



RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI DENGAN REFLEKTOR BUSUR SEPEREMPAT LINGKARAN

Nailul 'Atifah¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : dosen00410@unpam.ac.id

Masuk : 21 Juni 2018

Direvisi : 27 September 2018

Disetujui : 2 Oktober 2018

Abstrak: Penelitian mengenai rancang bangun dan studi eksperimen pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran telah dilaksanakan. Reflektor busur seperempat lingkaran pada penelitian ini memiliki ukuran jari-jari sebesar 60 cm, panjang 60 cm, terbuat dari potongan cermin dengan lebar 3 cm dan panjang 30 cm. Sistem pemanas air tenaga matahari ini memiliki nilai fraksi radiasi dari reflektor parabola ke pipa absorber sebesar 5,2 %. Pipa absorber terbuat dari pipa besi yang dicat hitam dengan diameter 1,5 inchi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa pemanas air tenaga matahari ini dapat memanaskan air sebanyak 684 ml dengan suhu maksimal mencapai 71⁰C pada kondisi cerah dan tidak berangin. Pemanas air tenaga matahari ini menghasilkan nilai energi termal output tertinggi sebesar 98,73 kJ. Energi termal output rata-rata pada sistem ini adalah sebesar 55,08 kJ dengan efisiensi termal rata-rata sebesar 31,64%.

Kata kunci : pemanas air tenaga matahari, busur seperempat lingkaran, reflektor, temperatur, energi termal, efisiensi termal

Abstract: The research on design and experimental studies of solar water heater with a quarter circular arc reflector has been done. The quarter circle arc reflector in this research has radius of 60 cm, and length of 60 cm. This reflector is made of cut-off mirrors 3 cm width and 30 cm length. The radiation fraction value from the parabolic reflector to the absorber pipe is 5.2 %. The absorber pipe is made of black painted iron pipe with 1.5 inch diameter. The experimental results show that this solar water heater is able to heat 684 ml of water with a maximum temperature of 71⁰C in bright and windless conditions. This solar energy heater has the highest thermal energy output of 98.73 kJ. The average output thermal energy in this system is 55.08 kJ with an average thermal efficiency of 31.64%.

Keywords : solar water heater, quarter circular arc, reflector, temperature, thermal energy, thermal efficiency

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber energi matahari yang cukup potensial dikarenakan terletak pada garis khatulistiwa. Intensitas rata-rata radiasi matahari untuk wilayah Jabodetabek adalah sekitar 4,98334-5,02111 kWh/m²/hari [1]. Teknologi pemanfaatan energi matahari melalui sistem termal salah satunya adalah dengan sistem *parabolic trough*. Sistem ini menggunakan reflektor berbentuk terusan palung dengan kurva berbentuk parabola dan pipa absorber yang ditempatkan di sepanjang garis fokusnya.

Prastika, dkk [2] dalam penelitiannya mengenai sistem Mini PTC (*Parabolic Trough Collector*) menggunakan bahan plat seng mengkilat sebagai reflektor dan pipa aluminium sebagai *absorber*. Desain *aperture* reflektor 50 cm dan panjang 105 cm yang dirancang sanggup memanaskan air sebanyak 63,2 ml dengan temperatur maksimal sebesar 54⁰C. Tayade et al. [3] dalam penelitiannya melakukan perancangan PTC dengan menggunakan aluminium sebagai bahan reflektornya dan bahan pipa absorbernya, serta pipa gelas untuk mengungkung pipa absorbernya. Kenaikan suhu pada sistem yang dirancangnya mencapai suhu 32⁰ C-55C selama bulan November-Desember 2015 di daerah Chandrapur, India (19.95° LU, 79.3° BT). Berikutnya, hasil penelitian Valan Arasu dan

Sornakumar [4] menunjukkan PTC yang dirancang dengan bahan reflector berupa *solarflex foil* dan absorber dengan bahan tembaga yang diselubungi dengan pipa gelas dapat menaikkan suhu air dalam pipa sebesar 42°C - 55°C .

Penelitian kali ini mengadopsi sistem yang mirip dengan *parabolic trough* dari penelitian-penelitian sebelumnya. Namun, perbedaannya terletak pada bentuk geometri pada bagian reflektornya. Bagian reflektor pada penelitian ini berupa kurva yang berbentuk busur seperempat lingkaran. Hal ini dilatarbelakani karena lebih mudah dalam pembuatannya. Selain itu, material reflektor yang digunakan adalah cermin yang dipotong-potong. Meskipun formasi reflektor akhirnya bukanlah berbentuk kurva yang halus, namun dengan nilai reflektansi yang tinggi dari material cermin diharapkan dapat memantulkan radiasi yang cukup tinggi.

PERANCANGAN

Radiasi matahari yang mengenai reflektor cermin busur lingkaran akan dipantulkan pada titik fokusnya. Letak fokus pada cermin cekung adalah setengah dari jari-jarinya. Daya radiasi yang dipantulkan cermin pada pipa absorber dapat dinyatakan dalam persamaan berikut [5]:

$$P_{in} = F_{12} \cdot r \cdot I \cdot A_r \quad (1)$$

dengan:

- P_{in} : Daya input yang diterima pipa absorber dari pantulan reflektor (Watt)
- F_{12} : Fraksi radiasi dari reflektor parabola ke pipa absorber
- ϕ : reflektansi cermin reflektor
- I : Intensitas matahari (Watt/m^2)
- A_r : Luas reflektor cermin (m^2)

Reflektansi reflektor yang terbuat dari cermin adalah sekitar 80% s/d 97% [3]. Jika intensitas rata-rata radiasi matahari untuk wilayah Jabodetabek adalah sekitar 4,98334-5,02111 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{hari}$ [1] dengan hari yang dimaksud adalah lama penyinaran matahari dari pagi sampai sore yakni sekitar 12 jam, maka dapat dikonversikan nilainya menjadi 415,278-418,426 W/m^2 .

Sedangkan luas reflektor yang merupakan busur seperempat lingkaran dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$A_r = \frac{\pi}{2} \cdot r \cdot L \quad (2)$$

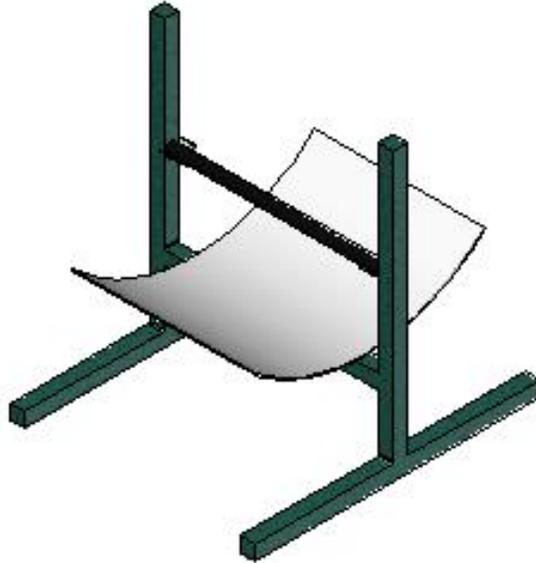
dengan:

- r : jari-jari reflektor (m)
- L : panjang reflektor (m)

Reflektor yang digunakan dalam penelitian ini memiliki radius 60 cm dan panjang 60 cm. Dengan demikian nilai A_r dapat dihitung sebagai berikut:

$$A_r = \frac{\pi}{2} \cdot 0,6\text{m} \cdot 0,6\text{m} = 0,565\text{m}^2$$

Gambar 1. berikut menunjukkan sketsa pemanas air tenaga matahari dengan reflektor terusan busur seperempat lingkaran yang akan diuji:



Gambar 1. Sketsa Pemanas Air Tenaga Matahari dengan Busur Seperempat Lingkaran

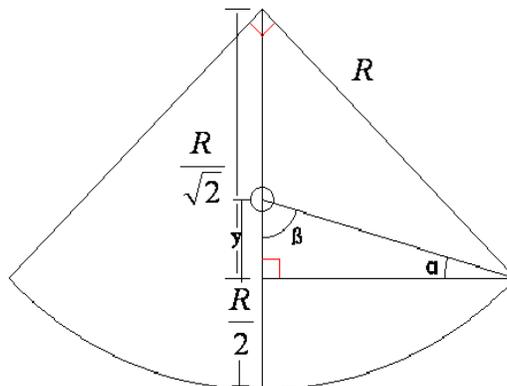
Jika reflektor cermin dianggap sebagai permukaan 1 dan pipa absorber dianggap sebagai permukaan 2, maka berdasarkan relasi *reciprocity* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [5]:

$$F_{12} = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_{21} \tag{3}$$

dengan:

- A_1 : Luas permukaan reflektor parabola persatuan panjang (m)
- F_{12} : Fraksi radiasi dari reflektor parabola ke pipa absorber
- A_2 : Luas permukaan pipa absorber persatuan panjang (m)
- F_{21} : Fraksi radiasi dari pipa absorber ke reflektor parabola

Gambar 2. berikut menunjukkan penampang reflektor busur parabola dan pipa absorber



Gambar 2. Penampang Reflektor Busur Parabola dan Pipa Absorber

y , α , β merupakan besaran geometri yang terdapat pada Gambar 2. di atas.

Nilai F_{12} dapat diperoleh dengan analisis geometri sebagai berikut:

$$y = \frac{R}{\sqrt{2}} - \frac{R}{2} = \frac{R}{2}(\sqrt{2} - 1) = 0,207.R$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{\frac{R}{\sqrt{2}}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0,207R}{0,707.R} \right) = \tan^{-1}(0,293) = 16,32^\circ$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 16,32^\circ = 73,68^\circ$$

Nilai F_{21} dapat diperoleh dengan rumus berikut:

$$F_{21} = \frac{2\beta}{360^\circ} = \frac{\beta}{180^\circ} = \frac{73,68^\circ}{180^\circ} = 0,409$$

Diameter pipa absorber yang digunakan adalah 1,5 inci= 3,81 cm dan radius cermin reflektor adalah 60 cm. Maka nilai A_1 dan A_2 dapat dihitung dengan penjabaran sebagai berikut:

$$A_1 = \frac{\pi}{2} . R = \frac{\pi}{2} . 0,6m = 0,942m$$

$$A_2 = \pi . d = \pi . 0,00381m = 0,120m$$

Dengan mensubstitusikan nilai F_{21} , A_1 dan A_2 ke dalam persamaan (3), maka:

$$F_{12} = \frac{A_2}{A_1} . F_{21} = \frac{0,120m}{0,942m} . 0,409 = 0,052$$

Tidak semua radiasi yang dipantulkan oleh reflektor cermin diterima oleh pipa absorber. Faktor radiasi yang diterima oleh pipa berdasarkan perhitungan di atas adalah 0,052. Jika Intensitas rata-rata radiasi matahari untuk wilayah Jabodetabek adalah sekitar 4,98334-5,02111 kWh/m²/hari [1] dengan hari yang dimaksud adalah lama penyinaran matahari dari pagi sampai sore yakni sekitar 12 jam, maka dapat disetarakan nilainya dengan 415,278-418,426 W/m². Dengan demikian daya input pada sistem ini jika menggunakan nilai intensitas matahari terendah yaitu 415 W/m² adalah sebagai berikut:

$$P_{in} = F_{12} . \phi . I . A_r \tag{4}$$

$$P_{in} = 0,052 . 0,8 . 415 \frac{W}{m^2} . 0,565m^2$$

$$P_{in} = 9,76W$$

Dalam hal ini nilai intensitas matahari yang digunakan dalam perhitungan adalah nilai terendah yaitu 415 W/m^2 . Nilai reflektansi cermin ϕ yang digunakan adalah 80% yang merupakan nilai minimum data reflektansi cermin yang ada di pasaran yakni 80%-97% [6].

Tidak semua daya input dikonversi seluruhnya menjadi panas. Akan tetapi terjadi *heat loss* (kerugian panas) ke lingkungan baik berupa konveksi maupun radiasi akibat adanya perbedaan temperatur antara pipa absorber dengan lingkungan.

Heat loss dengan mekanisme konveksi dijabarkan dengan persamaan berikut [7]:

$$q_{conv} = h.A_p.(T_p - T_s) \tag{5}$$

dengan:

- q_{conv} : Laju perpindahan panas konveksi (W)
- h : Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
- A_p : Luas pipa absorber (m^2)
- T_p : Temperatur pipa absorber (K)
- T_s : Temperatur lingkungan sekitar (K)

Sedangkan *heat loss* dengan mekanisme perpindahan panas radiasi dari pipa absorber ke lingkungan dapat dijabarkan dengan persamaan berikut [7]:

$$q_{rad} = \varepsilon.\sigma.A_p (T_p^4 - T_s^4) \tag{6}$$

dengan:

- q_{rad} : Laju perpindahan panas radiasi (W)
- ε : Emisivitas pipa absorber
- σ : Konstanta Stefan Boltzman ($5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$)

Total kerugian panas total konveksi dan radiasi adalah:

$$q_{loss} = q_{conv} + q_{rad} \tag{7}$$

dengan:

- q_{loss} : Total laju kerugian perpindahan panas (W)

Dengan demikian daya yang berguna untuk memanaskan air di dalam pipa absorber adalah:

$$P_{out} = P_{in} - q_{loss} \tag{8}$$

dengan:

- P_{out} : Daya output yang berguna untuk memanaskan air (W)

Dengan demikian efisiensi thermal dari sistem pemanas air tenaga matahari dapat ditentukan dengan persamaan berikut [8]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{9}$$

Dengan:

η : Efisiensi termal pemanas air tenaga matahari

Nilai η juga dapat dihitung dengan perbandingan energi input dan energi output secara total selama rentang waktu operasi. Maka efisiensi juga dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

dengan:

E_{in} : Energi input (Joule)

E_{out} : Energi output (Joule)

Energi input dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$E_{in} = P_{in} \cdot t \quad (11)$$

dengan:

t : Waktu operasi (sekon)

Sedangkan energi output dapat ditentukan dari pengukuran temperatur air pada pipa absorber. Dari data pengukuran temperatur air akan didapatkan grafik dinamik temperatur air terhadap waktu.

Energi termal output ini merupakan panas sensibel yang menyebabkan kenaikan temperatur air dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [8]:

$$E_{out} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (12)$$

dengan:

m : Massa air yang dipanaskan (kg)

c_p : Kapasitas panas air (4,186 kJ/kg. °C)

ΔT : Kenaikan temperatur air (°C)

Perhitungan m yang merupakan massa air dijabarkan sebagai berikut:

$$m = \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \quad (13)$$

dengan:

ρ : Massa jenis air (kg/m³)

D : Diameter pipa absorber (m)

L : Panjang pipa absorber (m)

Sistem pemanas air ini memiliki pipa absorber dengan diameter 3,81 cm dan panjang 60 cm. Air yang dipanaskan dalam pipa absorber ini terisi penuh. Dengan demikian dari perhitungan geometri volume air yang dipanaskan pada pengujian ini adalah sebesar:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot (0,0381)^2}{4} \cdot 0,6m^3 = 6,84 \cdot 10^{-4} m^3 = 684mL$$

Jika dikonversi menjadi satuan massa air dengan densitas air sekitar 997 kg/m^3 [7], maka massa air yang dipanaskan adalah sebesar:

$$m = \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot L = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 6,84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,682 \text{ kg}$$

Penelitian ini dilaksanakan melalui studi eksperimen dimana sistem pemanas air ini adalah berupa sistem *batch*, dimana air yang ditempatkan di dalam pipa dalam kondisi tidak mengalir. Pengujian dilakukan dengan mengukur kenaikan temperatur air dalam pipa dari jam efektif matahari terbit yaitu pada pukul 10.00 s/d pukul 15.00. Temperatur air diukur setiap 15 menit sekali. Dari hasil pengukuran akan diperoleh besarnya energi output yakni panas sensibel yang berguna untuk menaikkan temperatur air.

HASIL DAN PEMBAHASAN

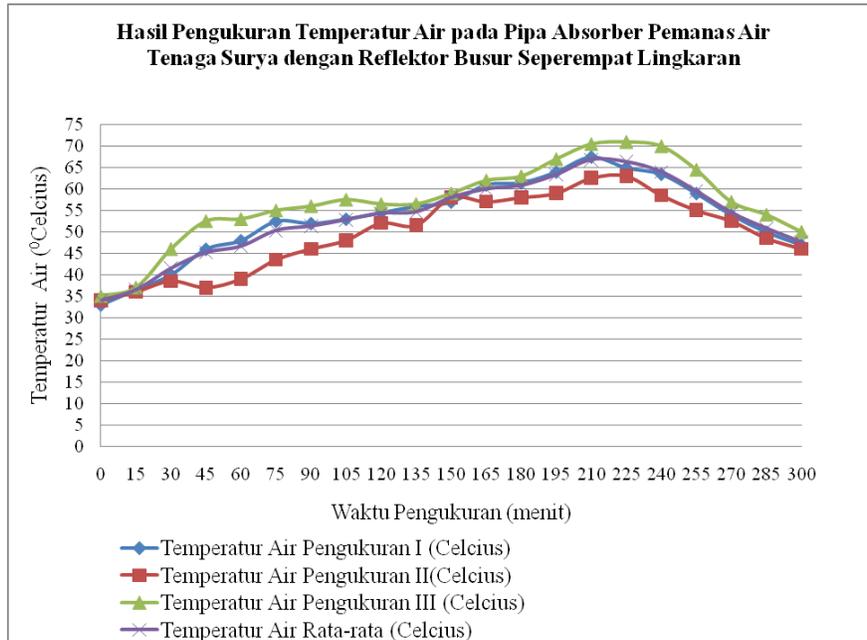
Pemanas air tenaga matahari dengan reflektor berbentuk busur seperempat lingkaran yang dirancang dan diuji di penelitian ini ditunjukkan pada foto pada Gambar 3. berikut:



Gambar 3. Pemanas Air Tenaga Matahari dengan Reflektor Busur Seperempat Lingkaran

Gambar 4. menyajikan grafik hasil pengukuran temperatur air di dalam pipa absorber pada pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran dimana pengujian dilakukan dengan temperatur air dalam pipa dari jam efektif matahari terbit yaitu pada pukul 10.00 s/d pukul 15.00. Temperatur air diukur setiap 15 menit sekali. Pengujian dilaksanakan sebanyak 3 kali pada cuaca cerah tanpa angin.

Dari hasil pengukuran tersebut dapat dilihat bahwa temperatur air tertinggi dicapai pada temperatur 71°C pada menit ke 225 yakni pada pukul 13.45 WIB. Dan setelah menit ke 225 tersebut, temperatur air kembali turun. Temperatur air tertinggi di dalam pipa absorber justru tidak terjadi pada waktu puncak intensitas radiasi matahari yakni sekitar pukul 12.00. Hal ini disebabkan adanya efek *heat loss* (kerugian panas) dari pipa absorber ke lingkungan. Pada pukul 12.00 temperatur lingkungan sekitar juga relatif tinggi, sehingga selisih temperatur dari pipa absorber dan lingkungan juga rendah. Dengan demikian laju perpindahan panas dari pipa absorber ke lingkungan tidak terlalu tinggi.



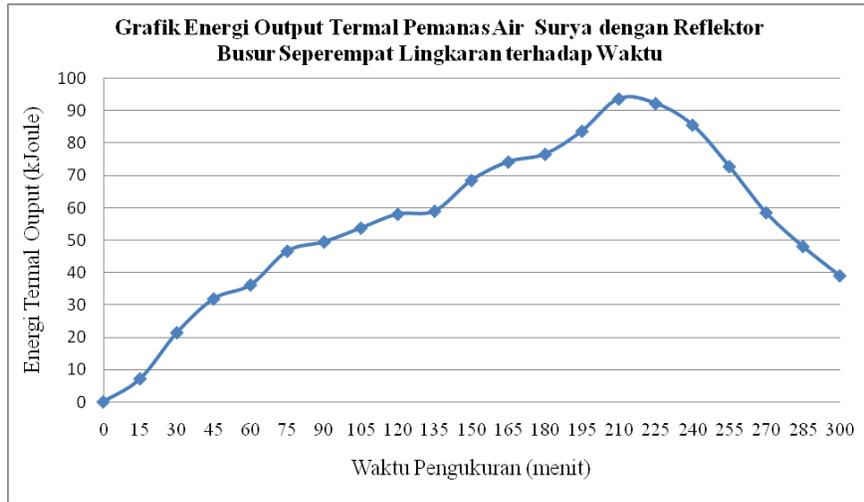
Gambar 4. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Air di Dalam Pipa Absorber pada Pemanas Air Tenaga Matahari dengan Reflektor Busur Seperempat

Temperatur air meningkat pada saat mendekati waktu tersebut (pukul 13.45 WIB). Hal ini juga disebabkan oleh adanya akumulasi panas air di dalam pipa absorber. Namun setelah melewati waktu tersebut temperatur air mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena adanya penurunan temperatur lingkungan sekitar sehingga menyebabkan selisih temperatur air dengan lingkungan meningkat. Dengan demikian laju *heat loss* (kerugian panas) dari pipa absorber ke lingkungan juga meningkat. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya [2] yang menggunakan sistem *PTC (Parabolic Trough Collector)* berbahan plat seng mengkilat dengan desain *aperture* reflektor 50 cm dan panjang 105 cm yang memanaskan air sebanyak 63,2 ml dengan temperatur maksimal sebesar 54°C, maka desain pada penelitian ini memiliki performa yang lebih baik. Desain pemanas air tenaga matahari pada penelitian ini sanggup memanaskan air lebih banyak yakni 684 ml dengan suhu yang lebih tinggi mencapai 71°C. Meskipun demikian sistem pemanas air yang dirancang pada penelitian ini belum sanggup untuk mendidihkan air dan menghasilkan uap air.

Berdasarkan perhitungan dari persamaan (4), daya input P_{in} diperoleh sebesar 9,67 W dan waktu operasi dalam rentang 5 jam. Dengan demikian energi input dapat dihitung berdasarkan persamaan (11) adalah sebagai berikut:

$$E_{in} = P_{in} \cdot t = 9,67W \cdot 5.3600s = 174,06kJ$$

Hasil perhitungan energi output termal berdasarkan persamaan (11), (12) dan temperatur air rata-rata disajikan melalui grafik pada Gambar 5. berikut:



Gambar 5. Grafik Energi Termal Output Pemanas Air Tenaga Matahari dengan Reflektor Busur Seperempat Lingkaran terhadap Waktu

Dari hasil perhitungan energi termal output tersebut, diperoleh nilai energi output tertinggi sebesar 98,73 kJ. Sedangkan energi termal output rata-rata dalam rentang waktu pengujian selama 5 jam dari pukul 10.00 sampai dengan pukul 15.00 adalah sebesar 55,08 kJ. Dengan demikian dapat ditentukan besarnya efisiensi termal rata-rata dari sistem pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran ini dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\% = \frac{55,08kJ}{174,06kJ} \times 100\% = 31,64\%$$

Efisiensi termal pada sistem pemanas air matahari ini kurang dari 50% atau dapat dikatakan masih relatif rendah. Hal ini disebabkan karena desain pada pipa absorber belum dilengkapi dengan mekanisme *cover* perangkap panas transparan yang dapat menahan panas yang telah diterima absorber sehingga mengurangi laju perpindahan panas dari pipa absorber ke lingkungan. Selain itu desain reflektor yang disusun dari cermin yang dipotong-potong memang tidak menghasilkan kurva busur seperempat lingkaran yang halus, meskipun memiliki nilai reflektansi yang relatif tinggi. Sehingga untuk kedepannya perlu dipertimbangkan mengenai pemilihan bahan reflektor yang melengkung halus namun memiliki reflektansi yang relatif tinggi seperti dari bahan *stainless steel mirror*. Dengan pengembangan desain selanjutnya diharapkan dapat meningkatkan efisiensi termalnya sehingga dapat mendidihkan air dan menghasilkan uap air.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran berjari-jari 60 cm, panjang 60 cm dengan pipa absorber berdiameter 1,5 inchi ini memiliki nilai fraksi radiasi dari reflektor parabola ke pipa absorber sebesar 5,2 %
2. Pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran pada penelitian ini dapat memanaskan air sebanyak 684 ml dengan suhu maksimal sebesar 71⁰C pada kondisi cerah tidak berangin dan dicapai pada waktu sekitar pukul 13.45 WIB.

3. Desain pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran pada penelitian ini yang relatif lebih mudah dirakit dan dengan ukuran yang tidak jauh berbeda dengan penelitian terdahulu yang menggunakan kurva parabola, menunjukkan performa termal yang jauh lebih tinggi meskipun belum sanggup menghasilkan uap air.
4. Pemanas air tenaga matahari dengan reflektor busur seperempat lingkaran pada penelitian ini menghasilkan nilai energi termal output tertinggi sebesar 98,73 kJ, energi termal output rata-rata sebesar 55,08 kJ serta efisiensi termal rata-rata sebesar 31,64%

DAFTAR PUSTAKA

1. Vetri Nurliyanti, Marlina Pandin, Bono Pranoto, "Pembuatan Peta Potensi Energi Matahari". M&E, Vol.10, No.4, Desember 2012
2. Lintang Ratri Prastika, dkk, 2015, *Desain, Perakitan dan Uji Coba Mini Parabolic Trough Collector (PTC) Sederhana*. Prosiding SKF, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
3. M.G. Tayade, R. E. Thombre, S. Dutt, 2015. *Int. Journal of Scientific and Research Publications* 5 (1), 1-5
4. A. Valan Arasu and S. T. Sornakumar, 2006. *Thermal Science* 10 (2), 167-174
5. J.P. Holman, *Heat Transfer*, Mc Graw-Hill, New York, U.S.A, 1986.
6. Stephanie Meyan, Eckhard Lupfert "Standardization of Solar Mirror Reflectance Robin Test". National Renewable Energy Laboratory. SolarPACES, France, 2010.
7. Incropera, Frank.P, 1985, *Fundamentals of Heat Transfer and Mass Transfer, Second Edition*, John Willey & Sons, New York
8. Arora, C.P., 1998, *Thermodynamics*, Mc Graw-Hill Publishing Company, New York