

ผลของอุณหภูมิน้ำทางเข้าคอนเดนเซอร์ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น

Effect of Condenser Inlet Water Temperature on the Energy Performance of a Chiller System

ณัฐพล แห่สงนาม*¹, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์² และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์³
 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี
 อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800¹
 อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800²
 อาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี
 อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800³
 Corresponding author's e-mail: nattapol.research@gmail.com*

บทคัดย่อ

เครื่องทำน้ำเย็นเป็นระบบหลักที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในอาคารขนาดใหญ่ โดยสมรรถนะเชิงพลังงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อภาระงานของคอมเพรสเซอร์และค่า Power Input per Capacity (kW/RT) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของ อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อสมรรถนะการใช้พลังงานภายใต้สภาวะใช้งานจริง โดยเก็บข้อมูลจากเครื่องทำน้ำเย็นขนาด 300–800 ตันความเย็น จำนวน 7 โครงการ และเปรียบเทียบกับข้อมูลผู้ผลิตที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 85 °F และ 90 °F ข้อมูลภาคสนามถูกประมวลผล แม้แต่ละโครงการมีชั่วโมงการเดินเครื่องแตกต่างกัน แต่การประเมินใช้ดัชนี kW/RT ซึ่งเป็นตัวชี้วัดเชิงความเข้มพลังงานที่ไม่ขึ้นกับระยะเวลาการเดินเครื่องโดยตรง ผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์จากการใช้งานจริงอยู่ในช่วง 78.4 °F(25.7 °C) – 95.5 °F(35.2 °C) และส่งผลต่อค่า kW/RT โดยเมื่อเทียบกับข้อมูลผู้ผลิตที่ 85 °F(29.4 °C) พบความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง -19.84% ถึง +9.54% ขณะที่เมื่อเทียบกับเงื่อนไข 90 °F(32.2 °C) พบความแตกต่างอยู่ในช่วง -6.32% ถึง +25.20% แนวโน้มโดยรวมแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่า kW/RT เพิ่มขึ้นตามลักษณะความสัมพันธ์เชิงบวก สะท้อนถึงการลดลงของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในระบบ

คำสำคัญ : เครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ, อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์, ประสิทธิภาพพลังงาน, โกลว์ดีดต่อต้นความเย็น, สมรรถนะนอกจุดออกแบบ, สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)

Abstract

Water-cooled chillers are among the major electricity-consuming systems in large buildings. Their energy performance strongly depends on the entering condenser water temperature, which directly affects compressor workload and the power input per capacity (kW/RT). This study aims to investigate the impact of entering condenser water temperature on chiller energy performance under actual operating conditions. Field data were collected from seven water-cooled chillers with capacities ranging from 300 to 800 refrigeration tons (RT) and compared with manufacturer specifications at entering condenser water temperatures of 85°F and 90°F. Although the operating hours varied among the projects, performance was evaluated using kW/RT, an energy intensity indicator independent of operating duration. The results show that the actual entering condenser water temperature ranged from 78.4°F (25.7°C) to 95.5°F (35.2°C), significantly affecting kW/RT values. Compared with manufacturer data at 85°F (29.4°C), the average deviation ranged from -19.84% to +9.54%, while deviations relative to the 90°F (32.2°C) condition ranged from -6.32% to +25.20%. The overall trend indicates a positive correlation between entering condenser water temperature and kW/RT, reflecting a reduction in the Coefficient of Performance (COP). These findings highlight the importance of condenser water temperature control for improving energy efficiency in chiller systems.

Keywords: Water-Cooled Chiller, Entering Condenser Water Temperature (ECWT), Energy Performance, kW per Ton (kW/RT), Off-Design Performance, Coefficient of Performance (COP)

บทนำ

การใช้พลังงานในอาคารขนาดใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยระบบปรับอากาศมีสัดส่วนการใช้พลังงานสูงถึง 40–60% ของพลังงานรวมในอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่ (ASHRAE, 2020; IEA, 2019) เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เป็นองค์ประกอบหลักของระบบทำความเย็นแบบศูนย์กลาง และเป็นตัวกำหนดสมรรถนะพลังงานโดยรวมของระบบ โดยทั่วไปสมรรถนะจะประเมินในรูปกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น (kW/RT) หรือค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)

ในเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดอุณหภูมิและความดันการควบแน่นของสารทำความเย็น เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิการควบแน่นสูงขึ้น ส่งผลให้ความดันด้านส่งของคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น งานอัดสูงขึ้น และ COP ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัดของวัฏจักรอัดไอและประสิทธิภาพเชิงคาร์โนต์ (Çengel & Boles, 2019)

งานวิจัยก่อนหน้าจำนวนมากได้ศึกษาพฤติกรรมเครื่องทำน้ำเย็นในสภาวะนอกจุดออกแบบ (off-design conditions) ตัวอย่างเช่น (Braun, 1992) วิเคราะห์ผลของกลยุทธ์การควบคุมระบบทำความเย็นต่อการลดพลังงานสูงสุด และแสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์มีผลต่อพลังงานรวมของระบบ (Hydeman et al., 2002) พัฒนาแบบจำลอง Regression-based model สำหรับทำนายสมรรถนะเครื่องทำน้ำเย็นภายใต้ภาระโหลดบางส่วน (part-load conditions) และพบว่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อระบบทำงานห่างจากจุดออกแบบ

(Yu & Chan, 2010) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นภายใต้ภาระโหลดแปรผัน และรายงานว่าคุณค่า kW/RT มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์ในช่วงการทำงานจริง ขณะที่ (Zhang et al., 2020) ใช้วิธีการ optimization เพื่อปรับอุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์ให้เหมาะสม และสามารถลดการใช้พลังงานของระบบได้ 5–15% ภายใต้สภาวะโหลดจริง นอกจากนี้ (Li et al., 2022) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม (field performance analysis) ของระบบ water-cooled chiller และพบว่าสมรรถนะจริงเบี่ยงเบนจากข้อมูลผู้ผลิต โดยเฉพาะในช่วงภาระโหลดต่ำกว่า 60%

ดังนั้น ช่องว่างองค์ความรู้ (Research Gap) ที่สำคัญคือ การศึกษาภาคสนามเชิงเปรียบเทียบหลายโครงการ ที่ประเมินผลกระทบของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ต่อค่า kW/RT โดยอ้างอิงเงื่อนไขมาตรฐานของผู้ผลิต และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องทำน้ำเย็นขนาด 300–800 ตันความเย็น จำนวน 7 โครงการ เพื่อประเมินความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์และค่า kW/RT และเปรียบเทียบกับข้อมูลผู้ผลิตที่ 85°F และ 90°F เพื่อสนับสนุนการประเมินสมรรถนะจริงและการปรับปรุงกลยุทธ์ควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในสภาวะ off-design

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากการใช้งานจริงการทำงานจริงในอาคารขนาดใหญ่ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ

การประเมินสมรรถนะพิจารณาในรูปกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น (kW/RT) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงาน HVAC (ASHRAE, 2020), ("Performance Analysis," 2012) โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ กับพลังงานที่ใช้ของเครื่อง

ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก กำลังไฟฟ้า และภาระโหลดของเครื่อง ซึ่งได้จากระบบตรวจวัดภาคสนาม ("Performance Analysis," 2012), (Braun, 1992)

ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวในการประเมินสมรรถนะและข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นในการใช้งาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น ในรูปกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น (kW/RT) ภายใต้สภาวะการทำงานจริง

เพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นจากข้อมูลการตรวจวัดจากการใช้งานจริงกับค่ามาตรฐานจากผู้ผลิต เพื่อระบุความแตกต่างของสมรรถนะภายใต้สภาวะการทำงานที่ศึกษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การสร้างความรู้เชิงวิศวกรรมพลังงานเกี่ยวกับพฤติกรรมสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยเฉพาะผลของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การประเมินสมรรถนะเชิงพลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น อย่างเป็นระบบ โดยสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าจากการใช้งานจริงกับข้อมูลมาตรฐานของผู้ผลิต ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

เป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของระบบเครื่องทำน้ำเย็น โดยสามารถประเมินการใช้พลังงานจริงและเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจด้านการบริหารจัดการพลังงานและการปรับปรุงระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากระบบปรับอากาศของอาคารขนาดใหญ่จำนวน 7 โครงการ ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ (ASHRAE, 2020; Performance Analysis, 2012)

สถานะของเครื่องจักร

เครื่องทำน้ำเย็นที่ใช้ในการศึกษาเป็นเครื่องจักรใหม่ที่ทำกรติดตั้งและเดินเครื่องใช้งานครั้งแรก เงื่อนไขดังกล่าวช่วยลดอิทธิพลของตัวแปรด้านอายุการใช้งาน ทำให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมสมรรถนะภายใต้สภาวะการทำงานจริง ได้ชัดเจนมากขึ้น และสามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลสมรรถนะจากผู้ผลิตได้อย่างเหมาะสม

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลการทำงานถูกบันทึกแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงต่อโครงการ โดยกำหนดช่วงเวลาเก็บข้อมูลทุก 60 วินาที ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงพลวัตของระบบ HVAC (Braun, 1992) ข้อมูลการตรวจวัดประกอบด้วย อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกด้าน Evaporator, อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกด้าน Condenser, อัตราการไหลของน้ำด้าน Evaporator, กำลังไฟฟ้าที่ใช้ของเครื่อง (kW)

ลักษณะการเดินเครื่องของแต่ละโครงการแตกต่างกันตามประเภทอาคาร

กลุ่มโรงแรม: เดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน

กลุ่มศูนย์การค้า/ห้างสรรพสินค้า: เดินเครื่องตามช่วงเวลาเปิดให้บริการ โดยทั่วไปเริ่มเดินเครื่องช่วงประมาณ 05:00–06:30 น. และหยุดการทำงานช่วงประมาณ 21:30–22:00 น.

ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาคำนวณความสามารถในการทำความเย็นและสมรรถนะการใช้พลังงาน โดยใช้ความสัมพันธ์มาตรฐานดังนี้

ความสามารถในการทำความเย็นคำนวณจาก

$$Q = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

ประสิทธิภาพพลังงาน

$$kW/RT = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า}(kW)}{\text{ความสามารถในการทำความเย็น}(RT)} \quad (2)$$

การคัดกรองและตรวจสอบข้อมูล ข้อมูลทั้งหมดผ่านกระบวนการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของข้อมูล ตรวจสอบสมดุลพลังงาน, กำจัดค่าผิดปกติ (outliers), ตัดข้อมูลในช่วงโหลดต่ำกว่า 30% การตัดข้อมูลช่วงโหลดต่ำมีเหตุผลทางวิศวกรรม เนื่องจากช่วงดังกล่าวเครื่องมักทำงานในโหมด unloading หรือ cycling control ซึ่งทำให้ค่า kW/RT ผันผวนและไม่สะท้อนสมรรถนะในสภาวะคงที่ (steady-state performance) (ASHRAE, 2020; Braun, 1992)

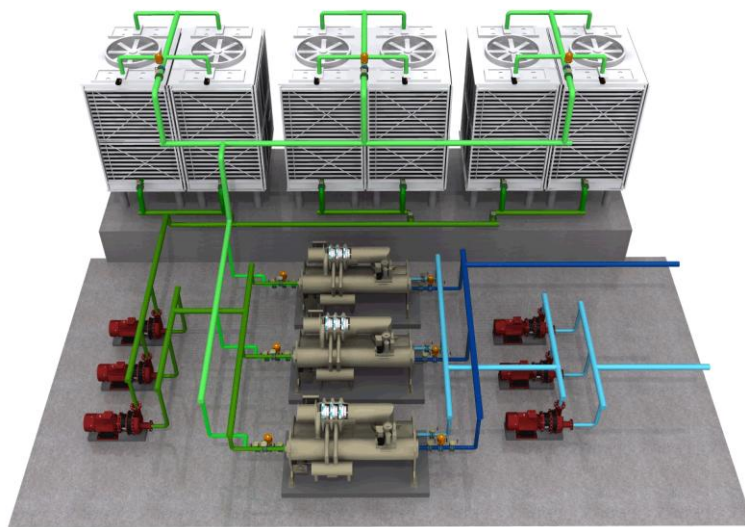
จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์กับค่าการใช้พลังงานในรูป kW/RT โดยใช้การวิเคราะห์แนวโน้มและความสัมพันธ์เชิงสถิติ (trend and correlation analysis) พร้อมเปรียบเทียบกับข้อมูลสมรรถนะจากผู้ผลิต

ผลการวิเคราะห์นำเสนอในรูปแบบกราฟและตาราง เพื่ออธิบายพฤติกรรมการทำงานและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะเครื่องทำน้ำเย็นภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

ระบบเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller Plant System)

ระบบเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller Plant System) เป็นระบบผลิตและถ่ายเทความเย็นที่ใช้ในอาคารขนาดใหญ่ ประกอบด้วยเครื่องทำน้ำเย็น ปั๊มน้ำเย็น ปั๊มน้ำคอนเดนเซอร์ และหอหล่อเย็น ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อถ่ายเทความร้อนจากภายในอาคารไปยังสภาพแวดล้อมภายนอก (ASHRAE, 2020)



รูปที่ 1 ระบบเครื่องทำน้ำเย็น

Chiller (เครื่องทำน้ำเย็น)

ทำหน้าที่ผลิตน้ำเย็นโดยอาศัยวัฏจักรอัดไอ (Vapor Compression Cycle) ซึ่งสารทำความเย็นจะดูดซับความร้อนจากน้ำที่Evaporator และระบายความร้อนออกที่Condense ส่งผลให้น้ำเย็นถูกส่งไปใช้งานใน หน้าที่หลักคือการผลิตความเย็น (Cooling Production) โดยอาศัยหลักการ Heat absorption & rejection (ASHRAE, 2020)

Cooling Tower (หอหล่อเย็น)

ทำหน้าที่ระบายความร้อนจากน้ำCondenseสู่บรรยากาศ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนร่วมกับการระเหย (Evaporative Cooling) ทำให้อุณหภูมิน้ำลดลงก่อนหมุนเวียนกลับเข้าสู่คอนเดนเซอร์ หน้าที่หลักคือ

กระบายความร้อน (Heat Rejection) โดยอาศัยหลักการ Evaporation + Convective heat transfer (ASHRAE, 2020)

Pumps (ปั๊มน้ำ)

ประกอบด้วยปั๊มน้ำเย็นและปั๊มน้ำคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่ส่งน้ำผ่านระบบเพื่อถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ หน้าที่หลักคือการ ลำเลียงของไหล (Fluid Transport) โดยอาศัยหลักการ Conservation of mass & energy

Load (ภาระความเย็น)

คือปริมาณความร้อนที่ต้องถูกกำจัดออกจากพื้นที่ใช้งาน เช่น ห้องหรืออาคาร ซึ่งเกิดจากคน อุปกรณ์ไฟฟ้า และสภาพแวดล้อม หน้าที่หลักคือแหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source) โดยอาศัยหลักการ Energy balance ระบบทั้งหมดทำงานเป็นวงจรเพื่อถ่ายเทความร้อนจากภายในอาคารไปสู่ภายนอก โดยสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแต่ละองค์ประกอบและสภาวะการทำงานร่วมกัน

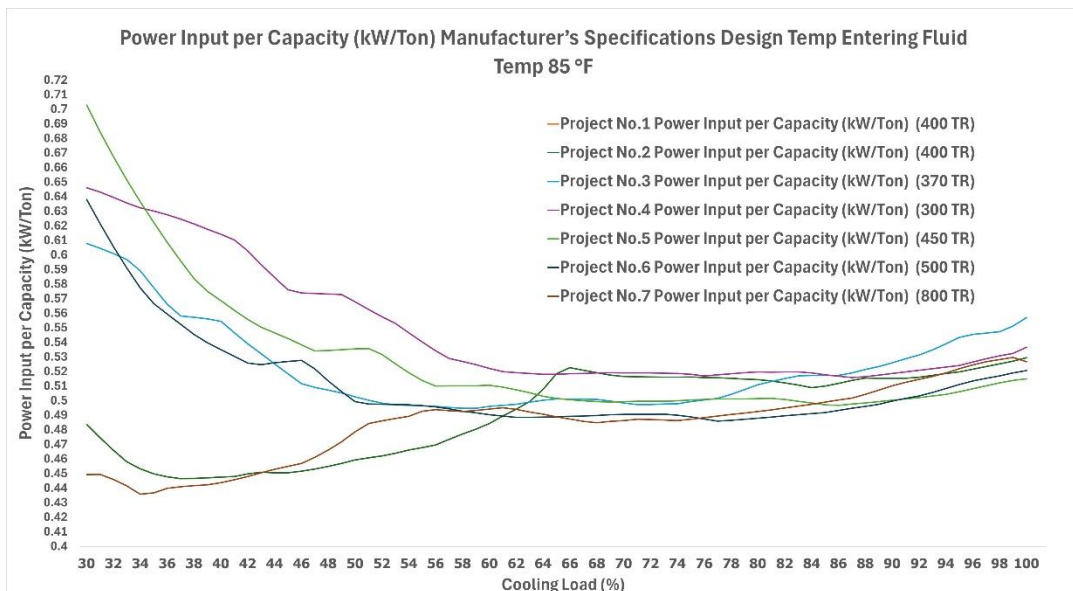
Load → (Heat Gain) → Chiller (Cooling) → Cooling Tower (Heat Rejection) → Pumps

ทฤษฎีสมดุลพลังงานและการคำนวณสมรรถนะ

ความสามารถในการทำความเย็นของระบบคำนวณจากสมดุลพลังงานของน้ำเย็นตามสมการ (1) และประเมินประสิทธิภาพในรูปแบบ

$$kW/RT = \frac{3.517(P)}{Q} \quad (3)$$

โดย kW/RT เป็นตัวชี้วัดหลักของระบบ HVAC (ASHRAE, 2020), ("Performance Analysis," 2012)



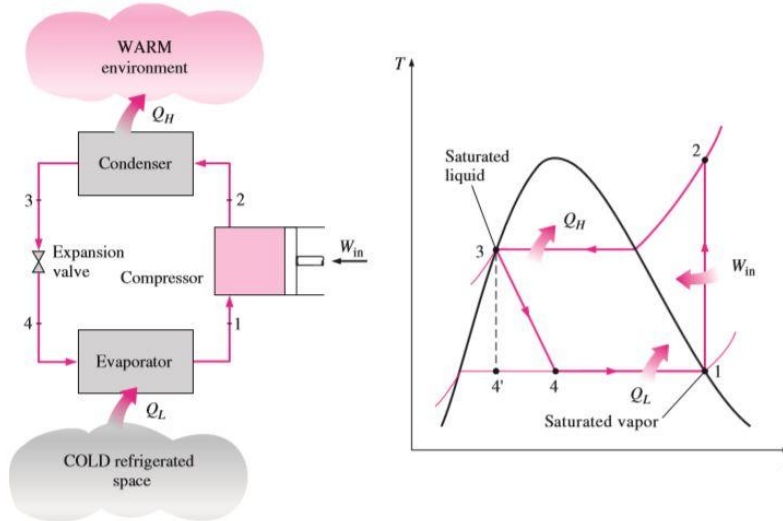
รูปที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังความเย็น (kW/Ton)
ตามข้อมูลผู้ผลิตที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 85°F (29.4°C)

ทฤษฎีวัฏจักรอัดไอและอัตราส่วนการอัด

สมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นขึ้นอยู่กับวัฏจักรอัดไอ โดยงานของคอมเพรสเซอร์สัมพันธ์กับอัตราส่วนการอัด

$$r = \frac{P_{evap}}{P_{cond}} \tag{4}$$

เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิและความดันควบแน่นเพิ่มขึ้น r เพิ่มขึ้น งานคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น kW/RT สูงขึ้น (Çengel & Boles, 2019)



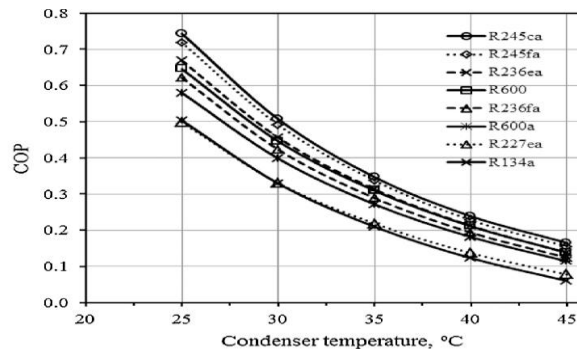
รูปที่ 3 ทฤษฎีวัฏจักรอัดไอ (Çengel & Boles, 2005)

วัฏจักรคาร์โนต์

สมรรถนะสูงสุดของระบบถูกกำหนดโดยวัฏจักรคาร์โนต์

$$COP_{Carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \tag{5}$$

เมื่อ T_H (ฝั่งคอนเดนเซอร์) เพิ่มขึ้น COP ลดลง นอกจากนี้ ตาม Second Law of Thermodynamics การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้านคอนเดนเซอร์ร้อนจะเพิ่มการสูญเสียเชิงเอนโทรปี ทำให้ประสิทธิภาพจริงต่ำกว่าค่าทฤษฎี (Çengel & Boles, 2019), ("Carnot Cycle," n.d.)



รูปที่ 4 ผลกระทบของอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของวัฏจักร (Saleh, 2016)

การถ่ายเทความร้อนในคอนเดนเซอร์

อัตราการถ่ายเทความร้อนในคอนเดนเซอร์สามารถประมาณได้จาก

$$Q = UA\Delta T_{lm} \quad (6)$$

อุณหภูมิน้ำเข้า Condense เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ΔT_{lm} ลดลง (ASHRAE, 2020)

การใช้พลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสามารถประเมินได้จาก

$$Energy = P \times t \quad (7)$$

และสามารถใช้ kW/RT เชื่อมโยงกับต้นทุนพลังงานเพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบ

แหล่งที่มาของข้อมูล และลักษณะของข้อมูล

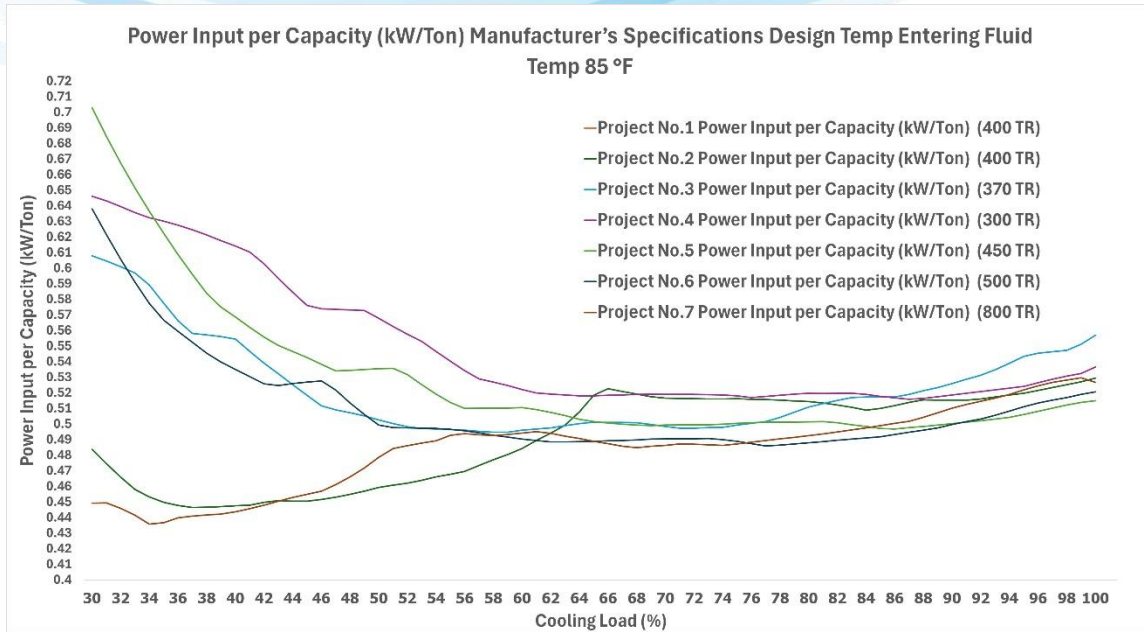
งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นชนิด Water-cooled Chiller ที่ติดตั้งในระบบปรับอากาศของอาคารขนาดใหญ่ โดยข้อมูลที่น่ามาใช้เป็นข้อมูลเชิงปฏิบัติการ (operational data) ซึ่งได้จากระบบบันทึกและติดตามการทำงานของเครื่องจักร ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลทางวิศวกรรมในช่วงเวลาการใช้งานของระบบอย่างต่อเนื่อง

ข้อมูลสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นจากผู้ผลิต ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงด้านประสิทธิภาพ โดยอยู่ในรูป Power Input per Capacity (kW/RT) ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบ เช่น อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ที่ 85°F (29.4°C) และ 90°F (32.2°C)

Power Input per Capacity (kW/Ton) Manufacturer's Specifications Design Temp Entering Fluid Temp 85 °F

	Project No.1	Project No.2	Project No.3	Project No.4	Project No.5	Project No.6	Project No.7
Cooling Load (%)	Power Input per Capacity	Power Input per Capacity	Power Input per Capacity	Power Input per Capacity	Power Input per Capacity	Power Input per Capacity	Power Input per Capacity
	(kW/Ton)	(kW/Ton)	(kW/Ton)	(kW/Ton)	(kW/Ton)	(kW/Ton)	(kW/Ton)
	(400 RT)	(400 RT)	(370 RT)	(300 RT)	(450 RT)	(500 RT)	(800 RT)
10	1.045	1.045	1.508	1.848	1.593	1.418	0.7787
20	0.5569	0.5569	0.7541	0.9241	0.8632	0.8324	0.4763
30	0.4837	0.4837	0.608	0.6461	0.7028	0.6381	0.4493
40	0.4475	0.4475	0.5545	0.6141	0.5686	0.5351	0.4437
50	0.4593	0.4593	0.5027	0.5679	0.5355	0.4994	0.4786
60	0.4844	0.4844	0.496	0.5221	0.5105	0.4904	0.4943
70	0.5167	0.5167	0.4985	0.5191	0.4993	0.4906	0.4864
80	0.5144	0.5144	0.5109	0.5197	0.5014	0.488	0.4925
90	0.5154	0.5154	0.5261	0.5186	0.5003	0.4997	0.5102
100	0.5295	0.5295	0.557	0.5367	0.515	0.5207	0.5267

ตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังความเย็น (kW/Ton)
ตามข้อกำหนดผู้ผลิตที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 85°F (29.4°C)

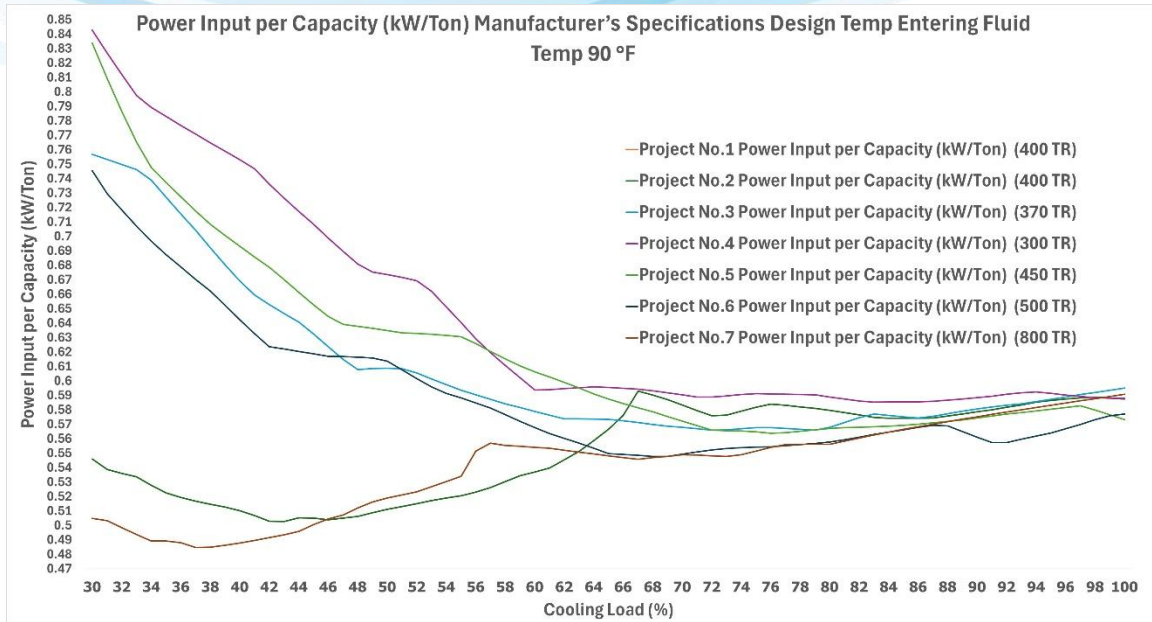


รูปที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังความเย็น (kW/Ton)
ตามข้อมูลผู้ผลิตที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 85°F (29.4°C)

Power Input per Capacity (kW/Ton) Manufacturer's Specifications Design Temp Entering Fluid Temp 90°F

Cooling Load (%)	Project No.1	Project No.2	Project No.3	Project No.4	Project No.5	Project No.6	Project No.7
	Power Input per Capacity (kW/Ton) (400 RT)	Power Input per Capacity (kW/Ton) (400 RT)	Power Input per Capacity (kW/Ton) (370 RT)	Power Input per Capacity (kW/Ton) (300 RT)	Power Input per Capacity (kW/Ton) (450 RT)	Power Input per Capacity (kW/Ton) (500 RT)	Power Input per Capacity (kW/Ton) (800 RT)
10	1.336	1.336	2.19	2.499	2.045	1.809	0.8615
20	0.6678	0.6678	1.095	1.25	1.022	0.9923	0.5631
30	0.546	0.546	0.7569	0.8427	0.8337	0.7454	0.505
40	0.5103	0.5103	0.6691	0.7531	0.6932	0.6423	0.4879
50	0.5113	0.5113	0.6089	0.6737	0.6349	0.6138	0.519
60	0.537	0.537	0.579	0.5939	0.6064	0.5677	0.5541
70	0.5835	0.5835	0.5679	0.5905	0.5722	0.5494	0.5489
80	0.5798	0.5798	0.5679	0.589	0.5671	0.5577	0.5562
90	0.5788	0.5788	0.5807	0.5885	0.5745	0.5612	0.5753
100	0.5875	0.5875	0.5951	0.5879	0.5732	0.5772	0.5909

ตารางที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังความเย็น (kW/Ton)
ตามข้อกำหนดผู้ผลิตที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 90°F (32.2°C)



รูปที่ 5 ค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังความเย็น (kW/Ton)
ตามข้อมูลผู้ผลิตที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 90°F (32.2°C)

ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและพารามิเตอร์การทำงานของระบบ ซึ่งได้จากการตรวจวัดกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณภาระความเย็นของระบบในช่วงเวลา การประเมินสมรรถนะ เครื่องทำน้ำเย็นใช้การตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก และกำลังไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์ Flow Meter (Ultrasonic), Temperature Sensor และ Power Meter ตามลำดับ ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม ตามหลักวิศวกรรม

เครื่องมือทั้งหมดได้รับการสอบเทียบ (Calibration) ตามมาตรฐานก่อนการใช้งาน เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องและลดความไม่แน่นอนของการวัดในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด

เครื่องวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า Power Quality Analyzer (PQA) : Hioki PQ3198



รูปที่ 6 เครื่องวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า Power Quality Analyzer (PQA)

เครื่องตรวจวัดอัตราการไหล Ultrasonic Flow Meter : Floko FM-200H



รูปที่ 7 เครื่องตรวจวัดอัตราการไหล Ultrasonic Flow Meter

เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ Thermometer : Lutron TM-1947SD



รูปที่ 8 เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ Thermometer

Date	Time	Temp (°F)				Evap flow (GPM)	Cooling Capability (Ton)	Power Consumption (kW)	Efficiency (kW/Ton)	% Load Chiller
		Actual Measured Data Evaporator Temp (°F)		Actual Measured Data Condensing Temp (°F)						
		Actual Measured Data Evaporato r Temp (°F) Leaving	Actual Measured Data Evaporator Temp (°F) Entering	Actual Measured Data Condensing Temp (°F) Entering	Actual Measured Data Condensing Temp (°F) Leaving					
14-10-25	11:26:15 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	703.58	121.37	51.70	0.426	30%
14-10-25	11:26:25 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	689.77	118.99	51.70	0.435	30%
14-10-25	11:26:35 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	701.68	121.04	51.80	0.428	30%
14-10-25	11:26:40 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	691.38	119.26	51.70	0.433	30%
14-10-25	11:26:45 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	691.34	119.26	51.80	0.434	30%
14-10-25	11:26:50 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	695.08	119.90	51.80	0.432	30%
14-10-25	11:26:55 AM	44.8	48.9	81.7	85.6	711.33	122.70	51.70	0.421	31%
14-10-25	11:27:00 AM	44.8	48.9	81.7	85.5	687.39	118.57	51.70	0.436	30%
14-10-25	11:27:05 AM	44.8	48.9	81.7	85.5	719.41	124.10	51.70	0.417	31%

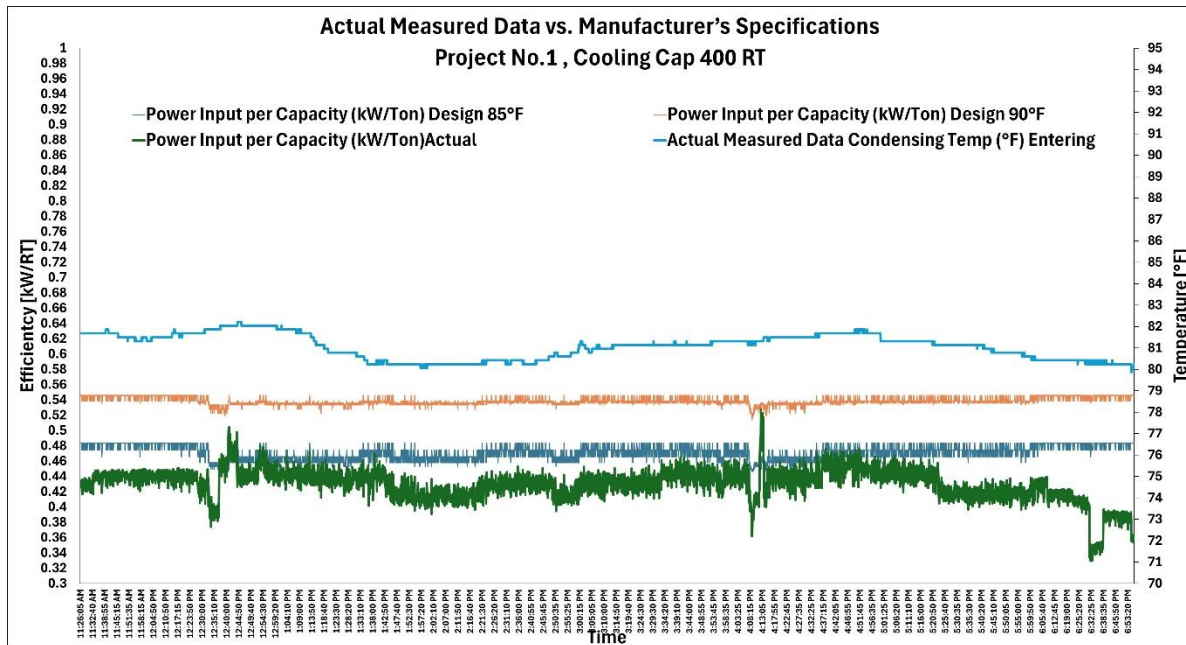
ตารางที่ 3 ตัวอย่างข้อมูลตรวจวัดภาคสนามของเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

ข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะการใช้พลังงานในรูปแบบ kW/RT และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์กับพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น โดยข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (time-series data) ภายใต้การทำงานปกติของระบบ (ASHRAE, 2020), ("Performance Analysis," 2012)

วิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ผลดำเนินการโดยนำข้อมูลอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ทั้งจากค่ามาตรฐานของผู้ผลิต (85°F (29.4°C) และ 90°F (32.2°C)) และค่าที่วัดได้จริงจากภาคสนาม มาเปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นในรูปกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น (kW/RT)

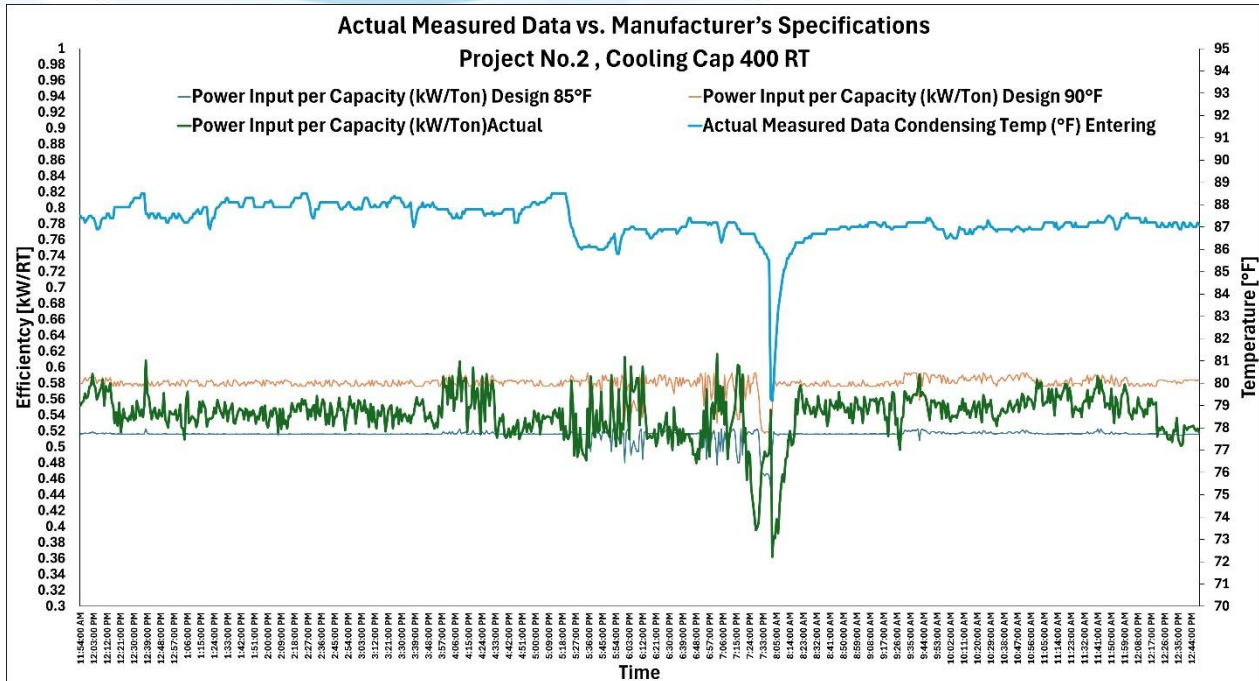
การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 1



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 1

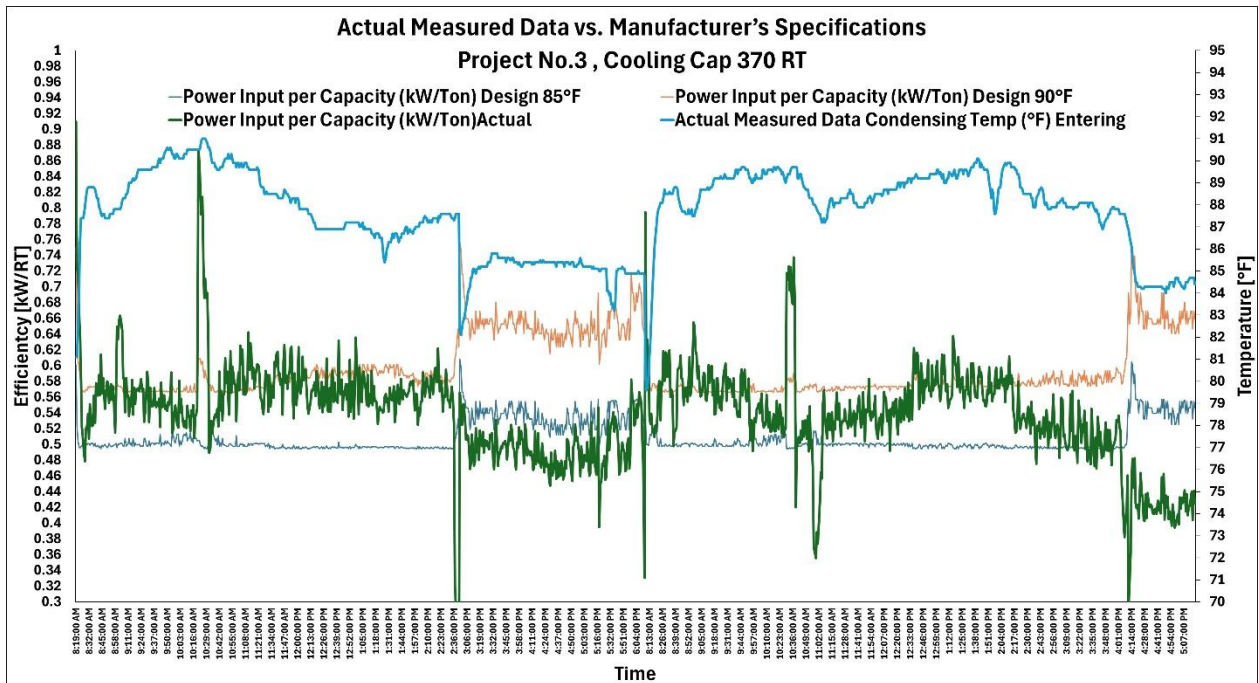
จากรูปที่ 9 พบว่า เครื่องทำงานได้ประสิทธิภาพสูงกว่าค่า Design (85°F) อย่างต่อเนื่อง แม้อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงตัวในช่วง 80-82°F แต่ระบบควบคุมสามารถรักษาเสถียรภาพของพลังงานได้ดีมาก แสดงถึงประสิทธิภาพของชุดคอนเดนเซอร์ที่รองรับ Load ได้เป็นอย่างดี

การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 2



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 2
จากรูปที่ 10 พบว่าประสิทธิภาพ (Actual kW/RT) อยู่ระหว่างเส้น Design 85°F และ 90°F อย่างชัดเจน

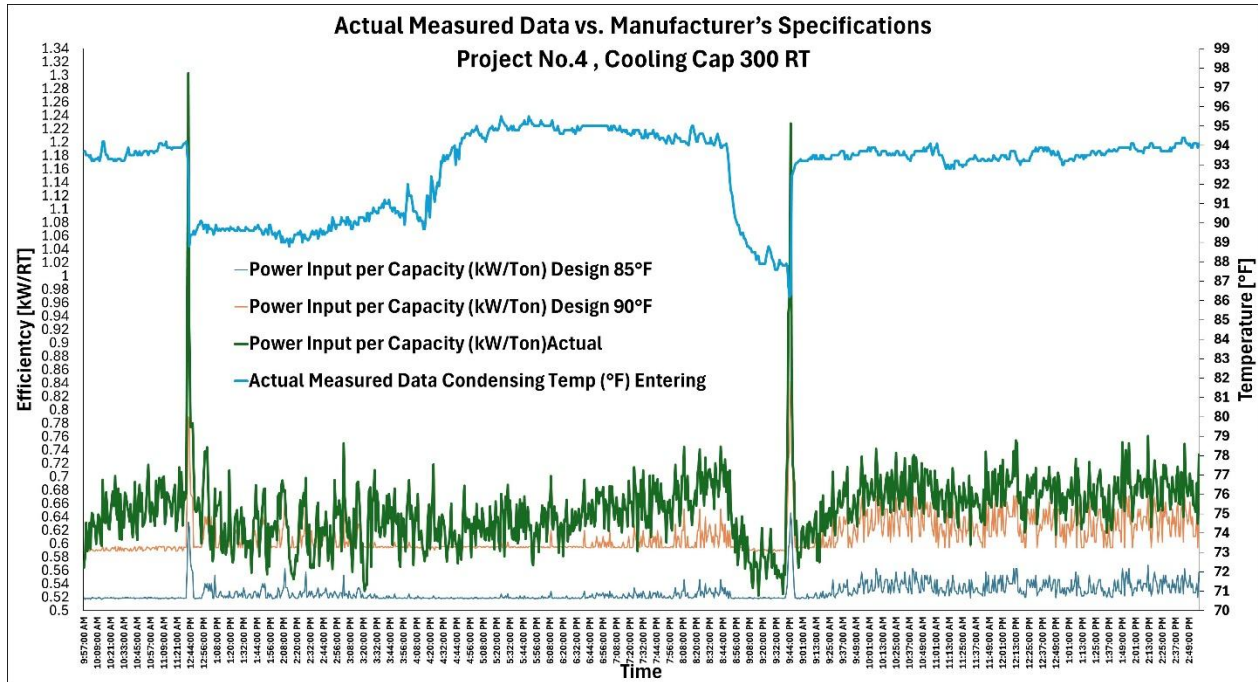
การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 3



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 3

จากรูปที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพ Actual มีความผันผวนสูงตามอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง (84-90°F) ในช่วงที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่ำกว่า 85°F เครื่องสามารถทำประสิทธิภาพได้ดีกว่าค่า Design แต่เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์สูงขึ้นเกิน 89°F ประสิทธิภาพจะลงไปใกล้เคียงกับเส้น Design 90°F

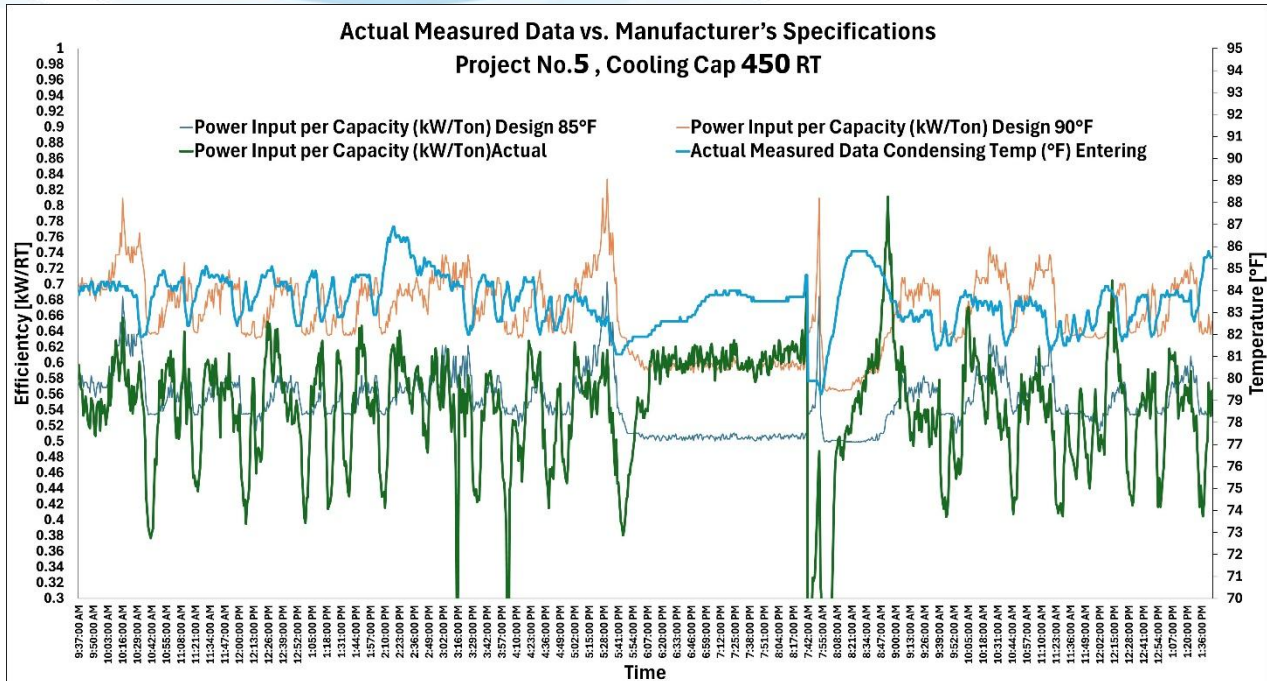
การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 4



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 4

จากรูปที่ 12 พบว่าเครื่องทำงานที่สภาวะ Part Load หรือมีความผิดปกติบางประการ เนื่องจากค่า Actual kW/RT สูงกว่าเส้น Design 90°F เกือบตลอดเวลา แม้อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์จะค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 93-94°F) แต่ค่าประสิทธิภาพที่สูงเกิน 0.64 kW/RT ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ที่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานส่งผลกระทบท่อพลังงาน

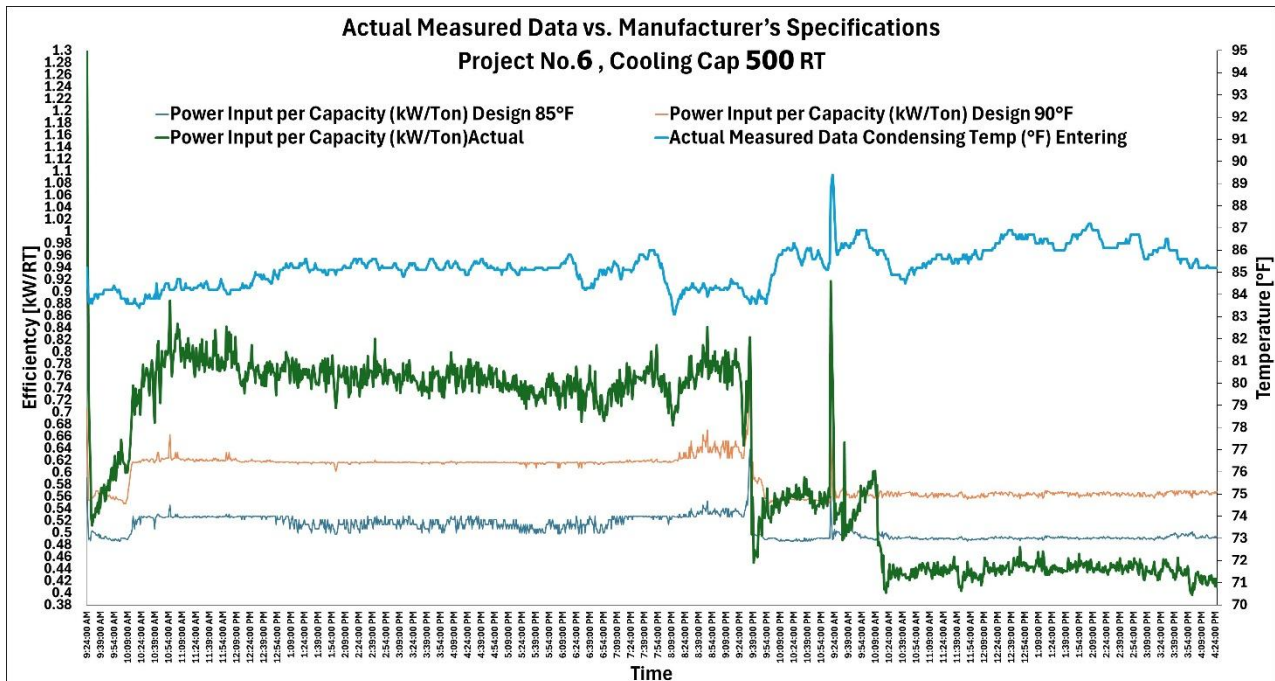
การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 5



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 5

จากรูปที่ 13 พบว่ามีลักษณะผันผวนถี่ ทั้งในส่วนของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ และ Power Input การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ปรับเปลี่ยนการทำงานตลอดเวลา

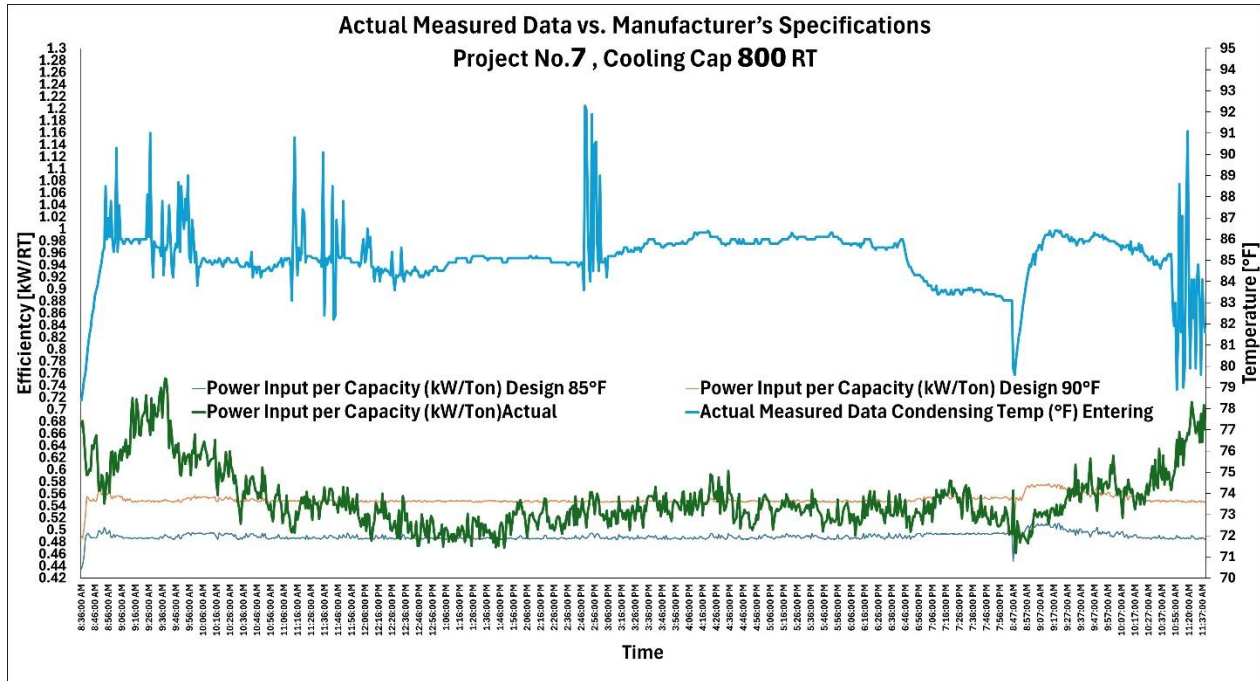
การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 6



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 6

จากรูปที่ 14 พบว่าการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ลดลงจาก 86°F มาอยู่ที่ 84°F ค่า Actual kW/RT ลดลง เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ลดลง

การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 7



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดกับข้อมูลตามข้อกำหนดผู้ผลิตของโครงการที่ 7

จากรูปที่ 15 พบว่าสำหรับเครื่องขนาดใหญ่ 800 RT พบว่าในช่วงที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ เสถียร (85-86°F) เครื่องสามารถทำประสิทธิภาพได้ดีกว่าค่า Design 90°F อย่างคงที่ ช่วงท้ายของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ สูงขึ้นเกิน 91°F ส่งผลให้ค่า kW/RT มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นทันที สะท้อนให้เห็นว่าใน Chiller ขนาดใหญ่ การควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นมีความสำคัญวิกฤตต่อการประหยัดพลังงาน

สรุปผลการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น

การศึกษานี้วิเคราะห์สมรรถนะการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นจาก 7 โครงการ ภายใต้สภาวะการใช้งานจริงที่มีความแตกต่างกันในด้านภาระโหลดและอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่า kW/RT มีความแตกต่างกันแต่ละโครงการ สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของสภาวะการใช้งานจริงที่แตกต่างจากเงื่อนไขมาตรฐานของผู้ผลิต โดยเฉพาะในช่วงการทำงานนอกจุดออกแบบ (off-design conditions) (ASHRAE, 2020), ("Performance Analysis," 2012)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์และสมรรถนะของเครื่อง พบว่า ค่า kW/RT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ โดยแนวโน้มของ kW/RT ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ มีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งรายงานว่าคุณค่า kW/RT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ในช่วงประมาณ 2–3% ต่อ 1°F ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานของระบบ ("Performance Analysis," 2012), (Second Law of Thermodynamics, n.d.)

โดยรวม ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์และประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนมีบทบาทสำคัญต่อการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น และสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบในสถานะการทำงานจริง

ภาพรวมสถานะการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นทั้ง 7 โครงการ

จากการรวบรวมข้อมูลการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นทั้ง 7 โครงการ พบว่าระบบส่วนใหญ่ทำงานภายใต้สภาวะนอกจุดออกแบบ (off-design conditions) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการทำงานของระบบและสมรรถนะการใช้พลังงาน

Project Name	Details	Percentage of Full Load (%)	Actual Measured Data				Condensing Fluid Temp (°F)			Power Input per Capacity (kW/Ton)				
			Evaporator Temp (°F)		Condensing Temp (°F)		Entering Fluid Temp (°F)	Entering Fluid Temp (°F)	Entering Fluid Temp (°F)	Power Input per Capacity (kW/Ton)	Power Input per Capacity (kW/Ton)	Power Input per Capacity (kW/Ton)	Power Input per Capacity (kW/Ton)	Power Input per Capacity (kW/Ton)
			Actual Measured Data	Actual Measured Data	Actual Measured Data	Actual Measured Data	Manufacturer's Specifications	Manufacturer's Specifications	Actual Measured Data	Capacity (kW/Ton)	Capacity (kW/Ton)	Capacity (kW/Ton)	Capacity (kW/Ton)	Capacity (kW/Ton)
			Evaporator Temp (°F) Leaving	Evaporator Temp (°F) Entering	Condensing Temp (°F) Entering	Condensing Temp (°F) Leaving	Design Temp (°F) Entering	Design Temp (°F) Entering	Condensing Temp (°F) Entering	85°F	90°F	Actual	85°F VS	90°F VS
Project 1	Max	38%	45.0	49.3	82.2	86.5	85.0	90.0	82.2	0.484	0.546	0.528		
	Min	30%	44.2	48.2	79.9	83.7	85.0	90.0	79.9	0.446	0.515	0.330	9.54%	25.20%
	Ave	31%	44.5	48.9	81.1	85.2	85.0	90.0	81.1	0.471	0.539	0.430		
Project 2	Max	80%	73.9	77.9	88.5	98.2	85.0	90.0	88.5	0.523	0.593	0.617		
	Min	36%	45.6	52.7	79.2	82.1	85.0	90.0	79.2	0.448	0.517	0.362	-4.61%	7.23%
	Ave	72%	47.3	55.6	87.2	96.6	85.0	90.0	87.2	0.516	0.580	0.540		
Project 3	Max	91%	63.0	65.8	91.0	466.3	85.0	90.0	91.0	0.608	0.757	0.910		
	Min	30%	46.2	51.9	79.6	81.0	85.0	90.0	79.6	0.495	0.566	0.226	-5.49%	10.70%
	Ave	60%	49.9	57.0	87.6	94.4	85.0	90.0	87.6	0.508	0.596	0.538		
Project 4	Max	79%	63.2	67.2	95.5	111.1	85.0	90.0	95.5	0.646	0.843	1.303		
	Min	30%	50.3	56.3	86.2	86.0	85.0	90.0	86.2	0.517	0.589	0.523	-19.12%	-6.32%
	Ave	61%	54.7	61.0	92.8	103.0	85.0	90.0	92.8	0.527	0.611	0.652		
Project 5	Max	81%	68.1	73.6	86.9	98.4	85.0	90.0	86.9	0.703	0.834	0.811		
	Min	30%	44.9	49.1	79.3	84.2	85.0	90.0	79.3	0.499	0.564	0.094	1.95%	22.35%
	Ave	47%	46.4	51.9	83.5	91.3	85.0	90.0	83.5	0.550	0.661	0.540		
Project 6	Max	98%	64.7	68.0	89.4	97.1	85.0	90.0	89.4	0.638	0.745	1.367		
	Min	30%	43.8	49.2	83.1	88.5	85.0	90.0	83.1	0.486	0.548	0.397	-19.84%	-6.08%
	Ave	62%	46.5	52.9	85.2	94.0	85.0	90.0	85.2	0.507	0.595	0.633		
Project 7	Max	91%	66.1	71.6	92.3	106.0	85.0	90.0	92.3	0.513	0.577	0.752		
	Min	34%	46.0	53.5	78.4	83.0	85.0	90.0	78.4	0.436	0.486	0.461	-11.26%	-0.18%
	Ave	68%	48.1	55.5	85.2	94.3	85.0	90.0	85.2	0.489	0.550	0.551		

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังความเย็น (kW/Ton) ระหว่างค่ามาตรฐานผู้ผลิตที่

อุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์ 85°F (29.4°C) และ 90°F (32.2°C) กับค่าที่ตรวจวัดได้จริง

***** ค่าความแตกต่างเป็นบวก (+) หมายถึง เครื่องทำน้ำเย็นมีประสิทธิภาพดีกว่าค่ามาตรฐาน *****

***** ค่าความแตกต่างเป็นลบ (-) หมายถึง เครื่องทำน้ำเย็นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าค่ามาตรฐาน *****

การเปรียบเทียบสมรรถนะรายโครงการ

จากการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของ Power Input per Capacity (kW/RT) เทียบกับค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 85°F (29.4°C) และ 90°F (32.2°C) พบความแตกต่างของสมรรถนะระหว่างแต่ละโครงการอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถอภิปรายเชิงลึกได้ดังนี้

โครงการที่มีสมรรถนะดีที่สุด

Project 1 มีสมรรถนะโดยรวมดีที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างเป็นบวกในทั้งสองสถานะ (+9.54% ที่ 85°F (29.4°C) และ +25.20% ที่ 90°F (32.2°C)) แสดงว่าเครื่องทำงานได้ดีกว่าค่ามาตรฐานอย่างชัดเจน พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนที่ดี รวมถึงการควบคุมโหลดที่เหมาะสม ทำให้เครื่องสามารถรักษาค่า kW/RT ให้อยู่ในระดับต่ำ

โครงการที่มีสมรรถนะต่ำที่สุด

Project 6 แสดงสมรรถนะต่ำที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างติดลบอย่างมีนัยสำคัญ (-19.84% ที่ 85°F (29.4°C) และ -6.08% ที่ 90°F (32.2°C)) ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบใช้พลังงานสูงกว่าค่ามาตรฐานอย่างต่อเนื่อง แนวโน้มดังกล่าวอาจเกิดจากข้อจำกัดของระบบระบายความร้อน เช่น อุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์สูง หรือประสิทธิภาพของ Cooling Tower ที่ไม่เพียงพอ รวมถึงความเป็นไปได้ของการทำงานในช่วงโหลดที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ภาระงานของคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น

โครงการที่มีสมรรถนะเปลี่ยนแปลงตามสถานะ

Project 2, 3, 4, 5 และ 7 พบว่ามีสมรรถนะที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ โดยบางโครงการมีค่าดีกว่ามาตรฐานในสถานะหนึ่ง แต่ด้อยกว่าในอีกสถานะหนึ่ง

Project 4 และ 6 มีแนวโน้มด้อยกว่ามาตรฐานอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ 85°F (29.4°C)

Project 5 แสดงพฤติกรรมที่ดีขึ้นอย่างมากที่ (1.95% ที่ 85°F (29.4°C) และ 22.35% ที่ 90°F (32.2°C))

Project 7 มีสมรรถนะใกล้เคียงมาตรฐาน (-0.18% ที่ 90°F (32.2°C))

พฤติกรรมเหล่านี้สะท้อนถึงความไวของระบบต่อสถานะการระบายความร้อน และแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์เป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น

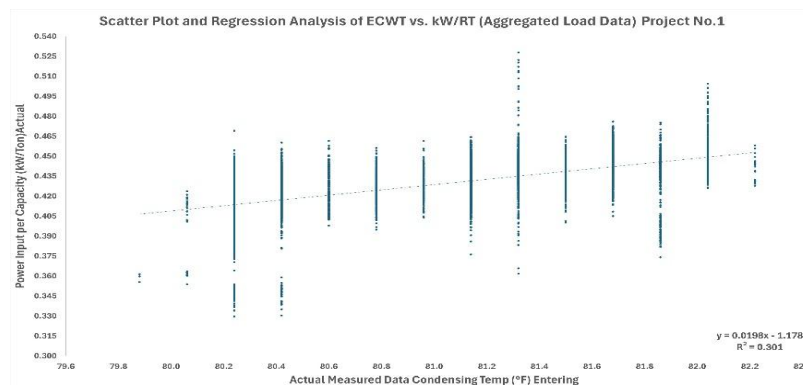
โดยรวมพบว่าโครงการที่มีระบบระบายความร้อนมีประสิทธิภาพและสามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำคอนเดนเซอร์ได้ดี จะมีแนวโน้มให้ค่า kW/RT ต่ำกว่ามาตรฐานอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่โครงการที่มีข้อจำกัดด้านการระบายความร้อนหรือทำงานนอกช่วงโหลดที่เหมาะสม จะมีสมรรถนะต่ำกว่ามาตรฐาน

Project Name	Percentage of Full Load (%)	Condensing Fluid Temp (°F)		Power Input per Capacity (kW/Ton)			Cooling Cap (Ton)	1 Year (Working 12hr./day)			
		Entering Fluid Temp (°F)	Entering Fluid Temp (°F)	Entering Fluid Temp (°F)	Power Input per Capacity (kW/Ton)	Power Input per Capacity (kW/Ton)		Power Input per Capacity (kW/Ton)	Chiller Electricity Cost Electricity Rate = 4.2 Baht/kWh		
		Manufacturer's Specifications Design Temp (°F)	Manufacturer's Specifications Design Temp (°F)	Actual Measured Data Condensing Temp (°F)	Design 85°F	Design 90°F		Actual	Chiller Electricity Cost Design 85°F (Bath)	Chiller Electricity Cost Design 90°F (Bath)	Chiller Electricity Cost Actual (Bath)
		Entering	Entering	Entering							
Project 1	31%	85.0	90.0	81.1	0.471	0.539	0.430	400	1089662.47	1245454.89	994774.19
Project 2	72%	85.0	90.0	87.2	0.516	0.580	0.540	400	2717837.21	3055227.30	2849285.61
Project 3	60%	85.0	90.0	87.6	0.508	0.596	0.538	370	2061754.55	2414869.49	2181424.81
Project 4	61%	85.0	90.0	92.8	0.527	0.611	0.652	300	1765331.72	2044744.58	2182696.09
Project 5	47%	85.0	90.0	83.5	0.550	0.661	0.540	450	2145365.63	2574639.47	2104286.59
Project 6	62%	85.0	90.0	85.2	0.507	0.595	0.633	500	2892031.97	3388683.30	3607893.72
Project 7	68%	85.0	90.0	85.2	0.489	0.550	0.551	800	4919015.03	5533121.99	5543191.30

ตารางที่ 5 ตารางการคำนวณและเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ 85°F (29.4°C) และ 90°F (32.2°C) และค่าที่วัดได้จริง

บทสรุปผลการวิเคราะห์สมรรถนะและ Regression Analysis

โครงการที่ 1: ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (kW/RT ต่ำกว่า Design 85°F ตลอดช่วง) สะท้อนถึงสมรรถนะ Heat Exchanger ที่ยังสูงและระบบระบายความร้อนที่ทำงานได้ดีกว่าสภาวะออกแบบ



SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics

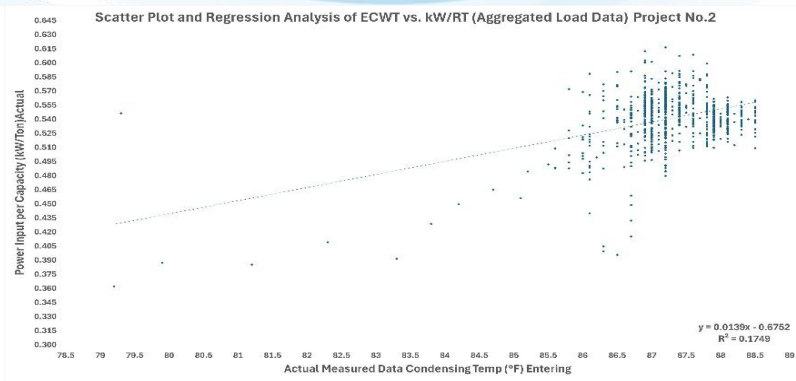
R Square	0.301
Standard Error	0.017
Observations	5019

รูปที่ 16 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่า

ประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 1

จากการวิเคราะห์ พบว่าค่า R² ที่ไม่สูงเกิดจากระบบมีการควบคุมความเร็วรอบปั๊มน้ำและภาระโหลดของอาคารที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดวัน แม้อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ จะต่ำ แต่หากอัตราการไหลของน้ำในคอนเดนเซอร์เปลี่ยนแปลงตามการควบคุมพลังงาน จะทำให้ค่า kW/RT นิ่งกว่าปกติ ส่งผลให้ความสัมพันธ์เชิงสถิติกับอุณหภูมิน้ำคูลน้อยลง

โครงการที่ 2: พบว่าไวต่ออุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ลดลง



SUMMARY OUTPUT

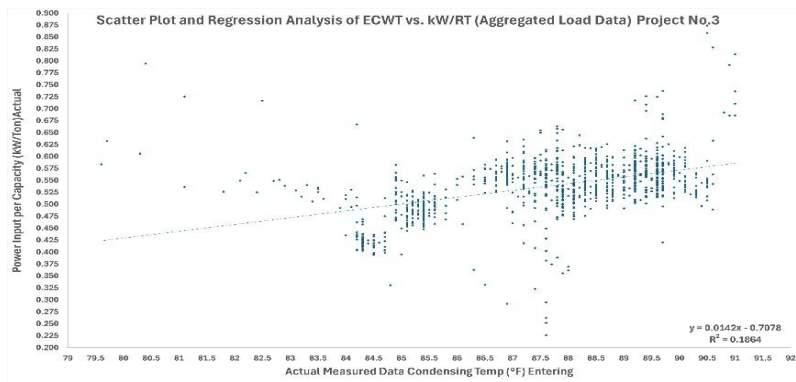
Regression Statistics

R Square	0.175
Standard Error	0.789
Observations	753

รูปที่ 17 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่าประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 2

จากการวิเคราะห์ พบว่าผลกระทบจากความชื้นสัมพัทธ์ และประสิทธิภาพของ Cooling Tower ในช่วงที่ความชื้นสูง Cooling Tower อาจทำอุณหภูมิ Approach ได้ไม่ดี ทำให้เครื่องต้องทำงานหนักขึ้น แม้จอุณหภูมิ น้ำเข้าคอนเดนเซอร์ปกติ ปัจจัยด้านสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาจึงเป็นตัวแปรแทรกซ้อนที่ลดทอนค่า R²

โครงการที่ 3: มีช่วงการทำงานที่กว้าง



SUMMARY OUTPUT

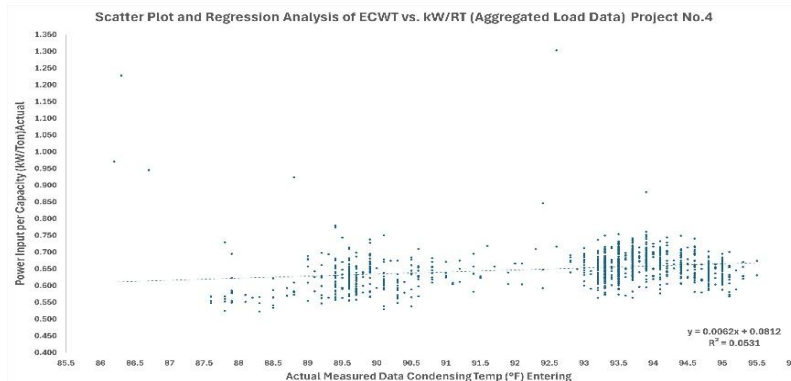
Regression Statistics

R Square	0.186
Standard Error	1.727
Observations	1117

รูปที่ 18 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่าประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 3

จากการวิเคราะห์ พบว่าผลกระทบจากความชื้นสัมพัทธ์ และประสิทธิภาพของ Cooling Tower ในช่วงที่ความชื้นสูง Cooling Tower อาจทำอุณหภูมิ Approach ได้ไม่ดี ทำให้เครื่องต้องทำงานหนักขึ้น แม้จอุณหภูมิ น้ำเข้าคอนเดนเซอร์ปกติ ปัจจัยด้านสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาจึงเป็นตัวแปรแทรกซ้อนที่ลดทอนค่า R²

โครงการที่ 4: เนื่องจากอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์สูงกว่า 90°F ต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่า kW/RT แยกว่าเส้น Design อย่างชัดเจน



SUMMARY OUTPUT

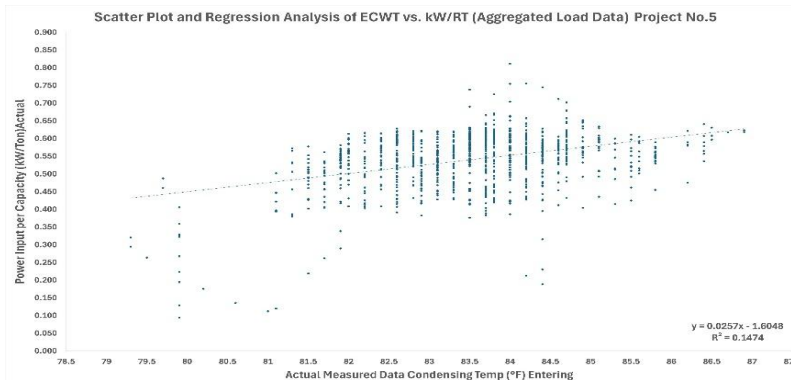
Regression Statistics

R Square	0.053
Standard Error	1.985
Observations	1006

รูปที่ 19 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่าประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 4

จากการวิเคราะห์ พบว่าอุณหภูมิระบายความร้อนที่สูง เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์สูงกว่า 90°F อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ต่อการควบแน่นของสารทำความเย็นและการทำงานของคอมเพรสเซอร์

โครงการที่ 5: พบความสัมพันธ์ที่แปรผันตามรอบการทำงานของระบบระบายความร้อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ต้องปรับตัวตลอดเวลา



SUMMARY OUTPUT

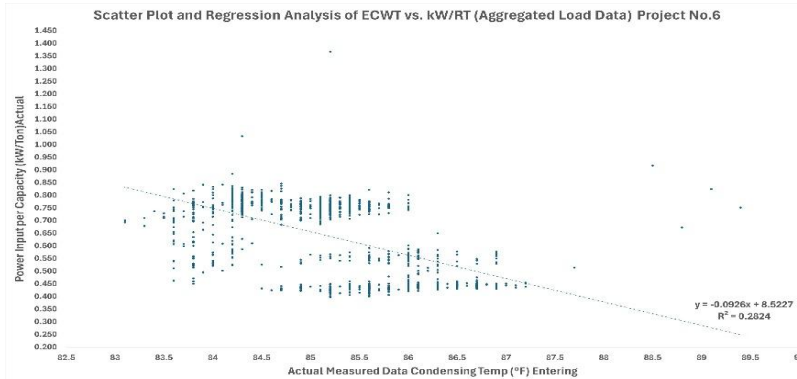
Regression Statistics

R Square	0.147
Standard Error	1.100
Observations	1011

รูปที่ 20 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่าประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 5

จากการวิเคราะห์ พบว่าการทำงานแบบ Part-load cycling และพฤติกรรมการใช้ น้ำเย็นของอาคารมีผันผวน ชี้ให้เห็นว่าอาคารมีโหลดไม่คงที่ (Fluctuating Load) ส่งผลให้มีการเพิ่มลรอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ ค่าความร้อนสะสมในระบบทำให้อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์และ kW/RT ปรับตัวไม่พร้อมกัน ส่งผลให้จุดข้อมูลในทางสถิติกระจายตัว

โครงการที่ 6: มีสมรรถนะต่ำที่สุด โดย kW/RT สูงกว่าค่า Design ทุกสภาวะ ซึ่งให้เห็นถึงปัญหาไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์



SUMMARY OUTPUT

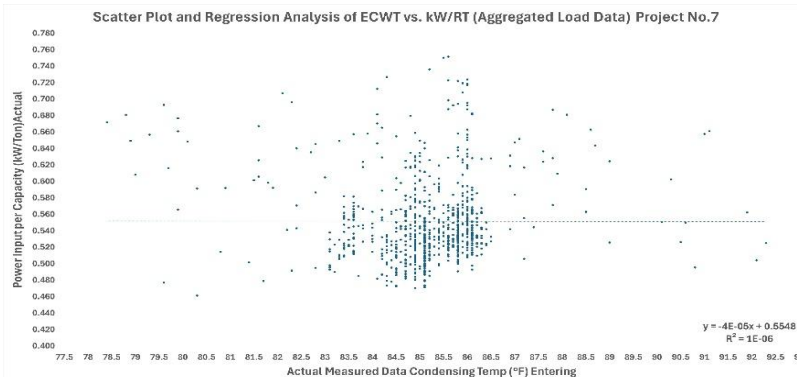
Regression Statistics

R Square	0.282
Standard Error	0.727
Observations	1248

รูปที่ 21 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่าประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 6

จากการวิเคราะห์ พบว่าการสะสมของตะกรัน และการอุดตันในระบบทางเดินน้ำ อาจส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำภายในระบบ การที่ kW/RT สูงกว่ามาตรฐานอย่างคงที่ บ่งชี้ว่ามี "ความต้านทานความร้อน" ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ปัจจัยด้านความสะอาดของน้ำ ที่ส่งผลทำให้ค่าความสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เปลี่ยนแปลง

โครงการที่ 7: สำหรับ Chiller ขนาดใหญ่พบความเสถียรของประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์อยู่ในช่วง 85-87°F แต่ประสิทธิภาพจะลงทันทีเมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์สูงกว่า 90°F



SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics

R Square	1.241E-06
Standard Error	1.422
Observations	833

รูปที่ 22 แผนภาพการกระจายและเส้นถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ต่อค่าประสิทธิภาพ kW/RT (ข้อมูลรวมทุกระดับภาระโหลด) โครงการที่ 7

จากการวิเคราะห์ พบว่าขนาดของระบบที่ใหญ่ Chiller ขนาด 800 RT มีมวลน้ำในระบบปริมาณมาก อุณหภูมิน้ำที่เซนเซอร์วัดได้อาจไม่ใช่ตัวแทนความร้อนแฝงทั้งหมดในขณะนั้น ปัจจัยด้านเสถียรภาพของระบบป้อนน้ำขนาดใหญ่จึงส่งผลต่อค่า R² มากกว่าเครื่องขนาดเล็ก

อภิปรายผลและสรุปผล

จากผลการวิเคราะห์สมรรถนะและการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นทั้ง 7 โครงการ พบว่าอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า kW/RT โดยแสดงความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่า kW/RT จะเพิ่มขึ้นตาม สะท้อนถึงการลดลงของ Coefficient of Performance (COP) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการวัฏจักรอัดไอและขีดจำกัดเชิงทฤษฎีของคาร์โนต์ (Çengel & Boles, 2019; Carnot cycle, n.d.)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยภาคสนามของ Wang et al. (2023) ซึ่งรายงานว่าอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีค่า sensitivity สูงสุดต่อประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เพียง 1°C สามารถทำให้ประสิทธิภาพพลังงานลดลง นอกจากนี้ Zhang et al. (2020) และ Ma & Wang (2021) ยังชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นสามารถลดการใช้พลังงานรวมของระบบ Chiller Plant ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับแบบจำลองการถดถอยเชิงข้อมูล (data-driven regression models) ของ Li & Chen (2024) พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์และ kW/RT ที่ปรากฏในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานในระดับสากล แม้ว่าค่า R² จากแบบจำลองจะไม่สูงมากนัก เนื่องจากระบบจริงถูกควบคุมโดยหลายตัวแปร ได้แก่

1. Entering Condenser Water Temperature: อุณหภูมิน้ำระบายความร้อน
2. Leaving Chilled Water Temperature: อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย
3. Cooling Load: ภาระทำความเย็นของอาคาร
4. Water Flow Rate: อัตราการไหลของน้ำในระบบ Evaporator และ Condenser
5. Ambient Conditions: สภาพอากาศโดยรอบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ Cooling

ตามแนวคิดใน IPMVP (Efficiency Valuation Organization, 2022) และงานของ Hydeman et al. (2002)

การจำแนกกลุ่มโครงการ

กลุ่มโครงการที่มีศักยภาพในการประหยัดพลังงาน (โครงการที่ 1, 2, 3 และ 5) แสดงแนวโน้มตอบสนองต่อการลดอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ค่า kW/RT ลดลงอย่างเป็นสัดส่วนเมื่ออุณหภูมิน้ำหล่อเย็นลดลง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Li et al. (2022) ซึ่งรายงานว่า การลดอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ภายใต้สภาวะไหลผันแปรสามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบได้

กลุ่มโครงการที่ควรปรับปรุงระบบ (โครงการที่ 4, 6 และ 7) แสดงค่า kW/RT ที่สูงกว่าค่ามาตรฐาน ผู้ผลิตในบางช่วงการทำงาน ซึ่งอาจสะท้อนถึงข้อจำกัดของระบบระบายความร้อน เช่น ประสิทธิภาพของ Cooling Tower, การควบคุมอัตราการไหลของน้ำ Yu & Chan (2010) ที่ระบุว่าคุณสมบัติภายใต้ภาระบางส่วนและสภาวะ off-design มีผลอย่างมากต่อการใช้พลังงานจริงของระบบ

การวิเคราะห์หัตถิพลของอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์

ในเชิงวิศวกรรมเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เป็นตัวกำหนดระดับอุณหภูมิและความดันการควบแน่นของสารทำความเย็น ซึ่งมีผลโดยตรงต่อ

1. อัตราส่วนความดัน (Pressure Ratio) ของคอมเพรสเซอร์
2. งานอัด (Compressor Work)
3. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)

เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ลดลง อุณหภูมิการควบแน่นลดลง ส่งผลให้ความแตกต่างของความดันระหว่างด้าน Evaporator และ Condenser ลดลง ทำให้งานที่คอมเพรสเซอร์ต้องใช้ในการอัดไอ (Çengel & Boles, 2019) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มผลทำความเย็นของระบบ เนื่องจากของเหลวสารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลงก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดัน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ในการลดการสูญเสียเชิงเอนโทรปี (Second law of thermodynamics, n.d.)

ค่า R^2 จากการวิเคราะห์ regression เชิงเส้นตัวแปรเดียวจะไม่สูงมาก เนื่องจากระบบถูกควบคุมโดยหลายตัวแปรพร้อมกัน แต่แนวโน้มเชิงสถิติยังคงยืนยันว่าอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการใช้พลังงานของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับงาน sensitivity analysis ของ Wang et al. (2023) และแบบจำลองเชิงข้อมูลของ Li & Chen (2024)

ผลการศึกษานี้ยืนยันว่า การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ให้ต่ำและมีเสถียรภาพ เป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่ม COP และลดค่า kW/RT ของเครื่องทำน้ำเย็นภายใต้สภาวะการใช้งานจริง แนวทางที่เหมาะสมควรดำเนินการในลักษณะ System Optimization โดยพิจารณาทั้ง Cooling Load, การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์, ประสิทธิภาพของ Cooling Tower และการบริหารจัดการอัตราการไหลร่วมกันตามแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพแบบองค์รวมของระบบ Chiller Plant (Zhang et al., 2020; Ma & Wang, 2021)

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์สมรรถนะและผลกระทบด้านพลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นทั้ง 7 โครงการ สามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงเชิงวิศวกรรมได้ดังนี้

การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์

ควรรักษาอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์ให้อยู่ในระดับต่ำและใกล้เคียงสภาวะออกแบบ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อค่า kW/RT และการใช้พลังงานของระบบ การปรับปรุงประสิทธิภาพของ Cooling Tower และระบบน้ำหล่อเย็นจะช่วยลดภาระคอมเพรสเซอร์และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่อง

การติดตามและวิเคราะห์ข้อมูล

ควรมีการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ประเมินแนวโน้มสมรรถนะ ตรวจสอบความผิดปกติ และสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานในระยะยาว

การบริหารจัดการภาระโหลด

ควรปรับกลยุทธ์การเดินเครื่องให้สอดคล้องกับภาระโหลดจริง เช่น การจัดลำดับการทำงานของเครื่อง (Chiller Sequencing) และหลีกเลี่ยงการทำงานในช่วงโหลดที่ไม่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ระบบทำงานใกล้จุดประสิทธิภาพสูงสุด

การประยุกต์ใช้เชิงเศรษฐศาสตร์พลังงาน

ผลการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าคอนเดนเซอร์สามารถส่งผลต่อค่าใช้จ่ายพลังงานในแต่ละโครงการ ดังนั้น การนำผลการศึกษาไปใช้ในการวางแผนควบคุมระบบและบริหารจัดการพลังงาน จะช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าและเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบในระยะยาว

การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำเย็นควรดำเนินการในลักษณะ System Optimization โดยบูรณาการการควบคุมอุณหภูมิ การติดตามข้อมูล และการบริหารจัดการโหลดร่วมกัน ซึ่งไม่เพียงช่วยลดการใช้พลังงาน แต่ยังสามารถลดต้นทุนการดำเนินงาน

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาคำแนะนำและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- ASHRAE. (2020). ASHRAE handbook—HVAC systems and equipment. ASHRAE.
- Braun, J. (1992). Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building cooling systems. Energy and Buildings.
- Carnot cycle: Theoretical efficiency limit of refrigeration systems. (n.d.). [Technical description].
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2005). Thermodynamics: An engineering approach. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Efficiency Valuation Organization. (2022). International performance measurement and verification protocol (IPMVP). EVO.
- Hydeman, M., Gillespie, K. L., & Kavanagh, S. P. (2002). Development and testing of a reformulated regression-based electric chiller model. *ASHRAE Transactions*, 108(2).
- Li, X., Wang, S., & Yan, C. (2022). Field performance analysis and optimal control of water-cooled chiller systems under variable operating conditions.
- Li, Z., & Chen, J. (2024). Data-driven regression models for water-cooled chiller performance analysis under varying load conditions. *Journal of Building Engineering*.
- Ma, Z., & Wang, S. (2021). Energy-efficient control of chiller plants with different types of cooling towers. *Applied Energy*.
- International Energy Agency. (2018). *Energy efficiency in buildings*. IEA.
- Performance analysis of water-cooled chiller systems under varying condenser water temperatures. (2012). *Energy and Buildings*.
- Saleh, B. (2016). Performance analysis and working fluid selection for ejector refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*.
- Second law of thermodynamics: Principle of entropy generation and irreversibility. (n.d.). [Scientific principle].
- Wang, S., Yan, C., & Xiao, F. (2023). Sensitivity analysis of condenser entering water temperature on centrifugal chiller energy efficiency: A field study. *Energy and Buildings*.
- Yu, F. W., & Chan, K. T. (2010). Energy performance of air-cooled chillers under part load conditions. *Applied Thermal Engineering*.
- Zhang, L., Deng, S., & Zhao, Q. (2020). Dynamic optimization of condenser water temperature for energy-efficient chiller plant operation. *Energy and Buildings*.