

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบ lce thermal storage

Mathematical Modeling and the Design of Ice thermal storage

ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ^{1*} และ อธิการ เรื่องเจริญ¹ ¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ E-mail: fengpsw@ku.ac.th โทรศัพท์: 02-9428555 ต่อ 1803 โทรสาร: 02-5794576

<u>บทคัดย่อ</u>

Ice thermal storage คือระบบเก็บรักษาพลังงานในรูปน้ำแข็งในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ แล้วนำน้ำแข็งที่ได้ เพื่อนำมาเสริมหรือทำงานแทนระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็นในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง งานวิจัย นี้ มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice on coil storage system ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเวลาในการสร้างน้ำแข็งมีผลกระทบอย่างมากจาก ค่า Fouling factor, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างน้ำยาทำความเย็นและผิวท่อทองแดงด้านใน (Internal convective coefficient), ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างน้ำเย็นและน้ำแข็ง (External convective coefficient) ค่าความด้านทานของระบบต่อการสร้างน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดลอดเวลา (Time dependent parameter) โดยที่เมื่อค่า Fouling factor เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความด้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็ง เพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลง 49.70% เมื่อค่า Internal convective coefficient ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า อ้างอิง ทำให้ความด้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลง 22.16 % แบบจำลองได้ถูกทดสอบโดยการทดลอง โดยการใช้วงจรน้ำยาทำความเย็น R134a ในการทำความเย็นและสร้าง น้ำแข็ง มีสภาวะ Evaporating temperature เท่ากับ -7 deg C จากผลการทดลองแสดง ให้เห็นถึงความถูกต้อง ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปปรับใช้ในออกแบบรูปแบบโครงสร้าง และออกแบบ ระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการสร้างน้ำแข็งในระบบ Ice thermal storage ต่อไป <u>Keywords</u> : Mathematical modeling, Ice thermal storage, Ice forming modeling, Experimental test

<u>Abstract</u>

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 during 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 during 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 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

<u>บทน้ำ (Introduction)</u>

ระบบเก็บพลังงานเย็น Ice storage เพื่อระบบปรับอากาศ และทำความเย็น มีการนำมาใช้ เนื่องจาก การใช้พลังงาน ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟมีราคาต่ำมาผลิตพลังงานเย็น เก็บเอาไว้ แล้วนำพลังงานเย็นนี้ออกมาใช้งานในช่วงเวลาที่ ้อัตราค่าไฟฟ้ามีราคาสูงกว่า ดังนั้นระบบการเก็บพลังงาน เย็นจะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้าใน ช่วงเวลากลางวันและกลางคืนมีความแตกต่างกัน หรืออัตรา ้ค่าไฟฟ้ามี Demand charge ในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก มี ความจูงใจเพียงพอที่จะให้ผลคุ้มต่อการลงทุนได้ ในหลาย ประเทศโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้า ในช่วงเวลาต่างๆ กัน ในแต่ละวันจะแตกต่างกันไป ในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้า มาก ซึ่งเรียกว่า On-peak จะมีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่าใน ช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อย ซึ่งเรียกว่า Off-peak ถ้าเรา สามารถนำความเย็นเก็บสะสมเอาไว้ในช่วงเวลา Off-peak แล้วนำพลังงานเย็นนี้ออกมาใช้ปรับอากาศในช่วงเวลา Onpeak แล้ว ค่าไฟฟ้าของอาคารหรือโรงงานดังกล่าวจะลดลง ได้มาก

ระบบการเก็บพลังงานเย็นในปัจจุบันมี อยู่ 3 ประเภท คือ 1) ประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (Chilled water storage system) 2) ประเภทเก็บพลังงาน ด้วยน้ำแข็ง (Ice thermal storage system) 3) ประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเกลือแข็ง หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็น ของเหลวได้ (Salt storage หรือ Phase change materials) ในงานวิจัยนี้จะเน้นที่ระบบเก็บพลังงานเย็น ด้วยน้ำแข็ง (Ice storage system) เนื่องจากความต้องการใช้พื้นที่ที่ น้อยกว่าประเภทเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (Chilled water storage system) และมีความยุ่งยากน้อยกว่า ประเภทเก็บ พลังงานด้วยน้ำเกลือแข็ง หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยน สถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ (Salt storage หรือ Phase change materials) ระบบเก็บพลังงาน ด้วยน้ำแข็ง (Ice storage system) มีได้ หลายวิธีการ ทั้งขึ้นอยู่กับการลงทุนและเทคโนโลยีการสร้าง แผ่นน้ำแข็งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามระบบ สร้างแผ่นน้ำแข็งจะทำงานที่อุณหภูมิของ Evaporator ที่ต่ำ ้กว่าระบบทำน้ำเย็นสำหรับการปรับอากาศ โดยทั่วไป อุณหภูมิของ Evaporator ซึ่งสร้างน้ำแข็งจะอยู่ระหว่าง -4 deg C ถึง -10 deg C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของน้ำแข็งที่ ต้องการ ระยะเวลาที่ใช้ทำน้ำแข็ง รูปแบบของน้ำแข็งและ การออกแบบพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน การออกแบบ ้จำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการ วิเคราะห์ ประเมิน Evaporating temperature ที่เหมาะสม เพราะการที่ต้องใช้อุณหภูมิของ Evaporator ต่ำจะเป็นผล ให้ค่า COP ของ เครื่องทำความเย็นลดลงไปจากภาวะปกติ นั่นคือการใช้พลังงานไฟฟ้า kW/TR ของชุดทำความเย็นที่ ผลิตน้ำแข็งจะสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นใน การพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว โดยได้นำเสนอแนวคิดการ วิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ เพื่อทำให้การวิเคราะห์มีความ แม่นยำมากขึ้นกว่าการคำนวณแบบสภาวะคงตัว (Steady state) แต่เพียงอย่างเดียว

<u>งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</u>

Jekel TB และ Mitchell JW ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลอง ของ Ice storage พบว่าค่าของ Inlet temperature มี ความสัมพันธ์โดยตรงการความสามารถในการสร้างน้ำแข็ง และเชื่อมโยงข้อมูลการวิเคราะห์เข้ากับข้อมูลของผู้ผลิต [3] Lee AHW และ Lones JW ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ Ice-on-coil thermal-energy storage ขนาดเล็กสำหรับที่อยู่ อาศัยและธุรกิจขนาดเล็ก การทดลองได้ทดลองที่ University of Texas, Center for Energy studies โดยใช้ ระบบ TES ขนาด 43.8 Ton-Hr ใช้น้ำยา R-22 เป็นสารทำ ความเย็น การทดสอบได้ทดลองที่สภาวะ Outdoor temp ที่ แตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการสร้างน้ำแข็ง และ การใช้พลังงานของ Compressor [4] Yamaha M and Nakahara N ได้ศึกษาพฤติกรรมของ Ice thermal storage



จากการทดลอง พบว่าภาวะการผสมกันของน้ำในถังมีผลต่อ ประสิทธิภาพของระบบ พบว่า Archimedes number และ Enthalpy flowrate ส่งผลต่ออุณหภูมิขาออกจาก Ice thermal storage tank [5] Akbari, H จาก Lawrence Berkeley Laboratory ได้ศึกษาศักยภาพและการประยุกต์ใช้ งานในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม โดยได้รับทุน สนับสนุนจาก Building systems division of the U.S. department of energy ในการเปรียบเทียบเทคโนโลยีและ การวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ [6] Haller MY et al. ได้วิเคราะห์ผลกระทบจาก Thermal stratification ที่ อยู่ใน 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 จึงได้มีแนวคิดในการใช้ระบบน้ำยาทำ ้ความเย็น R134a เป็นอุปกรณ์สร้างความเย็น ซึ่งประกอบ ไปด้วย Compressor, Condenser, Capillary tube, และ Evaporator ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นส่วนในการสร้าง ้น้ำแข็ง การทำน้ำแข็งแบบ Ice on coil system ประกอบไป ด้วยถังน้ำซึ่งมีท่อ Evaporator ขดไปมาอยู่ภายในถังน้ำหุ้ม ้ฉนวนกันความร้อน เมื่อสารทำความเย็นของระบบวิ่งผ่าน ้ไปในท่อ ก็จะทำให้เกิดน้ำแข็งเกาะขึ้นรอบๆ ท่อ Evaporator เมื่อใดที่ต้องการนำพลังงานเย็นไปใช้ ก็ให้ปั้ม ้สูบน้ำเย็นไหลเข้ามาภายนอก Coil เพื่อละลายน้ำแข็ง ก็จะ

ได้น้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 0-1.5 deg C ออกจากถัง ซึ่ง จะต้องได้รับการผสมจากน้ำที่อุ่นกว่าจะได้อุณหภูมิที่ พอเหมาะเสียก่อนที่จะส่งต่อไปยังท่อน้ำเย็นของระบบปรับ อากาศหรือระบบทำความเย็นที่ต้องการทำงาน



รูปที่ 2 : Cross-sectional ของท่อน้ำยาและน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดยรอบท่อ

แบบจำลองเริ่มต้นจากทรงกระบอกกลวง รูปที่ 2 ที่มีพื้นที่ ผิวด้านใน ด้านนอก ติดกับของไหลที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในที่นี้ อุณหภูมิของผิวด้านนอก จะสูงกว่าอุณหภูมิของผิว ้ด้านใน สำหรับสภาวะคงตัว ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน $\frac{1}{r}\frac{dr}{dt}\left(kr\frac{dT}{dr}\right) = 0$ (1) ้จาก Fourier's Law การนำความร้อนผ่านพื้นผิวของรูป ทรงกระบอกแสดงได้ว่า $Q_e = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$ (2) เมื่อ A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน จาก ู้สมการจะเห็นได้ว่า kr(dT/dr) เป็นอิสระไม่ขึ้นกับค่ารัศมี r ทำให้ประเมินได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ใน แนวรัศมี การวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอุณหภูมิ

ภายในที่วัตถุทรงกระบอก โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขต และ ถือว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k คงที่ จากการ integrate สมการ (1)

$$\Gamma(\mathbf{r}) = C_1 \ln \mathbf{r} + C_2 \tag{3}$$

จาก boundary conditions

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

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



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

จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการนำความ ร้อนของทรงกระบอกอยู่ในรูปฟังก์ชัน Logarithmic ที่ไม่ เป็นเชิงเส้นตรงเหมือนกับแบบผนังเรียบภายใต้สภาวะที่ เหมือนกัน เมื่อประยุกต์สมการ (6) เข้ากับ Fourier's Law สมการ (2) จะได้ว่า

$$Q_{e} = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(\frac{r_{2}}{r_{1}})}$$
(7)

และเมื่อวิเคราะห์สมการ (7) เทียบกับ นิยามของ Thermal resistance สำหรับการนำความร้อนจะได้ว่า

$$R_{\text{cond}} = \frac{T_{\text{s},1} - T_{\text{s},2}}{Q_{\text{e}}} = \frac{\ln\left(\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1}\right)}{2\pi L k}$$
(8)

เมื่อประยุกต์สมการ (7) เข้ากับระบบท่อน้ำยาของ Ice thermal storage โดยคำนึ่งผลจากการพาความร้อนด้วยดัง แสดงในรูปที่ 3 ท่อทองแดงขนาด ¼ นิ้ว เบอร์ 22 มีความ ียาว L มีรัศมีภายใน r₁ และ รัศมีภายนอก r₂ มีน้ำยาทำ ความเย็น R134a อุณหภูมิ Te วิ่งอยู่ภายในท่อทองแดง ้น้ำแข็งที่เกิดขึ้นเริ่มจากผิวนอกของท่อทองแดง ไปจนถึง ขอบผิวนอกของน้ำแข็งจากจุดศูนย์กลางของท่อทองแดงไป จนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็งนิยามด้วยรัศมี r ซึ่งมีการ เปลี่ยนแปลงต่อเวลา โดยขณะที่น้ำอยู่ภายนอกโดยรอบท่อ ทองแดง มีอุณหภูมิ T_r ค่า h₁ คือสัมประสิทธิ์การพาความ ้ร้อนภายในท่อกับน้ำยาทำความเย็น ค่า F คือ Fouling factor ภายในท่อ ค่า k. คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ ท่อทองแดง ค่า k_i สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง ค่า h₃ คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของน้ำแข็ง กับน้ำเย็นโดยรอบ จากรูปที่ 3 จะสามารถวิเคราะห์สมการ ถ่ายเทความร้อนได้ว่า

$$Q_{e} = \frac{T_{f} - T_{e}}{\frac{1}{2\pi r_{1}Lh_{1}} + \frac{F}{2\pi r_{1}L} + \frac{\ln\left(\frac{r_{2}}{r_{1}}\right)}{2\pi Lk_{t}} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_{2}}\right)}{2\pi Lk_{i}} + \frac{1}{2\pi r_{L}h_{3}}}$$
(9)
$$R_{total} = \frac{1}{2\pi r_{1}Lh_{1}} + \frac{F}{2\pi r_{1}L} + \frac{\ln\left(\frac{r_{2}}{r_{1}}\right)}{2\pi Lk_{t}} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_{2}}\right)}{2\pi Lk_{i}} + \frac{1}{2\pi r_{L}h_{3}}$$
(10)



รูปที่ 3 : ค่าความต้านทานในส่วนต่าง ๆ ระบบของท่อน้ำยา และน้ำแข็งที่เกิดขึ้นโดยรอบท่อ

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

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

จะเห็นได้ว[่]าแบบจำลองการสร้างน้ำแข็งนี้เป็นแบบจำลอง Nonlinear function และสามารถสร้าง Block diagram แสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ จะเห็นได้ว่าน้ำแข็งที่ เกิดขึ้นเริ่มจากผิวนอกของท่อทองแดง ไปจนถึงขอบผิวนอก ของน้ำแข็ง หรือจากจุดศูนย์กลางของท่อทองแดงไปจนถึง ขอบผิวนอกของน้ำแข็งนิยามด้วยรัศมี r มีการเปลี่ยนแปลง ต่อเวลา ส่งผลให้ค่าความต้านทานเนื่องจาก Heat conduction ของน้ำแข็ง และค่าความต้านทานเนื่องจาก Heat convection ของน้ำโดยรอบ มีการเปลี่ยนแปลง ตลอดเวลา ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อน Qe อัตรา การเกิดน้ำแข็ง dr/dt และการเกิดน้ำแข็ง r เปลี่ยนแปลงไป กับเวลา (Time dependent)





รูปที่ 4 : Dynamic modeling ของระบบการสร้างน้ำแข็ง

<u>ผลการวิเคราะห์ (Simulation result)</u>

การวิเคราะห์การสร้างน้ำแข็งได้ตั้งเป้าหมายไว้ที่ 5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสร้างน้ำแข็งสำหรับ ช่วง Offpeak เพื่อจะนำน้ำแข็งไปใช้ในช่วง On-peak การวิเคราะห์ แบ่งออกได้เป็นสองสภาวะ คือ ช่วงที่ต้องใช้ Sensible heat และช่วงที่ต้องใช้ Latent heat สำหรับช่วง Sensible heat สามารถวิเคราะห์แบบสภาวะคงตัว (Steady state condition) ได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงทางด้าน Sensible heat

$$Q_e = \frac{mc_P \Delta T}{t}$$
(12)

Cooling capacity ของ Compressor Qe = 370 watts, น้ำ 12 ลิตร มีมวล m =12 kg, Specific heat ของน้ำ c_P= 4,200 J/kg.K, อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำจาก 30 deg TSF 88

C มาเป็น 0 deg C, จากการคำนวณโดยสมการที่ 12 จะได้ ว่า time = 4,086 วินาที (1 ชั่วโมง 8 นาที) นี่คือเวลาที่ใช้ สำหรับการดึงความร้อนออกจากน้ำ เพื่อให้มีอุณหภูมิที่ ้เหมาะสมก่อนที่จะเกิดเป็นน้ำแข็ง ซึ่งเรียกได้ว่าเป็น Delay time ก่อนที่จะเกิด Ice forming การวิเคราะห์ในช่วงที่ต้อง ใช้ Latent heat ในการสร้างน้ำแข็ง เนื่องจากเป็นการ เปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม Matlab Simulink ดังรูปที่ 4 การ วิเคราะห์ใช้การ Simulation แบบ Dynamic เมื่อหักลบเวลา ์ ที่ใช้สำหรับ Sensible heat ไปแล้ว ระยะเวลาที่เหลือ สำหรับ 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 ¼" 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 h₁ ระหว่างสารทำความ เย็นและผิวด้านในของท่อทองแดง = 100 m² K/W, ค่า Convective coefficient h₃ ระหว่างน้ำและผิวด้านนอกของ ้น้ำแข็ง = 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
 ӣ 5: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่ว

รูปที่ 5: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่วน ของ Ice conduction เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor



จากรูปที่ 5 และจากสมการ (10) ค่าความต้านทานในส่วน ของ Ice conduction = $\ln(r/r_2)/2\pi Lk_i$ และ ค่าความ ต้านทานในส่วนของ Fouling factor = $F/2\pi r_1 L$ จากผล การ Simulation จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมี ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการ เพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction นี้ เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจากค่า r = r_2 ณ สภาวะเริ่มต้น ทำให้ $\ln(r/r_2) = 0$ ค่า Fouling factor เป็นพารามิเตอร์ที่ ขึ้นกับชนิดของของไหล อุณหภูมิ ความเร็วของการไหล ซึ่ง ในที่นี้คือน้ำยาทำความเย็น R134a ซึ่งมีสภาวะเป็น Two phase flow คือกำลังเกิดการเดือดระเหยกลายเป็นไอที่ Evaporator





 \times 2 times of identified Fouling factor F \bigcirc 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) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับ เวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่ อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น ที่ลดลง สังเกตได้ว่าค่า r นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจาก ค่า r = r₂ = 3.175 mm ณ สภาวะเริ่มต้น จากผลการทดลอง ที่ปรับค่า Fouling พบว่าค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผล ให้ r ลดลง ตัวอย่างเช่นที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้าง น้ำแข็ง 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 ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้าง ้น้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก 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 ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้าง ้น้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง r = 14.29 mm การเกิด r ลดลง 28.29% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของ การสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง r = 10.36 mm การ เกิด r ลดลง 48.02%



รูปที่ 7: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Volume of ice generated เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor

จากผลการ Simulation รูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า Volume of ice generated (V) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมี ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สังเกตได้ว่าค่า V นี้เริ่มต้นที่ วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างน้ำแข็ง ณ สภาวะเริ่มต้น จากผลการทดลองที่ปรับค่า 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 ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้าง น้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง V = 1.68 Litre การเกิด V ลดลง 49.70% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของ การสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง V = 0.84 Litre การ เกิด V ลดลง 74.85% ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้าง น้ำแข็ง ที่ค่า Reference fouling factor การสร้าง V = 6.69 Litre แต่เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการ สร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง V = 3.35 Litre การเกิด V ิลดลง 49.92% เมื่อ Fouling factor เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เป็น 4 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวม ของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง V = 1.68 Litre การเกิด V ลดลง 74.89%



รูปที่ 8: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่วน ของ Ice conduction เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective coefficient h₁

จากผลการ Simulation รูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ค่าความ ต้านทานในส่วนของ Ice conduction มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ เทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรก เริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตรา การเพิ่มขึ้นที่ลดลง ค่า Convective coefficient (h₁) หรือค่า การพาความร้อนที่อยู่ระหว่างสารทำความเย็น R134a และ ผิวท่อทองแดงด้านใน ค่า h₁ เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับชนิด ของของไหล อุณหภูมิ ความเร็วของการไหล ซึ่งในที่นี้คือ น้ำยาทำความเย็น ซึ่งมีสภาวะเป็น Two phase flow คือ กำลังเกิดการเดือดระเหยกลายเป็นไอที่ Evaporator จากผล การทดลองที่ปรับค่า h₁ พบว่าค่า h₁ ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ค่า ความต้านทานในส่วนของ Ice conduction เพิ่มขึ้น ซึ่งตรง ข้ามกับผลกระทบของ Fouling factor ต่อค่าความต้านทาน ในส่วนของ Ice conduction ที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งส่งผลให้ เกิดการเสริมกับ ค่าความต้านทานในส่วนของ Fouling factor โดยตรงทำให้ ค่าความต้านทานโดยรวมมีค่าที่ เพิ่มขึ้น



 $\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 0.001 \mbox{ time of Identified Convective coefficient } h_1 \\ & 0.0025 \mbox{ time of Identified Convective coefficient } h_1 \\ & 0.005 \mbox{ time of Identified Convective coefficient } h_1 \\ & \times & 0.01 \mbox{ time of Identified Convective coefficient } h_1 \\ & & & \\ \hline \end{array} \end{array}$

รูปที่ 9: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Outside radius of ice surface เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective

coefficient h1

จากผลการ Simulation รูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า r มีการ เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา ผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และ ในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง จากผลการทดลองที่ปรับค่า h₁ พบว่าค่า h₁ ที่ลดลงส่งผลให้ r ลดลง ตัวอย่างเช่นที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient h₁ = 100 W/m² K



การสร้าง r = 14.26 mm แต่เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวม ของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง r = 12.67 mm การ เกิด r ลดลง 11.15% เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของ การสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง r = 11.53 mm การ เกิด r ลดลง 19.14% ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้าง น้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient h₁ = 100 W/m² K การสร้าง r = 19.53 mm แต่เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลง ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทาน โดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง r = 17.64 mm การเกิด r ลดลง 9.68% เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวม ของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การสร้าง r = 16.00 mm การเกิด r ลดลง 18.07%



รูปที่ 10: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Volume of ice generated เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective coefficient h₁

จากผลการ Simulation รูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า V มีการ เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา ผ่านไป จากผลการทดลองที่ปรับค่า h₁ พบว่าค่า h₁ ที่ลดลง ส่งผลให้ V ลดลง ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะ 100 นาทีของการ สร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient h₁ = 100 W/m² K การสร้าง V = 3.34 Litre แต่เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การ สร้าง V = 2.60 Litre การเกิด V ลดลง 22.16 % เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การ สร้าง V = 2.12 Litre การเกิด V ลดลง 36.53 % ที่สภาวะ 200 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient h₁ = 100 W/m² K การสร้าง V = 6.69 Litre แต่ เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง V = 5.20 Litre การเกิด V ลดลง 22.27 % เมื่อ h₁ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.005 เท่าของค่า Reference ทำให้ ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก การ สร้าง V = 4.25 Litre การเกิด V ลดลง 36.47 %

<u>การทวนสอบด้วยการทดลอง (Model verification by</u> <u>Experimental test)</u>

เพื่อทำการทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบ Ice thermal storage ที่ใช้ในการสร้างน้ำแข็งได้ถูกสร้างและ ประกอบขึ้นจาก Hermetic compressor ยี่ห้อ Kulthorn Kirby รุ่น AE A2415Y ชนิด Reciprocating, ½ hp, Cooling Capacity 1,262 BTU/Hr (370 watt), ใช้กับไฟฟ้า 220 Volt ,50 Hz, 1 phase, ใช้กับน้ำยา R134a, ระบาย ความร้อนด้วยอากาศ, ระบบ Expansion device เป็นแบบ Capillary tube, อุปกรณ์ถูกติดตั้งบนแท่นทดลองที่สามารถ ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้โดยง่าย ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 : การติดตั้งระบบทำความเย็นเพื่อใช้ในการทำ Ice thermal storage



ท่อทองแดงแบบไร้ตะเข็บ (Seamless copper tube ASTM B88) ขนาด ¼" ยาว 5.5 เมตร มี Internal radius = 2.475 mm มี Outside radius = 3.175 mm ถูกนำมาขดเพื่อทำ เป็นอุปกรณ์สำหรับการสร้าง Ice thermal storage ดังแสดง ในรูปที่ 12



รูปที่ 12 : การประกอบท่อน้ำยาเพื่อใช้ในการทำ Ice thermal storage

ขดท่อทองแดงถูกนำมาแช่ในถังน้ำที่บรรจุน้ำอยู่ 12 ลิตร อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 30 deg C ระบบทำความเย็นทำงาน โดยที่ Evaporator ถูกควบคุมให้ทำงานที่อุณหภูมิ = -7 deg C อุณหภูมิของน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง 10 นาที อุณหภูมิของน้ำอยู่ที่ 0 deg C – 1 deg C และเริ่มเกิดน้ำแข็งเกาะขึ้นโดยรอบขดท่อทองแดง และ เริ่มเพิ่มความหนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 13 เมื่อ เวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง 52 นาที จึงหยุดระบบทำความเย็น และตรวจวัดปริมาตรน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจาก ปริมาตรของน้ำที่ หายไป พบว่าโดยค่า r ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 21.0 mm โดยเฉลี่ย ้คิดเป็นปริมาตรโดยรวม 7.45 ลิตรน้ำแข็ง เมื่อเทียบกับผลที่ วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเวลาผ่าน ไปเท่ากัน ได้ปริมาตรน้ำแข็งเท่ากับ 7.76 ลิตร จากการ เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้ จากการคำนวณประมาณ 4 % ซึ่งอาจเกิดได้จากการ ควบคุมสภาวะต่างๆ ในการทดลอง



รูปที่ 13 : ผลการสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice thermal storage

<u>บทสรุป (Conclusion)</u>

- งานวิจัยนี้ ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการ วิเคราะห์เวลาที่ใช้ในสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice on coil storage system ผลกระทบทางพลศาสตร์ส่งผลต่อ พฤติกรรมของระบบอย่างชัดเจน ค่าความต้านทานของ ระบบต่อการสร้างน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Time dependent performance) และส่งผลต่อการผลิต น้ำแข็ง
- ค่า Fouling factor, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ภายในและภายนอกท่อ ส่งผลต่อความสามารถในการ ผลิตน้ำแข็ง เมื่อค่า Fouling factor เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้าง น้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลง 49.70%
- เมื่อค่า Convective coefficient ระหว่างน้ำยาทำความ เย็นและผิวท่อทองแดงด้านใน ลดลงเป็น 0.01 เท่าของ ค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้าง น้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลง 22.16 %
- 4) แบบจำลองได้ถูกทดสอบโดยการสร้างน้ำแข็งด้วยวงจร น้ำยา R134a ในการทำความเย็น จากผลการทดลอง แสดง ให้เห็นถึง ความถูกต้องของ แบบจำลอง คณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์อัตราการสร้างน้ำแข็ง ผล จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในหารูปแบบ โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน และ ออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง น้ำแข็งในระบบ Ice thermal storage ต่อไป



<u>กิตติกรรมประกาศ</u>

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการวิจัยและ พัฒนาวิศวกรรมระบบปรับอากาศและทำความเย็น คณะวิศกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ และบริษัท โอ.อี เอ็น จิเนียริ่ง จำกัด

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

 r₁ = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อน้ำยาถึงเส้นรอบวงผิว ด้านในของท่อน้ำยา (mm)
 r₂ = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อน้ำยาถึงเส้นรอบวงผิว ด้านนอกของท่อน้ำยา (mm)

r = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อน้ำยาถึงเส้นรอบวงผิวด้าน นอกของน้ำแข็ง (mm) $h_1 = convective coefficient ที่อยู่ระหว่างสารทำความเย็น$ R134a และผิวท่อทองแดงด้านใน (W/m² K) $<math>h_3 = ค่าการพาความร้อนที่อยู่ระหว่างน้ำเย็นอุณหภูมิ 0$ deg C และผิวน้ำแข็งด้านนอก (W/m² K)F = ค่า Fouling factor (m² K/ W) $<math>k_t$ = thermal conductivity of copper tube = 393 W/m.K k_i = thermal conductivity of ice = 22 W/m.K L = ความยาวของท่อน้ำยา = 5.5 m Qe = อัตราการถ่ายเทความร้อน m = มวลของน้ำ (kg) h_{sf} = Latent heat of fusion of ice = 336 kJ/kg