

Kaji Eksperimental Pipa Kalor dengan Berbagai Jenis Fluida Kerja

Zulfikar¹⁾ dan Abdurrachim²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Malikussaleh, Lhokseumawe

²⁾ Prodi Teknik Mesin-Institut Teknologi Bandung
phi_kar@yahoo.com, halim@labsurya.ms.itb.ac.id

Abstrak

Pipa kalor tembaga dengan diameter luar 4,7 mm, tebal 0,5 mm, panjang 360 mm, dan insert stainless steel mesh 50 telah dibuat dan dievaluasi secara ekperimental dengan fluida kerja air, metanol dan aseton. Pengujian dilakukan untuk input panas bervariasi antara 50W sampai dengan 120W. Sedangkan pengambilan panas dari pipa kalor dilakukan melalui air pendingin yang disirkulasikan dibagian kondensor pipa kalor.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa fluida kerja air dengan rasio pengisian 0,07 baik untuk dioperasikan pada temperatur pipa kalor rata-rata 97°C dengan fluks panas 91,42 kW/m², fluida metanol dengan rasio pengisian 0,07 baik dioperasikan pada temperatur 58,70°C dengan fluks panas 40,22 kW/m², fluida metanol dengan rasio pengisian 0,24 baik untuk dioperasikan pada temperatur 89,4°C dengan fluks panas sebesar 60,23 kW/m² dan fluida aseton dengan rasio pengisian 0,03 baik dioperasikan pada temperatur 38,58°C dengan fluks panas 7,5 kW/m². Peningkatan konduktivitas termal pipa kalor terhadap pipa tembaga pejal untuk diameter luar yang sama adalah 9,42 kali untuk fluida kerja aseton, 16204 kali untuk fluida kerja methanol dengan rasio pengisian 0,24, 419 kali untuk fluida kerja methanol dengan rasio pengisian 0,07 dan 1526 kali untuk fluida kerja air.

Kata kunci: pipa kalor, fluida kerja, rasio pengisian, temperatur operasi, konduktivitas termal, fluks panas.

1. Pendahuluan

Pipa kalor merupakan alat perpindahan panas pasif dengan konduktivitas termal efektif yang sangat tinggi [2] dan gradien temperatur yang sangat kecil. Mekanisme perpindahan panas dengan perubahan fasa fluida kerja menghasilkan kemampuan perpindahan panas seratus hingga beberapa ribu kali lebih baik dari kemampuan tembaga. Koefisien perpindahan panas di daerah evaporator dan kondenser adalah 10^3 - 10^5 W/m² K, tahanan termal pipa kalor 0.01-0.03 K/W[10]. Biasanya pipa kalor juga dimodelkan sebagai elemen dengan konduktivitas termal yang sangat tinggi ($\lambda=50000$ W/mK) [6].

Konsep pipa kalor pertama kali dikemukakan oleh Gaugler dari General Motors, Ohio, dengan menambahkan struktur sumbu kapilaritas di dalam pipa/tabung *Perkins* sebagai pemompa cairan. Pada saat itu, belum banyak orang dari komunitas perpindahan panas menaruh perhatian hingga konsep program luar angkasa digalakkan kembali. Pada 1964, Gorver dari laboratorium Los Alamos Nasional, New Mexico mempublikasikan untuk pertama kali artikel tentang pipa kalor.

Beberapa penelitian tentang pipa kalor telah dilakukan di laboratorium yang sama. Tarlo [8], telah mempelajari pengaruh rasio pengisian terhadap karakteristik transpor panas. Yoga [9], telah mempelajari efek kemiringan (orientasi) pipa kalor terhadap karakteristik transpor panas sebuah pipa kalor. Kesemuaan penelitian tersebut dilakukan terhadap pipa kalor tembaga yang berfluida kerja air. Pada penelitian ini akan ditunjukkan secara eksperimen pengaruh jenis dan rasio pengisian fluida kerja terhadap karakteristik dan performansi pipa kalor.

2. Fluida Kerja

Proses perpindahan panas perubahan fasa merupakan proses utama pada sebuah pipa kalor, sehingga pemilihan fluida kerja menjadi faktor yang sangat penting. Rentang temperatur operasi pipa kalor digunakan untuk menentukan jenis fluida kerja yaitu di antara titik beku dan keadaan kritis. Pemilihan fluida kerja harus didasarkan pada pertimbangan sifat termodinamik dengan memperhatikan beberapa batasan aliran panas yang terjadi di dalam pipa kalor, seperti tekanan uap, densitas cair dan

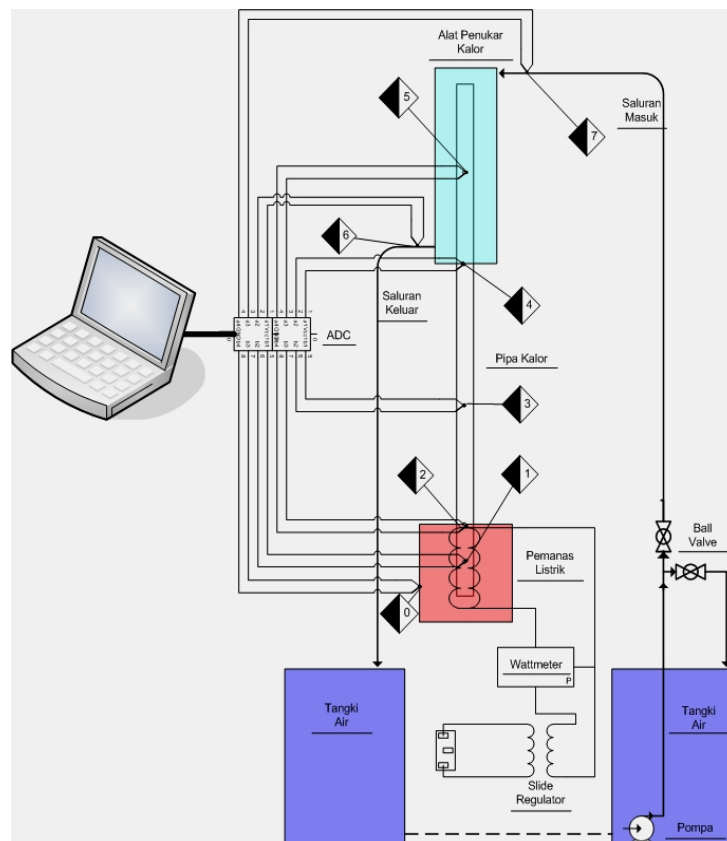
uap, panas penguapan spesifik, kapasitas panas spesifik cairan jenuh, viskositas dinamik cair dan uap jenuh, konduktivitas termal cair jenuh, tegangan permukaan dan bilangan merit [5]. Suatu substansi sebagai fluida kerja juga harus memenuhi beberapa syarat, antara lain: kesesuaian dengan material pipa dan sumbu, panas laten tinggi, dan stabilitas termal baik [4].

Fluida kerja untuk pendingin elektronika sering digunakan *air deionized*, amoniak, aseton atau metanol, tergantung pada rentang temperatur operasi dan kesesuaian dengan sumbu dan bejana/pipa.

3. Peralatan uji dan Pengujian

Pipa kalor dibuat dari pipa tembaga dengan panjang 300 mm, diameter luar 6,35 mm (1/4inch) dan diameter dalam 4,75 mm. Struktur sumbu yang digunakan adalah jenis *screenmesh* terbuat dari *stainless steel AISI 304* dengan ukuran *mesh* 50. Fluida yang digunakan adalah aquades, metanol dan aseton. Pemilihan berbagai fluida tersebut karena memenuhi syarat utama sebagai fluida kerja serta sesuai untuk temperatur operasi menengah.

Pengujian pendahuluan dilakukan untuk memastikan bahwa pipa kalor dapat berfungsi dengan baik dan layak untuk diuji. Pengujian ini dilakukan dengan pendinginan kondenser secara konveksi bebas oleh udara pada temperatur kamar. Selanjutnya, pengujian dengan pengambilan panas secara konveksi paksa (gambar 1) dilakukan terhadap pipa-pipa kalor yang dinyatakan layak uji hasil dari pengujian pendahuluan, sehingga kondisi operasi maksimum setiap pipa kalor tersebut didapat.



Gambar 1 Rangkaian peralatan pengujian dengan modus konveksi paksa.

Pemanas elektrik dengan daya maksimum 190W telah digunakan sebagai pemberi panas kepada pipa kalor. Alat penukar jenis *double pipe* dengan aliran berlawanan digunakan sebagai pengambil panas. Alat penukar kalor terbuat dari bahan transparan sehingga dapat dipastikan posisi ujung pipa kalor

tetap simetris. Media pendinginan yang digunakan adalah air yang disirkulasikan oleh pompa dengan laju aliran dijaga konstan pada 2,4 liter per menit.

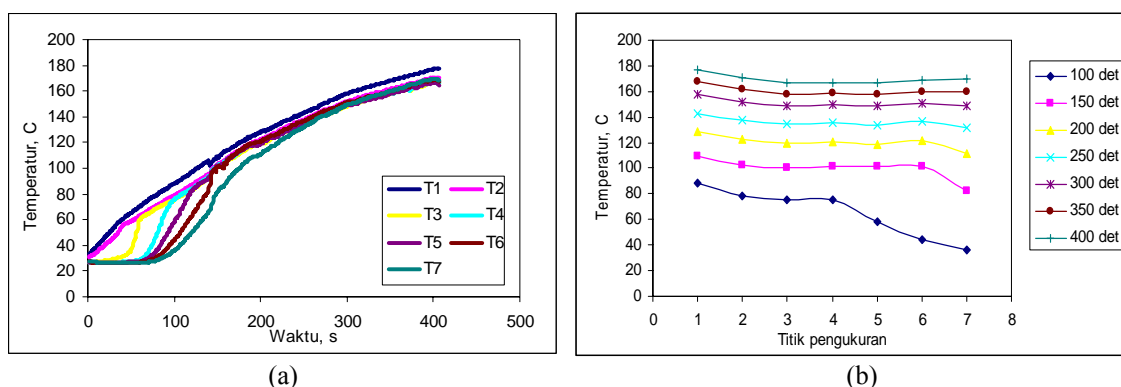
Data yang diukur dari pengujian pendahuluan adalah jenis fluida; rasio pengisian; temperatur sepanjang dinding pipa kalor; temperatur lingkungan dan daya listrik yang disuplai ke pemanas listrik. Pada pengujian lanjutan, data yang diukur adalah jenis dan rasio pengisian fluida kerja; temperatur dinding pipa kalor; temperatur lingkungan; temperatur air pendingin masuk dan keluar kondensor; laju alir air pendingin dan daya listrik yang disuplai ke pemanas elektrik.

Pengukuran massa, daya listrik dan laju aliran diukur dengan menggunakan alat ukur *digital balance*, wattmeter, gelas ukur dan pencatat waktu. Pengukuran temperatur dinding pipa kalor, temperatur lingkungan, temperatur air masuk dan keluar kondensor diukur secara bersamaan dengan menggunakan termokopel tipe T dan *analog to digital converter* (ADC) yang dihubungkan ke komputer melalui terminal *universal serial bus* (USB).

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Performansi pipa kalor

Suatu hal penting untuk meyakinkan bahwa pipa kalor tersebut dapat berkerja dan berfungsi dengan baik sebagai pipa kalor. Gambar 2 memperlihatkan riwayat temperatur dinding dan distribusi temperatur dinding sepanjang pipa dalam arah aksial pada waktu berbeda. Dari gambar tersebut diperoleh bahwa distribusi temperatur sepanjang pipa kalor seragam setelah melewati waktu transien.



Gambar 2. a) Variasi temperatur untuk pendinginan udara pada pipa kalor tembaga-air dengan rasio pengisian 0,12 pada titik pengukuran berbeda dalam arah vertikal. b) Profil temperatur dinding pipa kalor untuk pendinginan udara pada pipa kalor tembaga-air dengan rasio pengisian 0,12 pada waktu berbeda.

Dari pengujian dengan pendinginan udara diperoleh 4 pipa kalor yang dapat berfungsi dengan baik dan efektif dari 26 pipa kalor yang diuji, yaitu: pipa kalor tembaga-air untuk rasio pengisian 0,07; pipa kalor tembaga-metanol untuk rasio pengisian 0,07 dan 0,24; dan pipa kalor tembaga-aseton untuk rasio pengisian 0,03.

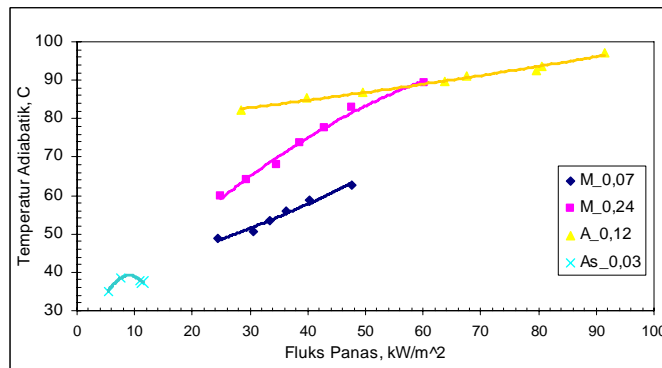
Kondisi operasi maksimum pipa kalor diperoleh dari pengujian dengan pendinginan air. Kemampuan menghantarkan panas pipa kalor didapat dari laju perpindahan panas yang terjadi dari pipa kalor ke air pendingin, dan telah dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \Delta T$$

dimana \dot{m} , laju aliran air pendingin, kg/s; c_p , panas jenis air pendingin, kJ/kg°C dan ΔT selisih temperatur air pendingin masuk dan keluar, °C.

4.2 Temperatur Operasi

Pada kondisi steady, nilai temperatur rata-rata setiap titik pengukuran dipetakan terhadap fluks panas rata-rata sehingga diperoleh grafik hubungan temperatur terhadap perubahan fluks panas.



Gambar 3. Hubungan temperatur adiabatik terhadap beban kondenser untuk pipa kalor tembaga-air rasio pengisian 0,07; pipa tembaga-metanol rasio pengisian 0,07 dan 0,24; pipa kalor tembaga-aseton rasio pengisian 0,03.

Gambar 3, memperlihatkan bahwa jenis dan rasio pengisian fluida kerja mempengaruhi temperatur operasi dan fluks panas pipa kalor. Temperatur operasi pipa kalor terus menanjak dengan penambahan fluks panas sehingga tercapai nilai maksimum pada suatu nilai fluks panas tertentu. Kemudian, penambahan fluks panas akan menurunkan nilai temperatur adiabatik pipa kalor, tetapi nilai T1 menanjak tajam. Kemampuan pipa kalor tembaga-air menerima fluks panas cukup besar, kemudian disusul oleh pipa tembaga-metanol dan tembaga-aseton. Hal ini sesuai dengan urutan kuantitas kalor laten fluida-fluida tersebut. Pipa kalor tembaga-air juga memiliki temperatur operasi tertinggi, kemudian disusul pipa kalor tembaga-metanol dan pipa kalor tembaga-aseton. Hal ini juga sesuai dengan urutan temperatur didih fluida-fluida tersebut. Kemampuan menerima fluks panas, pipa kalor tembaga-metanol dengan rasio pengisian 0,24 lebih besar daripada pipa kalor tembaga-metanol dengan rasio pengisian 0,07. Hal ini dikarenakan semakin besar massa fluida maka semakin besar panas yang mampu ditransportkan, tetapi semakin tinggi pula temperatur kerja dan semakin lama waktu transiennya.

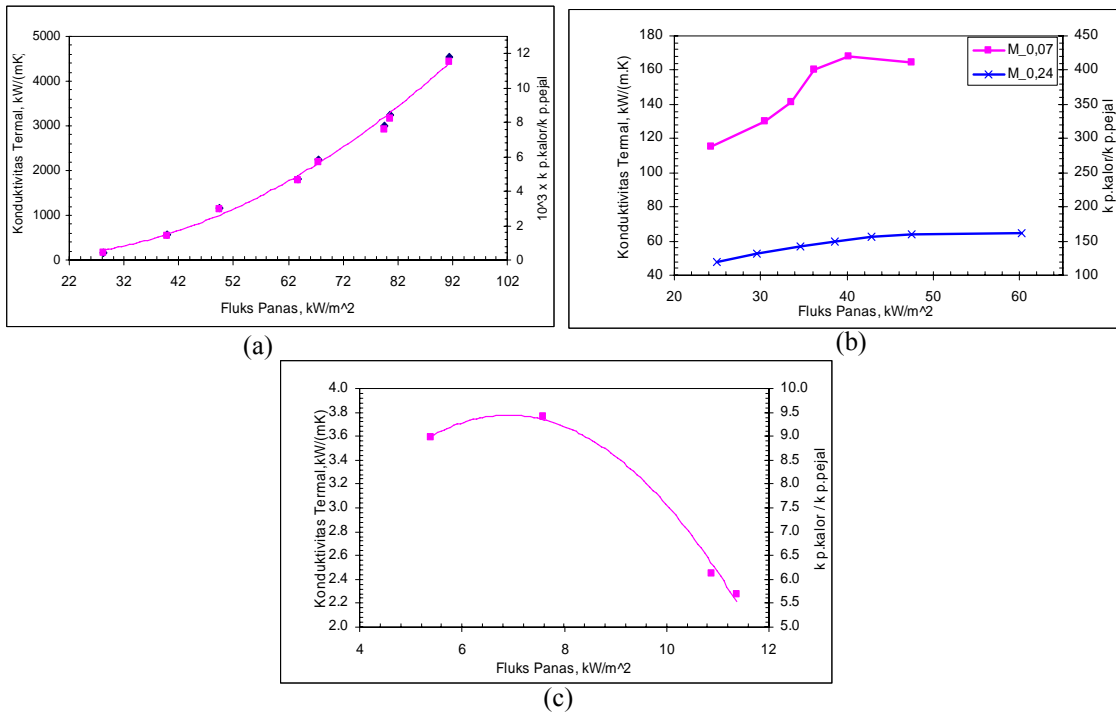
4.3 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal pipa kalor dapat ditentukan dengan menggunakan hukum *Fourier*, yaitu :

$$k = -\frac{Q_k}{A} \cdot \left(\frac{dx}{dT} \right)$$

dengan dx adalah jarak antara titik tengah evaporator dan titik tengah kondenser, dT adalah beda temperatur antara evaporator dan kondenser dan Q_k adalah laju perpindahan panas pada kondenser dan A adalah luas penampang pipa.

Hubungan antara konduktivitas termal pipa kalor terhadap fluks panas dan perbandingan konduktivitas termal pipa kalor terhadap pipa pejal tembaga (394 W/m°C) [4] diperlihatkan pada gambar 4.



Gambar 4. Hubungan konduktivitas termal terhadap beban kondenser: a) untuk pipa kalor tembaga-air rasio pengisian 0,07; b) untuk pipa kalor tembaga-metanol rasio pengisian 0,07 dan 0,24 ; dan c) untuk pipa kalor tembaga-aseton rasio pengisian 0,03.

Gambar 4 memperlihatkan bahwa nilai konduktivitas pipa kalor tidak konstan dan bervariasi terhadap fluks panas. Kurva konduktivitas termal terus menanjak dengan pertambahan fluks panas hingga mencapai nilai maksimum hingga nilai fluks panas tertentu. Selanjutnya, kurva konduktivitas termal menurun dengan pertambahan fluks panas. Pola ini terjadi pada setiap pipa kalor yang diuji, kecuali pipa kalor tembaga-air yang tidak memiliki titik balik. Hal ini dikarenakan pada keadaan pengujian tersebut, pipa kalor tembaga-air masih dapat bekerja dengan baik.

Secara keseluruhan, hasil dari pengujian dengan pendinginan kondenser secara konveksi paksa diberikan pada tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengujian dengan pendinginan kondenser secara konveksi paksa.

PK	Fluida Kerja		Kondisi Operasi Maksimun		
	Jenis	Rasio	T_{ad} , °C	q'' , kW/m ²	K kW/m K
1	Air	0,12	97,11	91,42	4541
2	Metanol	0,07	47,51	62,72	1653
3	Metanol	0,24	89,40	60,23	638
4	Aseton	0,03	7,50	39,81	3710

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan diperoleh pipa kalor dengan fluida kerja air, metanol dan aseton dengan kondisi-kondisi sebagai berikut :

1. Pipa kalor tembaga-air dengan rasio pengisian 0,12 baik dioperasikan pada temperatur rata-rata 97,11°C dengan fluks panas 91,42 kW/m² dan peningkatan konduktivitas termal terhadap pipa tembaga sebesar 11526,33 dengan nilai konduktivitas termal 4541 kW/mK.
2. Pipa kalor tembaga-metanol dengan rasio pengisian 0,07 baik dioperasikan pada temperatur 58,70°C dengan fluks panas 40,22 kW/m² dan peningkatan konduktivitas termal terhadap tembaga sebesar 419,53 dengan nilai konduktivitas termal 1653 kW/mK. Sedangkan pipa kalor metanol dengan rasio pengisian 0,24 baik untuk dioperasikan pada temperatur 89,4°C dengan fluks panas sebesar 60,23 kW/m² dan peningkatan konduktivitas termal terhadap pipa tembaga sebesar 162,04 dengan nilai konduktivitas termal 638 kW/mK.
3. Pipa kalor tembaga-aseton dengan rasio pengisian 0,03 baik dioperasikan pada temperatur 38,58°C dengan fluks panas 7,5 kW/m² dan peningkatan konduktivitas termal sebesar 9,42 terhadap pipa tembaga dengan nilai konduktivitas termal sebesar 3710 kW/mK.
4. Bilangan rasio pengisian yang besar dapat memperbesar kemampuan perpindahan panas dan meningkatkan temperatur operasi pipa kalor, tetapi nilai konduktivitas termal menurun.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada PHK-A3 Prodi Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Collier, J.G., 1972, *Convective Boiling and Condensation*, UK: McGraw-Hill press.
- [2] DeHoff, R., and Grubb, K., 2006, Heat pipe application guidelines, Thermacore, Inc., <http://thermacore.com>.
- [3] Devarakonda A., and Anderson. W.G., 2005., *Thermo-physical properties of intermediate temperature heat pipe fluids*, NASA/CR—2005-213582, <http://gltrs.grc.nasa.gov>.
- [4] Dunn, P., and Reay, D.D., 1982, *Heat Pipes*, UK : Pergamon Press.
- [5] Engineering Science Data Unit, 80017, 1980, *Thermophysical properties of heat pipe working fluids: operating range between -60°C and 300°C*, London :Institution of Mechanical Engineers and Institution of Chemical Engineers.
- [6] Legierski, J., Wiecek B., Mey G, 2006, Measurements and simulation of transient characteristics of heat pipes, *Microelectronics Reability*, Vol.46, P.109-115.
- [7] Takaoka. M., Motai. T., Sakaya. M., Mochizuki. M., Mashiko. K., and Ito. M., 1985, Development of long heat pipes and heat-pipe applied products, *Fujikura Technical Review*, No.14, P. 77-93.
- [8] Tarlo Sembiring, 2005, *Kajian Peningkatan Perpindahan Panas dengan Pipa Kalor yang Beroperasi pada Temperatur Menengah*, Tesis Institut Teknologi Bandung.
- [9] Yoga. N.G., 2005, *Kaji Eksperimental Karakteristik Pipa Kalor untuk Berbagai Rasio Pengisian, Fluks Panas, dan Kemiringan*, Tesis Institut Teknologi Bandung.
- [10] Vafai. K., and Wang. W., 1992., Analysis of flow and heat transfer characteristics of an asymmetrical flat plate heat pipe, *Int. J. Heat Mass Tran* Vol.35, P.2087-2099.
- [11] Zou. Z.J., and North. M.T, 2006, Combined pulsating and capillarity heat pipe mechanism for cooling of high heat flux electronics, Thermacore. Inc. <http://www.thermacore.com>.