

Efek Variasi Warna Lapisan Film pada Panel Solar-termal terhadap Proses Perpindahan Kalor

Edi Marzuki¹, Indra Resmana^{1,2}, Yogi Sirodz Gaos¹, Mulya Juarsa¹, Januar Akbar¹

¹*Engineering Development for Energy Conversion and Conservation (EDfEC)*
Research Laboratory

Fakultas Teknik Univeristas Ibn Khaldun Bogor
Jalan KH Sholeh Iskandar Bogor 16162
edi.marzuki@ft.uika-bogor.ac.id

²Mahasiswa Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jalan KH Sholeh Iskandar Bogor 16162

Abstrak

Pemanfaatan energi yang bersumber dari matahari sejak dahulu telah dimanfaatkan manusia untuk membantu proses kehidupan. Namun seiring perkembangan zaman, metode pemanfaatan energi matahari juga semakin berkembang. Energi matahari dimanfaatkan dalam bentuk gelombang menggunakan fotovoltaik dan secara radiasi menyimpan termal. Teknologi solar termal semakin berkembang, dan salah satunya pada pengembangan aspek panel solarnya. Sehingga perlu dilakukan penelitian terkait panel solar, khususnya pada lapisan film sebagai mediator di antara lingkungan dengan tabung (*tube*) kolektor. Penelitian dilakukan secara eksperimental mengenai pemanfaatan energi matahari dilakukan dengan mengkonstruksi fasilitas Solar Termal Eksperimental Aparatus (STEA FT-02). Selain itu STEA FT-02 digunakan untuk memahami fenomena sirkulasi alamiah dengan menghitung perpindahan kalor berdasarkan perbedaan temperatur pada daerah air dan es. Konstruksi STEA FT-02 terdiri dari bagian utama panel solar termal dan tangki reservoir. Panel solar termal terdiri dari tube kolektor panas, pelat alumunium, kaca yang dilapisi film. Panjang total tabung (*tube*) kolektor 2 meter dan ukuran kaca panel lebar 0,7 meter dan panjang 1,3 meter. Variasi eksperimen adalah perbedaan warna lapisan film yang dipasang pada kaca bagian dalam panel solar termal yaitu bening (non warna), kuning dan merah. Temperatur rata-rata air ($T_{rata2air}$) dan temperatur es (T_{es}) digunakan sebagai parameter yang diukur dan direkam dengan rentang waktu eksperimen selama 90 menit. Hasil eksperimen dan perhitungan menggunakan beberapa korelasi menunjukan, perpindahan kalor memiliki ketstabilan yang secara berturut-turut adalah 5,18 watt pada kaca film warna bening (non warna), 7,41 watt pada kaca warna kuning, dan 8,63 watt pada kaca warna merah. Perpindahan kalor memiliki karakteristik berbeda untuk setiap perbedaan warna lapisan film. Semakin gelap warna lapisan film maka semakin besar kalor yang diterima.

Keywords: termal, lapisan film, perpindahan kalor, warna, solar.

Pendahuluan

Sistem pembangkit daya yang menerapkan aplikasi teknik dari hukum fisika menjadi salah satu fokus pengembangan konversi energi dalam sistem energi terbarukan, salah satu konsep fisika yang digunakan untuk kasus konversi energi adalah *sirkulasi alamiah* (*natural circulation*). Prinsip kerja sistem sirkulasi alamiah mulai banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang, baik yang berhubungan dengan instalasi pembangkit listrik, sistem pengelolaan sumber energi, industri dan kebutuhan energi secara umum. Sistem pemanas air yang memanfaatkan panas akibat pancaran sinar matahari atau *solar thermal system* sudah sering ditemukan. Sistem *solar termal* umumnya terdiri dari; (a) kolektor panas matahari,

(b) tangki penyimpanan air atau fluida lain, (c) interkoneksi pipa, dan (d) fluida mengalir untuk memindahkan panas dari kolektor ke tangki penyimpanan (U.S. Department of Energy, USA, 2003).

Panel kolektor *solar termal* pada STEA FT-02 terdiri dari rangkaian pipa *stainless steel* yang ditempatkan pada sebuah kotak yang dilengkapi dengan penutup kaca yang berfungsi sebagai penangkap panas dari sinar matahari dan dapat panas agar tidak banyak keluar kembali, sedangkan tangki pada *solar thermal* berfungsi sebagai tempat penyimpanan air berinsulasi (*thermos*) yang mampu menahan penurunan panas seminimal mungkin pada saat matahari bersinar, panel kolektor menangkap pancaran sinar matahari dan secara mekanis mengalirkan panas ke pipa-pipa

tembaga yang berisi air, sehingga suhu air di dalamnya perlahan meningkat (<http://kamissore.blogspot.com/2010/01/cara-kerja-wika-solar-heater.html>, 24 September 2011).

Sistem pasif bekerja berdasarkan hukum fisika sehingga sirkulasi yang terjadi di dalam *loop* tidak memerlukan alat untuk menggerakan *fluida* karena aliran sirkulasi alamiah ditentukan oleh ketinggian *loop* dan perbedaan kerapatan *fluida* sebagai konsekuensi perbedaan temperatur (panas dan dingin) pada dua titik di dalam *loop* (William, K. et al., 2004).

Pemahaman konsep sirkulasi alamiah dengan memanfaatkan panas matahari dan bagian pendinginannya perlu dilakukan karena perpindahan kalor baik secara konduksi, konveksi, dan radiasi pada sistem *solar thermal* akan mempengaruhi gerakan air pada penampung, dan lapisan warna film pada panel *solar thermal* akan mempengaruhi perpindahan kalor di bagian dingin (tangki pendingin). Penelitian terkait kinerja tangki penampung (*reservoir*) sebagai sistem pendingin pada rangkaian *solar thermal* karenanya perlu dilakukan.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

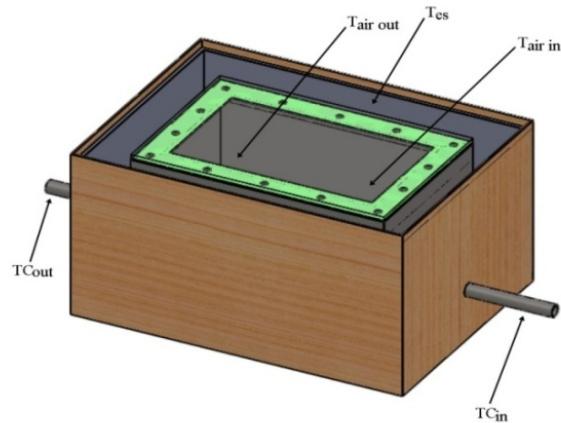
Metode Eksperimen

Metode penelitian dilakukan secara eksperimental tentang pemanfaatan energi panas yang ditimbulkan oleh pancaran sinar matahari menggunakan Solar Termal Eksperimental Aparatus (STEA FT-02) yang merupakan salah satu fasilitas yang ada di laboratorium riset *Engineering and Development for Energy Conversion and Conservation (EDfEC)*. Pembacaan dan perekaman selama eksperimen berlangsung menggunakan *National Instrument Data Acquisition System (NI-DAQ)*.

Fasilitas Eksperimen

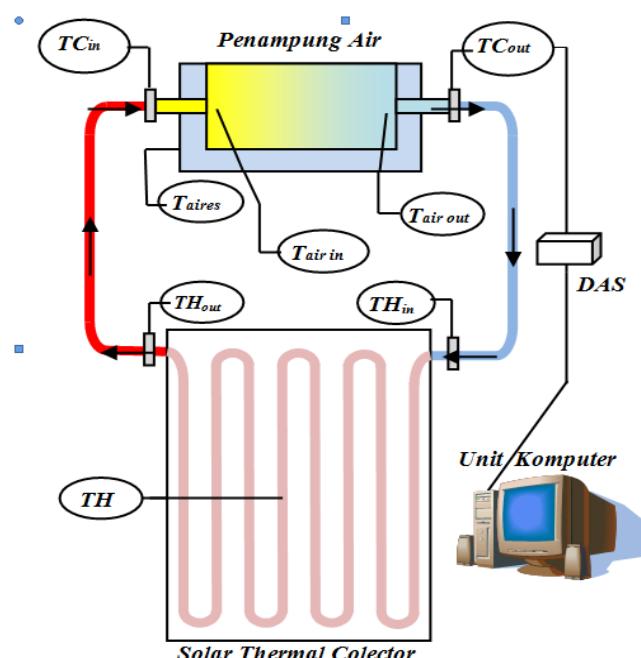
STEA FT-02 dikonstruksi pada tahun 2009 yang terdiri dari tangki penyimpanan air yang dibuat berbentuk dua buah kotak (kotak bagian dalam sebagai penampung air, dan kotak bagian luar sebagai penampung air yang diberi es), kotak penampung air berukuran panjang (*l*) 300 mm, lebar plat (*w*) 200 mm, tinggi plat (*h*) 150 mm, dan berbahan plat SS 304 dengan tebal bahan (*t*) 1.8 mm, kotak ini dilengkapi dengan dua buah pipa SS 304 dengan panjang (*l*) 200 mm dengan diameter luar (*d*) 1 inchi (25,4 mm) yang berfungsi sebagai bagian masukan dan keluaran atau *inlet* dan *outlet* aliran air dari bagian *solar colector*, sedangkan kotak penampung air yang dicampur dengan es berukuran panjang (*l*

420 mm, lebar (*w*) 320 mm, tinggi (*h*) 220 mm, dan berbahan *fiber glass* dengan tebal bahan (*t*) 5 mm. Adapun bentuk dari kedua kotak ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tangki *reservoir* (Mauludin, Achmad Saleh, 2010)

Peralatan yang digunakan untuk mncatat hasil pengukuran temperatur menggunakan termokopel tipe *K* dan yang direkam menggunakan *National Instrument Data Acquisition System (DAS)* dengan tipe *WinDaQ T1000* dengan *sampling rate* 1 data per-detik pada 8 kanal (dalam makalah ini data hanya ditampilkan $T_{air\ in}$, $T_{air\ out}$, dan T_{es}). Fasilitas eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Instalasi *solar termal eksperimen aparatus (STEA) FT-02*

Prosedur Eksperimen

Eksperimen dimulai dengan memasang selang (*hose*) pada pipa *inlet* dan *outlet*, lalu mengisi tangki

penampung dengan air, mengatur perangkat kontrol *DAS* (*data acquisition system*), memasukan bongkah es yang telah dihancurkan dalam tangki *reservoir* sebagai sumber pendinginan alami, menyalakan *DAS* untuk merekam data, memasukan tinta pewarna penanda arah aliran, setelah data didapat dilanjutkan dengan mengganti warna lapisan film pada panel *solar thermal*, dan melanjutkan kembali dengan pengambilan data dengan urutan langkah kerja yang sama.

Perhitungan

Hasil pengamatan perbedaan temperatur antara kotak air dan kotak es dikonversi menjadi perpindahan kalor menyeluruh seperti persamaan (1).

$$\begin{aligned} q &= h_1 A(T_A - T_1) \\ &= \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2) \\ &= h_2 A(T_2 - T_B) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1)$$

q (watt) adalah perpindahan kalor, h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) adalah koeisien perpindahan kalor konveksi, A (m^2) adalah luas penampang, k (W/mK) adalah konduktivitas thermal bahan. Sehingga perpindahan kalor dihitung dengan jalan membagi beda temperatur menyeluruh dengan jumlah tahanan *thermal*, seperti yang diuraikan melalui korelasi (2) (Welty, James R., et al, 2002).

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

Nilai $1/hA$ menunjukkan tahanan konveksi. Aliran kalor menyeluruh adalah gabungan proses konduksi dan konveksi yang dinyatakan dengan koefisien perpindahan kalor menyeluruh U , sehingga diperoleh korelasi (3)(Holman, J.P, 1981).

$$q = UA\Delta T_{menyeluruh} \quad \dots \dots \dots (3)$$

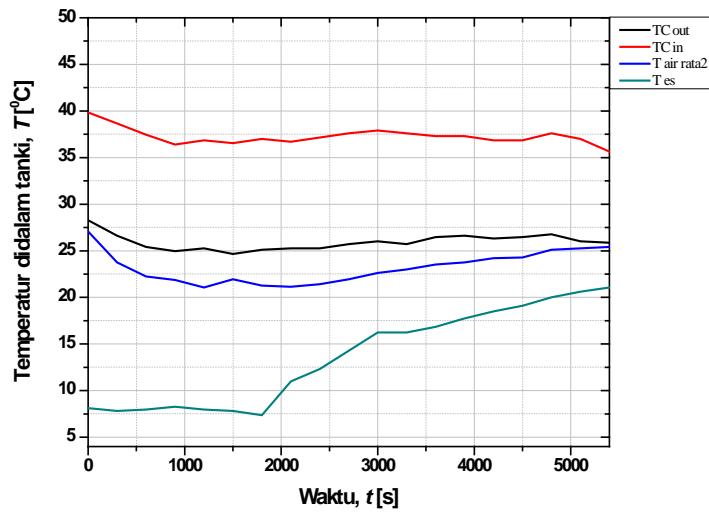
Dimana U ialah total perpindahan kalor koefisien dan A (m^2) ialah luas penampang. Kemudian korelasi (2) dan korelasi (3) diperoleh korelasi (4), sebagai berikut;

$$q = \frac{A(\bar{T}_{air} - T_{es})}{\frac{2}{h_{air}} + \frac{t}{K_{ss}}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

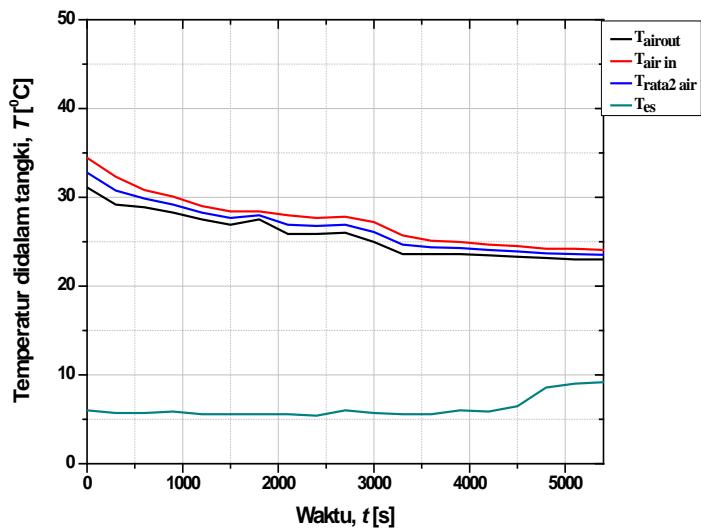
Dimana q (watt) perpindahan kalor, t (m) adalah tebal, h_{air} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) adalah koefisien konveksi air, dan K_{ss} (W/mK) adalah konduktifitas thermal bahan.

Hasil dan Pembahasan

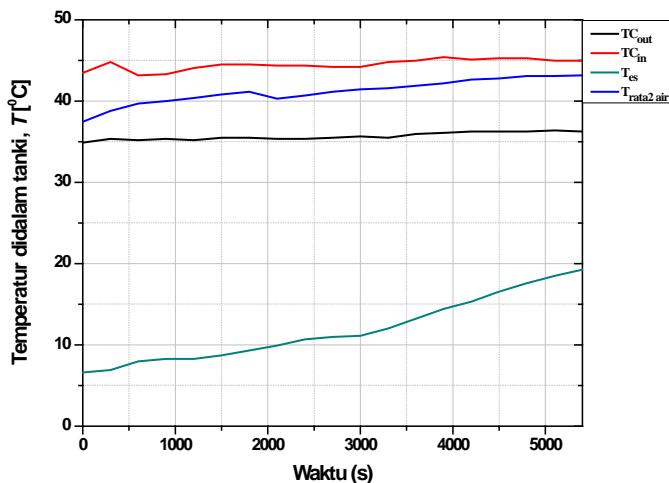
Hasil pengukuran pada dasarnya dilakukan pada 8 titik pengukuran, untuk penelitian ini hanya 3 titik pengukuran temperatur saja yang ditampilkan. Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 menunjukkan hasil pengukuran $T_{air in}$, $T_{air out}$, dan T_{es} serta rata-rata dari $T_{air in}$ dan $T_{air out}$ berdasarkan variasi warna film secara berturut-turut dari bening (non warna), kuning, dan merah.



Gambar 3. Temperatur air dalam tangki penampungan air menggunakan lapisan film tidak berwarna (bening)



Gambar 4. Temperatur air dalam tangki penampungan air menggunakan lapisan film berwarna kuning



Gambar 5. Temperatur air dalam tangki penampungan air menggunakan lapisan film berwarna merah.

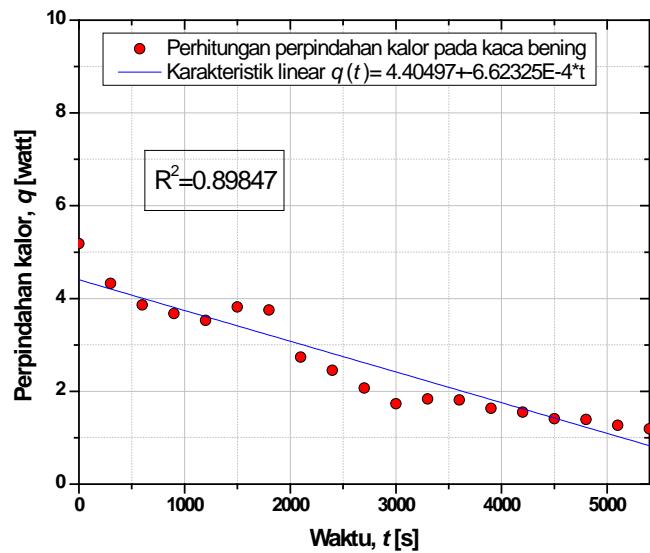
Fenomena perubahan temperatur selama 90 menit dapat dijelaskan sebagai berikut, pada Gambar 3 untuk kaca bening (tanpa warna) penurunan TC_{in} dan TC_{out} dengan cepat dan cukup tajam dimulai dari 0 detik hingga sekitar 900 detik temperatur TC_{in} dan TC_{out} yang semula 40°C dan 28°C turun menjadi 36°C dan 25°C. kemudian temperatur mulai stabil, dari 900 detik hingga 5400 detik, meski pada detik ke 4700, temperatur turun sekitar 5°C. Sedangkan pada T_{es} terjadi kenaikan temperatur dengan cepat dan cukup tajam dimulai dari 1900 detik hingga sekitar 3000 detik yang semula 6°C naik menjadi 16°C, kemudian temperatur naik kembali dan cukup tajam dari 3400 detik hingga 5400 detik yang semula 16°C naik menjadi 21°C. Sedangkan pada kaca kuning (Gambar 4) menunjukkan penurunan pada TC_{in} dengan cepat sehingga dimulai dari 0 detik hingga sekitar 900 detik yang semula 39°C turun menjadi 36°C, kemudian temperatur TC_{in} perlahan terus naik dari 900 detik hingga 5400 detik, $T_{air\ out}$ pada detik 3200 detik hingga 5400 detik menunjukkan penurunan yang semula 39°C turun menjadi 35°C, pada T_{es} menunjukkan kenaikan yang cukup cepat dari 4400 detik hingga 5400 detik yang semula 6°C naik menjadi 9°C. Sedangkan pada kaca merah (Gambar 5) T_{es} mengalami peningkatan yang relatif cepat dari 0 detik sampai detik terakhir.

Pembahasan

Perpindahan Kalor

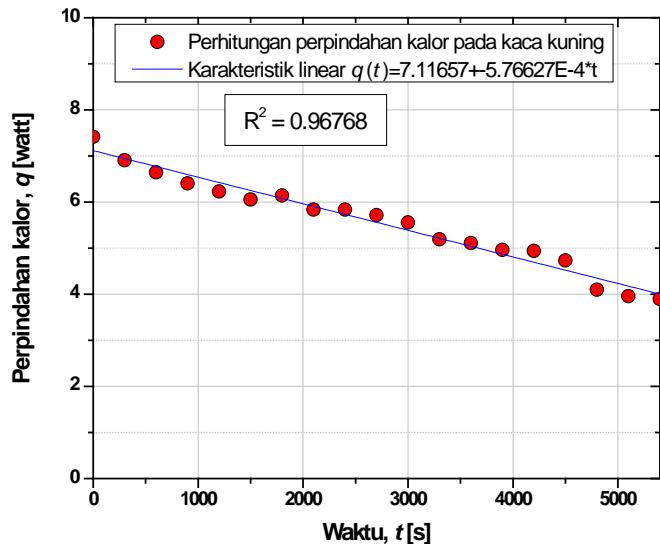
Data hasil pengukuran temperatur pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5, dan perpindahan kalor berdasarkan beda temperatur tersebut dimasukan ke dalam persamaan (4) dengan terlebih dahulu

menghitung luas bidang (A) dan panjang bidang (l). Hasil perhitungan diperlihatkan pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8 untuk setiap warna lapisan film.



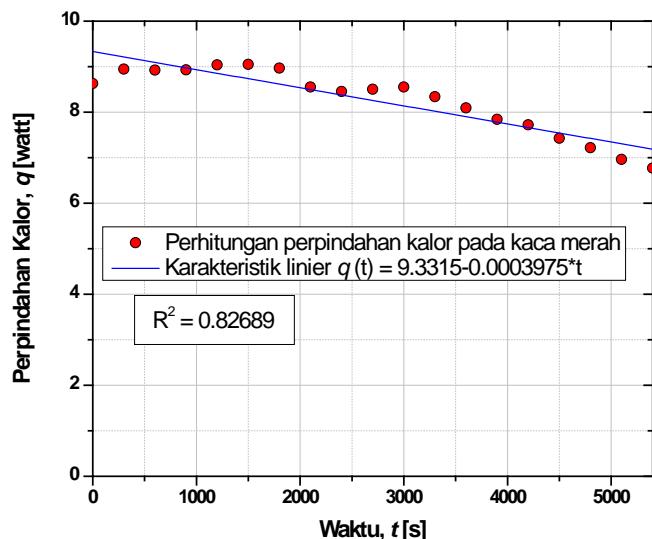
Gambar 6. Kurva perpindahan kalor terhadap waktu pada penggunaan lapisan film tidak berwarna (bening)

Perpindahan kalor kaca bening (Gambar 6) menunjukkan penurunan dari 0 detik sampai 5400 detik yang semula 5,18 watt turun menjadi 1,12 watt.



Gambar 7. Kurva perpindahan kalor terhadap waktu pada penggunaan lapisan film berwarna kuning

Perpindahan kalor kaca kuning (Gambar 7) menunjukkan penurunan dimulai dari 0 detik sampai 5400 detik yang semula 7,4 watt turun menjadi 3,8 watt.



Gambar 8. Kurva perpindahan kalor terhadap waktu pada penggunaan lapisan film berwarna merah

Perpindahan kalor kaca merah (Gambar 8) menunjukkan penurunan dimulai dari 0 detik sampai 5400 detik yang semula 8,6 watt turun menjadi 6,7 watt.

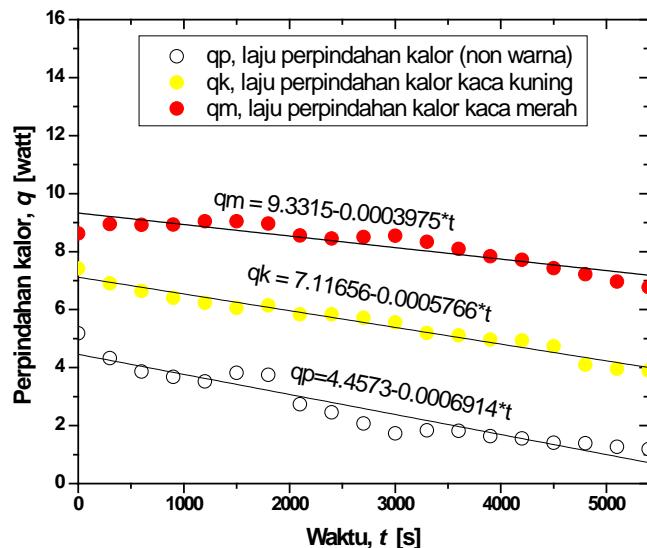
Gambar 6, Gambar 7, Gambar 8 menunjukkan perpindahan kalor menurun diakibatkan daerah es sudah terlalu banyak menerima kalor dari daerah air dan tidak terjadi keseimbangan antara masukan panas dari TH terhadap masukan dingin dari T_{es} .

Korelasi linier perpindahan kalor terhadap waktu masing-masing warna yang diperoleh adalah:

- Lapisan film tidak berwarna (bening):
 $q(t) = 4.40497 - 6.62325E-4*t$
tingkat kepercayaan $R^2 = 0,89847$
- Lapisan film berwarna kuning:
 $q(t) = 7.11657 - 5.76627E-4*t$
tingkat kepercayaan $R^2 = 0,96768$
- Lapisan film berwarna merah:
 $q(t) = 9.3315 - 0.0003975*t$
tingkat kepercayaan $R^2 = 0,82689$

Perbandingan perpindahan kalor terhadap warna lapisan film

Hasil perhitungan berdasarkan perbedaan warna lapisan film menunjukkan nilai perpindahan kalor yang berbeda antara warna bening (non warna), warna kuning dan warna merah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva perbandingan perpindahan kalor terhadap warna lapisan film

Gambar 9 menunjukkan kurva perbandingan nilai perpindahan kalor berdasarkan beda warna lapisan film, dimana terlihat bahwa perpindahan kalor kaca merah berada di atas dengan waktu 0 detik 8,6 watt, kaca kuning di tengah dengan waktu 0 detik 7,4 watt, dan kaca bening paling bawah dengan waktu 0 detik 5,18 watt. Penyebabnya adalah perbedaan intensitas cahaya terhadap warna, semakin gelap warna lapisan film maka semakin besar panas yang diterima.

Kesimpulan

Hasil studi eksperimental perpindahan kalor dibagian dingin berdasarkan variasi warna lapisan film pada panel sistem *solar termal*, menyimpulkan bahwa karakteristik perpindahan kalor dipengaruhi oleh perbedaan temperatur pada daerah tangki yaitu daerah air dan daerah es, kemudian perpindahan kalor tertinggi 9 watt dan beda temperatur rata-rata 29,29°C untuk lapisan warna merah,. Perpindahan kalor minimal terjadi pada lapisan kaca bening (non warna) 1,12 watt dan beda temperatur rata-rata 9,29°C. Intensitas cahaya terhadap warna lapisan film sangat mempengaruhi perpindahan kalor.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Riset *EDfEC*, Dosen peneliti, Asisten Peneliti, dan mahasiswa yang tergabung *EDfEC Research Group* yang telah membantu sehingga makalah ini bisa terselesaikan.

Nomenklatur

Q	Perpindahan kalor (W)
L	Panjang permukaan (m)
K_{ss}	Konduktivitas termal ss 304 (W/m.K)
A	Luas (m^2)
c_p	Kalor spesifik air (kJ/kg.K)
T	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
U	<i>Overall heat transfer coefisien</i>
Δx	Tebal dinding (m)
h_{air}	Koefisien konveksi air (W/ $m^2\text{K}$)

Referensi

Holman, J.P, *Heat Transfer (fifth edition)*, McGraw-Hill book company, New York, 1981.

<http://kamissore.blogspot.com/2010/01/cara-kerja-wika-solar-heater.html>, 24 September 2011.

James R. Welty, Charles E. Wicks, Robert E. Wilson, Gregory Rorrer, *Fundamental of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 4th edition, John & Sons, Inc., New York, 2002.

Kays, William; Crawford, Michael; Weigand, Bernhard, *Convective Heat and Mass Transfer*, 4E. McGraw-Hill Professional, New York, 2004.

Mauludin, Achmad Saleh, *Analisis perpindahan panas konveksi pada air di dalam tangki reservoir berbasis sistem solar heater*, Fakultas Teknik UIKA Bogor, Bogor, 2010.

The National Renewable Energy Laboratory, *Heat Your Water with The Sun, A Consumer's Guide*, Energy Efficiency and Renewable Energy, DOE/GO-102003-1824, U.S. Department of Energy, USA, December 2003.