

การประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศด้วยการใช้อากาศ ภายนอกเอนทัลปีต่ำในบริบทภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย Assessment of Energy-Saving Potential of Air Conditioning Systems Using Low-Enthalpy Outdoor Air in Hot-Humid Climate of Thailand

มานพ หิตะรัตน์¹, ประเมษฐ์ สิทธิสันดี¹, สุรัตน์ เศษโพธิ์¹, บุญวัฒน์ วิจารย์พล¹ และ นพรัตน์ เกตุขาว^{2*}
Manop Hitarat¹, Poramate Sittisun¹, Surat Sedpho¹, Bunyawat Vichanpol¹
and Nopparat Katkhaw^{2*}

¹สาขาวิชาพลังงานทดแทน คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

¹Department of Renewable Energy, School of Energy and Environment, University of Phayao

²Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Phayao

*Email: nopparat_ka@hotmail.com

Received: August 1, 2025; Revised: September 19, 2025; Accepted: November 14, 2025

บทคัดย่อ

ระบบปรับอากาศเป็นองค์ประกอบที่ใช้พลังงานสูงในอาคาร โดยเฉพาะในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นอย่างประเทศไทย ซึ่งมีความต้องการการทำความเย็นเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ระบบ Economizer หรือการนำอากาศภายนอกที่มีค่าเอนทัลปีต่ำ มาใช้เพื่อลดภาระของเครื่องปรับอากาศ ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ แต่การประยุกต์ใช้ในสภาพอากาศร้อนชื้นยังมีข้อจำกัดด้านความชื้น ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือการประเมินศักยภาพและความเป็นไปได้ของการใช้ระบบ Economizer ในประเทศไทย โดยมุ่งวิเคราะห์สภาวะอากาศและช่วงเวลาที่เหมาะสม ตลอดจนประเมินผลด้านการประหยัดพลังงาน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติ งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศรายวันช่วงหน้าหนาวของระหว่างปี 2567 - 2568 จากจังหวัดตัวแทนใน 5 ภูมิภาค ได้แก่ จ.เชียงราย จ.นครพนม จ.ลพบุรี จ.นครนายก และ จ.ประจวบคีรีขันธ์ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ตลอดวัน (24 ชั่วโมง) ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) ผลการคำนวณค่าเอนทัลปีรายชั่วโมงพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้ระบบ Economizer คือ ค่าเอนทัลปีต่ำกว่า 50.465 kJ/kg และอุณหภูมิภายนอกอยู่ระหว่าง 20 - 28.7 °C จำนวนชั่วโมงที่สามารถเปิดรับอากาศภายนอกแตกต่างกันตามภูมิภาค เช่น จ.นครพนม 432 ชั่วโมง/ปี (ตลอดวัน) จ.นครนายก 279 ชั่วโมง (ช่วงทำงาน) และ จ.ลพบุรี 157 ชั่วโมง (ช่วงกลางคืน) การประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานพบว่า จ.ลพบุรี และ จ.ประจวบคีรีขันธ์ มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุด ขณะที่ จ.นครนายก มีสัดส่วนการประหยัดสูงสุดถึง 12.56% แม้ปริมาณที่ลดลงจริงไม่มาก ส่วนภาคใต้มีสัดส่วนการประหยัดต่ำสุด (0.27 - 2.5%) แม้มีการใช้พลังงานสูงในบางช่วงเวลา โดยสรุป การใช้ระบบ Economizer ในประเทศไทยมีศักยภาพแตกต่างกันตามภูมิภาคและช่วงเวลา การเลือกใช้อย่างเหมาะสมกับลักษณะอุณหภูมิและความชื้นของพื้นที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและสนับสนุนการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : ระบบปรับอากาศ, เอนทัลปีต่ำ, การประหยัดพลังงาน

Abstract

Air conditioning systems are among the highest energy-consuming components in buildings, particularly in hot-humid climates such as Thailand, where cooling demand continues to rise. The economizer system-introducing outdoor air with lower enthalpy to reduce cooling loads - has gained attention as a potential energy-saving measure. However, its application in humid climates remains

challenging due to high relative humidity. Therefore, the objective of this study is to assess the feasibility and energy-saving potential of economizer applications in Thailand by analyzing suitable climatic conditions and time periods, and to provide insights for practical design and implementation. This study utilized daily weather data during the winter season between 2024 and 2025, obtained from representative stations in five regions of Thailand: Chiang Rai (North), Nakhon Phanom (Northeast), Lopburi (Central), Nakhon Nayok (East), and Prachuap Khiri Khan (South). Three time periods were analyzed: full day (24 hours), working hours (08:00 - 17:00), and nighttime (20:00 - 06:00). The hourly enthalpy calculations indicated that suitable conditions for economizer operation occur when the enthalpy is below 50.465 kJ/kg and the outdoor air temperature ranges between 20 and 28.7 °C. Based on this criterion, the number of hours in which outdoor air could be utilized varied across regions; for example, Nakhon Phanom recorded 432 h/year (all-day period), Nakhon Nayok 279 h (Office time), and Lopburi 157 h (Night time). Furthermore, the energy-saving potential analysis indicated that Lopburi and Prachuap Khiri Khan achieved the highest absolute reductions, whereas Nakhon Nayok exhibited the highest percentage savings (12.56%) despite the smaller actual reduction. In contrast, the southern region showed the lowest savings proportion (0.27 - 2.5%), even though energy consumption was relatively high during certain periods. In summary, the implementation of economizers in Thailand exhibits varying potential depending on region and time period. Appropriate selection based on local temperature and humidity conditions can enhance system performance and support the development of sustainable energy-efficient buildings.

Keywords : Air conditioning system, Low-Enthalpy, Energy saving

1. บทนำ

ระบบปรับอากาศถือเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในภาคอาคาร โดยเฉพาะในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย ซึ่งมีความต้องการการทำความเย็นเพิ่มสูงขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ การขยายตัวของเมือง และระดับความเป็นอยู่ที่สูงขึ้น [1] ในบางช่วงฤดูร้อน ระบบปรับอากาศในอาคารทั่วเรือนไทยอาจใช้ไฟฟ้าคิดเป็นกว่า 60% ของพลังงานรวมทั้งหมดในบ้านพักอาศัย การลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืน [2]

หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมในระดับสากล คือการนำอากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีต่ำมาใช้เพื่อช่วยลดภาระของเครื่องปรับอากาศ วิธีการนี้เรียกว่า ระบบ Economizer [3] ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่า เมื่ออากาศภายนอกมีพลังงานรวมต่ำกว่าอากาศภายใน (ทั้งในแง่อุณหภูมิและความชื้น) ก็สามารถนำเข้ามาใช้งานโดยตรงหรือผสมกับอากาศหมุนเวียน เพื่อลดการทำงานของเครื่องทำความเย็น ส่งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 20 - 30% ในบางพื้นที่ [4,5]

Economizer ในระบบปรับอากาศเป็นกลไกที่ออกแบบมาเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยการนำอากาศภายนอกที่มีสถานะเหมาะสม เช่น มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นต่ำกว่าอากาศภายใน เข้ามาแทนที่อากาศหมุนเวียนบางส่วนเมื่อเงื่อนไขของอากาศภายนอกสอดคล้องกับเกณฑ์ที่กำหนด

ระบบจะเปิดให้อากาศดังกล่าวไหลเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศโดยตรง ส่งผลให้ภาระของเครื่องทำความเย็นลดลง ซึ่งช่วยให้การใช้พลังงานโดยรวมของระบบปรับอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ระบบนี้ในเขตอากาศร้อนชื้นยังคงเป็นความท้าทาย เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์สูงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศภายในและประสิทธิภาพของระบบ [6,7] โดยเฉพาะในอาคารที่ไม่มีระบบควบคุมความชื้นที่แม่นยำ บทความนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ Economizer โดยอาศัยอากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีต่ำในการลดภาระของระบบปรับอากาศในบริบทของประเทศไทย ซึ่งยังขาดการศึกษาที่เจาะจงในพื้นที่ภูมิอากาศลักษณะนี้

2. ทฤษฎีและการคำนวณ

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศรายวัน ได้แก่ อุณหภูมิ กระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเก็บรวบรวมโดยกรมอุตุนิยมวิทยาแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2567 - 2568 จากสถานีตัวแทนใน 5 ภูมิภาค ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ โดยข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ ได้แก่ ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.), ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) และช่วงตลอดทั้งวัน

2.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าเอนทัลปี

1. คำนวณค่าความดันไออิ่มตัวของอากาศ จากอุณหภูมิ กระเปาะแห้งที่สภาวะนั้นๆ ตามสมการที่ 1 [8]

$$P_{vs} = e^{\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6 \ln T} \quad (1)$$

โดยที่

P_{vs} คือ ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ตรงกับอุณหภูมิ กระเปาะแห้งของก๊าซผสมไอน้ำนั้น (Pascal)

T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของก๊าซผสมไอน้ำ ($^{\circ}\text{K}$) และกำหนดค่าคงที่ดังต่อไปนี้

$$C_1 = -5800.2206$$

$$C_2 = 1.3914993$$

$$C_3 = -0.04860239$$

$$C_4 = 4.1764768 \times 10^{-5}$$

$$C_5 = -1.445209 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = 6.5459673$$

2. คำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ และค่าความดันไออิ่มตัวที่ ตามสมการที่ 2 [8]

$$W = \frac{0.622 \phi P_{vs}}{P - \phi P_{vs}} \quad (2)$$

โดยที่

w คือ อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หน่วย เป็น kg ของไอน้ำ/kg ของอากาศแห้ง

ϕ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

และกำหนดค่าคงที่ดังต่อไปนี้

P คือ ความดันบรรยากาศรวม (Total atmospheric pressure) (101,325 Pa)

3. คำนวณหาค่าปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) ตามสมการที่ 3 [8]

$$v = (0.287 + 0.462w) \cdot \frac{T}{P} \quad (3)$$

โดยที่

v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น (specific volume of moist air) (m^3/kg)

4. คำนวณหาค่าเอนทัลปีของสภาวะอากาศนั้นๆ ในแต่ละชั่วโมง ตามสมการที่ 4 [8]

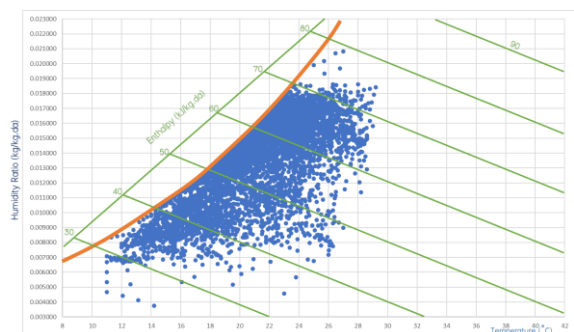
$$h = t + w(2501 + 1.86t) \quad (4)$$

โดยที่

h คือ เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)

t คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของก๊าซผสมไอน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)

5. ค่าเอนทัลปีที่ได้จากการคำนวณจะนำไปแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งมีแกน X แสดงค่าอุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$) และแกน Y แสดงค่าอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio; kg/kg dry air) โดยมีเส้นเฉียงแทนค่าคงที่ของเอนทัลปี (Enthalpy Lines) เพื่อใช้ในการประเมินความเหมาะสมของสภาวะอากาศภายนอกสำหรับการนำมาใช้ในระบบ Economizer แทนการใช้พลังงานในการทำผิวน้ำด้วยระบบเครื่องกล



รูปที่ 1 ตัวอย่างสภาวะอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก

2.2 การคำนวณขอบเขตการใช้งานของอากาศภายนอก

2.2.1 ภาระทำความเย็นของห้องปรับอากาศ

ตามมาตรฐาน ISO 16358-1 [9] ภาระทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศภายนอกอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกมีผลต่อปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคาร ซึ่งจะกำหนดอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นภาระทำความเย็น 0% และ 35 องศาเซลเซียส เป็นภาระทำความเย็น 100% ดังนั้นภาระทำความเย็นที่อุณหภูมิใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ 5 [9]

$$L_c(t_j) = \phi_{full}(35) \cdot \frac{t_j - 20}{35 - 20} \quad (5)$$

$L_c(t_j)$ คือ ภาระทำความเย็น (Cooling Load) ที่อุณหภูมิใดๆ คือการคำนวณภาระทำความเย็นที่อุณหภูมิ t_j หน่วยเป็น W (Cooling)

t_j คือ อุณหภูมิภายนอก (อุณหภูมิคุ้มแห้ง) หน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

$\phi_{full}(35)$ คือ สมรรถนะ 100% ของเครื่องปรับอากาศที่ อุณหภูมิอากาศภายนอก (outdoor air temperature) 35 องศาเซลเซียส หน่วยเป็น W (Cooling)

2.2.2 สมรรถนะการทำงานของเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิใดๆและที่ภาระโหลดต่างๆ

การหาสมรรถนะที่อุณหภูมิใดๆและที่โหลดใดๆของเครื่องปรับอากาศ จะได้จากการใช้วิธีการ Linear จากการที่ทราบค่า สมรรถนะ 100% อุณหภูมิอากาศภายนอกที่ 29 และ 35 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ 6 [9]

$$\phi_{full}(t_j) = \phi_{full}(35) + \frac{\phi_{full}(29) - \phi_{full}(35)}{35 - 29} \cdot (35 - t_j) \quad (6)$$

$\phi_{full}(t_j)$ คือ สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศภายนอก (outdoor air temperature) t_j ใดๆหน่วยเป็น W (Cooling)

$\phi_{full}(29)$ คือ สมรรถนะ 100% ของเครื่องปรับอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศภายนอก (outdoor air temperature) 29 องศาเซลเซียส หน่วยเป็น W (Cooling)

2.2.3 คำนวนขอบเขตอุณหภูมิภายนอกที่สามารถนำลดการใช้พลังงาน

ในกรณีที่อากาศภายนอกมีค่าเอนทัลปีต่ำแต่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าควบคุมที่กำหนดไว้ การนำอากาศดังกล่าวเข้าสู่ระบบอาจทำให้ระบบปรับอากาศยังคงต้องทำงานบางส่วนเพื่อปรับลดอุณหภูมิภายในให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องควบคุมอุณหภูมิห้องไม่ให้เกิน 25 °C ทั้งนี้แม้จะมีภาระในการทำความเย็นเหลืออยู่บ้าง แต่การใช้อากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีต่ำก็ยังสามารถช่วยลดภาระรวมของระบบปรับอากาศได้ในระดับหนึ่ง [8]

$$\phi_{full}(t_j) \times SHR = 1.23 \times Q \times (t_{supply} - t_j) \quad (7)$$

$$[Lc(t_j) - \text{Latent heat}] = 1.23 \times Q \times (t_{room} - t_{supply}) \quad (8)$$

โดยที่

SHR (Sensible Heat Ratio) คือ อัตราส่วนความร้อนสัมผัสรวม (Total Sensible Heat) ต่อความร้อนทั้งหมด (Total Heat)

Q คือ อัตราการไหลอากาศ m^3/s

t_{supply} คือ อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องปรับอากาศหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

t_{room} คือ อุณหภูมิห้องที่ต้องการหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

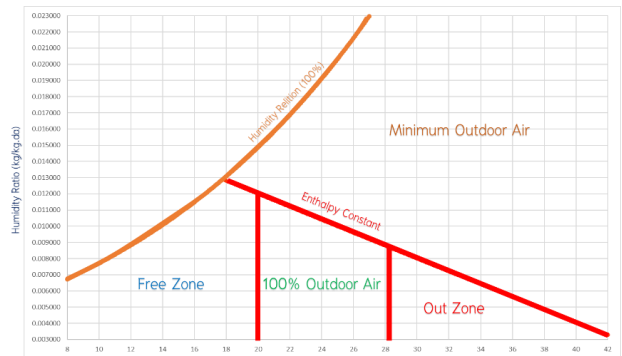
จากสมการที่ (7) และ (8) สามารถสรุปเงื่อนไขในการเลือกใช้อากาศภายนอกเพื่อลดภาระของระบบปรับอากาศได้ว่า อากาศภายนอกจะต้องมีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าค่าควบคุมที่กำหนดไว้ (เชิงอ้างอิงจากสมการ) และมีอุณหภูมิไม่เกินค่า

อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับพื้นที่ภายในอาคาร หรือ t_{jmax} ในที่นี้กำหนดไว้ที่ 25°C

ดังนั้น สภาวะของอากาศภายนอกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เพื่อลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขทั้งสองประการ คือ

- $h_j < h_{set}$ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์)

- $20^\circ\text{C} < t_j < t_{jmax}$



รูปที่ 2 ขอบเขตสภาวะอากาศภายนอกที่เหมาะสมต่อการลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ

2.3 การคำนวณศักยภาพในการประหยัดพลังงาน

2.3.1 การคำนวณปริมาณอากาศภายนอกที่เติมเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศ

การศึกษานี้กำหนดให้พิจารณาห้องปรับอากาศที่มีระบบระบายอากาศ โดยคำนวณปริมาณการระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 [10] ดังนั้น ปริมาณอากาศเติมขั้นต่ำ (V'_{min}) ในช่วงที่โซนอยู่ในสภาวะใช้อากาศภายนอก 100% (100% Outdoor Air) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [20]

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_o \times A_z \quad (9)$$

โดยที่

V_{bz} คือ Breathing Zone Outdoor Air Flow (cfm)

R_p คือ Outdoor Air Flow Rate ต่อคน จากตารางที่ 1 (cfm/คน)

P_z คือ จำนวนผู้อยู่อาศัยภายในห้อง

R_o คือ Outdoor Air Flow Rate ต่อพื้นที่ห้อง จากตารางที่ 1 (cfm/ตารางฟุต)

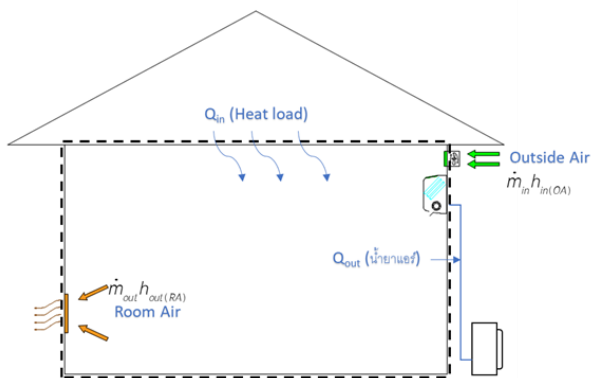
A_z คือ พื้นที่ห้องเป็นตารางฟุต

ปริมาณอากาศเติมสูงสุด (V'_{max}) ในช่วงที่โซนอยู่ในสภาวะใช้อากาศภายนอก 100% (100% Outdoor Air) จะพิจารณาจากค่าสูงสุดของอัตราการจ่ายลมของเครื่องเติม

อากาศ โดยค่า V'_{max} นี้จะใช้เป็นค่าขอบเขตบนในการวิเคราะห์ช่วงการทำงานของระบบระบายอากาศภายใต้เงื่อนไขสูงสุด

2.3.2 การคำนวณผลประหยัดพลังงานจากระบบระบายอากาศ

การวิเคราะห์ผลประหยัดพลังงานในหัวข้อนี้ยึดตามหลักการของกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบและพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของงาน เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศ



รูปที่ 3 แสดงการเติมอากาศเข้าสู่ห้องปรับอากาศ

ในการวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานของระบบ สามารถประยุกต์ใช้หลักการดุลพลังงาน (Energy Balance) ร่วมกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีการไหลของมวลสารเข้า - ออก เช่น ระบบปรับอากาศ หรือระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเขียนสมการดุลพลังงานในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$Q_{in} + \dot{m}_{in} h_{in} = Q_{out} + \dot{m}_{out} h_{out} + w$$

เมื่อ

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

จะได้

$$Q_{out} = Q_{in} + \dot{m} (h_{in} + h_{out}) \quad (10)$$

โดยที่

Q_{in} คือ ภาระความร้อนที่เข้ามาในห้อง ซึ่งอาจมาจากหลายแหล่ง เช่น แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านหน้าต่าง, ความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้า, หรือความร้อนจากร่างกายของผู้อยู่อาศัย

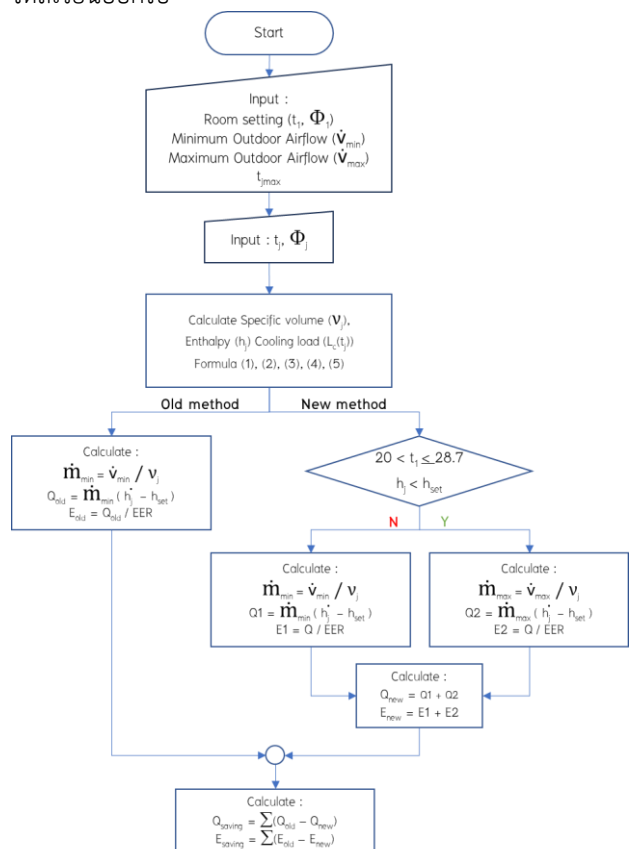
Q_{out} คือ ความร้อนที่ถูกดูดออก จากอากาศภายในห้อง โดยเครื่องปรับอากาศ (AC) ผ่านการทำงานของสารทำความเย็น (Refrigerant) ซึ่งจะลดอุณหภูมิของอากาศในห้องลง

$\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล ของอากาศที่ถูกดูดเข้าจากเครื่องเติมอากาศ

$\dot{m}_{out}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล ของอากาศที่ถูกดูดออกจากห้องผ่านทางช่องระบายอากาศ

h_{in} คือ เอนทัลปี (Enthalpy) ของอากาศจากภายนอกอาคาร (Outside Air) ที่ไหลเข้ามา

h_{out} คือ เอนทัลปีของอากาศในห้อง (Room Air) ที่ไหลเวียนออกไป



รูปที่ 4 ผังกระบวนการประเมินการศักยภาพในการประหยัดพลังงานของระบบ

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการคำนวณค่าเอนทัลปีของอากาศในแต่ละช่วงเวลา แต่ละภูมิภาค

ประเทศไทยมีภูมิอากาศที่หลากหลาย ส่งผลให้ศักยภาพในการใช้ระบบ Economizer แตกต่างกันตามแต่ละภูมิภาค งานวิจัยนี้ได้เลือกจังหวัดตัวแทนจาก 5 ภูมิภาคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่

ภาคเหนือ: จังหวัดเชียงราย ซึ่งมีอากาศเย็นและแห้ง ในช่วงฤดูหนาว โดยเฉพาะเวลากลางคืน เหมาะสำหรับการใช้ระบบ Economizer เป็นบางช่วงเวลา

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ: จังหวัดนครพนม มีอุณหภูมิสูง ในฤดูร้อนแต่ความชื้นสัมพัทธ์ยังอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ

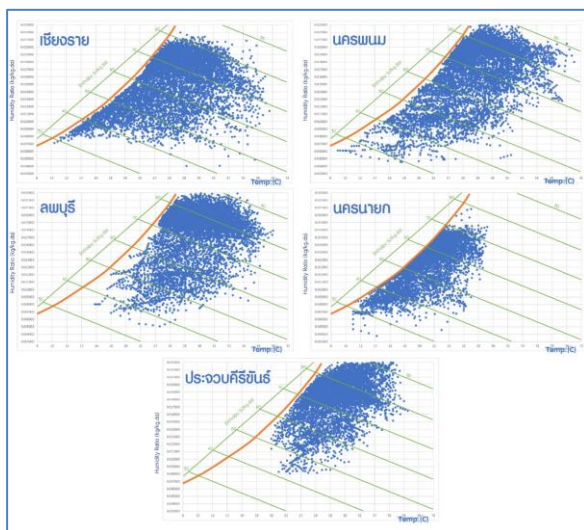
ภาคกลาง: จังหวัดลพบุรี มีลักษณะอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการใช้ระบบ Economizer เนื่องจากความชื้นแฝงที่สูง

แม้ว่าจังหวัดลพบุรีจะมีลักษณะภูมิอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี ซึ่งถือเป็นอุปสรรคต่อการใช้ระบบ Economizer อย่างต่อเนื่อง แต่จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะเวลากลางคืนและช่วงที่ค่าเอนทัลปีต่ำกว่าเกณฑ์ จังหวัดลพบุรีสามารถลดการใช้พลังงานได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอื่น ๆ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาปัจจัยด้านภูมิอากาศเฉพาะพื้นที่และช่วงเวลาในการออกแบบการใช้ Economizer อย่างเหมาะสม

ภาคตะวันออก: จังหวัดนครนายก แม้อยู่ในเขตชื้น แต่มีภูมิประเทศใกล้ภูเขาและป่าไม้ซึ่งอาจช่วยลดอุณหภูมิและความชื้นเฉพาะบางช่วงเวลา

ภาคใต้: จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝน ทำให้การนำอากาศภายนอกมาใช้งานต้องมีระบบควบคุมความชื้นอย่างรัดกุม

จากการประเมินค่าเอนทัลปีเฉลี่ยของอากาศภายนอกในแต่ละจังหวัด พบว่าตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความเหมาะสมในการนำอากาศภายนอกมาใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา ส่งผลให้แต่ละพื้นที่มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานจากการใช้งานระบบ Economizer แตกต่างกันไป



รูปที่ 5 ค่าเอนทัลปีแต่ละภูมิภาคจากตัวแทนละจังหวัด

เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความเหมาะสมในการนำอากาศภายนอกมาใช้ จึงได้มีการวิเคราะห์โดยแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1) ตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง) 2) ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) และ 3) ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงสภาวะอากาศภายนอกที่สามารถนำมาใช้เพื่อลดภาระการทำงานของระบบปรับอากาศ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ในการประเมินโอกาสในการประหยัดพลังงานของแต่ละพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 เกณฑ์การประเมินค่าเอนทัลปีและอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่เอื้อต่อการใช้งานระบบ Economizer อย่างมีประสิทธิภาพ

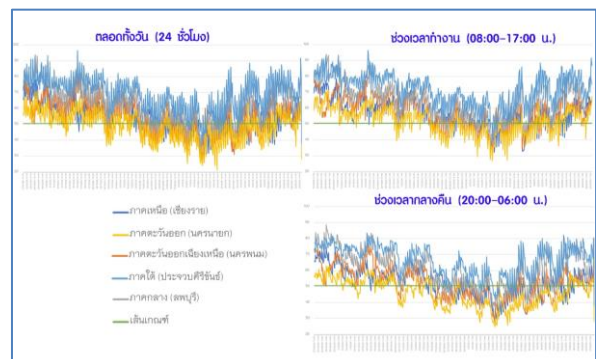
1. อากาศภายนอกจะต้องมีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าสภาวะควบคุมของห้องปรับอากาศ (25°C , 50%) จากสมการ (1), (2), (3) และ (4)

$$h_{set} = 50.465 \text{ kJ/kg}$$

ค่าเอนทัลปีช่วงฤดูหนาว ประมาณปลายสัปดาห์ที่สามของเดือนตุลาคม 2567 ถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ 2568

2. อากาศที่นำเข้ามาแล้วทำให้อุณหภูมิห้องต้องไม่เกิน 25°C

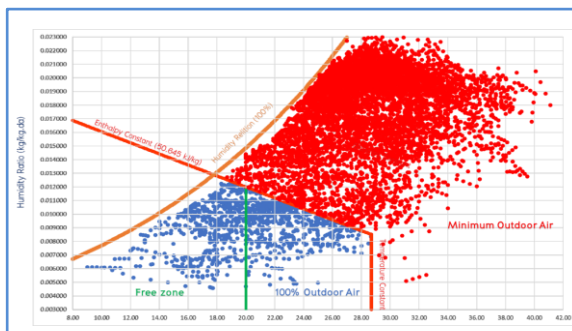
จากผลการวิเคราะห์พบว่า อากาศภายนอกที่มีค่าเอนทัลปีต่ำกว่า 50.465 kJ/kg และมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $20 - 28.7^{\circ}\text{C}$ สามารถนำมาใช้เพื่อลดภาระการทำงานของระบบปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วงเวลาดังกล่าวถือเป็นโซนที่เหมาะสมในการเปิดรับอากาศภายนอก 100% ขณะที่หากอุณหภูมิต่ำกว่า 20°C จะเข้าสู่โซน Free Cooling ซึ่งสามารถระบายอากาศได้โดยไม่ต้องพึ่งพาระบบทำความเย็นเชิงกล ทำให้ช่วยประหยัดพลังงานได้มากขึ้น ตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าเอนทัลปี กับ h_{set} แต่ละช่วงเวลา

รูปที่ 6 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าเอนทัลปีกับอุณหภูมิภายนอกในแต่ละช่วงเวลา โดยช่วงที่ค่าเอนทัลปีต่ำกว่า 50.465 kJ/kg และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 - 28.7 °C เป็นโซนที่เหมาะสมต่อการเปิดรับอากาศภายนอกเพื่อลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

ในการออกแบบและควบคุมระบบปรับอากาศ การบริหารจัดการปริมาณอากาศภายนอกที่นำเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานโดยรวมของระบบ โดยเฉพาะในอาคารที่มีการใช้ระบบระบายอากาศร่วมกับระบบปรับอากาศ การประเมินสภาวะอากาศภายนอกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ กราฟต่อไปนี้แสดงการจำแนกโซนสภาวะอากาศภายนอกตามศักยภาพในการช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ



รูปที่ 7 โซนการทำงานของระบบปรับอากาศตามสภาวะอากาศภายนอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

รูปที่ 7 แสดงการแบ่งโซนการทำงานของระบบปรับอากาศตามสภาวะอากาศภายนอก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ โดยจำแนกออกเป็น 3 โซนหลัก ดังนี้

1) Minimum Outdoor Air (อากาศภายนอกขั้นต่ำ)
หมายถึงช่วงที่การนำอากาศภายนอกเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศจะส่งผลให้ภาระการทำความเย็นเพิ่มขึ้น ระบบจึงจำกัดการนำอากาศภายนอกให้น้อยที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้เหมาะสมตามมาตรฐาน

2) 100% Outdoor Air (อากาศภายนอก 100%)
หมายถึงช่วงที่อากาศภายนอกมีคุณสมบัติเอื้อต่อการลดภาระความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ระบบจะสั่งให้เปิดรับอากาศภายนอกในปริมาณสูงสุดที่เครื่องสามารถรองรับได้ เพื่อใช้ในการระบายอากาศแทนการทำความเย็นด้วยเครื่องจักร

3) Free Cooling Zone (โซนการทำความเย็นอิสระ)
เป็นช่วงที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกต่ำกว่า 20°C ส่งผลให้

ภาระความร้อนจากภายนอกมีน้อยมาก จึงสามารถระบายอากาศได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องปรับอากาศ ทำให้ลดการใช้พลังงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 การประเมินจำนวนชั่วโมงที่สามารถใช้งานระบบ Economizer ได้จากข้อมูลสภาพอากาศรายชั่วโมง

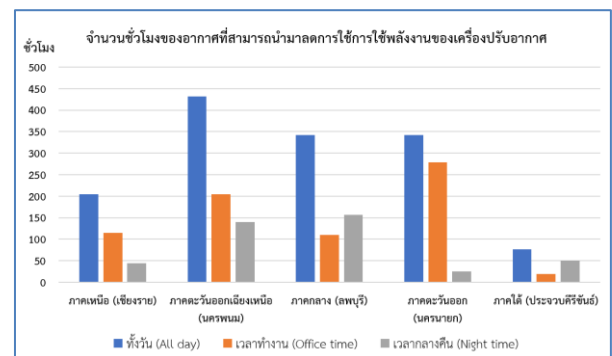
จากการวิเคราะห์จำนวนชั่วโมงที่สามารถปรับอัตราการเติมอากาศจากค่าขั้นต่ำเป็นการเติมอากาศภายนอก 100% ตามเกณฑ์อุณหภูมิและเอนทัลปีที่กำหนด พบว่าในแต่ละภูมิภาคและแต่ละช่วงเวลาจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8

ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง): พบว่าจังหวัดนครพนมมีจำนวนชั่วโมงสูงสุดในการใช้อากาศภายนอก คือ 432 ชั่วโมง/ช่วงฤดูหนาว

ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.): จังหวัดนครนายกมีจำนวนชั่วโมงสูงสุดเท่ากับ 279 ชั่วโมง/ช่วงฤดูหนาว

ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.): จังหวัดลพบุรีมีจำนวนชั่วโมงสูงสุดอยู่ที่ 157 ชั่วโมง/ช่วงฤดูหนาว

ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของศักยภาพในการใช้อากาศภายนอกเพื่อการประหยัดพลังงานของแต่ละพื้นที่ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 จำนวนชั่วโมงของอากาศที่สามารถนำมาลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ

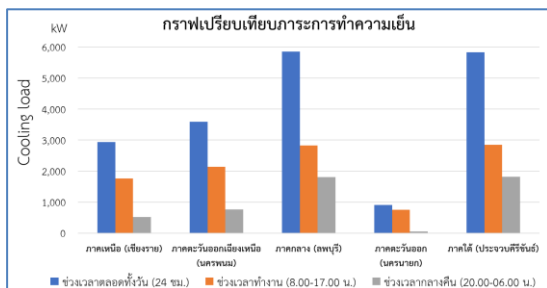
3.4 การวิเคราะห์ศักยภาพการลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อประเมินศักยภาพในการประหยัดพลังงานจากการใช้ระบบ Economizer ซึ่งอาศัยอากาศภายนอกที่มีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าสภาวะควบคุมภายในอาคาร การศึกษานี้ได้ดำเนินการคำนวณปริมาณอากาศภายนอกที่สามารถนำเข้ามาใช้ในพื้นที่พักอาศัย และประมาณค่าพลังงานที่สามารถลดลงได้จากการลดภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ

1) ปริมาณอากาศที่เติมเข้าห้อง
กำหนดสมมติฐานจากห้องพักอาศัยขนาด 20 ตารางเมตร (เท่ากับ 215.28 ตารางฟุต) โดยมีผู้อยู่อาศัยจำนวน 2 คน อิงตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 ค่าปริมาณอากาศภายนอกที่ต้องเติมอย่างน้อยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{bz} &= R_p \times P_z + R_o \times A_z \\ &= 5 \times 2 + 0.06 \times 215.28 \\ &= 22.9168 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที} \end{aligned}$$

2) คำนวณผลประหยัดพลังงาน

จากผังกระบวนการประเมินศักยภาพในการประหยัดพลังงานของระบบ (รูปที่ 4) ได้มีการจำลองภาระการทำความเย็นในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ได้แก่ ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง), ช่วงเวลาทำงาน (08.00 - 17.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20.00 - 06.00 น.) เพื่อนำข้อมูลไปใช้ประกอบการวิเคราะห์โอกาสในการลดภาระของเครื่องปรับอากาศผ่านการใช้ระบบ Economizer โดยกราฟต่อไปนี้แสดงผลการเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นในแต่ละภูมิภาคตามช่วงเวลาดังกล่าว



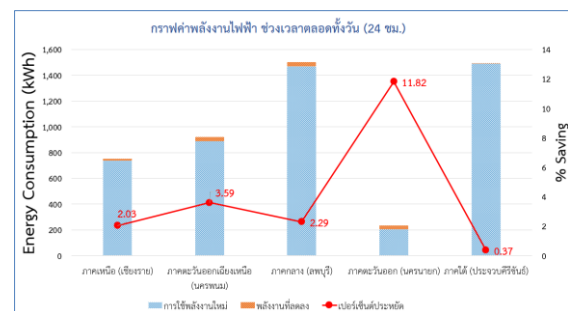
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยตามช่วงเวลาต่าง ๆ

จากการประเมินพลังงานที่สามารถลดลงได้จากการใช้ระบบ Economizer ดังรูปที่ 9 พบว่า ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และ ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงที่สุดในช่วงเวลา ตลอดทั้งวัน และ ช่วงเวลากลางคืน ตามลำดับ ขณะที่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครนายก) มีศักยภาพต่ำสุดในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะในช่วงกลางคืนที่มีค่าต่ำสุดเพียง 52.50 หน่วย ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของศักยภาพการประหยัดพลังงานตามภูมิภาคและช่วงเวลาใช้งาน

สำหรับช่วงเวลาต่าง ๆ ของการใช้งานระบบปรับอากาศ ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าในรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประหยัดพลังงานของระบบ Economizer ในแต่ละภูมิภาคอย่างชัดเจน โดยแบ่งตามช่วงเวลาทั้งหมด ได้แก่ ตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง), ช่วงเวลา

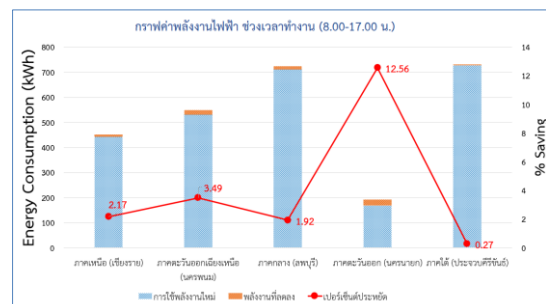
ทำงาน (08:00 - 17:00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) ข้อมูลจากกราฟเหล่านี้จะช่วยให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพและโอกาสในการลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศในแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลาใช้งานอย่างละเอียด

สำหรับจังหวัดลพบุรี จากผลการจำลองพบว่ามีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานรวมสูงสุดประมาณ 650 kWh ตลอดทั้งวันและช่วงกลางคืน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะบางช่วงเวลา เช่น เวลากลางคืนเพียงอย่างเดียว ปริมาณการลดพลังงานจะอยู่เพียง 260 kWh ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าพลังงานลดลงมีความแตกต่างกันในแต่ละการนำเสนอ ทั้งนี้การระบุผลทั้งสองลักษณะมีจุดมุ่งหมายเพื่อสะท้อนให้เห็นถึงความหลากหลายของช่วงเวลาการใช้งานระบบ Economizer ในบริษัทที่แตกต่างกัน



รูปที่ 10 กราฟค่าพลังงานไฟฟ้า ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชม.)

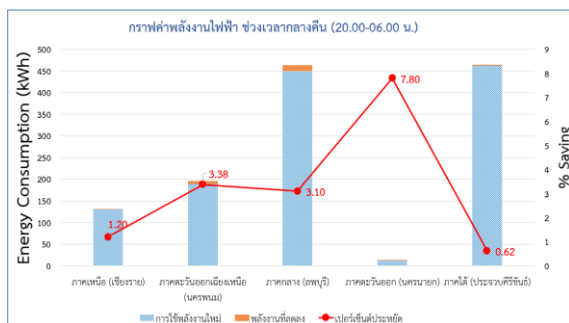
จากการวิเคราะห์กราฟค่าพลังงานไฟฟ้า ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชม.) ดังรูปที่ 10 พบว่า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครนายก) มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานสูงสุด อยู่ที่ 11.82% แม้ว่าปริมาณพลังงานที่ลดลงจะไม่สูงนัก ขณะที่ ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครพนม) มีปริมาณพลังงานที่ลดลงมากที่สุด แต่มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดเพียง 2.29% และ 3.59% ตามลำดับ ส่วน ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีศักยภาพการประหยัดต่ำที่สุดในทั้งสองด้าน



รูปที่ 11 ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.)

จากข้อมูลรูปที่ 11 ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) พบว่า ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) แม้มีพลังงานลดลงไม่สูงนัก แต่กลับมีสัดส่วนการประหยัดพลังงานสูงสุดถึง 12.56% ในช่วงเวลาทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Seem & House [3] ที่เสนอว่าการปรับกลยุทธ์ Economizer ตามเงื่อนไขท้องถิ่นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้มากกว่าการควบคุมแบบทั่วไป และยังสอดคล้องกับ Yao & Wang [11] ที่ชี้ว่า VAV system ในภูมิอากาศจีนก็มีผลใกล้เคียงกัน ขณะที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครพนม) และ ภาคเหนือ (จ.เชียงราย) มีการลดพลังงานและเปอร์เซ็นต์การประหยัดอยู่ในระดับปานกลาง ส่วน ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีเปอร์เซ็นต์ประหยัดต่ำสุดที่ 0.27% แม้จะมีการใช้พลังงานใหม่สูงสุด

ในการประเมินเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน พบว่าค่าร้อยละ 12.56% สะท้อนถึงสัดส่วนการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) ขณะที่ค่าร้อยละ 11.82% เป็นค่าเฉลี่ยการประหยัดพลังงานตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง) ดังนั้น แม้ตัวเลขทั้งสองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ช่วงเวลาอ้างอิงมีความแตกต่าง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณาในการตีความผลลัพธ์



รูปที่ 12 ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.)

จากข้อมูลรูปที่ 12 ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) พบว่า ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Seem & House [12] ยังคงมี เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงที่สุดอยู่ที่ 7.80% แม้ปริมาณพลังงานรวมจะน้อยที่สุด ขณะที่ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และ ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีปริมาณพลังงานที่ลดลงสูง แต่เปอร์เซ็นต์การประหยัดอยู่ในระดับปานกลางและต่ำ ส่วน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครพนม) มีความสมดุลระหว่างพลังงานที่ลดลงและเปอร์เซ็นต์การประหยัดที่ดี

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ศักยภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้ระบบ Economizer ที่อาศัยอากาศภายนอกซึ่งมีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าสภาวะภายในอาคาร ผลการวิเคราะห์พบว่า ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดในช่วงเวลาตลอดทั้งวันและช่วงเวลากลางคืนตามลำดับ ขณะที่ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) แม้จะมีการใช้พลังงานใหม่ในระดับต่ำ แต่มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงสุดในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะช่วงเวลาที่สูงถึงกว่า 12% ในทางตรงกันข้าม ภาคใต้มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดต่ำสุด แม้ว่าจะมีการใช้พลังงานสูง นอกจากนี้ จำนวนชั่วโมงที่สามารถใช้ระบบ Economizer ได้แตกต่างกันไปในแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลา โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือมีจำนวนชั่วโมงใช้งานได้สูงในช่วงเวลาตลอดทั้งวันและช่วงทำงานตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของศักยภาพการประหยัดพลังงานในแต่ละภูมิภาคอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะสภาพอากาศเฉพาะถิ่น ความแปรปรวนของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ รวมถึงช่วงเวลาการใช้งานของระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ ค่าการประหยัดพลังงานในบางพื้นที่แม้จะมีเปอร์เซ็นต์สูง แต่ปริมาณพลังงานที่ลดลงจริงอาจต่ำ เนื่องจากปริมาณการใช้พลังงานเริ่มต้นที่ต่ำ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณาในการออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบ Economizer เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

การนำผลการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติควรคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลาใช้งานเพื่อปรับแต่งการทำงานของระบบให้เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุดในการลดการใช้พลังงาน ทั้งนี้ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความแม่นยำของข้อมูลภูมิอากาศและพฤติกรรมการใช้งานจริง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของระบบในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์ใช้ระบบ Economizer ในบริบทของประเทศไทย ควรดำเนินการในลักษณะการออกแบบเชิงพื้นที่ (Climate-specific design) และยึดถือมาตรฐานสากล เช่น ASHRAE [7,10] เพื่อสร้างความสมดุลระหว่างปริมาณพลังงานที่ลดลงและสัดส่วนการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้ยังควรมีการศึกษาต่อเนื่องตามข้อเสนอของ Asim et al. [13] เกี่ยวกับความยั่งยืนของระบบ HVAC ในระยะยาว ซึ่งจะช่วยยกระดับคุณภาพของการออกแบบและการใช้งานระบบปรับอากาศให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Lundgren-Kownacki, E. D. Hornyanszky, T. A. Chu, J. Alkan Olsson, and P. Becker, "Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate," *International Journal of Biometeorology*, vol. 62, Special Issue on Trans-disciplinary approaches to climate change, pp.401-412, Mar.2018.
- [2] Z. Tao, X. Zhu, G. Xu, D. Zou, and G. Li, "A comparative analysis of outdoor thermal comfort indicators applied in China and other countries," *Sustainability*, vol. 15, no. 22, Art.no.16029, 2023. doi: 10.3390/su152216029.
- [3] J. Feng, M. Liu, and X. Pang, *Economizer control using mixed air enthalpy*. Energy Systems Laboratory, University of Nebraska–Lincoln, 2007.
- [4] B. Li, P. Wild, and A. Rowe, "Free cooling potential of air economizer in residential houses in Canada," *Building and Environment*, vol. 167, Art.no.106460, 2019. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106460.
- [5] H. Selamat, M. Mohammad, M. Badiei, and H. Razali, "Review on HVAC system optimization towards energy saving building operation," *International Energy Journal*, vol. 20, no.3, pp. 345-358, 2020.
- [6] S. T. Taylor and C. H. Cheng, "Why enthalpy economizers don't work," *ASHRAE Journal*, vol. 52, no. 11, pp. 12–20, Nov. 2010.
- [7] ASHRAE, "ASHRAE journal QA: Why enthalpy economizers don't work," *ASHRAE Journal*, Nov. 2010.
- [8] R. Jirakanvasan, *Air conditioning*. Bangkok: Thai Air Conditioning Engineering Association, 2018. (in Thai).
- [9] Ministry of Industry, TIS 2714 Part 1-2558: *Standard for air-cooled air conditioners and heat pumps - Testing and seasonal performance factor calculation, Part 1: Cooling seasonal performance factor*, 2016. (in Thai).
- [10] T. Manee-wattana, "Ventilation rate calculation according to ASHRAE 62.1 standard," Technical article of Thai Air Conditioning Engineering Association, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. (in Thai).
- [11] Y. Yao and L. Wang, "Energy analysis on VAV system with different air-side economizers in China," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 8, pp. 1220–1230, 2010. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.015.
- [12] J. E. Seem and J. M. House, "Development and evaluation of optimization-based air economizer strategies," *Applied Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 910–924, 2010. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.044.
- [13] N. Asim, M. Badiei, M. Mohammad, H. Razali, A. Rajabi, and L. C. Haw, "Sustainability of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in buildings – An overview," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 2, Art.no. 1016, 2022. doi: 10.3390/ijerph19021016.