การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19
19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดสงขลา

การศึกษาการไหลเวียนตามธรรมชาติของน้ำในระบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

Study of a Natural Circulation of Water in a Small Model of Solar Water Heater

เผชิญ จันทร์สา*[1], ศุภชาติ จงไพบูรย์พัฒนะ[2], มูฮำมัด ทรงชาติ[3] และ มณเฑียร แก่นสน[4]
[1,3,4]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพมหานคร 10900
โทรศัพท์: 0-2579-1111 ต่อ 1202, 1261, โทรสาร: 0-2579-1111 ต่อ 2147, *E-mail: pachern@buntharik.spu.ac.th
[2]สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต), ปทุมธานี 12121
โทร. 0-2986-9009 ต่อ 2207, โทรสาร 0-2986-9009 ต่อ 1801

Pachern Jansa*[1], Supachart Chungpaibulpatana[2], Muhammat Songchart[3], and Montien Kaenson[4]
[1,3,4]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University, Bangkok 10900
Phone: 0-2579-1111 ext. 1202, 1261. Fax: 0-2579-1111 ext. 2147. *E-mail: pachern@buntharik.spu.ac.th
[2]Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University (Rangsit Campus), Patumthani 12121
Phone: 0-2986-9009 ext. 2207. Fax: 0-2986-9009 ext. 1801

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาการไหลเวียนตามธรรมชาติของน้ำในระบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในการศึกษาได้ใช้วิธีการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการคาดเดาโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมกับผลที่ได้จากการทดลองจริงของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น ในสมการการคาดเดาอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน จะมีสมการย่อยของอัตราการไหลรวมอยู่ด้วย โดยสัมประสิทธิ์รวมของการไหล, K_r จะเป็นค่าคงที่ที่สำคัญในสมการการคาดเดาอัตราการไหลเวียนของน้ำ ผลการคาดเดาอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ตรงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงมากที่สุด จะถูกนำมาพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์รวมของการไหล, K_r ซึ่งวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์รวมของการไหล, K_r ได้ถูกอธิบายไว้ในบทความนี้ จากผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์รวมของการไหล, K_r สามารถที่จะใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอันหนึ่งของแบบจำลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดลองนี้ได้

คำหลัก เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, การไหลเวียนตามธรรมชาติ, สัมประสิทธิ์รวมของการไหล

Abstract

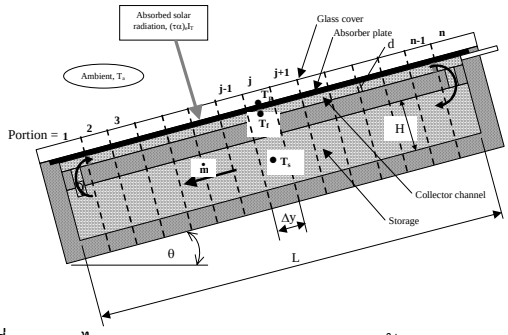
This paper presents a study of a natural circulation of water in a model of constructed small solar water heater. The study uses the comparison of the storage tank temperatures that obtained from the simulation with that obtained from the experiment. A mathematical model for predicting a thermosyphon flow rate of the constructed solar water heater has been modeled. An overall flow coefficient K_r has been introduced as an important parameter in the flow model. The storage tank temperature resulted from the simulation which consistent with that of the experiment will be considered to find out the value of K_r. The procedure to determine the values of K_r has also been presented. The study shows that the overall flow coefficient K_r introduced in the flow model can be considered to be a parameter used for simulating the performance of constructed solar water heater.

Keywords: Solar water heater, Natural circulation (thermosyphon flow), Overall flow coefficient.

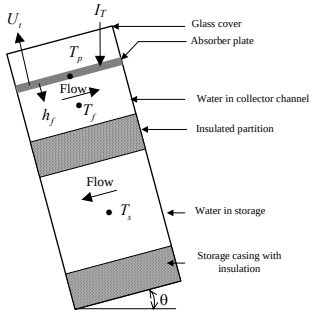
1.บทนำ

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบที่ไม่ใช้ปั๊มในการหมุนเวียนน้ำนั้น การไหลเวียนของน้ำภายในระบบจะเป็นไปอย่างธรรมชาติ (Natural Circulation หรือ Thermosyphon) โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่รวมเอาแผงรับแสงอาทิตย์กับถังสะสมน้ำร้อนเข้าเป็นหน่วยเดียวกัน (Built-in-storage Solar Water Heater, BIS) ที่มักจะพบความยุ่งยากในการหาอัตราการไหลเวียนของน้ำภายในระบบ ที่ผ่านมามีนักวิจัยได้พยายามคิดสมการอัตราการไหลขึ้นมาเพื่อมาใช้ในการคำนวณหาสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS เช่น A.A Mohamad (1997) [1] ได้ประยุกต์ใช้สมการคำนวณอัตราการไหลของ A. Bar-Cohan และ W.M. Rohsenow (1994) [2] เพื่อใช้ในการคำนวณหาสมรรถนะทาง

ความร้อนของ “Integrated solar collector-storage tank system with thermal diode” อัตราการไหลของน้ำในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มาก การไหลเวียนตามธรรมชาติ นั้นเกิดจากความแตกต่างกันของความหนาแน่นของน้ำที่อยู่ระดับที่ต่างๆ กัน โดยความหนาแน่นของน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำ ดังนั้นจุดประสงค์ของการศึกษานี้คือการหาสัมประสิทธิ์รวมของการไหล (Overall flow Coefficient) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์โดยรวมทั้งหมดของความเสียดทานการไหลของน้ำในระบบตลอดเส้นทางการไหลที่เกิดจาก ข้อต่อ ร่องทางน้ำ วาล์วและแผ่นกั้นกระจายน้ำ โดยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์รวมของการไหลนี้จะวิเคราะห์อ้างอิงกับผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS [4]

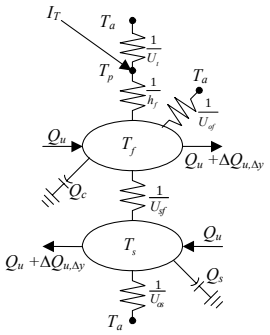


รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของสามส่วนประกอบหลักและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 2 ภาพขยายสามส่วนประกอบหลักสำหรับชิ้นส่วน Δy

รูปที่ 3 แสดงโครงข่ายการถ่ายเทความร้อนของสามส่วนประกอบหลัก



2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกใช้อ้างอิงในการศึกษาสามารถอธิบายได้โดยสมการสมดุลพลังงานของส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ แผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์ ร่องทำน้ำร้อน และถังสะสมน้ำร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1, 2 และ 3

2.1 แผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์

สมการสมดุลพลังงานของแผ่นดูดรับรังสีสามารถเขียนขึ้นโดยสมมติให้ไม่มีความจุความร้อนที่แผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์

$$Q_A - Q_{TL} = Q_{P\text{-}C}$$

หรือ

$$(\tau\alpha)_e I_T - U_t\left(T_p - T_a\right) = h_f\left(T_p - T_f\right) \qquad (1)$$

โดยที่ Q_A คือพลังงานความร้อนที่แผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์สามารถดูดรับไว้ได้, Q_{TL} คือพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์สู่บรรยากาศทางด้านบน, Q_{p-c} คือพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์กับร่องทำน้ำร้อน, $(\tau\alpha)_e$ คือผลคูณประสิทธิผลระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับค่าการดูดรับรังสีแสงอาทิตย์, I_T คือความเข้มแสงอาทิตย์, U_t คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างแผ่นดูดรับรังสีกับบรรยากาศ, T_p คืออุณหภูมิแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์, T_a คืออุณหภูมิบรรยากาศ, h_f คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างแผ่นดูดรับรังสีกับร่องทำน้ำร้อน และ T_f คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในร่องทำน้ำร้อน

จากสมการที่ 1 จะได้

$$T_p = \frac{(\tau\alpha)_e I_f + h_f T_f + U_t T_a}{h_f + U_t} \qquad (2)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์กับบรรยากาศสามารถคำนวณโดยสมการ (Duffie and Beckman,1980 [5],1991[6])

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_p^*}\left(\frac{T_p^* - T_a^*}{N+f}\right)^e} + \frac{1}{h_v}\right]^{-1} + \frac{\sigma(T_p^* + T_a^*)(T_p^{*2} + T_a^{*2})}{(\varepsilon_p + 0.00591 N h_v)^{-1} + \frac{2N+f-1+0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \qquad (3)$$

โดยที่ N คือจำนวนแผ่นกระจกครอบ, T_p^* คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของแผ่นดูดรับรังสี, T_a^* คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของบรรยากาศ, ε_g คือสัมประสิทธิ์การปล่อยรังสีของกระจก, ε_p คือสัมประสิทธิ์การปล่อยรังสีของแผ่นดูดรับรังสี, σ คือค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มาน, h_v คือ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากลม = 5.7 + 3.8 v_{wind}, โดยที่ v_{wind} = ความเร็วลม, e= 0.43(1-100/T_p^*), f = (1 + 0.089h_v - 0.1166$h_v\varepsilon_p$)(1 + 0.07866N), และ c = 520(1-0.000051θ^2) สำหรับ $0^\circ < \theta < 70^\circ$, โดยที่ θ คือมุมเอียงของแผงรับแสงอาทิตย์

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์กับน้ำในร่องทำน้ำร้อนสามารถหาได้จาก (J. P. Holman, 1997 [7])

$$h_f = \overline{Nu}_e . k_w / \Delta y \qquad (4)$$

โดยที่ $\overline{Nu}_e$ คือค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย, k_w คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ, และ Δy คือความยาวของชิ้นส่วนที่พิจารณา

2.2 ร่องทำน้ำร้อน

การสมดุลพลังงานในส่วนร่องทำน้ำร้อนแต่ละชิ้นส่วน *dy* พิจารณา ณ เวลาใดๆ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_c = Q_{p-c} - Q_{c-s} - Q_{c-a} - Q_u$$

หรือ

$$\rho_f dC_{pf}\frac{dT_f}{dt} = h_f(T_p - T_f) - U_{sf}(T_f - T_S) - U_{of}(\frac{2d}{B})(T_f - T_a) - \frac{\dot{m}C_{pf}}{B}\frac{dT_f}{dy} \qquad (5)$$

โดยที่ Q_c คือพลังงานที่สะสมของน้ำในร่องทำน้ำร้อน ณ เวลาใดๆ, Q_{c-s} คือพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างร่องทำน้ำร้อนกับถังสะสมน้ำร้อน, Q_{c-a} คือพลังงานที่สูญเสียจากร่องทำน้ำร้อนสู่บรรยากาศ, Q_u คือพลังงานที่เป็นประโยชน์ที่ได้จากร่องทำน้ำร้อนไหลเข้าไปสู่ถังสะสมน้ำร้อน, ρ_f คือความหนาแน่นของน้ำในร่องทำน้ำร้อน , d คือความลึกของร่องทำน้ำร้อน, B คือความกว้างของร่องทำน้ำร้อน, C_{pf} คือความจุความร้อนของน้ำในร่องทำน้ำร้อน, $\dot{m}$ คืออัตราไหลเวียนของน้ำในระบบ, T_S คืออุณหภูมิน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, U_{sf} คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างร่องทำน้ำร้อนกับถังสะสมน้ำร้อน , U_{of} คือสัมประสิทธิ์สูญเสียความร้อนจากร่องทำน้ำร้อนผ่านผนังด้านข้างสู่บรรยากาศ

เมื่อแทนสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 5 จะได้

$$\rho_f dC_{pf}\frac{dT_f}{dt} = \frac{h_f[(\tau\alpha)_e I_T - U_t(T_f - T_a)]}{h_f + U_t} - U_{sf}(T_f - T_s) - U_{of}(\frac{2d}{B})(T_f - T_a) - \frac{\dot{m}C_{pf}}{B}\frac{dT_f}{dy} \qquad (6)$$

โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ร่องทำน้ำร้อนจะถูกแบ่งเป็น *n* ส่วนตามความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 1 อุณหภูมิของน้ำในร่องทำน้ำร้อนของชิ้นส่วนที่ j^{th} ณ ช่วงเวลา Δt ถัดไปจะสามารถอธิบายได้จาก

$$T_{f_j}^{t+\Delta t} = T_{f_j}^t + \frac{\Delta t}{\rho_f^t dC_{pf}^t}\{\frac{h_f^t[(\tau\alpha)_e I_T^t - U_t^t(T_{f_j}^t - T_a^t)]}{h_f^t + U_t^t} - U_{sf}(T_{f_j}^t - T_{s_j}^t) - U_{of}(\frac{2d}{B})(T_{f_j}^t - T_a^t) - \frac{\dot{m}^t C_{pf}^t}{B\Delta y}(T_{f_j}^t - T_{f_{j-1}}^t)\} \qquad (7)$$

โดยที่ T_f^t คืออุณหภูมิน้ำในร่องทำน้ำร้อนที่เวลา *t*, $T_f^{t+\Delta t}$ คืออุณหภูมิน้ำในร่องทำน้ำร้อนที่เวลา *t* + Δt, T_s^t คืออุณหภูมิน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่เวลา *t*, T_a^t คืออุณหภูมิบรรยากาศที่เวลา *t*, ρ_f^t คือความหนาแน่นน้ำในร่องทำน้ำร้อนที่เวลา *t*, C_{pf}^t คือความจุความร้อนของน้ำในร่องทำน้ำร้อนที่เวลา *t*, I_T^t คือความเข้มแสงอาทิตย์ที่กระทบบนพื้นผิวของแผงรับแสงอาทิตย์ที่เวลา *t*, h_f^t คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์กับน้ำในร่องทำน้ำร้อนที่เวลา *t*, U_t^t คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์สู่บรรยากาศทางด้านบนที่เวลา *t*, $\dot{m}^t$ คืออัตราการไหลเวียนของน้ำที่เวลา *t* สำหรับชิ้นส่วนที่อยู่ปลายด้านบนและล่างของแผงรับแสงอาทิตย์นั้นจะมีการสูญเสียความร้อนจากน้ำในร่องน้ำสู่บรรยากาศทางด้านข้างเพิ่มเข้ามา ซึ่งเทอมของ $U_{of}(\frac{2d}{B})(T_{f_j}^t - T_a^t)$ ในสมการที่ 7 จะเป็น $U_{of}(\frac{1}{\Delta y} + \frac{2}{B})d(T_{f_j}^t - T_a^t)$

2.3 ถังสะสมน้ำร้อน

การสมดุลพลังงานของชิ้นส่วน *dy* ของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$Q_s = Q_u + Q_{c-s} - Q_{s-a}$$

หรือ

$$\rho_s HC_{ps}\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{m}C_{ps}}{B}\frac{dT_s}{dy} + U_{sf}(T_f - T_s) - U_{os}(1 + \frac{2H}{B})(T_s - T_a) \qquad (8)$$

โดยที่ Q_s คือพลังงานทั้งหมดที่สะสมในถังสะสมน้ำร้อน, Q_{s-a} คือพลังงานสูญเสียจากถังสะสมน้ำร้อนสู่บรรยากาศ, ρ_s คือความหนาแน่นของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, *H* คือความลึกของถังสะสมน้ำร้อน, C_{ps} คือความจุความร้อนของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, U_{os} คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากถังสะสมน้ำร้อนสู่บรรยากาศ และจากรูปที่ 1 อุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนสำหรับชิ้นส่วน j^{th} ในช่วงเวลา Δt ถัดไปสามารถเขียนได้เป็น

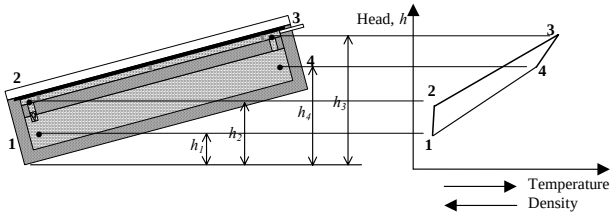
$$T_{s_j}^{t+\Delta t} = T_{s_j}^{t} + \frac{\Delta t}{\rho_s^t H C_{ps}^t}[\frac{\dot{m}^t C_{ps}^t}{B\Delta y_j}(T_{s_{j-1}}^t - T_{s_j}^t)$$
$$+U_{sf}(T_{f_j}^t - T_{s_j}^t) - U_{os}(1+\frac{2H}{B})(T_{s_j}^t - T_a^t)] \quad (9)$$

โดยที่ $T_s^{t+\Delta t}$ คืออุณหภูมิน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่เวลา $t + \Delta t$, ρ_s^t คือความหนาแน่นของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่เวลา t, C_{ps}^t คือความจุความร้อนของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่เวลา t และสำหรับส่วนปลายด้านบนและล่างของถังสะสมน้ำร้อนจะมีการสูญเสียความร้อนจากน้ำในถังสะสมน้ำร้อนสู่บรรยากาศเพิ่มขึ้นมาคือเทอมของ $U_{os}(1+\frac{2H}{B})(T_{s_j}^t - T_a^t)$ ในสมการที่ 9 จะเป็น $U_{os}(1+\frac{2H}{B}+\frac{H}{\Delta y})(T_{s_j}^t - T_a^t)$

2.4 อัตราการไหลเวียนตามธรรมชาติ

a) ความดันที่ทำให้เกิดการไหลเวียนตามธรรมชาติ

ภาพแสดงเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS ที่สัมพันธ์กับไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวมกับความหนาแน่นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ความดันที่ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติที่เวลาใดๆ จะเกิดจากความแตกต่างกันของความดันรวมตามเส้นทางการไหล 123 เทียบกับเส้นทางการไหล 143



รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหนาแน่นของน้ำภายในระบบ

ความดันที่ทำให้เกิดการไหลเวียนตามธรรมชาติจะสามารถอธิบายได้ว่า

$$H_T = \int_1^2 \rho g dh + \int_2^3 \rho g dh - \int_1^4 \rho g dh - \int_4^3 \rho g dh \quad (10)$$

โดยที่ h คือระดับความสูงในแนวดิ่ง

เนื่องจากการแปรผันของอุณหภูมิน้ำในระบบมีค่าน้อย จึงสมมติให้อุณหภูมิของน้ำมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความหนาแน่นของน้ำ, $T = c\rho g$ โดยที่ c เป็นค่าคงที่ ดังนั้นความดันที่ทำให้เกิดการไหลเวียนตามธรรมชาติจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_T = C_1(h_2-h_1)(T_{mb}-T_{sb}) + C_1(h_3-h_2)(T_{fm}-T_{sb}) - C_1(h_4-h_1)(T_{sm}-T_{sb})$$
$$- C_1(h_3-h_4)(T_{mt}-T_{sb}) \quad (11)$$

โดยที่ C_1 คือค่าคงที่, T_{fm} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในร่องทำน้ำร้อน, T_{sm} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, T_{mb} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ส่วนปลายล่างของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, $(T_{sb}+T_{fb})/2$, T_{mt} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ส่วนปลายบนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, $(T_{ft}+T_{st})/2$, T_{fb} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ส่วนปลายล่างของร่องทำน้ำร้อน, T_{sb} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำส่วนปลายของถังสะสมน้ำร้อน, T_{ft} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ส่วนปลายบนของร่องทำน้ำร้อน และ T_{st} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ส่วนปลายบนของถังสะสมน้ำร้อน

b) ความดันเสียดทานการไหล

ความดันเสียดทานการไหลรวมที่เกิดภายในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS จะเกิดจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะน้ำไหลผ่านทางเข้า ทางออก แผ่นกั้นกระจายน้ำและวาล์วกันกลับในวงจรการไหล ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$H_F = C_2V^2 = C_3\dot{m}^2 \quad (12)$$

โดยที่ C_2, C_3 คือค่าคงที่ และ V คือความเร็วการไหล

c) อัตราการไหล

จากสมการที่ 11 และ 12 จะสามารถเขียนสมการอัตราการไหลได้ดังนี้

$$C_3\dot{m}^2 = C_1\{(h_2-h_1)(T_{mb}-T_{sb}) + (h_3-h_2)(T_{fm}-T_{sb}) - (h_4-h_1)(T_{sm}-T_{sb})$$
$$- (h_3-h_4)(T_{mt}-T_{sb})\}$$

หรือ

$$\dot{m} = K_f\{(h_2-h_1)(T_{mb}-T_{sb}) + (h_3-h_2)(T_{fm}-T_{sb}) - (h_4-h_1)(T_{sm}-T_{sb})$$
$$- (h_3-h_4)(T_{mt}-T_{sb})\}^{(1/2)} \quad (13)$$

โดยที่ K_f คือสัมประสิทธิ์รวมของการไหลที่เกิดจากความเสียดทานตลอดทางการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแผ่นกระจายน้ำ, ทางเข้า, ทางออกของร่องทำน้ำร้อนและวาล์วกันกลับ

3. วิธีการทำแบบจำลองการคาดเดาสมรรถนะของระบบ

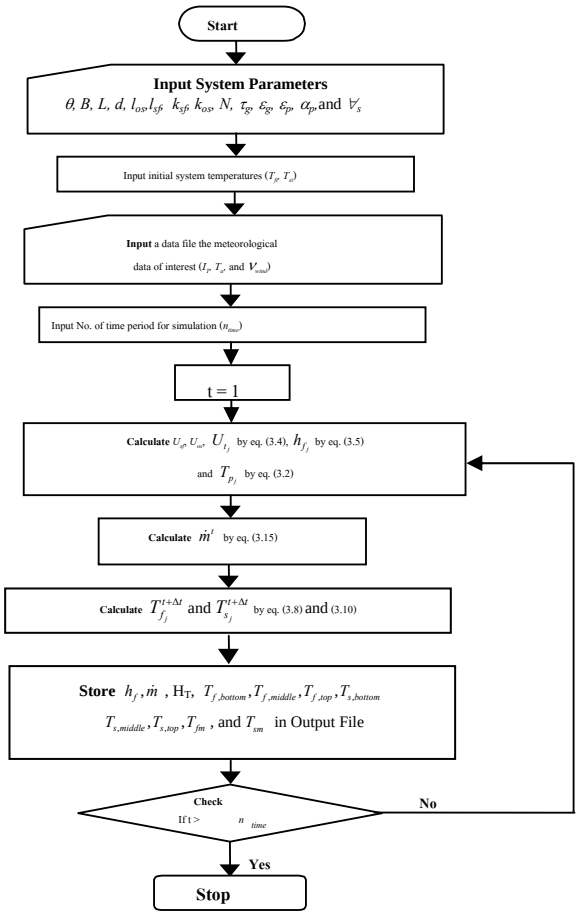
วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ ได้ถูกใช้ในการแก้ปัญหาของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยการพิจารณาแบ่งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็นหลายๆ ส่วนตามความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับแบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนแบบ BIS นี้ถูกแบ่งออกเป็น 17 ส่วนเท่าๆกันตลอดความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์ โดยตัวแปรและค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และกระบวนการคำนวณของแบบจำลองได้อธิบายไว้ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปรควบคุม	ค่า
มุมเอียงของแผงรับแสงอาทิตย์, θ	15° *
ละติจูด, *Lat*	15° (north)
ความกว้างของร่องทำน้ำร้อน, *B* (m)	1.1 *
ความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์, *L* (m)	1.7 *
ความลึกเฉลี่ยของร่องทำน้ำร้อน, *d* (m)	0.0425 *
ความหนาแผ่นฉนวนด้านข้าง, l_{os} (m)	0.03 *
ความหนาแผ่นกั้นบุฉนวน, l_{sf} (m)	0.035 *
ค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนด้านข้าง, k_{os} (W/mK)	0.07 **
ค่าการนำความร้อนของแผ่นกั้นบุฉนวน, k_{sf} (W/mK)	0.15 **
จำนวนแผ่นกระจกครอบแผงรับแสงอาทิตย์, *N*	1
ค่าการส่งผ่านแสงของกระจก, τ_g	0.88 **
ค่าการปล่อยแสงของกระจก, ε_g	0.88 **
ค่าการปล่อยแสงของแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์, ε_p	0.95 **
ค่าการดูดรับแสงของแผ่นดูดรับรังสีแสงอาทิตย์, α_p	0.8 **
ปริมาตรของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, $\forall_s$ (liters)	273 *
ความสูงของ ($h_2 - h_1$) และ ($h_3 - h_4$) ในรูปที่ 4 (m)	0.10 *
ความสูงของ ($h_3 - h_2$) และ ($h_4 - h_1$) ในรูปที่ 4 (m)	0.46 *

* ได้จากการวัด

** ได้จากบริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 5 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนของโปรแกรมคำนวณ

4. การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์รวมของการไหล, K_f

4.1 กระบวนการคำนวณ

สัมประสิทธิ์รวมของการไหล K_f ที่ปรากฏในสมการที่ 14 นั้นมีความจำเป็นที่ต้องกำหนดค่าขึ้นมาเพื่อใช้ในการคาดเดาหาอัตราการไหลของน้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) ได้ถูกใช้ในการกำหนดค่า K_f โดยเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง ค่า K_f จำนวนมากมายได้รับมาจากการคำนวณและค่าเหล่านั้นถูกใช้ป้อนกลับเข้าไปใหม่เพื่อการคำนวณครั้งต่อๆ ไป ในแต่ละค่าของ K_f โปรแกรมจะทำการคำนวณคาดเดาค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน ณ ช่วงเวลาใดๆ จากนั้นค่าอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการคำนวณก็จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงนี้ก็จะถูกนำมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการคาดเดา (Standard errors of estimate, SEE) ของ T_{sm} ซึ่งจะคำนวณจาก

$$\text{SEE} = \left| \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(T^t_{sm,cal_i} - T^t_{sm,\exp_i})^2}}{n-1} \right| \qquad (14)$$

โดยที่ $T^t_{sm,cal}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลา *t*, $T^t_{sm,\exp}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการทดลองจริงที่เวลา *t* และ n คือจำนวนของข้อมูล

สุดท้ายค่า K_f ที่มีค่า SEE ที่น้อยที่สุดถูกเลือกนำมาใช้เป็นค่าคงที่ในสมการอัตราการไหลภายใต้เงื่อนไขเดียวกับการทดลองจริง

น้ำในร่องทำน้ำร้อนจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตลอดช่วงเวลาการทำความร้อนและถ้าไม่มีวาล์วกันกลับ น้ำในร่องทำน้ำร้อนก็จะไหลย้อนกลับลงไปในถังสะสมน้ำร้อนในช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงที่มีการทำความร้อนไม่เพียงพอทำให้น้ำร้อนในถังสะสมไหลออกจากถังสะสมน้ำร้อนทางด้านบนมาสู่ร่องทำน้ำร้อนและสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นค่าของ K_f ในช่วงการทำความร้อนจะมีความแตกต่างกันกับค่าของ K_f ในช่วงการสูญเสียความร้อนเนื่องจากความเสียดทานการไหลที่ต่างกันในทิศทางการไหลตรงข้ามกัน ดังนั้น K_f จะถูกพิจารณาเป็นสองกรณีสำหรับชุดข้อมูลของการทดลองจริงสองชุดข้อมูลคือ K_f สำหรับช่วงการทำความร้อนและ K_f สำหรับช่วงการสูญเสียความร้อน สำหรับช่วงการทำความร้อน K_f ถูกกำหนดภายใต้วันของการทดลองที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูง (ประมาณ 20 MJ/m^2)

ค่าของ K_f สำหรับช่วงการทำความร้อนถูกกำหนดขึ้นโดยใช้ข้อมูลการทดลองจริงที่มีค่าของความดันการไหล H_T, ที่คำนวณโดยสมการที่ 12, มีค่าเป็นบวก ส่วนค่าของ K_f สำหรับช่วงการสูญเสียความร้อนก็จะถูกกำหนดจากค่าของความดันการไหล H_T มีค่าเป็นลบ และเนื่องจากข้อมูลการทดลองจริงมีการเก็บอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงรุ่งเช้าของวันใหม่ ในการกำหนดค่า K_f นั้นก็จะได้ค่า K_f สำหรับช่วงการทำความร้อนในช่วงกลางวันก่อน จากนั้นก็จะใช้ค่า K_f ที่

ดีที่สุดไปเป็นส่วนหนึ่งของการกำหนดค่า K_r สำหรับช่วงการสูญเสียความร้อน

4.2 ผลการคำนวณและวิจารณ์

กรณีของการศึกษาเพื่อกำหนดค่า K_r สามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1: วาล์วกันกลับถูกบังคับเปิดตลอดช่วงการทดลอง ซึ่งหมายถึงจะมีการไหลย้อนกลับของน้ำในระบบในช่วงการสูญเสียความร้อน

กรณีที่ 2: วาล์วกันกลับถูกปล่อยให้มีการทำงานอย่างอิสระตลอดช่วงการทดลอง ซึ่งคาดว่าการเปิด-ปิดวาล์วจะขึ้นอยู่กับความดันแตกต่างของทางน้ำ 123 และ 143 ตามรูปที่ 3

กรณีที่ 3: วาล์วกันกลับถูกปล่อยให้มีการทำงานอย่างอิสระในช่วงการทำความร้อนแต่ถูกบังคับปิดในช่วงการสูญเสียความร้อน ซึ่งหมายความว่าจะไม่มีการไหลย้อนกลับของน้ำในระบบในช่วงของการสูญเสียความร้อน

สำหรับค่า K_r ที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธีการข้างต้นของทั้งช่วงการทำความร้อนและช่วงการสูญเสียความร้อนสำหรับทุกการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และตัวอย่างของการนำ K_r ที่ได้ มาทำแบบจำลองเพื่อคาดเดาอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, $T_{sm,cal}$ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการทดลองจริง, $T_{sm,exp}$, ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6, 7 และ 8

ในตารางที่ 2 พบว่า K_r สำหรับช่วงการทำความร้อนของกรณีที่ 1 มีค่าสูงกว่าค่า K_r ของกรณีที่ 2 และ 3 จากที่ K_r มีความสัมพันธ์ตรงกับอัตราการไหลเวียนของน้ำในระบบ นั่นหมายความว่าอัตราการไหลเวียนของน้ำในกรณีที่ 1 มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของอีกสองกรณีที่เหลือ ดังนั้นสามารถจะอธิบายได้ว่ากรณีที่ 1 ที่วาล์วถูกบังคับเปิดตลอดช่วงเวลาการทดลอง ความต้านทานการไหลเวียนของน้ำจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองกรณี สำหรับกรณีที่ 3 ซึ่งวาล์วถูกบังคับปิดในช่วงเวลาการสูญเสียความร้อน ค่าของ K_r ที่ได้ควรจะมีค่าเป็นศูนย์แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ก็มีค่าน้อยมากๆ ซึ่งความผิดพลาดเล็กน้อยนี้อาจจะเกิดจากข้อผิดพลาดของการวัดในการทดลอง และที่น่าพิจารณาของกรณีที่ 2 ที่ค่า K_r สำหรับช่วงการสูญเสียความร้อนมีค่าน้อย นั่นก็คือการติดตั้งวาล์วกันกลับสามารถหยุดการไหลย้อนกลับของน้ำในช่วงเวลาการสูญเสียความร้อนได้

5. สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองจริงกับระบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS ที่สร้างขึ้น และได้ทำการคาดเดาอุณหภูมิน้ำในถังสะสมน้ำร้อนด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่สร้างจากสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งสัมพันธ์กับแบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แล้วนำผลการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคาดเดาด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรมมาเปรียบเทียบ เพื่อนำมากำหนดค่าสัมประสิทธิ์รวมของการไหล, K_r ของการไหลเวียนน้ำตามธรรมชาติในระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS

จากผลการทดลองของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ BIS หลายๆการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทำงานของวาล์วกันกลับที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ค่าของ K_r สำหรับกรณีการทำงานของวาล์วกันกลับในแต่ละกรณี และค่า K_r ที่ได้ก็มีความเป็นไปได้เหมาะสมกับเหตุและผล กล่าวคือค่า K_r มีค่ามากจะหาได้จากกรณีที่อัตราการไหลมีค่ามาก ซึ่งจะพบในกรณีที่วาล์วกันกลับถูกบังคับเปิดตลอดช่วงการทดลอง ตัวอย่างของการนำ K_r ที่ได้ มาทำแบบจำลองเพื่อคาดเดาอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน, $T_{sm,cal}$ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการทดลองจริง, $T_{sm,exp}$, ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6, 7 และ 8 ดังนั้นสัมประสิทธิ์รวมของการไหล K_r สามารถที่จะถูกใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอันหนึ่งของแบบจำลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดลองนี้ได้

กติกรรมประกาศ

คณะผู้แต่งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมและสำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติเดิม) สำหรับการสนับสนุนเงินทุนส่วนหนึ่งในการสร้างแบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแผงรับแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ทดลองเป็นข้อมูลเปรียบเทียบในการศึกษาวิจัยของบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A.A. Mohamad (1997), Integrated solar collector-storage tank system with thermal diode. Solar Energy 61, 211-218.

[2] A. Bar-Cohen and W.M. Rohsenow (1984), Thermal optimum spacing of vertical, natural convection cooled parallel plates. Transaction of the ASME: Journal of Heat Transfer 106, 116-123

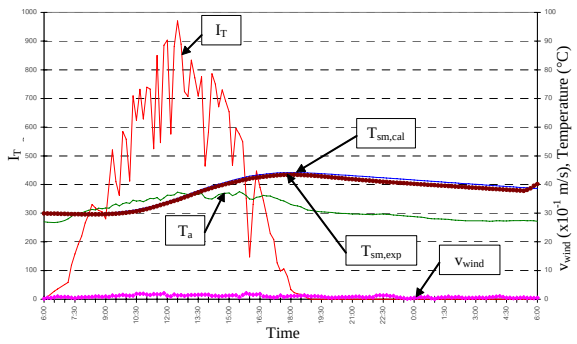
[3] G.Y. Saunier, Ph. Bouix, Supachart Chungpaibulpatana, and Thada Vitagsabootr (1985), A test procedure for thermosyphon solar water heaters. Solar Thermal Component and System Testing: Proceedings of the Fourth Asian School on Solar Energy Harnessing 12-20 December 1985 at AIT, Bangkok, 163-177

[4] P. Jansa, S. Chungpaibulpatana, and B. Limmeechokchai (2003), Development of a built-in-storage solar water heater for remote areas. Proceedings of the 2nd Regional conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, The Joint Graduate School of Energy and Environment on 12-14 February 2003 at Phuket, Thailand, 422-428

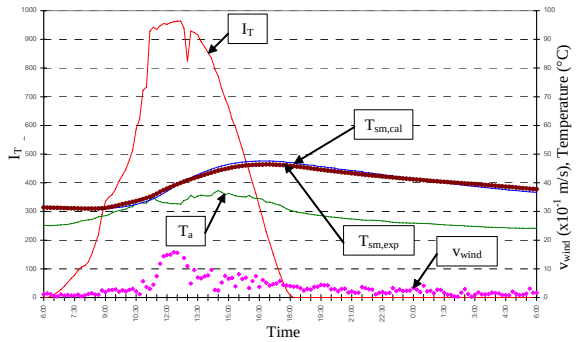
[5] John A. Duffie and William A. Beckman (1980), Solar Engineering of Thermal Processes (First Edition). John Wiley & Sons, Inc.

[6] John A. Duffie and William A. Beckman (1991),Solar Engineering of Thermal Processes (Second Edition). John Wiley & Sons, Inc.

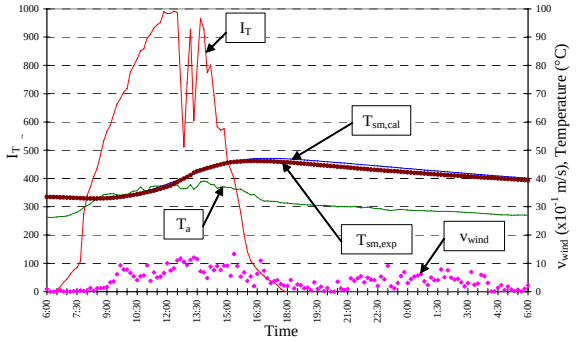
[7] J. P. Holman (1997), Heat Transfer. McGraw-Hill, Inc.



รูปที่ 6 แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของวันที่ 12 กรกฎาคม 2545



รูปที่ 7 แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของวันที่ 9 ตุลาคม 2545



รูปที่ 8 แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของวันที่ 15 พฤศจิกายน 2545

ตารางที่ 2 แสดงค่าที่ดีที่สุดของ K_f ที่ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ต่างกันของวาล์วกันกลับ

เงื่อนไขการทำงานของวาล์วกันกลับ	วันที่ทดลอง	I_T (MJ/m^2)	ช่วงการทำความร้อน		ช่วงการสูญเสียความร้อน	
			K_f (kg.s^{-1}.(mK)$^{-1/2}$)	SEE (°C)	K_f (kg.s^{-1}.(mK)$^{-1/2}$)	SEE (°C)
กรณีที่ 1: วาล์วกันกลับถูกบังคับเปิดตลอดช่วงการทดลอง	17/7/2545	12.3	0.00150	0.03	-0.00250	0.06
	5/10/2545	15.8	0.00250	0.14	-0.01600	0.07
	9/10/2545	20.7	0.00150	0.18	-0.01550	0.10
กรณีที่ 2: วาล์วกันกลับถูกปล่อยให้มีการทำงานอย่างอิสระตลอดช่วงการทดลอง	3/10/2545	20.7	0.00095	0.11	-0.00105	0.04
	11/10/2545	25.2	0.00090	0.22	-0.00090	0.09
	15/11/2545	20.7	0.00045	0.07	-0.00020	0.02
กรณีที่ 3: วาล์วกันกลับถูกปล่อยให้มีการทำงานอย่างอิสระในช่วงการทำความร้อนแต่ถูกบังคับปิดในช่วงการสูญเสียความร้อน	12/7/2545	19.7	0.00060	0.08	-0.00025	0.15
	14/7/2545	18.5	0.00060	0.02	-0.00075	0.03