

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัฒมลพลังงาน
แสงอาทิตย์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน
A Simulation-Based Performance Assessment of PV-Fan Assisted Demand-
Controlled Ventilation for Indoor Air Quality Enhancement and Energy Savings

ปรวิทย์ บัณฑิตสิทธิ์รัตน์^{*1}, ดร.ปรีดา จันทวงษ์², ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์³

นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัย
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800¹

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัย
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800²

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800³

Corresponding author's e-mail : poravit.bun@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัฒมลพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานภายใต้สภาวะการใช้งานจริง แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นใน MATLAB/Simulink โดยใช้ข้อมูลจริงรายชั่วโมงจากแหล่งข้อมูลภายนอก ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER และข้อมูล PM2.5 จาก Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน เพื่อใช้แทนข้อมูลจากเซนเซอร์ภายนอกอาคาร ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นอินพุตของแบบจำลองร่วมกับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ความชื้นสัมพัทธ์ และภาระพลังงานของระบบระบายอากาศและระบบปรับอากาศ

การศึกษาได้เปรียบเทียบ 3 กรณีหลัก ได้แก่ กรณีฐานแบบระบายอากาศธรรมชาติ (S0) กรณีระบายอากาศคงที่ (S1) และกรณีควบคุมอัตราการระบายอากาศตามความต้องการแบบ DCV ร่วมกับ PV-Fan (S2) โดยพิจารณาทั้งในโหมดการทำงานของระบบปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง และโหมดทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน ผลการจำลองพบว่า S2 สามารถลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายได้ดีกว่า S1 โดยเฉพาะในโหมดใช้งานตาม

ผู้ครอบครอง ขณะเดียวกันยังสามารถรักษาความเข้มข้น CO₂ ให้อยู่ใกล้ค่าควบคุมได้ดีกว่ากรณีฐาน ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงแสดงให้เห็นศักยภาพในการสร้างสมดุลระหว่างการประหยัดพลังงานและการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระบบ DCV สามารถควบคุมค่า CO₂ ให้อยู่ใกล้ค่ากำหนด (1000 ppm) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งลดการเกิด overshoot และลดช่วงเวลาที่เกินมาตรฐาน IAQ ขณะเดียวกันยังสามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมผ่านการใช้พลังงานจาก PV ส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนที่เหมาะสมระหว่างคุณภาพอากาศและการใช้พลังงาน

คำสำคัญ: การระบายอากาศตามความต้องการ, PV-Fan, คุณภาพอากาศภายในอาคาร, MATLAB/Simulink, คาร์บอนไดออกไซด์

Abstract

This study evaluates the performance of a PV-fan assisted Demand-Controlled Ventilation (DCV) system for a small office, focusing on the trade-off between indoor air quality and energy consumption under realistic operating conditions. A MATLAB/Simulink model was developed using hourly external data from NASA POWER for meteorological and solar radiation variables, and from Air4Thai for ambient PM_{2.5} concentration, during April to June. These datasets were used as substitutes for outdoor sensors and combined with indoor occupancy profiles to simulate carbon dioxide (CO₂) concentration, relative humidity, ventilation control response, and energy use of both ventilation and air-conditioning systems.

Three ventilation scenarios were compared: natural ventilation baseline (S0), fixed ventilation (S1), and DCV with PV-fan assistance (S2), under two operating modes: continuous air-conditioning and occupancy-based air-conditioning. The simulation results show that S2 achieves lower energy consumption and operating cost than S1, especially in the occupancy-based mode, while maintaining CO₂ closer to the control threshold than the baseline case. The proposed system therefore demonstrates the capability to balance indoor air quality improvement and energy saving more effectively than conventional ventilation strategies.

Results indicate that the DCV system effectively maintains CO₂ concentration near the setpoint (1000 ppm) while minimizing overshoot and reducing IAQ exceedance duration. Additionally, PV-assisted fan operation reduces grid energy consumption. The proposed system demonstrates a balanced trade-off between energy consumption and indoor air quality.

Keywords: Demand-controlled ventilation, PV-fan, indoor air quality, MATLAB/Simulink, carbon dioxide

บทนำ

คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality : IAQ) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพ ความสบาย และประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้อาคาร โดยเฉพาะในอาคารที่มีการใช้งานต่อเนื่อง และมีความหนาแน่นของผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Persily,2017) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ภายในอาคารมักถูกใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงตัวแทนของประสิทธิภาพการระบายอากาศ เนื่องจาก CO₂ มีความสัมพันธ์กับอัตราการระบายอากาศและจำนวนผู้ใช้งานในพื้นที่ แม้ ASHRAE จะระบุว่าค่า CO₂ ไม่ใช่ตัวชี้วัดคุณภาพอากาศทั้งหมด แต่เป็นตัวชี้วัดที่มีประโยชน์ในการประเมินความเพียงพอของการระบายอากาศ (ASHRAE, 2025)

ในทางปฏิบัติ การเพิ่มอัตราการระบายอากาศช่วยลดการสะสม CO₂ และลดโอกาสเกิดภาวะอากาศอับ แต่การระบายอากาศที่มากเกินไปจนเพิ่มความจำเป็นย่อมเพิ่มภาระพลังงานของระบบปรับอากาศและพัดลม (Chenari et al., 2025) ดังนั้นแนวคิด Demand-Controlled Ventilation (DCV) จึงได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับอัตราการระบายอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการจริงของอาคาร เช่น จำนวนผู้ใช้งานหรือระดับ CO₂ แบบเวลาจริง ซึ่งช่วยสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายใน (IAQ) และการใช้พลังงานได้ดีกว่าระบบระบายอากาศแบบคงที่ fixed ventilation (Goyal et al., 2015; Chenari et al., 2025)

นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบระบายอากาศเป็นอีกแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า โดยระบบ photovoltaic (PV) สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง (NREL, 2016) ในด้านข้อมูลภายนอก NASA POWER เป็นแหล่งข้อมูลอุตุนิยามวิทยาและรังสีดวงอาทิตย์แบบรายชั่วโมงที่สามารถนำมาใช้ในงานจำลองพลังงานอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (NASA, n.d.) ขณะที่ Air4Thai ให้ข้อมูล PM2.5 รายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดในประเทศไทย ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นอินพุตในงานจำลอง IAQ (กรมควบคุมมลพิษ, n.d.)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลม พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการควบคุม CO₂ พลังงาน

และผลกระทบต่อความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่าง IAQ และพลังงาน โดยอาศัยข้อมูลจริงภายนอกของประเทศไทยในช่วงเวลา 3 เดือน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมระบบที่ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากที่สุด

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาระบบต้นแบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก (Small office) ขนาด $4 \times 5 \times 3$ m ปริมาตร $V \approx 60 \text{ m}^3$ และพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาทำงานคือ 08:00 – 18:00 และนอกเวลาทำงานกำหนดจำนวนผู้ใช้งาน = 0 ที่มีปริมาตรอากาศคงที่ โดยใช้แบบจำลอง single-zone ใน MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของ CO_2 ภายในห้อง พลังงานของพัดลม ภาระการใช้พลังงานรวม และตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร ข้อมูลอินพุตภายนอกประกอบด้วยอุณหภูมิภายนอก รังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ และ $\text{PM}_{2.5}$ รายชั่วโมง ซึ่งใช้ข้อมูลจริงจาก NASA POWER และ Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายนรวมระยะเวลา 3 เดือนของประเทศไทย และนำมาใช้แทนการติดตั้งเซนเซอร์ภายนอกในต้นแบบจำลอง

การศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะ 3 กรณีหลัก ได้แก่ กรณีฐานแบบระบายอากาศธรรมชาติ (S0) กรณีระบายอากาศคงที่ (S1) และกรณีควบคุมอัตราการระบายอากาศตามความต้องการแบบ DCV ร่วมกับ PV-Fan (S2) ภายใต้ 2 โหมดการเดินระบบปรับอากาศคือโหมด A และโหมด B โดยยังไม่ได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนอย่างละเอียดหลายโซน การรั่วไหลอากาศเชิงซับซ้อน หรือแบบจำลองไดนามิกของอุปกรณ์จริงในระดับฮาร์ดแวร์ ทั้งนี้ จุดมุ่งหมายหลักของงานคือประเมินแนวโน้มเชิงระบบและผลของกลยุทธ์ควบคุม ไม่ใช่การสร้าง digital twin ที่ละเอียดระดับอาคารจริงทั้งหมด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ในห้องสำนักงานขนาดเล็ก
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนผู้ใช้งาน, ACH และความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง
3. เพื่อเปรียบเทียบผลของกลยุทธ์ S0, S1 และ S2 ต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร พร้อมประเมินผลกระทบด้านพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายของแต่ละกรณี
4. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน ระหว่าง IAQ (Indoor Air Quality) และพลังงาน สำหรับใช้เป็นแนวทางพัฒนาต้นแบบจริงในอนาคต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

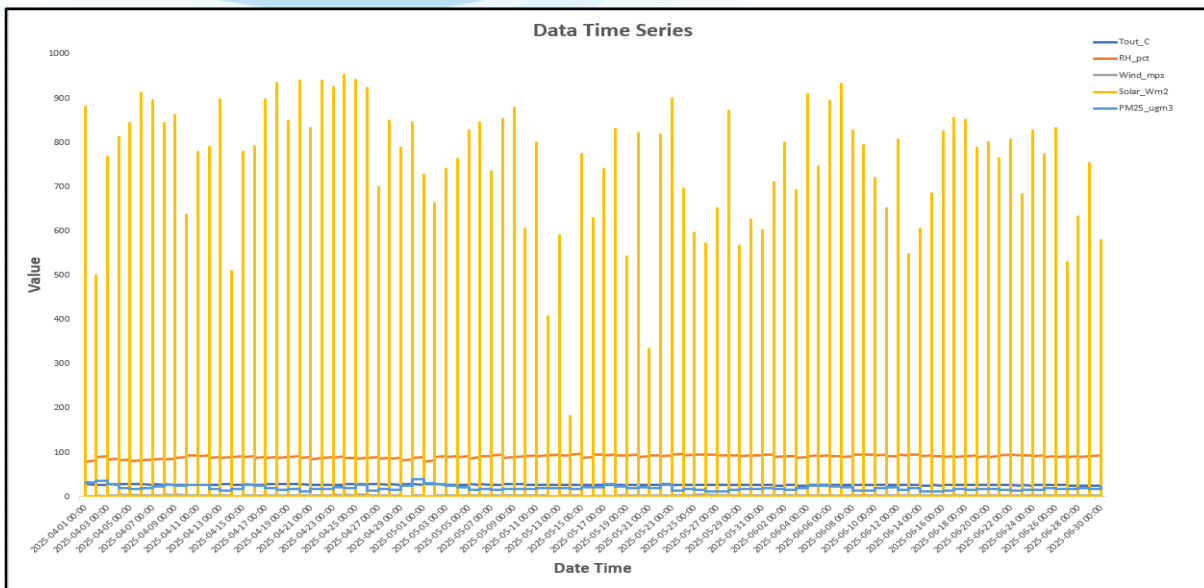
งานวิจัยนี้ช่วยให้ได้กรอบวิธีการจำลองและประเมินระบบระบายอากาศแบบ DCV ที่สามารถนำไปใช้ต่อยอดกับต้นแบบจริงได้ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทยซึ่งมีข้อมูลสิ่งแวดล้อมภายนอกที่เข้าถึงได้จากแหล่งข้อมูลสาธารณะ ผลการศึกษาสามารถใช้สนับสนุนการออกแบบระบบควบคุมการระบายอากาศที่เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งาน ลดการใช้พลังงานโดยไม่ลดทอนคุณภาพอากาศ และใช้เป็นข้อมูลประกอบการนำเสนอแนวคิดระบบ PV-Fan + DCV ต่ออาจารย์ ที่ปรึกษา หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ แบบจำลองยังสามารถเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาตัวควบคุม ขั้นสูงในอนาคต เช่น adaptive control หรือ predictive control

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงแบบจำลองโดยพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก ปริมาตรประมาณ 60 ลูกบาศก์เมตร แบบจำลองใช้ข้อมูลภายนอกรายชั่วโมง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และรังสีดวงอาทิตย์ จาก NASA POWER ร่วมกับข้อมูล PM2.5 จาก Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน โดยกำหนดจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องตามรูปแบบการใช้งานรายชั่วโมง

การศึกษานี้เปรียบเทียบ 3 กรณี ได้แก่ กรณีฐานแบบระบายอากาศธรรมชาติ (S0) กรณีระบายอากาศคงที่ (S1) และกรณีระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ (S2) ภายใต้ 2 รูปแบบการทำงานของระบบปรับอากาศ คือ ทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา และทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน

ตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินประกอบด้วย ความเข้มข้น CO₂ ภายในห้อง ชั่วโมงที่ค่า CO₂ เกินเกณฑ์ ชั่วโมงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เกินเกณฑ์ ชั่วโมงเสียงจาก PM2.5 รวมถึงพลังงานไฟฟ้า ค่าใช้จ่าย และสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์



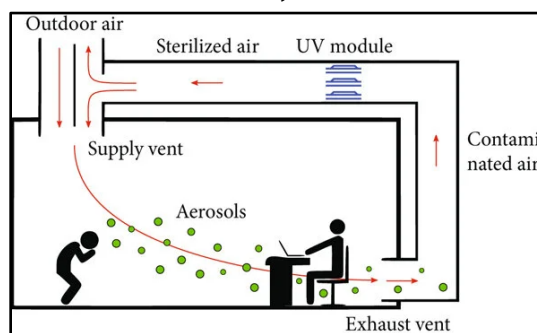
รูปที่ 1 ข้อมูล Time Series มาจาก NASA POWER (2025) และ Air4Thai (2025)

รูปที่ 1 แสดงข้อมูลภายนอกรายชั่วโมงที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจาก NASA POWER และข้อมูล PM2.5 จาก Air4Thai โดยข้อมูลดังกล่าวใช้แทนการวัดจากเซนเซอร์ภายนอกอาคาร เพื่อให้แบบจำลองสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงของประเทศไทยในช่วงเวลาศึกษา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวคิด Indoor Air Quality (IAQ) - CO₂ Balance

Indoor Air Quality (IAQ) คือคุณภาพของอากาศภายในอาคาร ซึ่งส่งผลต่อ สุขภาพ (Health) , ความสบาย (Comfort) , ประสิทธิภาพการทำงาน (Productivity)



รูปที่ 2 ภาพประกอบอธิบายการระบายภายในอาคารเพื่อปรับปรุง IAQ

รูปที่ 2 เป็นภาพประกอบแนวคิดการระบายอากาศภายในอาคาร เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการนำอากาศใหม่เข้าสู่ห้องกับการลดการสะสมของมลสารภายในอาคาร ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารในงานวิจัยนี้

โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้เป็นตัวชี้วัด IAQ คือ ความเข้มข้นของ CO₂ (Carbon Dioxide Concentration) เพราะ CO₂ เป็นตัวแทน (Proxy) ของ “จำนวนคน + การระบายอากาศ”

หลักการสมดุลมวลของ CO₂ ในห้อง

แบบจำลอง CO₂ ภายในห้องอาศัยหลักสมดุลมวลของสารใน single-zone enclosure ซึ่ง NIST อธิบายว่า single-zone mass balance ของ CO₂ สามารถเขียนได้ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในห้อง ปริมาตรห้อง อัตราการระบายอากาศ ความเข้มข้นภายนอก และอัตราการเกิด CO₂ ภายในพื้นที่

สมการทั่วไปคือ

$$V \frac{d(C(t))}{dt} = G(t) + Q(t)(C_{out}(t) - C(t))$$

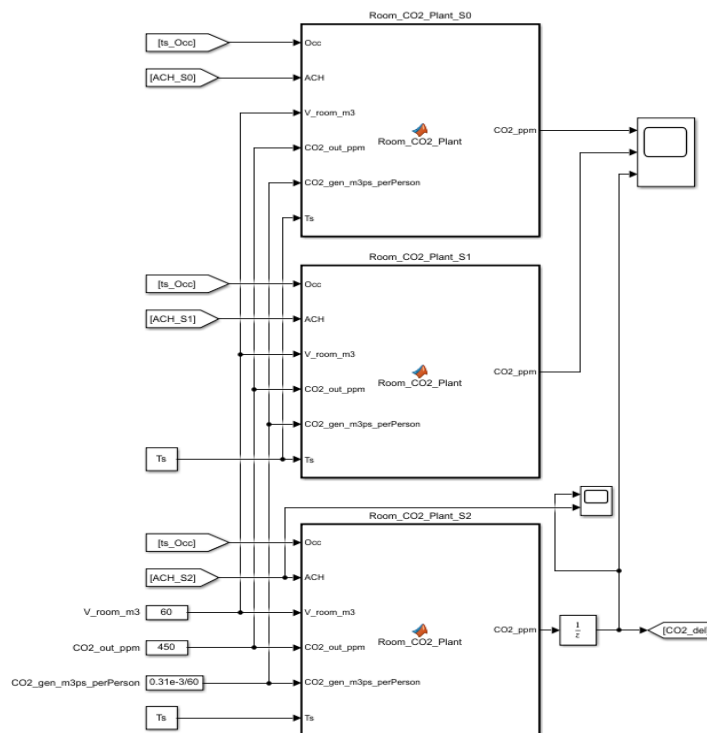
โดยที่

V = ปริมาตรห้อง (m³) | C(t) = ความเข้มข้น CO₂ ภายในห้อง (ppm)

C_{out}(t) = ความเข้มข้น CO₂ ภายนอกห้อง (ppm) | G(t) = อัตราการเกิด CO₂ จากผู้ใช้งานภายในห้อง

Q(t) = อัตราการไหลของอากาศใหม่เข้าสู่ห้อง (m³/s)

สำหรับการจำลองแบบรายชั่วโมงใน Simulink งานวิจัยนี้ใช้สมการดังกล่าวเป็นแกนหลักของ Room_CO₂_Plant block ในแต่ละ scenario

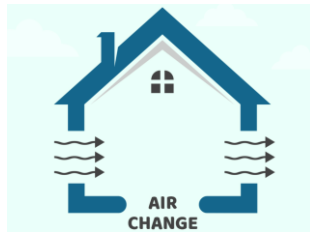


รูปที่ 3 Prototype Room_CO₂_Plant block แต่ละ Scenario ภายใน Simulink

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองย่อยสำหรับคำนวณความเข้มข้น CO₂ ภายในห้องในแต่ละกรณีศึกษา โดยใช้หลักสมมูลมวลแบบโซนเดียว เพื่อประเมินผลของกลยุทธ์การระบายอากาศที่แตกต่างกันต่อความเข้มข้น CO₂

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ และการแลกเปลี่ยนอากาศต่อเวลาชั่วโมง

Airflow (Q) = ปริมาณลมที่ไหลเข้า/ออกห้อง หน่วย (m³/s หรือ m³/h)



Air Change per Hour (ACH) = จำนวนครั้งที่ “อากาศในห้องถูกเปลี่ยนทั้งหมด” ต่อ 1 ชั่วโมง (h⁻¹)

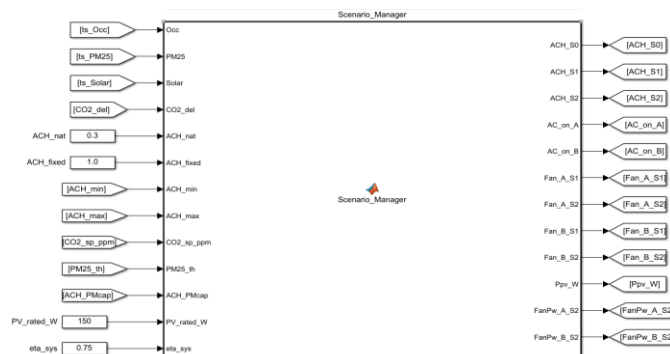
รูปที่ 4 หลักการทำงานของ ACH

รูปที่ 4 แสดงแนวคิดของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง ซึ่งใช้เชื่อมโยงระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับปริมาตรห้อง เพื่อใช้กำหนดสมรรถนะการระบายอากาศในแบบจำลอง

อัตราการระบายอากาศแบบ ACH นิยามได้จาก

$$ACH = \frac{Q}{V}$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลของอากาศใหม่เข้าสู่ห้องต่อชั่วโมง (m³/h) และ V คือปริมาตรห้อง (m³) เป็นสมการที่ใช้เชื่อมระหว่างสมรรถนะของพัดลมจริงกับแบบจำลอง CO₂ ในห้อง หากทราบ air flow ของพัดลมและขนาดห้อง ก็สามารถประมาณค่า ACH ได้โดยตรงในเชิงวิศวกรรมเบื้องต้น ก่อนนำไปปรับแก้ด้วย Logic การ



ควบคุมจริงใน Scenario_Manager

รูปที่ 5 Prototype Scenario_Manager ภายใน Simulink

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างส่วนจัดการกรณีศึกษาและตรรกะการควบคุมของแบบจำลอง ซึ่งทำหน้าที่กำหนดค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ การเปิดทำงานของพัดลม และเงื่อนไขการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละกรณีศึกษา

หลักการของ Demand-Controlled Ventilation

แนวคิด DCV คือการทำให้อัตราการระบายอากาศไม่คงที่ แต่เปลี่ยนแปลงตามภาระการใช้งานจริง เช่น จำนวนผู้ใช้งาน ระดับ CO₂ หรือข้อจำกัดด้าน PM2.5 หากภายในห้องมีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรือ CO₂ มีแนวโน้มสูง ค่า ACH จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อขับอากาศเสียออกจากห้อง ในทางกลับกัน เมื่อภาระลดลง ค่า ACH ควรลดลงเพื่อลดการใช้พลังงาน หลักการนี้สอดคล้องกับบทบาทของ CO₂ ในฐานะตัวชี้วัดด้านความเพียงพอของการระบายอากาศที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานประเมินระบบระบายอากาศ

ในโมเดลที่สร้างขึ้น ค่า ACH_S2 ไม่ได้ขึ้นกับจำนวนผู้ใช้งาน เพียงตัวเดียว แต่ขึ้นกับตรรกะควบคุมร่วมของจำนวนผู้ใช้งาน , CO₂ ภายในห้อง และ PM2.5 ภายนอก จึงอธิบายได้ว่าบางช่วงจำนวนผู้ใช้งาน ไม่เปลี่ยนแปลงแต่ ACH ยังเปลี่ยน เพราะตัวควบคุม พยายามตอบสนองต่อค่า CO₂ ที่เปลี่ยนแปลงอยู่

หลักการผลิตไฟฟ้าจาก PV

NASA POWER (2024) ให้ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์แบบรายชั่วโมงที่เหมาะสมกับงานด้านพลังงานอาคาร ส่วนเทคโนโลยี PV เปลี่ยนพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่ง NREL อธิบายหลักการการทำงานของระบบ photovoltaic ว่าเป็นการแปลงพลังงานจากโฟตอนของแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าในเซลล์ PV

ในการจำลองนี้ กำลังไฟจาก PV ถูกประมาณในรูป

$$P_{pv}(t) = \eta_{sys} \cdot P_{rated} \cdot \frac{G(t)}{G_{ref}}$$

โดยที่

P_{rated} = กำลังติดตั้งของแผง | $G(t)$ = รังสีดวงอาทิตย์ ณ เวลา t

η_{sys} = ประสิทธิภาพรวมของระบบ | G_{ref} = ค่ารังสีอ้างอิง

สมการนี้ถูกใช้ใน Scenario_Manager เพื่อสร้างสัญญาณ P_{pv} แล้วส่งไปยัง Energy_6case

การคำนวณพลังงานและค่าใช้จ่าย

พลังงานไฟฟ้าสุทธิของระบบระบายอากาศและระบบปรับอากาศสามารถเขียนอย่างง่ายได้เป็น

$$P_{net}(t) = P_{AC}(t) + P_{fan}(t) - P_{PV}(t)$$

และในแบบจำลองของคุณใช้การหวนวงค่าไม่ให้ติดลบในรูป

$$P_{grid}(t) = \max(0, P_{fan}(t) - P_{PV}(t))$$

ส่วนพลังงานสะสมคำนวณจากผลรวมของกำลังไฟในแต่ละช่วงเวลา

$$E = \sum P(t)\Delta t$$

และค่าใช้จ่ายคำนวณจาก

$$Cost = E \times Tariff$$

ตัวชี้วัดด้าน IAQ (Indoor Air Quality)

ตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ในงานนี้ประกอบด้วย

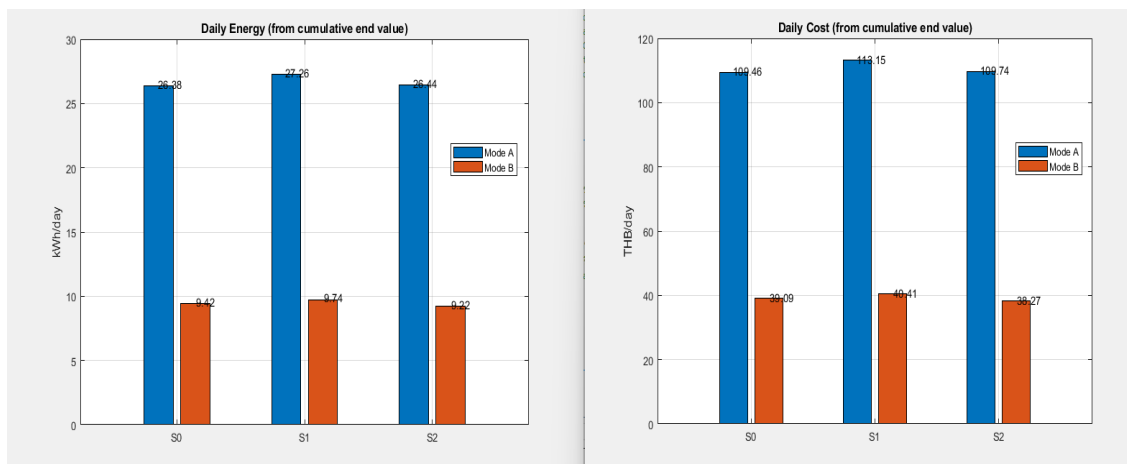
- จำนวนชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ / - จำนวนชั่วโมงเสี่ยงด้าน $PM2.5$ / - จำนวนชั่วโมงที่มีผู้ใช้งาน
- จำนวนชั่วโมงที่ RH เกินเกณฑ์ / - กราฟ *cumulative frequency* และ *exceedance duration* ของ

CO_2

ตัวชี้วัดเหล่านี้ช่วยให้การประเมิน IAQ ไม่ได้ดูเพียงค่าเฉลี่ย แต่เห็นพฤติกรรมการกระจายตัวและความเสี่ยงเชิงเวลาได้ชัดเจนขึ้น

ผลการวิจัย

1. ผลด้านพลังงานและค่าใช้จ่าย



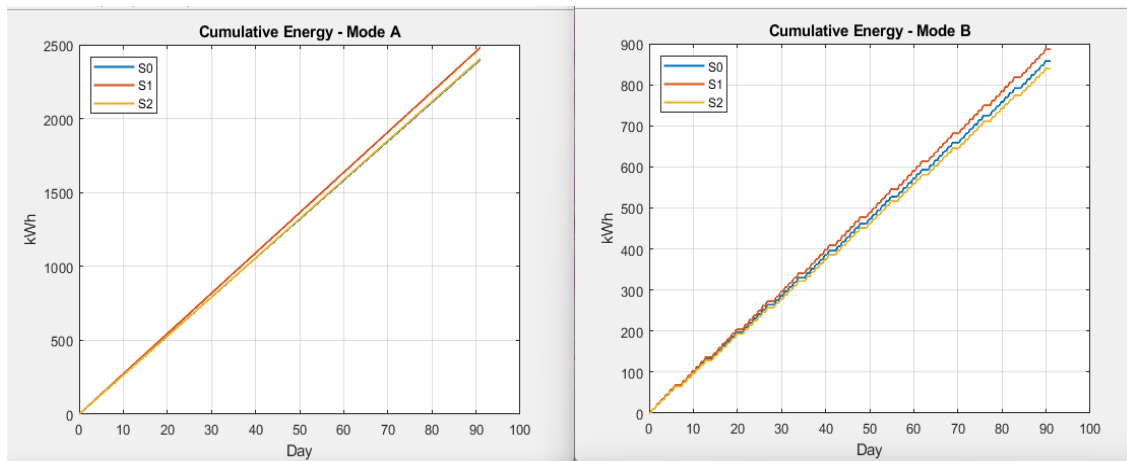
- Daily Energy (avg) | Daily Cost (avg)

รูปที่ 6 Daily Energy (avg) และ Daily Cost (avg)

รูปที่ 6 แสดงค่าพลังงานเฉลี่ยรายวันและค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายวันของทั้ง 3 กรณีศึกษา ภายใต้โหมดการทำงาน A และ B โดยพบว่าในโหมด A กรณี S1 ใช้พลังงานสูงที่สุด ขณะที่ S2 มีค่าต่ำกว่า S1 อย่างต่อเนื่อง

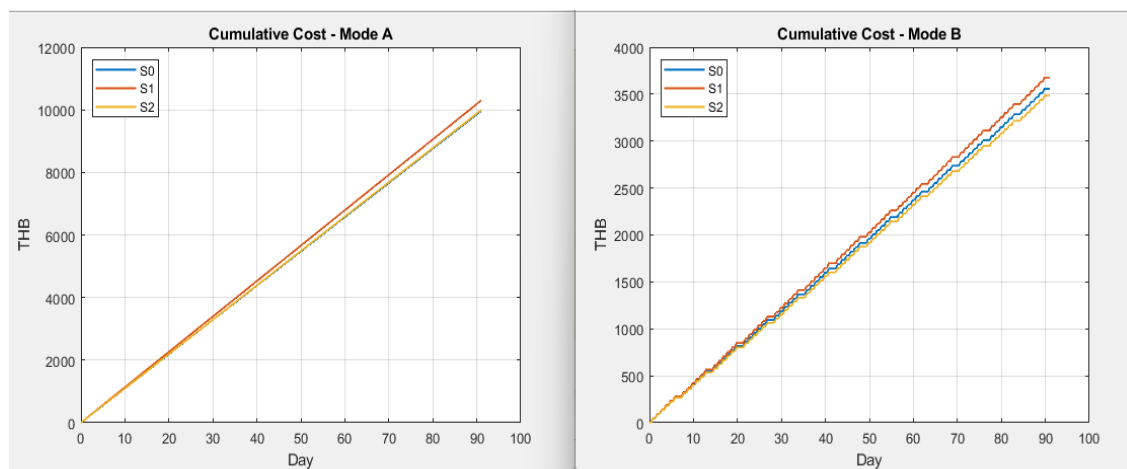
ส่วนในโหมด B กรณี S2 ให้ค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด สะท้อนว่าการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการช่วยลดการใช้พลังงานได้ชัดเจนเมื่อระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน

- Cumulative Energy – Mode A/B | Cumulative Cost – Mode A/B



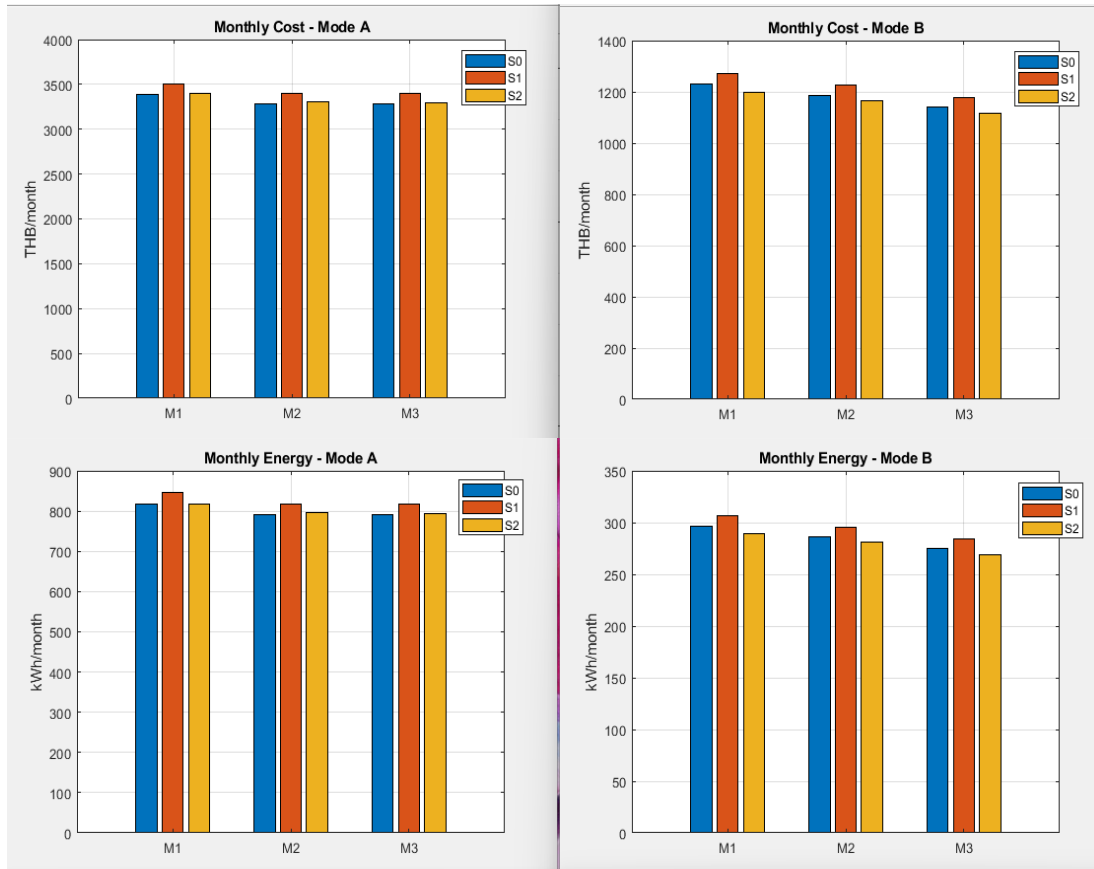
รูปที่ 7 Cumulative Energy – Mode A/B

รูปที่ 7 แสดงพลังงานสะสมตลอดช่วงเวลาจำลองของแต่ละกรณีศึกษา โดยเส้นที่มีความชันมากกว่าสะท้อนการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า S2 มีแนวโน้มสะสมต่ำกว่า S1 โดยเฉพาะในโหมด B



รูปที่ 8 Cumulative Energy – Mode A/B

รูปที่ 8 แสดงค่าใช้จ่ายสะสมตลอดช่วงเวลาจำลองของแต่ละกรณีศึกษา โดยเส้นที่มีความชันมากกว่าสะท้อนค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเร็วกว่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า S2 มีแนวโน้มสะสมต่ำกว่า S1 โดยเฉพาะในโหมด B

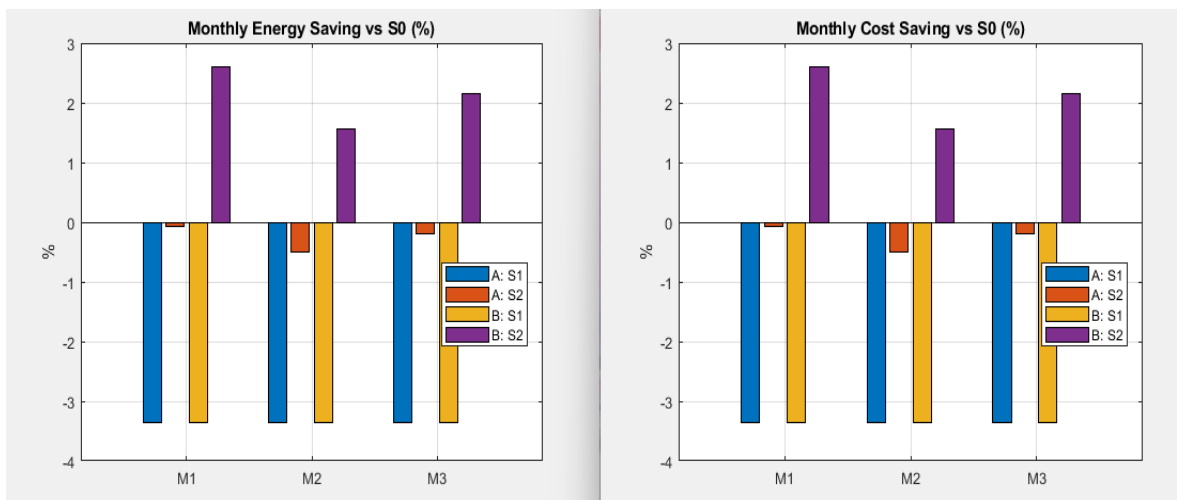


- Monthly Energy – Mode A/B | Monthly Cost – Mode A/B

รูปที่ 9 Monthly Energy – Mode A/B | Monthly Cost – Mode A/B

รูปที่ 9 แสดงพลังงานและค่าใช้จ่ายรายเดือนของแต่ละกรณีศึกษา เพื่อเปรียบเทียบผลในแต่ละเดือนพบว่า S2 ให้ค่าต่ำกว่า S1 อย่างสม่ำเสมอ และให้ผลชัดเจนมากขึ้นในโหมด B

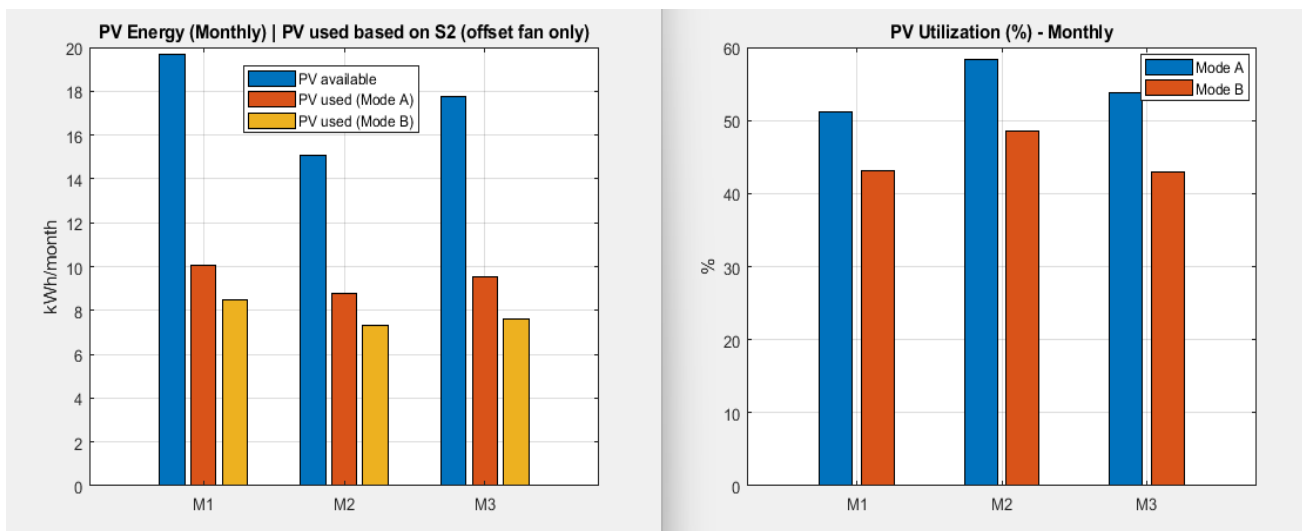
- Monthly Energy Saving vs S0 | Monthly Cost Saving vs S0



รูปที่ 10 Monthly Energy Saving vs S0 | Monthly Cost Saving vs S0

รูปที่ 10 แสดงผลการประหยัดพลังงานและการประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับกรณีฐาน S0 โดยค่าบวกหมายถึงสามารถประหยัดได้เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ส่วนค่าลบหมายถึงมีการใช้พลังงานหรือค่าใช้จ่ายสูงกว่ากรณีฐาน ผลการจำลองชี้ว่า S2 ภายใต้โหมด B ให้ผลการประหยัดเป็นบวกต่อเนื่องทั้ง 3 เดือน

- PV Energy (Monthly) | PV Utilization (%) – Monthly



รูปที่ 11 PV Energy (Monthly) | PV Utilization (%) – Monthly

รูปที่ 11 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายเดือนและสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากพลังงานดังกล่าว โดยพบว่าระบบสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาศึกษา และช่วยลดภาระไฟฟ้าจากโครงข่ายได้บางส่วน

ผลการจำลองด้านพลังงานแสดงให้เห็นว่า ในโหมด A ซึ่งระบบปรับอากาศทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา กรณี S1 มีการใช้พลังงานเฉลี่ยรายวันสูงสุด ขณะที่ S0 มีค่าต่ำกว่า และ S2 ให้ค่าการใช้พลังงานต่ำกว่า S1 อย่างสม่ำเสมอ สะท้อนว่าการใช้ DCV ร่วมกับ PV-fan สามารถลดภาระพลังงานของระบบได้ แม้ผลต่างเชิงพลังงานจะไม่สูงมากในเชิงเปอร์เซ็นต์ แต่มีแนวโน้มคงที่ตลอดช่วงการจำลอง

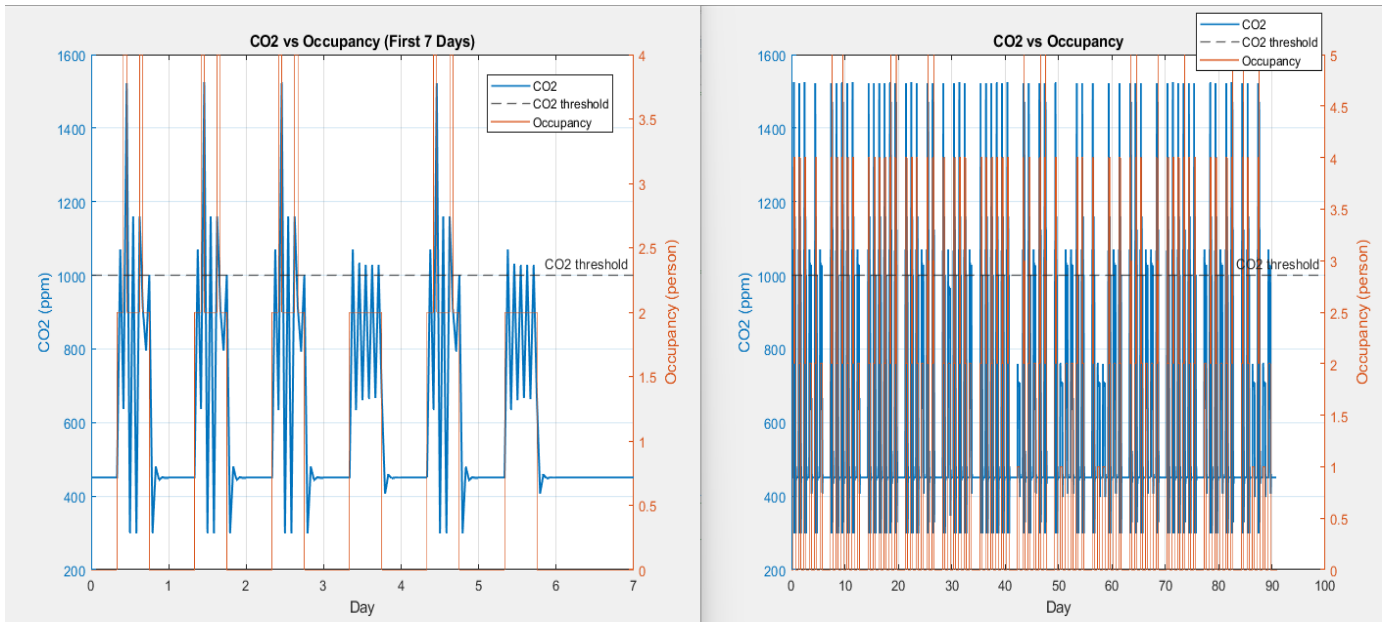
ในโหมด B ซึ่งระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน ความแตกต่างระหว่างกรณีศึกษาชัดเจนขึ้น โดย S2 ให้ค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำสุดเมื่อเทียบกับ S0 และ S1 ในทุกเดือนที่ศึกษา แสดงว่าการควบคุมตาม จำนวนผู้ใช้งาน มีส่วนสำคัญต่อการลดพลังงานมากกว่าการใช้การระบายอากาศคงที่ เพียงอย่างเดียว และเมื่อรวมกับพลังงานจาก PV ยิ่งทำให้ผลด้านต้นทุนดีขึ้น

ผลการประเมินรายเดือนยังชี้ว่า กรณี S2 ภายใต้โหมด B ให้ผลการประหยัดพลังงานและการประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นค่าบวกเมื่อเทียบกับกรณีฐาน S0 ขณะที่ S1 และบางกรณีในโหมด A มีค่าการประหยัดติดลบ ซึ่งหมายถึงใช้พลังงานมากกว่ากรณีฐาน ทั้งนี้ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการว่า การระบายอากาศที่ไม่ปรับตามภาระจริงอาจเพิ่มภาระระบบโดยไม่จำเป็น ในขณะที่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ช่วยลดพลังงานพัดลมได้บางส่วน โดยจากกราฟ PV utilization พบว่ามีการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ในระดับหนึ่งต่อเนื่องตลอด 3 เดือน

2. ผลด้าน IAQ และพฤติกรรม CO₂

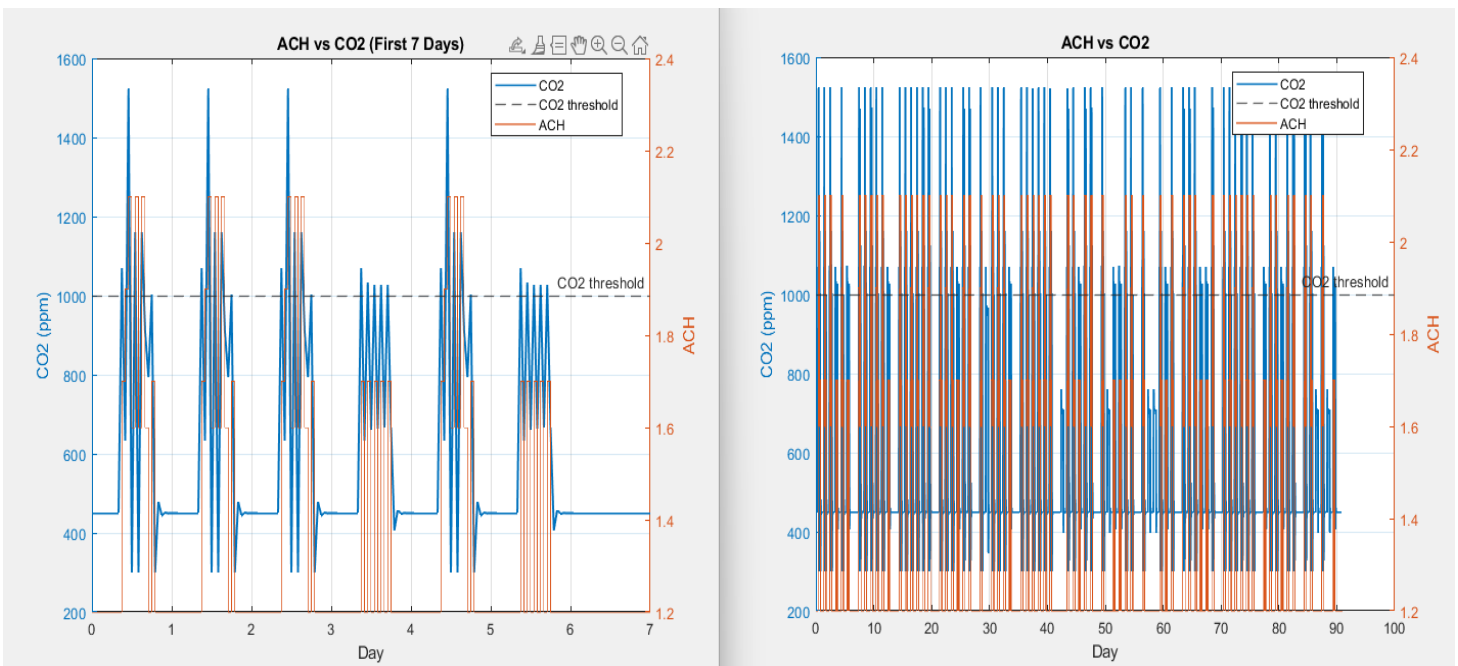
ผลด้าน IAQ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น CO₂ ภายในห้องมีความสัมพันธ์ชัดเจนกับช่วงเวลาที่มียูใช้งาน โดยจากกราฟ CO₂ vs Occupancy ทั้งในช่วง 7 วันแรกและตลอด 91 วัน พบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ค่า CO₂ จะมีแนวโน้มเพิ่มตามอย่างเด่นชัด เนื่องจากอัตราการเกิด CO₂ ภายในห้องสูงขึ้นจากการหายใจของผู้ใช้งาน ขณะที่ในช่วงไม่มีผู้ใช้งาน ค่า CO₂ จะค่อย ๆ ลดลงกลับเข้าใกล้ค่าภายนอกหรือค่าพื้นฐานของระบบ

- CO₂ vs Occupancy (7 Days , 91 Days)



รูปที่ 12 CO₂ vs Occupancy

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CO₂ กับจำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง ทั้งในช่วง 7 วันแรก และตลอด 91 วัน โดยพบว่าค่า CO₂ เพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานอย่างชัดเจน และค่อย ๆ ลดลงเมื่อไม่มีผู้ใช้งาน



- ACH vs CO₂ (7 Days , 91 Days)

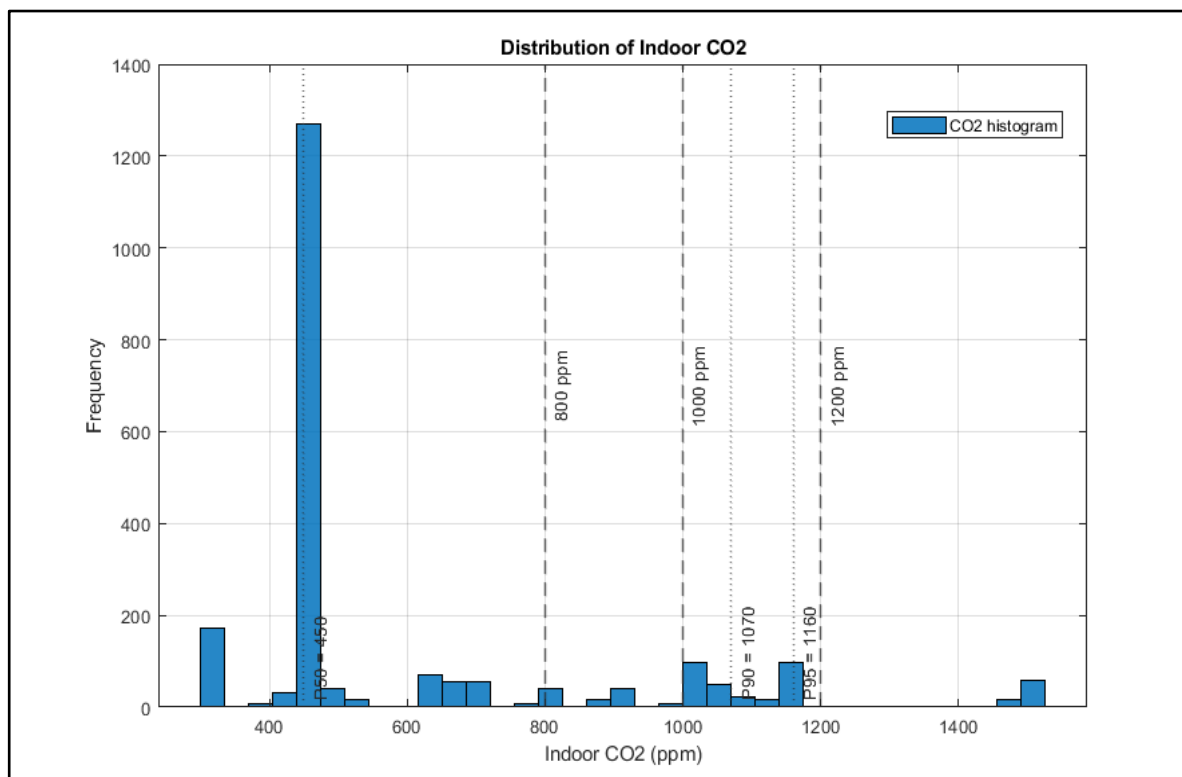
รูปที่ 13 ACH vs CO₂

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงกับความเข้มข้น CO₂ ในกรณี S2 โดยพบว่าเมื่อค่า CO₂ สูงเข้าใกล้เกณฑ์ ระบบจะเพิ่มค่า ACH เพื่อเร่งการระบายอากาศ และจะลดลงเมื่อค่า CO₂ กลับเข้าสู่ระดับที่ยอมรับได้

สำหรับกรณี S2 ซึ่งใช้ DCV พบว่า ACH ไม่ได้เปลี่ยนตามจำนวนผู้ใช้งาน เพียงอย่างเดียว แต่เปลี่ยนตามจำนวนผู้ใช้งานร่วมกับระดับ CO₂ และเงื่อนไขของ PM2.5 ภายนอก ทำให้บางช่วงแม้จำนวนผู้ใช้งานไม่เพิ่ม แต่ ACH ยังเพิ่มขึ้นได้ เพื่อเร่งระบายอากาศและควบคุม CO₂ ไม่ให้เกินค่าที่กำหนด พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนการทำงานของตัวควบคุม ที่ตอบสนองต่อสภาพจริงของระบบ ไม่ใช่เพียงการติดตามคนแบบตรงตัว

จากกราฟ ACH vs CO₂ พบว่า ACH_S2 มีพฤติกรรมปรับขึ้นลงสอดคล้องกับความเข้มข้น CO₂ ในระดับหนึ่ง กล่าวคือ เมื่อ CO₂ สูงเข้าใกล้หรือเกินเกณฑ์ ค่า ACH จะถูกดันขึ้นเพื่อระบายอากาศมากขึ้น และเมื่อ CO₂ ลดลง ค่า ACH จะค่อย ๆ กลับลงมาใกล้ค่าต่ำสุด ระบบจึงมีลักษณะเป็น *control tracking* แบบ *rule-based* ไม่ใช่ *tracking* แบบ *ideal reference smooth* ตลอดเวลา แต่ยังสะท้อนการควบคุมเชิงเหตุผลตามวัตถุประสงค์ของ DCV ได้ชัดเจน

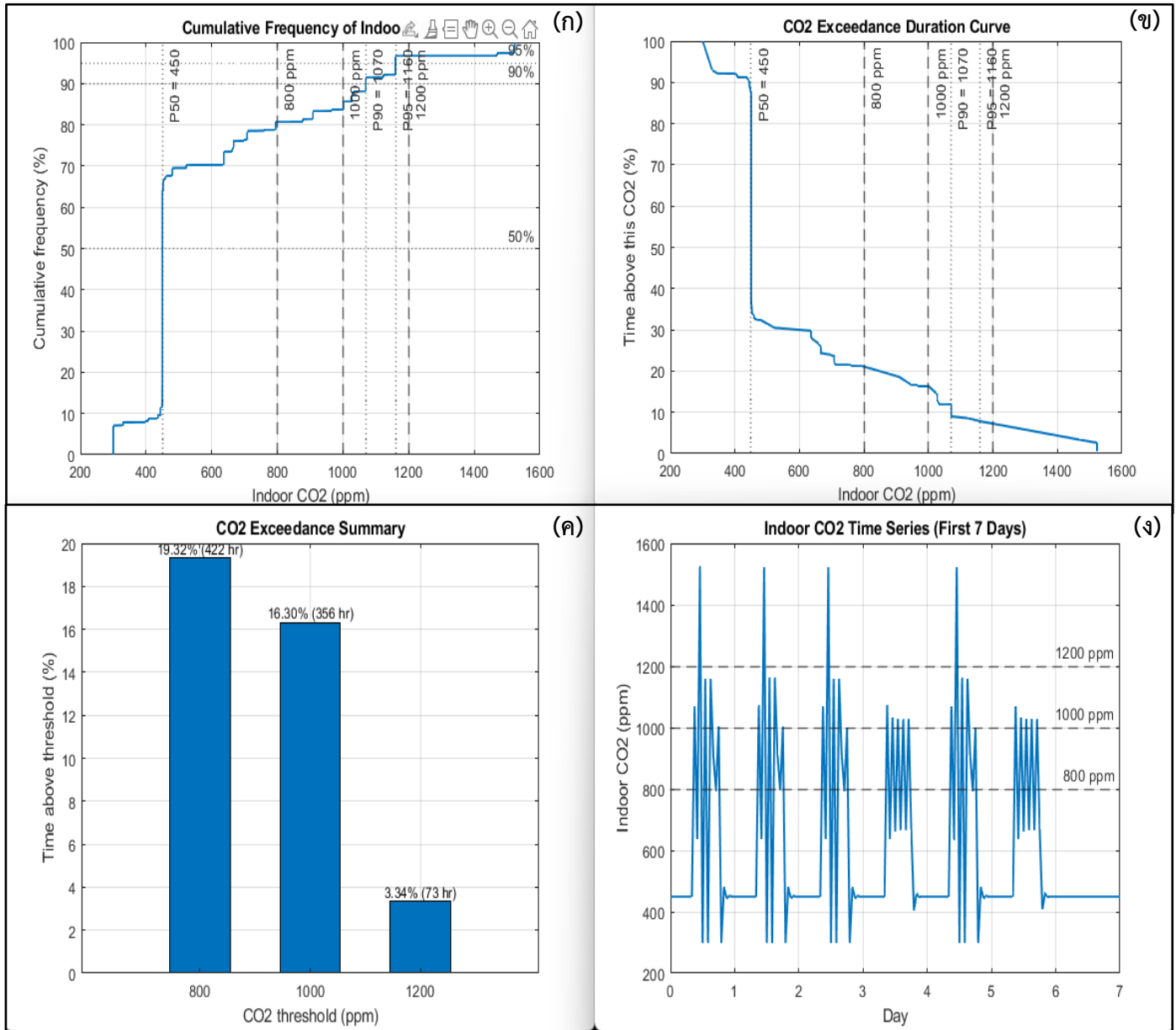
- IAQ Summary (Figure 1-5)



รูปที่ 14 IAQ 1 : CO₂ Histogram

รูปที่ 14 แสดงการกระจายความถี่ของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง โดยข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่าต่ำถึงปานกลาง แต่ยังมีบางช่วงเวลาที่มีค่า CO_2 สูงเกินเกณฑ์ ซึ่งสะท้อนว่ายังมีความเสี่ยงในบางสถานการณ์ที่ภาระผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของ CO_2 จาก *IAQ summary* พบว่า *distribution* ของ CO_2 กระจุกตัวมากในช่วงค่าต่ำใกล้พื้นฐานของระบบ แต่ยังมีส่วนทางด้านขวาที่ลากไปถึงช่วงความเข้มข้นสูงในบางเหตุการณ์ แสดงว่าระบบส่วนใหญ่อยู่ในสภาพปลอดภัยหรือยอมรับได้ แต่ยังมีบางช่วงที่เกิด *peak* จากภาระผู้ใช้งานหรือการตอบสนองของการระบายอากาศ ที่ไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน



รูปที่ 15 (ก) IAQ Summary 2 – Cumulative Frequency

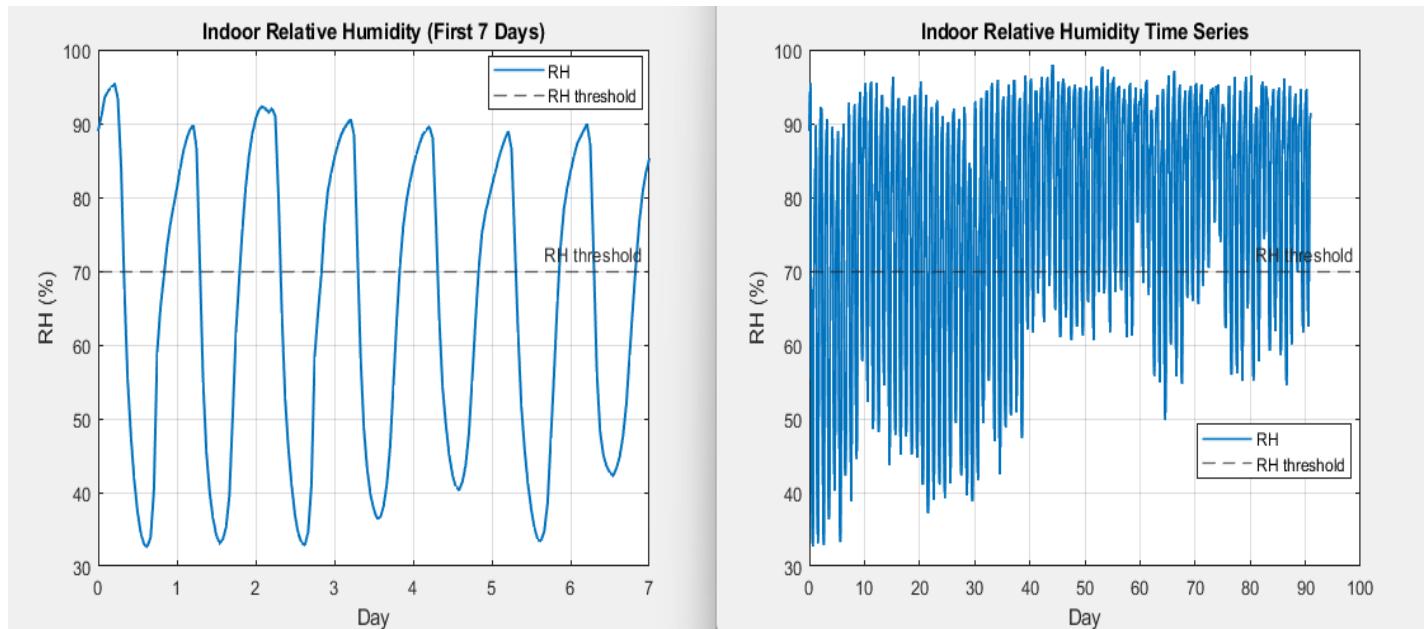
(ข) IAQ Summary 3 – Exceedance Duration Curve

(ค) IAQ Summary 4 – CO2 Exceedance Summary

(ง) IAQ Summary 5 – First 7 Days CO2

รูปที่ 15 แสดงผลสรุปเชิงสถิติของ CO_2 ประกอบด้วยกราฟความถี่สะสม กราฟระยะเวลาที่ค่าเกินเกณฑ์ สรุปสัดส่วนช่วงเวลาที่ค่า CO_2 เกินเกณฑ์ และกราฟค่า CO_2 ในช่วง 7 วันแรก ซึ่งช่วยให้เห็นทั้งภาพรวมของการกระจายตัวและความเสี่ยงเชิงเวลา

● RH Time Series (7 Days , 91 Days)



รูปที่ 16 RH Time Series

รูปที่ 16 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทั้งในช่วง 7 วันแรกและตลอด 91 วัน โดยพบว่าหลายช่วงเวลามีค่าความชื้นสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ สะท้อนว่าความชื้นยังเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบระบบ

ในด้านความชื้นสัมพัทธ์ กราฟ RH time series แสดงให้เห็นว่าระบบมีค่าความชื้นสูงกว่าระดับเกณฑ์ที่ 70% ในหลายช่วงเวลา โดยเฉพาะบางเดือนที่มีแนวโน้มความชื้นสัมพัทธ์สูงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า RH high percent และ RH high hours ที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ผลดังกล่าวชี้ว่าประเด็นความชื้นเป็นอีกมิติหนึ่งของ IAQ ที่ยังต้องได้รับการพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบหรือปรับกลยุทธ์ควบคุมในอนาคต

3. ผลด้าน Trade-off ระหว่าง IAQ และ Energy

Trade-off คือความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่าง IAQ (Indoor Air Quality) วัดจาก

- CO₂ risk hours
- PM risk hours

Energy / Cost -> THB/month

เป้าหมายคือ ลด risk โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด

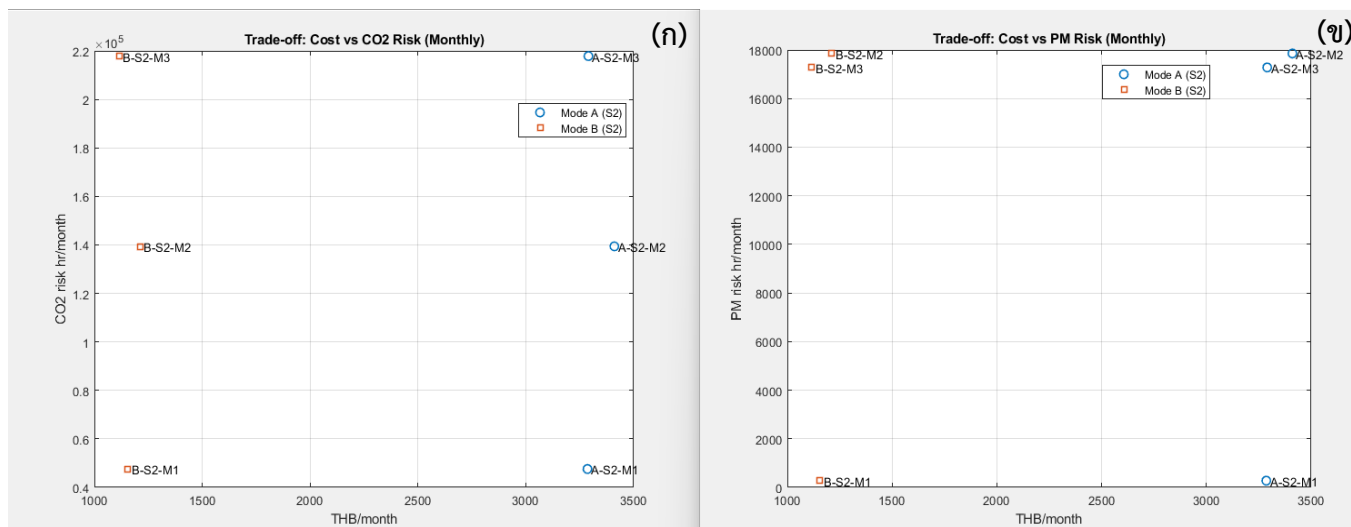
ผลความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน ระหว่างต้นทุนกับความเสียด้าน IAQ เป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้ โดยจากกราฟ Cost vs CO₂ Risk และ Cost vs PM Risk พบว่าแต่ละกรณีศึกษาให้ตำแหน่งบนกราฟแตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ กรณีที่ลดพลังงานมากที่สุดไม่จำเป็นต้องให้ IAQ ที่ดีที่สุดเสมอไป ขณะที่กรณีที่ควบคุม IAQ ได้ดีมากอาจต้องแลกกับต้นทุนที่สูงขึ้น

จากกราฟ

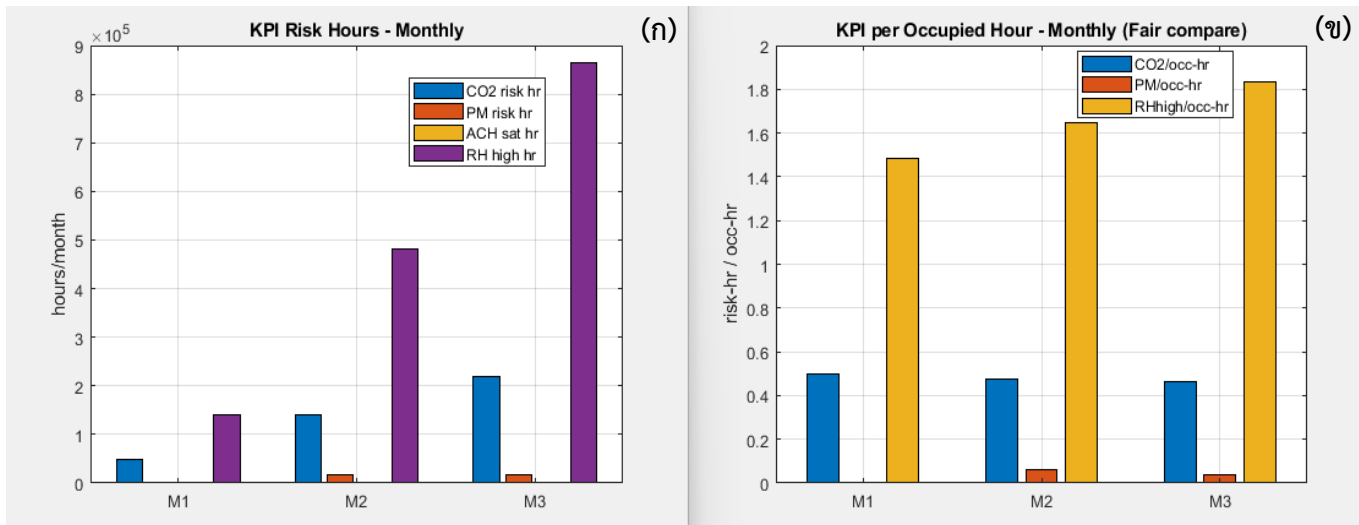
- Mode A เปิดแอร์ตลอดและ PV Fan แบบ Fix ค่า Cost สูง แต่ CO₂ Risk ต่ำ
- Mode B เปิดแอร์และ PV Fan DCV เฉพาะตอนมีคน ค่า Cost ต่ำ แต่ CO₂ Risk สูงขึ้น

● Trade-off Cost vs CO₂ Risk | Trade-off Cost vs PM Risk



รูปที่ 17 (ก) Trade-off Cost vs CO₂ Risk | (ข) Trade-off Cost vs PM Risk

รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายกับชั่วโมงเสี่ยงด้าน CO₂ และ PM_{2.5} เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่างการใช้พลังงานกับคุณภาพอากาศภายในอาคาร ตำแหน่งที่มีค่าใช้จ่ายต่ำและความเสี่ยงต่ำถือว่าเหมาะสมกว่าในเชิงสมรรถนะของระบบ



- KPI Risk Hour – Monthly | KPI per Occupied Hour – Monthly

รูปที่ 18 (ก) KPI Risk Hour – Monthly | (ข) KPI per Occupied Hour – Monthly

รูปที่ 18 แสดงจำนวนชั่วโมงเสี่ยงรายเดือนและจำนวนชั่วโมงเสี่ยงต่อชั่วโมงการใช้งานจริง ซึ่งช่วยให้เปรียบเทียบความเสี่ยงของแต่ละกรณีศึกษาได้อย่างเป็นธรรมมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม กรณี S2 โดยเฉพาะเมื่อทำงานร่วมกับ logic occupancy-based mode มีแนวโน้มวางตัวอยู่ในตำแหน่งที่สมดุลกว่าระหว่างพลังงาน และ IAQ (Indoor Air Quality) กล่าวคือ ลดค่าใช้จ่ายได้ โดยไม่ทำให้ความเสี่ยงด้าน CO₂ และ PM สูงเกินไปเมื่อเทียบกับกรณีการระบายอากาศคงที่ ผลลัพธ์นี้สะท้อนว่าการใช้ DCV ร่วมกับ PV-fan มีศักยภาพในการเป็นกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับอาคารต้นแบบที่ต้องการทั้งประหยัดพลังงานและรักษาคุณภาพอากาศภายใน

เกณฑ์การประเมินผลและการพิจารณาผ่านเกณฑ์

เพื่อให้การแปลผลการจำลองมีความชัดเจน งานวิจัยนี้กำหนดเกณฑ์การประเมินดังนี้

1. ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องไม่ควรเกิน 1,000 ส่วนในล้านส่วน โดยหากค่า CO₂ สูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าวจะนับเป็นช่วงเวลาไม่ผ่านเกณฑ์ด้านคุณภาพอากาศ
2. ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไม่ควรเกินร้อยละ 70 โดยหากค่าสูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าวจะนับเป็นช่วงเวลาไม่ผ่านเกณฑ์ด้านความสบายและคุณภาพอากาศ
3. ค่า PM_{2.5} ภายนอกอาคารที่สูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขจำกัดการระบายอากาศของระบบ เพื่อหลีกเลี่ยงการนำอากาศภายนอกที่มีมลพิษสูงเข้าสู่ภายในอาคาร

4. ในด้านพลังงาน หากกรณีศึกษามีค่าพลังงานไฟฟ้ารวมและค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากรณีฐานคือ (S0) กรณีระบายอากาศธรรมชาติ และ (S1) กรณีระบายอากาศคงที่ จะถือว่ามีผลด้านการประหยัดพลังงานและการประหยัดค่าใช้จ่ายที่ดีกว่า
5. ในด้านภาพรวม ระบบจะถือว่ามีสมรรถนะดีกว่าเมื่อสามารถลดจำนวนชั่วโมงที่ค่า CO₂ หรือความชื้นสัมพัทธ์เกินเกณฑ์ได้ โดยไม่เพิ่มการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินผลและการพิจารณาผ่านเกณฑ์ของระบบระบายอากาศ

ตัวแปรการประเมิน	เกณฑ์ที่กำหนด	เงื่อนไขการผ่านเกณฑ์
CO ₂ ภายในห้อง	ไม่เกิน 1,000 ppm	ค่า CO ₂ ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	ไม่เกิน 70%	ค่า RH ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
PM2.5 ภายนอกอาคาร	ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด	ไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อคุณภาพอากาศภายใน
พลังงานไฟฟ้ารวม	ต่ำกว่ากรณีฐาน (S0) , (S1)	แสดงถึงการประหยัดพลังงาน
ค่าใช้จ่ายรวม	ต่ำกว่ากรณีฐาน (S0) , (S1)	แสดงถึงการประหยัดค่าใช้จ่าย

อภิปรายผลและสรุปผล

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานโดยไม่ทำให้คุณภาพอากาศภายในอาคารลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีระบายอากาศคงที่ กรณี S2 ให้ผลที่สมดุลงกว่า ทั้งในด้านความเข้มข้น CO₂ ค่าใช้จ่าย และพลังงานไฟฟ้ารวม โดยเฉพาะภายใต้โหมดที่ระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน

ประเด็นสำคัญที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การระบายอากาศที่ปรับตามความต้องการจริงของห้องมีผลต่อการลดพลังงานมากกว่าการกำหนดอัตราการระบายอากาศแบบคงที่ เนื่องจากระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานและระดับ CO₂ ได้โดยตรง ขณะเดียวกันการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังช่วยลดเขยการใช้พลังงานของพัดลม ทำให้ผลรวมด้านพลังงานดีขึ้น

ในเชิงองค์ความรู้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การประเมินระบบระบายอากาศไม่ควรพิจารณาเฉพาะความเข้มข้น CO₂ หรือพลังงานเพียงด้านใดด้านหนึ่ง แต่ควรพิจารณาร่วมกันในลักษณะของความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคาร ความชื้นสัมพัทธ์ ภาวะมลพิษภายนอก และพลังงานที่ใช้จริง ผลดังกล่าวช่วยขยายมุมมองจากการประเมินแบบตัวแปรเดียว ไปสู่การประเมินเชิงระบบที่ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากขึ้น

ในเชิงประยุกต์ใช้ งานวิจัยนี้ให้กรอบแนวทางสำหรับการออกแบบและประเมินระบบระบายอากาศสำหรับอาคารขนาดเล็กในบริบทประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจริงจากแหล่งข้อมูลสาธารณะ ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดด้านการติดตั้งเครื่องมือวัดภายนอกอาคาร และสามารถนำไปใช้เป็นฐานสำหรับพัฒนาต้นแบบจริงหรือระบบควบคุมขั้นสูงในอนาคต

อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองยังสะท้อนว่าความชื้นสัมพัทธ์ยังเป็นข้อจำกัดสำคัญของระบบ และตรรกะควบคุมแบบอาศัยกฎยังทำให้การตอบสนองของค่า ACH และ CO₂ มีลักษณะเป็นขั้นในบางช่วงเวลา ดังนั้นงานในอนาคตควรพัฒนาวิธีควบคุมที่มีความต่อเนื่องมากขึ้น และควรตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากต้นแบบจริง

ข้อเสนอแนะงานต่อยอดจากงานวิจัยนี้

1. ควรทดลองปรับปรุงกฎการควบคุมของ *DCV* ให้มีความนุ่มนวลขึ้น เพื่อลดการแกว่งของ *CO₂* และ *ACH*
2. ควรขยายแบบจำลองให้รวมผลของความร้อนแฝงและผลของค่าความชื้นสัมพัทธ์ ต่อความสบายเชิงความร้อนอย่างละเอียด
3. ควรเก็บข้อมูลจากต้นแบบจริงจากสถานที่จริง โดย *Sensor* เพื่อใช้ *validate* แบบจำลอง *Simulink*
4. ควรทดลองเพิ่มกรณีศึกษาที่เปลี่ยน *setpoint* ของระบบปรับอากาศ หรือเปลี่ยนขนาด *PV* และพัดลม เพื่อศึกษาความไวของระบบ
5. ควรประเมินเพิ่มเติมในระดับห้องจริงหลายขนาด หรือหลายรูปแบบจำนวนผู้ใช้งาน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้คำแนะนำด้านแนวคิด การออกแบบแบบจำลอง และการวิเคราะห์ผล ตลอดจนขอขอบคุณแหล่งข้อมูลสาธารณะ ได้แก่ NASA POWER (2025) และ Air4Thai (2025) กรมควบคุมมลพิษ ที่ทำให้สามารถนำข้อมูลจริงมาใช้ในการจำลองและประเมินระบบในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดีเป็นรูปธรรม

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2025). Air4Thai. <https://air4thai.pcd.go.th>

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2025). Indoor carbon dioxide. ASHRAE.

ASHRAE. (2019). ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Chenari, B., Dias Carrilho, J., & Gameiro da Silva, M. (2025). Experimental assessment of demand-controlled ventilation strategies for energy efficiency and indoor air quality in office spaces. MDPI Air.

Goyal, S., Barooah, P., & Middelkoop, T. (2015). Experimental study of occupancy-based control of HVAC zones. Applied Energy.

National Aeronautics and Space Administration. (2025). NASA POWER Hourly API. <https://power.larc.nasa.gov>

National Renewable Energy Laboratory. (2016). Facility-scale solar photovoltaic guidebook. NREL.

National Renewable Energy Laboratory. (1997). Photovoltaics: Basic design principles and components. NREL.

Persily, A. K. (2017). Indoor carbon dioxide as a metric of ventilation and IAQ: Yes or no or maybe? NIST/AIVC Workshop.

Persily, A. K. (2021). Indoor Carbon Dioxide Metric Analysis Tool (NIST Technical Note 2213).

National Institute of Standards and Technology.