

PENGARUH VARIASI KETEBALAN PCM TERHADAP KINERJA PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI TERMOSIFON***The Effect of PCM Thickness to Thermosyphon Solar Water Heaters Performance*****A. Syahrinaldy Syahrudin****Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie****Corresponding Author: a.syahrinaldy@ith.ac.id****Abstract**

Solar water heater technology is increasingly in demand by the wider community, this has led to an increasing number of research related to solar water heaters. The working efficiency of a thermosyphon solar water heater with the integration of heat storage materials is presented in this study. Heat absorbing collectors with varying thicknesses of paraffin wax PCM as the heat storage material are modeled and then the performance calculated theoretically. The variations thickness of the heat storage material are 6 mm, 10 mm, and 15 mm, respectively. The theoretically calculation conducted based on experimental data collection with varying constant solar radiation. The results of this study show that the working efficiency of the heat absorbing collector with a PCM thickness of 15 mm is greater when compared to thicknesses of 10 mm and 6 mm or collectors without heat storage material with an average efficiency of 67.49%.

Keywords: PCM thickness variations, Performance efficiency, Solar water heater

Abstrak

Teknologi pemanas air tenaga matahari semakin banyak diminati masyarakat luas, hal ini membuat penelitian yang berkaitan dengan pemanas air tenaga matahari juga semakin banyak dilakukan. Efisiensi kerja pemanas air tenaga matahari thermosifon dengan pengintegrasian material penyimpanan panas dihadirkan pada penelitian ini. Kolektor penyerap panas dengan variasi ketebalan PCM lilin paraffin sebagai material penyimpanan panasnya dimodelkan kemudian dihitung efisiensinya secara teoritis. Variasi ketebalan material penyimpanan panas tersebut masing-masing 6 mm, 10 mm, dan 15 mm. Perhitungan secara teoritis dilakukan berdasarkan hasil pengambilan data secara eksperimental dengan radiasi matahari konstan. Hasil penelitian ini menunjukkan efisiensi kinerja pemanas air tenaga matahari dengan ketebalan PCM 15 mm lebih besar jika dibandingkan dengan ketebalan 10 mm dan 6 mm maupun pemanas air tenaga matahari tanpa PCM dengan efisiensi rata-rata sebesar 67,49%.

Kata Kunci: Efisiensi kinerja, Pemanas air tenaga matahari, Variasi ketebalan PCM

PENDAHULUAN

Pemanas air solar termal merupakan salah satu teknologi yang menggunakan energi panas sebagai sumber energinya. Saat ini penggunaan pemanas air solar termal semakin berkembang seiring perkembangan teknologi. Penelitian-penelitian terbaru mengenai pemanas air solar termal menunjukkan peningkatan efisiensi pemanas air dalam memanfaatkan energi termal matahari yang melimpah, berkelanjutan, dan ramah lingkungan (Naveenkumar et al., 2025). Dengan memanfaatkan perbedaan temperatur, teknologi pemanas air solar termal saat ini tidak lagi membutuhkan arus listrik untuk mengalirkan air panas ke penggunaanya.

Teknologi pemanas air solar termal ini dikenal dengan sebutan pemanas air *termosifon* (Syahrudin et al., 2021). Pemanfaatan pemanas air termosifon ini telah banyak diterapkan pada berbagai jenis bangunan, seperti bangunan komersial dan bangunan perumahan (Zaafouri et al., 2025). Begitu juga dengan efisiensi termal dan faktor kehilangan energinya telah diteliti dengan membandingkan kinerjanya pada kondisi langit cerah maupun berawan di Nigeria (Nunayon & Akanmu, 2022).

Faktor kehilangan energi dan kondisi cuaca yang tidak menentu membuat pengembangan teknologi pemanas air termosifon terus dilakukan. Dengan mengintegrasikan material penyimpan kalor sebagai penyimpanan energinya, berbagai penelitian telah dilakukan. Penelitian ini dilakukan dengan menghitung efisiensi pemanas air solar termal baik dengan material pengubah fase maupun tanpa material pengubah fase. Cara kerja, mulai dari pemasukan termal, kinerja, dan distribusi termalnya dihitung dan diamati antara kedua sistem kerjanya. Pada sistem operasi yang setimbang, pemanas air solar termal dengan material pengubah fase memiliki kinerja yang jauh lebih baik daripada tanpa material pengubah fase, efisiensi pemanas air solar termal dengan material pengubah fase lebih baik daripada tanpa material pengubah fase (Wu et al., 2018). Sehingga pemanas air solar termal dengan material pengubah fase lebih tepat dalam menerapkan penggunaan energi solar termal.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian mengenai pemanas air tenaga matahari dengan variasi ketebalan PCM dilakukan melalui pendekatan secara numerik. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan penjelasan mengenai kinerja pemanas air tenaga matahari dengan variasi ketebalan PCM.

Studi Pustaka

Pemanas air solar termal termosifon adalah perangkat yang memanfaatkan beda temperatur air untuk mengalirkan air panas hasil pemanasan dari solar termal ke penggunaannya. Solar radiasi diserap melalui kaca transparan dan pengumpul panas yang selanjutnya didistribusi ke air dalam pipa (Freegah, 2019). Perbedaan temperatur air masuk dan yang keluar membuat air dengan temperatur tinggi memiliki tekanan yang lebih besar sehingga akan memenuhi tanki penyimpanan, hal ini disebut termosifon. Pemanas air solar termal memiliki komponen utama diantaranya pelat pengumpul panas yang dilengkapi dengan lembaran metal tipis yang dicat hitam, pipa untuk mendistribusikan air, dan tanki penyimpanan.

Kaca sebagai penutup pemanas air solar termal berfungsi sebagai pelindung dari gangguan luar seperti debu dan kotoran yang menempel. Selain itu penutup ini juga berfungsi sebagai perangkap panas agar tidak bercampur dengan udara luar (Rosa & Sukma, 2008). Di sisi lain, kaca memiliki sifat transparan terhadap gelombang cahaya tampak dan ultraviolet, tetapi tidak transparan terhadap gelombang inframerah (efek rumah kaca), sehingga *losses* termal akibat radiasi dari permukaan pelat lebih minim (Samanci & Berber, 2011). Meskipun demikian masih terdapat *losses* termal ke permukaan luar karena efek konveksi dari udara yang terus bergerak di dalam ruang antara pelat dan kaca. Perbedaan antara koefisien *losses* termal dan temperatur kaca yakni lebih kecil 9% pada jarak normal antara pelat dan kaca, dan 14% lebih besar jika jarak antara pelat dan kaca lebih kecil. (Subiantoro & Ooi, 2013).

PCM atau material pengubah fase dapat dibedakan menjadi dua yakni, PCM non organik dan organik (Chaabane et al., 2013). PCM organik merupakan PCM dari golongan hidrokarbon, asam/ester atau garam, alkohol, freon, dan polimer. Keuntungan penggunaan PCM organik adalah sifat fisik dan kimia yang stabil dan

perilaku termal material yang baik. Kerugian penggunaan PCM ini adalah konduktifitas termal rendah, massa jenis rendah, titik lebur rendah, kelembapan tinggi, mudah terbakar, dan perubahan volume. PCM non organik merupakan campuran unsur metal pembentuk garam. Keuntungan penggunaan PCM non organik adalah penyimpanan energi yang tinggi, konduktifitas termal tinggi, dan tidak mudah terbakar. Kerugian penggunaan PCM ini adalah mudah menyebabkan pengkaratan, pemisahan unsur ketika terjadi perubahan fasa, dan penurunan suhu yang drastis. Sebagian besar PCM organik mudah terbakar di alam dan dapat dibedakan sebagai *paraffin* dan *non paraffin*.

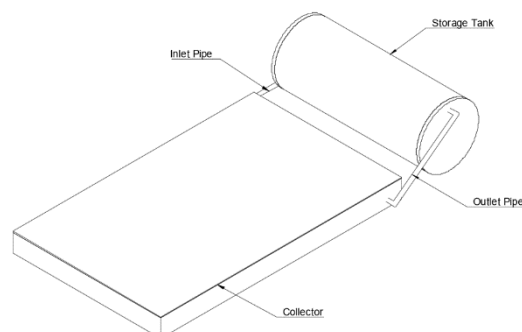
Pada penelitian ini, parafin digunakan karena biaya yang cukup rendah dan sifat kimianya yang dapat mencapai titik didih zat cair rendah. Paraffin adalah campuran senyawa hidrokarbon alkane $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$ dengan efek kristalisasi $\text{CH}_3\text{-}$ yang melepaskan sejumlah panas laten, sehingga titik leleh dan panas peleburan latennya meningkat seiring semakin panjangnya rantai. Kualifikasi paraffin sebagai material pengubah fase dengan panas peleburan laten yang besar juga disebabkan oleh rentang temperatur yang cukup besar.

Berdasarkan penjelasan di atas, bahwa pemilihan PCM yang tepat untuk penggunaan pemanas air solar termal merupakan metode yang sangat penting untuk dilakukan pada penelitian mengenai pemanas solar termal terkhusus untuk system termosifon. Pernyataan ini sinkron dengan hasil penelitian sebelumnya yaitu paraffin dan air diintegrasikan sebagai material penyimpanan termal yang dilakukan secara eksperimental pada pemanas air solar termal termosifon dimana penggunaan PCM digunakan sebagai media penukar kalor yang cukup efektif sehingga memberi dampak termal terhadap pemanas air solar termal (Nadjib, 2016).

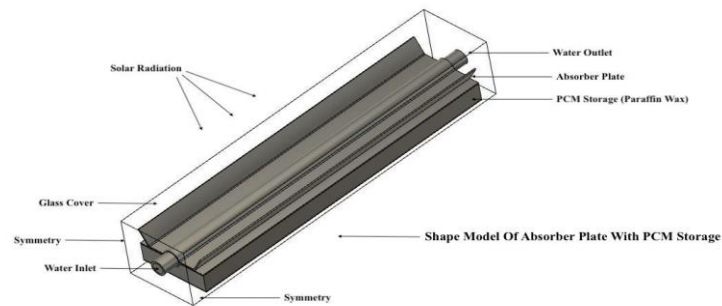
METODE

Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan pendekatan numerik untuk menguji unjuk kerja dari pemanas air tenaga matahari. Terdapat empat macam pemanas air tenaga matahari diuji kinerjanya, yakni pemanas air keluaran pabrik dan pemanas air dengan tiga variasi ketebalan PCM sebagai penyimpan energinya (ketebalan 6 mm, 10 mm, dan 15 mm).

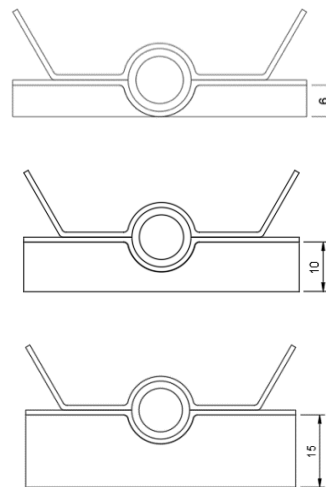
Secara sederhana, skema pemanas air tenaga matahari termosifon yang diuji beserta potongan detail, dan variasi ketebalan PCM nya dapat dilihat pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar 1. Skema pemanas air tenaga matahari termosifon



Gambar 2. Gambar detail pemanas air tenaga matahari thermosifon



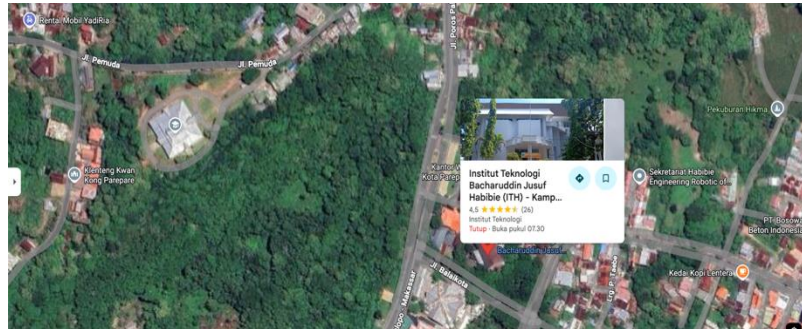
Gambar 3. Gambar detail variasi ketebalan PCM pada pemanas air tenaga matahari thermosifon

Pengambilan data dilakukan secara eksperimental untuk mendapatkan variabel masukan sebagai parameter dilakukannya perhitungan efisiensi secara numerik. Hasil perhitungan numerik akan menunjukkan efisiensi kinerja dari keempat macam pemanas air tenaga matahari yang diuji. Sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi rekomendasi untuk pengembangan teknologi pemanas air tenaga matahari yang lebih efektif, efisien dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi Penelitian

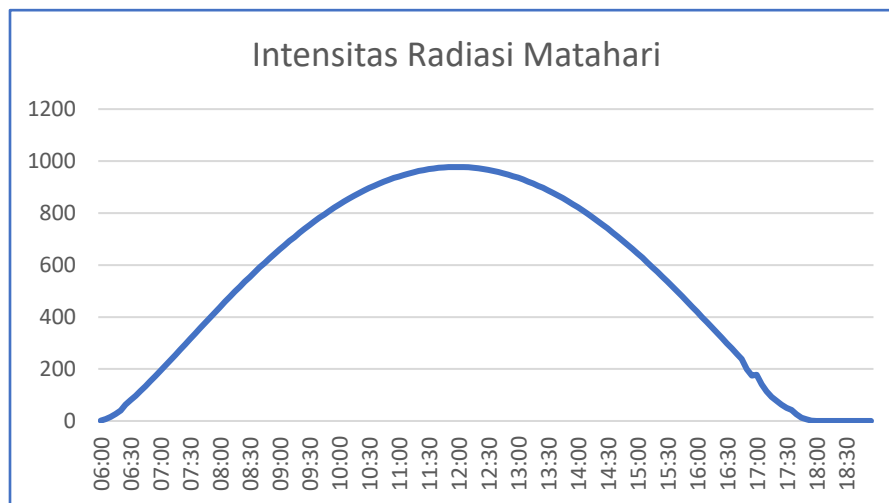
Penelitian ini baik pengambilan data, proses desain, analisis data, hingga evaluasi akhirnya dilaksanakan di Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie (ITH) yang terletak di Jl. Balaikota No.1 Kelurahan Bumi Harapan, Kecamatan Bacukiki Barat, Kota Parepare dengan titik koordinat *latitude* -4.0288263, *longitude* 119.6333246. Gambar 1 berikut merupakan hasil tangkapan layar dari titik lokasi penelitian ini dilaksanakan.



Gambar 4. Lokasi Penelitian

Intensitas Radiasi Matahari

Hasil pengujian eksperimental menunjukkan intensitas radiasi matahari yang terjadi di Kota Parepare berkisar antara $800 - 1000 \text{ W/m}^2$ pada siang hari sebagai puncak radiasi matahari dengan rentan waktu pukul 10.00 – 14.00. grafik intensitas radiasi matahari yang terjadi di Kota Parepare dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



Gambar 5. Grafik Intensitas Radiasi Matahari Kota Parepare

Efisiensi Pemanas Air Tenaga Matahari

Untuk menentukan efisiensi dilakukan perhitungan efisiensi secara teoritis berdasarkan data hasil pengukuran eksperimental. Adapun perhitungan secara teoritis menggunakan data pengukuran eksperimental yang dilakukan pada tanggal 29 juli 2025 jam 11.38 adalah sebagai berikut:

- Dimensi kolektor :
 - Panjang : 0,56 m
 - Lebar : 0,10525 m
 - Jarak *absorber* dengan kaca : 0,05 m
 - Luas Kolektor (A_c) : 0,0578 m^2
 - Sudut Kemiringan Kolektor (θ): 10°
 - Diameter Luar Pipa (D_o) : 0,012 m
 - Diameter Dalam Pipa (D_i) : 0,011 m
- Transmisivitas penutup (τ) : 0,87
- Absorbsivitas rata-rata pelat (α) : 0,975
- Sudut kemiringan kritis kolektor (θ_{cr}) : 25°

- Emisivitas pelat *absorber* (ϵ_p) : 0,95
- Emisivitas kaca (ϵ_c) : 0,88
- Data pengukuran diambil pada titik-titik pengukuran sebagai berikut :
 1. Intensitas matahari (I_T) : 1000 W/m²
 2. Temperatur Tangki : 46,5 °C
 3. Temperatur Air Masuk : 42,6 °C
 4. Temperatur Air Keluar : 54,6 °C
 5. Temperatur PCM : 54,6 °C
 6. Temperatur pelat *absorber* (T_p)
 - a. Datar : 75,1 °C
 - b. Pada Pelat Dilalui Pipa : 72,1 °C
 - c. Miring : 72,6 °C
 7. Temperatur kaca luar (T_{c-luar}) : 59,335 °C
 8. Temperatur kaca dalam ($T_{c-dalam}$) : 59,7 °C
 9. Temperatur udara luar (T_a) : 36 °C
 10. Kecepatan angin (V_w) : 0,3 m/s

Dari data tersebut diatas diperoleh:

- a. Perpindahan panas antara penutup dan udara luar
 1. Perpindahan panas konveksi paksa (penutup dengan udara luar)

$$T_f = \frac{T_{c-luar} + T_a}{2}$$

$$T_f = \frac{59,335 + 36}{2}$$

$$T_f = 47,67 \text{ °C}$$

Berdasarkan ($T_f = 47.67 \text{ °C}$) diperoleh dari lampiran 2:

$$k = 0,028 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000017915 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho = 1,0863 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Pr} = 0,704$$

$$\text{Re} = \frac{L}{\nu}$$

$$\text{Re} = 0,3 \frac{0,56}{0,000017915}$$

$$\text{Re} = 9377,61$$

Karena $\text{Re} \leq 5 \times 10^5$ maka alirannya laminar

$$\text{Nu} = 0,332 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$$

$$\text{Nu} = 0,332. 9377,61^{1/2}. 0,704^{1/3}$$

$$\text{Nu} = 28,6$$

$$h_w = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L}$$

$$h_w = \frac{28,6 \times 0,028}{0,56}$$

$$h_w = 1,4198 \text{ W/m}^2\text{K}$$

2. Perpindahan panas radiasi (penutup dengan udara luar)

$$T_{sky} = 0,05552 \cdot T_a^{1,5}$$

$$T_{sky} = 0,05552 \cdot 36^{1,5}$$

$$T_{sky} = 11,99232 \text{ °C}$$

$$h_{r_{c-a}} = \frac{\sigma \cdot \epsilon_c \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4)}{(T_c - T_a)}$$

$$h_{r_{c-a}} = \frac{5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,88 \cdot ((59,335 + 273)^4 - (11,99232 + 273)^4)}{(59,335 + 273) - (36 + 273)}$$

$$h_{r_{c-a}} = 11,976 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r_{c-a}}}$$

$$R_1 = \frac{1}{1,4198 + 11,976}$$

$$R_1 = 0,0747 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

b. Perpindahan panas antara pelat absorber dan penutup

1. Perpindahan panas konveksi bebas (pelat absorber dengan penutup)

$$T_f = \frac{T_p + T_{C-dalam}}{2}$$

$$T_f = \frac{73,26 + 59,7}{2}$$

$$T_f = 66,48^\circ\text{C}$$

Berdasarkan ($T_f = 66.48^\circ\text{C}$) diperoleh dari lampiran 2:

$$k = 0,029 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 1,96 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha = 2,56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,702$$

$$\beta = 0,00296853 \text{ K}^{-1}$$

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot Pr}{\nu^2}$$

$$Ra_L = \frac{9,8 \times 0,00296853 \cdot ((73,26 + 273) - (59,7 + 273)) \cdot 0,56^3 \times 0,702}{1,96E - 05^2}$$

$$Ra_L = 2,489 \times 10^8$$

$$Nu = Nu_{\theta=0^\circ} \left(\frac{Nu_{\theta=90^\circ}}{Nu_{\theta=0^\circ}} \right)^{\theta/\theta_{cr}} (\sin \theta_{cr})^{\theta/4\theta_{cr}}$$

$$Nu_{\theta=90^\circ} = 0,18 \left(\frac{Pr}{0,2Pr} Ra_L \right)^{0,29}$$

$$Nu_{\theta=90^\circ} = 0,18 \left(\frac{0,702}{0,2 \cdot 0,702} 2,489 \times 10^8 \right)^{0,29}$$

$$Nu_{\theta=90^\circ} = 45,555$$

$$Nu_{\theta=0^\circ} = 0,069 Ra_L^{1/3} Pr^{0,074}$$

$$Nu_{\theta=0^\circ} = 0,069 (2,489 \times 10^8)^{1/3} (0,702)^{0,074}$$

$$Nu_{\theta=0^\circ} = 78,24$$

$$Nu = Nu_{\theta=0^\circ} \left(\frac{Nu_{\theta=90^\circ}}{Nu_{\theta=0^\circ}} \right)^{\theta/\theta_{cr}} (\sin \theta_{cr})^{\theta/4\theta_{cr}}$$

$$Nu = 78,24 \left(\frac{45,555}{78,24} \right)^{10/25} (\sin 25)^{10/100}$$

$$Nu = 57,8188$$

$$h_{c_{p-c}} = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

$$h_{c_{p-c}} = \frac{57,8188 \times 0,029}{0,56}$$

$$h_{cp-c} = 2,9942 \text{ W/m}^2\text{K}$$

2. Perpindahan panas radiasi (pelat *absorber* dengan penutup)

$$h_{rp-c} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1}$$

$$h_{rp-c} = \frac{5,67 \times 10^{-8} ((346,26)^2 + (332,7)^2)(346,26 + 332,7)}{\frac{1}{0,95} + \frac{1}{0,88} - 1}$$

$$h_{rp-c} = 7,472 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{cp-c} + h_{rp-c}}$$

$$R_2 = \frac{1}{2,9942 + 7,472}$$

$$R_2 = 0,0955 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

- c. Perpindahan panas antara pelat *absorber* dan fluida

Perpindahan panas konveksi bebas (pelat *absorber* dengan fluida) :

$$T_{fin} = 42,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{fout} = 54,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_{pp} + T_{fm}}{2}$$

$$T_f = \frac{72,1 + 48,6}{2}$$

$$T_f = 60,35 \text{ }^\circ\text{C}$$

Berdasarkan ($T_f = 60,35 \text{ }^\circ\text{C}$) diperoleh

$$k = 0,654 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 4,749 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 2,99$$

$$\beta = 0,517 \times 10^{-3}$$

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot Pr}{\nu^2}$$

$$Ra_L = \frac{9,8 \cdot 0,000517 \cdot ((72,1 + 273) - (48,6 + 273)) \cdot 0,011^3 \cdot 2,99}{4,749 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Ra_L = 0,0132 \times 10^7$$

$$L_c = \frac{Do - Di}{2}$$

$$L_c = \frac{0,012 - 0,011}{2}$$

$$L_c = 0,0005$$

$$F_{cyl} = \frac{[\ln(\frac{Do}{Di})]}{Lc^3 (Di^{-\frac{3}{5}} + Do^{-\frac{3}{5}})^{-\frac{5}{4}}}$$

$$F_{cyl} = \frac{[\ln(\frac{0,012}{0,011})]}{0,0005^3 (0,012^{-\frac{3}{5}} + 0,011^{-\frac{3}{5}})^{-\frac{5}{4}}}$$

$$F_{cyl} = 0,00264$$

Karena $0,70 \leq Pr \leq 6000$ dan $10^2 \leq F_{cyl} Ra_L \leq 10^7$ maka $k_{eff} / k = Nu$ digunakan, sehingga :

$$Nu = 0,386 \left(\frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{1/4} (F_{cyl} Ra_L)^{1/4}$$

$$Nu = 0,386 \left(\frac{2,99}{0,861 + 2,99} \right)^{1/4} (0,00264 \cdot 0,0132 \times 10^7)^{1/4}$$

$$Nu = 1,565$$

$$h_f = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

$$h_f = \frac{1,565 \cdot 0,654}{0,011}$$

$$h_f = 93,046 \text{ W/m}^2\text{K}$$

d. Koefisien perpindahan panas kolektor

1. Koefisien perpindahan panas atas kolektor

$$U_t = \frac{1}{(R_1 + R_2)}$$

$$U_t = \frac{1}{(0,0747 + 0,0955)}$$

$$U_t = 5,875 \text{ W/m}^2\text{K}$$

2. Koefisien perpindahan panas bawah kolektor

$$U_b = \frac{1}{\left[\frac{L_a}{k_a} + \frac{L_F}{k_F} + \frac{L_P}{k_P} + \frac{1}{h_f} \right]}$$

$$U_b = \frac{1}{\left[\frac{0,0002}{0,00016} + \frac{0,004}{0,032} + \frac{0,01}{0,13} + \frac{1}{93,046} \right]}$$

$$U_b = 0,719 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3. Koefisien perpindahan panas total kolektor

$$U_L = U_t + U_b$$

$$U_L = 5,875 + 0,719$$

$$U_L = 6,594 \text{ W/m}^2\text{K}$$

e. Faktor pelepasan panas kolektor

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}}$$

$$m = \sqrt{\frac{6,594}{205 \times 0,001}}$$

$$m = 5,67$$

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2}$$

$$F = \frac{\tanh[5,67(0,1017 - 0,012)/2]}{5,67(0,1017 - 0,012)/2}$$

$$F = 0,979$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{\pi D_o h_f} \right]}$$

$$F' = \frac{\frac{1}{6,594}}{0,1017 \left[\frac{1}{6,594 \cdot [0,012 + (0,1017 - 0,012)0,979]} + \frac{1}{3,14 \cdot 0,012 \cdot 93,046} \right]}$$

$$F' = 0,826$$

- f. Radiasi matahari yang diserap oleh pelat *absorber*:

$$S = 1,01 \tau \alpha I_T$$

$$S = 1,01 \times 0,87 \times 0,975 \times 1000$$

$$S = 856,732 \text{ W/m}^2$$

- g. Flow Rate air yg bekerja dalam sistem.

Persamaan dasar energi pada kolektor

$$Q_u = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) = A_c \cdot F_R [S - U_L(T_i - T_a)] - U_L \cdot F' \cdot A_c$$

$$\dot{m} = \frac{C_p \cdot \ln \left[1 - \frac{U_L(T_{out} - T_{in})}{S - U_L(T_{in} - T_a)} \right]}{-U_L \cdot F' \cdot A_c}$$

$$\dot{m} = \frac{-6,594 \cdot 0,826 \cdot 0,0578}{4182 \cdot \ln \left[1 - \frac{6,594(54,6 - 42,6)}{856,732 - 6,594(42,6 - 36)} \right]}$$

$$\dot{m} = 0,000735 \text{ kg/s}$$

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} - (T_{f,o} - T_a)}{\frac{S}{U_L} - (T_{f,i} - T_a)} \right]$$

$$F'' = \frac{0,000735 \times 4182}{0,0578 \times 6,594 \times 0,826} \left[1 - \frac{\frac{856,732}{6,594} - (54,6 - 36)}{\frac{856,732}{6,594} - (42,6 - 36)} \right]$$

$$F'' = 0,9498$$

$$F_R = F' \cdot F''$$

$$F_R = 0,826 \cdot 0,9498$$

$$F_R = 0,7845$$

- h. Panas yang berguna pada kolektor

$$Q_u = A_c \cdot F_R [S - U_L(T_i - T_a)]$$

$$Q_u = 0,0578 \times 0,7845 [856,732 - 6,594(42,6 - 36)]$$

$$Q_u = 36,838 \text{ W}$$

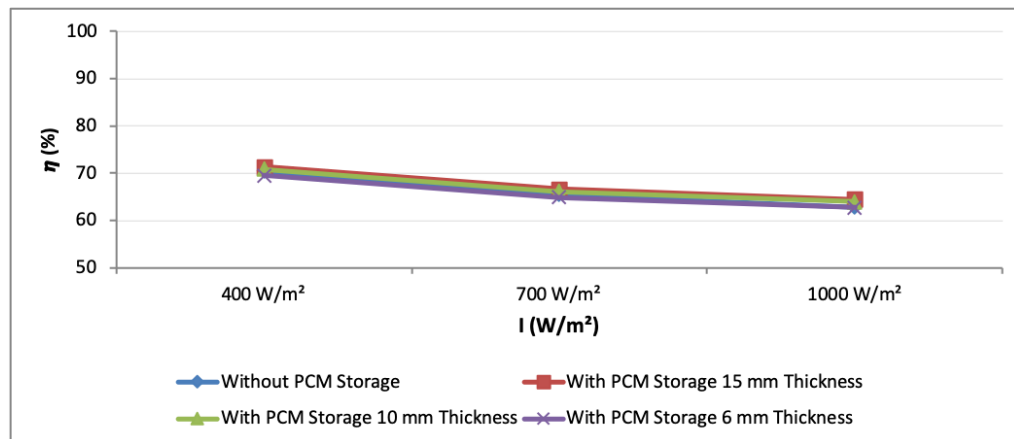
- i. Efisiensi teoritis kolektor

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_T} = \frac{36,838}{0,0578 \times 1000}$$

$$\eta = 0,63733$$

$$\eta = 63,73 \%$$

Dengan cara yang sama diperoleh efisiensi untuk setiap ketebalan PCM pada setiap pemanas air tenaga matahari thermosifon. Data hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada grafik berikut.



Gambar 6. Efisiensi Pemanas Air Tenaga Matahari dengan Variasi PCM

Pada Grafik efisiensi diatas, terlihat bahwa efisiensi cenderung menurun seiring meningkatnya intensitas radiasi matahari. Meningkatnya temperatur air masuk kolektor terhadap waktu operasi dalam hal ini peningkatan intensitas matahari menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi tersebut. Efisiensi rata-rata dari pelat absorber tanpa PCM storage yaitu sebesar 63,73 %, lebih kecil jika dibandingkan dengan pelat absorber dengan PCM storage tebal 15 mm yakni 67,49 % dan PCM storage tebal 10 mm yakni 67 %. Akan tetapi masih lebih besar jika dibandingkan dengan pelat absorber yang menggunakan PCM storage tebal 6 mm yaitu 61,37 %.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian disimpulkan bahwa penggunaan PCM dengan ketebalan 15 mm lebih efektif diterapkan pada pemanas air tenaga matahari jika dibandingkan dengan menggunakan PCM dengan ketebalan 10 mm, 6 mm, atau bahkan tanpa PCM. Metode perhitungan secara teoritis yang berdasar pada hasil pengambilan data secara eksperimental sangat mendukung dalam menghitung efisiensi kinerja dari suatu sistem, terkhusus pada pemanas air tenaga matahari. Penggunaan variasi ketebalan PCM pada pemanas air tenaga matahari sebagai material penyimpan energi termal dapat dijadikan dasar dalam melakukan evaluasi kinerja terhadap pemanas air tenaga matahari untuk menghasilkan produk yang efektif, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2013). Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with a storage tank equipped with radial fins of rectangular profile. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 49 (1), 107-115.
- Freeгах, B. (2019). *Design, Development and Optimisation of A Novel Thermo-Syphon System for Domestic Applications*.
- Nadjib, M. (2016). Penggunaan Paraffin Wax Sebagai Penyimpan Kalor Pada Pemanas Air Tenaga Matahari Thermosyphon. *Rotasi*, 18 (3), 76.
- Naveenkumar, R., Venkateshkumar, R., Mohanavel, V., Franklin, C., Ismail, S. O., Ravichandran, M., Kannan, S., & Soudagar, M. E. M. (2025). Recent

- developments in solar water heaters and solar collectors: A review on experimental and neural network analyses. *Results in Engineering*, 25, 104394.
- Nunayon, S. S., & Akanmu, W. P. (2022). Potential application of a thermosyphon solar water heating system for hot water production in beauty salons: A thermo-economic analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101881.
- Rosa, Y., & Sukma, R. (2008). Rancang Bangun Alat Konversi Energi Surya Menjadi Energi Mekanik. *Jurnal Teknik Mesin*, 5 (2).
- Samanci, A., & Berber, A. (2011). Experimental investigation of single-phase and twophase closed thermosyphon solar water heater systems. *Scientific Research and Essays*, 6 (4), 688-693.
- Subiantoro, A., & Ooi, K. T. (2013). Analytical models for the computation and optimization of single and double glazing flat plate solar collectors with normal and small air gap spacing. *Applied Energy*, 104, 392-399.
- Syahrudin, A. S., Jalaluddin, J., & Hayat, A. (2021). Performance Analysis Of Solar Water Heating System With Plate Collector Integrated Pcm Storage. *EPI International Journal of Engineering*, 3 (2), 143-149.
- Wu, W., Dai, S., Liu, Z., Dou, Y., Hua, J., Li, M., Wang, X., & Wang, X. (2018). Experimental study on the performance of a novel solar water heating system with and without PCM. *Solar Energy*, 171, 604-612.
- Zaafouri, W., Amara, W. Ben, Bouabidi, A., Kadhim, S. A., & Askar, A. H. (2025). Advancements and integration strategies of solar water heaters in buildings: A comprehensive review. *Energy Nexus*, 20, 100535.