

บรรณานุกรม

- ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ. *การออกแบบและทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน*. วิทยานิพนธ์, เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2541.
- ประดิษฐ์ เทอดกุล. *ท่อความร้อน*. เชียงใหม่ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2536.
- เปรมิกา นพนาถิพงษ์, วิวัฒน์ มงคลสุวรรณค์ และ วิสิทธิ์ เล็กงามเอก “*ท่อความร้อนสำหรับทำเยนแผลงเซลแสงอาทิตย์*.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่, 2539.
- พลเดช ทองขุนคำ. *การออกแบบสร้างและทดสอบฮีโคโนไมเซอร์แบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป*. วิทยานิพนธ์, เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2543.
- พัฒนพงศ์ ชันทา. *เครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนและการประยุกต์ใช้งานในการอบแห้งยิปซัม*. วิทยานิพนธ์, เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2542.
- วิจิตร วุฒิจำนงค์. *การออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป*. วิทยานิพนธ์, เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2542.
- วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล. *เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบที่เป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงานสำหรับเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน*. ดุษฎีนิพนธ์, เชียงใหม่ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2547.
- สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว “*เทคโนโลยีเซลแสงอาทิตย์*” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- Akachi, H., Polasek, F. and Stulc, P., *Pulsating Heat Pipe*. Procs. of the 5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne Australia., 1996.
- AkiraUsami, ShiroSeki, YuichiMita, HiromuKobayashi, HajimeMiyashiro and NobuyukiTerada, *Temperature dependence of open-circuit voltage in dye-sensitized solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol 93 (2009) pp. 840–842

- C. Tien, K. Chung, *Entrainment limits in heat pipes*, in: Proceedings of 3rd International Heat Pipe Conference, Palo Alto (CA), 1978, pp. 36–40.
- Charoensawan, P., Terdtoon, P., Tantakom, P. and Ingsuwan, P., *Effect of Evaporator Section Lengths, Number of Turns and Working Fluid on Internal Flow Patterns of a Vertical Closed-Loop Oscillating Heat Pipe*. Procs. of the 7th International Heat Pipe Symposium. Jeju Korea., 2003., pp 360-367.
- Charoensawan, P., Terdtoon, P., Tantakom, P., Ingsuwan, P. and Groll, M., *Effect of Inclination Angle, Filling Ratios and Total Lengths on Heat Transfer Characteristics of a Closed-Loop Oscillating Heat Pipe*. Procs. of the 6th International Heat Pipe Symposium. Chiang Mai Thailand., 2000., pp 422-430.
- Dunn, P. and Reay, D.A., *Heat Pipes*. 3rd Edition., Pergamon Press. Oxford England., 1982.
- Engineering Sciences Data Item Nember 81038. *Heat Pipe-performance of Two-phase Closed Thermosyphons*. London : Engineering Sciences Data Unit, 1981.
- Incropera Dewitt Bergmann Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*; Wiley Asia Student Sixth Edition
- Kammuang-lue, N., Sakulchangsajatai, P., Waowaew, T. and Terdtoon, P., *Effect of Working Fluid Types on Thermal Effectiveness of Closed-Loop Pulsating Heat Pipe on Ice Storage System*. 8th International Heat Pipe Symposium. Kumamoto Japan., 2006.
- Lin, L., Ponnappan, R. and Leland, J., *Experimental Investigation of Oscillating Heat Pipe*. 35th Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. Vol. 2 ., 2000.
- M. Berginc, U. Opara Krašovec, M. Hočevár, M. Topič, *Performance of dye-sensitized solar cells based on Ionic liquids: Effect of temperature and iodine concentration*, Thin Solid Films Vol. 516 (2008) pp. 7155–7159
- M. Groll, S. Khandekar, *Pulsating heat pipes: progress and prospects*, Proceedings of 3rd International oscillation in oscillating thermosyphon, Heat Pipe Technology (Proceedings of 5th International Heat Pipe network, in: Proceedings of 12th International Heat Pipe Conference, Moscow, 2002, pp. 215–219.

- M.A. Mosalam Shaltout, M.M. El-Nicklawy, A.F. Hassan, U.A. Rahoma and M. Sabry, *The temperature dependence of the spectral and efficiency behavior of Si solar cell under low concentrated solar radiation*, Renewable Energy Vol 21 (2000) pp. 445-458
- Maezawa, S., Gi, K.Y., Minamisawa, A. and Akachi, H., *Thermal Performance of Capillary Tube Thermosyphon*. Procs. of the IX International Heat Pipe Conference. Albuquerque USA. Vol. II., 1995.
- Maezawa, S., *Heat Pipe: Its Origin, Development and Present Situation*. Procs. of the 6th International Heat Pipe Symposium. Chiang Mai Thailand., 2000., pp 1-13.
- Marian Florescu, Hwang Lee, Irina Puscasu, Martin Pralle, Lucia Florescu, David Z. Ting and Jonathan P. Dowling, *Improving solar cell efficiency using photonic band-gap materials*, Solar Energy Materials & Solar Cells Vol.91 (2007) pp. 1599–1610
- Masaki Shima, Masao Isomura, Ken-ichiro Wakisaka, Kenji Murata, Makoto Tanaka, *The influence of operation temperature on the output properties of amorphous silicon-related solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 85, Issue 2, 2005, pp. 167-175.
- Meena, P., Rittidech, S. and Poomsa-ad, N., *Closed-loop oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CVs) air-preheater for reducing relative humidity in drying systems*. Applied Energy. Vol. 84., 2007., pp 363-373.
- P. Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, P. Terdtoon, *Closed loop pulsating heat pipes-Part A: Parametric experimental investigations*, Applied Thermal Engineering, Elsevier Science, ISSN 1359-4311, in press, 2003.
- Rittidech, S., Terdtoon, P., Murakami, M., Kamonpet, P. and Jompakdee, W., *Effect of Evaporator Section Lengths, Number of Turns and Working Fluid on Internal Flow Patterns of an Closed-End Oscillating Heat at Normal Operating Condition*. Procs. of the 7th International Heat Pipe Symposium. Jeju Korea., 2003., pp 337-342.
- Rittidech, S., Terdtoon, P., Murakami, M., Tantakom, P. and Jompakdee, W., *Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition*. Applied Thermal Engineering. Vol. 23., 2003., pp 497-510.

- S. Khandekar, M. Schneider, M. Groll, *Mathematical modeling of pulsating heat pipes: state of the art and future challenges*, in: Proceedings of 5th ASME/ISHMT Joint International Heat and Mass Transfer Conference
- Shirashi, M., Kikuchi, K. and Yamanishi, T. *Investigation of heat transfer characteristics of a Two-Phase closed thermosyphon*, Proc. 4th Int heat Pipe Conference, London: 1981., pp 95-104.
- Soylomez, MS. *On the optimum heat exchanger sizing for heat recovery*. Energy Manage; 2000., pp 1419-1427.
- Soylomez, MS. *On the thermoeconomical optimization of heat pipe heat exchanger HPHE for wasteheat recovery*. Energy Manage; 44: 2003., pp 2509-2517.
- Soylomez, MS. *On the thermoeconomical optimization of single stage refrigeration systems*. Energy and Buildings; 36 : 2004., pp 965-968.,
- W. Rohsenow, *A method for correlating heat transfer data for surface boiling of liquids*, Trans. ASME, J. Heat Transfer 74 (1952) 969–976.

ภาคผนวก ก
แสดงตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนทั้งหมดที่ต้องการถ่ายเทออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ความร้อนที่ต้องกำจัดเพื่อให้อุณหภูมิของแผงลดลงจาก 60 °C เป็น 25 °C

$$C_{p_{\text{Silicon}}} = 712 \text{ J/Kg-K}$$

$$T_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$m = 0.5 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } Q &= mC_p(T_2 - T_1) \\ &= 0.5 \times 712 \times (60 - 25) \\ &= 12,460 \text{ J} \end{aligned}$$

ต้องการกำจัดค่าความร้อน 12,460 J ภายใน 20 วินาที

$$= \frac{12,460}{20} = 623 \text{ W}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน

ใช้ข้อมูลของวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2554 เมื่อเวลา 12:00 นาฬิกา

$$T_{\text{ambient}} = 34.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ได้แผง}} = 52.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$U = 0.2 \text{ m/s}$$

$$A_{\text{แผง}} = 1 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{film}} = \frac{(T_{\text{ได้แผง}} + T_{\text{ambient}})}{2} = \frac{(52.3 + 34.6)}{2} = 43.45 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ หรือ } 316.6 \text{ K}$$

จากคุณสมบัติ Element of Heat Transfer จะได้

$$V = 17.55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 27.53 \times 10^{-3} \text{ W/(m-K)}$$

$$\alpha = 23 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0.706$$

$$\text{จาก } \text{Re} = \frac{U \times x}{\nu} = \frac{(0.2 \times 0.49)}{17.55 \times 10^{-6}} = 5,584 \text{ ตรวจสอบว่าเป็นการพาแบบบังคับหรือแบบธรรมชาติ จาก}$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cos 15^{\circ} \beta \Delta T X^3}{\nu^2} = \frac{9.81 \times \cos 15^{\circ} (1/316.45) \times (52.3 - 34.6) \times 0.49^3}{(17.55 \times 10^{-6})^2}$$

$$\text{Gr} = 202448680.4$$

$$\text{Gr/Re}^2 = 6.49$$

ถ้า $Gr/Re^2 \gg 1$ พิจารณาเป็น Free Convection

ถ้า $Gr/Re^2 \ll 1$ พิจารณาเป็น Force Convection

ดังนั้น $Gr/Re^2 = 6.49$ เป็น Free convection

จากสูตร Incline Plate ที่ Hot Surface Facing downward

$$\begin{aligned} Nu &= 0.54 (Gr \times Pr \times \cos 15^\circ)^{0.25} \\ &= 0.54 \times (209590269.6 \times 0.706 \times \cos 15^\circ)^{0.25} \\ &= 59.04 \end{aligned}$$

$$h = \frac{Nu \times k}{X} = \frac{(59.04 \times 27.53 \times 10^{-3})}{0.49} = 3.31 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q &= hA(T_{\text{ผิว}} - T_{\text{ambient}}) \\ &= 3.31 \times 1 \times (52.3 - 34.6) \\ &= 58.58 \text{ W} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน กรณีให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร้อน

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 45 °C จะได้ $V = 17.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr=0.70448$, $k= 27.632 \times 10^{-3} \text{ W/m-k}$

$$V= 0.2 \text{ m/s}$$

$$\text{อุณหภูมิได้แสง} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{อุณหภูมิฟิล์ม} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ หรือ } 318 \text{ K}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จาก

$$Re_D = \frac{U \times D}{\nu} = \frac{0.2 \times 0.0286}{17.7 \times 10^{-6}} = 323.1$$

$$Gr = \frac{g \cos 15^{\circ} \beta \Delta T D^3}{\nu^2} = \frac{9.81 \times \cos 15^{\circ} \times (3.14 \times 10^{-3}) \times (60 - 30) \times 0.0286^3}{(17.7 \times 10^{-6})^2} = 66,652$$

$$Gr/Re^2 = 66,652 / (323.1^2) = 0.638 \text{ เป็น Force Convection}$$

$$\begin{aligned} Nu_D &= 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{(1 + (\frac{0.4}{Pr})^{2/3})^{1/4}} (1 + (\frac{Re_D}{282,000})^{5/8})^{4/5} \\ &= 0.3 + \frac{0.62 \times 323.1^{1/2} \times 0.704^{1/3}}{(1 + (\frac{0.4}{0.704})^{2/3})^{1/4}} (1 + (\frac{323.1}{282,000})^{5/8})^{4/5} \\ &= 5.5 \end{aligned}$$

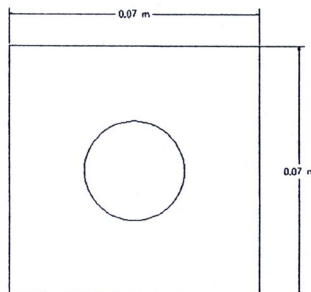
$$h = \frac{5.5 \times 27.632 \times 10^{-3}}{0.0286} = 5.36 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

การคำนวณครีความร้อน

ความหนาของครี 0.001 m

ความยาวครี = 0.07 m

ความกว้างครี = 0.07 m



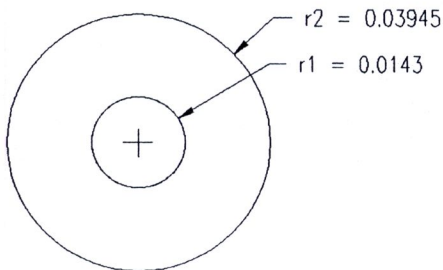
เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของครีแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีพื้นที่หน้าตัดแบบวงกลมเพื่อง่ายต่อการคำนวณ

$$\frac{\pi D^2}{4} = \text{กว้าง} \times \text{ยาว}$$

$$D = \frac{\sqrt{4 \times \text{กว้าง} \times \text{ยาว}}}{\pi} = \frac{\sqrt{4 \times 0.07 \times 0.07}}{\pi} = 0.0789 \text{ m}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อทองแดง = 0.0286 m

ดังนั้นสามารถประมาณครีปได้ดังนี้



$$R_2 = 0.03945 \text{ m}$$

$$R_1 = 0.0143 \text{ m}$$

$$R_{2c} = R_2 - \frac{\text{Thickness}}{2} = 0.03945 - \frac{0.001}{2} = 0.03895 \text{ m}$$

$$L = R_2 - R_1 = 0.03945 - 0.0143 = 0.02515 \text{ m}$$

$$L_c = L + \frac{\text{Thickness}}{2} = 0.02515 + \frac{0.001}{2} = 0.02565 \text{ m}$$

$$A_p = L_c \times \text{Thickness} = 0.02565 \times 0.001 = 2.565 \times 10^{-5}$$

$$\frac{R_{2c}}{R_1} = \frac{0.03895}{0.0143} = 2.723$$

$$h = 5.36 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

$$K_{\text{aluminium}} = 285.4 \text{ W/(m.k)}$$

$$L_c^{3/2} (h/kAp)^{1/2} = 0.02565^{3/2} (5.36/285.4 \times 2.565 \times 10^{-5})^{1/2} = 0.111$$

สมมติประสิทธิภาพครีปความร้อน = 97 %

Overall Surface Efficiency

จำนวนครีป = 30 แผ่น

ระยะห่างระหว่างครีป = 0.01 m

$$A_b = \pi \times 0.0286 \times (0.40 - 0.001 \times 30) = 0.033 \text{ m}^2$$

$$A_r = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2) = 2 \times \pi \times (0.03895^2 - 0.0143^2) = 0.008247 \text{ m}^2$$

$$A_t = N \times A_r + 2\pi r_1 (H - N \times t) = 30 \times 0.008247 + 2\pi \times 0.0143 \times (0.4 - 30 \times 0.001) = 0.27$$

$$\eta_0 = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_r) = 1 - \frac{30 \times 0.00824}{0.27} \times (1 - 0.97) = 96 \%$$

ความยาวทั้งหมดของท่อทองแดง = 1.5 m

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก = 0.0286 m

ความหนาของท่อ = 0.001 m

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน = $0.0286 - 2 \times 0.001 = 0.0266$

ความยาวท่อส่วนทำระเหย = 1.1 m

ความยาวท่อส่วนควบแน่น = 0.4 m

$T_{\text{evaporator}} = 60^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{condenser}} = 26^{\circ}\text{C}$

$K_{\text{copper}} = 395 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$

$K_{\text{thermal Grease}} = 197.5 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$

สัดส่วนการเดินสารทำงาน 40% ของความยาวส่วนทำระเหย

$$A_{\text{Evaporator}} = \pi \times D \times L = \pi \times 0.0285 \times 1.1 = 0.0984$$

$$A_{\text{Condenser}} = A_i \times \eta_0 = 0.27 \times 0.96 = 0.2592$$

$$Z_1 = 0 \text{ K/W}$$

$$Z_9 = \frac{1}{h \times A_{\text{condenser}}} = \frac{1}{5.36 \times 0.2592} = 0.719 \text{ K/W}$$

$$Z_2 = \ln(D_o/D) / (2\pi l_c k_x) = \frac{\ln(\frac{0.0286}{0.0266})}{2 \times \pi \times 1.1 \times 395} = 2.66 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$Z_8 = \ln(D_o/D) / (2\pi l_c k_x) = \frac{\ln(\frac{0.0286}{0.0266})}{2 \times \pi \times 0.4 \times 395} = 7.33 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$Z_{(1+9+2+8)} = 0.719 + 2.66 \times 10^{-5} + 7.33 \times 10^{-5} = 0.719 \text{ K/W}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{Z_{(1+9+2+8)}} = \frac{(60-30)}{0.719} = 41.67 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} T_v &= T_{\text{si}} + \left[\frac{(z_7 + z_8 + z_9)}{z} \right] \Delta T \\ &= 25 + \frac{(0.59 + 7.33 \times 10^{-5})}{0.59} \times (60 - 25) \\ &= 60^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

อุณหภูมิ R-134a ที่ 60°C หาค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้ดังนี้

$$P_v = 1.68 \text{ MPa}$$

$$\rho_l = 1,053.7 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_v = 87.64 \text{ kg/m}^3$$

$$L = 426.86 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$\mu_l = 138.6 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$K_{R-134a} = 65.8 \times 10^{-3} \text{ W/(m-K)}$$

$$\sigma = 3.81 \times 10^{-3} \text{ W/(m-K)}$$

$$\beta = 15^\circ$$

$$C_{p,l} = 1663 \text{ J/Kg-k}$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{Lk^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{0.25} = \left(\frac{(426.1 \times 10^3) \times (65.8 \times 10^{-3})^3 \times 1053^2}{138.6 \times 10^{-6}} \right)^{0.25} = 992.7$$

$$\begin{aligned} \Phi_3 &= \frac{\rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} c_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left(\frac{P_v}{P_a} \right)^{0.23} \\ &= \frac{1053^{0.65} 0.0658^{0.3} 1663^{0.7}}{87.64^{0.25} 426860^{0.4} (138.6 \times 10^{-6})^{0.1}} \times \left(\frac{1680000}{101325} \right)^{0.23} = 62.11 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{3f} &= (CQ^{(1/3)}) / D^{4/3} g^{1/3} l_e \Phi_2^{4/3} \\ &= \frac{0.235 \times 165^{(\frac{1}{3})}}{0.0286^{(\frac{4}{3})} \times 9.81^{(\frac{1}{3})} \times 1.1 \times 992.7^{(\frac{4}{3})}} = 6.319 \times 10^{-3} \text{ K/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{3p} &= \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D l_e)^{0.6}} \\ &= \frac{1}{62.11 \times 9.81^{0.2} \times 165^{0.4} \times (\pi \times 0.0286 \times 1.1)^{0.6}} = 5.3 \times 10^{-3} \text{ K/W} \end{aligned}$$

$$Z_{3p} < Z_{3f}; Z_3 = Z_{3f}$$

$$Z_3 = 6.319 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$Z_7 = \frac{CQ^{1/3}}{D^{4/3} g^{1/3} l_c \Phi_2^{4/3}} = \frac{0.235 \times 165^{(1/3)}}{0.0286^{(4/3)} 9.81^{(1/3)} 0.4 \times 992.7^{(4/3)}} = 0.0173 \text{ K/W}$$

$$Z_{\text{total}} = 0.719 + 6.319 \times 10^{-3} + 0.0173 = 0.742 \text{ K/W}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} = \frac{(60-30)}{0.742} = 40.39 \text{ W}$$

ท่อเทอร์โมไซฟอนสามารถถ่ายเทความร้อนจากบริเวณใต้แผงไปยังส่วนควบแน่นได้ 40.39 W ต่อ 1 ท่อ ดังนั้นเมื่อติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 10 ท่อ จะสามารถระบายความร้อนได้ทั้งหมด 403.9 W

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนของท่อความร้อนแบบล้นวงรอบ กรณีให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร้อน

ค่าคุณสมบัติของสารตัวอย่าง หาได้จากตารางคุณสมบัติของสาร

อุณหภูมิส่วนทำระเหย 60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนควบแน่น 30 องศาเซลเซียส

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (D_i)	=	0.002 m
ความยาวส่วนทำระเหย (L_e)	=	0.30 m
ความยาวส่วนกันความร้อน (L_a)	=	0.00 m
ความยาวส่วนควบแน่น (L_c)	=	0.20 m
อุณหภูมิส่วนทำระเหย (T_e)	=	60 °C
อุณหภูมิส่วนควบแน่น (T_c)	=	30 °C
ผลต่างอุณหภูมิส่วนควบแน่นกับส่วนทำระเหย	=	30 °C
แฟงทำมุมกับแนวระดับเป็นมุม (β)	=	15 °
จำนวน โคง์เกลียวของท่อ (N)	=	10 โคง์เกลียว
ความหนาแน่นของสารทำงาน (ρ_{liq})	=	1,411.395 kg/m ³
ความดันของสารทำงานในส่วนควบแน่น (P_c)	=	109,583 N/m ²
ความดันของสารทำงานในส่วนระเหย (P_e)	=	285,899 N/m ²
ความหนืดจลน์ (μ_{liq})	=	3.33 x 10 ⁻⁴ Pa·s
ค่าความจุความร้อน (C_p)	=	1.0451 kJ/kg-K
ค่าการนำความร้อน (k_{liq})	=	7.10 x 10 ⁻⁵ kW/m-K
เอนทาลปีของเหลวอิ่มตัว (h_f)	=	84.56 kJ/kg
เอนทาลปีของไออิ่มตัว (h_g)	=	247.28 kJ/kg
ค่าความร้อนแฝง (h_{fg})	=	162.72 kJ/kg



หาค่า Karman number และค่าความยาวประสิทธิผล จาก

$$L_{eff} = 0.5 (L_e + L_c) + L_a$$

$$Ka_{liq} = \frac{1,411.395 \times 176,316 \times (0.002)^3}{(3.33 \times 10^{-4})^2 \times 0.25} = 71,582,382.24$$

หาค่า Prandtl number

$$Pr_{liq} = \frac{1.0451 \times 3.33 \times 10^{-4}}{7.10 \times 10^{-5}} = 4.90$$

จากค่าความร้อนแฝง ค่าความจุความร้อน และผลต่างของอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น
นำมาหาค่า Jakob number

$$Ja = \frac{162.72}{1.0451 \times 30} = 5.19$$

นำค่า ต่างๆ ที่คำนวณได้มาแทนค่าหาความร้อนได้

$$Q = \pi \times 0.002 \times 10 \times 2 \times 0.30 \times 0.54 (\exp(0.261))^{0.48} (71,582,382.24)^{0.47} 4.90^{0.27} 5.19^{1.43} 10^{-0.27} \\ = 986.79 \text{ W}$$

เนื่องจากท่อความร้อนในส่วนรับความร้อนสัมผัสแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพียงขอบท่อคิดเป็น 10%
ของเส้นรอบวงของท่อ และจากการติดตั้งท่อความร้อนไม่ได้สัมผัสแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด
สัมผัสเพียง 60% ของพื้นที่รับความร้อนของท่อความร้อนทั้งหมด ดังนั้น

$$Q = 98.68 \text{ W}$$

ดังนั้นเมื่อทำการติดตั้งทั้งหมด 6 ชุด จะสามารถระบายความร้อนได้ = 592 W

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลวันที่ 3 เมษายน 2554 การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดต่อเทอร์โมไซฟอน กำหนดให้ส่วน
ควมแน่นของท่อความร้อนอยู่บริเวณที่ร่ม และเพิ่มการฉีดละอองน้ำ
เลือกช่วงเวลา 10.00 นาฬิกา

ความเข้มแสง = 12.6 mV

พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ = 1 m²

กระแสไฟฟ้า = 5.69 A

ความต่างศักย์ไฟฟ้า = 20.05 V

จากข้อมูลค่าความเข้มแสง จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ค่าที่ได้ยังไม่สามารถนำมา
คำนวณได้เนื่องจากมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์ จึงต้องทำการแปลงข้อมูลก่อน โดยค่าคงที่ในการเปลี่ยน
17.73 (μV/W/m²) ทำได้ดังนี้

$$\text{ความเข้มแสงที่ใช้ในการคำนวณ} = \frac{12.6 \times 1000}{17.73} = 710.66 \text{ W/m}^2$$

สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จาก

$$\text{ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{I \times V}{G \times A} \times 100\%$$

เมื่อ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตออกมา

V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

G คือ ค่าความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์

A คือ พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\text{ดังนั้น ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{5.69 \times 20.05}{710.66 \times 1} \times 100$$

$$= 16.05\%$$

ภาคผนวก ง
ตัวอย่างการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

ตัวอย่างการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง.1 ราคาลงทุน กรณีทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดท่อความร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
เหล็ก	500
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	200
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น(TIC)	19,375

ตารางผนวกที่ ง.2 ราคาลงทุน กรณีทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซโฟน โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร่ม

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
ท่อทองแดง ขนาด 1 นิ้ว 1 ฟุต	2,500
อลูมิเนียม	900
เหล็ก	500
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	200
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น (TIC)	22,775

ตารางผนวกที่ ง.3 ราคาลงทุน กรณีทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอน โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร่ม และติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยระบายความร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
ท่อทองแดง ขนาด 1 นิ้ว 1 หุน	2,500
อลูมิเนียม	900
เหล็ก	500
พัดลม 2 ตัว	200
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	200
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น (TIC)	22,975

ตารางผนวกที่ ง.4 ราคาลงทุน กรณีทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอน โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร่มและติดตั้งหัวฉีดละอองน้ำ เพื่อช่วยระบายความร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
ท่อทองแดง ขนาด 1 นิ้ว 1 หุน	2,500
อลูมิเนียม	900
เหล็ก	500
ถังน้ำ 200 ลิตร	600
ปั้มน้ำ 0.5 แรงม้า	900
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	250
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น (TIC)	24,325

ตารางผนวกที่ ง.5 ราคาลงทุน กรณีทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
ท่อทองแดง ขนาด 2มิลลิเมตร	1,300
เหล็ก	500
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	200
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น (TIC)	20,675

ตารางผนวกที่ ง.6 ราคาลงทุน กรณีทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร้อน และติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยระบายความร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
ท่อทองแดง ขนาด 2 มิลลิเมตร	1,300
เหล็ก	500
พัดลม 6 ตัว	600
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	200
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น (TIC)	21,275

ตารางผนวกที่ ง.7 ราคาลงทุน กรณีทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นอยู่บริเวณที่ร่ม และติดตั้งหัวฉีดละอองน้ำเพื่อช่วยระบายความร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
เซลล์แสงอาทิตย์ 130 W	18,525
ท่อทองแดง ขนาด 2 มิลลิเมตร	1,300
เหล็ก	500
ถังน้ำ 200 ลิตร	600
ปั้มน้ำ 0.5 แรงม้า	900
อุปกรณ์ประกอบระบบอื่นๆ	350
ค่าแรงในการติดตั้ง	150
รวมเงินลงทุนเริ่มต้น (TIC)	22,325

วิธีการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น ประกอบด้วย 4 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเทียบเท่ารายปี การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน และการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนในการลงทุน

1. วิธีวิเคราะห์หาต้นทุนรายปี (Annual Cost Method)

$$AC = (TIC)(CRF) + OM - S(SFF)$$

โดยที่ $CRF = [i(1 + i)^n] / [(1 + i)^n - 1]$

$$SFF = i / [(1 + i)^n - 1]$$

เมื่อ AC = ค่าใช้จ่ายสุทธิตลอดปีของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ (บาท/ปี)

TIC = มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนทั้งหมด (บาท)

OM = ค่าดำเนินงานและบำรุงรักษารายปี (บาท/ปี)

S = มูลค่าซากของระบบ (บาท)

i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี

n = อายุการใช้งานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ปี)

CRF = Capital recovery factor

SFF = Sinking fund factor

ตารางผนวกที่ ง.8 รายการคำนวณหาค่าใช้จ่ายต้นทุนรายปี

		TIC	CRF	OM	S	SFF	AC (บาท/ปี)
ไม่ติดตั้งท่อความร้อน		19,375	0.09	194	1,940	0.015	1,903.39
ติดตั้ง ท่อเทอร์ โมไซฟอน	ที่ร่ม	22,775	0.09	228	2,280	0.015	2,237.41
	ที่ร่ม + พัดลม	22,975	0.09	229.75	2,297.50	0.015	2,257.05
	ที่ร่ม + ฉีดน้ำ	24,325	0.09	243.25	2,432.50	0.015	2,389.68
ติดตั้งท่อ ความร้อน ส่นวงรอบ	ที่ร่ม	20,675	0.09	206.75	2,067.50	0.015	2,031.10
	ที่ร่ม + พัดลม	21,275	0.09	212.75	2,127.50	0.015	2,090.05
	ที่ร่ม + ฉีดน้ำ	22,325	0.09	223.25	2,232.50	0.015	2,193.20

2. การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV)

$$NPV = (TIC) + (OM)(USPWF) - S(SPPWF)$$

โดยที่ $USPWF = [(1 + i)^n - 1] / [i(1 + i)^n]$

$$SPPWF = 1 / (1 + i)^n$$

เมื่อ USPWF = Uniform – series present worth factor

SPPWF = Single payment present worth factor

ตารางผนวกที่ ง.9 รายการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ

		TIC	USPWF	OM	S	SPPWF	NPV (บาท)
ไม่ติดตั้งท่อความร้อน		19,375	11.15	194	1,940	0.16	21,217.01
ติดตั้ง ท่อเทอร์ โมไซฟอน	ที่ร่ม	22,775	11.15	228	2,280	0.16	24,940.25
	ที่ร่ม + พัดลม	22,975	11.15	229	2,297	0.16	25,159.27
	ที่ร่ม + ฉีดยา	24,325	11.15	243	2,432	0.16	26,637.62
ติดตั้งท่อ ความร้อน ส่นวงรอบ	ที่ร่ม	20,675	11.15	206	2,067	0.16	22,640.60
	ที่ร่ม + พัดลม	21,275	11.15	212	2,127	0.16	23,298.00
	ที่ร่ม + ฉีดยา	22,325	11.15	223	2,232	0.16	24,447.47

3. ระยะเวลาคืนทุน (Simple Payback period, SPP)

$$\text{SPP} = \frac{\text{First Cost}}{\text{Cost Saving}}$$

- 3.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน 10 ชั่วโมงต่อวัน (ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 18:00 น.)
- 3.2 คิดเป็นพลังงานทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ Electric SWH ประสิทธิภาพ 80%
- 3.3 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ค่าไฟฟ้า 3 บาท/kW.h)
- 3.4 ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี จำนวนได้ดังนี้

เซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ให้พลังงานงานไฟฟ้า 130 w (468 kJ/hr) พลังงาน
งานไฟฟ้าสะสมที่ได้ตลอด 10 ชั่วโมงต่อวัน ได้พลังงาน = 4.68 MJ/วัน (474.5 Kwh/ปี)
พลังงานทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ Electric SWH ประสิทธิภาพ 80%
เท่ากับ 593.13 kW.h/ปี

ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ค่าไฟฟ้า 3 บาท/ kW.h) = 1,779.36 บาท/ปี

ตารางผนวกที่ ง.10 รายการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน

		TIC	OM	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงในแต่ละปี (บาท/ปี) (ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ – ค่าดำเนินการ)	SPP (ปี)
ไม่ติดตั้งท่อความร้อน		19,375	194.00	1,585	12.22
ติดตั้ง	ที่รุ่ม	22,775	228.00	1,552	14.68
ท่อเทอร์โมไซ	ที่รุ่ม + พัดลม	22,975	229.75	1,550	14.83
ฟอน	ที่รุ่ม + ฉีดน้ำ	24,325	243.25	1,536	15.84
ติดตั้งท่อความ	ที่รุ่ม	20,675	206.75	1,573	13.15
ร้อนแบบสั้น	ที่รุ่ม + พัดลม	21,275	212.75	1,567	13.58
วงรอบ	ที่รุ่ม + ฉีดน้ำ	22,325	223.25	1,556	14.35



4. อัตราผลตอบแทนการคืนทุน (Internal Rate of Return, IRR)

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{NCF_n}{(1+IRR)^n} - TIC = 0$$

เมื่อ NCF_n = กระแสเงินสดสุทธิของปีที่ n (บาท) ซึ่งในการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนในการลงทุนหมายถึงกระแสเงินสดที่ได้รับสุทธิในแต่ละปี ซึ่งได้แก่ ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงในแต่ละปี รวมกับมูลค่าซากที่แปลงมาเป็นรายปี

- NCF_n = ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงในแต่ละปี + $S(SFF)$
- IRR = อัตราผลตอบแทนในการลงทุน
- N = อายุการใช้งานของระบบพลังงานรังสีอาทิตย์ (ปี)

ตารางผนวกที่ ง.11 รายการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนการคืนทุน

		S	SFF	ค่าไฟฟ้าที่ ประหยัดได้จริง ในแต่ละปี (บาท/ปี)	NCF_n	TIC	$\frac{TIC}{NCF_n}$	IRR (%)
ไม่ติดตั้งท่อความร้อน		1,940	0.015	1,585.63	1,614.16	19,375	12.00	6.90
ติดตั้ง ท่อเทอร์โม ไซฟอน	ที่ร่ม	2,280	0.015	1,552	1,585.54	22,775	14.36	5.09
	ที่ร่ม + พัดลม	2,297.50	0.015	1,550	1,583.80	22,975	14.51	4.99
	ที่ร่ม + ฉีดยา	2,432.50	0.015	1,536	1,571.78	24,325	15.48	4.37
ติดตั้งท่อ ความร้อน สั้นวงรอบ	ที่ร่ม	2,067.50	0.015	1,573	1,603.41	20,675	12.89	6.17
	ที่ร่ม + พัดลม	2,127.50	0.015	1,567	1,598.30	21,275	13.31	5.85
	ที่ร่ม + ฉีดยา	2,232.50	0.015	1,556	1,588.84	22,325	14.05	5.30

