

Studi Termodinamika Air, Methanol dan Ethanol untuk Aplikasi Kolektor Surya Menggunakan Pipa Kalor

Djuanda, Amiruddin, Muhsin Z.

Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar
022-2502342, djuanda89@yahoo.com

Abstrak

Salah satu alat yang dapat mengubah radiasi matahari menjadi bentuk energi termal adalah kolektor surya. Intensitas radiasi matahari yang diterima kolektor surya tidak kontinu tetapi berfluktuasi karena adanya hambatan cuaca. Salah satu cara untuk mengatasi fluktuasi radiasi maka digunakan kolektor surya pipa kalor uap bersirkulasi, sehingga kalor dapat segera dipindahkan secara cepat. Fluida kerja yang dipergunakan juga bersifat khusus, oleh karena itu diperlukan kajian khusus mengenai sifat termodinamika dari fluida kerja yang digunakan. Kajian meliputi sifat entalpi, tekanan, konduktifitas, dan viskositas fluida. Hasil penelitian yang dilakukan dengan mengkaji sifat termodinamika menghasilkan beberapa studi fluida kerja yaitu air, methanol dan ethanol. Temperatur fluida diberikan antara 30 sampai 100°C. Dengan meningkatnya temperatur fluida maka tekanan dan entalpi fluida akan semakin tinggi sedangkan viskositas akan menurun. Entalpi uap dari fluida cenderung konstan seiring dengan meningkatnya temperatur. Entalpi terbesar dihasilkan oleh air kemudian oleh ethanol dan methanol.

Kata kunci: absorpsi, pendingin, hidrokarbon, mineral oil, termofisik

1. PENDAHULUAN

Sebagai negara tropis, Indonesia diuntungkan dengan potensi energi surya yang melimpah sepanjang tahun. Potensi radiasi rata-rata harian mencapai 4,8 kWh/m² (Departemen dan Energi, 2003) yang sebagian besar belum dimanfaatkan. Hanya sebagian kecil dimanfaatkan menjadi energi listrik (*fotovoltaik*) serta pemanas air. Pemanfaatan terbesar justru dilakukan secara tradisional untuk pengeringan hasil pertanian dan perikanan.

Salah satu alat yang dapat mengubah radiasi matahari menjadi bentuk energi termal adalah kolektor surya. Intensitas radiasi matahari yang diterima kolektor surya tidak kontinu tetapi berfluktuasi karena adanya hambatan cuaca. Salah satu cara untuk mengatasi

fluktuasi radiasi maka digunakan kolektor surya yang responsif, agar kalor dapat segera dipindahkan secara cepat. Dari berbagai tipe solar kolektor tetap yang ada maka kolektor tipe plat datar dengan menggunakan pipa kalor menjadi pilihan dalam penelitian ini.

Kolektor surya tipe plat datar dengan pipa kalor telah banyak diteliti sejak beberapa tahun yang lalu. Penelitian rata-rata menfokuskan pada fluida kerja yang digunakan, aplikasi pemanfaatan, serta karakteristik dan performansi dari kolektor surya. Konfigurasi utama dari solar kolektor yang ada dewasa ini menggunakan dua fluida kerja, yaitu fluida kerja primer yang digunakan dalam pipa kalor dan fluida kerja sekunder yang

berfungsi memindahkan kalor dari fluida primer ke sistem lain.

Dengan menggunakan konfigurasi kolektor surya seperti yang ada saat ini, maka akan terdapat beberapa kelemahan mendasar, yaitu: (1) respon dan performansi dari kolektor surya sangat dipengaruhi oleh efektifitas kondensor dalam memindahkan kalor dari fluida primer ke fluida sekunder; (2) karakteristik dan performansi dari kolektor surya sangat bergantung pada karakteristik fluida sekunder; (3) fabrikasi sangat menyulitkan terutama bila diinginkan menggunakan fin pada kondensor untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan kalor; serta (4) kemungkinan kebocoran fluida sekunder pada kolektor surya sangat tinggi.

Dalam penelitian ini diusulkan penggunaan konfigurasi baru kolektor surya yaitu hanya menggunakan satu fluida kerja yang berfungsi sebagai fluida primer sekaligus sebagai fluida sekunder. Dengan konfigurasi ini berbagai kelemahan yang ada dapat diminimalkan. Penelitian meliputi kajian fluida kerja yang digunakan, konfigurasi kolektor surya, desain kolektor surya dan performansi kolektor surya. Dari penelitian ini diharapkan diperoleh kolektor surya tipe plat datar dengan pipa kalor yang lebih efisien dibandingkan yang ada saat ini.

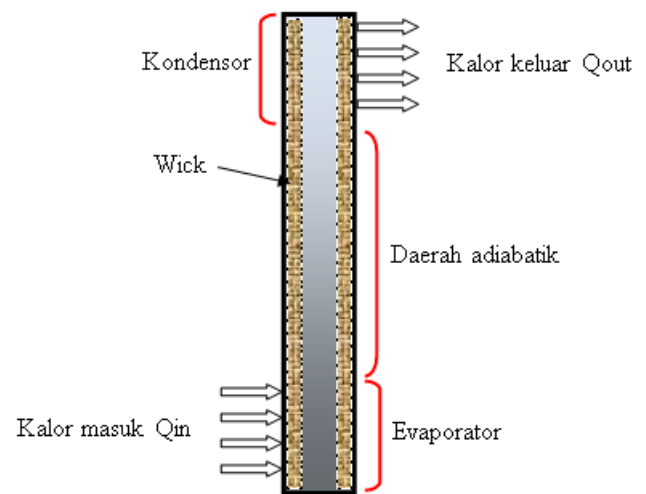
2. STUDI PUSTAKA

Pipa kalor adalah salah satu cara untuk meningkatkan perpindahan kalor. Peningkatan ini diperoleh disebabkan perpindahan kalor yang terjadi berdasarkan perubahan fasa dari fluida kerjanya. Ini berarti dengan dimensi yang sama terhadap pipa biasa akan diperoleh perpindahan kalor yang lebih tinggi bila sistem menggunakan pipa kalor.

Aplikasi pipa kalor dewasa ini sudah sangat beragam. Sebagai contoh dalam bidang konservasi energi untuk daur ulang buangan gas panas, dan aplikasi industri serta pendingin komputer (Moon

dkk., 2002), meningkatkan perpindahan kalor pada chip elektronik (Launay dkk., 2004), konversi energi, luar angkasa, serta penggunaan pipa kalor di kolektor surya.

Beberapa jenis pipa kalor yang ada saat ini antara lain adalah pipa kalor konvensional, pipa kalor panel, pipa kalor loop, *vapour-dynamic* termosifon, pipa kalor mikro, pipa kalor berputar dan sebagainya. Prinsip kerja dari pipa kalor dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip kerja pipa kalor

Pipa kalor adalah pipa maupun susunan pipa yang berfungsi sekaligus sebagai evaporator dan kondensor. Fluida kerja diisikan ke dalam pipa dengan perbandingan rasio pengisian (*fill ratio*) tertentu, selain itu dapat juga ditambahkan *wick* sebagai saluran bagi cairan untuk kembali ke evaporator. Fluida kerja akan menguap ketika kalor masuk ke bagian evaporator, uap kemudian akan bergerak ke sisi kondensor dan melepaskannya ke fluida pendingin. Fluida kerja kemudian akan mengalami perubahan fasa ke cair dan akan turun kembali melalui sisi permukaan pipa maupun *wick*.

Pipa kalor pertama kali digunakan oleh R.S. Gaugler pada tahun 1942 (Dunn dan Reay, 1982). Akan tetapi perkembangannya semakin diperhatikan berbagai kelebihan pipa kalor berhasil diungkapkan oleh G. M. Grover pada awal

tahun 1960an. Kelebihan utama dari pipa kalor adalah:

1. Daya hantar termal yang sangat tinggi (*very high thermal conductance*)
2. Memiliki kemampuan sebagai transformator fluks termal (*thermal flux transformer*)
3. Permukaan isothermal dengan impedansi yang rendah.

Agar pipa kalor dapat beroperasi dengan baik maka *capillary pumping head* maksimum $(\Delta P_c)_{max}$ haruslah lebih besar dari total penurunan tekanan yang terjadi. Komponen yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan terdiri dari:

1. Penurunan tekanan ΔP_l yang dibutuhkan agar cairan dari kondensor dapat kembali ke evaporator
2. Penurunan tekanan ΔP_v yang mengakibatkan uap mengalir dari evaporator ke kondensor
3. Beda grafitasi ΔP_g yang dapat bernilai negatif, positif, atau nol.

Sehingga:

$$(\Delta P_c)_{max} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (1)$$

Jika kondisi ini tidak terpenuhi maka *wick* akan mengering di daerah evaporator dan pipa kalor tidak akan bekerja.

Untuk media porous persamaan Blake-Kozeny memberikan hubungan antara penurunan tekanan sepanjang porous, yaitu:

$$\Delta P_l = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2 l_{eff} v}{D^2 \varepsilon r^3} \quad (2)$$

Dimana v adalah kecepatan permukaan

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho_l A} \quad (3)$$

Dan ε' adalah perbandingan antara ruang kosong dan lubang porous.

Persamaan Cotter dan Busse dipergunakan untuk menentukan penurunan tekanan uap total untuk aliran inkompresibel:

$$\Delta P_v = -\frac{8\mu_v \dot{m}}{\rho_v r_v^4} \left[l_a + \frac{l_e + l_c}{2} \right] \quad (4)$$

Serta beda tekanan hidrostatik:

$$\Delta P_g = \rho_l g l \sin \phi \quad (5)$$

Dimana ϕ adalah sudut yang dibentuk antara pipa kalor dan bidang horisontal.

Perpindahan kalor maksimum dalam pipa kalor ditentukan dengan persamaan:

$$Q_{max} = \dot{m}_{max} L \quad (6)$$

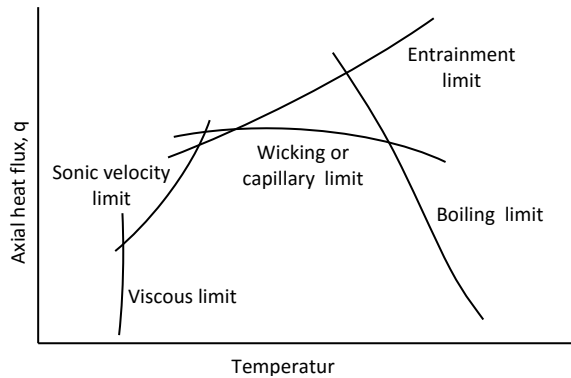
Dimana :

$$\dot{m}_{max} = \frac{\rho_l K A_w}{\mu_l l_{eff}} \left(\frac{2\sigma_l}{r_c} \cos \theta - \rho_l g l_{eff} \sin \phi \right) \quad (7)$$

Dan L adalah entalpi penguapan fluida kerja.

Selama masa kerja awal dan temperatur tinggi maka kecepatan uap dapat mencapai kecepatan suara, pada kondisi ini efek kompresibilitas harus diperhitungkan. Kondisi sonik menjadi salah satu faktor kemampuan perpindahan kalor maksimum yang dimungkinkan oleh pipa kalor. Beberapa faktor lain yaitu pada temperatur rendah oleh gaya viskos, limit peningkatan temperatur dibatasi oleh *entrainment limit*, *capillary limit* dan *burn out*.

Pembatasan kemampuan perpindahan kalor ini diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pembatasan pada perpindahan kalor dalam pipa kalor (Dunn dan Reay, 1982)

Aplikasi pipa kalor pada solar kolektor juga telah banyak dikaji dan dipublikasikan, Beberapa kajian itu antara lain oleh Rittidech dan Wannapakne (2007) yang menggunakan pompa kalor oskilasi (*oscillating heat pipe*) dengan fluida kerja adalah R-134a. Efisiensi kolektor surya yang dapat dicapai 62%.

Huang dkk. (2005) menggunakan kolektor surya pipa kalor yang dikombinasikan dengan pompa kalor untuk pemanas air. Pompa kalor dioperasikan bila radiasi matahari terlalu rendah untuk menyuplai pemanas air, dan pipa kalor dioperasikan bila radiasi matahari tinggi. Operasi hibrid ini akan meningkatkan COP sistem menjadi 3,32 dibandingkan dengan

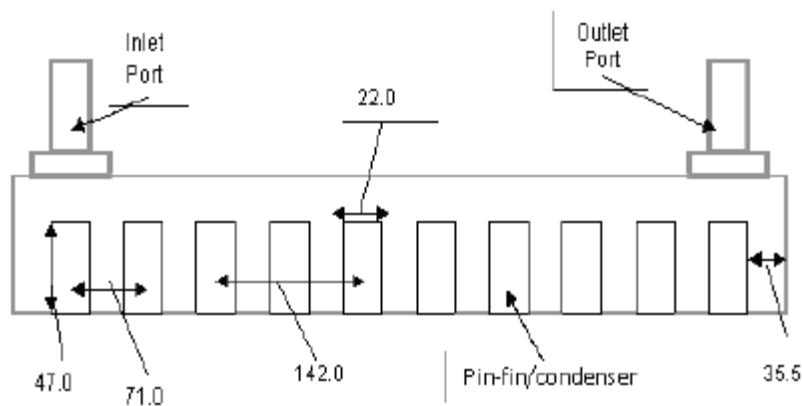
hanya menggunakan pompa kalor yaitu 2,58.

Yoga (2010) telah membuat dan menguji sistem kolektor surya pipa kalor tipe plat datar. Fluida kerja yang digunakan adalah air dan tidak menggunakan wick. Dengan menggunakan dua kolektor surya yang disusun secara seri temperatur air keluar kolektor dapat mencapai 80°C untuk laju aliran $0,004 \text{ kg/s}$.

Kolektor surya pipa kalor tipe plat datar juga dipergunakan oleh Facao dan Oliveira (2005), analisa numerik dengan menggunakan pendekatan quasi-steady state dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari pengujian. Penelitian menunjukkan efisiensi kolektor mencapai 64% dan koefisien kehilangan kalor keseluruhan kolektor $5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Persamaan efisiensi yang diperoleh dari hasil pengujian diberikan dengan:

$$\eta_{sc} = 0,64 - 5,5 \frac{T_{fm} - T_a}{I} \quad (8)$$

Kolektor surya pipa kalor tipe tabung vakum telah dipergunakan oleh Redpath dkk. (2008) untuk pemanas air. Konstruksi kondensor dan saluran masuk-keluar aliran air ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Konstruksi kondensor dan saluran masuk-keluar aliran air (Redpath dkk., 2008)

Konstruksi yang mirip juga dipergunakan oleh berbagai penelitian lain seperti Walker dkk. (2004), maupun yang telah ada dipasaran seperti yang dibuat oleh *Kingspan Solar*, *SolarCollect*, dan *Sussex Solar* (2011).

3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan umum penelitian ini adalah menghasilkan studi termodinamika campuran air-methanol yang sesuai digunakan pada pipa kalor uap bersirkulasi. Studi dimaksudkan untuk mengenai sifat dasar dari campuran sehingga nantinya efisiensi kolektor surya yang akan dihasilkan akan memiliki efisiensi yang tinggi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian tahap pertama mengkaji fluida kerja yang digunakan pada pipa kalor. Tujuan akhirnya adalah menentukan jenis fluida kerja yang sesuai digunakan pada kolektor surya dengan menggunakan pipa kalor sebagai basis sistem. Kajian meliputi sifat termodinamika dan sifat transport dari fluida. Penelitian menggunakan program Refrop 8 untuk mengetahui perbandingan berbagai sifat termodinamika dari fluida kerja.

Syarat utama yang harus dipenuhi oleh fluida kerja pipa kalor adalah:

- 1) Kompatibel dengan material pipa dan wick
- 2) Stabilitas termal yang baik
- 3) Material pipa dan wick terbasahi secara baik

- 4) Tekanan uap tidak boleh terlalu tinggi maupun terlalu rendah untuk daerah kerja yang dibutuhkan
- 5) Kalor laten yang tinggi
- 6) Konduktifitas termal yang tinggi
- 7) Viskositas uap dan cair yang rendah
- 8) Tegangan permukaan yang tinggi
- 9) Titik didih dan cair yang sesuai

Beberapa fluida kerja yang biasa digunakan pada pipa kalor untuk berbagai daerah temperatur kerja diberikan pada Tabel 1. Data menunjukkan erbagai jenis fluida yang telah digunakan secara luas untuk berbagai daerah temperatur kerja. Untuk daerah temperatur rendah terdapat fluida kerja seperti helium, ammonia, nitrogen dan pentane. Sedangkan untuk temperatur kerja dari rendah sampai medium temperatur terdapat acetone, methanol, Fluotech, air dan lainnya. Untuk Temperatur tinggi biasanya dipergunakan logam cair seperti perak, lithium, sodium dan sebagainya.

Penggunaan pipa kalor untuk aplikasi kolektor surya membutuhkan daerah temperatur kerja antara 30 sampai 150°C. Sehingga kajian penelitian akan berfokus pada fluida air, ethanol dan methanol. Hal lain yang mesti diperhatikan dalam pemilihan fluida kerja adalah kompatibilitas fluida terhadap material yang dipergunakan seperti pipa, katup, pompa dan lainnya. Hal ini disebabkan beberapa fluida kerja tidak sesuai dipergunakan untuk beberapa material seperti penggunaan ammonia tidak sesuai untuk tembaga karena akan menyebabkan terjadinya korosi.

Tabel 1. Beberapa fluida kerja yang biasa dipergunakan di pipa kalor (Reay, D.A.Dunn, P., 2006)

Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos. press. (°C)	Useful range (°C)
Helium	-271	-261	-271 to -269
Nitrogen	-210	-196	-203 to -160
Ammonia	-78	-33	-60 to 100
Pentane	-130	28	-20 to 120
Acetone	-95	57	0 to 120
Methanol	-98	64	10 to 130
Flutec PP2 ¹	-50	76	10 to 160
Ethanol	-112	78	0 to 130
Heptane	-90	98	0 to 150
Water	0	100	30 to 200
Toluene	-95	110	50 to 200
Flutec PP9 ¹	-70	160	0 to 225
Thermex ²	12	257	150 to 350
Mercury	-39	361	250 to 650
Caesium	29	670	450 to 900
Potassium	62	774	500 to 1000
Sodium	98	892	600 to 1200
Lithium	179	1340	1000 to 1800
Silver	960	2212	1800 to 2300

Tabel 2 memperlihatkan kompatibilitas fluida kerja terhadap berbagai material. Air dan methanol keduanya dapat menggunakan material yang terbuat dari tembaga, tetapi penggunaan methanol pada material dari aluminium mesti dihindari. Sedangkan untuk air penggunaannya pada baja karbon, aluminium, nikel harus dihindari karena menyebabkan terjadinya korosi pada material.

Hasil kajian termodinamika dan sifat transport dari penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa campuran

antara Air dan ethanol dapat digunakan di pipa kalor. Pemilihan jenis campuran didasarkan bahwa air memiliki kalor laten yang tinggi, dengan demikian laju aliran kalor yang dibutuhkan untuk memindahkan energy akan semakin kecil dibandingkan dengan fluida lainnya. Entalpi penguapan air pada temperatur 80°C adalah 2307,99 kJ/kg. Harga ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan entalpi penguapan methanol dan ethanol yaitu masing-masing sebesar 1069,27 kJ/kg dan 847,01 kJ/kg.

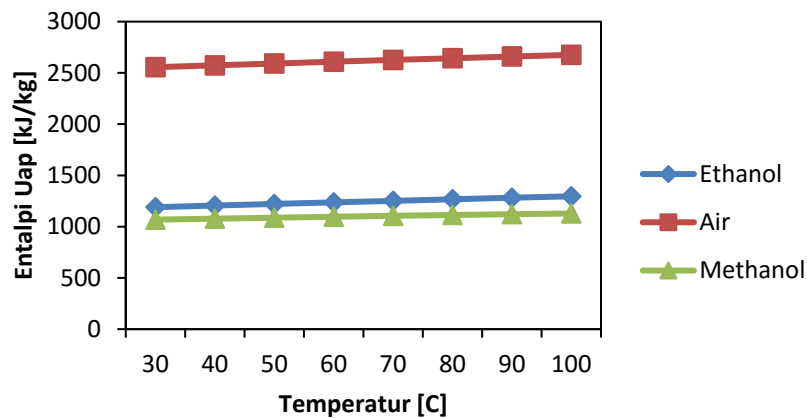
Tabel 2. Kompatibilitas fluida kerja terhadap material (Reay, D.A.Dunn, P., 2006)

	Recommended	Not recommended
Ammonia	Aluminium Carbon steel Nickel Stainless steel	Copper
Acetone	Copper Silica Aluminium ¹ Stainless steel ¹	
Methanol	Copper Stainless steel Silica	Aluminium
Water	Copper Monel 347 Stainless steel ²	Stainless steel Aluminium Silica Inconel Nickel Carbon steel
Dowtherm A	Copper Silica Stainless steel ³	
Potassium	Stainless steel Inconel	Titanium
Sodium	Stainless steel Inconel	Titanium

Pemilihan methanol dibandingkan dengan ethanol disebabkan titik didih methanol yang lebih rendah dibandingkan dengan titik didih ethanol. Titik didih yang rendah akan mengakibatkan tekanan uap methanol lebih juga lebih rendah dibandingkan dengan ethanol. Ini menyebabkan pada kondisi vakum temperatur mulai menguap dari methanol akan lebih cepat daripada ethanol. Titik didih methanol adalah 64,7°C dan ethanol

adalah 78,37°C. Selain itu alasan lain pemilihan methanol adalah entalpi penguapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan ethanol. Kedua fluida tersebut dapat bercampur dengan air.

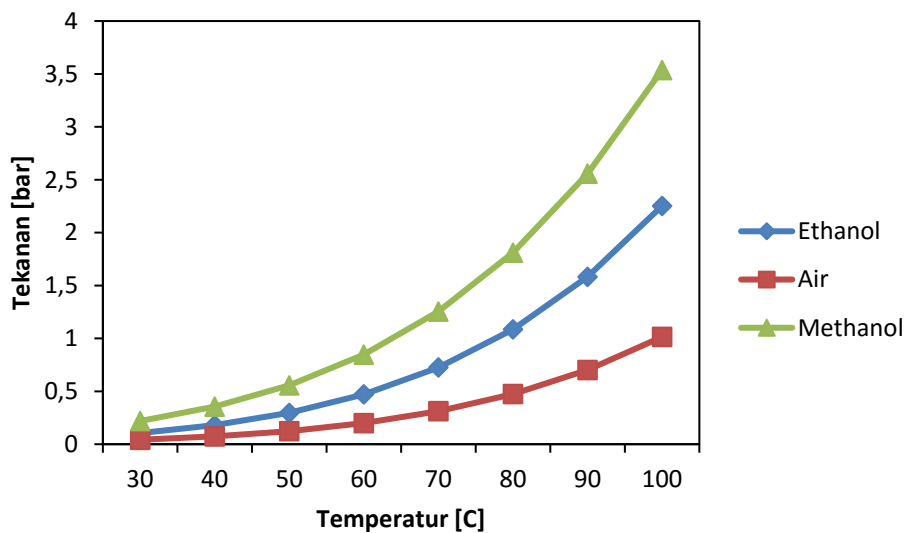
Entalpi pada fasa uap air, methanol dan ethanol dapat dilihat pada Gambar 7. Entalpi fasa uap tertinggi dihasilkan oleh air kemudian oleh ethanol dan yang terendah adalah methanol.



Gambar 7. Entalpi uap fluida kerja

Perubahan entalpi terhadap temperatur tidak terlalu signifikan meski cenderung mengalami peningkatan. Semakin tinggi temperatur akan mengakibatkan entalpi fasa uap juga mengalami peningkatan. Selain entalpi, sifat termodinamika lain yang meningkat seiring dengan naiknya temperatur adalah tekanan, seperti

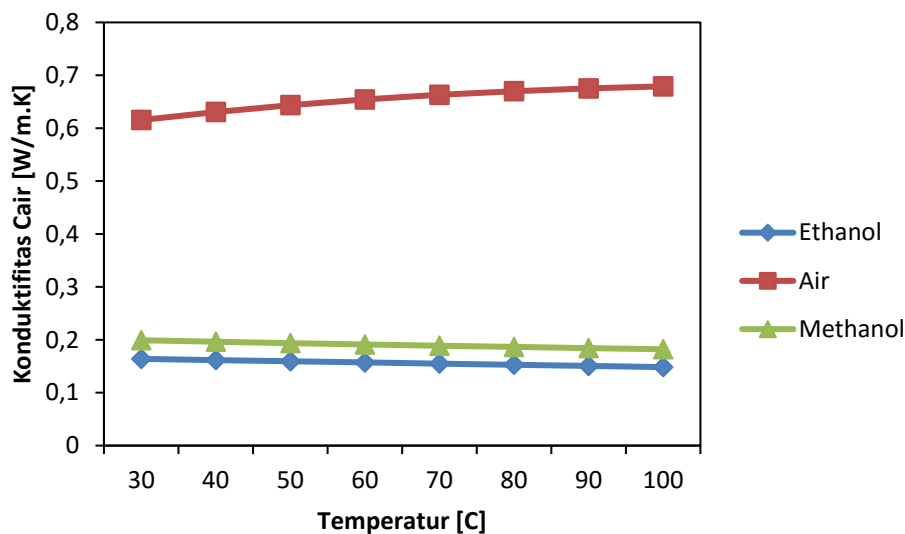
diperlihatkan pada Gambar 8. Tekanan yang paling tinggi peningkatannya diberikan oleh methanol kemudian oleh ethanol dan yang terakhir adalah air. Dalam sistem pipa kalor, tekanan akan divakum sehingga pengaruh tekanan terhadap konstruksi perpipaan menjadi sangat kecil.



Gambar 8. Pengaruh temperatur terhadap tekanan fluida

Syarat pemilihan fluida kerja pipa kalor lainnya adalah konduktifitas termal yang tinggi. Fluida dengan konduktifitas tinggi menghasilkan perpindahan kalor yang

cepat. Konduktifitas fluida pipa kalor ditunjukkan pada Gambar 9.

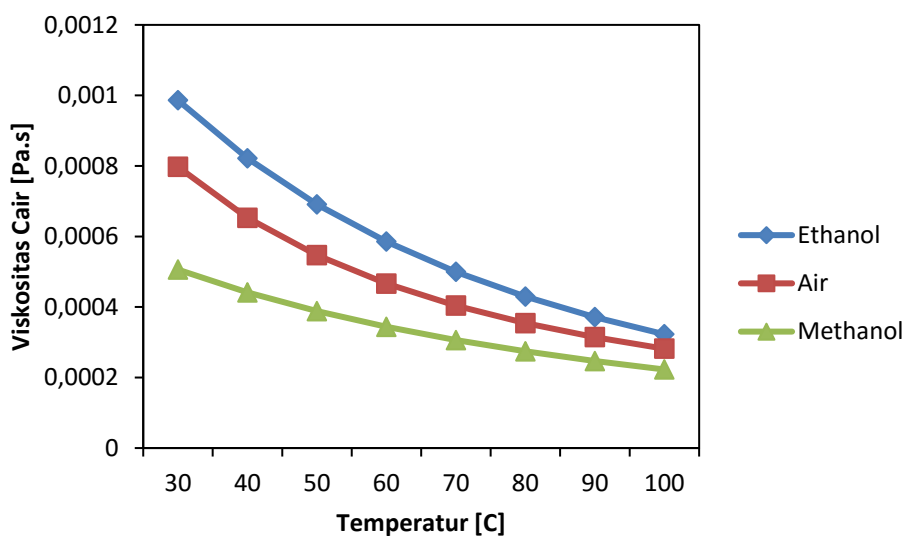


Gambar 9. Konduktifitas fasa cair fluida kerja

Konduktifitas ethanol dan methanol cenderung tidak berubah dengan naiknya temperatur. Hal ini berbeda dengan air yang sedikit mengalami peningkatan ketika temperatur fluida mengalami peningkatan. Konduktifitas air berada pada kisaran 0,65 W/m,K.

Agar proses perpindahan massa dapat terjadi dengan baik, maka pada

sisitem pipa kalor diperlukan viskositas cair dan uap yang rendah. Pada tahap ini juga ditinjau perubahan viskositas terhadap temperatur. Kenaikan temperatur pada umumnya akan menurunkan viskositas cair maupun viskositas pada fasa uap, seperti diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Viskositas fluida pada fasa cair

Viskositas ethanol lebih tinggi dibandingkan viskositas air dan methanol. Sehingga dapat disimpulkan kemampuan mengalir dari methanol akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan air maupun ethanol.

5. Kesimpulan

Hasil penelitian yang dilakukan dengan mengkaji sifat termodinamika campuran menghasilkan beberapa studi fluida kerja yaitu air, methanol dan ethanol. Kajian meliputi entalpi, tekanan, konduktivitas, dan viskositas fluida. Temperatur fluida diberikan antara 30 sampai 100°C. Dengan meningkatnya temperatur fluida maka tekanan dan entalpi fluida akan semakin tinggi sedangkan viskositas akan menurun. Entalpi uap dari fluida cenderung konstan seiring dengan meningkatnya temperatur. Entalpi terbesar dihasilkan oleh air kemudian oleh ethanol dan methanol.

6. REFERENSI

Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, 2003, Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi (Energi Hijau), Jakarta.

Djuanda, Suwono, A., Pasek, A.D., Tandian, N.P., 2009, Experimental study on a solar-assisted heat pump, Proceedings of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2009, Tongyeong, South Korea, December 7 – 10.

Facao, J., Oliveira, A.C., 2005, The effect of condenser heat transfer on the energy performance of a plate heat pipe solar collector, International Journal of Energy Research, 29, pp. 903 – 912.

Hermanto, A., 2005, Pengembangan Metode Simulasi Sistem Pengkondisian Udara Energi Surya, Disertasi, Institut Teknologi Bandung.

Huang, B.J., Lee, J.P., Chyng, J.P., 2005, Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater, Solar Energy, 78, pp. 375-381.

Hussein, H.M.S., 2007, Theoretical and experimental investigation of wickless heat pipes solar collector with cross flow heat exchanger, Energy Conversion and Management, 48, pp. 1266-1272.

Hussein, H.M.S., Mohamad, M.A., El-Asfour, A.S., 2001, Theoretical analysis of laminar-film condensation heat transfer inside inclined wickless heat pipes flat-plate solar collector, Renewable Energy, 23, pp. 525-535.

Kingspan Solar, Thermomax HP200, <http://www.kingspansolar.com/pdf/HP200.pdf>, April 2011.

Launay, S., Sartre, V., Lallemand, M., 2004, Experimental study on silicon micro-heat pipe arrays, Applied Thermal Engineering, 24, pp. 233-243.

Moon, S.H., Hwang, G., Yun, H.G., Choy, T.G., Kang, Y.I., 2002, Improving thermal performance for notebook PC cooling, Microelectronics Reliability, 42, pp. 135-140.

Reay, D.A., Dunn, P., 2006, Heat Pipes Theory and Applications, Pergamon Press, England.

Redpath, D.A.G., Griffiths, P.W., Lo, S.N.G., Heron, M., 2008, Experimental investigation of fluid flow regime in thermosyphon heat-pipe of evacuated tube solar water heater, Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Dublin 22-24 Oktober.

Rittidech, S., Wannapakne, S., 2007, Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP), Applied Thermal Energy, 27, pp. 1978-1985.

SolarCollect, Vacuum tube heat pipe solar collector from Tec-Solar Type TS-20-58PA,
<http://www.solarcollect.co.uk/downloads/solcollinstman.pdf>, April 2011.

Sussex Solar, Solar system evacuated heat-pipe collector unvented hot water cylinder owners manual,
[http://www.sussexsolar.com/SolarSystemUsermanual\(mainspressurecylinder\).pdf](http://www.sussexsolar.com/SolarSystemUsermanual(mainspressurecylinder).pdf), April 2011.

Vongchanh, K., 2010, Simulation and experimental studies of solar hybrid fish dryer, Disertasi, Institut Teknologi Bandung.

Walker, A., Mahjouri, F., Stiteler, R., 2004, Evacuated-tube heat-pipe solar collectors applied to the recirculation loop in a federal building, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.

Yoga, N.G., Suwono, A., Abdurrachim, Hardianto, T., 2010, Kaji eksperimental penggunaan pipa kalor sebagai penyerap energi termal surya untuk penyuplai pompa kalor temperatur tinggi, Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 9 (SNTTM 9), Palembang.