

ETM-2045

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบ Ice Thermal Storage

แบบสารละลาย Ethylene Glycol

Mathematical Modeling and the Design of Ice Thermal Storage

Using Ethylene Glycol Aqueous Solution

ประกอบ สุวัฒน์หาวรรณ^{1*} และ อธิการ เรืองเจริญ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

* ติดต่อ E-mail: fengpsw@ku.ac.th โทรศัพท์: 02-7970999 ต่อ 1803 โทรสาร: 02-5794576

บทคัดย่อ

ระบบเก็บพลังงานเย็น Ice storage เพื่อระบบปรับอากาศ และทำความเย็น เป็นการนำพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟมีราคาต่ำ (Off peak) มาผลิตพลังงานเย็น เก็บเอาไว้ แล้วนำพลังงานเย็นนี้ออกมาใช้งานในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟมีราคาสูงกว่า (On peak) ดังนั้นระบบการเก็บพลังงานเย็นจะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนมีความแตกต่างกัน หรืออัตราค่าไฟฟ้ามี Demand charge ในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก มีความสนใจเพียงพอที่จะให้ผลคุ้มค่าต่อการลงทุนได้ งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของ Parameter ที่เกี่ยวข้องและเวลาที่ใช้น้ำแข็งให้ได้ตามเวลาที่กำหนด ระบบทำความเย็นทำงานด้วยน้ำยา R134a และใช้ Evaporator ในการสร้างความเย็นให้กับสารทำความเย็นชั้นที่สองที่เป็นสารละลาย Ethylene glycol (Ethylene glycol aqueous solution) สารละลายนี้ ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ และถูกส่งมาสร้างน้ำแข็งที่ Ice thermal storage ซึ่งมีการออกแบบชุดท่อเป็นแบบ Ice on coil storage system แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพลศาสตร์ซึ่งได้คำนึงถึงผลกระทบของค่าการถ่ายเทความร้อนที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาและความหนาของน้ำแข็งได้ถูกนำมาใช้ ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ ประกอบไปด้วย ค่า fouling factor, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่าง EG solution และผิวท่อทองแดงด้านใน (Internal convective coefficient), ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างน้ำเย็นและน้ำแข็ง (External convective coefficient) ได้ถูกวิเคราะห์ในเชิงเปรียบเทียบ จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อค่า Fouling factor เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลงมากกว่า 40% เมื่อค่า Convective coefficient ระหว่าง EG solution และผิวท่อทองแดงด้านใน ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลง มากกว่า 20% เมื่อค่า Convective coefficient ระหว่างน้ำเย็นและผิวน้ำแข็ง ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลง มากกว่า 30%

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

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 supplying chilled water to the working location. The ice thermal storage is useful when the electrical cost during off-peak is lower than the electrical cost during on-peak. This research work aims to develop mathematical model used

ETM-2045

to determine the charging time in ice on coil storage system. The primary refrigerant for vapor compression compressor is R134a. An evaporator is used to cool the second refrigerant, Ethylene glycol aqueous solution. This solution is used because the working condition is lower than freezing point of water. The cooled solution is sent from the evaporator to the ice thermal storage to produce ice on copper coil. The mathematical model accounted for the variation of ice thickness, fouling factor, internal convective coefficient, and external convective coefficient. The model simulations were performed by Matlab/Simulink. Simulation. It was found that when the fouling factor is increased two times, the thermal resistance increases and the ice generated is reduced more than 40%. When the convective coefficient between EG solution and copper tube internal is reduced, the thermal resistance increases and the ice generated is reduced more than 20%. When the convective coefficient between ice and copper tube external is reduced, the thermal resistance increases and the ice generated is reduced more than 30%.

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

1. บทนำ (Introducton)

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage) เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าต่ำ มาผลิตพลังงานเก็บเอาไว้ แล้วนำพลังงานนี้ออกมาใช้ในช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่า ดังนั้นระบบการกักเก็บพลังงานแบบนี้จะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนมีความแตกต่างกัน หรืออัตราค่าไฟฟ้ามี Demand charge ในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก มีความจุเพียงพอที่จะให้ผลคุ้มค่าการลงทุนได้ ในหลายประเทศโครงสร้างของอัตราค่าไฟฟ้า ในช่วงเวลาต่างๆ กัน ในแต่ละวันจะแตกต่างกันไป ในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก ซึ่งเรียกว่า On peak จะมีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่าในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อย ซึ่งเรียกว่า Off peak ถ้าเราสามารถนำพลังงานในรูปแบบความเย็นเก็บสะสมเอาไว้ในช่วงเวลา Off-peak แล้วนำพลังงานนี้ออกมาใช้ปรับอากาศในช่วงเวลา On-peak แล้ว ค่าไฟฟ้าของอาคารหรือโรงงานดังกล่าวจะลดลงได้มาก

อุปกรณ์หลักในระบบ ประกอบไปด้วย Glycol chiller, Glycol pump, Ice thermal storage, Chilled water pump, และ Heat exchanger ระบบกักเก็บพลังงานด้วยน้ำแข็ง (Ice thermal storage) มีอยู่หลายรูปแบบ ทั้งขึ้นอยู่กับการลงทุนและเทคโนโลยีการสร้าง น้ำแข็งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามระบบ

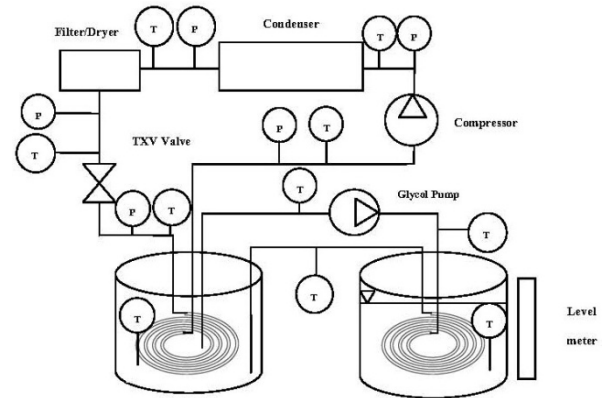
สร้างน้ำแข็งจะทำงานที่อุณหภูมิของ Evaporator ที่ต่ำกว่าระบบทำน้ำเย็นสำหรับการปรับอากาศ โดยทั่วไปอุณหภูมิของ Evaporator ซึ่งสร้างน้ำแข็งจะอยู่ระหว่าง -4 deg C ถึง -10 deg C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำแข็งที่ต้องการ ระยะเวลาที่ใช้ทำน้ำแข็ง รูปแบบของน้ำแข็งและการออกแบบพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน การออกแบบจำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ ประเมิน Evaporating temperature ที่เหมาะสม เพราะการที่ต้องใช้อุณหภูมิของ Evaporator ต่ำจะส่งผลให้ค่า COP ของ เครื่องทำความเย็นลดลงไปจากภาวะปกติ นั่นคือการใช้พลังงานไฟฟ้า kW/TR ของชุดทำความเย็นที่ผลิตน้ำแข็งจะสูงขึ้นกว่าเดิม วิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว โดยได้นำเสนอแนวคิดการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ เพื่อทำให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการคำนวณแบบสภาวะคงตัว (Steady state) แต่เพียงอย่างเดียว

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jekel TB และ Mitchell JW ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองของ Ice storage พบว่าค่าของ Inlet temperature มีความสัมพันธ์โดยตรงความสามารถในการสร้างน้ำแข็ง และเชื่อมโยงข้อมูลการวิเคราะห์เข้ากับข้อมูลของผู้ผลิต [3] Lee AHW และ Lones JW ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ Ice-on-coil thermal-energy

ETM-2045

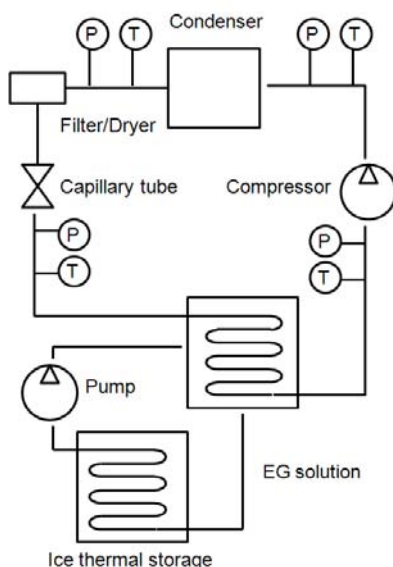
storage ขนาดเล็กสำหรับที่อยู่อาศัยและธุรกิจขนาดเล็ก การทดลองได้ทดลองที่ University of Texas, Center for Energy studies โดยใช้ระบบ TES ขนาด 43.8 Ton-Hr ใช้น้ำยา R-22 เป็นสารทำความเย็น การทดสอบได้ทดลองที่สภาวะ Outdoor temp ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการสร้างน้ำแข็ง และการใช้พลังงานของ Compressor [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]



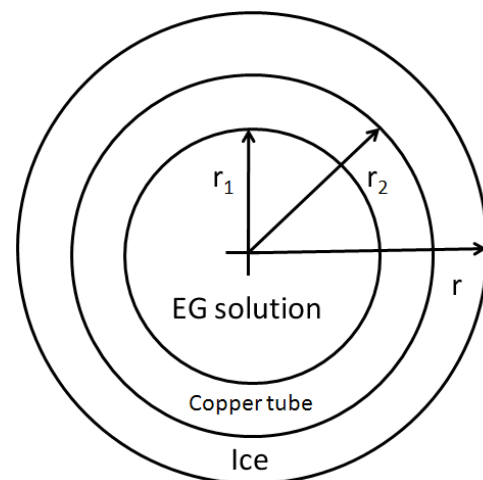
รูปที่ 2 : แนวคิดในการ setup วงจรทำความเย็นที่ใช้ในการสร้างน้ำแข็งที่ Ice thermal storage

ระบบสำหรับการวิเคราะห์ แยกเป็นสองวงจร โดยที่วงจรหนึ่ง เป็นระบบ refrigeration ใช้น้ำยาทำความเย็น R134a เป็นสารทำความเย็น ระบบประกอบไปด้วย Compressor, Condenser, Capillary tube, และ Evaporator ซึ่งเป็นส่วนในการสร้างความเย็นให้กับสารละลาย EG (Ethylene Glycol Aqueous Solution) ความเข้มข้น 25% โดยปริมาตร เมื่อสารละลาย EG ที่ได้อุณหภูมิตามต้องการ ก็จะถูกหมุนเวียนด้วยปั๊มสูบน้ำเย็นไปยัง ice thermal storage สำหรับการสร้างน้ำแข็งต่อไป

3. Mathematical modeling



รูปที่ 1: วงจรทำความเย็นที่ใช้ในการสร้างน้ำแข็งที่ Ice thermal storage



รูปที่ 3: Cross-sectional ของท่อทองแดงด้านในบรรจุ EG solution และน้ำแข็งที่เกิดขึ้นโดยรอบท่อ

แบบจำลองเริ่มต้นจากทรงกระบอกกลวง ที่มีพื้นที่ผิวด้านใน ด้านนอก ติดกับของไหลที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในที่นี้ อุณหภูมิของผิวด้านนอก จะสูงกว่าอุณหภูมิของ

ETM-2045

ผิวด้านใน สำหรับสภาวะคงตัว ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน

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

จาก Fourier's Law การนำความร้อนผ่านพื้นผิวของรูปทรงกระบอกแสดงได้ว่า

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

เมื่อ A = พื้นที่ที่ตัดฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน จากสมการจะเห็นได้ว่า $kr(dT/dr)$ เป็นอิสระไม่ขึ้นกับค่ารัศมี r ทำให้ประเมินได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ในแนวรัศมี การวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในที่วัตถุทรงกระบอก โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขต และถือว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k คงที่ จากการ integrate สมการ (1)

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

จาก boundary conditions

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

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

ทำให้ได้สมการทั่วไปดังนี้

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

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

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

และเมื่อวิเคราะห์สมการ (7) เทียบกับ นิยามของ

Thermal resistance สำหรับการนำความร้อนจะได้ว่า

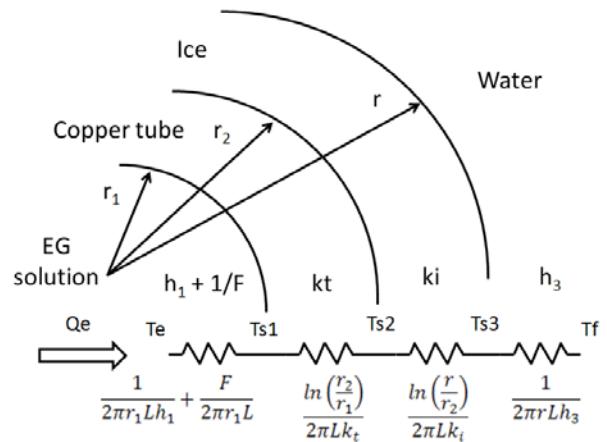
$$R_{cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{Q_e} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (8)$$

เมื่อประยุกต์สมการ (7) เข้ากับระบบท่อ EG solution ของ Ice thermal storage โดยคำนึงผลจากการพาความร้อนด้วยดังแสดงในรูปที่ 3 ท่อทองแดงมีความยาว L มีรัศมีภายใน r_1 และ รัศมีภายนอก r_2 มี EG solution อุณหภูมิ T_e วิ่งอยู่ภายในท่อทองแดง น้ำแข็งที่เกิดขึ้น

เริ่มจากผิวนอกของท่อทองแดง ไปจนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็งจากจุดศูนย์กลางของท่อทองแดงไปจนถึงขอบผิวนอกของน้ำแข็งนิยามด้วยรัศมี r ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา โดยขณะที่น้ำอยู่ภายนอกโดยรอบท่อทองแดง มีอุณหภูมิ T_f ค่า h_1 คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อกับ EG solution ค่า F คือ Fouling factor ภายในท่อ ค่า k_t คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อทองแดง ค่า k_i สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง ค่า h_3 คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของน้ำแข็งกับน้ำเย็นโดยรอบ จะสามารถวิเคราะห์สมการถ่ายเทความร้อนได้ว่า

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

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



รูปที่ 4 : ค่าความต้านทานในส่วนต่างๆ ระบบของท่อ EG solution และน้ำแข็งที่เกิดขึ้นโดยรอบท่อ

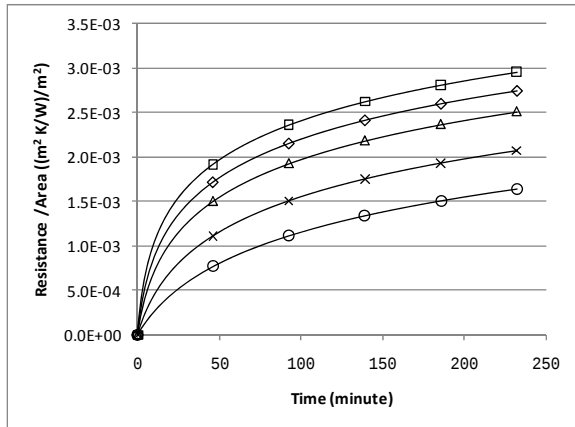
อัตราการเกิดน้ำแข็ง (Mass rate of ice formation) บนพื้นผิวท่อทองแดงทรงกระบอก อธิบายได้จากสมการ (11) โดยที่ h_{sf} คือค่าความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (Latent heat of fusion of ice)

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

รูปที่ 5 : Dynamic modeling ของระบบการสร้างน้ำแข็ง

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°C มาเป็น 0°C , จากการคำนวณโดยสมการที่ 12 จะได้ว่า $\text{time} = 4,086$ วินาที (1 ชั่วโมง 8 นาที) นี่คือเวลาที่ใช้สำหรับการดึงความร้อนออกจากน้ำ เพื่อให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะเกิดเป็นน้ำแข็ง ซึ่งเรียกได้ว่าเป็น Delay time ก่อนที่จะเกิด Ice forming การวิเคราะห์ในช่วงที่ต้องใช้ Latent heat ในการสร้างน้ำแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม Matlab Simulink การวิเคราะห์ใช้การ Simulation แบบ Dynamic เมื่อหักลบเวลาที่ใช้สำหรับ Sensible heat ไปแล้ว ระยะเวลาที่เหลือสำหรับการจัดการกับ Latent heat จึงเท่ากับ 3 ชั่วโมง 52 นาที (13,920 วินาที) โดยมี Calculation sampling time ทุก 15 วินาที Evaporating temperature ถูกควบคุมให้ทำงานที่อุณหภูมิ = -7°C ท่อทองแดงแบบไร้ตะเข็บ (Seamless copper tube ASTM B88) ขนาด $\frac{1}{4}$ " มีความยาว $L = 5.5$ เมตร, มี Internal radius $r_1 = 2.475$ mm, มี Outside radius $r_2 = 3.175$ mm, ดังนั้นค่า Initial condition ของ $r = 3.175$ mm, ค่า Convective coefficient h_1 ระหว่าง EG solution และผิวด้านในของท่อทองแดง = $100 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, ค่า Convective coefficient h_3 ระหว่างน้ำและผิวด้านนอกของน้ำแข็ง = $20 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

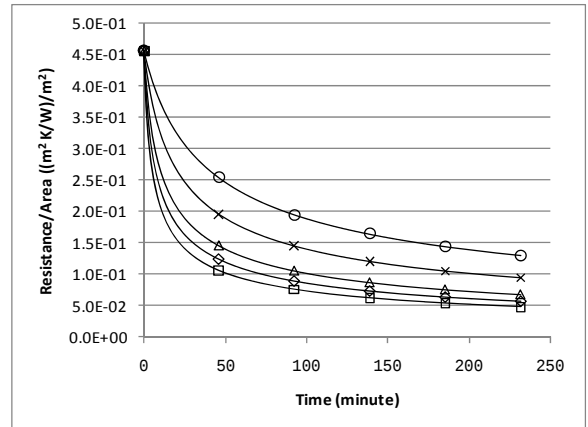
ETM-2045



- 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: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor

ผลการ Simulation แสดงได้ดังรูปที่ 6-11 และจากสมการ (10) ค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction $= \ln(r/r_2)/2\pi Lk_i$ และ ค่าความต้านทานในส่วนของ Fouling factor $= F/2\pi r_1 L$ จากผลการ Simulation จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0 เนื่องจากค่า $r = r_2$ ณ สภาวะเริ่มต้นทำให้ $\ln(r/r_2) = 0$ ค่า Fouling factor เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับชนิดของของไหล อุณหภูมิ ความเร็วของการไหล ซึ่งในที่นี้คือ EG solution ซึ่งมีสภาวะเป็นของเหลวที่กำลังไหลผ่านชุดท่อทองแดงของ ice thermal storage จากผลการทดลองที่ปรับค่า Fouling พบว่าค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ค่าความต้านทานในส่วนของ Ice conduction ลดลง แต่ไม่สามารถส่งผลต่อค่าความต้านทานรวมได้ เนื่องจาก ส่วนของค่าความต้านทานในส่วนของ Fouling factor มีค่าที่มากกว่าหลายเท่าตัว ทำให้ค่าความต้านทานโดยรวมมีค่าที่เพิ่มขึ้น



- 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

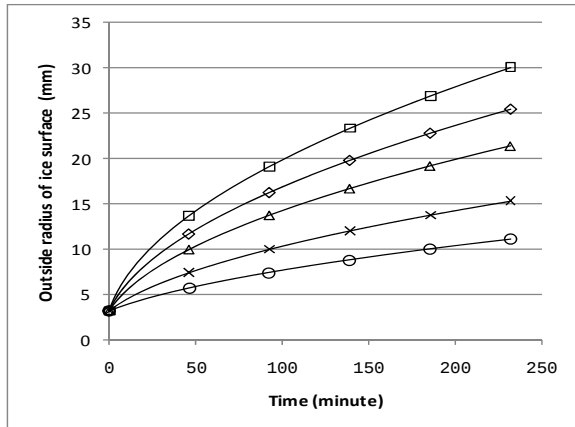
รูปที่ 7: ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในส่วนของ Water convection เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor

จากสมการ (10) ค่าความต้านทานในส่วนของ Water convection $= 1/2\pi r L h_3$ จากผลการ Simulation จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานในส่วนของ Water convection มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการลดลงที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการลดลงที่น้อยลง สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานในส่วนของ Water convection นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกที่ 0.4557 ($\text{m}^2 \text{ K/W}/\text{m}^2$) เนื่องจากค่า $r = r_2$ ณ สภาวะเริ่มต้นทำให้

$$\frac{1}{2\pi r L h_3} = \frac{1}{2\pi(0.003175)(5.5)(20)} = 0.4557$$

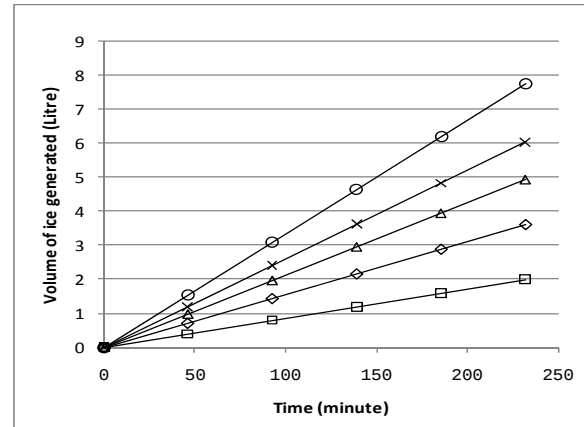
จากผลการ Simulation เทียบกับเวลา ค่าความต้านทานในส่วนของ Water convection มีค่าลดลงก็จริงแต่ไม่สามารถส่งผลต่อค่าความต้านทานรวมได้เนื่องจาก ส่วนของค่าความต้านทานในส่วนของ Fouling factor มีค่าที่มากกว่าหลายเท่าตัว ทำให้ค่าความต้านทานโดยรวมมีค่าที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองที่ปรับค่า Fouling พบว่าค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ค่าความต้านทานในส่วนของ Water convection มีอัตราการลดที่น้อยลง

ETM-2045



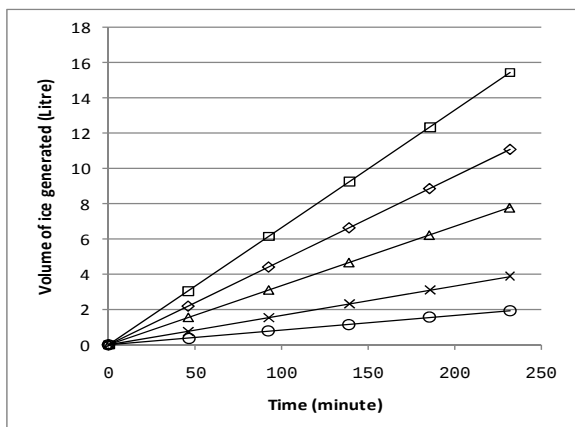
- 0.5 times of identified Fouling factor F
- ◇ 0.7 times of identified Fouling factor F
- △ Identified Fouling factor F
- × 2 times of identified Fouling factor F
- 4 times of identified Fouling factor F

รูปที่ 8: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Outside radius of ice surface เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor



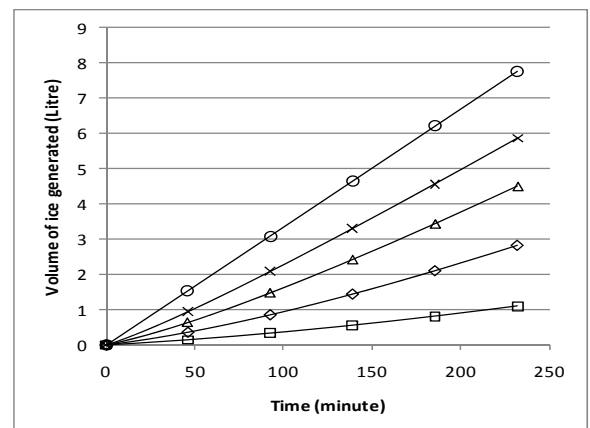
- 0.001 time of Identified Convective coefficient h_1
- ◇ 0.0025 time of Identified Convective coefficient h_1
- △ 0.005 time of Identified Convective coefficient h_1
- × 0.01 time of Identified Convective coefficient h_1
- Identified Convective coefficient h_1

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



- 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 9: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Volume of ice generated เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Fouling factor



- 0.001 time of Identified Convective coefficient h_3
- ◇ 0.0025 time of Identified Convective coefficient h_3
- △ 0.005 time of Identified Convective coefficient h_3
- × 0.01 times of Identified Convective coefficient h_3
- Identified Convective coefficient h_3

รูปที่ 11: ผลการเปลี่ยนแปลงของ Volume of ice generated เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Convective coefficient h_3

Outside radius of ice surface (r) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกเริ่มต้นที่อัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง และในช่วงถัดมาเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง สังเกตได้ว่าค่า r นี้เริ่มต้นที่วินาทีแรกคือ 0 เนื่องจากค่า $r = r_2 = 3.175$ mm ณ สภาวะเริ่มต้น จากผลการทดลองที่ปรับค่า Fouling

พบว่าค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ r ลดลง ตัวอย่างเช่นที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง 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%

ETM-2045

ค่า Fouling factor ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ V ลดลง ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะ 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 50%

Volume มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จากผลการทดลองที่ปรับค่า h_1 พบว่าค่า h_1 ที่ลดลงส่งผลให้ V ลดลง ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ค่า Reference convective coefficient $h_1 = 100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ การสร้าง $V = 3.34$ Litre แต่เมื่อ h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $V = 2.60$ Litre การเกิด V ลดลง 22%

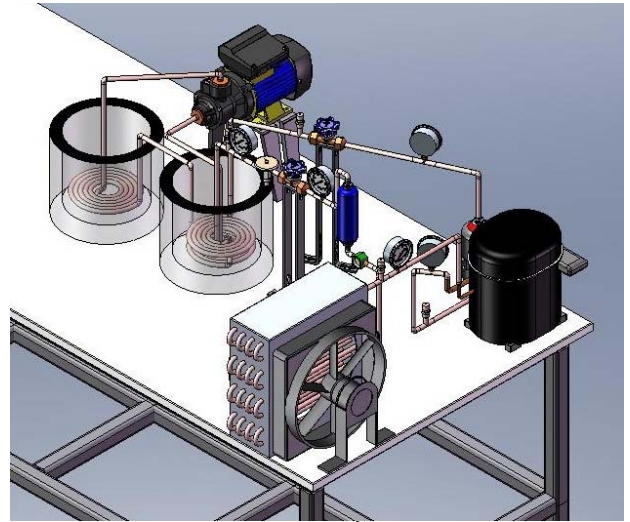
จากผลการทดลองที่ปรับค่า h_3 พบว่าค่า h_3 ที่ลดลงส่งผลให้ V ลดลง ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะ 100 นาทีของการสร้างน้ำแข็ง ที่ Reference convective coefficient $h_3 = 20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ การสร้าง $V = 3.34$ Litre แต่เมื่อ h_3 เปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่า Reference ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การสร้าง $V = 2.28$ Litre การเกิด V ลดลง 32 %

5. การออกแบบ Ice thermal storage ขนาดเล็ก

โดยใช้องค์ความรู้จากการ Simulation

องค์ความรู้ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย simulation ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบ ระบบ ice thermal storage ขนาดเล็ก 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, น้ำมัน R134a, ระบายความร้อนด้วยอากาศ, ระบบ Expansion device เป็นแบบ Capillary tube, อุปกรณ์ถูกติดตั้งบนแท่น

ทดลองที่สามารถตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 : การออกแบบและติดตั้งระบบทำความเย็นเพื่อใช้ในการทำ Ice thermal storage



รูปที่ 13 : การประกอบท่อทองแดงสำหรับ EG solution เพื่อใช้ในการทำ Ice thermal storage



รูปที่ 14 : ผลการสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice thermal storage

ETM-2045

เทคนิคการ simulation ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและกำหนดขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของท่อทองแดงที่ใช้ใน ice thermal storage และเป็นอุปกรณ์สำคัญในการสร้างน้ำแข็งให้ทันภายในเวลาที่ต้องการ ในรูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงท่อทองแดงแบบไร้ตะเข็บ (Seamless copper tube ASTM B88) ขนาด 3/8 นิ้ว ยาว 1.7 เมตร ถูกนำมาขดเพื่อทำเป็นอุปกรณ์สำหรับการสร้าง Ice thermal storage รูปที่ 14 แสดงให้เห็นถึงการเกิดของน้ำแข็งในระหว่างการทำงาน อุปกรณ์ดังกล่าวได้มีการจัดสร้างเพื่อการศึกษาในเชิงลึกต่อไป

6. บทสรุป (Conclusion)

- 1) งานวิจัยนี้ ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในสร้างน้ำแข็งของระบบ Ice on coil storage system แบบที่ใช้ Ethylene glycol aqueous solution
- 2) ผลกระทบทางพลศาสตร์ส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบอย่างชัดเจน ค่าความต้านทานของระบบต่อการสร้างน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Time dependent performance) และส่งผลต่อการผลิตน้ำแข็ง
- 3) ค่า Fouling factor, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในและภายนอกท่อ ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตน้ำแข็ง เมื่อค่า Fouling factor เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลงมากกว่า 40%
- 4) เมื่อค่า Convective coefficient ระหว่าง EG solution และผิวท่อทองแดงด้านใน ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลงมากกว่า 20% เมื่อค่า Convective coefficient ระหว่างน้ำเย็นและผิวน้ำแข็ง ลดลงเป็น 0.01 เท่าของค่าอ้างอิง ทำให้ความต้านทานโดยรวมของการสร้างน้ำแข็งเพิ่มขึ้น การเกิดปริมาตรน้ำแข็งลดลงมากกว่า 30%

7. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgments)

This study was sponsored by Research and Development of Refrigeration and Air conditioning Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

8. เอกสารอ้างอิง (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

ETM-2045

Abbreviation

r_1 = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อ EG solution ถึงเส้นรอบวงผิวด้านในของท่อทองแดง

r_2 = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อ EG solution ถึงเส้นรอบวงผิวด้านนอกของท่อทองแดง

r = ระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อ EG solution ถึงเส้นรอบวงผิวด้านนอกของน้ำแข็ง

h_1 = convective coefficient ที่อยู่ระหว่างสารละลาย EG solution และผิวท่อทองแดงด้านใน ($W/m^2 K$)

h_3 = ค่าการพาความร้อนที่อยู่ระหว่างน้ำเย็นอุณหภูมิ 0 deg C และผิวน้ำแข็งด้านนอก ($W/m^2 K$)

F = ค่า Fouling factor ($m^2 K/ W$)

k_t = thermal conductivity of copper tube = 393 W/m.K

k_i = thermal conductivity of ice = 22 W/m.K

L = ความยาวของท่อทองแดงสำหรับ EG solution

Q_e = อัตราการถ่ายเทความร้อน

m = มวลของน้ำ (kg)

h_{sf} = Latent heat of fusion of ice = 336 kJ/kg