

ผลของการปรับสัดส่วนการทำความเย็นของчилเลอร์ในระบบเก็บน้ำเย็นต่อการลดการใช้พลังงาน

ของระบบปรับอากาศ: กรณีศึกษาอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่

The Impact of Adjusting Chiller Cooling Ratios in a Chilled Water Storage System on Air Conditioning Energy Consumption Reduction: A Large Commercial Building Case Study

นาง สานคุณ², ธรรณิษฐ์ ดีทวยาท¹, อรรถกร อาสนคำ¹ และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์¹

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

² วิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

Abstract

This study investigates the potential to reduce energy usage of chillers for air conditioning in a large commercial building with maximum cooling load 1550 RT with relatively constant electricity demand during daytime and lower demand at night. It employs 2 units of existing 800 RT chiller systems integrated with a chilled water storage system and adopts a Partial Load Demand Limiting strategy, setting the chiller operation to 25%, 50%, and 75% of daytime requirements. The size of the chilled water storage tank depends on the chiller performance that varies with the designated cooling ratios and the amount of chill to be stored overnight for use during the day. Electrical energy savings calculations reveal that the 75% cooling ratio achieves the highest savings at 20.23% of existing units. Economic analysis indicates that the 75% cooling ratio offers the shortest payback period of 4.59 years with an internal rate of return of 27.12%. Furthermore, sensitivity analysis shows that electricity tariff rates significantly impact the payback period, with higher rates shortening the payback time.

Keywords: Chilled water storage; Chiller; Partial load demand limiting; Economic analysis

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของчилเลอร์ในการทำความเย็นเพื่อการปรับอากาศภายในอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่ที่มีความต้องการสูงสุด 1550 RT ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ในตอนกลางวันและมีความต้องการกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำในตอนกลางคืน โดยใช้ระบบเก็บสะสมความเย็นในรูปน้ำเย็นทำงานกับчилเลอร์ที่มีอยู่เดิมที่ขนาด 800RT จำนวน 2 ชุด และใช้แนวคิดของการจัดการพลังงานในรูปการกำหนดความต้องการภาระบางส่วน (Partial Load Demand Limiting) โดยกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของчилเลอร์เดิมที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน ขนาดของถังเก็บสะสมความเย็นจะขึ้นกับสมรรถนะของчилเลอร์ที่แปรตามสัดส่วนการทำความเย็นของчилเลอร์และความเย็นที่ต้องสะสมในช่วงกลางคืน เพื่อนำมาใช้ในช่วงกลางวัน จากการคำนวณพบว่าที่สัดส่วน 75% จะทำให้ระบบทำความเย็นประหยัดพลังงานสูงสุดที่ 20.23% ของการใช้ไฟฟ้าระบบเดิม และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์

ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าที่สัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์ที่ 75% ให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดที่ 4.59 ปี อัตราผลตอบแทนการลงทุนภายใน 27.12% นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ความไวพบว่าพารามิเตอร์อัตราค่าไฟฟ้าส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุนมากที่สุด ถ้าอัตราค่าไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลง

คำสำคัญ: ระบบเก็บสะสมความเย็นในรูปน้ำเย็น; ซิลเลอร์; การกำหนดความต้องการภาระบางส่วน; การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

บทนำ

ความต้องการพลังงานไฟฟ้าในอาคารโดยเฉพาะอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่ส่วนใหญ่เกิดจากความต้องการทำความเย็นเพื่อปรับอากาศภายในอาคาร จึงมีแนวทางในการจัดการพลังงานด้านความต้องการพลังงาน (Demand-sided management) ซึ่งนิยมใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปน้ำเย็น (Chilled water storage tank, CHWS) มาทำงานร่วมกับระบบซิลเลอร์ โดยมีการสะสมความเย็นในช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ (Off-peak period, OFFP) และนำมาใช้ในการทำความเย็น ในช่วงที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (On-peak period, ONP) [1-2] ซึ่งลักษณะการทำงานอาจจำแนกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบที่ 1 แบบซิลเลอร์ทำงานเต็มภาระ (Full Load) โดยซิลเลอร์ทำความเย็นสะสมใน CHWS เต็มกำลังที่กำหนด ในช่วง OFFP และความเย็นที่สะสมมาใช้ในการทำความเย็นให้กับภาระในช่วง ONP รูปแบบที่ 2 จะมีการปรับภาระเพียงบางส่วน (Partial Load Leveling) เพื่อช่วยลดภาระในช่วง peak และกระจายภาระทางด้านไฟฟ้าของอาคารไปให้ใกล้เคียงกันตลอดทั้งวัน และรูปแบบที่ 3 การกำหนดความต้องการภาระบางส่วน (Partial Load Demand Limiting) ซึ่งสามารถปรับระดับภาระการทำความเย็นของซิลเลอร์ได้ เช่น 25%, 50% หรือ 75% ในช่วง ONP และระบบเก็บสะสมน้ำเย็นจะจ่ายความเย็นให้เพียงบางส่วนของการทำความเย็น รูปแบบนี้จะช่วยลดขนาดของระบบสะสมพลังงาน เงินลงทุน และพลังงานที่ประหยัดได้ ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างรูปแบบที่ 1 และ 2

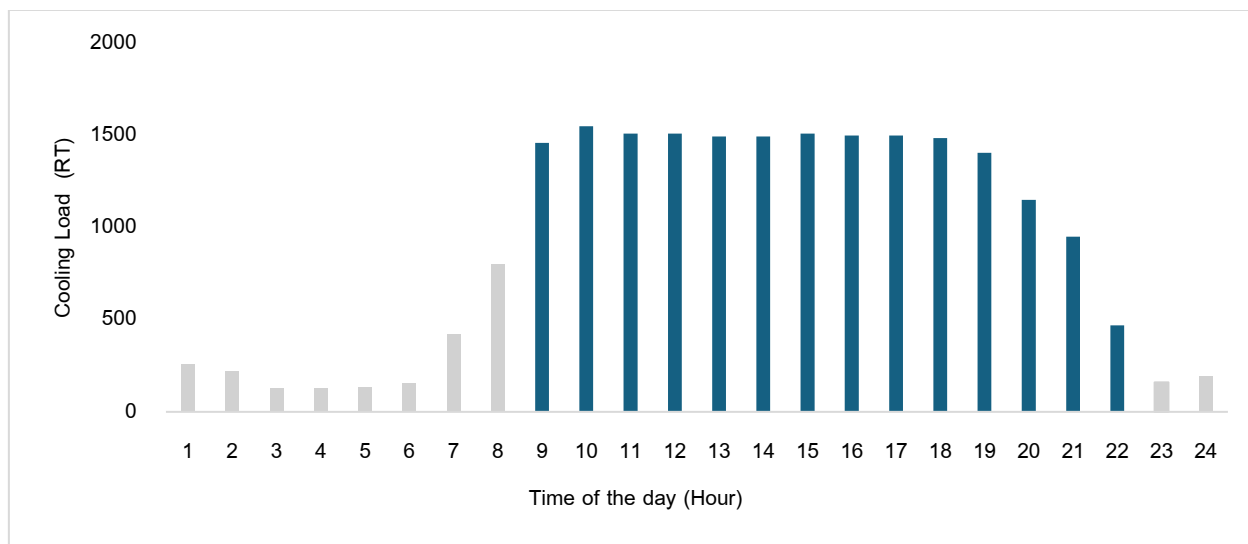
Dincer และคณะ [3] พบว่าวิธี Full storage จะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่มีการใช้ไฟฟ้าในช่วง ONP และอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าสูงรวมถึงมีภาระสูงสุดในช่วงเวลาสั้นๆ Sebzali และคณะ [4] ศึกษาแบบ CHWS ทำงานร่วมกับระบบปรับอากาศเทียบกับระบบปรับอากาศแบบทั่วไปในคลินิก สามารถลดภาระสูงสุดได้ 87.5% โดยวิธี Partial Load Leveling จะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ Boonnasa และ Namprakai [5] ศึกษาแบบ CHWS สำหรับอาคารในมหาวิทยาลัยพบว่าการทำงานซิลเลอร์สองยูนิต ยูนิตละ 450 RT คงที่ 24 ชั่วโมงร่วมกับระบบเก็บสะสมน้ำเย็น เป็นวิธีที่สามารถลดการใช้พลังงานได้มากที่สุด 35.7% เมื่อเทียบกับระบบปรับอากาศที่ไม่ใช้ CHWS โดยมีระยะเวลาคืนทุน 10 ปี และ IRR 21% Rahman และคณะ [6] ศึกษาแบบ CHWS ทั้ง 3 รูปแบบได้แก่ full, partial load leveling และ demand-limiting ในออสเตรเลีย พบว่าสามารถลดค่าไฟฟ้าได้ 61.19%, 33.94% และ 50.26% ตามลำดับ เทียบกับระบบปรับอากาศเดิม Comodi และคณะ [7] ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ CHWS กับอาคารพาณิชย์ในประเทศสิงคโปร์ที่มีการใช้อัตราค่าไฟฟ้าในช่วง ONP และ OFFP ซึ่งพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ อีกทั้งยังมีระยะเวลาคืนทุนต่ำสุดที่ 8.9 ปี, Alhikami และคณะ [8] ศึกษาการใช้ระบบ CHWS ในโรงพยาบาล โดยศึกษาทั้งหมด 6 รูปแบบได้แก่ full, partial load leveling และ demand-limiting ที่ 30%, 50%, 70%, และ 90% พบว่าในกรณีที่ลงทุนสร้างระบบทำความเย็นใหม่ รูปแบบ partial load leveling จะเหมาะสมที่สุด สามารถลดการใช้พลังงานได้ปีละ 10.5% หากเป็นการปรับปรุงจากระบบทำความเย็นเดิม รูปแบบ demand-limiting ที่ 30% จะเหมาะสมที่สุด สามารถลดการใช้พลังงานได้ปีละ 13% เมื่อเทียบกับระบบเดิม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปแบบน้ำเย็นที่ทำงานร่วมกับซิลเลอร์ไม่ว่าจะเป็นวิธี full, partial load leveling และ demand-limiting สามารถลดการใช้ไฟฟ้าลงได้ ซึ่งต้องพิจารณาในเรื่องของภาระการทำความเย็นของอาคารอัตราค่าไฟฟ้าในช่วง ONP และ OFFP รวมถึงภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่อีกด้วย งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษา ระบบ CHWS โดยเลือกใช้แนวคิดของการจัดการพลังงานในการกำหนดความต้องการภาระบางส่วน (Partial Load Demand Limiting) โดยกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน เพื่อให้สามารถใช้กับระบบซิลเลอร์ที่มีอยู่เดิม ลงทุนเพิ่มเฉพาะระบบ CHWS เท่านั้น โดยจะทำการศึกษาการใช้พลังงานเปรียบเทียบกับระบบซิลเลอร์เดิม ในเขตภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ที่เป็นอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่ รวมถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบระยะเวลาคืนทุนและอัตราผลตอบแทนภายใน เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด

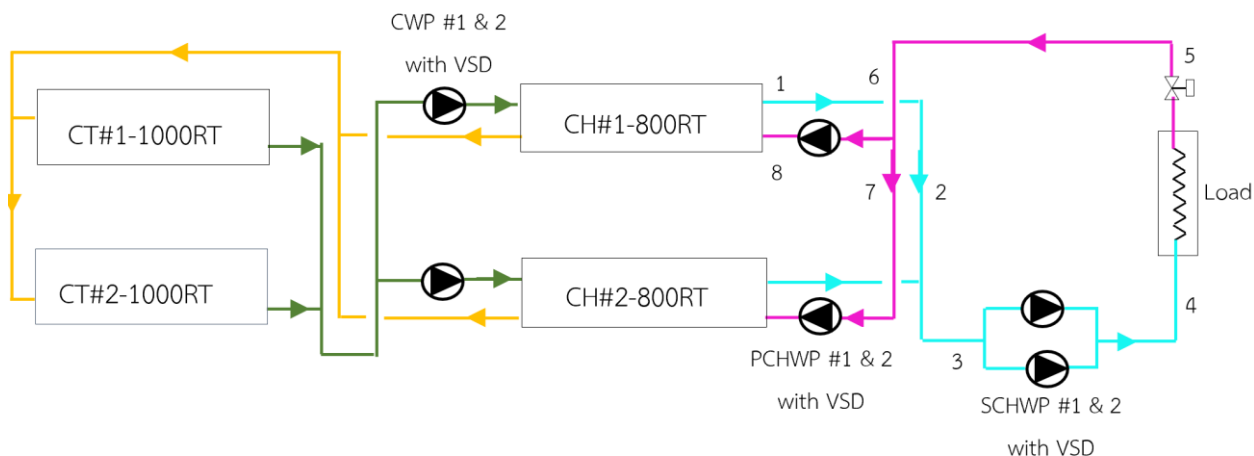
กรณีศึกษา

อาคารพาณิชย์ที่ทำการศึกษามีพื้นที่ที่ต้องมีการปรับอากาศ 28,000 m² อุณหภูมิภายนอกอาคารอยู่ในช่วง 34°C ถึง 40°C ตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (Tropical area) โดยมีภาระการทำความเย็นจากการเก็บข้อมูลจริงดังภาพที่ 1 ซึ่งพบว่าช่วงที่มีภาระการทำความเย็นสูงสุดจะอยู่ในช่วงกลางวันและจะมีภาระการทำความเย็นเพียงเล็กน้อยสำหรับการแช่เย็นอาหารและร้านขายของชำขนาดเล็กที่ยังเปิดบริการ ระบบการทำความเย็นด้วยซิลเลอร์สำหรับอาคารดังกล่าวจะแสดงในภาพที่ 2 โดยมีการใช้ซิลเลอร์ขนาด 800 RT [9] ทำงานต่อเนื่องเพื่อทำน้ำเย็นตามภาระการทำความเย็นที่ต้องการของอาคาร และในช่วงกลางคืนซิลเลอร์จะมีการทำงานเพียง 20-30% ของความสามารถสูงสุดซิลเลอร์ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ จึงเป็นเหตุผลในการศึกษา CHWS ที่เหมาะสมสำหรับอาคารแห่งนี้

ซิลเลอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบ centrifugal ที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยมีหอดึงเย็น 2 ชุด ชุดละ 1000 RT [10], ปั๊มน้ำเย็น (CWP) 2 ชุด ชุดละ 45 kW ในการหมุนเวียนน้ำระหว่างซิลเลอร์และหอดึงเย็น, ปั๊มน้ำปฐมภูมิ (PCHWP) 2 ชุด ชุดละ 30 kW และปั๊มน้ำทุติยภูมิ (SCHWP) 2 ชุด ชุดละ 40 kW ในการหมุนเวียนน้ำเย็นระหว่างซิลเลอร์และคอยล์เย็น (เส้น 1-4 และ 5-8)



ภาพที่ 1 ภาระทางความร้อนของอาคารพาณิชย์



ภาพที่ 2 แผนผังระบบการทำความเย็นของระบบเดิม

ระบบที่ทำการศึกษา

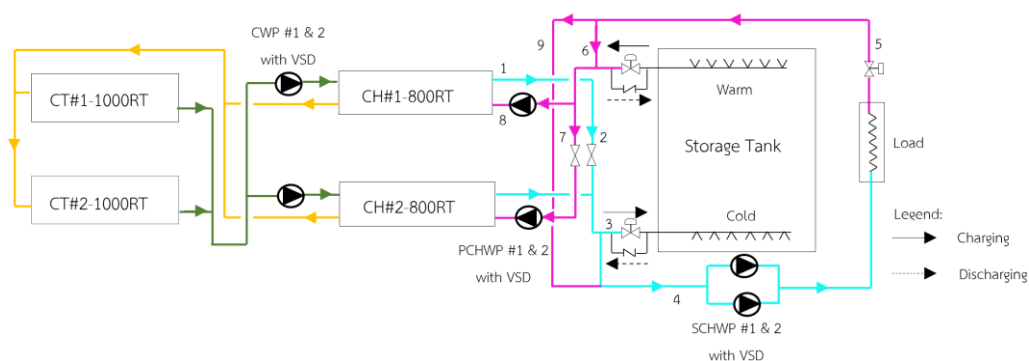
ในการศึกษานี้ต้องการภาระบางส่วน (Partial Load Demand Limiting) โดยกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน ขนาดของถังเก็บสะสมความเย็นจะขึ้นกับสมรรถนะของซิลเลอร์ที่แปรตามสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์และความเย็นที่ต้องสะสมในช่วงกลางคืน เพื่อนำมาใช้ในช่วงกลางวันโดยมีแผนผังดังภาพที่ 3

กระบวนการทำน้ำเย็นของระบบกักเก็บน้ำเย็น

น้ำเย็นที่อุณหภูมิเฉลี่ย 5.6°C จากซิลเลอร์ไหลไป 2 ทิศทาง ส่วนที่หนึ่ง (เส้น 2-4) ไปยังคอยล์เย็นของอาคารเมื่อมีต้องการการทำความเย็น อีกส่วนนั้นจะไปที่ถังน้ำเย็น (เส้น 2-3) เพื่อเก็บสะสมไว้ น้ำหลังจากผ่านคอยล์เย็นที่อุณหภูมิเฉลี่ย 12.6°C (เส้นที่ 5) และน้ำที่อุณหภูมิสูงในส่วนบนของถังน้ำเย็นจะไหลกลับไปที่ซิลเลอร์เพื่อลดอุณหภูมิอีกครั้งหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากน้ำที่ผ่านคอยล์เย็นยังมีอุณหภูมิต่ำจะถูกหมุนเวียนกลับมาที่คอยล์อีกครั้งด้วยบายพาส (เส้น 9-2-3-4)

กระบวนการใช้น้ำเย็นของระบบกักเก็บน้ำเย็น

การป้อนน้ำเย็นแก่คอยล์เย็นเพื่อลดภาระการทำความเย็นภายในอาคารสำหรับกรณี Partial Load Demand Limiting จะดึงน้ำเย็นจากถังเก็บและจากซิลเลอร์พร้อมกันโดยในการศึกษานี้จะกำหนดให้มีการดึงน้ำเย็นจากซิลเลอร์ที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน



ภาพที่ 3 แผนผังระบบการทำความเย็นในรูปการกำหนดความต้องการภาระบางส่วน (Partial Load Demand Limiting)

ขนาดถังเก็บน้ำเย็น

ขนาดถังน้ำเย็นสามารถประเมินได้จากปริมาณน้ำเย็นที่ต้องใช้ในช่วงกลางวันขึ้นกับผลต่างระหว่างปริมาณน้ำเย็นที่ผลิตได้จากซิลเลอร์และภาระการทำความเย็นที่อาคารต้องการในแต่ละชั่วโมง สามารถคำนวณได้จาก [11]

$$V(\text{theory}) = \frac{3600 \times \text{Daily Storage Capacity (kWh)}}{\rho \times C_{pw} \times (T_{CHWR} - T_{CHWS}) \times FOM} \quad (1)$$

V คือขนาดถังน้ำเย็น (m^3), ρ คือความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3), C_{pw} คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$), T_{CHWS} และ T_{CHWR} ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าและออกถังน้ำเย็น ($^\circ\text{C}$) ในการศึกษากำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7°C , FOM ตัวแปรไร้มิติ ในการศึกษาใช้ค่าเท่ากับ 0.9

ปั๊มน้ำเย็น

1. ปั๊มน้ำเย็นปฐมภูมิ

ปั๊มน้ำเย็นปฐมภูมิใช้ในการหมุนเวียนน้ำระหว่างซิลเลอร์และถังเก็บน้ำเย็น อัตราการไหลของปั๊มสามารถคำนวณได้ดังสมการ [11]

$$\dot{m}_{PCHWP} = \frac{RT_{chiller} \times 3.517}{C_{pw} \times (T_{CHWR} - T_{CHWS})} \quad (2)$$

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับปั๊มน้ำดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ (3) ในการศึกษาที่กำหนดให้ความสูง (operating head), ประสิทธิภาพปั๊มและมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 20 เมตร, 85%, and 95%, ตามลำดับ [11]

$$P_{pump} = \frac{(\dot{m}_{PCHWP})(g)(h)}{10^3 (\eta_p)(\eta_m)} \quad (3)$$

เมื่อ $RT_{chiller}$ คือขนาดของซิลเลอร์, $\dot{m}_{PCHWP}$ อัตราการไหล (kg/s), g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2), h ความสูง (m), η_p ประสิทธิภาพปั๊ม, η_m ประสิทธิภาพมอเตอร์ ซึ่งกำลังของปั๊มเมื่อมีภาระการทำความเย็นแค่บางส่วน [9] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{pump@part\ load\ (kW)} = P_{pump\ @\ full\ load} \times PPR \quad (4)$$

เมื่อ PPR คือ pump power ratio: $PPR = ax + bx^2 + cx^3$, x คือ part load ratio ของซิลเลอร์ a, b และ c คือค่าคงที่: $a=0.0205$, $b=0.4101$, $c=0.5753$.

2. ปั๊มน้ำเย็นทุติยภูมิ

ปั๊มน้ำเย็นทุติยภูมิใช้ในการหมุนเวียนน้ำระหว่างถังเก็บน้ำเย็นและคอยล์เย็น อัตราการไหลของปั๊มน้ำขึ้นกับภาระการทำความเย็นของอาคารสามารถคำนวณได้ดังสมการ (5) ในการศึกษาที่กำหนดให้ความสูง (operating head),

ประสิทธิภาพปั๊มและมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 28 เมตร, 85%, and 95%, ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าของปั๊มสามารถคำนวณจากสมการ (3,4) [11]

$$\dot{m}_{SCHWP} = \frac{RT_{load} \times 3.517}{C_{pw} (T_{CHWR} - T_{CHWS})} \quad (5)$$

3. ปั๊มน้ำหล่อเย็น

ปั๊มน้ำหล่อเย็นใช้ในการหมุนเวียนน้ำระหว่างหอผึ่งเย็นและคอนเดนเซอร์ของซิลเลอร์ ผลต่างอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าและขาออกหอผึ่งเย็น ($T_{CWR} - T_{CWS}$) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5.5 °C กำหนดให้ความสูง (operating head), ประสิทธิภาพปั๊มและมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 25 เมตร, 85%, and 95%, ตามลำดับและกำลังไฟฟ้าของปั๊มสามารถคำนวณจากสมการ (3,4) [11]

$$\dot{m}_{CWP} = \frac{RT_{CT_required} \times 3.517}{C_{pw} (T_{CWR} - T_{CWS})} \quad (6)$$

ผลการศึกษา

1. การระการทำความเย็นของซิลเลอร์ในกรณีต้องการภาระบางส่วน

การระการทำความเย็นในแต่ละชั่วโมงของซิลเลอร์ระบบเดิมและการทำความเย็นของซิลเลอร์ในกรณีต้องการภาระบางส่วนโดยกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน แสดงดังภาพที่ 4

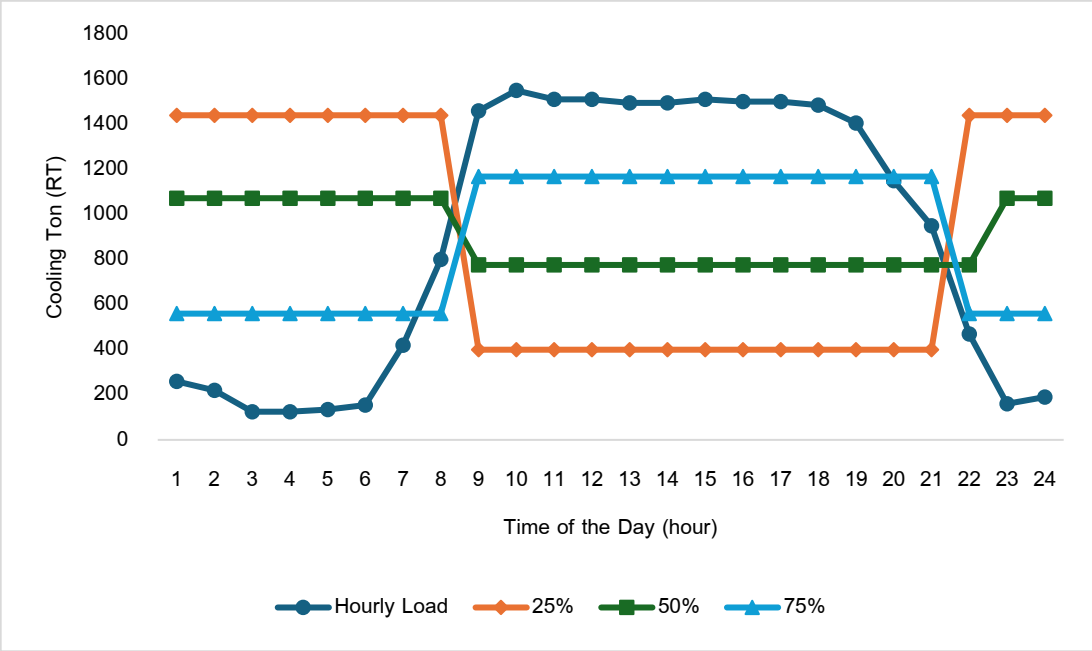
ในกรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25% ของความต้องการในช่วงกลางวัน, ซิลเลอร์ขนาด 800 RT 2 ยูนิตจะทำงานที่ 80% ของความสามารถสูงสุดในช่วง off-peak (10:00 p.m. ถึง 9:00 a.m. ในวันถัดมา) และซิลเลอร์ 1 ยูนิตจะทำงานที่ 50% ในช่วงเวลา on-peak (9:00 a.m. ถึง 10:00 p.m.) ขนาดถังเก็บน้ำเย็นที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 12,780 RTh ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำความเย็นช่วยซิลเลอร์ทั้งสองยูนิตในช่วงเวลา on-peak และ off-peak

กรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 50% ของความต้องการในช่วงกลางวัน, ซิลเลอร์ขนาด 800 RT 2 ยูนิตจะทำงานที่ 67% ของความสามารถสูงสุดในช่วง off-peak (10:00 p.m. ถึง 9:00 a.m. ในวันถัดมา) และซิลเลอร์ 1 ยูนิตจะทำงานที่ 97% ในช่วงเวลา on-peak (9:00 a.m. ถึง 10:00 p.m.) ขนาดถังเก็บน้ำเย็นที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 8,436 RTh ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำความเย็นช่วยซิลเลอร์ทั้งสองยูนิตในช่วงเวลา on-peak และ off-peak โดยถังน้ำจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25% ของความต้องการในช่วงกลางวัน

กรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน, ซิลเลอร์ขนาด 800 RT เพียง 1 ยูนิตจะทำงานที่ 70% ของความสามารถสูงสุดในช่วง off-peak (10:00 p.m. ถึง 9:00 a.m. ในวันถัดมา) และซิลเลอร์ 2 ยูนิตจะทำงานที่ 73% ในช่วงเวลา on-peak (9:00 a.m. ถึง 10:00 p.m.) ขนาดถังเก็บน้ำเย็นที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 3,576 RTh ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำความเย็นช่วยซิลเลอร์ทั้งสองยูนิตในช่วงเวลา on-peak และ off-peak

โดยถึงน้ำจะมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25 และ 50% ของความต้องการในช่วงกลางวัน

โดยตารางที่ 2 แสดงภาระการทำความเย็นของซิลเลอร์, การทำน้ำเย็นเก็บไว้ในถัง และการดึงน้ำเย็นจากถังมาใช้ในช่วง on-peak และ off-peak ในกรณีต่างๆ เทียบกับระบบเดิม

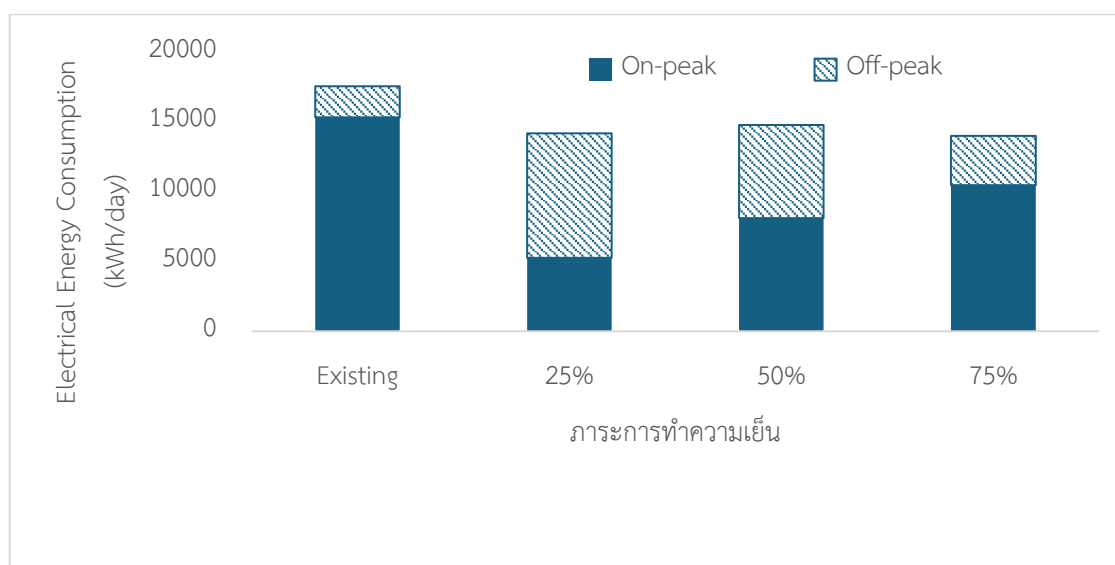


ภาพที่ 4 ภาระการทำความเย็นในแต่ละชั่วโมงของซิลเลอร์ระบบเดิมและภาระการทำความเย็นของซิลเลอร์ในกรณีต้องการภาระบางส่วนที่สัดส่วนต่างๆ

ตารางที่ 1 สมดุลภาระการทำความเย็นในแต่ละชั่วโมงของซิลเลอร์ในกรณีต้องการภาระบางส่วนที่สัดส่วนต่างๆ

Time (Hour)	Load (Ton)	Utility Period (Hour)	Partial Storage Demand Limiting								
			25%			50%			75%		
			Chillers in Operation	Storage Charging	Storage Discharge	Chillers in Operation	Storage Charging	Storage Discharge	Chillers in Operation	Storage Charging	Storage Discharge
			(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)	(Ton-hour)
1	260	Off-Peak	2 x 720	1440	1180	2 x 536	1072	812	1 x 560	560	300
2	220	Off-Peak	2 x 720	1440	1220	2 x 536	1072	852	1 x 560	560	340
3	125	Off-Peak	2 x 720	1440	1315	2 x 536	1072	947	1 x 560	560	435
4	125	Off-Peak	2 x 720	1440	1315	2 x 536	1072	947	1 x 560	560	435
5	135	Off-Peak	2 x 720	1440	1305	2 x 536	1072	937	1 x 560	560	425
6	155	Off-Peak	2 x 720	1440	1285	2 x 536	1072	917	1 x 560	560	405
7	420	Off-Peak	2 x 720	1440	1020	2 x 536	1072	652	1 x 560	560	140
8	800	Off-Peak	2 x 720	1440	640	2 x 536	1072	272	1 x 560	560	
9	1460	On-Peak	1 x 400	400	1060	1 x 776	776		2 x 584	1168	240
10	1550	On-Peak	1 x 400	400	1150	1 x 776	776	684	2 x 584	1168	292
11	1510	On-Peak	1 x 400	400	1110	1 x 776	776	774	2 x 584	1168	382
12	1510	On-Peak	1 x 400	400	1110	1 x 776	776	734	2 x 584	1168	342
13	1495	On-Peak	1 x 400	400	1095	1 x 776	776	734	2 x 584	1168	342
14	1495	On-Peak	1 x 400	400	1095	1 x 776	776	719	2 x 584	1168	327
15	1510	On-Peak	1 x 400	400	1110	1 x 776	776	719	2 x 584	1168	327
16	1500	On-Peak	1 x 400	400	1100	1 x 776	776	734	2 x 584	1168	342
17	1500	On-Peak	1 x 400	400	1100	1 x 776	776	724	2 x 584	1168	332
18	1485	On-Peak	1 x 400	400	1085	1 x 776	776	724	2 x 584	1168	332
19	1400	On-Peak	1 x 400	400	1000	1 x 776	776	709	2 x 584	1168	317
20	1150	On-Peak	1 x 400	400	750	1 x 776	776	624	2 x 584	1168	232
21	950	On-Peak	1 x 400	400	550	1 x 776	776	374	2 x 584	1168	18
22	470	On-Peak	2 x 720	1440	970	1 x 776	776	174	1 x 560	560	218
23	160	Off-Peak	2 x 720	1440	1280	2 x 536	1072	306	1 x 560	560	90
24	190	Off-Peak	2 x 720	1440	1250	2 x 536	1072	912	1 x 560	560	400
Total	21575				12780			8436		3576	3567
			15			9			9		

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวันของระบบในกรณีต้องการภาระบางส่วนที่สัดส่วนต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5 พบว่าในกรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวันจะมีการใช้ไฟฟ้าต่ำสุดที่ 14,004 kWh/day สามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 20.23% เมื่อเทียบกับระบบซิลเลอร์เดิมที่ 17,556 kWh/day เนื่องจากกรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน, ซิลเลอร์ขนาด 800 RT ทำงานที่ 70-73% ของความสามารถสูงสุดซึ่งเป็นช่วงที่ซิลเลอร์จะมีสมรรถนะสูงสุดมีการใช้ไฟฟ้าต่ำสุด ส่วนระบบซิลเลอร์เดิมจะทำงานในช่วงกลางคืนที่ 15-30% ของความสามารถสูงสุด ส่งผลให้มีการใช้ไฟฟ้าที่สูงกว่า



ภาพที่ 5 การใช้ไฟฟ้าในหนึ่งวันของระบบซิลเลอร์เดิมและซิลเลอร์ในกรณีต้องการภาระบางส่วนที่สัดส่วนต่างๆ

การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของการศึกษานี้จะประกอบด้วยค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนในถังน้ำเย็น ค่าไฟฟ้าในช่วง on-peak และ off-peak, ค่าบำรุงรักษาและมูลค่าซาก โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย
Electrical Tariff Rate [12]		
Energy: On peak	0.12	US\$/kWh
Energy: Off Peak	0.074	US\$/kWh
Capital cost		
Tank cost	122	US\$/RT-h
Maintenance cost [13]	6.6	US\$/RT/y
(2% increase/y)		
Lifetime	20	years
Discount rate [14]	2	%
Salvage value	15	% of total capital cost

ในการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์จะทำการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนเบื้องต้นและอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนทั้งหมด (US\$)}}{\text{ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (US\$ / year)}} \quad (11)$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{\sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1 + IRR)^n} - (TIC - SV)}{= 0} \quad (12)$$

เมื่อ R_n คือค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของระบบในปีที่ n , C_n ค่าใช้จ่ายด้านบำรุงรักษารายปีในปีที่ n , TIC เงินลงทุนทั้งหมดที่ปัจจุบันและ SV คือมูลค่าซาก โดยมีผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

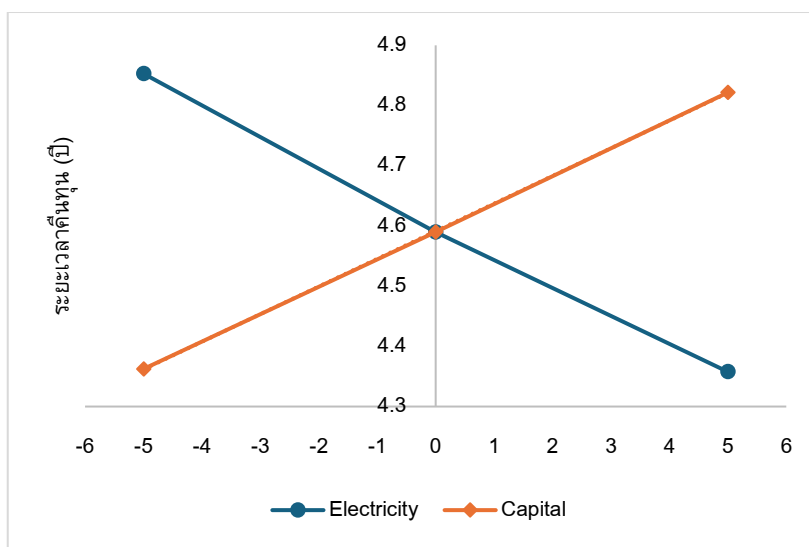
Descriptions	Scenarios		
	25% Demand Limiting	50% Demand Limiting	75% Demand Limiting
Chiller capacity (RT)	2x800 @ 90%	2x800 @ 67%	1x800 @ 70% (off-peak)
	1x800 @ 50%	1x800 @ 97%	2x800 @ 73% (On-peak)
Storage tank (m ³)	6,140	4,052	1,718
Chiller (US\$)	-	-	-
Tank cost (US\$)	1,431,360	1,096,680	643,680
Cooling Tower (US\$)	-	-	-
Total capital cost (US\$)	1,431,360	1,096,680	643,680
Annual maintenance cost (US\$/y)	10,560	10,560	10,560
Annual benefit (US\$/y)	204,954	156,187	150,734
Total profit (US\$/y)	194,394	145,627	140,174
Payback period (y)	7.36	7.53	4.59
IRR (%)	14.39%	13.90%	27.12%

จากตารางที่ 3 ถึงแม้ว่ากรณีกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25% ของความต้องการในช่วงกลางวันจะมีค่าไฟฟ้าถูกที่สุดเนื่องจากการใช้ไฟฟ้าในช่วง off-peak สูงกว่าทุกสัดส่วน แต่เนื่องจากต้องมีการลงทุนในถังเก็บน้ำเย็นสูงสุดทำให้มีระยะเวลาคืนทุนที่ 7.36 ปี มี IRR เท่ากับ 14.39% และกรณีสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 50% ของความต้องการในช่วงกลางวัน จะมีระยะเวลาคืนทุนและ IRR สูงสุด ที่ 7.53 ปี และ 13.90% ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันในกรณีสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน ถึงแม้จะสามารถลดค่าไฟฟ้าได้น้อยสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ แต่มีการลงทุนในถังเก็บน้ำเย็นต่ำทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดที่ 4.59 ปี

และ IRR สูงสุดที่ 27.12% โดยเทคนิคข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีภาระการทำความเย็นที่ใช้น้ำเย็นสูงในช่วงเวลากลางวันและมีการใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ ONP และ OFFP

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไวคือกระบวนการในการตรวจสอบว่าพารามิเตอร์ใดมีผลกระทบต่อระยะเวลาคืนทุนมากที่สุด ซึ่งตัวที่มีผลมากที่สุดจะต้องถูกนำมาพิจารณาเป็นพิเศษ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพิจารณาพารามิเตอร์อัตราค่าไฟฟ้า และเงินลงทุนเบื้องต้นที่เปลี่ยนแปลงไป $\pm 5\%$ มาใช้กับกรณีสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวันดังภาพที่ 6 ซึ่งพบว่าอัตราค่าไฟฟ้ามีผลกระทบต่อระยะเวลาคืนทุนมากกว่าเงินลงทุนเบื้องต้น หากอัตราค่าไฟฟ้าสูงขึ้นระยะเวลาคืนทุนจะยิ่งสั้นลง



ภาพที่ 6 การวิเคราะห์ความไวของระยะเวลาคืนทุนเมื่ออัตราค่าไฟฟ้า และเงินลงทุนเบื้องต้นที่เปลี่ยนแปลงไป $\pm 5\%$

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของซิลเลอร์ในการทำความเย็นเพื่อการปรับอากาศภายในอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ในตอนกลางวันและมีความต้องการกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำในตอนกลางคืน โดยใช้ระบบเก็บสะสมความเย็นในรูปน้ำเย็นทำงานกับซิลเลอร์ที่มีอยู่เดิม และใช้แนวคิดของการจัดการพลังงานในรูปการกำหนดความต้องการภาระบางส่วน (Partial Load Demand Limiting) โดยกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวัน โดยมีผลการศึกษาดังนี้

- เมื่อเปรียบเทียบการใช้ไฟฟ้าของวิธีการกำหนดความต้องการภาระบางส่วนกับซิลเลอร์ระบบเดิมที่มีการใช้ไฟฟ้า 17.56 MWh/วัน พบว่า วิธีการกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25, 50 และ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวันสามารถลดการใช้ไฟฟ้าลงได้ โดยที่สัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวันมีการใช้ไฟฟ้าต่ำสุดที่ 14 MWh/day ลดการใช้ไฟฟ้าได้ 20.23% ของการใช้ไฟฟ้าระบบเดิม

- ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ถึงแม้ว่าวิธีการกำหนดสัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 25 และ 50% จะมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าต่ำ แต่ต้องมีการลงทุนสูง ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนที่ยาวและ IRR ต่ำ ในทางตรงกันข้ามที่สัดส่วนการทำความเย็นของซิลเลอร์เดิมที่ 75% ของความต้องการในช่วงกลางวันจะมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดที่ระยะเวลาคืนทุน 4.59 ปี และ IRR=27.12%
 - ในการวิเคราะห์ความไว อัตราค่าไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาคืนทุนของโครงการมากกว่าเงินลงทุนเบื้องต้น เมื่ออัตราค่าไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาคืนทุนของโครงการเร็วขึ้น
- อย่างไรก็ตามการใช้ระบบ CHWS ที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลาง การกักเก็บพลังงานจะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัสซึ่งทำให้ขนาดของถังเก็บมีขนาดใหญ่และส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูง การลดขนาดถังเก็บความเย็น สามารถใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCMs) ซึ่งการกักเก็บพลังงานจะอยู่ในรูปของความร้อนแฝงมาใช้ร่วมกับน้ำสามารถลดขนาดถังเก็บลงได้ ในงานวิจัยในอนาคตสามารถศึกษาในรูปแบบ ลักษณะสัดส่วน รวมไปถึงตำแหน่งการจัดวางของ PCM ที่เหมาะสมกับขนาดถังเก็บและระบบ CHWS ต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่สนับสนุนงบประมาณ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Lin, X.H. Li, P.S. Cheng, et al., Thermoeconomic evaluation of air conditioning system with chilled water storage, Energy Convers. Manage. 85 (2014) 328–332.
- [2] M.W. Muhieldeen, Y.C. Kuang, Saving energy costs by combining air-conditioning and air-circulation using CFD to achieve thermal comfort in the building, J. Adv. Res. Fluid Mech. Thermal Sci. 58 (2019) 84–99.
- [3] Dincer I. On thermal energy storage systems and applications in buildings. Energy Build. 2002;34:377-388.
- [4] Sebzali MJ, Ameer B, Hussain HJ. Comparison of energy performance and economics of chilled water thermal storage and conventional air-conditioning systems. Energy Build. (2014) ;69:237–50.
- [5] Boonnasa S, Namprakai P. The chilled water storage analysis for a university building cooling system. Appl Therm Eng. 2010 Aug;30(11–12):1396–408.
- [6] Rahman MM, Rasul MG, Khan MMK. Feasibility of thermal energy storage systems in an institutional building in subtropical climates in Australia. Appl Therm Eng. 2011 Oct;31(14–15):2943–50.
- [7] Comodi, G., Carducci, F., Nagarajan, B., & Romagnoli, A. Application of cold thermal energy storage (CTES) for building demand management in hot climates. Applied Thermal Engineering, 2016, 103,

1186–1195.

- [8] Alhikami, A.F., Gusuma, E.D., Fiqi Firmansah, M., Nugroho, R.A.J., Sepriyatno, R. Cold thermal energy storage (CTES) study in a hospital building. *Jurnal Teknologi Terapan*, 2024, 8 (1), 165-173.
- [9] Trane. Product Catalogue. CenTraVac™ Water-cooled Liquid Chillers [Internet]. Trane; [Updated 2020 March; cited 2024 May 15]. Available form: https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/equipment/chillers/water-cooled/centrifugal-liquid/CTV-PRC007R-EN_03142020.pdf
- [10] Climaveneta. Water-cooled Chillers. Technical Data [Internet]. [cited 2024 May 16]. Available form: <http://www.climaveneta.com.cn/en/class/view?id=251>
- [11] Dorgan CE., Elleson JS. Design guide for cool thermal storage. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 1993.
- [12] Metropolitan Electricity Authority. TOU Tariff 4.2.3. Thailand.
- [13] Shaibani AR, Keshtkar MM, Talebizadeh Sardari P. Thermo-economic analysis of a cold storage system in full and partial modes with two different scenarios: A case study. *J Energy Storage*. 2019 Aug 1;24.
- [14] Boris Sullivan. Thailand Business News [Internet]. [Updated Jan 8, 2024; cited 2024 May 13]. Available form: <https://www.thailand-business-news.com/banking/120989-thai-inflation-rate-decreased-by-0-83-in-december-surpassing-forecasted-value>