

**RANCANG BANGUN ALAT PEMANAS AIR TENAGA SURYA DENGAN
KONFIGURASI TUBE *SERPENTINE* BERKAPASITAS 100 LITER**

Heriyanto Rusmaryadi^{1*)}, Rita Maria Veronika², Edy Purwanto³

^{1,2} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti Palembang.

³ Mahasiswa (S1) Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti Palembang.

Jln. Kapten Marzuki No. 2446 Kamboja Palembang, Indonesia

^{*)}Email: herirusmaryadi@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

Submitted:
12/06/2018

Accepted:
13/07/2018

Print-Published:
16/07/2018

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk menguji dan mengetahui performansi, dan faktor-faktor yang mempengaruhi performansi dari sebuah pemanas air tenaga surya. Jenis kolektornya adalah pelat datar dan konfigurasi pipa kolektornya adalah *serpentine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter-parameter yang penting adalah; intensitas radiasi matahari, posisi matahari untuk tiap-tiap jam, dan kecepatan tiupan angin. Efisiensi rata-rata pemanas air tenaga suryanya adalah 40.02%, sedangkan kerugian akibat kehilangan kalor terbesar terjadi di daerah bagian atas kotak kolektornya, yaitu sebesar $U_t = 2.09 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ atau 67.11% dari kerugian totalnya.

Katakunci: Pemanas air tenaga surya, kolektor pelat datar, *serpentine*, performansi, kerugian-kerugian

ABSTRACT

The purpose of this study is to test and determine the performance, and the factors that affect the performance of a solar water heater. The collector type is a flat plate and the configuration of collector pipe is serpentine. The results show that the important parameters are; the intensity of solar radiation, the sun's position for every hour, and the speed of the wind. The average efficiency of the solar water heater is 40.02%, while the average of the biggest losses due to heat loss occur in the upper area of the collector box is $U_t = 2.09 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ or 67.11% of total losses.

Keywords: Solar water heater, flat plate collector, *serpentine*, performance, losses

1. PENDAHULUAN

Matahari merupakan sumber energi yang tersedia luas, gratis, dan sederhana dalam pemanfaatannya. Pemanas air tenaga surya adalah salah satu aplikasi energi surya yang paling sederhana dimana energi surya langsung digunakan untuk memanaskan air.

Secara tradisional, air panas didapatkan cukup dengan memasak air dengan kayu bakar atau

kompor. Masalahnya, semakin banyak airnya, semakin besar energi atau bahan bakar yang diperlukan dan semakin lama pula waktu pemanasannya. Sehingga diperlukan alat pemanas yang menggunakan tenaga surya yang hemat bahan bakar ini.

Pemanas air tenaga surya didasarkan pada fenomena alam yang umum; air dingin terkena sinar matahari dan mengalami kenaikan suhu. Pemanas air

tenaga surya sederhana pada dasarnya terdiri dari kolektor plat datar dan tangki penyimpanan terisolasi. Kolektornya berupa pelat logam yang dicat hitam yang terpasang di bawah susunan pipa logam dan diberi penutup kaca dan diisolasi. Kotak kolektor dihu-bungkan ke tangki yang menyimpan air panas.

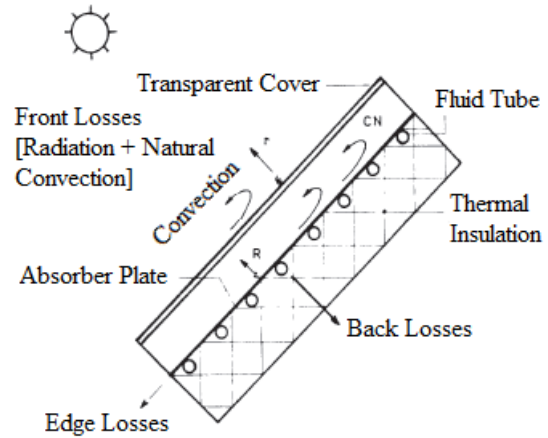
Ketika bekerja, kolektor akan menyerap radiasi sinar matahari, mentransfer panas yang dikumpulkan ke air yang bersirkulasi melalui pipa secara konduksi dan konveksi. Air panas dialirkan ke tangki penyimpanan untuk disimpan atau dipanaskan ulang bila temperaturnya masih bisa dinaikkan lagi. Pada desain yang paling umum, drum penyimpanan terletak lebih tinggi dari kolektornya. Posisi ini untuk memanfaatkan gravitasi bumi, sedangkan air panas dengan sendirinya naik dan kembali ke tangki penyimpanan dengan adanya fenomena *thermo-siphon* (Okafor, 2013).

Teknologi ini sangat sederhana, namun belum dimanfaatkan secara maksimal karena biaya investasinya tergolong tinggi, tapi hal ini bisa diatasi dengan membuat sendiri pemanas air tenaga surya. Alat pemanas air tenaga surya ini bertipe *serpentine* (untuk susunan pipa kolektornya). Adapun tujuan dari penelitian ini adalah; untuk mengetahui *heat loss* yang terjadi dan untuk mendapatkan rancangan alat pemanas air tenaga surya tipe *serpentine* yang bagus yang dapat menaikkan suhu air cukup tinggi dibanding suhu semulanya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Matahari

Energi Matahari terdiri dari sinar tampak dan radiasi panas elektromagnetik. Energi ini dapat dimanfaatkan dengan menggunakan serangkaian teknologi seperti; pemanas surya, sel fotovoltaik, dan fotosintesis buatan. Tekno-logi energi surya secara umum dikategorikan menjadi dua kelompok; teknologi pemanfaatan pasif dan aktif. Pengelompokan ini tergantung pada proses penyerapan, perubahan, dan penyaluran energi surya.



Gambar 1. Kolektor Pelat Datar (Beghi, 1983)

Di tahun 2011, Badan Energi Internasional menyatakan bahwa "Perkembangan teknologi energi surya yang terjangkau, tidak habis, dan bersih akan memberikan keuntungan jangka panjang yang besar". Perkembangan ini akan meningkatkan keamanan energi negara-negara melalui pemanfaatan sumber energi yang sudah ada, tidak habis, dan tidak tergantung pada impor, mengurangi polusi, meningkatkan kesinambungan, mengurangi biaya mitigasi perubahan iklim, dan menjaga harga bahan bakar fosil tetap rendah dari sebelumnya. Keuntungan-keuntungan ini berlaku global (Renewable Energy Technologies: Solar Energy Perspectives, 2011).

2.2 Jenis-Jenis Perpindahan Panas

Kalor dapat berpindah melalui tiga mekanisme; secara konduksi, secara konveksi, dan secara radiasi. Perpindahan kalor secara konduksi atau hantaran adalah perpindahan kalor melalui suatu zat tanpa disertai perpindahan partikel-partikel zat tersebut (bisa dikatakan dari satu molekul ke molekul di sebelahnya). Dimana, berdasarkan daya hantar kalornya, benda dibedakan menjadi tiga; konduktor, isolator, dan semikonduktor.

Perpindahan kalor konduksi berdasarkan (Cengel, 2002) dapat diekspresikan dalam bentuk hukum Fourier untuk konduksi (1):

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

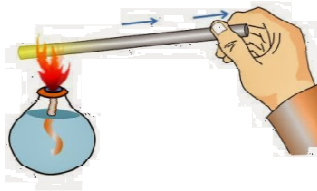
Dimana:

Q = jumlah kalor yang dipindahkan (W)

k = konduktivitas termal bahan ($W/m \cdot ^\circ C$)

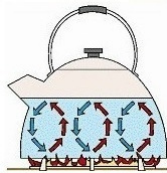
A = luas bidang pemanasan (m^2)

dT/dx = adalah gradien temperaturnya ($^\circ C/m$).



Gambar 2. Perpindahan kalor konduksi

Perpindahan kalor secara konveksi adalah modus transfer energi antara permukaan padat dengan cairan atau gas yang bergerak, yang melibatkan efek gabungan dari konduksi dan gerakan fluidanya. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar konveksinya, dan bila tak ada gerakan, maka yang terjadi adalah konduksi murni. Gerakan yang besar akan meningkatkan perpindahan kalor antara permukaan padat dan cairan, tetapi juga akan mempersulit penentuan laju perpindahan kalornya. (Cengel, 2002)



Gambar 3 Perpindahan kalor konveksi

Perpindahan kalor secara konveksi dapat diekspresikan berdasarkan (Cengel, 2002) dengan hukum Newton untuk pendinginan (2):

$$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)$$

Dimana:

h = koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

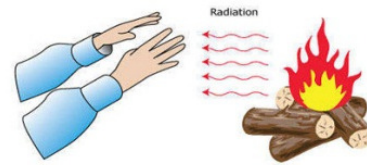
A_s = luas penampang tempat terjadinya perpindahan

kalor secara konveksinya (m^2)

T_s = temperatur permukaan

T_∞ = temperatur fluida yang terletak jauh dari permukaannya ($^\circ C$).

Sedangkan radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh materi (berbentuk gelombang elektromagnetik atau foton) akibat perubahan dalam konfigurasi elektronik atom atau molekulnya. Tidak seperti konduksi dan konveksi, transfer energi oleh radiasi tidak memerlukan kehadiran media antara.



Gambar4 Perpindahan kalor secara radiasi

Persamaan perpindahan kalor radiasi berdasarkan (Cengel, 2002) adalah (3):

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

Dimana:

ϵ = emisivitas permukaan

σ = konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)

A_s = luas permukaan

T_s = temperatur permukaan

T_{surr} = temperatur daerah sekeliling permukaan (K)

2.3 Cara Kerja Pemanas Air Tenaga Surya

Alat pemanas air tenaga surya ini merupakan sebuah alat yang berfungsi meningkatkan temperatur air dengan melibatkan panas matahari. Cara kerjanya; pada saat sinar matahari masuk ke kotak kolektor, kolektornya menyerap energi radiasi yang masuk (energi ini memanaskan plat kolektor, susunan pipa, dan udara yang ada di dalam kotak kolektor sehingga terjadi efek rumah kaca), temperatur dalam kotak meningkat, dan kalor yang ada digunakan untuk memanaskan air yang ada di dalam susunan pipa (yang diletakkan di atas plat kolektornya), selanjutnya air yang panas akan mengalir ke atas masuk ke tangki penampung (karena massa jenisnya lebih rendah dari massa jenis air yang dingin).

2.4 Jenis-Jenis Pemanas Air Tenaga Surya

Jenis pemanas air tenaga surya ditentukan oleh jenis kolektor yang dipakainya. Jenisnya antara lain; kolektor plat datar, kolektor tabung vakum, kolektor tanpa glasir, maupun kolektor berbentuk konsentrator.

Kolektor plat datar adalah pemanas air yang paling sederhana. Kolektor ini memiliki daerah resapan kalor yang besar, sehingga akan menyebabkan kehilangan / kerugian (*losses*) panas yang besar pula. Kolektor surya plat datar terdiri dari pelat absorber, saluran aliran, pelat penutup, isolasi, dan tangki penampung.

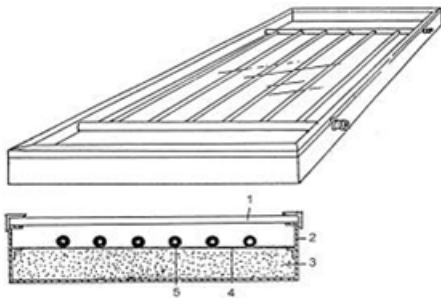
Kolektor tabung vakum sangat cepat menyerap kalor dan sangat efisien menyimpannya. Kolektor tabung vakum lebih unggul daripada kolektor plat datar meski lebih rumit pembuatannya. Hal ini

disebabkan lembaran logam tipis di dalam tabung menyerap kalor radiasi matahari, sedangkan proses kehilangan panas yang sudah didapat bisa diminimalisasi karena adanya ruang hampa di tengah tabung sehingga perpindahan kalor ke lingkungan lewat konveksi maupun konduksi sulit terjadi karena tidak adanya medium antara (ruang hampa).

Kolektor tanpa glasir adalah jenis kolektor yang dapat menyediakan air 10°C s.d. 15°C di atas suhu kamar dengan efisiensi yang lumayan. Kolektor ini terbuat dari ekstrusi polimer seperti; *polypropylin*, *polypropylene*, *polikarbonat* atau bahan lain (dengan *stabilisator UV*).

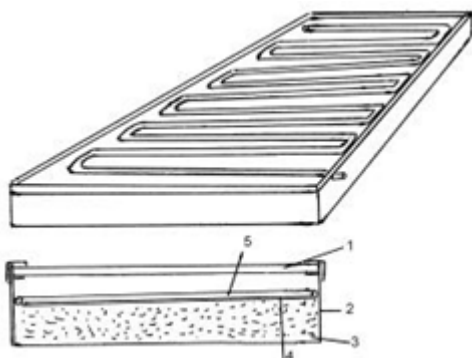
2.5 Konfigurasi Pipa Pemanas Air Tenaga Surya

Konfigurasi paralel adalah susunan pipa di atas plat (dalam kolektor surya) yang biasanya membentuk konfigurasi paralel dengan aliran airnya. Air didesain lebih cepat saat mengalir di dalam pipa.



Gambar 5 Konfigurasi paralel (Handoyo, 2000)

Konfigurasi *serpentine* adalah susunan pipa di atas plat (dalam kolektor surya) yang biasanya membentuk konfigurasi huruf S jamak. Pada pola ini, aliran air dapat dibuat lebih lambat saat mengalir di dalam pipa untuk memaksimalkan perpindahan kalor dari pipa ke airnya. Ilustrasinya bisa dilihat di Gambar 6.



Gambar 6 Konfigurasi *serpentine* (Handoyo, 2000)

Konfigurasi kombinasi adalah susunan pipa gabungan antara bentuk *serpentine* dan paralel.

Hasilnya juga merupakan kombinasi antara hasil bentuk paralel dan *serpentine* juga.

2.6 Keuntungan dan Kerugian

Keuntungannya; mampu menyediakan air hangat dan panas dengan cepat, umur pakai pemanas air tenaga suryanya lama, sistemnya sederhana (meski yang memakai pompa sekalipun), aman, ramah lingkungan, hemat bahan bakar (hanya memakai sinar matahari). Adapun kerugiannya antara lain; adanya kehilangan panas pada malam hari, tak cocok untuk iklim yang bertemperatur mendekati titik beku lebih dari 4 s.d. 5 malam per tahun, kerugian akibat kehilangan kalor dari bagian atas kolektor (*losses*) karena adanya konveksi akibat tiupan angin.

Adapun nilai koefisien kerugian kolektor kalor bagian atas secara teoritis dapat didekati dengan persamaan (4):

$$U_t = \frac{\left[\frac{N}{\frac{C}{T_v} \cdot \left(\frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^{0.33} + h_{wind}} + \frac{1}{h_{wind}} \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)}{\left[\varepsilon_p + 0,05 \cdot N \cdot (1 - \varepsilon_p) \right]^{-1} + \left[\frac{2N + f - 1}{\varepsilon_c} \right] - N}$$

Beberapa variabel yang belum diketahui didapatkan dengan persamaan (5), (6), dan (7) dari (Duffie & Beckman, 2013):

$$h_{wind} = 5.7 + 3.8 \cdot v \quad (W / m^2 \cdot K)$$

$$f = (1 - 0.04 \cdot h_{wind} + 0.0005 \cdot h_{wind}^2) \cdot (1 + 0.091N)$$

$$C = 250 \cdot (1 - 0.0044 \cdot (\beta - 90^\circ))$$

Dimana:

v = kecepatan angin di atas permukaan penutup (*cover*) paling atas (*m/s*)

N = jumlah penutup

ε_c = emisivitas penutup

ε_p = emisivitas pelat absorber ζ = konstanta Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)

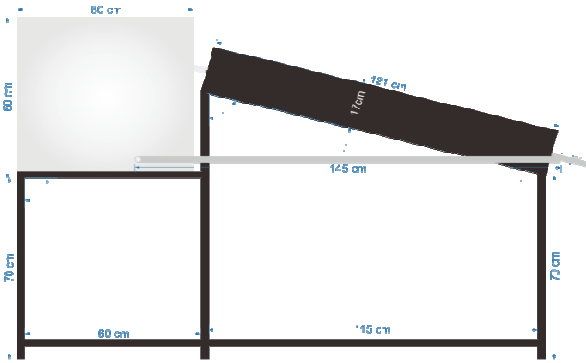
T_p = temperatur pelat absorber (*K*)

T_a = temperatur lingkungan (*K*)

3. METODE PENELITIAN

Adapun metode penelitiannya meliputi; metode studi pustaka (untuk mendapatkan teori-teori pendukung) dan metode studi lapangan (untuk melihat pemanfaatan pemanas air tenaga surya ini di lapangan). Pelat yang digunakan (baik untuk kolektor maupun

untuk pipa-pipanya) adalah berbahan *stainless steel*. Prosedur penelitiannya dimulai dari mendesain alatnya, penentuan bahan, perkakas dan alat ukur yang diperlukan

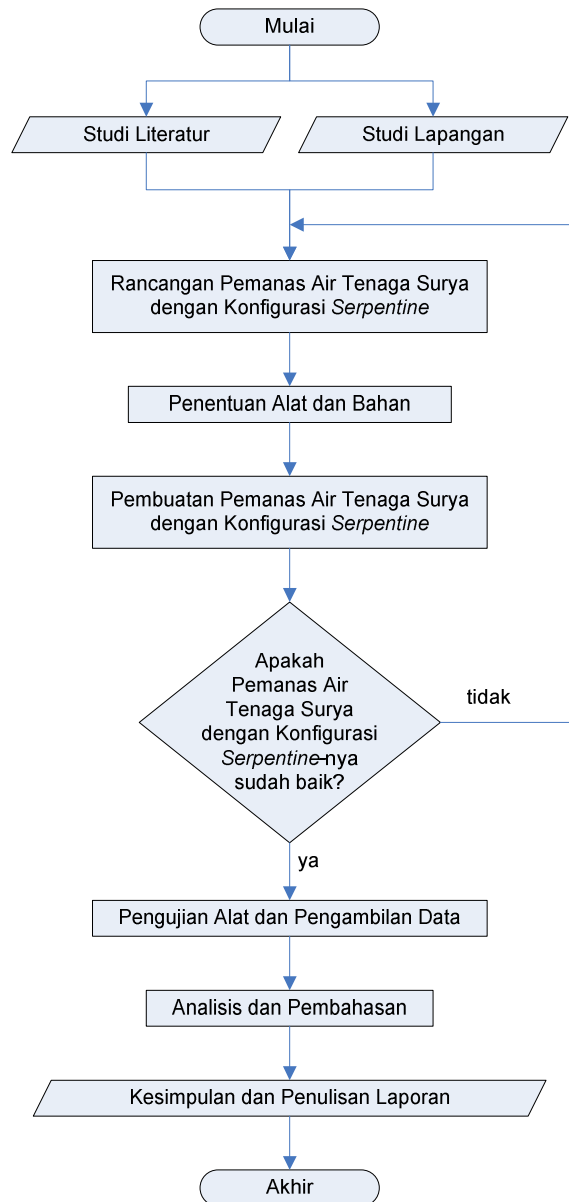


Gambar 7 Desain alat pemanas air

yang akan dipakai. Setelah alatnya selesai dibuat, pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui kinerja alatnya, serta untuk mengetahui kekurangan dan kelebihan dari alat yang dibuat.

Adapun diagram alir penelitiannya bisa dilihat pada Gambar 8. Sedangkan prosedur pengujian dan pengambilan data untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Penempatan modul alat pemanas di daerah terbuka yang mendapatkan sinar matahari langsung dan terhindar dari bayang-bayang pepohonan dan gedung di sekitar.
- Pengukuran dan pengambilan temperatur untuk daerah-daerah; di dalam kotak kolektor, pelat datar, pipa *serpentine*, tangki penampungan, temperatur udara luar dengan termometer. Semua kegiatan dilakukan setiap satu jam sekali, dari jam 09.00 hingga jam 16.00 (selama tiga hari).



Gambar 8 Diagram alir penelitian

- Pengukuran dan pengambilan waktu aliran fluidanya (sejak masuk hingga keluar pipa *serpentine*-nya) untuk tiap satu jam, dari jam 09.00 hingga jam 16.00 (selama tiga hari).
- Pengukuran dan pengambilan kecepatan angin dan intensitas matahari yang juga dilakukan setiap satu jam sekali (selama tiga hari).

Adapun penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2016 s.d. awal Maret 2017. Tempat penelitiannya adalah di Bengkel Teknik Las Rizki, Jl. Palembang-Jambi KM 122, Desa Sungai Lilin dan di Laboratorium Konversi Energi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti Palembang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Instalasi Kolektor Surya

Pada perhitungan ini, dicontohkan sebuah perhitungan lengkap pada satu data saja. Datanya adalah Data 02-03-2017 pada jam 09.00, yaitu:

$$\begin{aligned} Ts1 &= 30^{\circ}C & Ts2 &= 32^{\circ}C \\ Tk1 &= 35^{\circ}C & Tk2 &= 35^{\circ}C \\ Ts &= 59 \text{ menit} & G &= 316.5 \text{ W/m}^2 \\ v &= 6.0 \text{ km/jam} & Ta &= 27^{\circ}C \end{aligned}$$

Pertama-tama dihitung *Insolation* (radiasi total matahari pada permukaan horizontal dalam 1 jam), yaitu:

$$\begin{aligned} G &= 316.5 \text{ W/m}^2 = 316.5 \text{ (J/s)/m}^2 \\ &= 316.5 \text{ (J/(1/3600 jam))/m}^2 \\ &= 1.139.400 \text{ J/(jam.m}^2) \\ &= 1.1394 \text{ MJ/(jam.m}^2) \end{aligned}$$

atau:

$$I = 1.1394 \text{ MJ/m}^2$$

dimana; I adalah energi radiasi yang dipancarkan selama 1 jam. Dan, pada kondisi tunak, energi output kolektor surya adalah perbedaan antara radiasi surya yang diserap kolektor dengan kehilangan energi termal dari kolektor suryanya (Duffie & Beckman, 2013), yaitu (8):

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

Dimana:

A_c = luas area kolektor (= $1.2m \times 0.8m = 0.96 \text{ m}^2$)

S = radiasi yang diserap per satuan luas (W/m^2)

U_L = koefisien kehilangan / kerugian total kolektor ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}C$)

T_a = temperatur sekeliling kolektor (= $27^{\circ}C$)

T_{pm} = temperatur plat rata-rata = $(35^{\circ}C + 35^{\circ}C) / 2 = 35^{\circ}C$

Ukuran performansi kolektor adalah efisiensinya, yang didefinisikan sebagai rasio antara energi output kolektor surya (atau besar energi yang didapat) pada suatu periode waktu tertentu terhadap energi surya insiden (yang tergantung kemiringan sudut jatuh sinar suryanya) pada periode waktu yang sama (Duffie & Beckman, 2013), yaitu persamaan (9):

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{A_c \int G_T dt}$$

Jika kondisinya konstan selama suatu periode waktu, efisiensinya bisa disederhanakan (Duffie & Beckman, 2013) menjadi persamaan (10):

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c}$$

dimana I_T adalah intensitas radiasi pada permukaan yang miring.

Adapun besaran yang diketahui antara lain; jumlah kaca penutup ($N = 1$), jarak plat ke kaca penutup (17 mm), *emittance* kaca/gelas ($\epsilon_g = 0.94$), *emittance* plat ($\epsilon_p = 0.17$) (Lienhard & Lienhard, 2011), kemiringan kolektor ($b = 23.5^{\circ}$), tebal isolasi bawah ($L = 4 \text{ cm}$), konduktivitas isolasi *styrofoam* ($k = 0.035 \text{ W/m}^{\circ}C$), panjang x lebar x tinggi kotak kolektor $1.2m \times 0.8m \times 20 \text{ cm}$, ketebalan isolasi samping 4 cm , konstanta Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.66697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot K^4$), posisi lintang kota Palembang ($2^{\circ}59'$ atau dibulatkan jadi 3°), konstanta radiasi surya ($G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$), *diffuse reflectance* ($rg = 0.6$), *KL* gelas/kaca ($KL = 0.037$), dan absorptivitas plat (*normal incident*) = 0.6 .

Kerugian kalor dari atas kotak kolektor dominan akibat tiupan angin. Adapun koefisien perpindahan kalor dari angin dapat dihitung dengan persamaan (Duffie & Beckman, 2013):

$$h_w = 2.8 + 3.0 \cdot v = 2.8 + 3 \cdot (6 \cdot 1000 / 3600) = 7.8$$

Dimana:

h_w = koefisien perpindahan kalor angin ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}C$)

v = kecepatan angin (km/jam atau m/s)

Lalu, besaran-besaran yang diperlukan dihitung satu per satu. Misalnya, dari (Duffie & Beckman, 2013) didapatkan:

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \epsilon_p) (1 + 0.07866 N)$$

$$f = (1 + 0.089 (7.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}C) - 0.1166 (7.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}C) \cdot (0.17)) (1 + 0.07866 (1))$$

$$f = 1.661$$

Selanjutnya besaran C :

$$C = 520 \cdot (1 - 0.000051 \cdot \beta^2)$$

dimana; rumus ini dipakai bila $0^{\circ} < \beta < 70^{\circ}$, bila $70^{\circ} < \beta < 90^{\circ}$, maka $\beta = 70^{\circ}$. Sehingga:

$$C = 520 (1 - 0.000051 (23.5)^2) = 505.4$$

Begitu juga dengan besaran e :

$$e = 0.430 (1 - 100 / T_{pm})$$

$$e = 0.430 (1 - 100 / 308) = 0.290$$

Sehingga koefisien kerugian dari atas dihitung dengan persamaan (Duffie & Beckman, 2013):

$$U_t = \left(\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1}$$

$$U_i = \left(\frac{1}{\frac{5054 \left[\frac{308-300}{1+1.661} \right]^{0.290} + 1}{7.8}} + \frac{1}{\frac{5.67 \cdot 10^{-8} (308-300)(308^2-300^2)}{1 + \frac{2 \cdot 1 + 1.661 - 1 + 0.133 \cdot 0.17}{0.17 + 0.005911 \cdot 7.8} - 1}} \right)^{-1}$$

$$U_i = 1.75 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Koefisien kerugian kalor dari samping kotak kolektor bisa diselesaikan dengan persamaan (Duffie & Beckman, 2013):

$$U_e = (U_{samping} \cdot A_{edge=samping}) / A_c$$

dimana, kalau persamaan di atas diselesaikan satu per satu bagian-bagiannya, akan didapat:

$$U_{samping} = k/L$$

Dimana:

k = konduktivitas termal isolasinya (*Styrofoam*)
= 0.035 W/m K

L = ketebalan isolasi samping (= 4cm = 0.04m)

Jadi:

$$U_{samping} = (0.035 \text{ W/m}^0\text{C}) / (0.04\text{m}) = 0.0014 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$A_{edge=samping} = (2 \cdot 1.2\text{m} + 2 \cdot 0.8\text{m}) \cdot 0.17\text{m} = 0.68 \text{ m}^2$$

$$A_c = 1.2\text{m} \cdot 0.8\text{m} = 0.96\text{m}^2$$

Sehingga, kerugian kalor yang hilang lewat samping adalah:

$$U_e = (0.0014 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 0.68\text{m}^2) / 0.96\text{m}^2 = 0.15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Koefisien kerugian kalor dari bawah kotak kolektor bisa diselesaikan dengan persamaan (Duffie & Beckman, 2013):

$$U_b = 1/R_4 = k/L$$

Sehingga:

$$U_b = (0.035 \text{ W/m}^0\text{C}) / (0.04\text{m}) = 0.88 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Bila ketiga jenis kerugian tadi dijumlahkan, akan didapatkan koefisien kerugian total kolektornya (Duffie & Beckman, 2013), yaitu:

$$U_L = U_i + U_b + U_e$$

$$U_L = 1.75 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} + 0.88 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} + 0.15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$U_L = 2.78 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Adapun radiasi total di permukaan miring bisa dihitung dengan (Duffie & Beckman, 2013):

$$I_T = (I_b + I_d \cdot A) \cdot R_b + I_a \cdot (1 - A) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)^* \left(1 + f \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Hanya saja, masih banyak besaran yang belum diketahui dan perlu dihitung lebih dulu, yaitu:

- Nilai n yang didapat dari tabel 1.6.1 (Duffie & Beckman, 2013), yaitu; $n = 59+i$ (tanggal 02 Maret), sehingga $n = 61$.
- Nilai δ didapat dari tabel yang sama; $\delta = -7.7^\circ$.
- Nilai ϕ yang didapat dari posisi Palembang, yaitu; $2^\circ 59' \text{ LS}$, sehingga $\phi = 3$.
- Nilai ω_s yang didapat dengan rumus:
 $\cos \omega_s = -\tan \phi \cdot \tan \delta = -\tan(3) \cdot \tan(-7.7)$
sehingga; $\omega_s = 89.59^\circ$
- Nilai ω_{s1} , ω_{s2} dan ω , dimana; $\omega_{s1} = -45^\circ$ (data pertama pada jam 09.00, dimana dalam 1 jam matahari bergeser 15°), $\omega_{s2} = -30^\circ$ (data pertama pada jam 10.00), dan $\omega = (-45^\circ + (-30^\circ)) / 2 = -37.5^\circ$ (sebagai nilai rata-rata).

- Nilai I_0 yang didapat dari:

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right)^* \left(\cos \phi \cdot \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \cdot \sin \delta \right)$$

$$I_0 = 3.705.285,49 \text{ J/m}^2$$

- Nilai R_b yang didapat dari:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta}$$

$$R_b = 0.83$$

- Nilai K_T yang didapat dari:

$$K_T = \frac{I}{I_0} = \frac{1.139.400,00}{3.705.285,49} = 0,308$$

- Nilai I_d/I dari (Duffie & Beckman, 2013):

$$\frac{I_d}{I} = 0,9511 - 0,1604K_T + 4,388K_T^2 - 16,638K_T^3 + 12,336K_T^4$$

$$\frac{I_d}{I} = 0,943$$

- Nilai I_d yang didapat dari:

$$I_d = 0,766 \cdot I$$

$$I_d = 0,766 \cdot 1.139.400,00 = 1.074.696,1$$

- Nilai I_b yang didapat dari:

$$I_b = (1 - 0,766) \cdot I$$

$$I_b = (1 - 0,766) \cdot 1.139.400,00 = 64.703,9$$

- Nilai A_i yang didapat dari:

$$A_i = \frac{I_b}{I_0} = \frac{64.703,9}{3.705.285,49} = 0,017$$

- Nilai f yang didapat dari:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} = \sqrt{\frac{64.703,9}{1.139.400,00}} = 0,238$$

Sehingga, bila semua nilai-nilai dan besaran-besaran yang sudah dihitung tadi dimasukkan ke persamaannya, akan didapatkan radiasi total pada permukaan miring:

$$I_T = (64.703,9 + 1.074.696,1 \cdot 0,017) \cdot 0,83 + 1.074.696,1 \cdot (1 - 0,017) \cdot \left(\frac{1 + \cos(23,5)}{2} \right) \cdot \left(1 + 0,238 \cdot \sin^3 \left(\frac{23,5}{2} \right) \right) + 1.139.400,00 \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{1 - \cos(23,5)}{2} \right)$$

$$I_T = 1.112.107,1$$

Selanjutnya, radiasi yang diserap bisa dihitung menggunakan persamaan (Duffie & Beckman, 2013):

$$S = I_b \cdot R_b(\tau\alpha)_b + I_d(\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g \cdot I(\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Hanya saja, masih banyak besaran yang belum diketahui dan perlu dihitung lebih dulu, yaitu:

- Untuk radiasi *beam*, pada $\theta = 5,06^\circ$

$$\theta = \frac{46 \left(\text{derajat gerak matahari dari U ke S} \right)}{182 \left(\text{hari gerak matahari dari U ke S} \right)} \cdot 20 \left(\text{selisih 2 ke 22 Maret} \right)$$

Dari Gambar 4.11.1 (Duffie & Beckman, 2013),

untuk $\theta = 5,06^\circ$, didapatkan $\frac{\alpha}{\alpha_n} = 0,99$, dan dari

Gambar 5.3.1 (Duffie & Beckman, 2013) didapatkan $\tau = 0,62$.

Sehingga:

$$(\tau\alpha)_b = 1,01 \cdot 0,62 \cdot 0,99 \cdot 0,60 = 0,372$$

- Untuk radiasi *diffuse*, didapat $\theta = 57,5^\circ$ dari Gambar 5.4.1 (Duffie & Beckman, 2013), dari Gambar 4.11.1 didapatkan $\frac{\alpha}{\alpha_n} = 0,94$. Lalu, dari Gambar 5.3.1 didapat $\tau = 0,72$, sehingga:

$$(\tau\alpha)_d = 1,01 \cdot 0,72 \cdot 0,94 \cdot 0,60 = 0,410$$

- Untuk radiasi *beam*, didapat $\theta = 78,5^\circ$ dari Gambar 5.4.1 (Duffie & Beckman, 2013), dari Gambar 4.11.1 didapatkan $\frac{\alpha}{\alpha_n} = 0,72$. Lalu dari Gambar 5.3.1 didapat $\tau = 0,22$, sehingga:

$$(\tau\alpha)_g = 1,01 \cdot 0,22 \cdot 0,72 \cdot 0,60 = 0,096$$

Sehingga, bila semua nilai-nilai dan besaran-besaran yang sudah dihitung tadi dimasukkan ke persamaannya, akan didapatkan:

$$S = 64.703,9 \cdot 0,83 \cdot 0,372 + 1.074.696,1 \cdot 0,410 \cdot \left(\frac{1 + \cos(23,5)}{2} \right) + 0,60 \cdot 1.074.696,1 \cdot \left(\frac{1 - \cos(23,5)}{2} \right)$$

$$S = 0,344 + 0,402 + 0,003 = 0,749$$

Dari semua hasil perhitungan yang sudah dilakukan maka perhitungan energi output kolektor suryanya adalah sebagai berikut:

$$Q_u = 0,96 \cdot [0,749 - 2,77 \cdot (35 - 27)]$$

$$Q_u = 427.302,6$$

Sedangkan efisiensi kolektor suryanya bisa dihitung sebagai berikut :

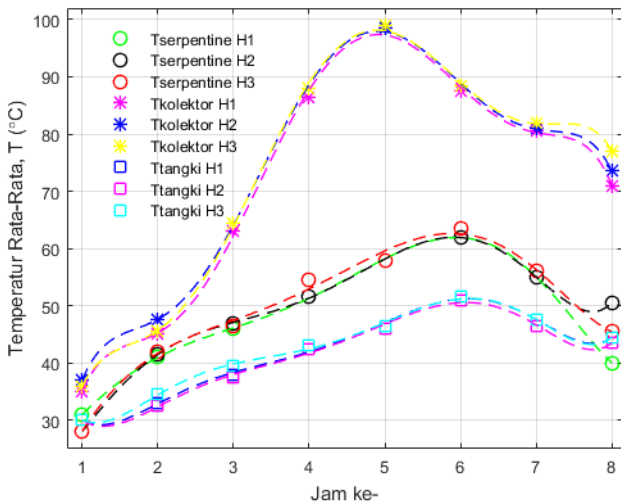
$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} = \frac{427.302,6}{1.112.107,1 \cdot 0,96} \cdot 100\%$$

$$\eta = 40,02 \%$$

4.2 Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan

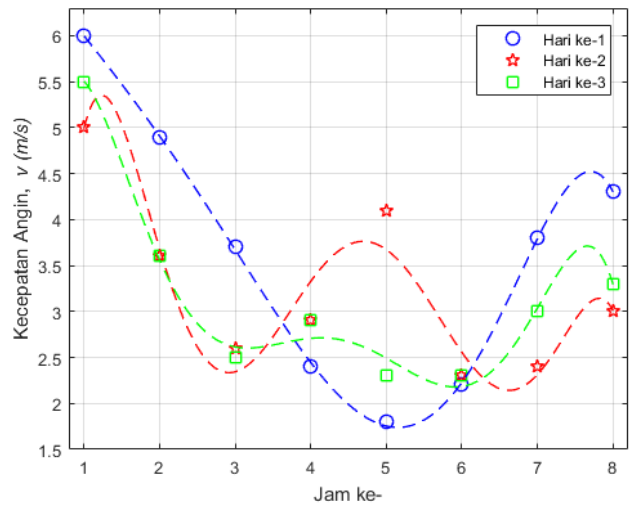
Dari Gambar 9, terlihat bahwa distribusi temperatur rata-rata (baik pada pipa *serpentine*, kotak kolektor, dan tangki penampung) untuk ketiga hari pengujian, polanya hampir sama. Pada pipa *serpentine* dan tangki penampung, temperatur terus mengalami kenaikan sejak jam ke-1 (pukul 09.00) hingga mencapai puncaknya pada jam ke-6 (pukul 14.00). Setelah itu, temperaturnya perlahan-lahan mengalami penurunan, dimana temperatur akhirnya (pada jam ke-8 atau pukul 16.00) hampir sama dengan temperatur pada jam ke-4 (pukul 12.00).

Sedangkan pada kotak kolektornya, temperatur mengalami kenaikan yang signifikan (dengan beda temperatur tertingginya bisa mencapai 23.5^oC atau dengan persentase kenaikan terbesar mencapai 41.8%), dimulai sejak jam ke-1 (pukul 09.00) hingga mencapai puncaknya pada jam ke-5 (pukul 13.00). Setelah itu, temperaturnya menurun 7 s.d. 10.5% untuk tiap jamnya (dengan temperatur rata-rata terakhir kotak kolektornya sebesar 73.83^oC pada jam ke-8 atau pukul 16.00).



Gambar 9 Temperatur pemanas air

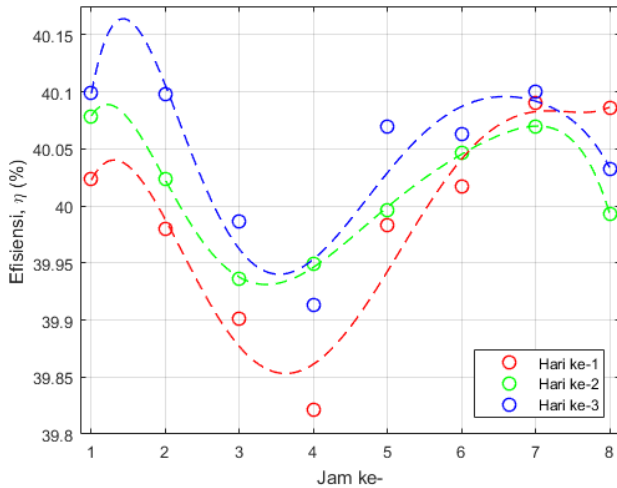
Fenomena perbedaan temperatur yang signifikan pada kotak kolektor (per jamnya) bisa dimaklumi karena di sinilah terjadinya sebagian besar perpindahan kalor. Di awal pengujian (pada jam 09.00) intensitas radiasi matahari dan temperatur lingkungan masih rendah, sehingga kalor yang masuk lebih banyak dipergunakan untuk memanaskan sistem pemanas airnya. Seiring peningkatan intensitas radiasi matahari (pada jam-jam selanjutnya), maka hal ini secara simultan akan meningkatkan perpindahan kalor dan sekaligus menaikkan temperatur di dalam kotak kolektor (diikuti dengan efek rumah kaca karena adanya penutup kaca di atas kotak kolektornya). Setelah mencapai titik maksimum (pada jam kelima atau jam 13.00), intensitas matahari akan menurun yang sekaligus menurunkan suhu kotak kolektornya.



Gambar 10 Kecepatan angin

Kecepatan angin juga berperan besar atas kenaikan temperatur kotak kolektor (seperti dapat dilihat pada Gambar 10). Pada awalnya kecepatan angin (pada jam 09.00) paling tinggi nilainya (6 m/s), sehingga banyak terjadi kerugian-kerugian (kalor yang hilang terbawa angin secara konveksi). Di jam selanjutnya, kecepatan anginnya menurun (berkisar antara 18.3% s.d. 35.1% per jamnya), sehingga kerugian-kerugian kalor akibat pengaruh angin menurun dan temperatur di dalam kotak kolektor meningkat. Setelah mencapai titik minimum (pada jam kelima atau jam 13.00), kecepatan anginnya naik kembali sehingga kerugian kalor secara konveksi (akibat pengaruh angin) meningkat dan berperan langsung menurunkan temperatur kotak kolektornya.

Sedangkan dari hasil perhitungan, didapatkan kurva efisiensi pada pemanas suryanya (Gambar 11). Dari gambar terlihat bahwa nilai efisiensinya berfluktuasi, hal ini sebagian besar dipengaruhi oleh intensitas matahari, posisi matahari (per jamnya), dan yang tak kalah penting adalah kerugian-kerugian (*losses*) akibat perpindahan kalor secara konveksi (seperti sudah dibahas sebelumnya). Efisiensi awal di kisaran angka 40% (untuk ketiga hari pengujian). Semakin mendekati siang hari efisiensi semakin turun (di kisaran 39.8%), hal ini menunjukkan kerugian-kerugian (akibat kehilangan kalor karena tiupan angin) cukup besar. Mendekati jam kelima (pukul 13.00) dan seterusnya, efisiensi mulai beranjak naik mendekati kisaran angka 40% tadi.



Gambar 11 Efisien pemanas air

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian pemanas air tenaga surya yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Performansi kerja termal kolektor surya pelat datar dipengaruhi oleh tiga hal, yaitu; intensitas matahari, posisi matahari (per jamnya), dan kerugian-kerugian (*losses*) akibat perpindahan kalor secara konveksi (akibat tiupan angin terhadap kotak kolektornya).
- Efisiensi maksimum dan minimum pemanas air tenaga suryanya adalah 40.10% dan 39.82%. Sedangkan efisiensi rata-ratanya adalah 40.02%.
- Kerugian akibat kehilangan kalor terbesar adalah pada daerah bagian atas kotak kolektornya (U_t). Dimana, nilai kerugian maksimumnya $U_t = 2.45 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (atau 70.62% dari seluruh kerugian yang terjadi), kerugian minimumnya $U_t = 1.75 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (63.19%), dan kerugian rata-ratanya adalah $U_t = 2.09 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (67.11%).
- Mengingat besarnya kerugian (*losses*) yang terjadi (terutama pada daerah bagian atas kotak kolektornya), maka perlu langkah preventif untuk mereduk-sinya. Cara terefektif adalah dengan pengkondisian ruang hampa (vakum) sehingga kalor di dalam kotak kolektor bisa diminimalisasi untuk keluar ke lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Okafor, Basil, 2013, *Thermo-siphon Solar Water Heater*, International Journal of Engineering and Technology Volume 3 No. 3 March, 2013
- Handoyo, Ekadewi A., 2000, *Perbandingan Konfigurasi Pipa Paralel dan Serpentine pada*

Unjuk Kerja Kolektor Surya Plat Datar, Jurnal Teknik Mesin Vol. 2, No. 1, April 2000 : 68 - 72

- Beghi, G, 1983, *Performance of Solar Energy Converters, Thermal Collectors and Photovoltaic Cells*, Dordrecht (Holland): D. Reidel Publishing Company.
- Cengel, Yunus A, 2002, *Heat Transfer: A Practical Approach*, New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Duffie, John A, dan Beckman, William A, 2013, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- Lienhard, John H. VI, Lienhard, John H. V, 2011, *A Heat Transfer Textbook*, Cambridge (US): Phlogiston Press.
- Noname, 2011, *Renewable Energy Technologies: Solar Energy Perspectives*, International Energy Agency, www.iea.org (diakses januari 2017)