนทัลปีจำเพาะของอากาศในสมการที่ (2) ปริมาตรจำเพาะในสมการที่ (7) คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบอุปกรณ์

IoT เพื่อติดตั้งจุดตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จากหอผู้ป่วย ใช้ Firebase ร่วมกับอุปกรณ์ IoT และให้แสดงข้อมูลไปยัง MIT App Inventor

MIT App Inventor [9] เป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างแอปพลิเคชันที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) โดย MIT App Inventor ใช้หลักการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงคอมโพเนนต์ (Component-Based Software Development) ทำให้ผู้ใช้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันได้ง่ายโดยไม่ต้องเขียนรหัสคำสั่ง



(Source Code) ภาษาจาวาสคริปต์ ซึ่งผู้วิจัยได้สร้างหน้าแอปพลิเคชันเพื่อแสดงข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นของห้องต่างๆในหอผู้ป่วยและอากาศภายนอกหอผู้ป่วย โดยใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์ IoT, Firebase [11] และ MIT App Inventor [12] ตามที่แสดงในรูปที่ 4 Inventor จัดทำแผนภูมิไซโครเมตริกโดยทำการพลอตแผนภูมิให้แกน x เป็นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แกน y เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศทั้งภายในและภายนอกแล้วความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นเส้นโค้งที่บ่งชี้เส้นประที่ลดหลั่นลงมาเป็นความชื้นสัมพัทธ์ 90% 80% 70% 60% 50% 40% 30% 20% และ 10% ตามลำดับ

จากนั้นนำข้อมูลสภาวะอากาศที่ได้จาก MIT App Inventor ของอากาศภายนอกและห้องต่างๆ ภายในหอผู้ป่วยมาคำนวณแล้วพลอตตำแหน่งลงบนแผนภูมิไซโครเมตริก

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ใช้ Power meter ELITE PRO XC Power Meter & Recorder และ Ro Coil CT วัดที่เมนจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบปรับอากาศทั้งหมดของหอผู้ป่วยโดยตั้งเครื่องมิ้ววัดให้ทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าทุกๆ 1 นาทีต่อเนื่องตลอดการศึกษา เพื่อนำไปรื้อไฟล์กำลังไฟฟ้ากับระยะเวลามาตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศของหอผู้ป่วย

สำหรับการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่เติมเข้าสู่หอผู้ป่วยนั้น เนื่องจากเครื่องเติมอากาศสะอาดเป็นเครื่องที่เติมอากาศด้วยอัตราการไหลคงที่ในการศึกษานี้ใช้ Testo 420 ซึ่งยานการวัดตรงกับค่าที่ทำการวัดสมมติฐานในการใช้งานระบบระบายอากาศในการทดสอบสภาวะอากาศและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพื่อการเปรียบเทียบผล



รูปที่ 4 อุปกรณ์ IoT + Firebase + MIT App Inventor

## 2.5 วิธีการทดสอบ

สมมติฐานในการใช้งานระบบระบายอากาศ ในการทดสอบสภาวะอากาศและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพื่อการเปรียบเทียบผลแบ่งเป็น 2 รูปแบบ

1) ปิดระบบระบายอากาศ (OFF ventilation mode): กรณีปกติที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อทางอากาศ ปิดระบบระบายอากาศทั้งเครื่องเติมอากาศสะอาดแก่ห้องสถานีพยาบาลและปิดเครื่องดึงอากาศออกจากห้องคนไข้ ประตูของโซนต่างๆ จะถูกเปิดทั้งหมด

2) เปิดระบบระบายอากาศ (ON ventilation mode): เปิดระบบระบายอากาศ 100% ทั้งเครื่องเติมอากาศสะอาดแก่ห้องสถานีพยาบาลและเครื่องดึงอากาศออกจากห้องคนไข้ทุกห้อง เป็นการใช้งานระบบระบายอากาศของหอผู้ป่วยในกรณีที่มิในสถานการณ์การระบาดของโรคแพร่เชื้อทางอากาศ การใช้งานของประตูโซนต่างๆจะปิด และจะเปิดเฉพาะในกรณีที่ใช้เส้นทางในกรณีที่มีการป้องกันการแพร่เชื้อในหอผู้ป่วย

การทดสอบระบบทั้ง 2 รูปแบบข้างต้น เป็นการเดินระบบปรับอากาศและระบายอากาศในสภาวะอากาศจริง โดยทำการทดสอบ กรณีที่ 1) และ กรณีที่ 2) จากการทำงานในหอผู้ป่วยเดียวกัน ในช่วงเวลาคนละวันกัน จึงตั้งสมมติฐานโดยทดสอบระบบต่อเนื่อง โดยทดสอบ



กรณีที่ 1) เป็นเวลา 2 วัน และทดสอบกรณีที่ 2) เป็นเวลา 7 วัน ในช่วงเดือนมกราคม 2566 เพื่อให้มีจำนวนชุดข้อมูลจำนวนมากพอในการคัดเลือกคู่เทียบในภาวะอากาศภายนอกที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากหอผู้ป่วยมีการใช้งาน

### 3. ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงผลความดันอากาศ สภาวะอากาศเฉลี่ยของห้องต่าง ๆ ภายในหอผู้ป่วย และอากาศภายนอกหอผู้ป่วย กรณีที่ 1) ปิดระบบระบายอากาศ และกรณีที่ 2) เปิดระบบระบายอากาศ

กรณีที่ 1) ปิดระบบระบายอากาศนั้นความดันของทุกห้องในหอผู้ป่วยเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก เนื่องจากไม่มีการเปิดระบบระบายอากาศเชิงกล ในห้องคนไข้ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย  $25.18^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 64.85% ห้องคนไข้ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ย  $24.78^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 63.15% ห้องคนไข้ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ย  $24.54^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 68.44% ห้องสถานีพยาบาลมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $24.76^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 53.29% โดยสภาวะอากาศภายนอกมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $26.21^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 56.47% อัตราส่วนความชื้นภายในห้องคนไข้สูงกว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายนอก

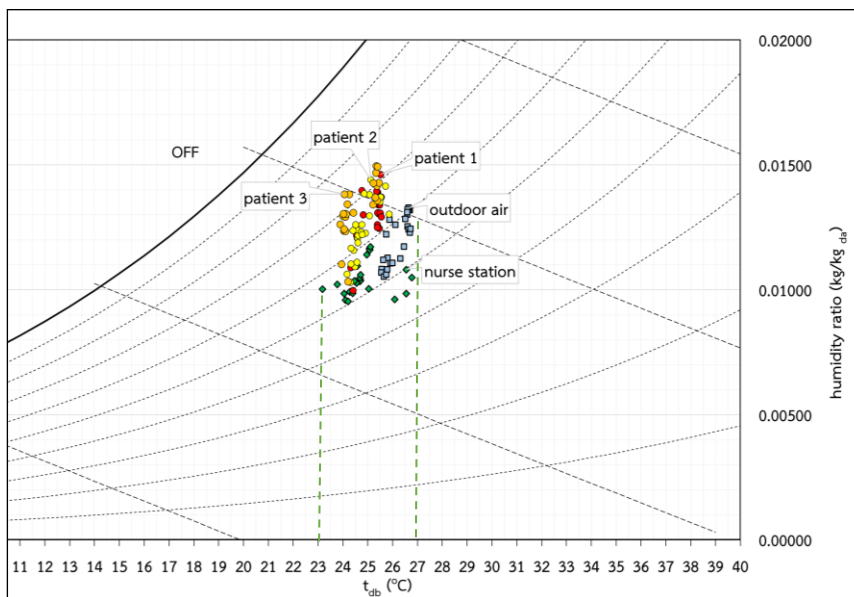
กรณีที่ 2) เมื่อเปิดระบบระบายอากาศความดันห้องสถานีพยาบาลเป็นบวกคือสูงกว่าความดันภายนอก 10 Pa หรือมีความดันสมบูรณ์เท่ากับ 101.325 kPa ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 และห้องคนไข้ 3 มีความดันเป็นลบเท่ากับ -30 Pa หรือมีความดันสมบูรณ์เท่ากับ

101.295 kPa ในห้องคนไข้ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย  $25.20^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 61.44% ห้องคนไข้ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ย  $24.78^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 62.47% ห้องคนไข้ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ย  $24.37^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 65.67% ห้องสถานีพยาบาลมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $24.17^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 55.81% โดยอากาศภายนอกมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $28.45^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 56.20% อัตราส่วนความชื้นภายในห้องคนไข้ต่ำกว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายนอก สภาวะอากาศรายชั่วโมงภายในและภายนอกหอผู้ป่วยในกรณีที่ 1) ปิดระบบระบายอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงในรูปที่ 5 สำหรับสภาวะอากาศรายชั่วโมงภายในและภายนอกหอผู้ป่วยในกรณีที่ 2) ที่มีการเปิดระบบระบายอากาศ 100% บนแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงในรูปที่ 6 ช่วงระหว่างเส้นประในรูปที่ 5 และในรูปที่ 6 เป็นช่วงอุณหภูมิ  $21\text{--}24^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60% สภาวะอากาศของห้องคนไข้ติดเชื่อตามคำแนะนำของ ANSI/ASHRAE Standard 170-2021 [3] ซึ่งพบว่าห้องคนไข้ทั้ง 2 กรณี มีสภาวะอากาศโดยเฉลี่ยสูงกว่าช่วงดังกล่าวทั้ง 2 กรณีค่ากำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทุกๆ 1 นาที ของระบบปรับอากาศในการใช้งานระบบกรณีที่ 1) ตลอด 24 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 7 พบว่าระบบปรับอากาศมีการตัดต่อระบบเป็นระยะตลอดทั้งวันและค่ากำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องของระบบปรับอากาศในการใช้งานระบบกรณีที่ 2) ตลอด 24 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่ากรณีที่ 1) ระบบปรับอากาศมีการตัดระบบน้อยกว่ากรณีที่ 2

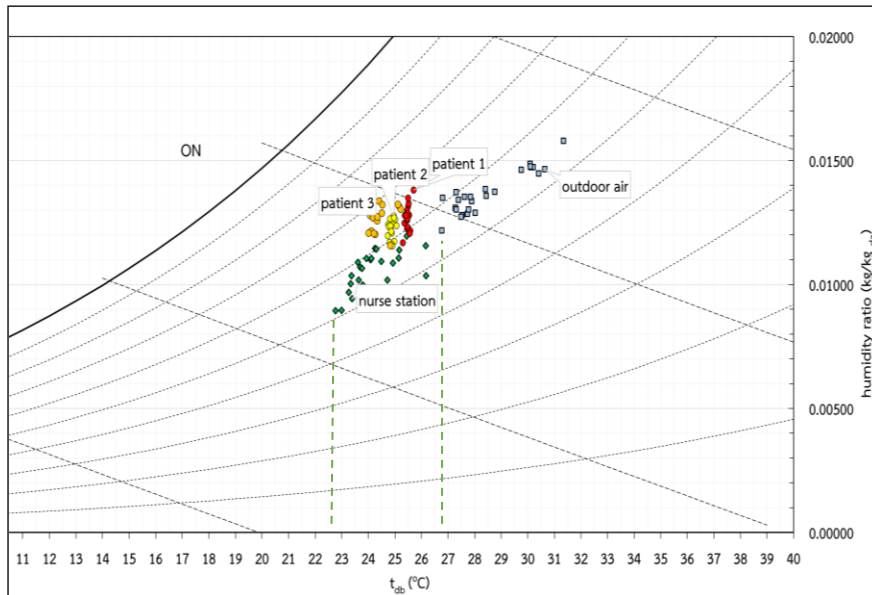


### ตารางที่ 3 สภาวะอากาศเฉลี่ยภายนอกและภายในหอผู้ป่วย

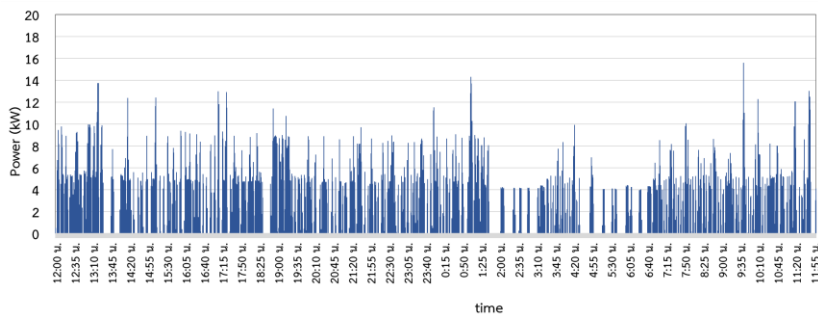
| ห้อง        | 1) ปิดระบบระบายอากาศ (OFF) |               |                      |                                          | 2) เปิดระบบระบายอากาศ (ON) |               |                      |                                          |
|-------------|----------------------------|---------------|----------------------|------------------------------------------|----------------------------|---------------|----------------------|------------------------------------------|
|             | ความดันอากาศ (kPa)         | อุณหภูมิ (°C) | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | อัตราส่วนความชื้น (kg/kg <sub>da</sub> ) | ความดันอากาศ (kPa)         | อุณหภูมิ (°C) | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | อัตราส่วนความชื้น (kg/kg <sub>da</sub> ) |
| อากาศภายนอก | 101.325                    | 26.21         | 56.47                | 0.01205                                  | 101.325                    | 28.45         | 56.20                | 0.01370                                  |
| สถานีพยาบาล | 101.325                    | 24.76         | 53.29                | 0.01038                                  | 101.335                    | 24.17         | 55.81                | 0.01052                                  |
| ห้องคนไข้ 1 | 101.325                    | 25.18         | 64.85                | 0.01304                                  | 101.295                    | 25.20         | 61.44                | 0.01236                                  |
| ห้องคนไข้ 2 | 101.325                    | 24.78         | 63.15                | 0.01239                                  | 101.295                    | 24.76         | 62.47                | 0.01222                                  |
| ห้องคนไข้ 3 | 101.325                    | 24.54         | 68.44                | 0.01325                                  | 101.295                    | 24.37         | 65.67                | 0.01255                                  |



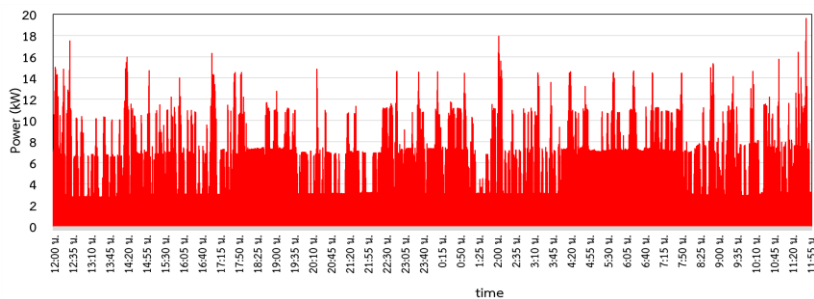
รูปที่ 5 สภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วยรายชั่วโมง กรณีที่ 1)



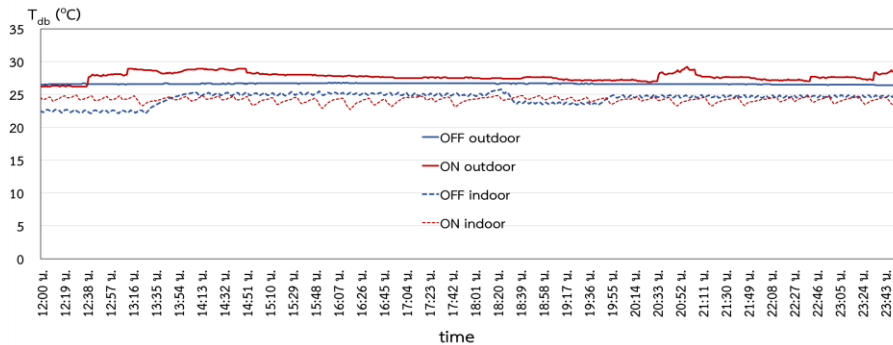
รูปที่ 6 สภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วย รายชั่วโมงกรณี 2)



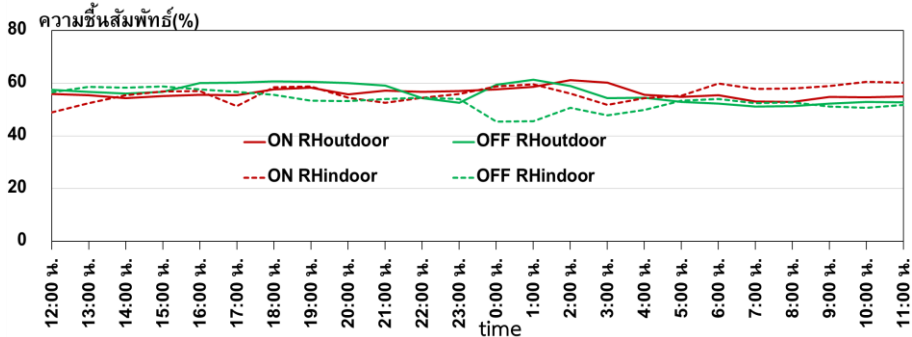
รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ กรณีที่ 1)



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศกรณี 2)



รูปที่ 9 อุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศภายนอกและภายในสถานีพยาบาลรายชั่วโมงกรณี (1) และกรณี (2)



รูปที่ 10 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกและภายในสถานีพยาบาลรายชั่วโมงกรณี (1) และกรณี (2)

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศภายนอกและภายในตลอด 24 ชั่วโมงทั้งกรณี (1) และ กรณี (2) ตามที่แสดงในรูปที่ 9 จะเห็นว่ารูปแบบ (Profile) ของอุณหภูมิมีความแตกต่างกัน โดยในวันที่ทำการทดสอบแบบเปิดระบบระบายอากาศมีอุณหภูมิภายนอกโดยเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในห้องสถานีพยาบาลซึ่งได้รับการเติมอากาศสะอาดจากภายนอกมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดวันทั้ง 2 กรณี

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกและภายในสถานีพยาบาล ตลอด 24 ชั่วโมงทั้งกรณี (1) และกรณี (2) แสดงในรูปที่ 10 จะเห็นว่าโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์ในวันที่ทำการทดสอบทั้งภายในและภายนอก

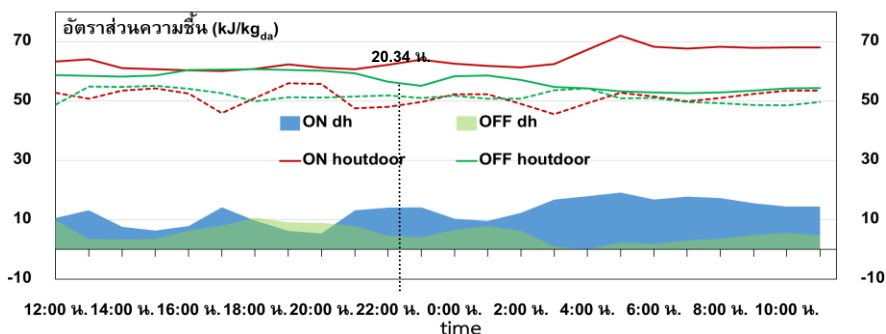
อยู่ในช่วง 45%-60% ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศในการทำความเย็นในส่วน of ความร้อนสัมผัสของระบบปรับอากาศที่สำคัญคืออุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายนอก ส่วนปัจจัยที่ส่งผลในส่วน of ความร้อนแฝงของระบบปรับอากาศ คือ อัตราส่วนความชื้น ( $w$ ) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นจากสภาวะอากาศทั้งกรณี (1) และกรณี (2) อัตราส่วนความชื้นในห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 และห้องคนไข้ 3 เปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นในห้องสถานีพยาบาล พบว่าห้องคนไข้ทั้ง 3 ห้องมีปริมาณน้ำในอากาศเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าห้องสถานีพยาบาล ซึ่งสันนิษฐานว่ามีการเติมน้ำให้อากาศมาจากแหล่งอื่น



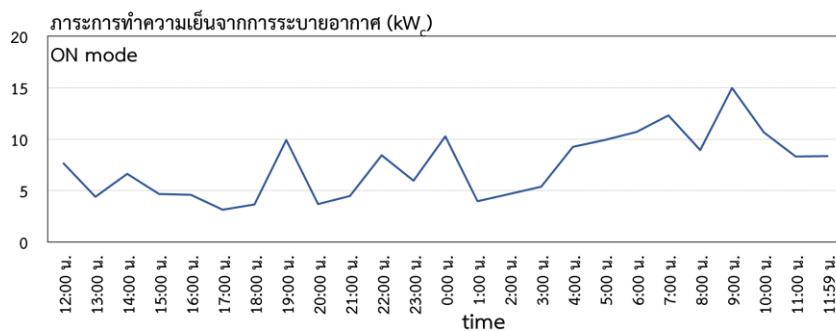
สำหรับในกรณีที่ 2) เมื่อมีการเปิดระบบระบายอากาศจะเป็นการบังคับให้มีการไหลของอากาศจากห้องสถานีพยาบาลไปยังห้องปรับอากาศต้นและไหลเข้าสู่ห้องคนไข้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความแตกต่างของความดันอากาศของห้องต่าง ๆ ในหอผู้ป่วย ซึ่งรูปแบบการจัดวางห้องพบว่า มีผนังห้องคนไข้ติดกับผนังภายนอกและห้องน้ำ ความดันของห้องคนไข้ที่ต่ำกว่าความดันภายนอก เป็นหนึ่งในปัจจัยให้มีอากาศภายนอกซึ่งมีความชื้นรั่วไหลเข้าสู่ห้องคนไข้

เอนทัลปีจำเพาะรายชั่วโมงของอากาศภายนอกและอากาศภายในสถานีพยาบาล แสดงในรูปที่ 11 พื้นที่ในส่วนล่างของรูปแสดงถึงความแตกต่างระหว่างเอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายนอกและอากาศ

ภายในสถานีพยาบาล ซึ่งมีผลต่อการในการทำความเย็นในส่วนของการรวมความร้อนของระบบปรับอากาศที่สำคัญ หากมีการเปิดระบบระบายอากาศหรือมีการรั่วเข้าของอากาศจากภายนอก รูปที่ 12 แสดงผลการคำนวณภาระการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้นจากการนำอากาศภายนอกเติมเข้าสู่ห้องสะอาดในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอด 24 ชั่วโมง ในกรณีที่มีการเปิดระบบระบายอากาศโดยใช้อัตราการไหลของอากาศที่เติมเข้าสู่ห้องสถานีพยาบาลกับความแตกต่างของเอนทัลปีจำเพาะของอากาศพบว่าส่วนเพิ่มของพลังงานที่ต้องใช้ในการทำความเย็นเพิ่มในส่วนของการระบายอากาศเท่ากับ 176.865 kWh<sub>c</sub>



รูปที่ 11 เอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายนอกและภายในรายชั่วโมง

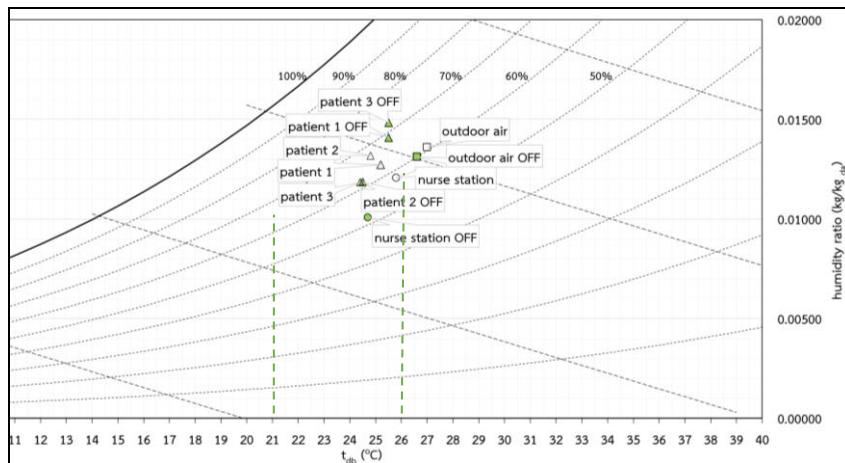


รูปที่ 12 ภาระการทำความเย็นส่วนเพิ่มจากการระบายอากาศ

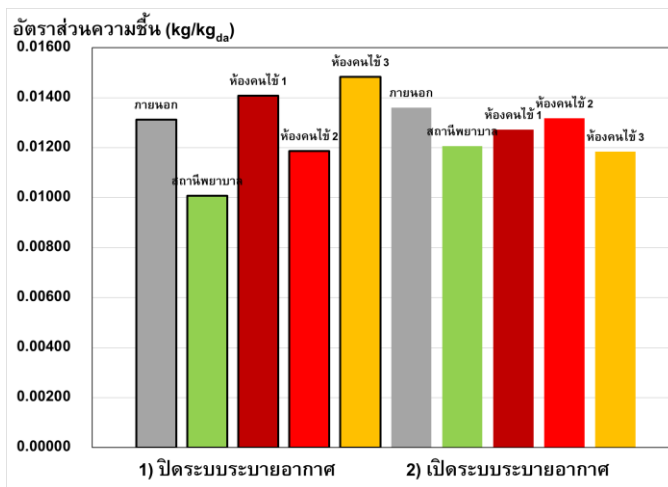


จากรูปที่ 11 พบว่าสภาวะอากาศที่มีความใกล้เคียงกันคือในเวลา 20.34 น. มาพิจารณาดำเนินการสภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วย กรณีที่ 1) และกรณีที่ 2) ณ เวลา 20.34 น. ตามที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าสภาวะอากาศในห้องผู้ป่วยทุกห้องอยู่นอกช่วงอุณหภูมิ 21-24 °C ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60%

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นของห้องต่าง ๆ ในรูปที่ 14 พบว่าในห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 และห้องคนไข้ 3 ทั้งกรณีที่เปิดระบบระบายอากาศและกรณีที่ปิดระบบระบายอากาศมีอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าในห้องสถานพยาบาล



รูปที่ 13 สภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วย



รูปที่ 14 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของหอผู้ป่วย กรณีที่ 1) และกรณีที่ 2) เวลา 20.34 น.





ในกรณีที่ไม้เปิดระบบระบายอากาศซึ่งความดันเท่ากับความดันอากาศภายนอกพบว่ามียัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นในห้องคนไข้ทั้ง 3 ห้อง สันนิษฐานได้จากกิจกรรมการใช้น้ำภายในห้องคนไข้ที่มีอ่างล้างมือมีการเช็ดตัวและให้นมให้อาหารคนไข้ตลอดวัน

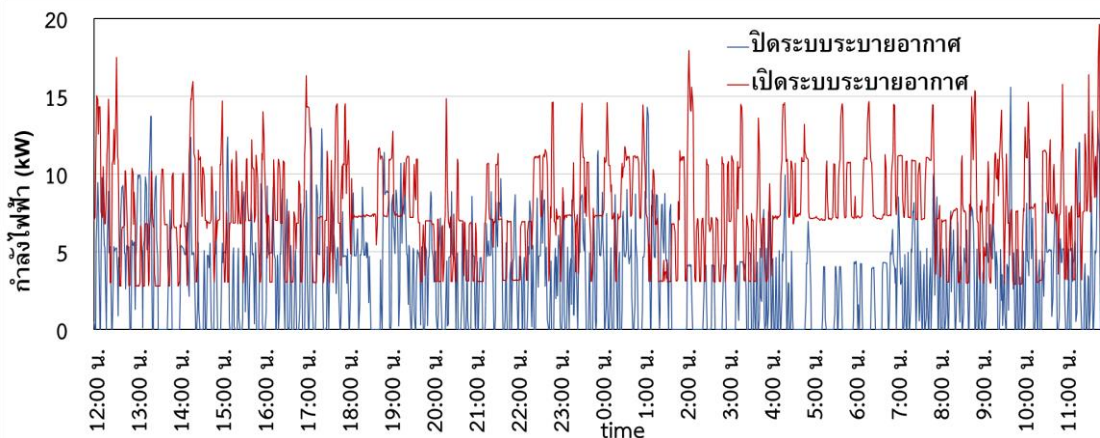
รูปที่ 15 แสดงพื้นที่แตกต่างได้กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของระบบปรับอากาศจากการเปิดระบบระบายอากาศจากการคำนวณพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศกรณีที่ปิดระบบระบายอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง เท่ากับ 76.778 kWh พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศกรณีที่เปิดระบบระบายอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง เท่ากับ 184.823 kWh มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น 108.045 kWh คิดเป็น 140.72%

#### 4. การอภิปรายผลและสรุปผล

จากการศึกษาสภาวะอากาศและวิเคราะห์การใช้พลังงานส่วนเพิ่มจากการระบายอากาศของหอผู้ป่วย

ที่สามารถปรับการใช้งานได้ทั้งในสถานการณ์มีการระบาดของการแพร่โรคติดเชื้อทางอากาศและในการใช้งานกรณีปกติ พบว่าในการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อใช้งานในสถานการณ์การระบาดของการแพร่โรคติดเชื้อทางอากาศของหอผู้ป่วยที่ทำการศึกษานี้มีภาระการทำความเย็นเพิ่มขึ้นในส่วนของการเติมอากาศสะอาดเข้าสู่สถานพยาบาลเพื่อสร้างความดันบวกประมาณ 32% ซึ่งจากการวัดติดตามค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นประมาณ 140%

เมื่อเปิดระบบระบายอากาศ ห้องสถานพยาบาลได้รับการเติมอากาศและกรองอากาศสะอาดจากภายนอกให้เป็นห้องความดันบวก อัตราส่วนความชื้นจะสูงกว่ากรณีที่ปิดระบบระบายอากาศ แต่ยังมีสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สุขสบาย สภาวะอากาศในห้องคนไข้ทุกห้องอยู่นอกช่วงที่ ANSI/ASHARE170-2021 แนะนำ



รูปที่ 15 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศจากการเปิด/ปิดระบบระบายอากาศรายชั่วโมง



เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นของห้องคนไข้ นอกเหนือมวณน้ำในอากาศที่เติมเข้าด้วยเครื่องเติมอากาศส่งอากาศต่อจากห้องความดันบวกผ่านห้องปรับความดันไปยังห้องคนไข้ และมวณน้ำในอากาศรั่วเข้าห้องความดันลบ พบว่ามีมวณน้ำถูกเติมเข้าสู่ห้องคนไข้จากสาเหตุอื่นด้วย ซึ่งจากการสังเกตกิจกรรมในพื้นที่พบว่าในห้องคนไข้มีแหล่งน้ำจากอ่างล้างมือที่ใช้ในการเช็ดตัวอาบน้ำคนไข้ ซึ่งหากจำเป็นต้องควบคุมความชื้นในห้องคนไข้ให้อยู่ในเกณฑ์ควรทำการวิเคราะห์สมมูลน้ำในหอผู้ป่วยเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความชื้นในอากาศอย่างละเอียดต่อไป

การศึกษานี้มีข้อจำกัดการทดสอบในหอผู้ป่วยที่มีสภาวะอากาศภายนอกจริง และการเข้าติดตั้งอุปกรณ์ได้ในช่วงเวลาที่จำกัดเนื่องจากความจำเป็นในการใช้พื้นที่ของโรงพยาบาล การเปิดระบบระบายอากาศเป็นระบบที่ใช้คนเปิดสวิตช์แยกเครื่อง หากหอผู้ป่วยมีการติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศ และการควบคุมความชื้นของอากาศจะสามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ได้มากขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทอีซีเอสเอ็นเนอร์ยีโซลูชัน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดบางรายการและขอขอบคุณโรงพยาบาลชลบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตามข้อมูล

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Burkett, Defining viruses and droplet release: virus transmission modes and mitigation strategies (Part 1), ASHRAE Journal, 2021, 63(3), 24-29.
- [2] World Health Organization, Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19, Geneva: World Health Organization, 2021.
- [3] J. Cho, Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: Effect of supply and exhaust air diffuser configurations, Applied Thermal Engineering, 2019, 148, 208-218.
- [4] S. Srivastava, X. Zhao, A. Manay and Q. Chen, Effective ventilation and air disinfection system for reducing coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection risk in office buildings, Sustainable Cities and Society, 2021, 75, 103408.
- [5] M.P. Halloran, Cost-effectiveness of various ASHRAE standard 241-2023 compliance methods, ASHRAE Journal, 2024, 16-20.
- [6] W. Zheng, J. Hu, Z. Wang, J. Li, Z. Fu, H. Li, J. Jurasz, S.K. Chou and J. Yan, COVID-19 Impact on operation and energy consumption of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems, Advances in Applied Energy, 2021, 3, 100040.
- [7] M.M. Squire, M. Munsamy, G. Lin, A. Telukdarie and T. Igusa, Modeling hospital energy and economic costs for COVID-19 infection control interventions, Energy and Buildings, 2021, 242, 110948.



- [8] ASHARE, Ventilation of Health Care Facilities, ASHRAE and American nation Standards Institute and American Society for Health Care Engineers, 2021.
- [9] Patent No.18282, Airborne filtration suction unit: A direct wall installation type, 2021. (in Thai)
- [10] H.E. Kennedy, ASHRAE fundamentals handbook SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook, 2021.
- [11] <https://firebase.google.com/>. (Accessed on 14 November 2022)
- [12] <http://www.appinventor.mit.edu/>. (Accessed on 14 November 2022)