

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นที่มีถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็ง Mathematical Model of an Ice Thermal Storage System

วิษณุ ดาวขุนทด¹ จุฬารักษ์ เบญจปิยะพร²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40002

โทร 0-43202845 โทรสาร 0-43202849 อีเมล widsanu_d@hotmail.com¹ julkae@kku.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นที่มีถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็ง ชนิดน้ำแข็งเกาะบนท่อสารทำความเย็นแบบละลายภายนอกของโรงงานนม อ.ส.ค. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น ซึ่งมีการใช้งานถึงสะสมขนาดความจุ 2,366 kWh ข้อมูลภาระการทำความเย็นออกแบบรายชั่วโมง ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น และ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาสภาพแวดล้อมภายนอกเฉลี่ยรายชั่วโมง 24 ชั่วโมงถูกนำมาใช้ในแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม EES ช่วยในการประมวลผล เพื่อคำนวณเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ รวมถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยคำนวณค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ทั้งอัตราปกติและอัตราค่าไฟฟ้า TOU จากการจำลองการใช้งานระบบทำความเย็นที่มีถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็ง พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอคือ ปริมาณความเย็นสะสม และ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอก การเดินเครื่องทำความเย็นสร้างน้ำแข็งในขณะที่มีปริมาณน้ำแข็งที่น้อยและที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกที่ต่ำกว่า จะส่งผลให้การเดินระบบทำความเย็นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากการจำลองแบบแผนการทำงานที่ต่างกัน 5 แบบแผน พบว่า แบบแผน Partial Storage ช่วงกลางวัน สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมต่ำสุด 3.3% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบแผน Partial Storage ในช่วงกลางวันและมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุด อีกทั้งเมื่อเลือกใช้การคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU แล้วจะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 48% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบแผนอื่นๆ และลดลง 37.4% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบแผนการคิดอัตราค่าไฟฟ้าอัตราปกติ ดังนั้นแบบแผน Partial Storage ช่วงกลางวัน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับจัดการการใช้งานระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งของโรงงานนมแห่งนี้

Abstract

In this paper, a mathematical model of an external-melt ice-on-coil ice thermal storage system of DPO Khon Kaen North-East Milk factory with an 2,366 kWh ice storage is developed. Hourly cooling load per day, the technical data of ice storage system

and average wet bulb temperature are simulated and solved with EES computer program in order to comparison the energy use, COP and operation cost in five different operation strategies of the system. The calculations show that Partial Storage in night time strategy consumes total electrical energy less than 3.3% when compared with Partial Storage in day time strategy. By using TOU Tariff rate the operation cost of Partial Storage in night time strategy can reduce to 48% when compared with other operation and 37.4% when compared with Flat Tariff rate. Therefore, Partial Storage in night time strategy could be an optimum strategy to operate the presented ice storage system.

1. คำนำ

จากปริมาณความต้องการไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของวัน ทำให้การไฟฟ้าต้องหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องลงในช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงเท่านั้น ซึ่งเป็นการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่คุ้มค่า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงพยายามกระจายปริมาณความต้องการไฟฟ้า โดยส่งเสริมให้มีการลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง แล้วมาใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำแทน โดยอาศัยมาตรการการคิดอัตราค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ (TOU Rate) และ อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (TOD Rate) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า โดยผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลงได้หากมีการจัดการการใช้ไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

ระบบสะสมพลังงานเชิงความร้อน (Thermal Energy Storage, TES) ที่ได้รับความนิยมใช้งานในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด แบ่งตามลักษณะสารตัวกลางในการเก็บสะสมพลังงาน ได้แก่ ระบบสะสมน้ำเย็น (Chilled Water Storage) ระบบสารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material) และระบบสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็ง (Ice Storage) โดยระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ

ในการย้ายความต้องการพลังงาน มีการใช้งานทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์ ระบบนี้จะเดินเครื่องทำความเย็น เพื่อสร้างน้ำแข็งสะสมไว้ภายในถังสะสมที่มีการหุ้มฉนวนอย่างดี เป็นการสะสมพลังงานโดยอาศัยความร้อนแฝงจากการแข็งตัวของน้ำแข็ง เมื่อต้องการความเย็น น้ำแข็งที่เก็บสะสมไว้จะถูกละลายเพื่อนำความเย็นไปใช้ ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ จะเหมือนกันกับ ระบบทำความเย็นแบบทั่วไป ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องอัดไอ คอนเดนเซอร์ วาล์วลดความดัน และ อีแวนเปอเรเตอร์ สามารถประยุกต์ใช้งานกับสถานประกอบการซึ่งมีระบบผลิตน้ำเย็นโดยใช้ร่วมกับระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว หรือการติดตั้งเป็นระบบใหม่ ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งาน คือ ขนาดของเครื่องทำความเย็นจะมีขนาดเล็กกว่าระบบผลิตน้ำเย็นแบบปกติเมื่อมีระยะเวลาของภาระการทำความเย็นสูงสุดไม่นานนัก ประหยัดเงินลงทุนในการติดตั้งระบบเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าระบบผลิตน้ำเย็นแบบปกติ และประหยัดค่าไฟฟ้าโดยมีความสามารถจ่ายค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า ระบบสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งแบ่งออกได้หลายประเภทตามลักษณะการออกแบบและการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งมีจุดเด่นจุดด้อยต่างกันด้วย การจัดการการทำงานโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นสองแบบแผนการทำงาน ได้แก่ แบบ Full Storage และ Partial Storage ซึ่งมีการทำงานต่างกัน การเลือกใช้ระบบถึงสะสมพลังงานและการจัดการการใช้งานอย่างเหมาะสม จะส่งผลให้เกิดการประหยัดเงินลงทุนในการติดตั้งระบบ และ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ [1,2]

โรงงานนม อ.ส.ค. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น มีการใช้งานระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งเดิมอยู่แล้ว ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 50% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการทำงานของเครื่องทำความเย็นไม่ได้มีการจัดการการทำงาน จะถูกควบคุมโดยอัตโนมัติด้วยตัวควบคุมความหนาน้ำแข็ง ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมตัดต่อการทำงานของเครื่องอัดไอเมื่อมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำแข็งภายในถังสะสมต่ำสุดและสูงสุดตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการทำงานด้วยแบบแผนการควบคุมเช่นนี้ อาจจะไม่ได้ออกมาซึ่งประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ดี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการทำงานในลักษณะแบบแผนต่าง ๆ กัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของระบบ โดยอาศัยการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการทำงานด้วยแบบแผนต่าง ๆ กัน เพื่อหาแบบแผนการทำงานที่เป็นไปได้ในการจัดการการใช้งานระบบถึงสะสมพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกเหนือจากการใช้งานแบบปกติด้วยการควบคุมเปอร์เซ็นต์น้ำแข็งต่ำสุดและสูงสุด

2. งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยเกี่ยวกับระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งอย่างแพร่หลาย โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในเชิงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ ทั้งการตรวจวิเคราะห์การทำงาน [3] การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [4,5] เพื่ออธิบายลักษณะการทำงานหรือการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ และ การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งาน [6,7] ในประเทศไทยมีงานวิจัยเกี่ยวกับระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งไม่มากนัก วัฒนา [6]

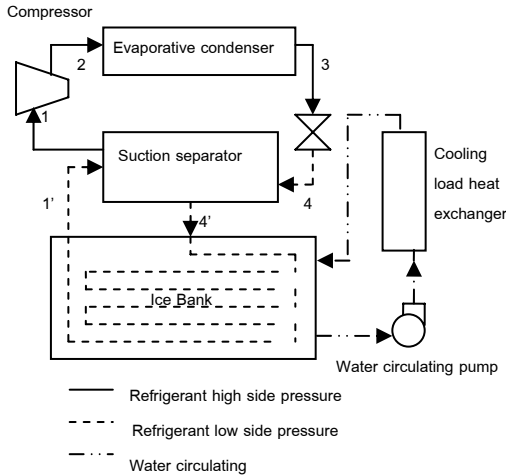
ได้ศึกษาการใช้งานกับอาคารสำนักงาน อาคารศูนย์การค้า โรงแรม และ โรงพยาบาล โดยใช้โปรแกรม BLAST ในการวิเคราะห์ ผลที่ได้คือแบบแผนการทำงาน Full Storage เป็นแบบแผนการทำงานที่ไม่คุ้มค่า และ แบบแผนการทำงาน Full storage On Peak มีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่าแบบแผนการทำงาน Load leveling เมื่อเปรียบเทียบอาคาร 4 ประเภทพบว่า อาคารสำนักงานมีระยะเวลาการคืนทุนเร็วที่สุดเนื่องจากมี load factor ต่ำกว่าอาคารประเภทอื่นๆ ซึ่งตัวอย่างกรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งจะเหมาะสมและคุ้มค่ากับการใช้งานกับสถานประกอบการที่มีความต้องการพลังงานสูงสุด เป็นระยะเวลาสั้นๆ การศึกษาของคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [7] ทำการวิเคราะห์การใช้ในอาคาร 4 ประเภทที่มีการคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOD เช่นเดียวกัน โดยใช้โปรแกรม DOE-2 ศึกษาเฉพาะระบบแบบ Ice-Harvesting system และ Ice on Coil System เนื่องจากระบบอื่นๆ ไม่เหมาะสมและไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทย พบว่าระบบแบบ Ice Harvester จะมีการลงทุนน้อยกว่าระบบ ice on coil เมื่อมีปริมาณความเย็นที่ต้องการเท่ากัน และแบบแผนการทำงาน Demand limiting storage มีความคุ้มทุนในการนำมาใช้งาน ส่วนแบบแผนการทำงานแบบ Full storage, Partial storage, Demand limited & Partial storage ไม่มีความคุ้มทุนในการใช้งาน

ในส่วนงานวิจัยด้านแบบจำลองในอดีต ได้มีการสร้างแบบจำลองตามสมมติฐานที่แตกต่างกันไป Chaichana [5] สร้างแบบจำลองของถึงสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็งโดยอาศัยวิธี quasi-steady state analysis และ thermal resistance network approach ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับที่ Neto และ Krarti [8] ใช้ ถึงสะสมพลังงานจะประกอบไปด้วยท่อตรงวางตัวในแนวนอนซึ่งถูกน้ำล้อมรอบ และมีสารทำความเย็นไหลผ่านภายในท่อ Lee [4] อธิบาย Basic heat transfer analysis ของกระบวนการ charging และ discharging ค่า output ของงานวิจัยนี้ได้ปริมาตรของน้ำแข็งภายในถังสะสม จากการทำ error analysis ของ ice volume และ cooling rate แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเท่ากับ 5% และ 12% ตามลำดับ โดยแบบจำลองของถึงสะสมพลังงานเป็นแบบที่มีการหลอมละลายจากภายนอก

การเดินเครื่องทำความเย็นของระบบทำความเย็นในช่วงเวลา กลางคืนซึ่งมีอุณหภูมิของอากาศภายนอกต่ำ จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงกว่า โดยจากการศึกษาแบบจำลองของระบบถึงสะสมน้ำแข็งของ Chaichana [5] ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอซึ่งได้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำลงเช่นเดียวกันกับ Lee และ Jones [3] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งชนิดน้ำแข็งเกาะบนท่อสารทำความเย็นสำหรับอาคารที่พักอาศัยและอาคารพาณิชย์ขนาดเล็กโดยการตรวจวัด พบว่า ที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกต่ำกว่าจะมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Energy-Efficiency Ratio, EER) สูงกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้จำลองการทำงานให้เครื่องทำความเย็นทำงานในช่วงเวลากลางคืนซึ่งจะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูงกว่าการทำงานในช่วงกลางวัน เพื่อหาแนวทางการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของ

ถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งของโรงงานนม อ.ส.ค. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น

3.แบบจำลองของระบบทำความเย็นที่มีถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็ง



รูปที่ 1 ระบบทำความเย็นที่มีถึงสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็ง แบบน้ำแข็งเกาะบนท่อ แบบละลายภายนอก (External-melt ice-on-coil ice storage system)

3.1 แบบจำลองถึงสะสมพลังงานในรูปน้ำแข็ง

การศึกษาการแข็งตัวของน้ำกลายเป็นน้ำแข็งซึ่งเกาะอยู่รอบๆท่อสารทำความเย็น เป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี โดยน้ำที่อยู่ล้อมรอบท่อจะถ่ายเทความร้อนผ่านทางผนังท่อไปยังสารทำความเย็นที่อยู่ภายในท่อ โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- พิจารณาท่อที่วางตัวในถังเป็นท่อตรงเท่านั้น
 - วิเคราะห์การแข็งตัวในทิศทางเดียว (One-Dimensional)
 - การถ่ายเทความร้อนในทุกๆท่อเหมือนกันทุกประการ และน้ำแข็งที่เกิดขึ้นบนท่อสารทำความเย็นตลอดทั้งท่อมีความหนาเท่ากัน
 - ไม่คิดอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนกับอากาศภายนอกถัง
- Lee [4] ได้พัฒนาสมการการแข็งตัวของน้ำแข็งต่อมาจากงานวิจัย

ของ Stewart [9] โดยการคิดอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของท่อสารทำความเย็นที่ดูความร้อนแฝงของการแข็งตัวของน้ำแข็งเพื่อสร้างน้ำแข็งขึ้นรอบๆท่อ (Q_{ev}) หาได้จากปริมาณของความร้อนแฝงที่ต้องการในการสร้างน้ำแข็งรอบๆท่อของสารทำความเย็นคูณกับอัตราการแข็งตัวของน้ำแข็ง

$$Q_{ev} = h_{sf} \frac{\Delta m_{ice}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$m_{ice} = \pi (r^2 - r_o^2) \rho_{ice} L \quad (2)$$

โดย Δm_{ice} เป็นผลต่างของน้ำแข็งในช่วงเวลา Δt , r คือตำแหน่งของผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำแข็ง และ r_o คือรัศมีด้านนอกท่อ Stewart [9] เสนอค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อวเปอเรเตอร์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น (T_e)

$$Q_{ev} = Q_f - b(T_f - T_e) \quad (3)$$

เมื่อ Q_f คือ อัตราการทำความเย็นเมื่ออุณหภูมิของสารทำความเย็นเท่ากับอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของน้ำ, $T_f = 0^\circ C$ และ b คือ ความชันหาได้จากสมการ

$$b = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (4)$$

ซึ่งค่า Q_{max} และ Q_{min} คืออัตราการทำความเย็นสูงสุดและอัตราการทำความเย็นต่ำสุดที่อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นสูงสุดและต่ำสุด T_{max} และ T_{min} ตามลำดับ Lee [4] เสนอสมการทำนายอัตราการแข็งตัวของน้ำแข็ง

$$t^* = \left(\frac{1}{2R^*} - \frac{1}{4} \right) (r_o^{*2} - 1) + \frac{r_o^{*2}}{2} \ln r_o^* - \frac{k}{2r_o h_o} \left(r_o^{*2} - \frac{2h_o r_o^*}{h} - 1 + \frac{2h_o}{h} \right) \quad (5)$$

เมื่อสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกแปรผันโดย $h \propto \frac{1}{r^{0.5}}$ [9] จากสมการ (5) จะได้

$$t^* = \left(\frac{1}{2R^*} - \frac{1}{4} \right) (r_o^{*2} - 1) + \frac{r_o^{*2}}{2} \ln r_o^* - \frac{k}{2r_o h_o} \left(r_o^{*2} - \frac{4r_o^{*1.5}}{3} + \frac{1}{3} \right) \quad (6)$$

เมื่อ $r_o^* = \frac{r}{r_o}$

$$t^* = \frac{(T_f - T_{max})k}{\left(1 - \frac{Q_{max}}{Q_f} \right) r_o^2 \rho h_{sf}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{kR_{min}}{\left(1 - \frac{Q_{max}}{Q_f} \right) r_o} \quad (9)$$

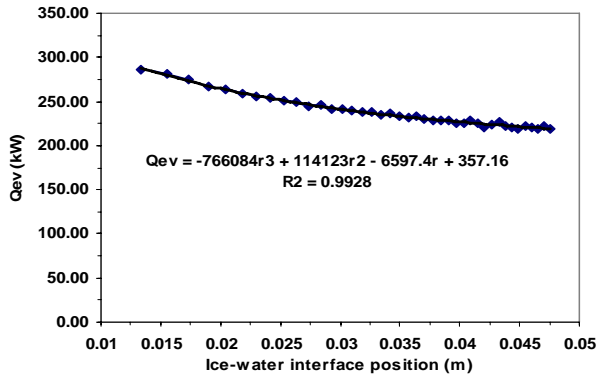
$$R_{min} = \frac{r}{r_i} \left(\frac{1}{h_i} + F + C \right) + \frac{r}{k_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) + \frac{1}{h_o} \quad (10)$$

ซึ่ง k และ k_i คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็งและท่อตามลำดับ h , h_i และ h_o คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ซึ่งมีน้ำแข็งที่ผิวท่อ และ ภายนอกท่อซึ่งไม่มีน้ำแข็งเกาะ ตามลำดับ F คือ Fouling factor สำหรับผิวท่อด้านใน และ C คือ contact resistance จากสมการ (1) ถึงสมการ (10) เมื่อใส่ตัวแปร input เข้าไปได้แก่ T_f , T_{max} , Q_{max} , b , h , h_i , h_o , k , k_i , F และ C การคำนวณเริ่มต้นจากการคำนวณค่าตัวแปรเวลาไร้มิติ สมการ (8) สำคัญๆช่วงเวลาในแต่ละ time step จะทำการคำนวณจนกว่าค่าตัวแปรเวลาไร้มิติจากสมการ (8) เท่ากับสมการ (6) เมื่อนั้นจะได้ตัวแปร output ได้แก่ r , Q_{ev} และ T_e ในทุกๆ time step

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำแข็งและอัตราการทำความเย็นดังรูปที่ 2 ทำการ fit-curve จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำความเย็นและความหนาของน้ำแข็ง ดังสมการ (11)

$$Q_{ev} = -766084r^3 + 114123r^2 - 6597.4r + 357.16 \quad (11)$$

โดยที่อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในแต่ละ time step สามารถคำนวณได้จากสมการ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำแข็งและอัตราการทำความเย็น โดยอาศัยแบบจำลองการแข็งตัวของน้ำแข็ง Lee [4]

อัตราการไหลของสารทำความเย็นคำนวณได้จาก

$$m_r = \frac{(h_{r,in} - h_{r,out})}{Q_{ev}} \quad (12)$$

จากรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาถึงสะสมพลังงานเป็นปริมาตรควบคุม

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (13)$$

$$Q_{wall} + m_r(h_{r,in} - h_{r,out}) + m_w(h_{w,in} - h_{w,out}) = \frac{dU(t)}{dt} \quad (14)$$

จากการตรวจวิเคราะห์ของ Lee [3] ความร้อนจากอากาศภายนอกที่ถ่ายเทด้วยการนำความร้อนผ่านผนังถึงสะสมพลังงานมีค่าน้อยกว่า 1% ของทั้งอัตราการทำความเย็นและอัตราการละลายน้ำแข็ง ดังนั้นผลของการถ่ายเทความร้อนนี้จึงมีค่าน้อยมาก $Q_{wall} \approx 0$ เมื่อ

$$Q_{ev} = m_r(h_{r,in} - h_{r,out}) \text{ และ } Q_{load} = m_w(h_{w,in} - h_{w,out}) \text{ ดังนั้น} \quad (15)$$

$$Q_{ev} + Q_{load} = \frac{dU(t)}{dt}$$

3.2 แบบจำลองระบบทำความเย็น

จากรูปที่ 1 พิจารณาอีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์เป็นปริมาตรควบคุม เป็นระบบที่คงตัวและมีการไหลคงที่ (Steady-state, Steady flow) จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$Q_{con} = m_r(h_{r,in} - h_{r,out}) + W_{com} \quad (16)$$

หรือ

$$Q_{con} = Q_{ev} + W_{com} \quad (17)$$

เครื่องอัดไอของโรงงานนม เป็นเครื่องอัดไอชนิด สกรูเดี่ยว (single screw compressor) กำลังงานที่เครื่องอัดไอหาได้จาก [10]

$$W_{comp} = \frac{m_r(h_2 - h_1)}{\eta_{mo}\eta_{me}\eta_{isen}} \quad (18)$$

เมื่อ η_{mo} คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์ η_{me} คือ ประสิทธิภาพเชิงกลของมอเตอร์ และ η_{isen} คือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.8, 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอหาได้จาก

$$COP = \frac{Q_{ev}}{W_{com}} \quad (19)$$

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 3 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

ความร้อนจากสารทำความเย็นจะถูกระบายออกจากระบบทำความเย็นด้วยอีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ โดยทั่วไปบริษัทผู้ผลิตจะให้ข้อมูลของ nominal volume air flow rate, nominal heat rejection capacity และค่า variable load multiplier (หรือ Heat Rejection Capacity Factor, HRF) ซึ่งค่า HRF เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอก และ อุณหภูมิควบแน่นอิ่มตัวของสารทำความเย็น อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงที่อีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ [11] สามารถคำนวณจาก

$$Q_{con} = \frac{Q_{con, no\ min\ al}}{HRF(T_{wb}, T_{con})} \quad (20)$$

สมการ (21) แสดงความสัมพันธ์ของค่า HRF อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอก และ อุณหภูมิควบแน่นอิ่มตัวของสารทำความเย็น จากข้อมูลของผู้ผลิต อีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ของ Baltimore Aircoil Ltd [12] คือ

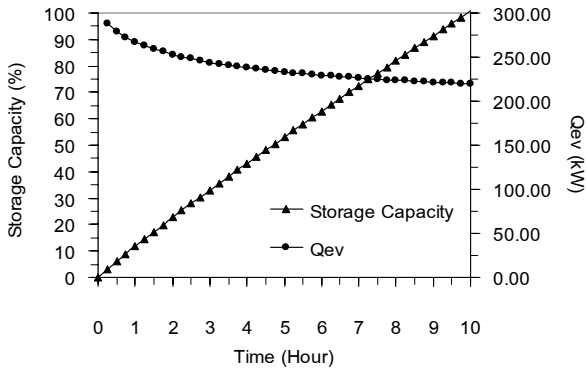
$$T_{con} = 11.392 \frac{T_{wb}^{0.3841}}{HRF^{0.287}} \quad (21)$$

จากสมการ (16) ถึง สมการ (21) สามารถใช้ทำนายตัวแปรที่ไม่ทราบค่า คือ อุณหภูมิควบแน่นของสารทำความเย็น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ได้ และ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอ เมื่อทราบ อัตราการทำความเย็น อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอก อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น

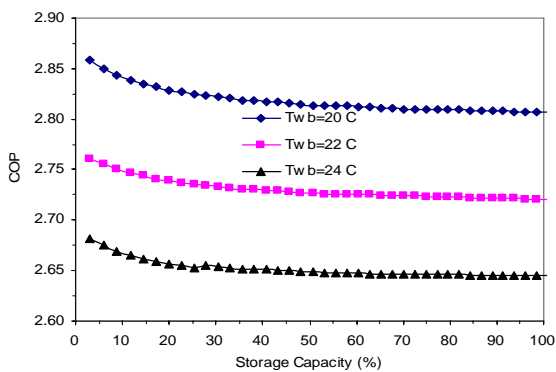
4. การจำลองกระบวนการสร้างน้ำแข็ง

การจำลองกระบวนการแข็งตัวของน้ำแข็งอาศัยสมการ ในหัวข้อที่ผ่านมา ในที่นี้ทำการออกแบบการจำลองจากเริ่มต้นภายในถึงสะสมพลังงานมีปริมาณน้ำแข็ง 0% (0 kWh) ของความจุสูงสุด จนกระทั่งเต็มความจุของถังที่ 100% (2,366 kWh) วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณความเย็นสะสม อัตราการทำความเย็นและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอในระหว่างกระบวนการสร้างน้ำแข็ง ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงในรูปที่ 3 ปริมาณความเย็นสะสมจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะเวลาในกระบวนการสร้างน้ำแข็ง ส่วนอัตราการทำความเย็นเมื่อกระบวนการสร้างน้ำแข็งดำเนินต่อไปจะมีค่าลดลงสาเหตุมาจากค่าความต้านทานความร้อนของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้องการกำลังงานในการอัดไอของสารทำความเย็นมากขึ้น ทำให้ค่า COP ของเครื่องอัดไอลดต่ำลงและที่อุณหภูมิอากาศภายนอกที่ต่ำกว่าจะส่งผลให้ค่า COP ของเครื่องอัดไอสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 4

การเดินระบบสร้างน้ำแข็งในขณะที่มีปริมาณน้ำแข็งที่น้อยกว่าและที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกที่ต่ำกว่า จะส่งผลให้การเดินระบบทำความเย็นมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงขึ้น การออกแบบการทำงานจึงควรหลีกเลี่ยงการเดินระบบในช่วงที่มีอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกที่สูงอย่างเช่นในช่วงกลางวัน โดยใช้ช่วงเวลาในการเดินระบบสร้างน้ำแข็งในช่วงเวลากลางคืนแทน



รูปที่ 3 ความจุความเย็นสะสมและอัตราการทำความเย็นกับระยะเวลา
ในกระบวนการสร้างน้ำแข็ง



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่า COP กับ ระยะเวลาในกระบวนการสร้างน้ำแข็ง
ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกแตกต่างกัน

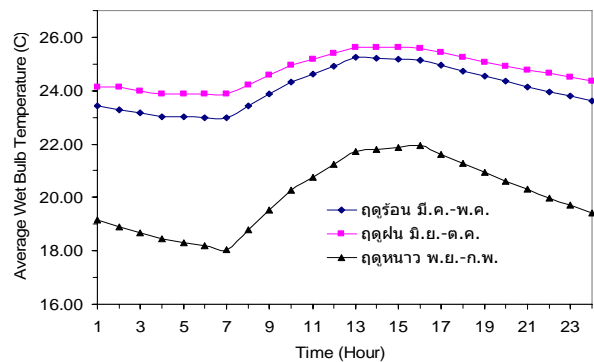
5. การจำลองสภาพการทำงานของระบบถังสะสมพลังงานในรูป ของน้ำแข็งด้วยแบบแผนการทำงานที่แตกต่างกัน

ทำการจำลองสภาพการทำงานของระบบด้วยแบบแผนการทำงานที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการใช้งานและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือได้แบบแผนการทำงานที่ส่งผลให้เกิดการใช้งานระบบอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า อาศัยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบต้องการ และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า เป็นตัวแปรที่จะนำมาชี้วัด

การจำลองอาศัยข้อมูลนำเข้า ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิมวลอากาศของอุณหภูมิกระเปาะเปียกเฉลี่ยรายชั่วโมงแยกตามฤดูกาลของจังหวัดขอนแก่น (จากสถานีอุณหภูมิมวลอากาศจังหวัดขอนแก่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ. 2550) ดังแสดงในรูปที่ 5 ภาระการทำความเย็นรายชั่วโมงและข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ต่างๆของโรงงานกรณีศึกษา [13] โดยมีตัวแปรนำออก ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบต้องการ การประมวลผลอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เลือกใช้โปรแกรม Engineering Equation Solve, EES ทำการจำลองการทำงานทุกๆ 15 นาที โดยชั่วโมงที่ 1 ออกแบบให้เป็นช่วงเวลาระหว่าง 0.00น.-1.00น. จนกระทั่งครบ 24 ชั่วโมง ซึ่งในที่นี้จะทำออกแบบการทำงานออกเป็น 5 แบบแผนการทำงานด้วยกัน ได้แก่

1. เดินระบบทำความเย็นโดยอัตโนมัติควบคุมโดยค่าเปอร์เซ็นต์น้ำแข็งต่ำสุดและสูงสุด
 - 1.1) 20% และ 80% ตามลำดับ
 - 1.2) 40% และ 80% ตามลำดับ
 - 1.3) 80% และ 100% ตามลำดับ
2. Partial Storage แบบต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - 2.1) ช่วงกลางวัน เวลา 9.00น.-17.00น.
 - 2.2) ช่วงกลางคืน เวลา 22.00น.-5.45น.

โดยแบบแผนการทำงาน Full Storage ไม่ได้นำมาวิเคราะห์เพราะ จากข้อมูลภาระการทำความเย็นรายชั่วโมงช่วงเวลาที่ไม่มีภาระการทำความเย็นมีระยะเวลาเพียง 5 ชั่วโมง กระบวนการสร้างน้ำแข็งสามารถประจุความเย็นสะสมได้ 53.13% (1,257 kWh) ดังรูปที่ 3 ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งานใน 1 วันของโรงงานนม 80% (1,885 kWh)



รูปที่ 5 อุณหภูมิกระเปาะเปียกเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดูกาล

6. วิเคราะห์ผล

6.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

6.1.1 การสิ้นเปลืองพลังงาน

พลังงานไฟฟ้ารวมที่ต้องการในการเดินระบบทำความเย็นประกอบไปด้วย พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอ บัมพ์น้ำหมุนเวียน พัดลมและปั๊ม น้ำของอีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ โดยในการศึกษานี้ไม่คิดค่าพลังงานไฟฟ้าในส่วนของปั๊มน้ำที่คอนเดนเซอร์ เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าในอีกสามส่วนที่กล่าวมา

จากตารางที่ 1 กำหนดภาระทำความเย็นรายวันขนาดและลักษณะการกระจายตัวที่เท่ากัน ผลที่ได้จากการจำลองคือการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมจากการทำงานรายวันมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 5 แบบแผนการทำงาน โดยแบบแผน 2.2 มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมต่ำที่สุด เนื่องมาจากการออกแบบเครื่องทำความเย็นให้ทำงานในช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิของอากาศภายนอกต่ำในช่วงกลางคืน ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอต้องการในกระบวนการอัดต่ำ อีกทั้งกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการเดินพัดลมระบายความร้อนที่อีวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ก็ลดลงด้วย ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีเดินเครื่องทำความเย็นในช่วงกลางวัน (แบบแผน 2.1) จะพบว่ามีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าประมาณ 1.6% ในฤดูฝน 1.9% ในฤดูร้อน และ 3.3% ในฤดูหนาว ในกรณีการเปรียบเทียบการทำความเย็นใน

เวลากลางวันและกลางคืนนี้ฤดูหนาวประหยัดพลังงานได้มากที่สุด เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกในช่วงกลางวันและกลางคืนที่มากกว่าดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยได้จากการจำลองการทำงานรายวันในแต่ละแบบแผน

แบบแผนการทำงาน	ฤดูฝน		ฤดูร้อน		ฤดูหนาว	
	สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kWh)	COP เฉลี่ย	สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kWh)	COP เฉลี่ย	สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kWh)	COP เฉลี่ย
1.1	952	2.63	945	2.65	901	2.82
1.2	937	2.61	931	2.63	892	2.78
1.3	951	2.60	946	2.62	909	2.76
2.1	951	2.60	945	2.61	907	2.75
2.2	936	2.65	927	2.68	877	2.88

ตารางที่ 2 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารายวันแยกตามช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้า TOU ที่ได้จากการจำลองการทำงานรายวันในแต่ละแบบแผน

แบบแผนการทำงาน	ฤดูฝน		ฤดูร้อน		ฤดูหนาว	
	On Peak (kWh)	Off Peak (kWh)	On Peak (kWh)	Off Peak (kWh)	On Peak (kWh)	Off Peak (kWh)
1.1	577	375	573	372	549	352
1.2	811	126	806	125	773	120
1.3	923	28	918	28	881	28
2.1	923	28	918	28	880	28
2.2	94	842	94	834	94	784

ตารางที่ 3 ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดรายวันแยกตามช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้า TOU ที่ได้จากการจำลองการทำงานรายวันในแต่ละแบบแผน

แบบแผนการทำงาน	ฤดูฝน		ฤดูร้อน		ฤดูหนาว	
	On Peak (kW)	Off Peak (kW)	On Peak (kW)	Off Peak (kW)	On Peak (kW)	Off Peak (kW)
1.1	120	112	119	111	114	105
1.2	113	106	113	105	108	100
1.3	107	101	107	100	102	95
2.1	112	5	112	5	107	5
2.2	8	128	8	127	8	120

6.1.2 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น

จากการศึกษากระบวนการสร้างน้ำแข็ง ทำให้เราทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอ ได้แก่ ปริมาณความเย็นสะสม และ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอก รูปที่ 4 ปริมาณความเย็นสะสมยิ่งสูงยิ่งมีค่า COP ที่ต่ำ เนื่องมาจากค่าความต้านทานความร้อนของน้ำแข็งเมื่อความหนาของน้ำแข็งภายในถังมากขึ้น อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นลดลง ส่งผลให้ต้องการกำลังงานในกระบวนการอัดไอน้ำ และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ

ภายนอกจะส่งผลต่ออัตราการระบายความร้อนที่อิวาโปเรทีฟคอนเดนเซอร์ โดยที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกต่ำลง อุณหภูมิควบแน่นของสารทำความเย็นจะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจะมีค่าสูง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการจำลองสภาพการทำงานในแบบแผนต่าง ๆ ทั้ง 5 แบบแผน เมื่อเปรียบเทียบแยกตามฤดูกาล จากตารางที่ 1 จะพบว่าทั้ง 5 แบบแผนการทำงานจะมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดในฤดูหนาว ต่ำลงมาในฤดูร้อน และมีค่าต่ำที่สุดในฤดูฝน เป็นผลมาจากอุณหภูมิกระเปาะเปียกเฉลี่ยของอากาศภายนอกในแต่ละฤดูกาลนั่นเอง เมื่อทำการเปรียบเทียบในแต่ละแบบแผน แบบแผน 2.2 จะมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงที่สุด เนื่องมาจากการออกแบบการทำงานเครื่องทำความเย็นเฉพาะในช่วงเวลากลางคืนที่มีอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกต่ำ

6.2 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เป็นการคำนวณค่าไฟฟ้าภายใต้อัตราค่าไฟฟ้า TOU และอัตราปกติ ของประเทศไทย โรงงานนม อ.ส.ค. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น จัดเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 3 ซึ่งปัจจุบันมีการจ่ายค่าไฟฟ้าในอัตราปกติ ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 3 สามารถเลือกเปลี่ยนมาใช้การคิดค่าไฟฟ้าอัตราค่าไฟฟ้า TOU ได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าในการเดินระบบทำความเย็นทั้งสองอัตรา จากตารางที่ 4 พิจารณาเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าในอัตราปกติ ทั้ง 5 แบบแผนมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อเดือนที่ใกล้เคียงกัน พิจารณาเปรียบเทียบการคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ทั้ง 5 แบบแผนมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นแบบแผนการทำงานแบบ Partial Storage เวลากลางคืน (Off Peak) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าแบบแผนอื่น ๆ ประมาณ 48% (48,000 บาท) เมื่อพิจารณาแบบแผนเดียวกัน แต่คิดอัตราค่าไฟฟ้าที่ต่างกันพบว่าอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าอัตราปกติ ยกเว้นแบบแผน Partial Storage ช่วงกลางคืนแบบแผนเดียวที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าลงได้ประมาณ 37.4% จากผลที่ได้ หากมีการใช้แบบแผนการควบคุมเปอร์เซ็นต์น้ำแข็งสูงสุดและต่ำสุด (แบบแผน 1.1-1.3) หรือแบบแผน Partial Storage ช่วงกลางวัน ไม่ควรเลือกใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU แต่หากเลือกใช้แบบแผนการทำงานแบบ Partial Storage ช่วงกลางคืน การเลือกใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU นั้นเหมาะสมมาก เนื่องจากสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าได้สูง

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าไฟฟ้าต่อเดือนในอัตราปกติและอัตราค่าไฟฟ้า TOU ของแต่ละแบบแผนการทำงาน

แบบแผนการทำงาน	ฤดูฝน		ฤดูร้อน		ฤดูหนาว	
	อัตราปกติ (บาท)	TOU (บาท)	อัตราปกติ (บาท)	TOU (บาท)	อัตราปกติ (บาท)	TOU (บาท)
1.1	96,365	100,700	95,716	100,033	91,356	95,572
1.2	93,925	110,244	93,371	109,582	89,540	105,064
1.3	93,628	115,538	93,156	114,935	89,493	110,389
2.1	94,711	116,263	94,218	115,645	90,384	110,919
2.2	97,004	60,605	96,108	60,115	90,876	57,195

7. สรุป

แบบจำลองของระบบทำความเย็นที่มีถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็ง ได้ถูกสร้างขึ้นและจำลองการทำงานของระบบ โดยอาศัยโปรแกรม EES จำลองสภาพการทำงานของระบบด้วยแบบแผนการทำงานที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการใช้งานและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ผลจากการจำลองการทำงานสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- การเดินระบบสร้างน้ำแข็งในขณะที่มีปริมาณน้ำแข็งที่น้อยกว่าและที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกที่ต่ำกว่า จะส่งผลให้การเดินระบบทำความเย็นมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงขึ้น การออกแบบการทำงานจึงควรหลีกเลี่ยงการเดินระบบในช่วงที่มีอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกที่สูงอย่างเช่นในช่วงกลางวัน

- แบบแผน Partial Storage ช่วงกลางคืน มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าประมาณ 1.6% ในฤดูฝน 1.9% ในฤดูร้อน และ 3.3% ในฤดูหนาว เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบแผน Partial ในช่วงกลางวัน

- ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอัดไอ ได้แก่ ปริมาณความเย็นสะสม และ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอก โดยปริมาณความเย็นสะสมยิ่งสูงยิ่งมีค่า COP ที่ต่ำ เนื่องจากค่าความต้านทานความร้อนของน้ำแข็ง และเมื่ออุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายนอกต่ำลง อุณหภูมิควบแน่นของสารทำความเย็นจะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจึงมีค่าสูงขึ้น

- แบบแผน Partial Storage ช่วงกลางคืน เป็นแบบแผนการทำงานที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานดีที่สุดจากทั้ง 5 แบบแผน คือ สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมต่ำสุดและมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุด อีกทั้งเมื่อเลือกใช้การคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU แล้วสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 48% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบแผนที่เหลือ และลดลง 37.4% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคิดอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ ดังนั้นแบบแผน Partial Storage ช่วงกลางคืน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการการใช้งานระบบถึงสะสมพลังงานในรูปของน้ำแข็งของโรงงานนมแห่งนี้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Wayne, C. T., 1997. Energy Management Handbook. Third Edition, Prentice-Hall Inc, USA.
2. Hasnain, S. M., 1998. Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part II, Cool Thermal Storage. Energy Convers. Mgmt, Vol. 39, No. 11, pp. 1139-1153.
3. Lee, A. H. W., and Jones, J. W., 1996. Laboratory performance of an ice-on-coil thermal-energy storage system for residential and light commercial applications. Energy, Vol.

21, No. 2, pp. 115-130.

4. Lee, A. H. W., and Jones, J. W., 1996. Modeling of an Ice-on-coil Thermal Energy Storage System. Energy Convers. Mgmt, Vol. 37, No. 10, pp. 1493-1507.
5. Chaichana, C., 2001. An ice thermal storage computer model. Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1769-1778.
6. วัฒนา ศรีวาจนะ, 2541, การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบแหล่งสะสมพลังงานแบบเก็บโดยน้ำแข็งในอาคารพาณิชย์, วิศวกรรมสาร, ปีที่ 51, ฉบับที่ 4, หน้า 68-78
7. อัครเดช สุพิชญางกูร, การใช้ระบบแหล่งสะสมพลังงาน เพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า, วารสารโลกพลังงาน ปีที่ 2-3, เม.ย.-มิ.ย. 2542, หน้า 31-40
8. Neto, J. H. M., and Krarti, M., 1997a. Deterministic Model for an Internal Melt Ice-on-Coil Thermal Storage Tank. ASHARE Trans., Vol. 103, No. 1, pp. 113-124.
9. Stewart, R. E., 1990. Ice Formation Rate For a Thermal Storage System. ASHRAE Transactions, Vol. 96, No. 1, pp. 400-405.
10. Fu, L., and Ding, G. L., 2002. Steady-state simulation of screw liquid chillers. Applied Thermal Engineering, Vol. 22, pp. 1713-1748.
11. Manske, K. A., Reindl, D. T., and Klein, S. A., 2001. Evaporative condenser control in industrial refrigeration systems. International Journal of Refrigeration, Vol. 24, pp. 676-691.
12. BAC Product & Application Handbook Volume II, 2007, ค้นเมื่อ 10 ธ.ค. 2550, จาก <http://www.baltimoreaircoil.be/BAC/EU/axiwc20.nsf>
13. ธนพล พงศ์พิพัฒน์ และ ธนพล วิถีเจริญศักดิ์, 2549, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนในโรงงานผลิตกัณฑ์นม อ.ส.ค. จังหวัดขอนแก่น, รายงานโครงการนักศึกษาหมายเลข ME2005-06, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น