

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ การออกแบบ Ice thermal storage Mathematical Modeling and the Design of Ice thermal storage



รองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ สุวรรณาวรรณ¹ และ ดร.เจดศักดิ์ สืบทรัพย์²

¹รองคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

E-mail: fengpsw@ku.ac.th โทรศัพท์: 02-9428555 ต่อ 1803 โทรสาร: 02-5794576

²กรรมการผู้จัดการ O.E. Engineering Co., Ltd

75/33 หมู่ 4 ซ.เอกชัย 34 ถนนเอกชัย บางขุนเทียน จอมทอง กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

Ice thermal storage คือระบบเก็บรักษาพลังงานในรูปน้ำแข็งในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ แล้วนำน้ำแข็งที่ได้ เพื่อนำมาเสริมหรือทำงานแทนระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็นในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice on coil storage system ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเวลาในการสร้างน้ำแข็งมีผลกระทบอย่างมากจาก ค่า Fouling factor, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างน้ำยาทำความเย็นและผิวท่อทองแดงด้านใน (Internal convective coefficient), ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างน้ำเย็นและน้ำแข็ง (External convective coefficient) ค่าความต้านทานของระบบต่อการสร้างน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Time dependent parameter)

โดยที่เมื่อค่า Fouling factor เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาณน้ำแข็งลดลง 49.70% เมื่อค่า Internal convective coefficient ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาณน้ำแข็งลดลง 22.16% แบบจำลองได้ถูกทดสอบโดยการทดลอง โดยการใช้วงจรน้ำยาทำความเย็น R134a ในการทำความเย็นและสร้างน้ำแข็ง มีสภาวะ Evaporating temperature เท่ากับ -7 deg C จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปปรับใช้ในออกแบบรูปแบบโครงสร้าง และออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการสร้างน้ำแข็งในระบบ Ice thermal storage ต่อไป

Keywords : Mathematical modeling, Ice thermal storage, Ice forming modeling, Experimental test

Abstract

Ice thermal storage is the temporary energy storage in ice form. The system is used to build ice during electrical off-peak time and utilize the ice during on-peak time by melting the ice and obtaining chilled water to the working destination. This research work aims to develop mathematical model used to determine the charging time in ice on coil storage system. The analysis showed that the ice charging time is strongly affected by the Fouling factor and convective coefficient at the contact surface between the refrigerant and copper tube (internal convective coefficient), and the convective coefficient at the contact surface between the water and the ice (external convective coefficient). The heat transfer resistances are time dependent parameters. When the Fouling factor increases 2 times of reference value, the total heat transfer resistance increases and the ice forming volume is reduced 49.70%. When the internal convective coefficient reduced to 0.01 times of reference value, the total heat transfer resistance increases and the ice forming volume is reduced 22.16%. Mathematic modeling was verified by experiment. R134a refrigeration circuit was utilized and the evaporating temperature was set at -7 deg C. The test results from the simulation and experiment were in a good agreement. The analysis guideline can be adapted to evaluate the optimum design for system components and control in various applications of ice thermal storage.

Keywords : *Mathematical modeling, Ice thermal storage, Ice forming modeling, Experimental test*

บทนำ (Introduction)

ระบบเก็บพลังงานเย็น Ice storage เพื่อระบบปรับอากาศและทำความเย็น มีการนำมาใช้ เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟมีราคาต่ำ มาผลิตพลังงานเย็นเก็บเอาไว้ แล้วนำพลังงานเย็นนี้ออกมาใช้งานในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟฟ้ามีราคาสูงกว่า ดังนั้นระบบการเก็บพลังงานเย็นจะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน และกลางคืนมีความแตกต่างกัน หรืออัตราค่าไฟฟ้ามี Demand charge ในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก มีความสนใจเพียงพอที่จะให้ผลคุ้มค่าการลงทุนได้ ในหลายประเทศโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้า ในช่วงเวลาต่างๆ กัน ในแต่ละวันจะแตกต่างกันไป ในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก ซึ่งเรียกว่า On-peak จะมีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่าในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อย ซึ่งเรียกว่า Off-peak ถ้าเราสามารถนำความเย็นเก็บสะสมเอาไว้ในช่วงเวลา Off-peak แล้วนำพลังงานเย็นนี้ออกมาใช้ปรับอากาศในช่วงเวลา On-peak แล้ว ค่าไฟฟ้าของอาคารหรือโรงงานดังกล่าวจะลดลงได้มาก

ระบบการเก็บพลังงานเย็นในปัจจุบันมี อยู่ 3 ประเภท คือ

- 1) ประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (Chilled water storage system)
 - 2) ประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำแข็ง (Ice thermal storage system)
 - 3) ประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเกลือแข็ง หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ (Salt storage หรือ Phase change materials)
- ในงานวิจัยนี้จะเน้นที่ระบบเก็บพลังงานเย็น ด้วยน้ำแข็ง (Ice storage system) เนื่องจากความต้องการใช้พื้นที่ที่น้อยกว่าประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (Chilled water storage system) และมีความยุ่งยากน้อยกว่า

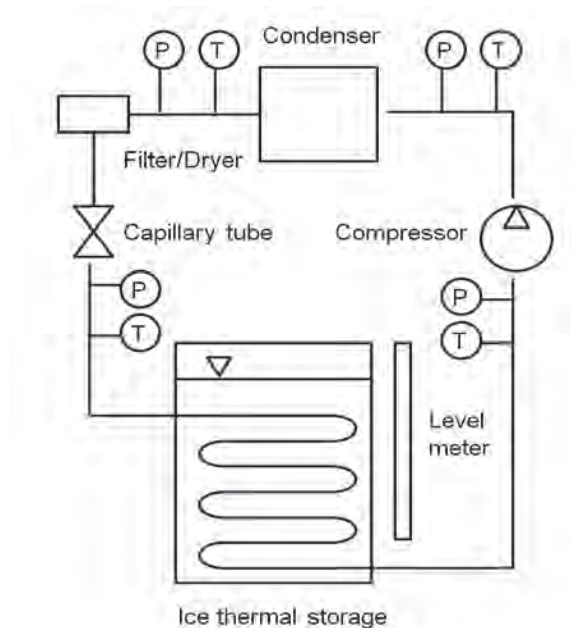
ประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเกลือแข็ง หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ (Salt storage หรือ Phase change materials)

ระบบเก็บพลังงานด้วยน้ำแข็ง (Ice storage system) มีได้หลายวิธีการ ทั้งขึ้นอยู่กับการลงทุนและเทคโนโลยีการสร้างแผ่นน้ำแข็งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามระบบสร้างแผ่นน้ำแข็งจะทำงานที่อุณหภูมิของ Evaporator ที่ต่ำกว่าระบบทำน้ำเย็นสำหรับการปรับอากาศ โดยทั่วไปอุณหภูมิของ Evaporator ซึ่งสร้างน้ำแข็งจะอยู่ระหว่าง -4 deg C ถึง -10 deg C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำแข็งที่ต้องการ ระยะเวลาที่ใช้ทำน้ำแข็ง รูปแบบของน้ำแข็ง และการออกแบบพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน การออกแบบจำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ ประเมิน Evaporating temperature ที่เหมาะสม เพราะการที่ต้องใช้อุณหภูมิของ Evaporator ต่ำจะเป็นผลให้ค่า COP ของ เครื่องทำความเย็นลดลงไปจากภาวะปกติ นั่นคือการใช้พลังงานไฟฟ้า kW/TR ของชุดทำความเย็นที่ผลิตน้ำแข็งจะสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว โดยได้นำเสนอแนวคิดการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการคำนวณแบบสภาวะคงตัว (Steady state) แต่เพียงอย่างเดียว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

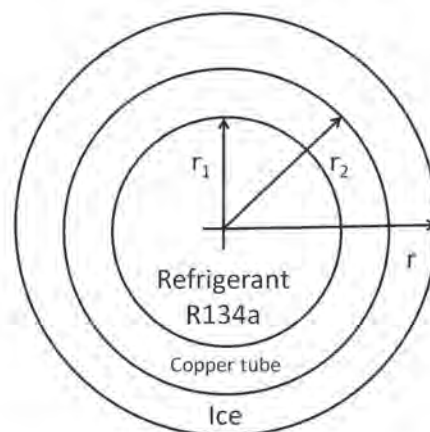
Jekel TB และ Mitchell JW ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองของ Ice storage พบว่าค่าของ Inlet temperature มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการสร้างน้ำแข็ง และเชื่อมโยงข้อมูลการวิเคราะห์เข้ากับข้อมูลของผู้ผลิต [3] Lee AHW และ Lones JW ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ Ice-on-coil thermal-energy storage ขนาดเล็กสำหรับที่อยู่อาศัย และธุรกิจขนาดเล็ก การทดลองได้ทดลองที่ University of Texas, Center for Energy studies โดยใช้ระบบ TES ขนาด 43.8 Ton-Hr ใช้น้ำยา R-22 เป็นสารทำความเย็น การทดสอบได้ทดลองที่สภาวะ Outdoor temp ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการสร้างน้ำแข็ง และการใช้พลังงานของ Compressor [4] Yamaha M and Nakahara N ได้ศึกษาพฤติกรรมของ Ice thermal storage จากการทดลอง พบว่าภาวะการผสมกันของน้ำในถังมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ พบว่า Archimedes number และ Enthalpy flowrate ส่งผลต่ออุณหภูมิขาออกจาก Ice thermal storage tank [5] Akbari, H จาก Lawrence Berkeley Laboratory ได้ศึกษาศักยภาพและการประยุกต์ใช้งานในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก Building systems division of the U.S. department of energy ในการเปรียบเทียบเทคโนโลยีและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [6] Haller MY et al. ได้วิเคราะห์ผลกระทบจาก Thermal stratification ที่อยู่ใน Thermal energy storage การประเมิน Stratification efficiency โดยต้องใช้ข้อมูลจาก Stratification degree ร่วมกับ Boundary conditions [7]

Mathematical modeling



รูปที่ 1 : วงจรทำความเย็นที่ใช้ในการสร้างน้ำแข็งที่ Ice thermal storage

งานวิจัยนี้มีขอบเขต ในส่วนของการสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice thermal storage จึงได้มีแนวคิดในการใช้ระบบน้ำยาทำความเย็น R134a เป็นอุปกรณ์สร้างความเย็น ซึ่งประกอบไปด้วย Compressor, Condenser, Capillary tube, และ Evaporator ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นส่วนในการสร้างน้ำแข็ง การทำน้ำแข็งแบบ Ice on coil system ประกอบไปด้วยถังน้ำซึ่งมีท่อ Evaporator ขดไปมาอยู่ภายในถังน้ำ หุ้มฉนวนกันความร้อน เมื่อสารทำความเย็นของระบบวิ่งผ่านไปในท่อ ก็จะทำให้เกิดน้ำแข็งเกาะขึ้นรอบๆ ท่อ Evaporator เมื่อใดที่ต้องการนำพลังงานเย็นไปใช้ ก็ให้ปั๊มสูบน้ำเย็นไหลเข้ามาภายนอก Coil เพื่อละลายน้ำแข็ง ก็จะได้น้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 0-1.5 deg C ออกจากถัง ซึ่งจะต้องได้รับการผสมจากน้ำที่อุ่นกว่า จะได้อุณหภูมิที่พอเหมาะเสียก่อนที่จะส่งต่อไปยังท่อน้ำเย็นของระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็นที่ต้องการทำงาน



รูปที่ 2 : Cross-sectional ของท่อน้ำยาและน้ำแข็งที่เกิดขึ้นโดยรอบท่อ

แบบจำลองเริ่มต้นจากทรงกระบอกกลวงรูปที่ 2 ที่มีพื้นที่ผิวด้านใน ด้านนอก ติดกับของไหลที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในที่นี้ อุณหภูมิของผิวด้านนอกจะสูงกว่าอุณหภูมิของผิวด้านใน สำหรับสภาวะคงตัวที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{dt} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (1)$$

จาก Fourier's Law การนำความร้อนผ่านพื้นผิวของรูปทรงกระบอกแสดงได้ว่า

$$Q_c = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

เมื่อ A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน จากสมการจะเห็นได้ว่า $kr \left(\frac{dT}{dr} \right)$ เป็นอิสระไม่ขึ้นกับค่ารัศมี r ทำให้ประเมินได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ในแนวรัศมี การวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในที่วัตถุทรงกระบอกโดยใช้เงื่อนไขขอบเขต และถือว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k คงที่ จากการ integrate สมการ (1)

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (3)$$

จาก boundary conditions

$$T(r_1) = T_{(s,1)} \text{ และ } T(r_2) = T_{(s,2)} \quad (4)$$

$$T_{(s,1)} = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad T_{(s,2)} = C_1 \ln r_2 + C_2 \quad (5)$$

ทำให้ได้สมการทั่วไปดังนี้

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) + T_{(s,2)} \quad (6)$$

จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการนำความร้อนของทรงกระบอกอยู่ในรูปฟังก์ชัน Logarithmic ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงเหมือนกับแบบผนังเรียบภายใต้สภาวะที่เหมือนกัน เมื่อประยุกต์สมการ (6) เข้ากับ Fourier's Law สมการ (2) จะได้ว่า

$$Q_e = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (7)$$

และเมื่อวิเคราะห์สมการ (7) เทียบกับ นิยามของ Thermal resistance สำหรับการนำความร้อน จะได้ว่า

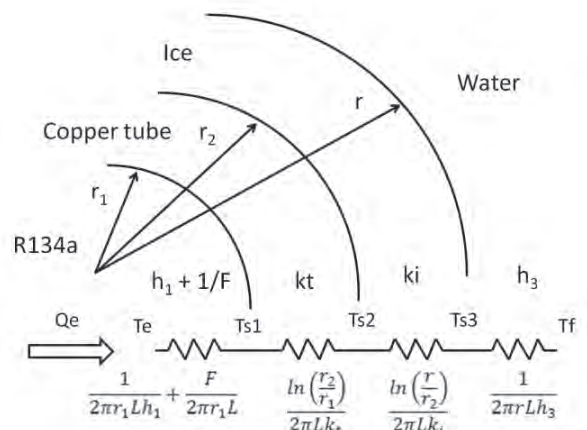
$$R_{\text{cond}} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{Q_e} = \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi Lk} \quad (8)$$

เมื่อประยุกต์สมการ (7) เข้ากับระบบท่อน้ำยาของ Ice thermal storage โดยคำนึงผลจากการพาความร้อนด้วยดังแสดงในรูปที่ 3 ท่อทองแดงขนาด 1/4 นิ้ว เบอร์ 22 มีความยาว L มีรัศมีภายใน r_1 และรัศมีภายนอก r_2 มีน้ำยาทำความเย็น R134a อุณหภูมิ T_e วิ่งอยู่ภายในท่อทองแดง น้ำแข็งที่เกิดขึ้นเริ่มจากผิวนอกของท่อทองแดง ไปจนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็งจากจุดศูนย์กลางของท่อทองแดงไปจนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็งนิยามด้วยรัศมี r ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยขณะที่น้ำอยู่ภายนอกโดยรอบท่อทองแดง มีอุณหภูมิ T_f ค่า h_1 คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ภายในท่อน้ำยาทำความเย็น ค่า F คือ Fouling factor ภายในท่อ ค่า k_i คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อทองแดง ค่า k_t สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง ค่า h_3 คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของน้ำแข็งกับน้ำเย็นโดยรอบ จากรูปที่ 3 จะสามารถวิเคราะห์สมการถ่ายเทความร้อนได้ว่า

$$Q_e = \frac{T_f - T_e}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{F}{2\pi r_1 L} + \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi L k_t} + \frac{\ln \left(\frac{r}{r_2} \right)}{2\pi L k_i} + \frac{1}{2\pi r L h_3}} \quad (9)$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{F}{2\pi r_1 L} + \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi L k_t} + \frac{\ln \left(\frac{r}{r_2} \right)}{2\pi L k_i} + \frac{1}{2\pi r L h_3} \quad (10)$$

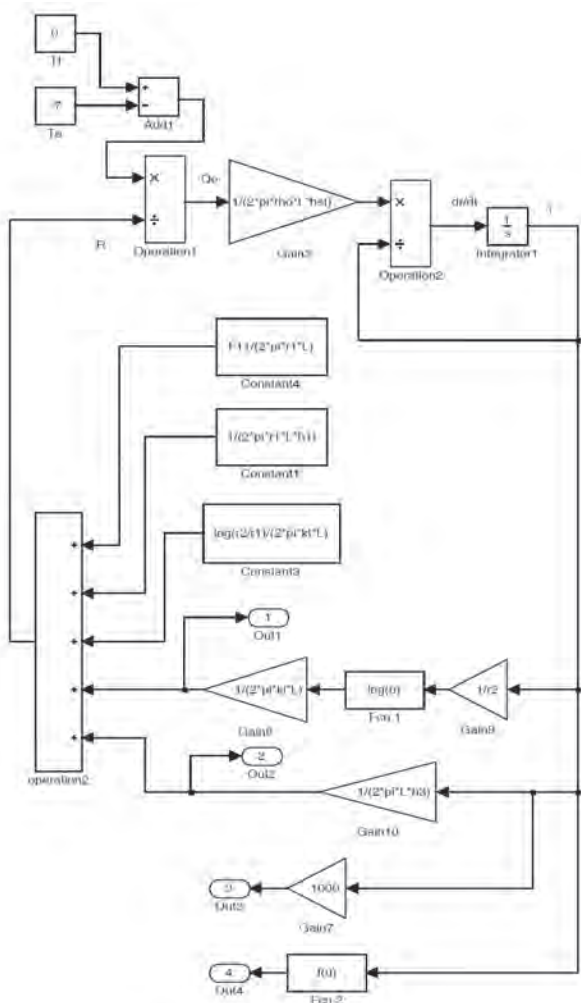


รูปที่ 3 : ค่าความต้านทานในส่วนต่างๆ ระบบของท่อน้ำยาและน้ำแข็งที่เกิดขึ้นโดยรอบท่อ

อัตราการเกิดน้ำแข็ง (Mass rate of ice formation) บนพื้นที่ผิวท่อทองแดงทรงกระบอก อธิบายได้จากสมการ (11) โดยที่ h_{sf} คือค่าความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (Latent heat of fusion of ice)

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Q_e}{h_{sf}} \quad (11)$$

จะเห็นได้ว่าแบบจำลองการสร้างน้ำแข็งนี้เป็นแบบจำลอง Nonlinear function และสามารถสร้าง Block diagram แสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ จะเห็นได้ว่าน้ำแข็งที่เกิดขึ้นเริ่มจากผิวนอกของท่อทองแดง ไปจนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็ง หรือจากจุดศูนย์กลางของท่อทองแดงไปจนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็งนิยามด้วยรัศมี r มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา ส่งผลให้ค่าความต้านทานเนื่องจาก Heat conduction ของน้ำแข็ง และค่าความต้านทานเนื่องจาก Heat convection ของน้ำโดยรอบ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อน Q_c อัตราการเกิดน้ำแข็ง $\frac{dr}{dt}$ และการเกิดน้ำแข็ง r เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา (Time dependent)



รูปที่ 4 : Dynamic modeling ของระบบการสร้างน้ำแข็ง

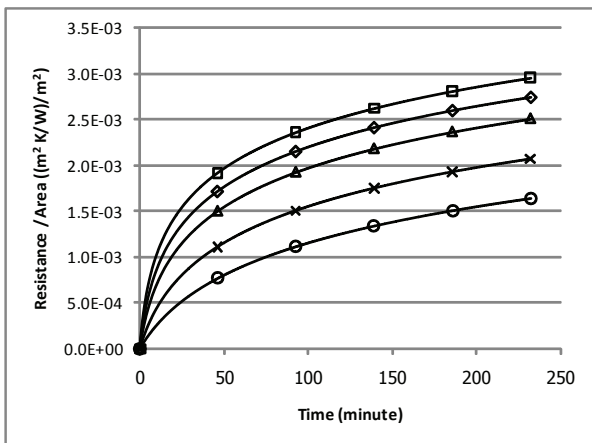
ผลการวิเคราะห์ (Simulation result)

การวิเคราะห์การสร้างน้ำแข็งได้ตั้งเป้าหมายไว้ที่ 5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสร้างน้ำแข็งสำหรับ ช่วง Off-peak เพื่อจะนำน้ำแข็งไปใช้ใน ช่วง On-peak การวิเคราะห์แบ่งออกได้เป็นสองสถานะ คือ ช่วงที่ต้องใช้ Sensible heat และช่วงที่ต้องใช้ Latent heat สำหรับช่วง Sensible heat สามารถวิเคราะห์แบบสภาวะคงตัว (Steady state condition) ได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงทางด้าน Sensible heat

$$Q_c = \frac{mc_p \Delta T}{t} \quad (12)$$

Cooling capacity ของ Compressor $Q_c = 370$ watts, น้ำ 12 ลิตร มีมวล $m = 12$ kg, Specific heat ของน้ำ $c_p = 4,200$ J/kg.K, อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำจาก 30 deg C มาเป็น 0 deg C, จากการคำนวณโดยสมการที่ 12 จะได้ว่า $time = 4,086$ วินาที (1 ชั่วโมง 8 นาที) นี่เป็นเวลาที่ใช้สำหรับการดึงความร้อนออกจากน้ำ เพื่อให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะเกิดเป็นน้ำแข็ง ซึ่งเรียกได้ว่าเป็น Delay time ก่อนที่จะเกิด Ice forming การวิเคราะห์ในช่วงที่ต้องใช้ Latent heat ในการสร้างน้ำแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม Matlab Simulink ดังรูปที่ 4 การวิเคราะห์ใช้การ Simulation แบบ Dynamic เมื่อห้กลับเวลาที่ใช้สำหรับ Sensible heat ไปแล้ว ระยะเวลาที่เหลือสำหรับ Latent จึงเท่ากับ 3 ชั่วโมง 52 นาที (13,920 วินาที) โดยมี Calculation sampling time ทุก 15 วินาที Evaporating temperature ถูกควบคุมให้ทำงานที่อุณหภูมิ = -7 deg C ท่อทองแดงแบบไร้ตะเข็บ (Seamless copper tube ASTM B88) ขนาด 1/4" มีความยาว $L = 5.5$ เมตร, มี Internal

radius $r_1 = 2.475$ mm, มี Outside radius $r_2 = 3.175$ mm, ดังนั้นค่า Inertial condition ของ $r = 3.175$ mm, ค่า Convective coefficient h_1 ระหว่างสารทำความเย็นและผิวด้านในของท่อทองแดง $= 100$ m² K/W, ค่า Convective coefficient h_3 ระหว่างน้ำและผิวด้านนอกของน้ำแข็ง $= 20$ m² K/W ผลการ Simulation แสดงได้ดังรูปที่ 5-10



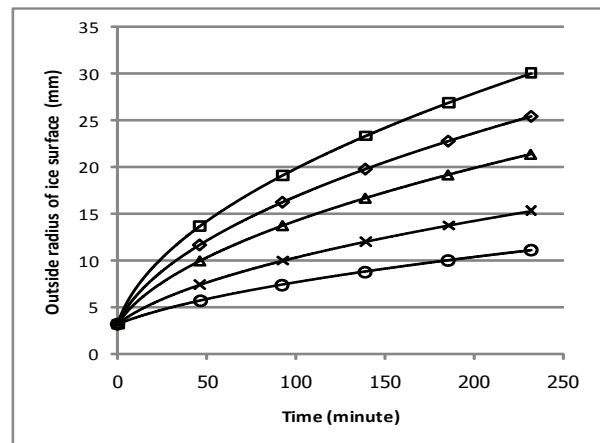
- 0.5 times of identified Fouling factor F
- ◇ 0.7 times of identified Fouling factor F
- △ Identified Fouling factor F
- × 2 times of identified Fouling factor F
- 4 times of identified Fouling factor F

รูปที่ 5: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor

จากรูปที่ 5 และจากสมการ (10) ค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction $= \frac{\ln(\frac{r}{r_2})}{2\pi L k_i}$

และค่าความต้านทานในส่วนของ Fouling factor $= \frac{F}{2\pi r_1 L}$ จากผลการ Simulation จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง สังเกตได้ว่า

ค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจากค่า $r = r_2$ ณ สภาวะเริ่มต้นทำให้ $\ln(\frac{r}{r_2}) = 0$ ค่า Fouling factor เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับชนิดของของไหล อุณหภูมิ ความเร็วของการไหล ซึ่งในที่นี้คือน้ำยาทำความเย็น R134a ซึ่งมีสภาวะเป็น Two phase flow คือกำลังเกิดการเดือดระเหยกลายเป็นไอที่ Evaporator

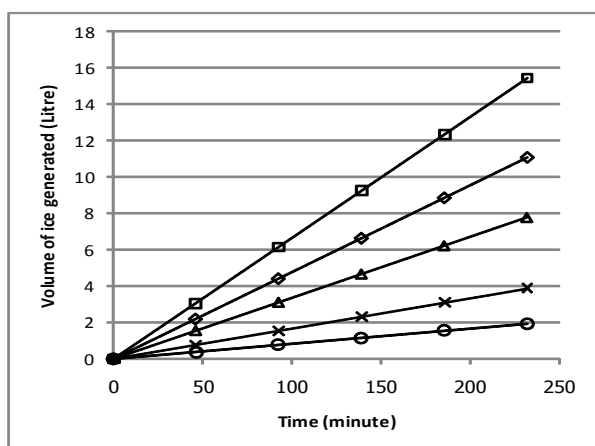


- 0.5 times of identified Fouling factor F
- ◇ 0.7 times of identified Fouling factor F
- △ Identified Fouling factor F
- × 2 times of identified Fouling factor F
- 4 times of identified Fouling factor F

รูปที่ 6: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Outside radius of ice surface เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor

จากผลการ Simulation รูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า Outside radius of ice surface (r) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง สังเกตได้ว่าค่า r นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจากค่า $r = r_2 = 3.175$ mm ณ สภาวะเริ่มต้น จากผลการทดลองที่ปรับค่า Fouling พบว่าค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ r ลดลง ตัวอย่างเช่นที่สภาวะ 100 นาที

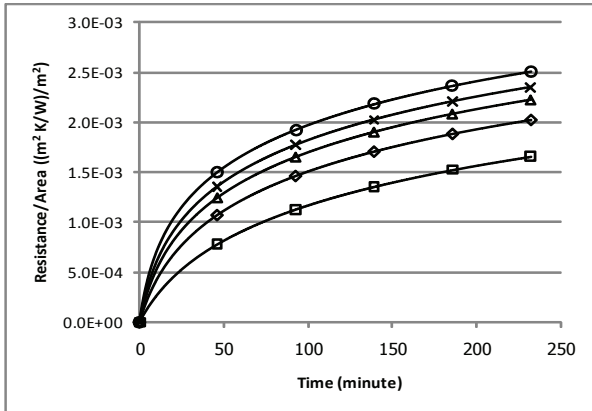
ของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Identified fouling factor หรือ Reference fouling factor การสร้าง $r = 14.26$ mm แต่เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $r = 10.35$ mm การเกิด r ลดลง 27.42% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $r = 7.66$ mm การเกิด r ลดลง 46.28% ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference fouling factor การสร้าง $r = 19.93$ mm แต่เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $r = 14.29$ mm การเกิด r ลดลง 28.29% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $r = 10.36$ mm การเกิด r ลดลง 48.02%



- 0.5 times of identified Fouling factor F
- ◇ 0.7 times of identified Fouling factor F
- △ Identified Fouling factor F
- × 2 times of identified Fouling factor F
- 4 times of identified Fouling factor F

รูปที่ 7: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Volume of ice generated เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor

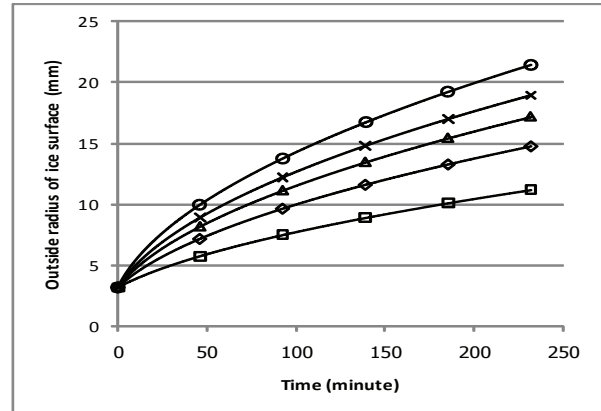
จากผลการ Simulation รูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า Volume of ice generated (V) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สังเกตได้ว่าค่า V นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างน้ำแข็ง ณ สภาวะเริ่มต้นจากการทดลองที่รับค่า Fouling พบว่าค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ V ลดลง ตัวอย่างเช่นที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference fouling factor การสร้าง $V = 3.34$ Litre แต่เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $V = 1.68$ Litre การเกิด V ลดลง 49.70% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $V = 0.84$ Litre การเกิด V ลดลง 74.85% ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference fouling factor การสร้าง $V = 6.69$ Litre แต่เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $V = 3.35$ Litre การเกิด V ลดลง 49.92% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $V = 1.68$ Litre การเกิด V ลดลง 74.89%



- 0.001 time of Identified Convective coefficient h_1
- ◇ 0.0025 time of Identified Convective coefficient h_1
- △ 0.005 time of Identified Convective coefficient h_1
- × 0.01 time of Identified Convective coefficient h_1
- Identified Convective coefficient h_1

รูปที่ 8: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่วนของการ Ice conduction เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective coefficient h_1

จากผลการ Simulation รูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานในส่วนของการ Ice conduction มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง ค่า Convective coefficient (h_1) หรือค่าการพาความร้อนที่อยู่ระหว่างสารทำความเย็น R134a และ ผิวท่อทองแดงด้านใน ค่า h_1 เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับชนิดของของไหล อุณหภูมิ ความเร็วของการไหล ซึ่งในที่นี้คือน้ำยาทำความเย็น ซึ่งมีสภาวะเป็น Two phase flow คือกำลังเกิดการเดือดระเหยกลายเป็นไอที่ Evaporator จากผลการทดลองที่ปรับค่า h_1 พบว่าค่า h_1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ค่าความต้านทานในส่วนของการ Ice conduction เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับผลกระทบของ Fouling factor ต่อค่าความต้านทานในส่วนของการ Ice conduction ที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสริมกับ ค่าความต้านทานในส่วนของการ Fouling factor โดยตรงทำให้ ค่าความต้านทานโดยรวมมีค่าที่เพิ่มขึ้น



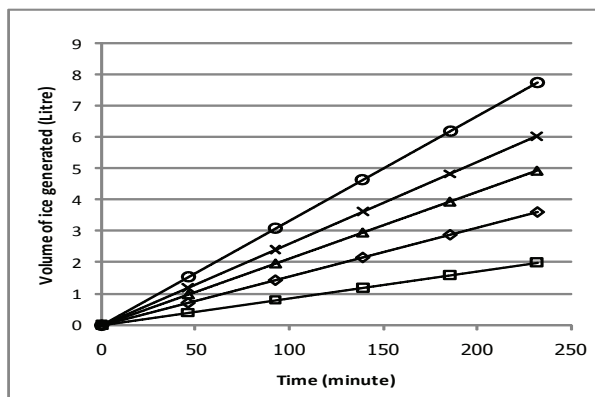
- 0.001 time of Identified Convective coefficient h_1
- ◇ 0.0025 time of Identified Convective coefficient h_1
- △ 0.005 time of Identified Convective coefficient h_1
- × 0.01 time of Identified Convective coefficient h_1
- Identified Convective coefficient h_1

รูปที่ 9: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Outside radius of ice surface เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective coefficient h_1

จากผลการ Simulation รูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า r มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง

จากผลการทดลองที่ปรับค่า h_1 พบว่าค่า h_1 ที่ลดลงส่งผลให้ r ลดลง ตัวอย่างเช่นที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient $h_1 = 100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ การสร้าง $r = 14.26 \text{ mm}$ แต่เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $r = 12.67 \text{ mm}$ การเกิด r ลดลง 11.15% เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $r = 11.53 \text{ mm}$ การเกิด r ลดลง 19.14% ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient $h_1 = 100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ การสร้าง $r = 19.53 \text{ mm}$ แต่เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลง

เป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $r = 17.64$ mm การเกิด r ลดลง 9.68% เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $r = 16.00$ mm การเกิด r ลดลง 18.07%



- 0.001 time of Identified Convective coefficient h_1
- ◇ 0.0025 time of Identified Convective coefficient h_1
- △ 0.005 time of Identified Convective coefficient h_1
- × 0.01 time of Identified Convective coefficient h_1
- Identified Convective coefficient h_1

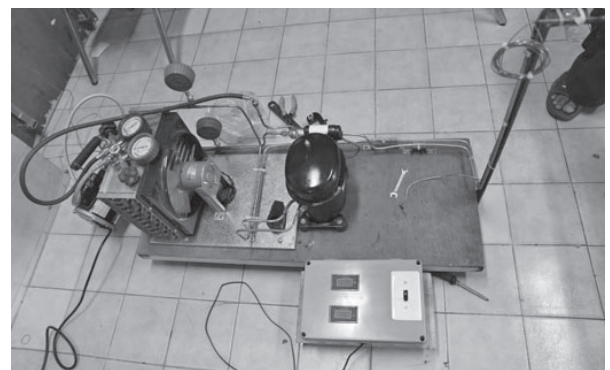
รูปที่ 10: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Volume of ice generated เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective coefficient h_1

จากผลการ Simulation รูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า V มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จากผลการทดลองที่ปรับค่า h_1 พบว่าค่า h_1 ที่ลดลงส่งผลให้ V ลดลง ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient $h_1 = 100$ W/m² K การสร้าง $V = 3.34$ Litre แต่เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $V = 2.60$ Litre การเกิด V ลดลง 22.16 % เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก

การสร้าง $V = 2.12$ Litre การเกิด V ลดลง 36.53 % ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient $h_1 = 100$ W/m² K การสร้าง $V = 6.69$ Litre แต่เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $V = 5.20$ Litre การเกิด V ลดลง 22.27 % เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง $V = 4.25$ Litre การเกิด V ลดลง 36.47 %

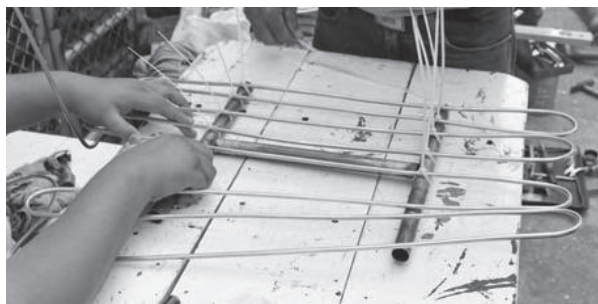
การทดสอบด้วยการทดลอง (Model verification by Experimental test)

เพื่อทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบ Ice thermal storage ที่ใช้ในการสร้างน้ำแข็ง ได้ถูกสร้างและประกอบขึ้นจาก Hermetic compressor ยี่ห้อ Kulthorn Kirby รุ่น AE A2415Y ชนิด Reciprocating, ๘ hp, Cooling Capacity 1,262 BTU/Hr (370 watt), ใช้กับไฟฟ้า 220 Volt ,50 Hz, 1 phase, ใช้กับน้ำยา R134a, ระบายความร้อนด้วยอากาศ, ระบบ Expansion device เป็นแบบ Capillary tube, อุปกรณ์ถูกติดตั้งบนแท่นทดลองที่สามารถตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยง่าย ดังแสดงในรูปที่ 11



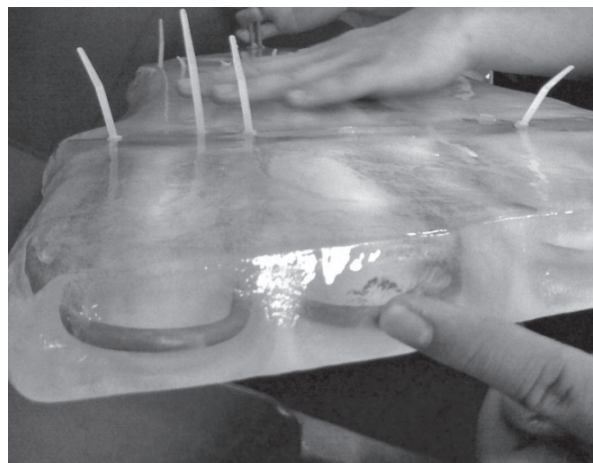
รูปที่ 11 : การติดตั้งระบบทำความเย็นเพื่อใช้ในการทำ Ice thermal storage

ท่อทองแดงแบบไร้ตะเข็บ (Seamless copper tube ASTM B88) ขนาด $\frac{1}{4}$ " ยาว 5.5 เมตร มี Internal radius = 2.475 mm มี Outside radius = 3.175 mm ถูกนำมาขดเพื่อทำเป็นอุปกรณ์สำหรับการสร้าง Ice thermal storage ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 : การประกอบท่อน้ำยาเพื่อใช้ในการทำ Ice thermal storage

ขดท่อทองแดงถูกนำมาแช่ในถังน้ำที่บรรจุน้ำอยู่ 12 ลิตร อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 30 deg C ระบบทำความเย็นทำงานโดยที่ Evaporator ถูกควบคุมให้ทำงานที่อุณหภูมิ = -7 deg C อุณหภูมิของน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง 10 นาที อุณหภูมิของน้ำอยู่ที่ 0 deg C — 1 deg C และเริ่มเกิดน้ำแข็งเกาะขึ้นโดยรอบขดท่อทองแดง และเริ่มเพิ่มความหนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 13 เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง 52 นาที จึงหยุดระบบทำความเย็นและตรวจวัดปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจาก ปริมาตรของน้ำที่หายไป พบว่าโดยค่า r ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 21.0 mm โดยเฉลี่ย คิดเป็นปริมาตรโดยรวม 7.45 ลิตร น้ำแข็ง เมื่อเทียบกับผลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากัน ได้ปริมาตรน้ำแข็งเท่ากับ 7.76 ลิตร จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 4 % ซึ่งอาจเกิดได้จากการควบคุมสภาวะต่างๆ ในการทดลอง



รูปที่ 13 : ผลการสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice thermal storage

unสรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้ ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เวลาที่ใช้น้ำแข็งของระบบ Ice on coil storage system ผลกระทบทางพลศาสตร์ส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบอย่างชัดเจน ค่าความต้านทานของระบบต่อการสร้างน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Time dependent performance) และส่งผลต่อการผลิตน้ำแข็ง

ค่า Fouling factor, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในและภายนอกท่อ ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตน้ำแข็ง เมื่อค่า Fouling factor เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาณน้ำแข็งลดลง 49.70%

เมื่อค่า Convective coefficient ระหว่างน้ำยาทำความเย็นและผิวท่อทองแดงด้านใน ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาณน้ำแข็งลดลง 22.16 %

แบบจำลองได้ถูกทดสอบโดยการสร้างน้ำแข็งด้วยวงจรน้ำยา R134a ในการทำความเย็น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์อัตราการสร้างน้ำแข็ง ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในรูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานและออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการสร้างน้ำแข็งในระบบ Ice thermal storage ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมระบบปรับอากาศและทำความเย็น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ และ O.E. Engineering Co., Ltd

References

- [1] Dorgan CE. and Elleson JS, Design guide for cool thermal storage, ASHRAE 1993
- [2] Dincer I and Rosen MA, Thermal Energy Storage : Systems and Applications, 2nd edition, Wiley, 2011
- [3] Jekel TB, Mitchell, JW, and Klein SA, Modeling of Ice-storage Tanks, ASHRAE Transaction 99(I), pp.1016-1024, 1993
- [4] Lee AHW, and Jones JW, 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, 1996
- [5] Yamaha M, Nakahara N, and Chiba R, Studies on Thermal Characteristics of Ice Thermal Storage Tank and a Methodology

for Estimation of Tank Efficiency, International Journal of Energy Research, vol. 32, pp.223-241, 2008

[6] Akbari, H, Thermal Energy Storage for Cooling of Commercial Buildings, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, USA, 2010

[7] Haller MY et al., Methods to Determine Stratification Efficiency of Thermal Energy Storage Process — Review and Theoretical Comparison, Solar Energy, vol.83, pp.1847-1860, 2009

Abbreviation

- r_1 = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อน้ำยาถึงเส้นรอบวงผิวด้านในของท่อน้ำยา (mm)
- r_2 = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อน้ำยาถึงเส้นรอบวงผิวด้านนอกของท่อน้ำยา (mm)
- r = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อน้ำยาถึงเส้นรอบวงผิวด้านนอกของน้ำแข็ง (mm)
- h_1 = convective coefficient ที่อยู่ระหว่างสารทำความเย็น R134a และผิวท่อทองแดงด้านใน ($W/m^2 K$)
- h_3 = ค่าการพาความร้อนที่อยู่ระหว่างน้ำเย็นอุณหภูมิ 0 deg C และผิวน้ำแข็งด้านนอก (W/m^2K)
- F = ค่า Fouling factor (m^2K/W)
- k_t = thermal conductivity of copper tube = 393 $W/m.K$
- k_i = thermal conductivity of ice = 22 $W/m.K$
- L = ความยาวของท่อน้ำยา = 5.5 m
- Q_e = อัตราการถ่ายเทความร้อน
- m = มวลของน้ำ (kg)
- h_{sf} = Latent heat of fusion of ice = 336 kJ/kg