

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสะสมน้ำเย็นร่วมกับระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ Mathematical Model of Integrating Chilled Water Storage with Conventional Air Conditioning System

ธีรพล อุซฮาบาล<sup>1</sup> และ จุฬากรณ์ เบญจปิยะพร<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

โทร 0-43202845 โทรสาร 0-43202849 E-mail: Teerapon\_u@hotmail.com<sup>1</sup>, Julkae@kku.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมน้ำเย็นแบบถังแยกชั้นอุณหภูมิ เพื่อคำนวณเปรียบเทียบผลตอบแทนทั้งทางด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นในแบบแผนต่างๆ โดยใช้ระบบปรับอากาศของศูนย์ประชุมอเนกประสงค์กาญจนาภิเษก มหาวิทยาลัยขอนแก่น เป็นกรณีศึกษาซึ่งปัจจุบันใช้เครื่องผลิตน้ำเย็นชนิดเครื่องอัดแบบหอยโข่งขนาด 660 ตันความเย็นระบายความร้อนด้วยน้ำ หอฝิ่งเย็นขนาด 700 ตัน มีภาระการทำความเย็นของอาคารตลอดช่วงเวลาทำงานของวันที่ใช้ออกแบบประมาณ 5,400 ตัน-ชั่วโมง โดยนำข้อมูลภาระการทำความเย็นในปัจจุบันมาทำการศึกษาในแบบจำลองที่กำหนดให้มีการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นในแบบแผนที่แตกต่างกันได้แก่ แบบเต็มภาระแบบภาระบางส่วนที่ร้อยละ 75 50 และ 25 ของภาระความร้อนทั้งหมด โดยคำนึงถึงผลกระทบของสภาวะอากาศภายนอกต่อการทำงานของระบบ ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม EES (Engineering Equation Solver) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบและค่าไฟฟ้าที่ลดลงในส่วนของการปรับอากาศ เพื่อใช้วิเคราะห์แนวทางที่เหมาะสมในการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นร่วมกับระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

### Abstract

The feasibility of integrating chilled water storage with conventional water-cooled air conditioning system was studied mathematically. The technical and economical profits were calculated and compared among different operating strategies. The operating data of the Golden Jubilee convention hall Khon Kaen university was applied in the mathematical model to demonstrate as a case study. The system was consist of 660 Ton water-cooled chillers and 700 Ton evaporative cooling towers, with approximate 5,400 Ton-hr cooling load during the operating period. Full storage, partial Storage strategies at 75, 50

and 25 percent of cooling load were simulated and solved by EES software (Engineering Equation Solver) in consideration of different ambient conditions. The electrical consumption and the COP (Coefficient of Performance) data of each operating strategy were calculated and used as a guideline to implement the chilled water storage tank with conventional air conditioning system.

### 1. บทนำ

ความแตกต่างของปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้าโดยรวม การที่ระบบผลิตไฟฟ้าทำงานอย่างเต็มที่เพียงช่วงเวลาสั้นๆ ในช่วงเวลาความต้องการสูงสุด เป็นการใช้งานระบบผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างขาดประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ และนอกจากนี้การที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดมากขึ้นโดยขาดการบริหารจัดการที่เหมาะสมอาจทำให้ต้องมีการขยายกำลังการผลิตหรือสร้างโรงไฟฟ้าแห่งใหม่เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อภาระการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่ระบบมีความต้องการสูงสุดได้ ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมากและอาจไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ขึ้นตามมา การดำเนินการเกี่ยวกับการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าจึงถือว่าเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมมากกว่า ซึ่งปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้จัดให้มีโครงการต่างๆ เพื่อส่งเสริม สนับสนุนและจูงใจให้ผู้ใช้ไฟฟ้าหันมาใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่ระบบมีความต้องการสูงสุด โดยสนับสนุนการใช้เทคโนโลยีเพื่อการประหยัดและการบริหารการใช้ไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบผลิตโดยรวม เทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมแพร่หลายคือการใช้ระบบสะสมพลังงานซึ่งสามารถลดการทำงานของระบบในช่วงเวลาความต้องการสูงสุดและให้ระบบทำงานในช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำแทน

เนื่องจากประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดตลอดทั้งปี ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศมากกว่าร้อยละ 50 ของการใช้ไฟฟ้าโดยรวมของอาคาร และจะเกิดขึ้นในเวลากลางวันซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นการบริหารจัดการการใช้ไฟฟ้าใน

ส่วนของระบบปรับอากาศจึงส่งผลอย่างมากต่อการใช้ไฟฟ้าในช่วงความต้องการสูงสุดของระบบโดยรวม จึงได้มีการประยุกต์ใช้ระบบสะสมพลังงานเพื่อเป็นเครื่องมือในการจัดการพลังงานในระบบปรับอากาศในลักษณะของระบบสะสมความเย็น (Cool Storage) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของระบบสะสมพลังงานเชิงความร้อน (Thermal Energy Storage, TES) ปัจจุบันได้รับความนิยมใช้อยู่ 3 ชนิดแบ่งตามชนิดของสารตัวกลางที่ทำหน้าที่เก็บกักความเย็น ได้แก่ ระบบสะสมน้ำเย็น (Chilled Water Storage) ระบบสะสมน้ำแข็ง (Ice Storage) และระบบสารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material) ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ ระบบสะสมความเย็นชนิดเก็บน้ำเย็นถึงแม้จะมีความสามารถในการเก็บความเย็นต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่นในปริมาณเท่ากัน แต่ก็มีความสะดวกในการติดตั้งใช้งาน สามารถประกอบเข้ากับระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ซึ่งมีอยู่เดิมได้ง่ายทำให้มีมูลค่าในการลงทุนต่ำที่สุดด้วย [1,2]

แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ระบบเก็บความเย็นในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการศึกษาเพื่อพิจารณาหาความเหมาะสมของการใช้ระบบสะสมความเย็นร่วมกับการปรับอากาศนี้มีความยุ่งยากซับซ้อน นับตั้งแต่การตรวจวิเคราะห์ข้อมูลภาระทางความร้อนของระบบ จนถึงการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่สามารถใช้เป็นดัชนีแสดงให้ผู้ประกอบการเห็นถึงความเป็นไปได้และความน่าสนใจของการลงทุนเพื่อใช้ระบบดังกล่าว ขณะที่ปัจจุบันการจัดการพลังงานได้เข้ามามีบทบาทต่อประสิทธิภาพการทำงานขององค์กรและต้นทุนทางพลังงานก็คิดเป็นต้นทุนหลักของสถานประกอบการต่างๆ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวิธีการศึกษาความเหมาะสมของการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นร่วมกับระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสร้างระบบสมการที่อธิบายการทำงานของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ซึ่งเป็นการนำเอาสมการของอุปกรณ์ย่อยในระบบมาคำนวณร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วย เครื่องผลิตน้ำเย็น หอผึ่งเย็นและปั๊มน้ำ โดยสมการของอุปกรณ์ได้มาจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ และใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตในการหาค่าคงตัวในสมการ จากนั้นจึงใช้แบบจำลองที่ได้มาจำลองผลการทำงานของระบบภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการศึกษา โดยมีตัวแปรที่สนใจเปรียบเทียบได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในส่วนของการผลิตน้ำเย็น ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในการทำงานของเครื่องผลิตน้ำเย็น

## 2. งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับระบบสะสมน้ำเย็นในแง่ของการจัดการพลังงาน ได้มีผู้ทำการศึกษาย้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศตะวันตกที่มีความตื่นตัวและให้ความสำคัญกับการจัดการพลังงานและมีการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นอย่างแพร่หลาย ส่วนมากจะเป็นการศึกษาหลักการการทำงานของระบบ การพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ศึกษาการควบคุมการทำงานหรือการตรวจวิเคราะห์ใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นในกรณีหนึ่งๆ เช่น การศึกษาศักยภาพเชิงนโยบายของการใช้ระบบสะสมพลังงานในสหรัฐอเมริกาของ Turner และ Doty [1] และ

Chavala, Jr. [2] ซึ่งได้ศึกษาแนวโน้มและข้อจำกัดในการใช้ระบบสะสมพลังงานของหน่วยงานในรัฐต่างๆ สหรัฐอเมริกาและพบว่าควรสนับสนุนการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นเมื่อจะมีการสร้างระบบปรับอากาศใหม่ มีการเปลี่ยนเครื่องผลิตน้ำเย็นที่ครบอายุการใช้งาน หรือเมื่อมีการขยายภาระของระบบปรับอากาศเดิม Hasnain [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดการพลังงานโดยได้ตรวจวิเคราะห์ผลตอบแทนในระบบที่ได้มีการติดตั้งถึงสะสมน้ำเย็นในประเทศซาอุดีอาระเบียซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดมูลค่าการใช้ไฟฟ้าและมูลค่าการดำเนินงานเท่านั้น แต่ยังสามารถลดมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นได้มากในระบบปรับอากาศขนาดใหญ่

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากระบบสะสมน้ำเย็นบ้างแล้วนับตั้งแต่เริ่มมีการนำเทคโนโลยีสะสมพลังงานเข้ามาใช้ในประเทศไทย กุสกาณา [4] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบเก็บความเย็นสำหรับการปรับอากาศในโรงแรมเปรียบเทียบกับระหว่างระบบสะสมน้ำเย็นกับระบบน้ำแข็งและพบว่าการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นให้ผลตอบแทนที่ดีกว่าเนื่องจากการลงทุนน้อยกว่าและกาญจนา [5] ได้ทำการศึกษาโดยการตรวจวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของระบบสะสมน้ำเย็นที่ติดตั้งสำหรับอาคาร ท.101 กฟผ. สำนักงานใหญ่เพื่อเป็นกรณีตัวอย่างของการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นและเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการทำงานของระบบสะสมน้ำเย็นของอาคารดังกล่าว

การศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีอยู่อย่างหลากหลายทั้งในรูปแบบของการศึกษาโดยทฤษฎีพื้นฐานทางกายภาพของอุปกรณ์ย่อยและการใช้วิธีเชิงตัวเลข แต่การใช้ทฤษฎีทางกายภาพนั้นมักจะเป็นการศึกษากระบวนการที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งโดยละเอียดและต้องอาศัยข้อมูลทางกายภาพภายในระบบนั้นอย่างครบถ้วน ทำให้นำไปใช้ในงานจริงได้ยากและสามารถใช้ได้ในช่วงข้อมูลที่จำกัด [6] จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีการใช้วิธีการเชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาชุดข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบที่สนใจ ซึ่งอาจมีรูปแบบต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวิธีการที่ผู้พัฒนาแบบจำลองเลือกใช้ เช่น การศึกษาของ Solati และ Zmeureanu [7] และแบบจำลองของ Underwood และ Yik [8] ซึ่งถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้

เพื่อให้การใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นแพร่หลายมากยิ่งขึ้นในการศึกษานี้ได้พัฒนาวิธีการที่จะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถเห็นถึงความแตกต่างของการใช้และไม่ใช้ระบบสะสมน้ำเย็นได้ชัดเจนมากขึ้นและลดความยุ่งยากซับซ้อนของการศึกษาลง โดยเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบที่จะทำการศึกษา จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากคู่มือการทำงานของผู้ประกอบการ และใช้ค่าภาระการทำความเย็นของระบบซึ่งอาจได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมคำนวณภาระทางความร้อนของอาคาร ต่างๆ หรือได้จากจากการตรวจวัดหาภาระการทำความเย็นโดยตรงสำหรับอาคารที่มีการใช้งานระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์อยู่เดิม เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นต่อไป

สมการแบบจำลองของเครื่องผลิตน้ำเย็นและหอผึ่งเย็นได้มีการศึกษา พัฒนาด้วยเทคนิควิธีการต่างๆ เพื่อให้ได้สมการที่มีความแม่นยำน่าเชื่อถือและนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสองสำหรับสองตัวแปร

(Bi-Quadratic Polynomial Function) โดยใช้ชุดข้อมูลของเครื่องผลิตน้ำเย็นชนิดและขนาดต่างๆ ของ Underwood และ Yik [8] ซึ่งทำให้ได้สมการที่นำเชื้อถือและนำมาใช้งานได้ง่าย โดยมีตัวแปรสำคัญคือพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในเครื่องผลิตน้ำเย็น ( $W_{Rated}$ ) พลังงานที่ใช้จริง ( $W_{CHR}$ ) ความสามารถในการทำความเย็นสูงสุด ( $Q_{Rated}$ ) และภาระการทำความเย็นจริง ( $Q_E$ ) สามารถทำนายการใช้ไฟฟ้าของเครื่องผลิตน้ำเย็นได้โดยใช้สมการ (1) และสมการของห่อหุ้มเย็น (2)

$$w_{CHR} = a_0 + a_1 q_E + a_2 q_E^2 + a_3 T_{CIN} + a_4 T_{CIN}^2 + a_5 q_E T_{CIN} + a_6 q_E^2 T_{CIN} + a_7 q_E T_{CIN}^2 + a_8 q_E^2 T_{CIN}^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $w_{CHR}$  = ตัวแปรไร้มิติของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ( $\frac{W_{CHR}}{W_{Rated}}$ )

$q_E$  = ตัวแปรไร้มิติของภาระการทำความเย็น ( $\frac{Q_E}{Q_{Rated}}$ )

$T_{CIN}$  = อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าคอยล์ร้อน ( $^{\circ}C$ )

$a_0 - a_8$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองเครื่องผลิตน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำจากการศึกษาของ Underwood และ Yik [8]

$$T_{wo} = c_0 + c_1 R + c_2 R^2 + c_3 T_{wb} + c_4 T_{wb}^2 + c_5 R T_{wb} + c_6 R^2 T_{wb} + c_7 R T_{wb}^2 + c_8 R^2 T_{wb}^2 \quad (2)$$

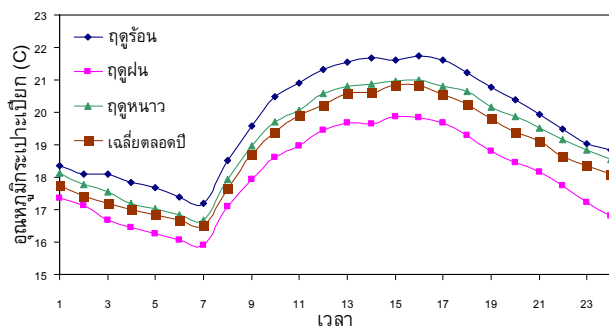
เมื่อ  $R$  = เรนจ์ของห่อหุ้มเย็น ( $^{\circ}C$ ) =  $T_{w,i} - T_{w,o}$

$T_{wb}$  = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศ ( $^{\circ}C$ )

$T_{wo}$  = อุณหภูมิน้ำขาออกจากห่อหุ้มเย็น ( $^{\circ}C$ )

$c_0 - c_8$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของห่อหุ้มเย็นที่

หาได้โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้ผลิต



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกในรอบวัน

การใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นจะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ต้องเปลี่ยนแปลงช่วงเวลางานไปจากเดิม และช่วงเวลาระหว่างวันที่ต่างกันนั้นจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตน้ำเย็น และจากการศึกษาพบว่า ตลอดทั้งปีมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศในแต่ละช่วงเวลาใกล้เคียงกันดังรูปที่ 1 จึงได้มีการประยุกต์เอาข้อมูลสภาวะอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงในส่วนอุณหภูมิกระเปาะเปียกรวมคำนวณในแบบจำลองของระบบปรับอากาศด้วย

$$T_{wb} = 0.0158 \times X^2 - 0.3301 \times X + 18.048 \quad , \quad (0 < X \leq 7)$$

$$T_{wb} = 0.00266 \times X^3 - 0.17129 \times X^2 + 3.28744 \times X + 0.97092 \quad , \quad (7 < X \leq 24) \quad (3)$$

เมื่อ  $X$  = เวลา (ชั่วโมง)

ซึ่งสมการทำนายอุณหภูมิกระเปาะเปียก (3) ได้จากการรวบรวมข้อมูลภูมิอากาศรายชั่วโมง เฉลี่ย 10 ปีของจังหวัดขอนแก่น (ระหว่างปี พ.ศ.2529-2538) ณ สถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยากระทรวงคมนาคม [9]

เมื่อได้ข้อมูลจากแบบจำลองของเครื่องผลิตน้ำเย็นแล้วจึงนำไปคำนวณเกี่ยวกับการใช้ระบบสะสมน้ำเย็น ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้เป็นถึงสะสมน้ำเย็นแบบแยกชั้นอุณหภูมิ ทรงกระบอก ทำงานแบบเต็มถึง (Full Scale) สามารถนำความเย็นที่เก็บไว้ไปใช้งานได้ร้อยละ 92 ของความจุของถัง เนื่องจากมีความสูญเสียทั้งจากภายนอกและภายในถึงสะสมน้ำเย็นจากการศึกษาของ Bahnfleth และ Reindl [10] โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$\eta_{TES} = \frac{Q_{Discharge}}{Q_{Max}} \quad (4)$$

เมื่อ  $\eta_{TES}$  = ประสิทธิภาพของถังสะสมน้ำเย็น

$Q_{Discharge}$  = ความเย็นที่สามารถนำไปใช้ (Ton-hr)

$Q_{Max}$  = ความเย็นที่ถึงเก็บไว้ได้ในทางทฤษฎี (Ton-hr)

และสามารถคำนวณปริมาตรถังสะสมน้ำเย็นได้จากสมการที่ (5)

$$V_S = \frac{Q_{Max}}{\eta_{TES} \times \Delta T_S} \times \frac{3024}{1000} \quad (5)$$

เมื่อ  $V_S$  = ปริมาตรของถังสะสมน้ำเย็น ( $m^3$ )

$\Delta T_S$  = อุณหภูมิแตกต่างของน้ำขาเข้าและออกจากถังเก็บน้ำเย็น

$$1 \text{ Ton-hr} = 3024 \text{ kcal}$$

$$1000 \text{ kcal} = 1 \text{ }^{\circ}C \cdot m^3 \text{ (Water)}$$

### 3. ขั้นตอนและวิธีการ

ในการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นร่วมกับระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์จำเป็นต้องใช้ข้อมูลภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศเป็นข้อมูลนำเข้าในการคำนวณ และข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบซึ่งเป็นข้อมูลที่สมารถหาได้จากผู้ผลิต เช่น ความสามารถสูงสุดในการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำเย็น ข้อมูลสภาวะการทำงานของห่อหุ้มเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็นและน้ำหล่อเย็น เป็นต้น ซึ่งจากคำแนะนำของ ARI 2002 [11] เกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพของระบบสะสมความเย็นสามารถสรุปข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา ดังนี้

- 3.1 ข้อมูลภาระการทำความเย็นเป็นรายชั่วโมงของระบบ
- 3.2 ตารางการทำงานของอุปกรณ์สะสมน้ำเย็นเป็นรายชั่วโมง
- 3.3 อุณหภูมิออกแบบของสิ่งแวดล้อม
- 3.4 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ต้องจ่ายไปยังส่วนปรับอากาศ ( $7.2^{\circ}C$ )
- 3.5 อุณหภูมิน้ำเย็นที่กลับจากส่วนปรับอากาศ ( $12.8^{\circ}C$ )
- 3.6 อัตราการไหลสูงสุดของน้ำเย็น ( $5.45 \text{ m}^3 / \text{min}$ )

3.7 ระยะเวลาสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถประจุน้ำเย็นได้ถึงเก็บ นับจากสภาวะเริ่มต้น (ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งานที่กำหนด)

3.8 คุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ในระบบสะสม (น้ำ)

เพื่อให้เห็นผลการศึกษเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจนจึงได้นำเอาข้อมูลของระบบผลิตน้ำเย็นหอประชุมเนกประสงค์กาญจนาภิเษก มหาวิทยาลัยขอนแก่น [12] มาใช้เป็นกรณีศึกษาซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องผลิตน้ำเย็นชนิดเครื่องอัดแบบหอยโข่ง ระบายความร้อนด้วยน้ำของบริษัทเทรน โมเดล CVHE 660 สารทำความเย็น HCFC-123 (R-123) มีค่าภาระออกแบบ 600 ตัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 401 kW อัตราส่วนการใช้พลังงาน 0.668 kW/Ton อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก 7.2 (°C) อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า 12.8 (°C) อัตราการไหลของน้ำเย็น 5.45 m<sup>3</sup>/min ป้อนน้ำเย็นขนาด 125 แรงม้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า 32.2 (°C) อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาออก 37.6 (°C) อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 6.81 m<sup>3</sup>/min ป้อนน้ำหล่อเย็นขนาด 75 แรงม้า

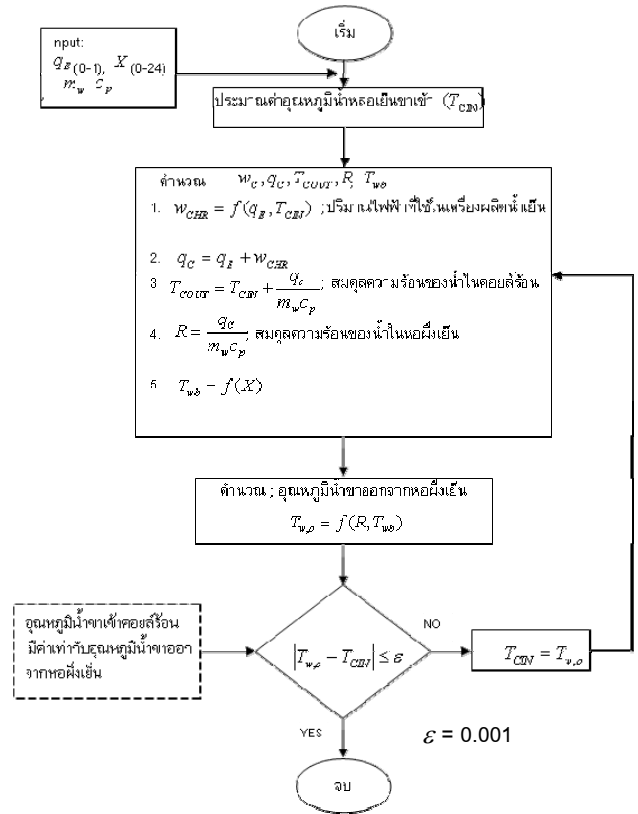
หอฝึ่งเย็นขนาด 700 ตัน ของผู้ผลิต Liang Chi รุ่น LCB 700 อัตราการไหลของอากาศผ่านหอฝึ่งเย็น (v<sub>a</sub>) มีค่าเป็น 4,050 m<sup>3</sup>/min อัตราการไหลของน้ำผ่านหอฝึ่งเย็น (v<sub>w</sub>) มีค่าเป็น 9.10 m<sup>3</sup>/min มอเตอร์พัดลมขนาด 30 แรงม้า

หลังจากรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นและแทนค่าลงในแบบจำลองแล้ว จะได้เป็นชุดสมการแบบจำลองของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่มีเครื่องอัดแบบหอยโข่ง ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำของอาคารกรณีศึกษา แล้วใช้โปรแกรม EES ช่วยในการคำนวณระบบสมการภายใต้เงื่อนไขสภาวะต่างๆ ดังขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 2 เมื่อตั้งสมมุติฐานให้มีการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็น เพื่อศึกษาความสามารถในการลดการใช้ไฟฟ้าในระหว่างช่วงเวลาความต้องการสูงสุด และหามาตรการที่เหมาะสมในการดำเนินการต่อไป

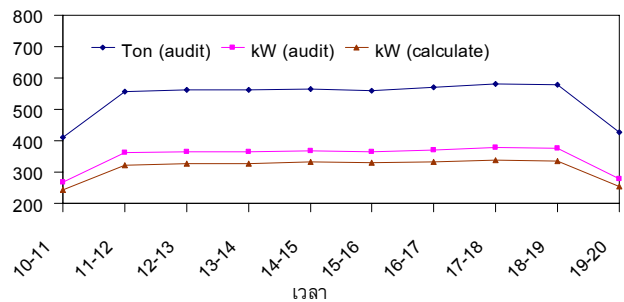
#### 4. ผลการจำลองแบบ

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาจำลองการทำงานของระบบปรับอากาศกรณีศึกษาซึ่งประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในข้อ 3 และใช้ค่าภาระการทำความเย็นรวมของอาคารในหน่วย ตัน-ชั่วโมง ที่ได้จากการตรวจวัดของสถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยขอนแก่น [12] เป็นข้อมูลนำเข้า พบว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องผลิตน้ำเย็นที่ได้จากการใช้แบบจำลองภายใต้เงื่อนไขการทำงานปรกติที่ไม่มีการสะสมน้ำเย็นมีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดโดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบในช่วงที่มีการทำงานของระบบ ดังรูปที่ 3

จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวมาใช้งานแสดงผลการทำงานของระบบผลิตน้ำเย็นภายใต้สมมุติฐานของการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นร่วมด้วย สำหรับรูปแบบการทำงานต่างๆ คือระบบสะสมน้ำเย็นที่มีการสะสมน้ำเย็นคิดเป็นร้อยละ 100 75 50 และ 25 โดยภาระความร้อนรวมของระบบปรับอากาศในวันที่ใช้ออกแบบมีค่าประมาณ 5,400 Ton-hr กำหนดให้เครื่องผลิตน้ำเย็นทำงานที่สภาวะ



รูปที่ 2 ขั้นตอนในการคำนวณการใช้ไฟฟ้าในเครื่องผลิตน้ำเย็น



รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องผลิตน้ำเย็นที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

90% ขณะประจุน้ำเย็น มีการใช้พลังงานในหอฝึ่งเย็น ป้อนน้ำเย็น และ ป้อนน้ำหล่อเย็นคงที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเดินเครื่อง ทำให้ผลรวมของการใช้ไฟฟ้าในส่วนผลิตน้ำเย็นสามารถคำนวณได้จากสมการ ที่ (6) และมีค่าดังที่แสดงในตารางที่ 1

$$P_{Total} = P_{Chiller} + P_{CT} + P_{CHP} + P_{CLP} \quad (6)$$

เมื่อ  $P_{Total}$  = กำลังไฟฟ้ารวมในส่วนผลิตน้ำเย็น

$P_{Chiller}, P_{CT}, P_{CHP}, P_{CLP}$  คือกำลังไฟฟ้าของเครื่องผลิตน้ำเย็น หอฝึ่งเย็น ป้อนน้ำเย็นและป้อนน้ำหล่อเย็นตามลำดับ

ตารางที่ 1 สรุปการใช้พลังงานของส่วนผลิตและสะสมน้ำเย็นใน

เวลา	ช่วงเวลาต่างๆ				
	Conventional (kW)	Full Storage (kW)	75% Storage (kW)	50% Storage (kW)	25% Storage (kW)
0-1	0	653	0	0	0
1-2	0	651	651	0	0
2-3	0	649	649	0	0
3-4	0	648	648	648	0
4-5	0	647	647	647	0
5-6	0	646	646	646	0
6-7	0	645	645	645	645
7-8	0	644	644	644	644
8-9	0	651	651	651	651
9-10	0	0	0	0	0
10-11	589	161	461	520	586
11-12	674	161	463	522	589
12-13	680	161	464	524	591
13-14	680	161	464	524	592
14-15	684	161	465	525	593
15-16	681	161	465	525	593
16-17	686	161	465	525	592
17-18	692	161	464	524	592
18-19	689	161	464	523	591
19-20	601	161	463	522	589
20-21	0	0	0	0	0
21-22	0	0	0	0	0
22-23	0	659	0	0	0
23-0	0	657	0	0	0
P (kW)	692	161	465	525	593
E (kWh)	6657	8755	9817	9115	7847
E <sub>1</sub> (kWh)	6657	1607	4638	5235	5908
E <sub>2</sub> (kWh)	0	7148	5180	3879	1939

โดย P = กำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วง On-peak

E = พลังงานที่ใช้ตลอดทั้งวัน

E<sub>1</sub> = พลังงานที่ใช้ในช่วง On-peak (9.00-22.00 น. จันทร์-ศุกร์)

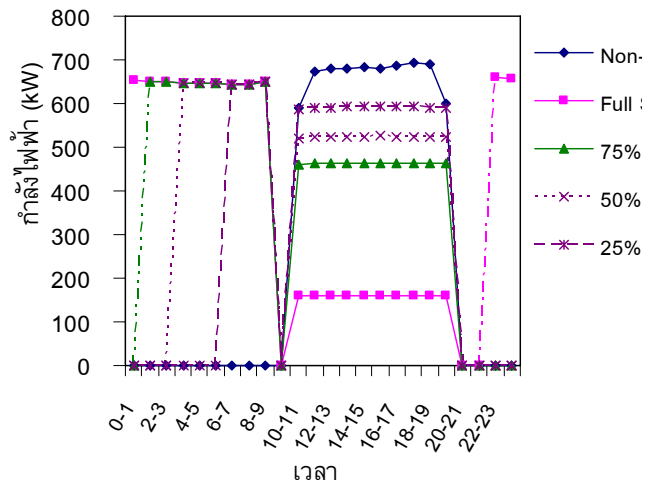
E<sub>2</sub> = พลังงานที่ใช้ในช่วง Off-peak (22.00-9.00 น. จันทร์-ศุกร์ และ 0.00-24.00 น. เสาร์-อาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์)

จากการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นร่วมกับระบบปรับอากาศ ทำให้การใช้พลังงานของระบบผลิตน้ำเย็นเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4

### 5. การวิเคราะห์ผล

จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองผลการดำเนินงานภายใต้เงื่อนไขและข้อสมมุติฐานต่างๆ ในรูปแบบการทำงานที่ต่างกัน 5 แบบ ได้แก่ แบบสะสมน้ำเย็นเต็มภาระ (Full-storage) และแบบสะสมน้ำเย็นในสัดส่วนที่ลดลงเป็นร้อยละ 75 50 และ 25 ของภาระความเย็นทั้งหมดตามลำดับ โดยกำหนดให้ทำงานโดยใช้เครื่องผลิตน้ำเย็นเครื่องเดิมรวมทั้งหอผึ่งเย็นและปั๊มน้ำเดิม สามารถนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์ความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการใช้งานระบบสะสมน้ำเย็นในลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

5.1 ถึงแม้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงาน (COP) ของเครื่อง



รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในส่วนผลิตน้ำเย็นในวันออกแบบ

ผลิตน้ำเย็นที่ทำงานในช่วงการประจุน้ำเย็นเข้าสู่ถึงเก็บโดยเฉลี่ย(5.79) จะมีค่าสูงกว่าค่า COP ของการทำงานในสภาวะปกติ (5.49) เล็กน้อยสำหรับเครื่องผลิตน้ำเย็นเครื่องเดียวกัน แต่ภาระการผลิตน้ำเย็นของระบบที่มีการสะสมน้ำเย็นจะเพิ่มสูงจากระบบเดิมเนื่องจากการสูญเสียทางความร้อนทั้งจากภายในและสูญเสียผ่านผนังของถังสะสมน้ำเย็น ทำให้เครื่องผลิตน้ำเย็นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของถังสะสมน้ำเย็น และการทำงานของระบบสะสมน้ำเย็นทำให้อุปกรณ์อื่นที่เกี่ยวข้องมีการทำงานในระยะเวลาที่มากขึ้นกว่าระบบเดิมทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบมากขึ้น และอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ได้ และจากผลการศึกษพบว่าหากใช้เครื่องผลิตน้ำเย็นเดิมแต่มีการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นแบบบางส่วนร่วมด้วยจะทำให้มีการใช้งานอุปกรณ์ไม่เต็มประสิทธิภาพ

5.2 ในการศึกษาการทำงานในลักษณะ Partial Storage เมื่อกำหนดให้มีการเก็บสะสมความเย็นเป็นสัดส่วนต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์ผลิตน้ำเย็นชุดเดิม พบว่าเครื่องผลิตน้ำเย็นมีการทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพและถือเป็นการสิ้นเปลืองโดยเปล่าประโยชน์ จึงไม่เหมาะนำไปประยุกต์ใช้งานจริง แต่ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา คือหากเครื่องผลิตน้ำเย็นเดิมครบกำหนดอายุการใช้งานก็สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการพิจารณาเลือกเครื่องผลิตน้ำเย็นที่มีขนาดลดลงได้โดยใช้ระบบสะสมน้ำเย็นทำงานร่วมด้วย หรือในกรณีที่มีการขยายส่วนปรับอากาศทำให้ระบบมีการทำความเย็นสูงขึ้นจากเดิมก็อาจติดตั้งระบบสะสมน้ำเย็นแทนการติดตั้งเครื่องผลิตน้ำเย็นเพิ่ม ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งการลงทุนเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในอนาคตได้

5.3 เมื่อนำข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณค่าไฟฟ้าเฉพาะในส่วนของระบบผลิตน้ำเย็นตามวิธีการคิดค่าไฟแบบ TOU พบว่าการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นแบบ Full Storage มีผลการประหยัดมากที่สุด โดยเมื่อสมมุติให้มีการใช้งานระบบปรับอากาศ 5 วัน ใน 1 เดือน จะสามารถลดค่าไฟลงได้ประมาณ 1.15 ล้านบาท ต่อปีหรือประมาณ 19.19% เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการสะสมน้ำเย็น โดยใช้ค่า Ft เดือน มิ.ย.51-ก.ย.51 (62.85 สตางค์/หน่วย) และหากคิดการลงทุนเฉพาะค่าถังสะสมน้ำเย็น 2,467 บาท/ตัน-ชม. [13] พบว่าระบบแบบสะสมเต็มภาระให้ระยะเวลาคืนทุนที่น้อยที่สุดคือประมาณ 13 ปี ทั้งนี้

ระบบปรับอากาศของกรณีตัวอย่างมีการใช้งานเฉลี่ยเพียงเดือนละ 5 วัน [11] คิดเป็นระยะเวลาการทำงานชั่วโมงต่อปีน้อย ทำให้ผลตอบแทนของการประหยัดค่าไฟฟ้าไม่สูงเท่าที่ควรดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ตัวแปรทางเศรษฐศาสตร์ของถังสะสมน้ำเย็น

Descriptions (Units)	100%	75%	50%	25%
Storage tank (ลบ.เมตร)	3747	2777	1851	926
Storage capacity (Ton-hr)	5940	4402	2935	1467
Tank cost (ล้านบาท)	14.65	10.86	7.24	3.62
Peak demand (kW)	161	465	525	593
Operating Period (ชม./ปี)	660	1080	960	780
Energy (MWh/ปี)	0.53	0.59	0.55	0.47
Electric cost (ล้านบาท/ปี)	1.46	2.39	2.47	2.50
Annual saving (ล้านบาท/ปี)	1.15	0.21	0.14	0.10
Payback (ปี)	13	51	54	35

เมื่อพิจารณาให้มีการใช้งานระบบมากขึ้น เป็น 10 และ 20 วัน เฉพาะวันจันทร์-ศุกร์ พบว่ากรณีสะสมแบบเต็มภาระจะมีระยะคืนทุนลดลงเป็น 10.5 และ 7.8 ปีตามลำดับ ส่วนการสะสมในลักษณะอื่นจะไม่คุ้มทุนเนื่องจากมีค่าไฟฟ้าสูงกว่าการใช้ระบบเดิม

## 6. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการทำงานของระบบผลิตน้ำเย็นด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างจากข้อมูลสมรรถนะการทำงานและข้อมูลออกแบบจากผู้ผลิตในครั้งนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมของการใช้ระบบสะสมน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศได้ และข้อมูลที่ได้จากการคำนวณก็สามารถใช้ประกอบการตัดสินใจในการออกแบบติดตั้ง เปลี่ยนแปลงหรือขยายการใช้งานระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ เพื่อให้สามารถบริหารจัดการการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเผยแพร่เทคโนโลยีการจัดการพลังงานในระบบปรับอากาศในองค์กรต่างๆ เพื่อการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและช่วยลดปัญหาความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของประเทศได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน (EMCO) มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้ให้การสนับสนุนงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

1. Turner, W. C., Doty, S., 2006. Thermal Energy Storage. Energy management handbook, 6<sup>th</sup> ed., pp. 519-532.
2. Chavala, Jr., W. D., 2001. Technology Potential of Thermal Energy Storage (TES) Systems in Federal Facilities. Federal Energy Management Program, U.S. Department of Energy, U.S.A..
3. Hasnain, S.M., 1998. Review on sustainable thermal energy

storage technology, part II, Cool thermal storage. Energy Research Institute (ERI), King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST), Saudi Arabia. Energy Conversion & Management, Vol. 39, pp. 1139-1153.

4. กุสกาณา กุมาฮา, 2532, การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบเก็บความเย็นสำหรับปรับอากาศในโรงแรม, คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. ภาณุ สุวิชาเชิดชู, 2541, การศึกษาและประเมินศักยภาพการใช้งานระบบเก็บความเย็นด้วยน้ำ ในอาคาร ท.101 กฟผ. สำนักงานใหญ่, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
6. Gordon, J. M., Kim Choon Ng, Hui Tong Chua, 1995. Centrifugal chillers, Thermodynamic modeling and a diagnostic case study, Int. J. Refrig., Vol. 18, No.4, pp. 253-257.
7. Solati, B., Zmeureanu, R., 2003. Correlation base model for the simulation of energy performance of screw chiller, Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 1903-1920.
8. Underwood, C. P., Yik, F.W. K., 2004. Modelling methods for energy in buildings, Oxford, Blackwell Science, pp. 128-181.
9. Energy Research Institute, Chulalongkorn University, <http://www.teenet.chula.ac.th/climatic/> (accessed on December 2005).
10. Bahnfleth, W. P., Reindl, D. T., 1998. Propects for Cool Thermal Storage in a Competitive Electric Power Industry, Journal of Agricultural Engineering, March.
11. ARI Standard 550/590-98, 1998. Standard for Water Chilling Packages Using the vapor Compression Cycle, Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 4301 North Fairfax Drive, Suite 425, Arlington, Va. 22203, U.S.A..
12. รายงานการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียดของอาคารควบคุม เล่มที่ 28 หอประชุมมอเนกประสงค์กาญจนาภิเษก, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 27 มีนาคม 2545
13. Boonasa, S., 2005. A Case Study of Energy Conservation in KMITNB using Chilled Water Storage, The 1<sup>st</sup> Conference on Energy Network of Thailand, pp. 238-243.