

Kinerja Termal dan Pola Aliran Oscillating Heat Pipe dengan Fluida Kerja Ethanol

Nandy Putra^{1,*}, Adi Winarta^{1,2} dan Fadli Bakhtiar Aji¹

¹Applied Heat Transfer Research Group, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Kampus Bukit Jimbaran, Bali, Indonesia

*email nandyputra@eng.ui.ac.id

Abstrak

Sebagai salah satu teknologi transfer kalor dua fasa sistem pasif, Oscillating Heat Pipe (OHP) mempunyai daya tarik tersendiri dalam perkembangan teknologi pipa kalor (heat pipe). Pemanfaatan OHP sangat beragam mulai dari aplikasi pendingin elektronika, *heat exchanger*, solar kolektor sampai pada teknologi *avionics* dan ruang angkasa. Penelitian ini menguji desain OHP pada penggunaan *ducting* sistem tata udara dengan ukuran 300 x 470 mm. OHP dibuat dengan menggunakan pipa kapiler tembaga dengan diameter dalam 1,7 mm dan tebal pipa 0,65 mm. Panjang bagian evaporator, adiabatik dan kondenser berturut-turut, 260 mm, 240 mm, dan 260 mm. Ethanol dipergunakan sebagai fluida kerja dengan filling ratio sebesar 60%. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai *thermal resistance* terendah adalah 0,36 °C/W pada input kalor 76,1 Watt. Hambatan thermal pada OHP yang diuji cenderung stabil saat sudut inklinasi dari OHP divariasikan. Hasil pengujian kinerja menunjukkan bahwa OHP sangat mungkin dimanfaatkan sebagai heat recovery dengan temperatur 50°C-70°C.

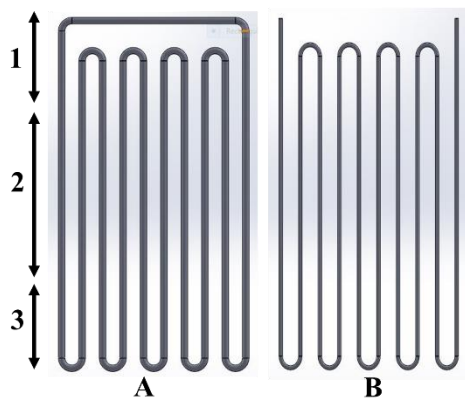
Kata kunci : *Oscillating Heat Pipe*, Kinerja Thermal, Ethanol

Konsumsi energi untuk sistem HVAC pada bangunan komersil dapat mencapai lebih dari 40% total penggunaan energy [1]. Penggunaan sistem *heat recovery* merupakan salah satu cara untuk melakukan efisiensi energi pada aplikasi jenis HVAC. Sistem *heat recovery* yang digunakan biasanya *plate to plate heat exchanger*, *heat recovery wheel*, dan yang terbaru yakni *heat pipe heat exchanger* (HPHE).

Heat pipe atau pipa kalor merupakan salah satu teknologi transfer kalor dua phase sistem pasif. Dari berbagai tipe dan jenis pipa kalor, *oscillating heat pipe* (OHP) merupakan jenis pipa kalor tanpa sumbu kapiler (*wickless*). Pipa kalor jenis ini ditemukan dan dipatenkan oleh Akachi pada tahun 1990 [2]. OHP yang juga dikenal dengan nama *Pulsating Heat Pipe* (PHP) merupakan jenis pipa kalor yang memiliki struktur menggunakan pipa kapiler yang dibentuk berlekuk-lekuk seperti diperlihatkan pada gambar 1. Karena menggunakan dimensi pipa kapiler maka secara alamiah fluida kerja yang diinjeksi ke dalam OHP akan membentuk susunan yang berselang seling antara cairan (*liquid*) dan

gelembung uap (*bubble*). Susunan fluida kerja dalam bentuk *liquid* dan *bubble* ini merupakan formasi yang sangat penting pada saat proses transfer kalor terjadi. Gerakan osilasi yang dihasilkan merupakan efek yang dihasilkan oleh formasi susunan fluida kerja ini.

Pada OHP terdapat tiga bagian utama yakni evaporator, kondenser dan adiabatik. Pada saat bagian evaporator dari OHP menerima kalor maka fluida kerja (*liquid* dan *bubble*) didalamnya akan mengalami ekspansi yang menyebabkan tekanan uapnya naik. Sedangkan pada saat yang bersamaan bagian kondenser melepaskan sejumlah kalor yang mengakibatkan fluida kerja mengalami kontraksi atau kondensasi. Akibat kondensasi tersebut tekanan uap lokal pada kondenser akan turun. Beda tekanan antara evaporator dan kondenser yang berlangsung secara kontinyu menyebabkan gerakan osilasi dan bahkan sirkulasi dari fluida kerja (formasi *liquid* dan *bubble*) yang selanjutnya menjadi media penghantar kalor dari evaporator ke kondenser.



Gambar struktur dan konfigurasi OHP (A) Open loop, (B) Closed loop, (1) Bagian kondenser, (2) Adiabatik dan (3) Evaporator

Beberapa penelitian mengenai aplikasi pipa kalor untuk pemanfaatan *heat recovery* diantaranya dilakukan oleh Yat H Yau et al [3]. Pada penelitiannya pipa kalor digunakan sebagai pengontrol kelembaban pada sistem HVAC di daerah tropis dengan kelembaban tinggi (Malaysia). Hasil penelitiannya merekomendasikan penggunaan pipa kalor sebagai instrumen pembantu proses dehumidifikasi [3]. S.H. Noie-baghbhan et al. [4] melakukan kajian simulasi dan eksperimental mengenai pemanfaatan pipa kalor sebagai *heat recovery* pada pengkondisian udara di rumah sakit dan laboratorium. Temperatur pengujian yang dipilih pada penelitian tersebut dilakukan pada rentang antara 10°C sampai dengan 55°C [4]. Khandekar et al. melakukan penelitian mengenai penggunaan *closed loop oscillating heat pipe* (CLOHP) yang digunakan sebagai *heat exchanger* [5]. Hasilnya menunjukkan keefektifan dari desain OHP *heat exchanger* dengan hambatan thermal yang dihasilkan dibawah 0,2 °C/W pada posisi pengujian vertikal [5]. Pemanfaatan CLOHP juga telah dilakukan pada sistem pengering oleh Rittidech et al. [6]. Pada penelitian ini OHP digunakan sebagai *air preheater*. Hasil penelitiannya menunjukkan penggunaan CLOHP akan semakin baik saat digunakan pada temperatur antara 60°C–80°C. Selain itu, penggunaan OHP terbukti dapat mengurangi penggunaan energi pada mesin pengering [6]. Jahan et al.[7] melakukan penelitian OHP dengan panjang 148 cm menggunakan diameter dalam pipa kapiler 2,0 mm. Variasi

inklinasi juga dilakukan pada penelitian ini untuk menyelidiki pengaruh gravitasi pada kinerja OHP. Hasil penelitiannya menyatakan orientasi 75° memiliki kinerja terbaik.

Beberapa penelitian mengenai pola aliran fluida kerja didalam OHP diantaranya dilakukan oleh Tong et al. [8]. Beliau melakukan pengamatan secara mendalam mengenai pola aliran fluida pada OHP dengan menggunakan pipa transparan. Tiga tipe pola aliran dikarakterisasi berdasarkan ukuran *bubble* yang terdapat pada pipa/channel OHP yakni; *dispersed bubble*, *vapour plug* dan *long vapour plug*. Karthikeyan et al.[9] juga melakukan kajian mengenai pola aliran pada OHP dengan pipa transparan menggunakan fluida kerja DI Water dan CuO Nanofluida. Empat pola aliran diamati menggunakan kamera berkecepatan tinggi yakni *slug flow*, *semi annular flow*, *slug/semi annular flow* dan *fully vapourised flow* [9]. Masing-masing aliran ini memiliki karakter perpindahan kalor yang berbeda-beda. Karthikeyan et al.[10] juga melakukan kajian mengenai pola aliran OHP menggunakan thermogram dan menyimpulkan teknik ini sangat berguna untuk mengkonfirmasi pola aliran yang terdapat pada OHP dari hasil data kuantitatif. Thermogram juga mengkonfirmasi gerakan pola aliran osilasi fluida kerja pada OHP pada input kalor rendah dan sirkulasi pada input kalor tinggi. Diantara kedua gerakan ini terdapat gerakan transisi antara osilasi dan sirkulasi.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan pipa kalor (*heat pipe*) atau Oscillating heat pipe (OHP) secara eksperimental dapat mengurangi konsumsi energi dalam berbagai sistem termal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakter kinerja termal dan pola aliran Oscillating Heat Pipe (OHP) yang akan digunakan pada aplikasi *heat recovery* pada ducting system tata udara. Pengamatan kinerja juga dilakukan menggunakan infrared thermography dan variasi pada sudut inklinasinya atau orientasi dari OHP.

Sebuah OHP dengan konfigurasi *close loop* didesain dengan dimensi yang disesuaikan pada aplikasi *ducting* tata udara. Tinggi dan lebar dari ducting yakni 300 × 470 mm.

Bagian evaporator dan kondenser harus memiliki luasan yang sesuai untuk dimensi ducting. Pada aplikasi nantinya bagian evaporator akan terpasang pada ducting dengan aliran udara panas. Sedangkan bagian kondenser akan terpasang pada aliran udara dingin. Untuk hal tersebut maka dimensi dari OHP memiliki panjang dan lebar yakni 760 dan 410 mm. Ethanol digunakan sebagai fluida kerja pada OHP dengan *thermophysical* properti diberikan pada tabel 1. Panjang bagian evaporator, adiabatik dan kondenser sebesar 260, 240 dan 260 mm. Panjang total pipa yang digunakan sebesar 1,35 m dengan 18 lekukan. Diameter pipa kapiler yang digunakan dihitung menggunakan persamaan diameter kritis (d_{crit}) berikut dibawah [1];

I. Metodologi

$$d_{crit} = 2,0 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1)$$

Dimana $\sigma, \rho_l, \rho_v, g$ adalah berturut-turut tegangan permukaan, masa jenis cairan, masa jenis uap dan gaya gravitasi. Perhitungan rumus (1) mendapatkan d_{crit} sebesar 3,29 mm. Sehingga diameter dalam pipa kapiler yang digunakan harus dibawah diameter kritis ($d_{crit} <$) yakni 1,7 mm dengan ketebalan pipa 0,65 mm.

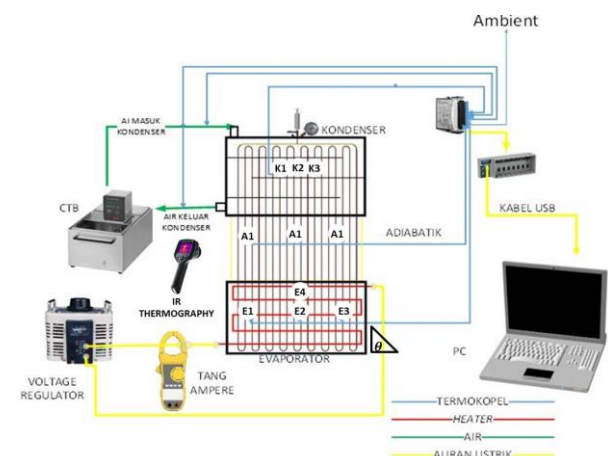
Tabel 1. Nilai properti *thermophysical* fluida Ethanol

No.	Properti	nilai (unit/satuan)
1	NBP	78,3 °C
2	P_{sat}	5,95 kPa (293K)
3	μ	$1,77 \times 10^{-3}$ (kg/m·s)
4	σ	$2,41 \times 10^{-2}$ (N/m)
5	ρ_l	$7,3 \times 10^4$ (kg/m ³)(293K)
6	ρ_v	3,41 (kg/m ³)(293K)

Sebelum memasukkan fluida kerja ethanol, OHP divakuum terlebih dahulu sampai pada tekanan vacuum 40 Torr. Kemudian 20 milliliter cairan fluida kerja ethanol 98% diinjeksi kedalam OHP menggunakan *syringe*. Sehingga rasio antara jumlah volume fluida kerja cair dan volume total OHP sebesar 60%.

Pada bagian evaporator input kalor diberikan menggunakan kawat heater yang disuplai daya listriknya oleh *voltage regulator* AC (0-230V). Sehingga variasi daya input

kalor bisa dilakukan dari 9 sampai dengan 90 Watt. Besarnya arus dan tegangan yang masuk ke *heater* diukur dengan tang Ampere. Water jacket yang terbuat dari bahan acrylic digunakan untuk mendinginkan bagian kondenser dengan air pada temperatur $\pm 20^\circ\text{C}$ dan laju masa $\pm 6\text{g/s}$. Air yang digunakan untuk mendinginkan kondenser disuplai oleh *Circulating Thermal Bath* ®Daihan Labtech dan laju aliran diukur menggunakan flowmeter ®Platon. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menempelkan thermokopel type K (diameter kawat 0.4 mm dengan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$) pada dinding OHP sebanyak 12 titik. Dengan rincian 4 titik pada evaporator, 4 titik pada adiabatik dan 3 titik kondenser. Pada inlet dan outlet dari air pendingin kondenser masing-masing menggunakan satu titik termokopel untuk mengukur temperature air masuk dan keluar bagian kondenser. Seluruh data pengukuran temperatur direkam dengan set data akuisisi cDAQ 9174, NI 9219 dan NI 9211. Data termokopel yang terekam oleh DAQ dikirim dan disimpan pada PC menggunakan *software* data akuisisi. Profile temperatur pada bagian adiabatik juga diamati menggunakan *thermal imaging* (*Infrared thermography* ®FLIRi50). Rugi kalor pada bagian evaporator diminimalisir menggunakan bahan isolator dari *glasswool* dan *polyurethane* setebal 20 mm pada bagian depan dan belakang. Bagian adiabatik menggunakan bahan isolator dari ®armaflex dengan tebal 25,4 mm.



Gambar 2 Skematik pengujian ekperimental

Kalor yang diinput pada bagian evaporator OHP merupakan daya listrik yang dikonsumsi (persamaan 3) heater dikurangi dengan rugi kalor pada evaporator. Sebuah termokopel dipasang pada dinding luar isolator evaporator bagian luar untuk menghitung rugi kalor isolasi. Dari hasil perhitungan didapatkan variasi pengambilan data input kalor dari 6,64 W, 11,6 W, 20,1 W, 32,6 W, 44,1 W, 59,1 W dan 76,1 W. Variasi pengambilan data juga dilakukan dengan merubah sudut kemiringan OHP (inklinasi) yakni 30°, 60° dan 90° (posisi vertical). Pengambilan data *thermography* hanya dilakukan pada posisi vertikal (sudut inklinasi 90°). Seluruh pengujian dilakukan dengan posisi bagian evaporator berada pada bagian bawah atau disebut juga *Bottom*

Heating Mode. Gambar 2 memperlihatkan skematik pengujian eksperimental dari pengujian OHP. Perhitungan kinerja menggunakan persamaan hambatan thermal seperti dibawah berikut;

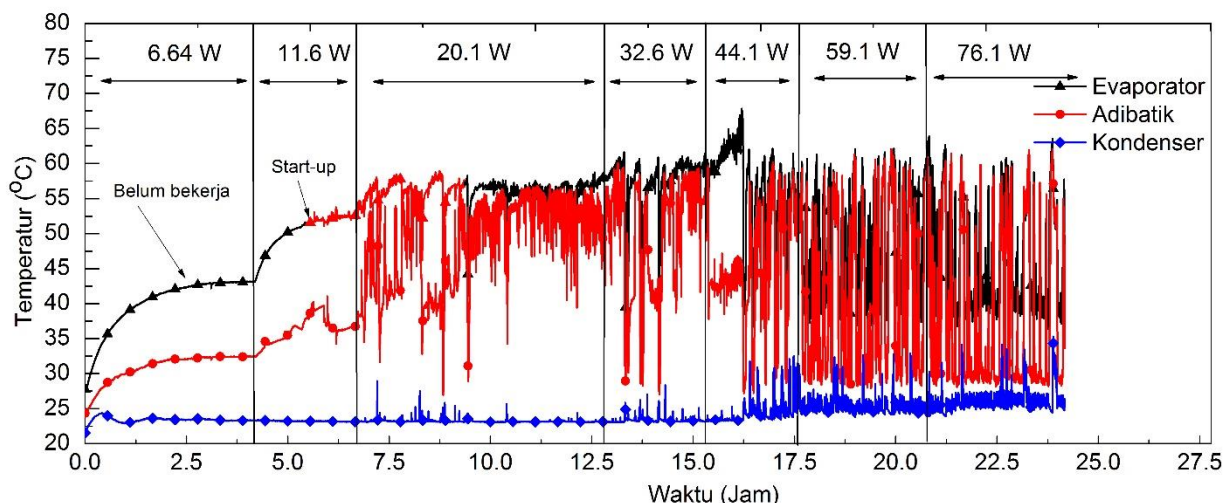
$$R_{tot} = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{Q_{input}} \quad (2)$$

$$Q_{input} = V \cdot I \quad (3)$$

Dengan \bar{T}_e adalah temperatur rata-rata pada evaporator, \bar{T}_a temperature rata-rata pada kondensor, Q merupakan kalor yang masuk ke bagian evaporator, V dan I masing-masing tegangan dan arus yang diberikan.

II. Hasil dan pembahasan

3.1 Kalor input *start-up*.



Gambar 3 Profil temperatur evaporator dan kondenser pada variasi input kalor (orientasi 90°)

Pada gambar 3 diberikan grafik profil temperatur pada bagian evaporator, adibatik dan kondenser dengan variasi input kalor. Pada input kalor awal yakni 6,64 Watt temperatur pada evaporator dan adibatik mengalami kenaikan pada sudut kemiringan yang berbeda. Tidak ada tanda fluktuasi temperatur yang terjadi pada input kalor rendah ini. Sehingga dapat dikatakan OHP belum beroperasi karena belum terjadinya pergerakan fluida kerja secara makro. Fluida kerja yakni susunan *liquid* dan *vapor* dapat dikatakan pada kondisi diam (*stagnan*) secara makro. Tidak adanya pergerakan fluida mengakibatkan hambatan thermal yang terjadi cukup tinggi (Gambar 10). Kenaikan temperatur pada tahap ini semata-mata diakibatkan oleh fenomena perpindahan kalor konduksi pada dinding pipa

tembaga. Temperatur kemudian seolah-olah steady (*quasi steady state*) pada saat titik kira-kira 42,5°C pada evaporator dan 32,5°C pada kondenser. Ketika temperatur keduanya terlihat pada kondisi *quasi steady* maka input kalor dinaikkan ke level berikutnya. Temperatur pada kondenser cenderung tidak bergerak pada kalor input rendah karena tidak terdapat transfer kalor yang cukup dari bagian evaporator dan adibatik. Akibat tidak Bergeraknya fluida kerja sehingga tidak terjadi transfer kalor yang berarti dari evaporator ke kondenser. Hal ini juga menjadi bukti bahwa OHP masih belum bekerja atau masih dalam keadaan gagal *start-up*. Fenomena pada input kalor rendah menyerupai fenomena yang terjadi pada *pool boiling*. Pada kalor input 11,6 Watt fluktuasi temperatur atau osilasi mulai

terjadi pada evaporator dan adiabatik. Walaupun fluktuasi yang terjadi masih sangat kecil dengan amplitudo yang rendah. Fluktuasi temperatur ini atau disebut sebagai osilasi thermal oleh Xu et al.[1] menandakan telah terjadinya gerakan osilasi *liquid* dan *bubble* didalam OHP. Energi kalor yang diterima oleh evaporator sudah cukup tinggi untuk menghasilkan pertumbuhan *bubble* yang berakibat adanya daya dorong (*fluid pumping*) yang cukup untuk menggerakkan susunan *liquid* dan *bubble* yang berada diatasnya. Daya 11,6 W merupakan input kalor minimum yang harus diberikan agar gerakan osilasi mulai diinisiasi dan dipertahankan (*start-up power*). Akibat pergerakan fluida ini kalor mulai dipindahkan dari evaporator ke kondenser walau dalam jumlah yang relatif kecil. Hal ini dapat dilihat dengan mulai menurunnya hambatan thermal (Gambar 10).

3.2 Efek kalor input pada profil temperatur OHP.

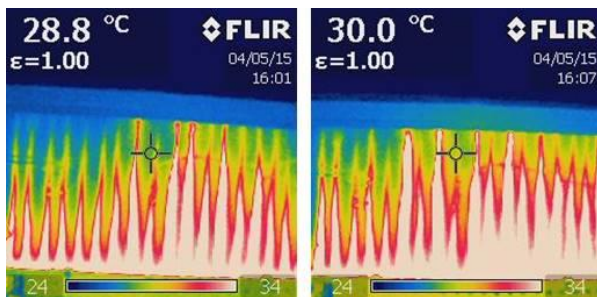
Gambar 3 memperlihatkan grafik profil temperatur yang mengindikasikan bahwa fluktuasi temperatur semakin meningkat seiring dengan peningkatan input kalor oleh *heater*. Ketika input kalor dinaikkan lebih tinggi lagi yakni 20,1 Watt gerakan osilasi pada bagian evaporator dan adiabatik semakin meningkat. Temperatur evaporator mengalami kenaikan dan penurunan yang tajam beberapa kali. Pada adiabatik, fluktuasi temperatur yang terjadi sangat tajam disertai peningkatan temperatur mendekati temperatur evaporator dengan kerapatan yang semakin meningkat. Pada pemberian input kalor lebih lanjut yakni 32,6 Watt terjadi beberapa kenaikan tajam pada temperatur, sebelum akhirnya menurun dan naik kembali. Fluktuasi temperatur pada bagian adiabatik semakin renggang dengan jarak yang semakin panjang. Kenaikan temperatur adiabatik mendekati temperature evaporator menandakan kalor adanya transfer kalor melalui fluida kerja. Adanya pergerakan yang tidak stabil pada temperatur adiabatik merupakan gerakan osilasi yang sangat dinamik dan acak pada tahap ini. Pada awal input kalor 44,1 Watt terjadi penurunan temperatur kondenser dan kenaikan temperatur evaporator. Hal ini menandakan

terjadinya penurunan kecepatan fluida kerja (*bubble* dan *liquid*) sehingga penyerapan kalor pada evaporator menurun dengan adanya kenaikan temperature. Terlihat pada hambatan thermal, garis penurunan cenderung melandai. Sampai pada suatu saat terdapat kenaikan osilasi thermal yang cukup tinggi pada bagian adiabatik yang diikuti dengan kenaikan fluktuasi pada temperatur kondenser. Pada input kalor 59,1 dan 76,1 Watt fluktuasi temperatur yang terjadi lebih stabil. Perubahan arah dari sirkulasi jauh berkurang dan temperatur rata-rata evaporator turun menjadi 48,3°C. Dapat dikatakan perpindahan kalor dengan kinerja terbaik terjadi pada input kalor ini yang memberikan hambatan thermal terendah seperti yang terlihat pada gambar 10.

3.3 Pengaruh kalor input terhadap pola aliran.

Metode *thermal imaging* (infrared thermografi) hanya dilakukan pada bagian adiabatik dengan membuka isolator thermal yang sebelumnya terpasang pada pengambilan data termokopel. Thermography akan membaca distribusi temperatur berdasar intensitas radiasi yang dipancarkan sinar infra merah. Gambar 4 merupakan hasil termografi pada bagian adiabatik pada kalor input 11,6 Watt. Hasil thermography menunjukkan pada tiap pipa/channel memiliki distribusi profil temperatur yang mendekati sama walaupun memiliki tinggi distribusi yang berbeda. Secara umum profil distribusi temperatur tinggi (bagian panas) semuanya bergerak dari arah evaporator. Jarak yang berbeda mengindikasikan adanya susunan *liquid* dan *bubble* yang berbeda pada channel. Jika dihubungkan dengan gambar 3 memang telah terjadi gerakan osilasi fluida kerja, walaupun masih dengan amplitudo dan frekwensi yang rendah. Pola aliran fluida kerja pada tahap ini diprediksi berupa aliran *slug flow* yang merupakan pola umum pada input kalor rendah. Pola ini biasanya memiliki arah gerakan yang berubah-ubah yang sangat dipengaruhi oleh distribusi liquid dan bubble didalam pipa OHP. Karena distribusi ini dapat berubah akibat adanya pertumbuhan *bubble* akibat input kalor (evaporasi) dan kondensasi. Perubahan distribusi mengakibatkan

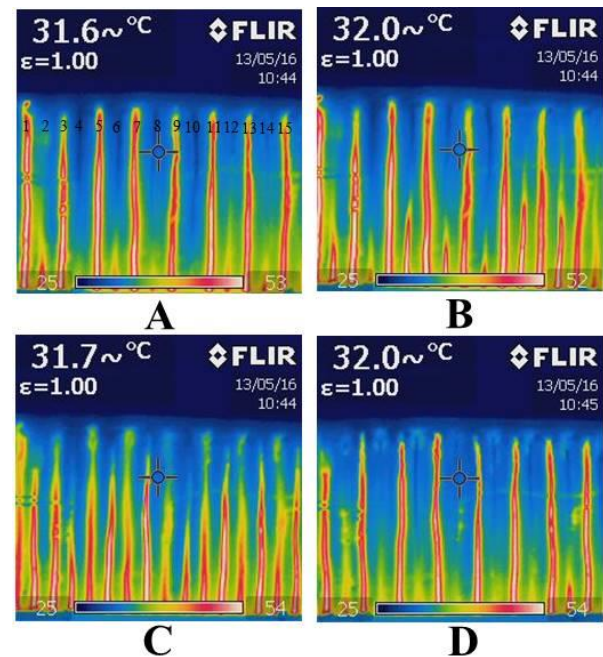
perubahan arah aliran. Pada input kalor rendah perubahan aliran terjadi sangat intens.



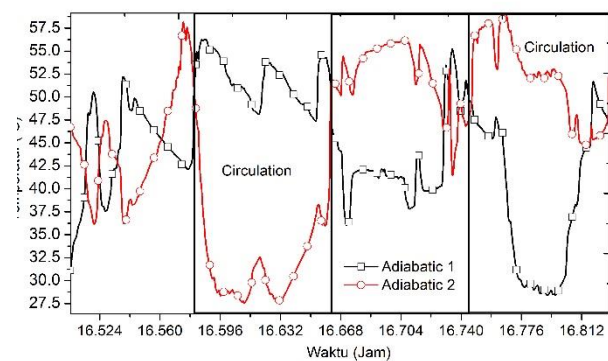
Gambar 4. Thermography pada 11,6 W

Gambar 5 memperlihatkan thermogram pada input kalor 44,1 Watt. Fluida kerja terlihat mulai mengalami transisi dari aliran osilasi ke gerakan sirkulasi satu arah atau sebaliknya. Hal ini dapat dilihat dari distribusi profil temperatur gambar 5. A dan 5. B. Gambar 5 A menunjukkan profil panas dan dingin yang berselang-seling di tiap tabung, sedangkan gambar 5B menunjukkan gerakan osilasi secara acak. Pada 5A rangkaian pipa yang saling berdekatan memiliki daerah temperatur rendah dan tinggi yang saling bergantian atau berselang-seling. Hal ini juga diamati oleh Kartikeyan et al [10]. pada penelitian yang dilakukannya. Kartikeyan mengindikasikan bahwa telah terjadi sirkulasi satu arah pada OHP jika pada pipa 1,3,5,7,9,11,13 dan 15 memiliki temperatur tinggi dan pipa 2,4,6,8,10,12 dan 14 memiliki temperatur yang rendah. Hal ini disebabkan oleh aliran fluida dingin datang dari kondenser di bagian atas dan mendapatkan kalor begitu melewati bagian evaporator pada daerah lekukan. Kartikeyan juga mengisyaratkan pola aliran ini memiliki transfer kalor yang paling baik [10].

Akan tetapi pergerakan transisi dari aliran osilasi ke sirkulasi pada tahap ini mudah berbalik arah dan tidak stabil. Phenomena ini ditunjukkan pada gambar 5C dan 5D. Beberapa saat setelah sirkulasi tercapai pada gambar 5B, kondisi ini dapat berubah menjadi aliran osilasi seperti gambar 5C dan kembali bersirkulasi dengan arah yang tetap atau berlawanan seperti yang terlihat pada gambar 5D. Gambar 6 merupakan profil temperatur pada bagian adiabatik 1 dan 2 yang menunjukkan ada perubahan aliran dari sirkulasi dan transisi secara bergantian.



Gambar 5. Thermography pada 44,1 Watt. A. Aliran sirkulasi; B. Aliran osilasi C. Aliran osilasi dan D. Aliran bersirkulasi kembali.



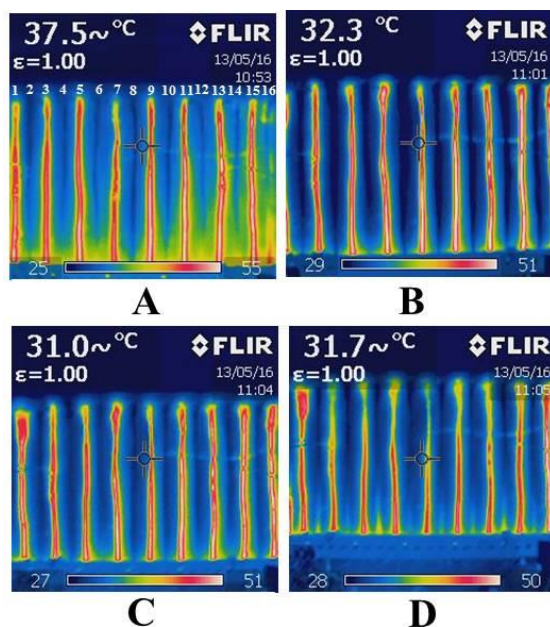
Gambar 6. Profil temperatur adiabatik 1 dan 2 pada input kalor 44,1Watt.

Sirkulasi yang terjadi secara bergantian pada pipa/channel yang bersebelahan diyakini oleh Khandekar merupakan fenomena yang terjadi akibat perubahan arah aliran dari fluida kerja [12]. Perubahan arah aliran biasanya terjadi pada input kalor medium dimana ada kemungkinan kecepatan aliran osilasi fluida kerja berubah-ubah akibat distribusi fluida kerja yang tidak seragam. Pada saat tertentu, temperatur dari adiabatik 1 lebih tinggi dari adiabatik 2, beberapa saat kemudian berbalik yang mengakibatkan adiabatik 2 menjadi lebih tinggi dari adiabatik 1. Saat temperatur

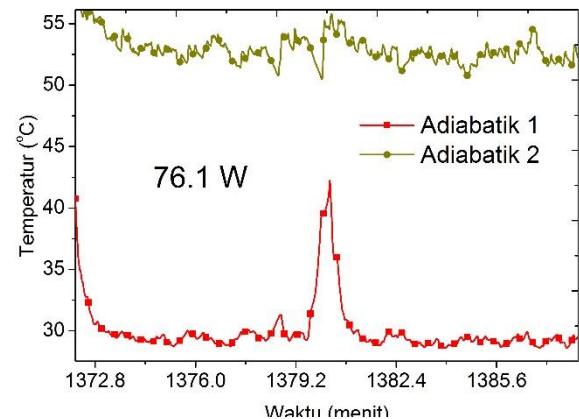
adiabatik 1 tinggi, dan adiabatik 2 rendah, aliran uap dari evaporator akan naik melalui adiabatik 1 dan aliran fluida dingin akan turun melalui adiabatik 2, begitu juga sebaliknya. Gambar 7 menunjukkan thermogram dari input kalor sebesar 76,1Watt. Aliran pada OHP akan mengalami aliran sirkulasi yang lebih stabil pada input kalor yang tinggi. Perubahan aliran yang dialami pada input kalor rendah menjadi sangat jarang. Suhu pada pipa/channel yang selang-seling ini diperkuat oleh gambar 8 dimana suhu rata-rata adiabatik 1 adalah 30°C dan suhu rata-rata adiabatik 2 adalah 55°C.

Hambatan thermal OHP

Pada gambar 9 diberikan grafik hambatan thermal yang didapatkan menggunakan persamaan 2 pada tiap-tiap variasi input kalor dan sudut inklinasi. Semakin rendah hambatan thermal mengindikasikan perpindahan kalor yang semakin efektif dari pipa kalor. Sehingga hambatan thermal pada umumnya digunakan sebagai parameter pokok kinerja dari pipa kalor.

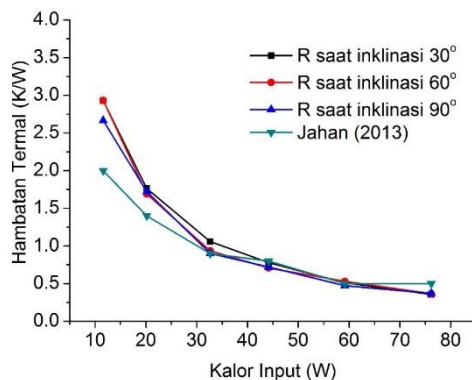


Gambar 7. Proses perubahan aliran dari A. Osilasi ke B. C. dan D. Aliran sirkulasi pada daya 76,1 Watt



Gambar 8. Temperatur Adiabatik 1 dan 2 pada input kalor 76,1 W.

Dari grafik diperlihatkan pada input kalor rendah yakni 6,64 Watt, hambatan thermalnya cukup tinggi yakni mendekati 3°C/W. Hal ini dapat dijelaskan kembali dengan gambar 3 dan 4 bahwa pada saat input kalor rendah, gerakan osilasi yang menjadi penghantar kalor pokok pada OHP belum terjadi. Fluida kerja masih dalam kondisi stagnan atau belum bergerak. Ketika input kalor dinaikkan pada level 11,6 Watt baru kemudian terjadi penurunan hambatan thermal secara signifikan yang menandakan mulai berosilasi fluida kerja. Adanya gerakan osilasi menyebabkan terjadinya transfer kalor secara konveksi paksa. Pada kenaikan input kalor berikutnya yakni 20,1 dan 44,1 Watt mengakibatkan meningkatnya frekwensi osilasi yang menyebabkan hambatan thermal semakin menurun. Walaupun dengan sudut kemiringan penurunan hambatan thermal yang semakin melandai. Pada kalor maksimum 76,1 Watt didapatkan hambatan thermal terendah yakni sebesar 0,36 °C/W. Pada grafik hasil perhitungan kinerja dari pengujian yang dilakukan dikomparasi dengan penelitian yang dilakukan oleh Jahan et al.[7]. Dari hasil perbandingan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai hambatan thermal sehingga dapat dikatakan terdapat kecenderungan yang sama pada hasil peneliti sebelumnya.



Gambar 9. Hambatan thermal OHP

Pada pengaruh dari variasi sudut inklinasi, 30°, 60° dan 90° yang didapatkan dari hasil pengujian diperlihatkan bahwa pengaruh inklinasi relatif tidak begitu signifikan. Sehingga perbandingan hambatan thermal yang dihasilkan cenderung memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Dari hasil ini dapat dikatakan bahwa pengaruh inklinasi pada kinerja thermal tidak terlalu berperan penting sehingga OHP dapat bekerja dengan baik pada sudut inklinasi yang telah diuji.

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kinerja thermal dari OHP dengan fluida kerja ethanol dan dimensi 760 mm × 410 mm yang digunakan pada aplikasi heat recovery tata udara. Dari pengujian OHP yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan utama yakni:

1. Proses start-up terjadi saat diberikan input kalor sebesar 11,6 Watt yang ditandai dengan fluktuasi temperatur evaporator dan adiabatik. Pada input kalor 11,6 Watt hingga 32,6 Watt amplitudo fluktuasi temperatur relatif rendah. Fluktuasi temperatur dengan amplitudo lebih tinggi terjadi saat input kalor yang diberikan sebesar 44,1 W. Fluktuasi semakin stabil pada pemberian input kalor yang lebih tinggi yakni 59,1 dan 76,1 Watt.
2. Penurunan hambatan thermal terjadi akibat kenaikan input kalor yang mengakibatkan kenaikan pada kinerja OHP. Hambatan thermal terkecil yang didapatkan pada penelitian ini adalah 0,36 °C/W pada input kalor 76,1 W. Penurunan hambatan thermal sangat dipengaruhi oleh pola aliran yang terjadi pada OHP. Aliran sirkulasi memiliki hambatan

thermal yang lebih rendah dibandingkan dengan aliran osilasi.

3. Metode infrared thermography mampu memberikan gambaran pola aliran sehingga analisa kinerja thermal dapat dipermudah dengan melihat visualisasi aliran yang terjadi.
4. Pada pengujian dengan sudut inklinasi yang berbeda yakni 30°, 60°, dan 90° kinerja thermal yang dihasilkan cenderung tidak berbeda jauh.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih pada pendanaan penelitian yang diberikan oleh DRPM UI melalui hibah PUPT Universitas Indonesia.

Referensi

- [1] Z. Yang, A. Ghahramani, and B. Becerik-Gerber, "Building occupancy diversity and HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system energy efficiency," *Energy*, vol. 109, pp. 641-649, 8/15/ 2016.
- [2] H. Akachi, "Structure of a heat pipe," US Patents, 1990.
- [3] Y. H. Yau, "Application of a heat pipe heat exchanger to dehumidification enhancement in a HVAC system for tropical climates—a baseline performance characteristics study," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 164-171, 2007/02/01 2007.
- [4] S. H. Noie-Baghban and G. R. Majideian, "Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, pp. 1271-1282, 10/1/ 2000.
- [5] S. Khandekar, "Pulsating heat pipe based heat exchangers," in *Proc. Of the 21st Int. Symposium on Transport Phenomena, Kaohsiung City, Taiwan*, 2010, pp. 2-5.
- [6] S. Rittidech, W. Dangeton, and S. Soponronnarit, "Closed-ended oscillating heat-pipe (CEOHP) air-preheater for energy thrift in a dryer," *Applied Energy*, vol. 81, pp. 198-208, 2005.
- [7] S. A. Jahan, M. Ali, and M. Q. Islam, "Effect of inclination angles on heat transfer characteristics of a closed loop pulsating heat pipe (CLPHP)," *Procedia Engineering*, vol. 56, pp. 82-87, 2013.

- [8] B. Y. Tong, T. N. Wong, and K. T. Ooi, "Closed-loop pulsating heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, pp. 1845-1862, 12// 2001.
- [9] V. Karthikeyan, K. Ramachandran, B. Pillai, and A. B. Solomon, "Understanding thermo-fluidic characteristics of a glass tube closed loop pulsating heat pipe: flow patterns and fluid oscillations," *Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 1669-1680, 2015.
- [10] V. K. Karthikeyan, S. Khandekar, B. C. Pillai, and P. K. Sharma, "Infrared thermography of a pulsating heat pipe: Flow regimes and multiple steady states," *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 470-480, 1/25/ 2014.
- [11] J. Xu and X. Zhang, "Start-up and steady thermal oscillation of a pulsating heat pipe," *Heat and Mass Transfer*, vol. 41, pp. 685-694, 2005.
- [12] S. Khandekar, "Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes," 2004.