

## การศึกษาสมรรถนะหลังคาต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมผลิตยาแผนปัจจุบัน

ศุภชัย วรเลิศ<sup>1\*</sup> ศุติต งามรุ่งโรจน์<sup>2</sup> และ ปรีดา จันทวงษ์<sup>3</sup>

วันที่รับ 22 เมษายน 2568 วันที่แก้ไข 23 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 30 พฤษภาคม 2568

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของฉนวนหลังคาที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมผลิตยาแผนปัจจุบันแห่งหนึ่ง โดยใช้โปรแกรม OpenStudio ในการวิเคราะห์ข้อมูล การศึกษานี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็นของห้องคลีนรูมเมื่อใช้ฉนวนหลังคาหนาชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Polyethylene (PE) ความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 10 mm และ Polyurethane (PU) ความหนา 25 mm และ Polyurethane (PU) ความหนา 50 mm ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาสามารถลดการใช้พลังงานในการทำมาเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยฉนวนหลังคา Polyurethane (PU) หนา 50 mm ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการใช้พลังงาน โดยมีค่าการใช้พลังงานรวมตลอดปีอยู่ที่ 68,839.33 kWh และค่าการใช้พลังงานในการทำมาเย็นลดลงเหลือ 27,159.36 kWh เมื่อเทียบกับฉนวนหลังคา Polyethylene (PE) ความหนา 3 mm ที่มีการใช้พลังงานรวม 71,943.75 kWh และการใช้พลังงานในการทำมาเย็น 29,817.36 kWh นอกจากนี้ การใช้ฉนวนหลังคาที่มีความหนาเพิ่มขึ้นยังช่วยลดภาระการทำความเย็น (Cooling load) โดยเฉลี่ยจาก 8.93 MBtu ในกรณีของ Polyethylene (PE) ความหนา 3 mm ลดลงเหลือ 7.72 MBtu ในกรณีของ Polyurethane (PU) หนา 50 mm จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การเลือกใช้ฉนวนหลังคาที่มีความหนาเพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยในการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานของห้องคลีนรูมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การติดตั้งฉนวนที่เหมาะสมจึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนพลังงานและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร โดยเฉพาะฉนวน Polyurethane (PU) หนา 50 mm ที่ให้ผลดีที่สุด

**คำสำคัญ:** ห้องคลีนรูม, ภาระการทำความเย็น, การใช้พลังงาน, ฉนวนหลังคา

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>3</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้แต่ง, อีเมล: suphachai.worralers@gmail.com

# The Study of Roof Performance on Energy Consumption of Cleanroom for Pharmaceutical Production

Suphachai Worralers<sup>1\*</sup> Dusit Ngamrungraj<sup>2</sup> and Preeda Chantawong<sup>3</sup>

Received 22 April 2025, Revised 23 May 2025, Accepted 30 May 2025

## Abstract

This study aims to evaluate the performance of roof insulation and its impact on energy consumption in a cleanroom of a modern pharmaceutical manufacturing facility using the OpenStudio software for data analysis. The study focused on comparing energy consumption and cooling loads in the cleanroom with various types and thicknesses of roof insulation, including Polyethylene (PE) at 3 mm, 4 mm, 5 mm, and 10 mm thickness, and Polyurethane (PU) at 25 mm and 50 mm thickness. The results indicated that increasing the thickness of roof insulation significantly reduced energy consumption for cooling. The 50 mm thick Polyurethane (PU) insulation provided the highest efficiency, with total annual energy consumption of 68,839.33 kWh and cooling energy consumption reduced to 27,159.36 kWh, compared to 71,943.75 kWh and 29,817.36 kWh, respectively, for 3 mm thick Polyethylene (PE) insulation. Additionally, increasing insulation thickness also lowered the average cooling load from 8.93 MBtu (PE 3 mm) to 7.72 MBtu (PU 50 mm). The findings suggested that selecting thicker roof insulation effectively reduced energy usage and enhances energy efficiency in cleanrooms. Therefore, the appropriate insulation installation was a cost-effective strategy to reduce energy expenses and to improve building energy performance, with 50 mm thick Polyurethane (PU) offering the best results.

**Keywords:** Cleanroom, Cooling load, Energy consumption, Roof insulation

---

<sup>1</sup> Energy Engineering Technology, Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>2</sup> Department of Social and Applied Science, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>3</sup> Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

\* Corresponding author, E-mail: suphachai.worralers@gmail.com

## 1. บทนำ

ปัจจุบัน การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของประชากรและเทคโนโลยี ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สังคมจึงหันมาใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อม แม้แต่สงครามก็มีส่วนทำให้โลกร้อน จากการใช้พลังงานจำนวนมาก โรงงานผลิตยาแห่งหนึ่ง จึงพัฒนาคลีนรูมต้นแบบด้วยวัสดุประหยัดพลังงาน เพื่อลดผลกระทบและใช้เป็นต้นแบบการพัฒนาต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาสมรรถนะฉนวนหลังคาที่มีผลกระทบ ต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมโดยใช้โปรแกรม OpenStudio

## 3. การทบทวนวรรณกรรม

OpenStudio และ EnergyPlus เป็นเครื่องมือ สำหรับการจำลองการใช้พลังงานในหลังคา โดย EnergyPlus ทำหน้าที่เป็นกลไกการจำลอง (Simulation engine) ที่คำนวณการใช้พลังงานโดยอาศัยแบบจำลอง ทางกายภาพ (Physical model) ซึ่งใช้สมการทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างหลังคา กับ สิ่งแวดล้อมรอบตัวหลังคา การคำนวณนี้อยู่บนพื้นฐาน ของสมดุลความร้อน สำหรับ OpenStudio เป็นโปรแกรม ประเภทอินเทอร์เฟซสำหรับการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (Application Programming Interface: API) ที่ใช้ในการจัดการข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ข้อมูลสภาวะอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม และรังสีอาทิตย์ สำหรับการตรวจสอบการใช้พลังงาน (Energy audit) และการตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง การคำนวณ แบบจำลองพลังงานของ EnergyPlus อาศัยหลักการ สมดุลความร้อน ซึ่งครอบคลุมถึงสมดุลความร้อนที่พื้นผิว สมดุลความร้อนในอากาศ และการจำลองระบบหลังคา การถ่ายเทความร้อนของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผล ต่อการสร้างภาระโหลดของอาคาร ส่งผลต่อการ ใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ การวิเคราะห์คุณสมบัติ

ของวัสดุต่าง ๆ จะใช้ U-value เป็นตัวชี้วัด หรือค่า การถ่ายเทความร้อน ซึ่งคำนวณได้จากค่าความต้านทาน ความร้อน (Thermal resistance) ของวัสดุ ความต้านทานความร้อนของวัสดุที่มีความหนา  $L$  (m) และมีค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อน  $k$  ( $W/m \cdot ^\circ C$ ) ความต้านทาน ความร้อน  $R$  ( $m^2 \cdot K/W$ ) คำนวณได้จากสมการ (1)

$$R = \frac{L}{k} \quad (1)$$

เมื่อ

$R$  คือ ค่าการต้านทานความร้อน ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )

$L$  คือ ความหนาของชั้นวัสดุ (m)

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

การคำนวณค่า U-value คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อน ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) ซึ่งได้จากการกลับค่าสมการของ ความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Thermal resistance) ของส่วนประกอบนั้น ๆ โดยรวมถึงความต้านทานของ ชั้นวัสดุแต่ละชั้นและฟิล์มอากาศภายในและภายนอก คำนวณได้จากสมการ (2)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (2)$$

เมื่อ

$U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวม ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$h_o$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ภายนอก ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$h_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ภายใน ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$L_n$  คือ ความหนาของวัสดุในชั้นที่  $n$  (m)

$k_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ชั้นที่  $n$  ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

การคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารทางหลังคามีลักษณะเช่นเดียวกับการผ่านพื้นที่ผนัง โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุหลังคา และฝ้าเพดาน รวมถึงสีและความหนาแน่นของมวลหลังคา สำหรับวัสดุผนังหลังคาและฉนวนที่นิยมใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบัน พบว่ามีค่าพลังงานความร้อนต่อตารางเมตรสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตามประกาศกระทรวงพลังงาน (2552) [1] ซึ่งอยู่ที่ 25 W/ m<sup>2</sup> คำนวณได้จากสมการ (3)

$$RTTV_i = U_r(1 - SRR)(TD_{eq}) + U_s(SRR)(\Delta T) + (SRR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (3)$$

เมื่อ

$RTTV_i$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารส่วนที่พิจารณา (W/ m<sup>2</sup>)

$U_r$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาทึบ (W/ m<sup>2</sup> °C)

$SRR$  คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาส่วนที่พิจารณา

$TD_{eq}$  คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent temperature difference) ระหว่างภายนอกและภายในของหลังคา ซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคา (°C)

$U_s$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (W/ m<sup>2</sup> °C)

$\Delta T$  คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกหลังคา (°C)

$SHGC$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง

$SC$  คือ สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด

$ESR$  คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาโปร่งแสง และ/หรือหลังคาทึบแสง (W/m<sup>2</sup>)

$$q''_{\infty, sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} + q''_{ko} = 0 \quad (4)$$

เมื่อ

$q''_{\infty, sol}$  คือ รังสีอาทิตย์ที่ดูดซับโดยตรงและกระจาย และฟลักซ์ความร้อน (W/m<sup>2</sup>)

$q''_{LWR}$  คือ การแลกเปลี่ยนฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนกับอากาศ และสภาพแวดล้อม (W/m<sup>2</sup>)

$q''_{conv}$  คือ การแลกเปลี่ยนฟลักซ์หมุนเวียนกับอากาศ ภายนอก (W/m<sup>2</sup>)

$q''_{ko}$  คือ ฟลักซ์การนำความร้อนสู่ผนัง (W/m<sup>2</sup>)

$$q''_{LWR} = \varepsilon \sigma F_{\text{gnd}} (T_{\text{gnd}}^4 - T_{\text{surf}}^4) + \varepsilon \sigma F_{\text{sky}} (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{surf}}^4) + \varepsilon \sigma F_{\text{air}} (T_{\text{air}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \quad (5)$$

เมื่อ

$\varepsilon$  คือ การปล่อยคลื่นช่วงยาวของพื้นผิว

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>

$F_{\text{gnd}}$  คือ ค่าปรับแก้ของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิพื้นผิวดิน

$F_{\text{sky}}$  คือ ค่าปรับแก้ของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิของท้องฟ้า

$F_{\text{air}}$  คือ ค่าปรับแก้ของพื้นผิวผนังต่ออุณหภูมิอากาศ

$T_{\text{surf}}$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก (°C)

$T_{\text{gnd}}$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวดิน (°C)

$T_{\text{sky}}$  คือ อุณหภูมิท้องฟ้า (°C)

$T_{\text{air}}$  คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

$$q''_{conv} = h_{c, ext} A (T_{surf} - T_{air}) \quad (6)$$

เมื่อ

$q''_{\text{conv}}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนภายนอก ( $W/m^2$ )

$h_{\text{c,ext}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก

$A$  คือ พื้นที่ผิว ( $m^2$ )

$T_{\text{surf}}$  คือ อุณหภูมิพื้นผิว ( $^{\circ}C$ )

$T_{\text{air}}$  คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก ( $^{\circ}C$ )

$$q''_{\text{ko}}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t+j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t+j\delta} \quad (7)$$

เมื่อ

$T$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )

$T_o$  คือ อุณหภูมิขององค์ประกอบภายนอกของหลังคา ( $^{\circ}C$ )

$T_i$  คือ อุณหภูมิขององค์ประกอบภายในของหลังคา ( $^{\circ}C$ )

$I$  คือ องค์ประกอบภายในอาคาร

$O$  คือ องค์ประกอบภายนอกอาคาร

$X, Y$  คือ ปัจจัยตอบสนอง

โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

การศึกษามลกระทบของรูปทรงอาคาร การระบายอากาศตามธรรมชาติ และแผงบังแดดต่อสมรรถนะความร้อนของอาคารที่พักอาศัยสามรูปแบบ (สี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปแอล และรูปยู) ในฤดูร้อนที่กรุงฮัมมาน ประเทศจอร์แดน โดยใช้โปรแกรม SketchUp กับ plug-in OpenStudio ออกแบบและจำลองผลด้วย EnergyPlus โดยประเมินความสบายเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ASHRAE-55 และแบบจำลอง Fanger พบว่า การระบายอากาศตามธรรมชาติร่วมกับอุปกรณ์บังแดดช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคารได้สูงสุด  $8.85^{\circ}C$  ในเวลากลางวัน และ  $12.70^{\circ}C$  ในเวลากลางคืน ซึ่งปรับปรุงความสบายเชิงความร้อนของอาคารทุกรูปแบบ [4]

การจำลองแบบไดนามิกได้รับการพัฒนาใน TRNSYS โดยเชื่อมโยงกับโค้ด Fortran เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของกลยุทธ์ระบบกักเก็บพลังงานแบบสองระดับ อาคารสำนักงานขนาดกลางทั่วไปถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้ OpenStudio-EnergyPlus เพื่อจำลองความต้องการพลังงานรายชั่วโมงในแต่ละสภาพภูมิอากาศ อีกทั้งพัฒนาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อทำให้อาคารสำนักงานสามารถแยกตัวจากโครงข่ายไฟฟ้าได้ [5]

การสร้างแบบจำลองอาคารและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศแบบสารดูดความชื้นในอาคารของสถาบันในเขตภูมิอากาศกึ่งร้อนชื้นที่มีลักษณะคล้ายกับภูมิอากาศในเซ็นทรัลควีนส์แลนด์ โดยใช้ OpenStudio เพื่อกำหนดความต้องการด้านความร้อนและความเย็นของอาคาร จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศแบบ VRF ที่ติดตั้งอยู่ในอาคารอ้างอิง โดยการพัฒนาแบบจำลองใน EnergyPlus (EP) แบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลการวัดที่บันทึกจากระบบบริหารจัดการอาคาร (BMS) หลังจากนั้นได้ทำการเพิ่มระบบปรับอากาศแบบสารดูดความชื้น (Desiccant Air Conditioning: DAC) เข้าไปในแบบจำลองเพื่อช่วยลดความชื้นของอาคารอ้างอิงให้สามารถบรรลุสถานะความสบายทางความร้อนในแง่ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ [5]

วิจัยพัฒนาหลังคาเย็นใหม่ใช้ฟิล์ม metamaterial "RadiCold" ที่มีคุณสมบัติต้านแสงและความร้อนโดดเด่น พร้อมปรับปรุงโมเดลคำนวณ RTTV ให้แม่นยำขึ้น โดยรวมผลกระทบของมวลความร้อนหลังคาโดยการทดสอบในสามเมืองสหรัฐฯ (Tucson, Los Angeles, Orlando) เปรียบเทียบวัสดุหลังคา Shingle, TPO และ RadiCold พบว่า RadiCold กระจายความร้อนได้ดีที่สุด ผลลัพธ์แสดงการประหยัดไฟฟ้า  $113.0 - 143.9 \text{ kWh}/(m^2 \cdot \text{yr})$  เมื่อเทียบกับ Shingle และ  $88.0 - 92.4 \text{ kWh}/(m^2 \cdot \text{yr})$  เมื่อเทียบกับ TPO [6]

การวิจัยนี้พัฒนารูปแบบการคำนวณ RTTV สำหรับหลังคาเขียวในเขตร้อนชื้น โดยตรวจสอบความแม่นยำของโมเดลการถ่ายโอนความร้อนด้วยข้อมูลภาคสนาม และจำลองความร้อนผ่านหลังคาเขียว 4 ประเภท

ผลการคำนวณ RTTV อยู่ในช่วง 2.29-2.49 W/m<sup>2</sup> และพัฒนาแบบจำลองการถดถอย 3 รูปแบบ พบว่า multilayer perceptron (MLP) มีความแม่นยำสูงกว่า multiple regression และ random forest สุดท้ายคำนวณค่าความต้านทานความร้อนเทียบเท่าของชั้นพืชเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบง่าย 5 แบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพความร้อนของหลังคาเขียวในขั้นตอนของการออกแบบ [7]

#### 4. ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นออกแบบและจำลองการทำงานของหลังคาห้องคลีนรูมโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ห้องคลีนรูม จากรูปที่ 1 ขนาด 4.20 x 4.20 x 2.50 m, เครื่องจักร 10 kW, แสงสว่าง 56 W, จำนวนผู้ปฏิบัติงาน 4 ท่าน และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องที่ 22°C ใช้ PIR หนา 50 mm เป็นผนังและฝ้าใช้เวลา 12 เดือน ในการวิเคราะห์การทำงานกำหนดอุณหภูมิ 25°C ตามมาตรฐาน ISO 14644 โดยเลือกวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ไม่มีการติดฉนวนโดยติดเพียงหลังคา Metal sheet หนา 0.47 mm, ฉนวน Polyethylene (PE) ที่ความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm, 10 mm และฉนวน Polyurethane (PU) ที่ความหนา 25 mm และ 50 mm เพื่อศึกษาหาสมรรถนะของหลังคาห้องคลีนรูมในสภาวะต่าง ๆ โดยวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติการนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความร้อนจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 1

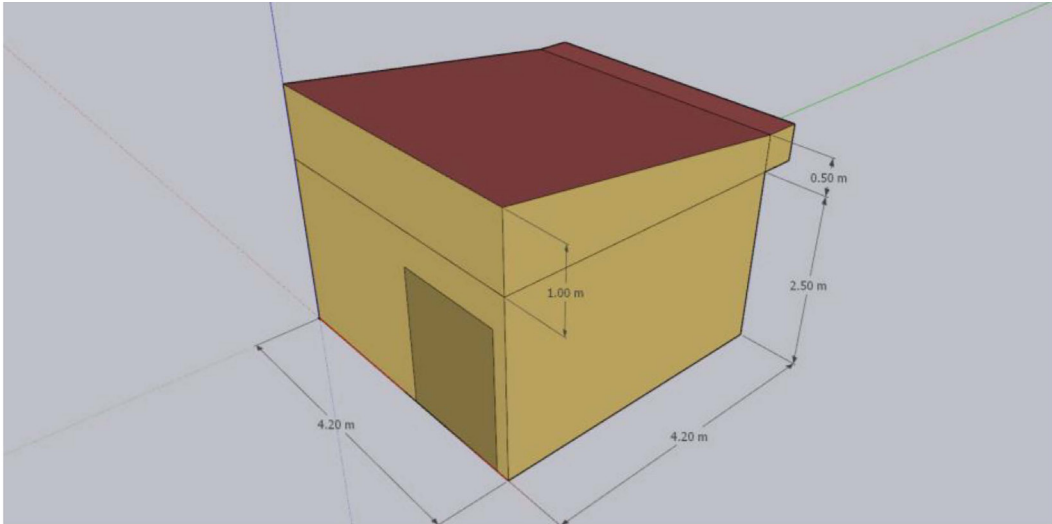
#### วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบและจำลองผนังห้องคลีนรูมด้วยโปรแกรม OpenStudio เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานความร้อนของวัสดุ โดยใช้แผ่นโลหะหนา 0.47 mm และวัสดุฉนวนสองชนิด ได้แก่ Polyethylene (PE) หนา 3, 4, 5 และ 10 mm และ Polyurethane (PU) หนา 25 และ 50 mm กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วยการตั้งค่าโครงการ สร้างแบบจำลอง กำหนดภาระพลังงาน เลือกเครื่องกลและจำลองผล ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้อย่างเป็นระบบ เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในอนาคต [8]

การใช้ OpenStudio จำลองพลังงานหลังคาเริ่มจากการสร้างโครงการใหม่และตั้งค่าข้อมูลพื้นฐาน เช่น ชื่อ สถานที่ และฐานข้อมูลภูมิอากาศ จากนั้นสร้างแบบจำลองหลังคาใน Geometry tab กำหนดขนาด รูปทรง และการแบ่งโซน กำหนดภาระพลังงานใน Loads tab ระบุปริมาณพลังงานแต่ละส่วนและตารางการใช้งาน ตั้งค่าการควบคุมใน Schedules Tab และ Thermostat setpoints เพื่อจัดการอุณหภูมิแต่ละโซน เลือกเครื่อง HVAC ที่เหมาะสมใน HVAC systems tab เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงาน เมื่อตั้งค่าครบถ้วนแล้วทำการจำลองใน Run Simulation Tab และวิเคราะห์ผลลัพธ์จาก Results summary ในรูปแบบกราฟ ตาราง หรือรายงานตัวเลข OpenStudio ช่วยให้การจำลองและวิเคราะห์การใช้พลังงานหลังคาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ

ตารางที่ 1 แสดงค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [9]

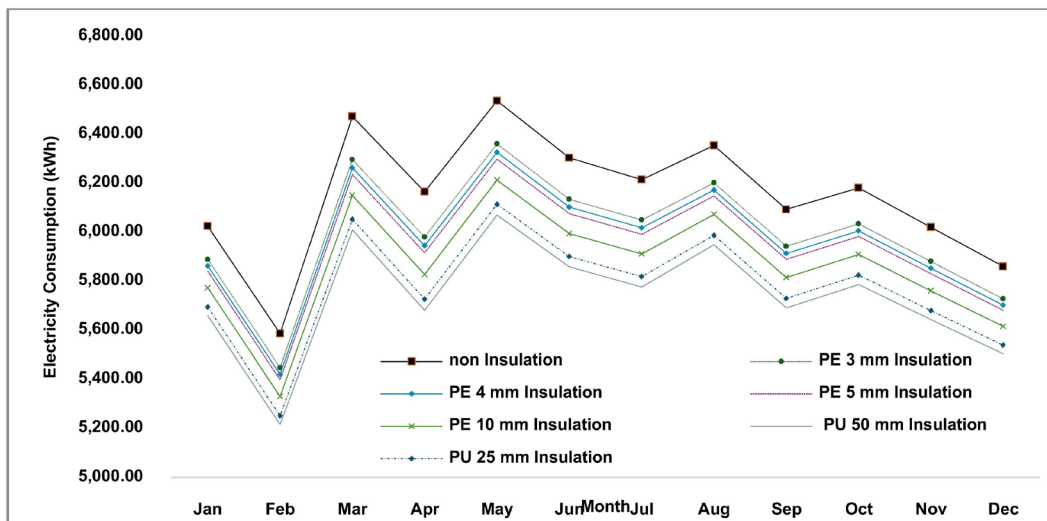
| วัสดุ        | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน<br>( $k$ , W/m·°C) | ความหนาแน่น<br>( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> ) | ค่าความร้อนจำเพาะ<br>( $c_p$ , kJ/kg·°C) |
|--------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Metal Sheet  | 211                                             | 2,672                                         | 0.896                                    |
| Polyethylene | 0.029                                           | 45                                            | 1.210                                    |
| Polyurethane | 0.026                                           | 40                                            | 1.590                                    |



รูปที่ 1 ขนาดห้องและหลังคาของห้องคลีนรูม

จากการจำลองของโปรแกรม OpenStudio สำหรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity consumption) การใช้งานไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) และปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละเดือน (Monthly load profiles) ที่แสดงในตารางมีความสำคัญในการเข้าใจผลกระทบของการออกแบบหลังคาต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า

ในกรณีนี้จะพูดถึงผลกระทบที่เกิดจากการใช้วัสดุฉนวนหลังคา (Roof insulation) ที่มีความหนาต่างกัน ซึ่งจะสามารถช่วยในการประเมินผลการใช้พลังงานในหลังคาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในอาคาร แสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity consumption) ของห้องคลินิกที่ติดตั้งฉนวนหลังคาแต่ละวัสดุ

จากรูปที่ 2 แสดงถึง การใช้พลังงานไฟฟ้า มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาของฉนวนกันความร้อนบนหลังคา โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

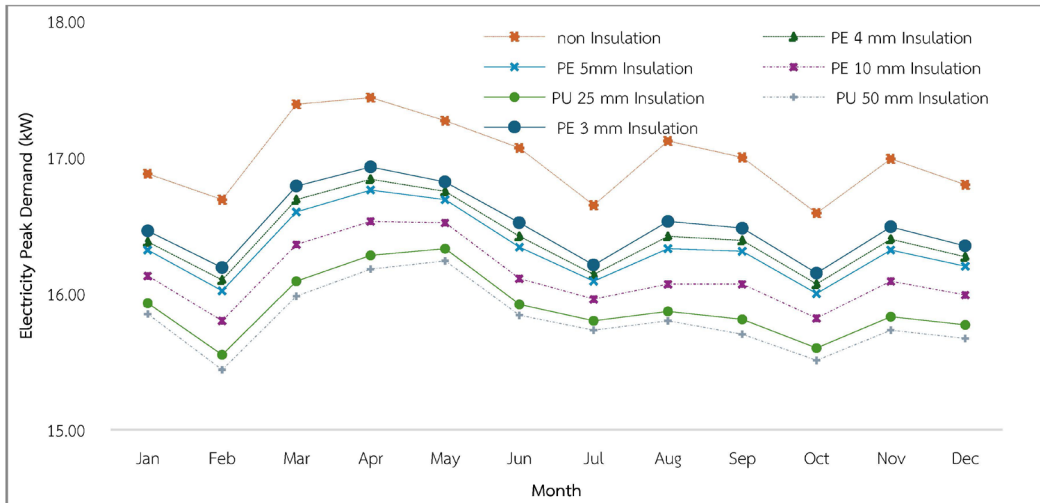
การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม แสดงถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในอาคารตลอดทั้งปี ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน พบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมสูงสุดอยู่ที่ 73,811.77 kWh ในขณะที่หลังคาที่มีฉนวน PU 50 mm มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมลดลงเหลือ 68,839.33 kWh ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มความหนาของฉนวนจากที่ไม่ติดตั้งเลยเป็นการติดตั้ง PU 50 mm ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้ประมาณ 6.73%

ระบบทำความเย็นเป็นส่วนที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในอาคาร โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนขึ้น ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบทำความเย็นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบทำความเย็นอยู่ที่ 31,396.78 kWh ในขณะที่หลังคาที่มีฉนวน PU 50 mm ลดลงเหลือ 27,159.36 kWh ซึ่งเป็นการลดลงประมาณ 13.49%

การลดลงของการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดจากคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนที่ช่วยลดการถ่ายเท

ความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร จากหลักการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ฉนวนกันความร้อนมีหน้าที่หลักในการลดการนำความร้อน (Conduction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านวัสดุจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อฉนวนกันความร้อนมีความหนาเพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อน (R-value) จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารได้น้อยลง ทำให้ระบบทำความเย็นไม่ต้องทำงานหนักเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้คงที่ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรมพลังงานที่ว่า การลดภาระการทำความเย็น (Cooling load) จะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนกันความร้อน โดยแสดงแผนภาพความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) ของการติดตั้งฉนวนกันความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity Peak Demand) ของห้องคลีนรูมที่ติดตั้งฉนวนหลังคาแต่ละวัสดุ

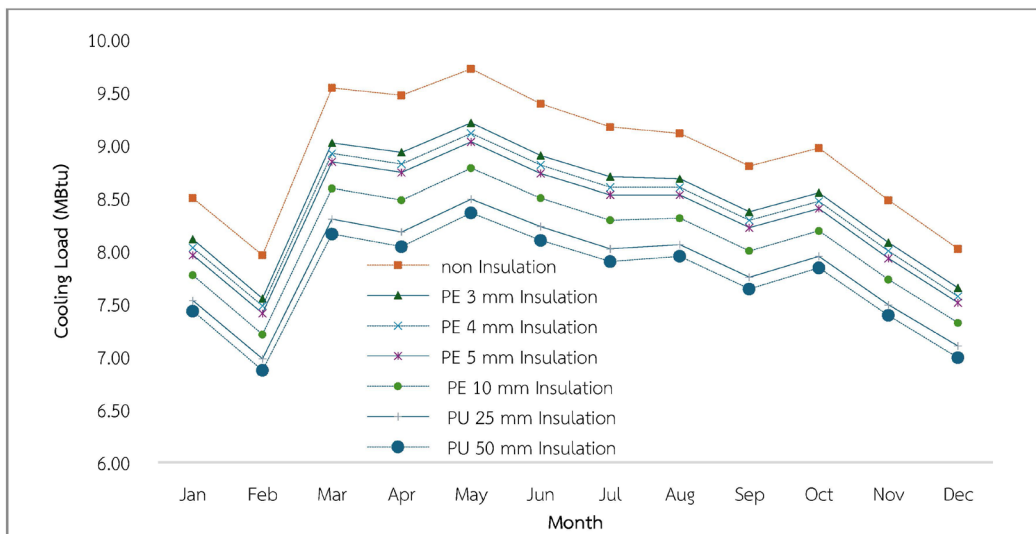
จากรูปที่ 3 สามารถอธิบายในเรื่องของความ ต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้ดังนี้

ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน พบว่า ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดรวมอยู่ที่ 203.88 kW ในขณะที่หลังคาที่มีฉนวน PU 50 mm ลดลงเหลือ 189.67 kW ซึ่งเป็นการลดลงประมาณ 6.97 % ระบบ ทำความเย็นเป็นส่วนที่ส่งผลต่อความต้องการไฟฟ้าสูงสุด มากที่สุด ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด จากระบบทำความเย็นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่ม ความหนาของฉนวน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของหลังคา ที่ไม่มีฉนวน ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดจากระบบ ทำความเย็นอยู่ที่ 80.11 kW ในขณะที่หลังคาที่มี ฉนวน PU 50 mm ลดลงเหลือ 66.72 kW ซึ่งเป็นการลดลงประมาณ 16.71%

ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด มักเกิดขึ้นในช่วงเวลา ที่ระบบทำความเย็นทำงานหนักที่สุด ซึ่งมักสัมพันธ์

กับอุณหภูมิภายนอกที่สูงขึ้น ฉนวนกันความร้อน ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้ ระบบทำความเย็นไม่ต้องทำงานหนักในช่วงเวลาที่มี ความต้องการสูงสุด ส่งผลให้ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ลดลง ตามหลักการของระบบไฟฟ้า (Electrical system) การลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้าน พลังงาน (Energy cost) และลดความเครียดของระบบ ไฟฟ้า (Electrical grid stress) ซึ่งเป็นประโยชน์ทั้งใน ระดับผู้ใช้และระดับระบบไฟฟ้าทั้งประเทศ

ภาระการใช้พลังงานรายเดือน (Monthly cooling load) และอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย (Average outdoor air dry bulb temperature) เป็นข้อมูลที่ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการใช้พลังงาน ในแต่ละเดือน แสดงแผนภาพการใช้พลังงานรายเดือน ของการติดตั้งฉนวนกันความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ภาระการใช้พลังงานรายเดือน (Monthly cooling load) ของห้องคลีนรูมที่ติดตั้งฉนวนหลังคาแต่ละวัสดุ

จากรูปที่ 4 สามารถอธิบายในเรื่องของภาระการทำความเย็นรายเดือน (Monthly cooling load) ลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับผลของวัสดุฉนวนต่อค่าภาระทางความร้อนประกอบด้วย

ประการแรก หลังคาที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนมีค่าภาระทางความร้อนสูงที่สุดในทุกเดือน เนื่องจากไม่มีวัสดุช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร ทำให้อาคารต้องใช้พลังงานในการทำความเย็นมากขึ้น

ประการต่อมา หลังคาฉนวน PE ความหนาต่าง ๆ หลังคาที่ใช้ฉนวน PE จะช่วยลดค่าภาระทางความร้อนได้เมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ไม่มีฉนวน ยิ่งความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้น จาก 3 mm เป็น 10 mm พบว่าค่าภาระทางความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการป้องกันความร้อนที่ดีขึ้นตามความหนาของวัสดุ

ประการสุดท้าย หลังคาฉนวน PU ความหนา 25 mm และ 50 mm วัสดุ PU มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนที่ดีกว่าฉนวน PE ซึ่งเห็นได้จากค่าภาระทางความร้อนที่ลดลงมากกว่า ฉนวน PU ความหนา 50 mm มีค่าภาระทางความร้อนต่ำที่สุดในทุกเดือน

แสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

## 5. วิจัย/อภิปรายผล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม OpenStudio ในการจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะของวัสดุฉนวนกันความร้อนหลังคาต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity consumption) ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) และภาระการใช้พลังงานรายเดือน (Monthly cooling load) ในห้องคลีนรูม โดยศึกษาฉนวนที่มีความหนาต่างกันของ PE และ PU

ผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม พบว่าห้องคลีนรูมที่ไม่มีการติดตั้งฉนวน ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดถึง 73,811.77 kWh ต่อปี ขณะที่หลังคาฉนวน PU 50 mm สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงเหลือ 68,839.33 kWh ซึ่งหมายถึงการลดลงประมาณ 6.73% สาเหตุหลักที่ทำให้การใช้พลังงานลดลง คือ ฉนวนช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคาร ทำให้ระบบทำความเย็นไม่ต้องทำงานหนักเท่ากับอาคารที่ไม่มีฉนวน

ผลกระทบต่อความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand) คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้มากที่สุด ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบระบบไฟฟ้า ห้องคลีนรูมที่ไม่มีฉนวน มี Peak demand สูงสุดที่ 203.88 kW ขณะที่ห้องคลีนรูมที่ใช้ ฉนวน PU 50 mm มี Peak Demand ลดลงเหลือ 189.67 kW หรือลดลงประมาณ 6.97% โดยเฉพาะในระบบทำความเย็น ซึ่งเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานหลัก มี Peak demand ลดลงถึง 16.71% เมื่อใช้ฉนวน PU 50 mm การลด Peak demand ช่วยลดค่าไฟฟ้าและลดภาระของระบบไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้พลังงานสูงสุด

ผลกระทบต่อภาระการใช้พลังงานรายเดือน ในทุกเดือนอาคารที่ไม่มีฉนวนมีภาระทำความเย็นสูงสุด เพราะไม่มีการป้องกันความร้อนจากภายนอก เมื่อใช้ ฉนวน PE (3 mm - 10 mm) ภาระทำความเย็นลดลงตาม ลำดับ ฉนวน PU (25 mm และ 50 mm) มีประสิทธิภาพ ดีที่สุดในการลดภาระความร้อน โดยฉนวน PU 50 mm ช่วยลดภาระการใช้พลังงานรายเดือนได้มากที่สุด

## 6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะฉนวนหลังคาห้องคลีนรูม พบว่า ฉนวนมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการ ใช้พลังงานโดยรวม โดยเฉพาะระบบทำความเย็นซึ่งใช้ พลังงานมากที่สุด การเพิ่มความหนาฉนวนหลังคาทำให้ การใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมลดลงอย่างชัดเจน โดย ฉนวน PU หนา 50 mm ให้ผลการประหยัดพลังงาน ดีที่สุด เนื่องจากช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อน จากภายนอก ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand) ลดลงเมื่อเพิ่มความหนาฉนวน ช่วยลดความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการใช้ พลังงานสูง อันเป็นผลจากการลดภาระการทำงานของ ระบบทำความเย็นและพัดลม การติดตั้งฉนวนที่เหมาะสม จึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนพลังงาน และปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร โดยเฉพาะฉนวน PU 50 mm ที่ให้ผลดีที่สุด

## 7. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมรรถนะวัสดุประกอบหลังคา ห้องคลีนรูม จะมีทั้งข้อดีและข้อเสียในคุณสมบัติของ วัสดุฉนวนแต่ละประเภท และจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า ช่วงเวลาในการทำงานของห้องคลีนรูมก็มีผลต่อ การเพิ่ม - ลด การใช้พลังงานด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่า ในช่วงเดือน มีนาคม - มิถุนายน จะใช้พลังงานไฟฟ้า ก่อนข้างสูงกว่าทุกเดือน โดยการศึกษาขึ้นจะเป็นแนวทาง หรือทางเลือกให้กับวิศวกร สถาปนิก และผู้ที่มีส่วน เกี่ยวข้องในการออกแบบก่อสร้างห้องคลีนรูมหรืออาคาร ที่มีความคล้ายคลึงกัน รวมไปถึงห้องคลีนรูมผลิตยาและ เครื่องมือแพทย์เพื่อการสนับสนุนทางการแพทย์ทหาร หรือเครื่องมือทางการแพทย์อื่น ๆ ที่ต้องมีการผลิต ภายใต้การควบคุมสภาวะแวดล้อมของห้องคลีนรูมนี้ เพื่อการสนับสนุนความมั่นคงทางการทหาร ในการป้องกันและรักษาอธิปไตยของประเทศชาติ ต่อไป งานวิจัยนี้มีส่วนสำคัญที่สามารถเลือกวัสดุ เพื่อนำมาเป็นฉนวนของหลังคาห้องคลีนรูมดังกล่าว ถ้าเลือกแบบมีสมรรถนะหลังคาที่สามารถป้องกันการ นำ การพา และการแผ่รังสีอาทิตย์ได้ดีก็จะได้มา ซึ่งการประหยัดพลังงานจากระบบ HVAC (Heating, ventilation, and air-conditioning) ทำงานน้อยลง หรือขนาดของระบบจะเล็กลงตามขนาดพิภคของ Cooling load แต่จะตามมาด้วยการลงทุนเริ่มต้น ในการก่อสร้างที่มีราคาสูงตามสมรรถนะของวัสดุที่มี การป้องกันที่ดี ส่วนที่มีการเลือกใช้สมรรถนะหลังคาต่ำ ก็ส่งผลให้การป้องกันรังสีอาทิตย์ได้ไม่ดี จึงทำให้ระบบ HVAC ทำงานหนักและทำให้พิภคของ Cooling load สูงขึ้น จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ต้นทุนในการก่อสร้างเริ่มต้นจะต่ำกว่าห้องคลีนรูม ที่มีสมรรถนะหลังคาที่ดี เป็นต้น

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Secretariat of the Cabinet, “Ministry of Energy Announcement on the Criteria and Methods for Calculating the Design of Each Building System, the Overall Energy Use of Buildings, and the Use of Renewable Energy in Various Building Systems, B.E. 2552,” in *Royal Thai Government Gazette*, Thailand, vol. 126, Special Part 122 Ngor, pp. 21 - 39, 2009. (in Thai).
- [2] N. Kampelis *et al.*, “An Integrated Energy Simulation Model for Buildings,” *Energies*, vol. 13, no. 5, p. 1170, 2020.
- [3] T. Chuaewong, S. Vorarat, and P. Rittidatch, “Energy Improvement of Building Frames in Government Office Buildings Using Energy Modeling: Case Study of Bang Mae Nang Municipality Office,” *EAU Heritage J. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 92 - 106, 2024.
- [4] E. S. Abbaas, M. Ismail, A. A. Saif, and M. A. Ghazali, “Optimizing the Thermal Performance of Residential Buildings in Jordan,” *J. Eng. Res.*, 2024. doi: 10.1016/j.jer.2024.05.025.
- [5] M. Rasul and C. Doring, “Performance Assessment of Desiccant Air Conditioning System in an Institutional Building in Subtropical Climate,” *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 486 - 491, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.173.
- [6] H. Fang *et al.*, “Performance Evaluation of a Metamaterial-Based New Cool Roof Using Improved Roof Thermal Transfer Value Model,” *Appl. Energy*. vol. 248, pp. 589 - 599, 2019.
- [7] Y. He, E. S. Lin, C. L. Tan, Z. Yu, P. Y. Tan, and N. H. Wong, “Model Development of Roof Thermal Transfer Value (RTTV) for Green Roof in Tropical Area: A Case Study in Singapore,” *Building Environ.*, vol. 203, p. 108101, 2021.
- [8] L. Brackney, A. Parker, D. Macumber, and K. Benne, *Building energy modeling with OpenStudio: A practical guide for students and professionals*. Springer, 2018.
- [9] *2021 ASHRAE Handbook: Fundamentals*, I-P ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, GA, USA, 2021.