

การเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำในอาคารที่เปิดใช้งานแล้ว:

กรณีศึกษาศูนย์การเรียนรู้กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์

Comparisons on the Predictive Chiller Power Models for a Water-Cooled Air Conditioning System in an Existing Building:

Krom Luang Naradhiwas Rajanagarinda Learning Center Case Study

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์^{1*}, ณัฐพล กิจสวัสดิ์¹, ณัฏพัทธ์ ดาวสดใส¹, นกานต์ สุธนเกียรติกันต์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: cchainar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปอุปกรณ์แต่ละตัวในโรงผลิตน้ำเย็นถูกตั้งค่าการใช้งานที่ค่าคงที่หนึ่ง ๆ และสอดคล้องกับค่าการออกแบบที่ทำให้ภาระการทำความเย็นสูงสุดของอาคาร แต่อย่างไรก็ตามในอาคารที่เปิดใช้งานแล้วเครื่องทำน้ำเย็นทำงานส่วนใหญ่ที่สภาวะภาระการทำความเย็นบางส่วน ดังนั้นการควบคุมตัวแปรอิสระ เช่น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิน้ำเย็น ให้เหมาะสมกับการใช้งานสามารถประหยัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นที่ทำงานที่ภาระบางส่วนได้ งานวิจัยนี้ทำการประเมินสมรรถนะของแบบจำลองทำนายกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำของอาคารศูนย์การเรียนรู้กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต สำหรับนำไปออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เพื่อการประหยัดพลังงานในอนาคต แบบจำลองที่ศึกษา คือ 1) Gordon-Ng model 2) DOE-2 model 3) ASHRAE model และ 4) แบบจำลองถดถอยกำลังสองคู่ (Bi-quadratic regression model, BQ) และ 5) Bruan model ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละแบบจำลองหาได้จากการใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบอาคารอัตโนมัติ เช่น กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิน้ำเย็น และภาระการทำความเย็น ของเครื่องทำน้ำเย็นจริงที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีพหุตัวแปรถดถอย (Multivariate regression method) ค่าความน่าเชื่อถือของแต่ละแบบจำลองถูกเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริง และค่าทางสถิติ เช่น ค่าความถูกต้อง (R-square) ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (CV) รายละเอียดของการใช้งานแบบจำลอง และการเปรียบเทียบต่าง ๆ จะถูกนำเสนอในบทความนี้

คำหลัก: แบบจำลอง; กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น; ระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ; อาคารที่เปิดใช้งานแล้ว

Abstract

Generally, each equipment in a chiller plant is set the operating conditions at a constant value in order to satisfy the design conditions, which must meet the peak cooling load of the building. In the existing building, however, the water chiller mostly works at the partial cooling loads. Therefore, appropriately controlling the independent variables, e.g. temperatures of condenser water and chilled water, has a potential to save the chiller power consumption at the partial loads. This research aims to evaluate the performance of four predictive chiller power models using with the water-cooled air conditioning system of Krom Luang Naradhiwas Rajanagarinda Learning Center in Thammasat University, Rangsit center for future design of the component-based control system for saving the energy. The models are 1) Gordon-Ng model, 2) DOE-2 model, 3) ASHRAE model, and 4) Bi-quadratic regression model (BQ), and 5) Bruan model. The coefficients in each model are obtained from utilizing the measured datasets, e.g. chiller power, temperatures of condenser water and chilled water, and cooling load, recorded by the building automation system at various real operating conditions of

the chiller, and analyzing the multivariate regression method. Reliabilities in each model are compared with the measured data and statistical values, e.g. coefficient of determination (R-square), mean absolute error (MAE), coefficient of variation (CV). The details of models and comparisons are presented in this paper.

Keywords: Predictive model; Chiller power consumption; Water-cooled air conditioning system; Existing building.

1 บทนำ

ด้วยปัญหาโลกร้อนมากขึ้นทำให้การใช้พลังงานของอาคารสำหรับระบบปรับอากาศมีค่าสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารเก่าและเปิดใช้งานอยู่แล้ว โดยส่วนใหญ่สภาวะการทำงานจริงของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงผลิตน้ำเย็น (Chiller plant) เช่น เครื่องทำน้ำเย็น หอผึ่งลม ปั๊มน้ำเย็น และปั๊มน้ำหล่อเย็น จะแตกต่างจากค่าการออกแบบซึ่งออกแบบที่ภาระการทำงานสูงสุด และออกแบบที่สภาวะอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ดังนั้นการกำหนดมาตรการการประหยัดพลังงานต่าง ๆ หรือการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนเพื่อการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็นซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ข้อมูลสมรรถนะจากแคตตาล็อกของผู้ผลิตอาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากสภาวะการใช้จริงแตกต่างกัน และโดยอย่างยิ่งอาคารที่ใช้งานเครื่องทำน้ำเย็นเก่ามาหลายปีสมรรถนะของอุปกรณ์อาจจะแตกต่างเดิมมาก นอกจากนี้แบบจำลองทำนายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ของเครื่องทำน้ำเย็นยังสามารถนำไปใช้ในการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอุปกรณ์ในโรงผลิตน้ำเย็นเพื่อการประหยัดพลังงานได้อีกด้วย

มีงานวิจัยมากมายนำเสนอแบบจำลองทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น Gordon และ Ng [1] ใช้การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และสมดุลความร้อนโดยคำนึงถึงค่าเอนโทรปีที่เกิดขึ้นภายในระบบ การถ่ายเทความร้อนระบบและสิ่งแวดล้อม รวมถึงค่าความต้านทานการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำและสารทำความเย็นเพื่อสร้างแบบจำลองทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นและใช้ข้อมูลสภาวะใช้งานของเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง โดยแบบจำลองนี้ถูกนำไปใช้งานวิจัยต่าง ๆ เช่น [2, 3]

Bruan และคณะ [4] นำเสนอแบบจำลองในรูปของสมการกำลังสอง และใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต เช่น อัตราส่วนภาระการทำงาน ความร้อน อัตราส่วนกำลังไฟฟ้า และผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องทำน้ำเย็นหรืออุณหภูมิยก (Lift temperature) ซึ่งเป็นค่าจำกัดสำหรับการทำงานของเครื่องน้ำเย็นแต่ละแบบ

LeBrun และคณะ [5] นำเสนอแบบจำลองซึ่งถูกนำไปใช้ในโปรแกรมคำนวณพลังงาน DOE-2 และ eQuest และโดยนักวิจัยต่าง ๆ เช่น [6, 7]

ASHRAE เป็นองค์กรที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นและปรับอากาศซึ่งในปี ค.ศ. 1999 [8] ได้ระบุแบบจำลองทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อพิจารณาสภาวะการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ โดยแบบจำลองนี้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น [9]

Yik และ Lam [10] นำเสนอแบบจำลองในรูปสมการกำลังสองคู่ (Bi-quadratic equation) ที่ใช้เพียงค่าภาระการทำงาน และความอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องทำน้ำเย็น

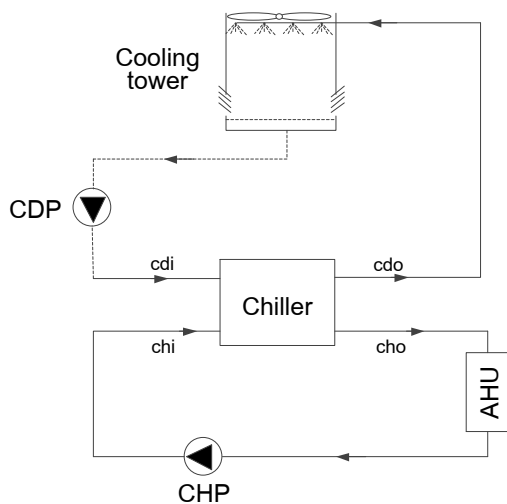
จากที่กล่าวมาข้างต้นมีเพียงแบบจำลอง Gordon-Ng ที่ได้มาโดยวิเคราะห์จากหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์และการสมดุลความร้อน ส่วนแบบจำลองอื่นพิจารณาตัวแปรที่สามารถวัดได้ในโรงผลิตน้ำเย็น และมีความเป็นไปได้ที่น่าจะเกี่ยวข้องกับการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นแล้วนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรและกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น โดยทั่วไปเรียกแบบจำลองเช่นนี้ว่า “แบบจำลองดำ (Black model)” ตัวแปรที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ของเครื่องทำน้ำเย็น เช่น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออกหรือเข้าเครื่องทำน้ำเย็น, อุณหภูมิน้ำเย็นออกหรือเข้าเครื่องทำน้ำเย็น, ค่าภาระการทำงานที่ทำได้หรืออัตราส่วนภาระการทำงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาความถูกต้องและน่าเชื่อถือของแบบจำลองทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น โดยทำการเปรียบเทียบ แบบจำลองซึ่งประกอบด้วย (1) Gordon-Ng model (2) DOE-model (3) ASHRAE model (4) Bi-quadratic regression (BQ) model และ (5) Braun (1987) model และศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่มีต่อกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นโดยใช้ข้อมูลที่วัดได้จริงซึ่งถูกบันทึกโดยระบบอาคาร (BAS) ของอาคารศูนย์การเรียนรู้กรมหลวงกรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ซึ่งเป็นอาคารสำหรับทำกิจกรรมกลุ่ม (Co-working space) และพื้นที่อ่านหนังสือ

2 รายละเอียดอาคารและโรงผลิตน้ำเย็น

อาคารศูนย์การเรียนรู้กรมหลวงกรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อาคารแห่งนี้มีพื้นที่ใช้งาน 16,363 ตารางเมตร แบ่งเป็น 5 ชั้น ปกติเปิดใช้งานจาก 9.00 ถึง 7.00 น. ของเช้าวันถัดไป ยกเว้นในวันหยุดสุดสัปดาห์ที่จะเปิดในงานเฉพาะชั้นที่ 1 และ 2 ระบบปรับอากาศที่ใช้เป็นแบบรวมศูนย์ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 อุปกรณ์หลักภายในโรงผลิตน้ำเย็น

(Chiller plant) ประกอบด้วยเครื่องทำน้ำเย็นขนาดพิกัดทำความเย็น ($\dot{Q}_{e, rated}$) 232.1 Ton (816.26 kW) พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ($P_{ch, rated}$) 149.1 kW จำนวน 3 เครื่อง ปั๊มน้ำหล่อเย็น (CDP) สร้างอัตราการไหล 696 gpm (0.0439 m³/s) จำนวน 3 เครื่อง ปั๊มน้ำเย็น (CHP) สร้างอัตราการไหล 556.8 gpm (0.0351 m³/s) จำนวน 3 เครื่อง และหอผึ่งลม (Cooling tower) ขนาดการระบายความร้อน 281.25 Ton (989.1 kW) จำนวน 3 เซลล์ ในการใช้ปกติจะใช้งานอุปกรณ์หลักในโรงผลิตน้ำเย็นอย่างละ 1 เครื่อง และตั้งค่าอุณหภูมิน้ำเย็นออก ($T_{cho, set}$) ที่ 9.5°C ส่วนอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องทำน้ำเย็น (T_{cdi}) ไม่มีการควบคุม แม้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Variable speed drive, VSD) ที่ปั๊มน้ำและพัดลมของหอผึ่งลมแต่ไม่มีการปรับค่าตลอดช่วงการใช้งาน โดยใช้งานที่ค่าอัตราการไหลสูงสุดยกเว้นในบางวันของช่วงเวลากลางคืนผู้ดูแลอาคารมีการปรับลดอัตราการไหลของปั๊มน้ำหล่อเย็นเพื่อแก้ปัญหาการทำงาน of เครื่องทำน้ำเย็น



รูปที่ 1 แผนภาพวงจรน้ำในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

3 ทฤษฎีและการคำนวณ

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบแบบจำลองทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นจำนวน 5 แบบจำลอง การสร้างแบบจำลองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เลือกข้อมูลที่ระบบทำงานที่สภาวะคงตัว (Steady state) และเลือกช่วงเวลาที่ใช้ (เครื่องทำน้ำเย็น ปั๊มน้ำเย็น ปั๊มน้ำหล่อเย็น หอผึ่งลม) เปิดใช้งานเพียงอย่างละ 1 ชุด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเพื่อให้อุปกรณ์มีชั่วโมงการทำงานที่ใกล้เคียงกัน ผู้ดูแลอาคารจึงสลับการทำงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแต่ละวัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลของเครื่องทำน้ำเย็นเครื่องหนึ่ง ๆ

เท่านั้น ส่วนอุปกรณ์อื่น ๆ ขึ้นกับการเลือกสลับเปิดใช้งานของผู้ดูแลอาคาร

3.1 แบบจำลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละแบบจำลองหาค่าโดยใช้ข้อมูลที่วัดและบันทึกได้จากระบบของอาคารผ่านวิธีพหุตัวแปรถดถอย (Multivariate regression method) ซึ่งคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

การสร้างแบบจำลอง Gordon-Ng แสดงดังสมการที่ (1) เป็นการผสมผสานกันระหว่างการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และข้อมูลจากการวัดจริง จากการสมดุลพลังงานและพิจารณาการสูญเสียเนื่องจากถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมและระบบในเทอมของ (1) อัตราเอนโทรปีที่เกิดขึ้นในระบบหรือการสูญเสียภายในระบบ (Rate of internal entropy production, ΔS) (2) ความร้อนที่รับหรือสูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (Rate of heat in/out from system, $\dot{Q}_{leak}$) และ (3) ค่าความต้านทานความร้อนของการแลกเปลี่ยนความร้อน (Thermal resistance of heat exchanger, R) COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of performance) ซึ่งเป็นดัชนีวัดความสามารถทำความเย็น ($\dot{Q}_e$) เทียบกับการใช้กำลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น (P_{ch}) การถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและน้ำในเครื่องระเหย ($\dot{Q}_e$) หรือในเครื่องควบแน่น ($\dot{Q}_c$) คำนวณจากผลคูณของอัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($c_{p,w} = 4.18 \text{ kJ/(kg.K)}$) และผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออกอุปกรณ์ ในการคำนวณทุกแบบจำลองจะใช้ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) นอกจากนี้สมการ (1) สามารถเขียนในรูปสมการอย่างง่ายดังสมการที่ (2) โดยค่า y และ x ต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ (3)

แบบจำลอง DOE-2 ดังสมการที่ (4) ถึง (7) กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า (T_{cdi}), อุณหภูมิน้ำเย็นออก (T_{cho}) กับอัตราส่วนภาระการทำความเย็น (Part load ratio, PLR) ซึ่งเป็นค่าภาระการทำความเย็นที่ทำได้ ($\dot{Q}_e$) หารด้วยค่าพิกัดทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น ($\dot{Q}_{e, rated}$)

แบบจำลอง ASHRAE และ Bruan มีรูปสมการคล้ายคลึงกัน และมีจำนวนเทอมที่ใช้ทำสมการถดถอย 6 เทอมเท่ากัน ส่วนที่ต่างกันคือ Braun คำนึง $\dot{Q}_e$ ในรูป PLR และพิจารณาอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก (T_{cdo}) แทนเพื่อใช้ตรวจสอบค่าอุณหภูมิกไม่ให้มีค่าต่ำเกินไปซึ่งเป็นข้อจำกัดของการใช้เครื่องทำน้ำเย็น ส่วนแบบจำลอง BQ แม้ว่าจะใช้เพียง T_{cdi} และ $\dot{Q}_e$ เพื่อทำนายกำลังไฟฟ้าแต่ต้องใช้ชุดข้อมูลที่มากกว่าเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ 9 เทอมสำหรับทำสมการ

ถดถอย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมการของแบบจำลองจะเห็นได้ว่ามีเฉพาะแบบจำลอง Gordon-NG เท่านั้นที่คำนึงผลของ

การเปลี่ยนแปลงอัตราการของน้ำหล่อเย็น (Condenser water, cd) และน้ำเย็น (Chilled water, ch)

Gordon-NG model

$$\left(\frac{1}{COP} + 1\right) \frac{T_{cho}}{T_{cdi}} - 1 = \Delta \dot{S} \frac{T_{cho}}{\dot{Q}_e} + \dot{Q}_{leak} \left(\frac{T_{cdi} - T_{cho}}{T_{cdi} \dot{Q}_e} \right) + R \left(\frac{1}{COP} + 1 \right) \frac{\dot{Q}_e}{T_{cdi}} \quad (1)$$

ที่ซึ่ง

$$R = \frac{1}{(\dot{m}c_p)_{cd}} + \frac{1}{(\dot{m}c_p)_{ch}}$$

$$y = a_0 + b_0 x_1 + c_0 x_2 + d_0 x_3 \quad (2)$$

$$y = \frac{\left(\frac{1}{COP} + 1\right) T_{cho}}{T_{cdi}} - 1 - \frac{1}{(\dot{m}c_p)_{cd}} \frac{\left(\frac{1}{COP} + 1\right) \dot{Q}_e}{T_{cdi}}, x_1 = \frac{T_{cho}}{\dot{Q}_e}, x_2 = \frac{T_{cdi} - T_{cho}}{\dot{Q}_e T_{cdi}}, x_3 = \frac{\left(\frac{1}{COP} + 1\right) \dot{Q}_e}{T_{cdi}} \quad (3)$$

DOE-2 model

$$P_{ch} = \frac{\dot{Q}_{e,rated}}{COP_{rated}} (CapFTemp) (EIRFTemp) (EIRFPLR) \quad (4)$$

ที่ซึ่ง

$$CapFTemp = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_{e,rated}} = a_1 + b_1 (T_{cho}) + c_1 (T_{cho})^2 + d_1 (T_{cdi}) + e_1 (T_{cdi})^2 + f_1 (T_{cho})(T_{cdi}) \quad (5)$$

$$EIRFTemp = \frac{P_{ch}}{PLR} = a_2 + b_2 (T_{cho}) + c_2 (T_{cho})^2 + d_2 (T_{cdi}) + e_2 (T_{cdi})^2 + f_2 (T_{cho})(T_{cdi}) \quad (6)$$

$$EIRFPLR = \frac{P_{ch}}{P_{ch,rated} (CapFTemp) (EIRFTemp)} = a_3 + b_3 (PLR) + c_3 (PLR)^2 \quad (7)$$

ASHRAE model

$$P_{ch} = a_4 + b_4 (T_{cdi} - T_{cho}) + c_3 (T_{cdi} - T_{cho})^2 + d_3 \dot{Q}_e + e_3 \dot{Q}_e^2 + f_3 (T_{cdi} - T_{cho}) \dot{Q}_e \quad (8)$$

Bi-Quadratic (BQ) model

$$\frac{1}{COP} = a_5 + b_5 \frac{1}{\dot{Q}_e} + c_5 \dot{Q}_e + d_5 \frac{T_{cdi}}{\dot{Q}_e} + e_5 \frac{(T_{cdi})^2}{\dot{Q}_e} + f_5 T_{cdi} + g_5 \dot{Q}_e T_{cdi} + h_5 (T_{cdi})^2 + i_5 \dot{Q}_e (T_{cdi})^2 \quad (9)$$

Bruan model

$$\frac{P_{ch}}{P_{ch,rated}} = a_6 + b_6 (PLR) + c_6 (PLR)^2 + d_6 (T_{cdi} - T_{cho}) + e_6 (T_{cdi} - T_{cho})^2 + f_6 (PLR)(T_{cdi} - T_{cho}) \quad (10)$$

3.2 การประเมินทางสถิติ

เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าที่บันทึกได้จริงจากระบบอาคาร และวิเคราะห์ค่าทางสถิติ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ของการหาค่า (Coefficient of determination, R^2), ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation, CV) และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error, MAE) ดังสมการที่ (11) ถึง (13)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}}{\bar{y}} \times 100\% \quad (12)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (13)$$

ที่ซึ่ง y_i คือ ค่าที่ได้จากวัดจากระบบอาคาร, $\hat{y}_i$ คือ ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และ $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดจากระบบอาคาร

4 ผลการคำนวณและวิจารณ์

4.1 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

จากวิธีถดถอยหลายตัวแปร (Multivariate regression method) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแต่ละแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 1 จำนวนค่าสัมประสิทธิ์แสดงถึงจำนวนข้อมูลจากระบบอาคารที่ต้องนำมาใช้เพื่อทำแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้จำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ 4140 ข้อมูล ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนตุลาคมของปี พ.ศ.2567

จากตารางที่ 2 และ รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าทางสถิติกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบอาคาร แบบจำลอง BQ ให้ค่าการทำนายกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นถูกต้องมากที่สุด โดยมีค่าความน่าเชื่อถือ $R^2 = 0.95$ ค่าความผิดพลาด, $CV = 7.08\%$ ความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างค่าจากการวัดจากระบบอาคารและค่าจากแบบจำลอง, $MAE \sim 4.98$ kW ส่วนแบบจำลอง Gordon-Ng ให้ค่าการทำนาย

ถูกต้องน้อยที่สุดโดยมีค่า $R^2 = 0.81$, $CV = 14.24\%$ และ $MAE \sim 7.97$ kW

จากรูปที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าของค่าวัดจริงและของค่าจากคำนวณ แบบจำลอง Gordon-Ng ASHRAE และ Bruan ทำนายค่อนข้างสูงกว่าค่าจริง (Overprediction) ในบางช่วงเวลา เช่น ในช่วงเวลากลางคืน ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ในงานวิจัยนี้ให้ข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนมีจำนวนผู้ใช้อาคารน้อย ประกอบกับอุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำ และดูแลอาคารตั้งค่า T_{cho} ค่อนข้างสูงเพื่อประหยัดพลังงาน ส่งผลทำให้ค่าผลต่างของ T_{cdo} และ T_{cho} ต่ำเกินไปอาจจะทำให้เครื่องทำน้ำเย็นมีปัญหาทำงานในสถานะไม่เสถียร

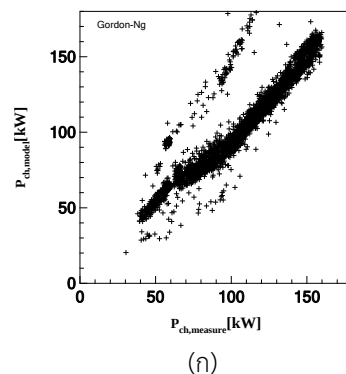
แม้ว่าแบบจำลอง BQ จะทำนายกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นได้ถูกต้องมากที่สุด แต่ต้องใช้จำนวนชุดข้อมูลอย่างน้อย 10 ชุดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ ส่วนแบบจำลอง Gordon-Ng แม้ว่ามีข้อดีเหนือแบบจำลองอื่นในการทำนายกำลังไฟฟ้าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเย็นหรือน้ำหล่อเย็นเปลี่ยน แต่ในโรงผลิตน้ำเย็นจริงอาจจะไม่ได้ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ

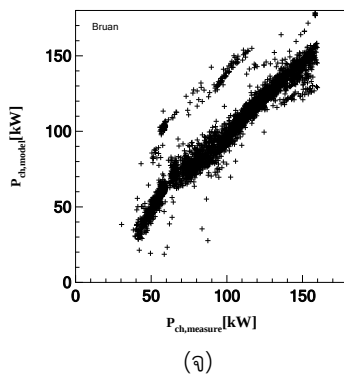
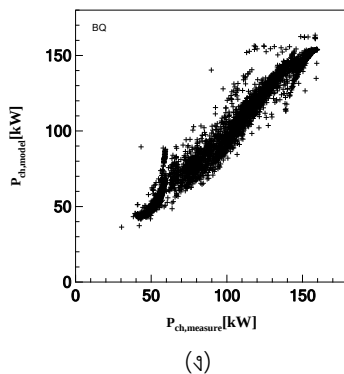
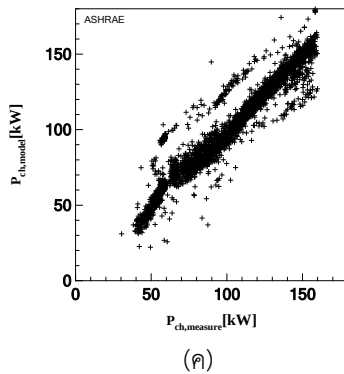
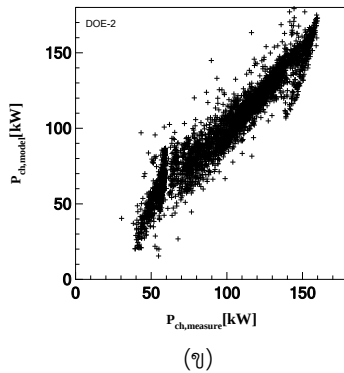
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละแบบจำลอง

		coeff.	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	Gordon-Ng model	0	0.048205866	0.0296783	398.688694	0.0134681					
2	DOE-2 model										
	ChillerCapFTemp	1	1722.697742	-8.545191	0.00823457	-3.4207021	-0.0001426	0.0126656			
	ChillerEIRFTemp	2	311.4097653	-0.727757	0.00092292	-1.3663439	0.001928	0.0006752			
	ChillerEIRFPLR	3	4.367143169	2.7122329	-1.1234968						
3	ASHRAE model	4	115.0395476	-15.44643	0.53046965	0.3226398	-0.0001536	-0.0026832			
4	BQ model	5	-13.6707457	125959.25	-0.6355446	-837.45336	1.3922415	0.0834565	0.0041892	-0.0001244	-6.904044E-06
5	Bruan model	6	0.593559654	1.4905765	-0.6739331	-0.071023	0.0023558	-0.0106073			

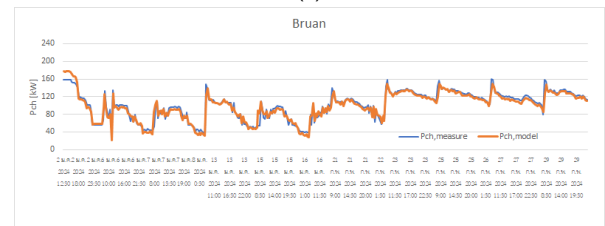
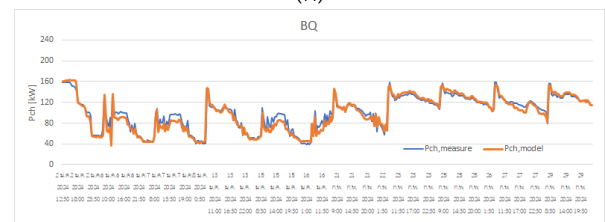
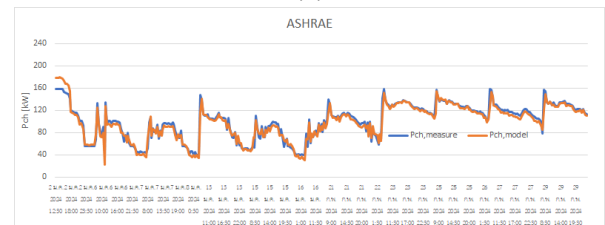
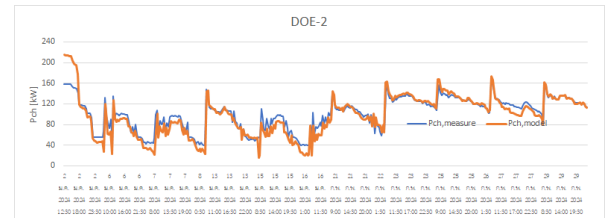
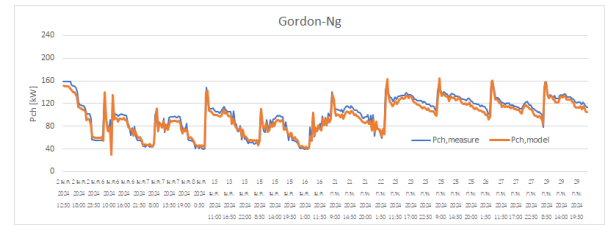
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการประเมินค่าทางสถิติ

	R^2	% CV	MAE
Gordon-Ng	0.8115029	14.240252	7.9675487
DOE-2 model	0.9154414	9.5377131	6.8505720
ASHRAE model	0.9221625	9.1508116	5.5276266
BQ model	0.9534087	7.0797458	4.9817481
Bruan model	0.8917639	10.790742	6.3141199

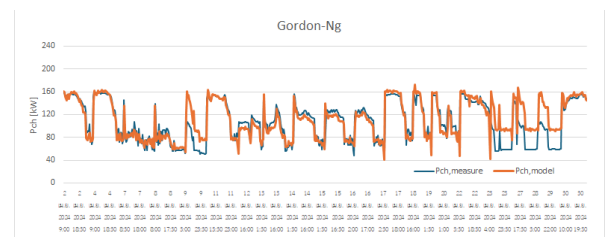


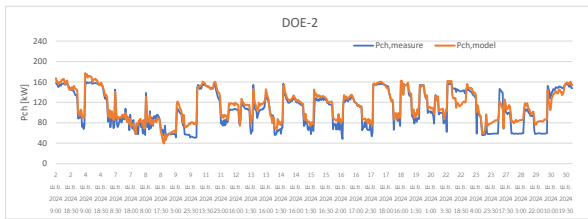


รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างค่าจากระบบ
อาคารและค่าจากแบบจำลองต่าง ๆ (ก) Gordon-Ng, (ข) DOE-2, (ค) ASHRAE (ง) BQ และ (จ) Bruan

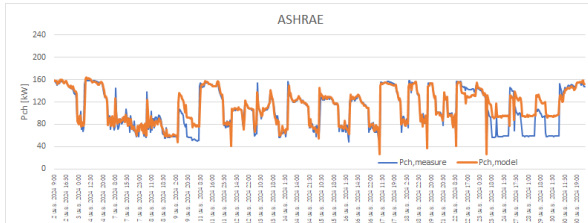


รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างค่าจากระบบ
อาคารและค่าจากแบบจำลอง เดือน ม.ค.-ก.พ. (ก) Gordon-
Ng, (ข) DOE-2, (ค) ASHRAE, (ง) BQ และ (จ) Bruan

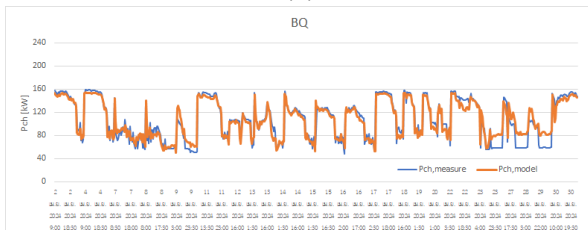




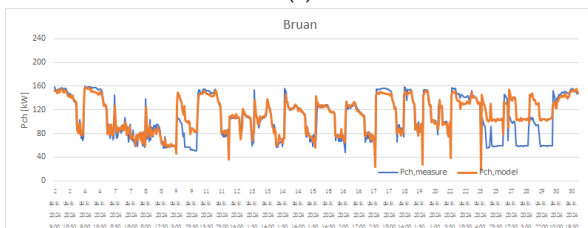
(ข)



(ค)



(ง)

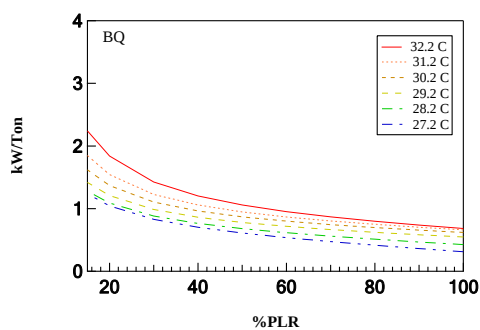


(จ)

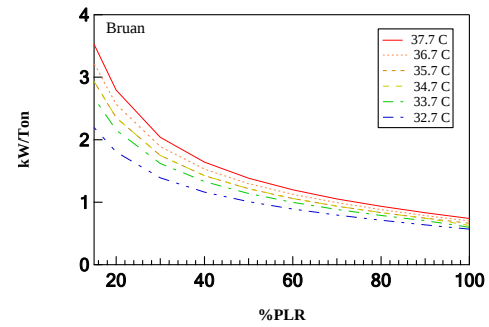
รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างค่าวัดจริงและค่าจากแบบจำลอง เตือน เมฆ. (ก) Gordon-Ng, (ข) DOE-2, (ค) ASHRAE, (ง) BQ และ (จ) Braun

4.2 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น งานวิจัยนี้กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำเย็นมีค่าคงที่ที่ 556.8 gpm (0.0351 m³/s) $T_{cho} = 44^{\circ}\text{F}$ (6.67 $^{\circ}\text{C}$) ภาระความเย็นสูงสุด $\dot{Q}_{e,full} = 231.9 \text{ Ton}$ (815.76 kW)

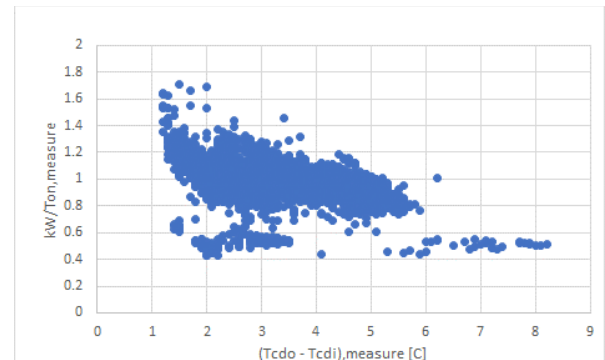


(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและ kW/Ton (ก) T_{cdi} และ (ข) T_{cdo}



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_{cdo} - T_{cdi}$ และ kW/Ton

รูปที่ 5(ก) ใช้แบบจำลอง BQ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า โดยกำหนดให้ $T_{cdo} = 100^{\circ}\text{F}$ (37.78 $^{\circ}\text{C}$) และรูปที่ 5(ข) ใช้แบบจำลอง Bruan พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก โดยกำหนดให้ $T_{cdi} = 90^{\circ}\text{F}$ (32.2 $^{\circ}\text{C}$) จากรูปที่ 5 (ก) และ 5(ข) พบว่าการลดลงของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นมีผลทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น (kW/Ton มีค่าต่ำ) แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณารูปที่ 6 ซึ่งใช้ข้อมูลจากระบบอาคารแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นออกและเข้าเครื่องทำน้ำเย็นกับค่า kW/Ton พบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นจะให้แนวโน้มค่า kW/Ton ด้วยเหตุนี้ถ้าพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็นจึงควรควบคุมทั้ง T_{cdi} หรือ T_{cdo} ร่วมกับผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นด้วย

5 สรุป

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบ 5 แบบจำลองเพื่อทำนายการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับอาคารที่เปิดใช้งานอยู่แล้วโดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จริงจากระบบอาคารเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองผ่านวิธีหาค่าเหมาะที่สุดและวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่มีต่อการใช้

กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบบจำลอง BQ ให้ค่าความถูกต้องและน่าเชื่อถือเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จริงมากที่สุด โดยมีค่า $R^2 = 0.95$, $CV = 7.08\%$ และ $MAE \sim 4.98$ kW และแบบจำลอง Gordon-Ng ให้ค่าความถูกต้องและน่าเชื่อถือต่ำสุด $R^2 = 0.89$, $CV = 14.24\%$ และ $MAE \sim 7.97$ kW
2. ในงานวิจัยนี้พบว่าช่วงเวลากลางคืนทุกแบบจำลองให้ค่าความผิดพลาดของการทำนายสูง โดยเฉพาะแบบจำลอง Gordon-Ng, ASHRAE และ Bruan ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นไม่คงตัวที่สภาวะภาระการทำความเย็นและอุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำ ๆ ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงต่อไป
3. จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง BQ และ Bruan ซึ่งพิจารณาอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นตัวใดตัวหนึ่ง (T_{cdo} หรือ T_{cdi}) พบว่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ต่ำลงทำให้ค่า kW/Ton ของเครื่องทำน้ำเย็นต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามควรต้องพิจารณาค่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นด้วย โดยค่าผลต่างมากมีแนวโน้มที่ให้ค่า kW/Ton ต่ำ

6 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หอสมุดแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และกองงานศูนย์รังสิตของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูล

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] Gordon, J.M., and Ng, K.C. (1994). Thermodynamic modeling of reciprocating chillers, *Journal of Applied Physics*, Vol.75, pp. 2769 – 2774.
- [2] Lee, T.S, Liao, K., Lu, W., (2012). Evaluation of the suitability of empirical-based models for predicting energy performance of centrifugal water chillers with variable chilled water flow, *Applied Energy*, vol.93, pp.583 – 595.
- [3] Jiang, W. (2003). Reevaluation of the Gordon-Ng performance models for water-cooled chillers, *ASHRAE Transactions*, vol.103(Pt2), pp.272 – 287.
- [4] Braun, J.E., Mitchell, J.W., and Klein, S.A. (1987). Performance and control charac-

teristics of a large cooling system, *ASHRAE Transactions*, vol.93, pp.1830 – 1852.

- [5] LeBrun, J., Bourdouxhe, J.P., and Grodent, M. (1999). *HVAC1 toolkit: A toolkit for primary HVAC system energy calculations*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [6] Hydeman, M., Sreedharan, P., Webb, N., and Blanc, S. (2002). Development and testing of a reformulated regression-based electric chiller model, *ASHRAE Transactions*, vol.108, pp. 1118 – 1127.
- [7] Mendes, N., Barbosa, R.M., Freire, R.Z, and Oliveira, R.C.L.F. (2008). A simulation environment for performance analysis of HVAC systems, *Building Simulation*, vol.1, pp.129 – 143.
- [8] *ASHRAE Handbook* (1998). *Supervisory control strategies and optimization, chapter 40*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [9] Wang, L., Lee, E.W.M., and Yuen, K.K. (2018). A practical approach to chiller plant's optimization, *Energy & Buildings*, vol.169, pp.332 – 343.
- [10] Yik, F.W.H., and Lam, V.C.K (1998). Chiller models for plant design studies, *Building Services Engineering Research and Technology*, vol.19, pp.233 – 241.