

## Studi Ekspserimental Perpindahan Panas Heat Pipe Berfluida Kerja R134a pada Kondisi Transien dan Steady

Thoharudin<sup>1,\*</sup>, Novi Caroko<sup>1</sup>, Mirza Yusuf<sup>1</sup>, Suyitno<sup>2</sup> dan Zainal Arifin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami No 36 A, Ketingan, Jebres, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

\*thoharudin@gmail.com

### Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas *heat pipe* berfluida kerja R134a pada kondisi transien dan *steady*. *Heat pipe* terbuat dari pipa tembaga berdiameter  $\frac{3}{4}$  inchi sepanjang 250 mm yang terbagi menjadi tiga bagian, area evaporator 110 mm, area adiabatik 30 mm dan kondensor sepanjang 110 mm. *Heat pipe* diisi dengan fluida kerja R134a pada tekanan 0,9 MPa dan pada area kondensor dilengkapi dengan fin dengan ukuran 115 mm x 50 mm dengan ketebalan 1 mm. Udara pendingin dimasukkan dalam saluran udara dengan kecepatan 0,8 m/dt, 1,0 m/dt dan 1,2 m/dt digunakan untuk mendinginkan area kondensor *heat pipe* yang bertemperatur evaporator 40°C, 60°C dan 80°C. Pengujian dilakukan pada kondisi awal bertemperatur lingkungan dan dicatat temperturnya setiap dua menit hingga kondisi *steady*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan semakin lama waktu semakin besar temperatur baik evaporator dan kondensor *heat pipe* disertai dengan semakin besarnya beda temperatur evaporator dan kondensor. Beda kecepatan udara pendingin tidak berpengaruh signifikan terhadap temperatur evaporator dan kondensor *heat pipe* dan nilai hambatan termalnya, akan tetapi berpengaruh terhadap efektivitas perpindahan panas *heat pipe*. Temperatur evaporator berpengaruh terhadap nilai hambatan termal dan efektivitas perpindahan panas *heat pipe*.

**Kata kunci** : heat pipe, R134a, hambatan termal, efektivitas, transien, steady

### Pendahuluan

Panas merupakan salah satu bentuk energi yang dapat di-*recovery* dengan alat *recovery* panas. Pada industri pengeringan misalnya, panas buangan setelah proses pengeringan belum dimanfaatkan secara optimal. Hal ini menyebabkan energi yang dibutuhkan untuk proses pengeringan menjadi besar karena limbah panas terbuang begitu saja. Padahal udara buangan dari proses pengeringan masih memiliki kandungan energi yang dapat dimanfaatkan lagi dalam proses pengeringan. Begitu pula pada peralatan lain seperti *Air Conditioner* (AC) dan *Freezer*, panas dari kondensor tidak termanfaatkan lagi. Salah satu peralatan *recovery* panas yang menjanjikan adalah *heat pipe*.

*Heat pipe* merupakan alat penukar panas yang efektif dengan sistem dua fasa yang melibatkan proses evaporasi dan kondensasi fluida kerja untuk memindahkan panas disertai dengan gaya kapiler yang terdapat pada *wick* untuk mensirkulasi fluida kerja [1].

Dibandingkan dengan alat penukar kalor konvensional, *heat pipe* memiliki beberapa kelebihan, antara lain: dapat memindahkan kalor dengan kuantitas yang besar melalui area perpindahan panas melintang yang kecil tanpa memerlukan daya tambahan, rugi tekanan yang rendah pada fluida, mudah dalam perawatan, struktur yang sederhana dan volume yang kecil [2].

Saat ini peneliti telah mengembangkan *heat pipe* dengan berbagai macam aplikasi untuk *recovery* panas dan proses pemanasan maupun pendinginan. Abd El-Baky dan Mohamed [3] telah mengembangkan *heat pipe* sebagai pendingin udara masuk (*fresh air*) pada sistem pengkondisian udara. Yang dkk [2] mengembangkan *heat pipe* sebagai pemanas ruangan pada kabin penumpang bus yang memanfaatkan panas dari gas buang mesin diesel bus. Meena dkk [4] mengembangkan *heat pipe* dengan sistem *check valve* yang diaplikasikan pada *air-preheater* untuk mengurangi kelembaban relatif pada sistem

pengering. Zou dkk [5] mengembangkan *heat pipe* sebagai pendingin battery yang dikombinasikan dengan sistem pengkondisian udara pada kendaraan listrik. Daghigh dan Shafieian [6] mengembangkan *heat pipe* sebagai pemanas air yang memanfaatkan panas matahari melalui sistem *solar collector* tipe *evacuated tube collector*.

Unjuk kerja panas *heat pipe* tergantung pada beberapa parameter, antara lain rasio pengisian, sudut kemiringan, dan fluida kerja. *Heat pipe* memiliki unjuk kerja optimum pada rasio pengisian 30% [7,8] dan pada posisi mendekati vertikal [9,10]. Selain itu, fluida kerja *heat pipe* juga berpengaruh signifikan terhadap unjuk kerja karena sebagai materi pembawa panas laten, sehingga kemampuan fluida untuk menguap dan seberapa besar panas yang diserap akan menentukan seberapa besar unjuk kerja dari *heat pipe* tersebut. Gedik dkk [11] membandingkan refrigeran R134a dan R410A sebagai fluida kerja *heat pipe*. Hasil dari penelitian tersebut memperlihatkan bahwa R134a memiliki unjuk kerja termal yang lebih baik dari pada R140A sebagai fluida kerja *heat pipe*.

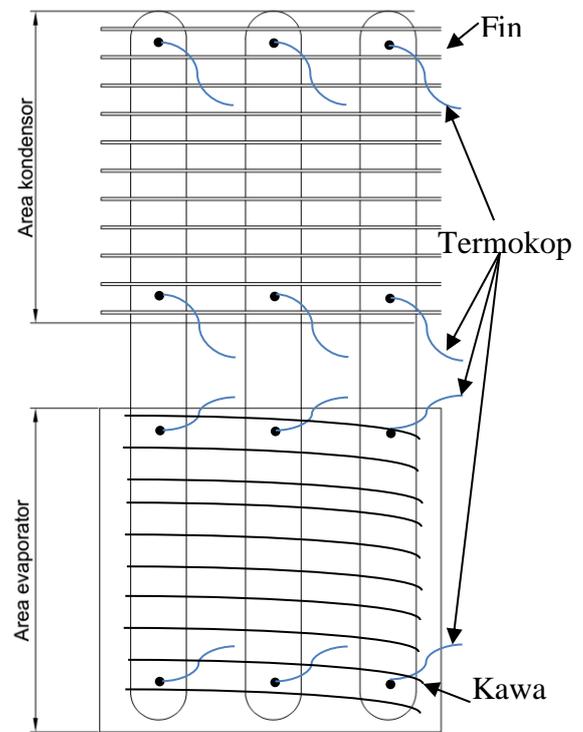
Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur kondensor *heat pipe* dan kecepatan udara udara pendingin terhadap efektivitas perpindahan panas dan hambatan termal *heat pipe* berfluida kerja R134a pada kondisi transien dan *steady*.

#### Metode

*Heat pipe* terbuat dari pipa tembaga dengan diameter  $\frac{3}{4}$  inchi sepanjang 250 mm yang terbagi menjadi tiga bagian, area kondensor dan evaporator masing-masing sepanjang 110 mm dan area adiabatik sepanjang 30 mm. Bagian dalam pipa tembaga disisipi *wick* yang terbuat dari anyaman kawat *stainless steel* dengan ukuran mesh 4. Pada bagian kondensor *heat pipe* dilengkapi dengan fin sebagai penambah luas area perpindahan panas dengan dimensi 115 mm x 50 mm dengan ketebalan 1 mm sebanyak 11 fin seperti terlihat pada Gambar 1.

Tiga buah *heat pipe* diisi dengan R134a pada tekanan 0,9 MPa dan disusun secara melintang pada saluran udara pendingin (kondensor *heat pipe*) dengan kecepatan udara

diatur pada 0,8, 1,0, dan 1,2 m/dt. Sementara itu pada bagian evaporator *heat pipe* dililit kawat nikelin dan diisolasi pada bagian luarnya dengan *glass wool*. Temperatur pemanas listrik tersebut diatur sebesar 40°C, 60°C dan 80°C.



Gambar 1. Skema *heat pipe*

Termokopel tipe T ditempatkan pada dinding pangkal dan ujung evaporator dan kondensor tiap *heat pipe* dan pada saluran masuk dan keluar udara pendingin sebagai alat pengukur suhu udara. Temperatur dicatat tiap 2 menit sampai pada kondisi *steady* pada kondisi awal bertemperatur lingkungan (60 menit).

Hambatan termal *heat pipe* dihitung dengan persamaan 1 [12] dimana  $T_{ev}$  merupakan temperatur rata-rata evaporator dan  $T_c$  merupakan temperatur rata-rata kondensor. Sementara itu,  $Q$  merupakan panas yang dihasilkan kawat nikelin bersumber dari listrik dihitung dengan persamaan 2 dimana  $V$  merupakan tegangan listrik dan  $I$  merupakan arus listrik.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{(T_{ev} - T_c)}{Q} \quad (1)$$

$$Q = V \times I \quad (2)$$

Efektivitas perpindahan panas dihitung dengan melibatkan persamaan 3 [13], dimana  $Q_{exp}$  merupakan kalor yang diserap udara pendingin. Kalor tersebut dihitung dengan persamaan 4, dimana  $\dot{m}$  merupakan laju aliran massa udara,  $c_p$  merupakan kalor spesifik udara,  $T_{out}$  merupakan temperatur udara setelah melewati *heat pipe* dan  $T_{in}$  merupakan temperatur udara sebelum melewati *heat pipe*.

$$Effectiveness (\varepsilon) = \frac{Q_{exp}}{Q} \quad (3)$$

$$Q_{exp} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

## Hasil dan Pembahasan

### Distribusi temperatur *heat pipe*

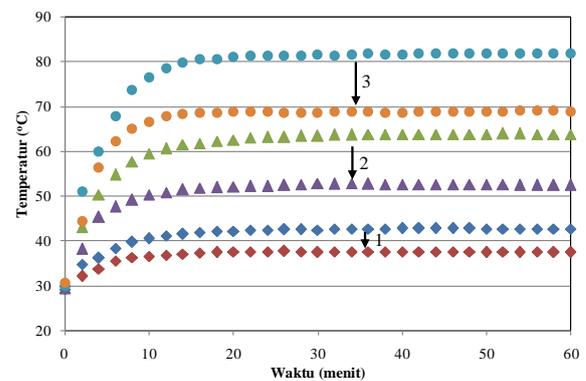
Distribusi temperatur evaporator dan kondensor *heat pipe* terhadap waktu terlihat pada Gambar 2, yang mana pada pengujian temperatur evaporator *heat pipe* dikontrol pada 40°C, 60°C dan 80°C. Terlihat pada Gambar 2 bahwa dengan semakin lama waktu maka perubahan temperatur semakin rendah mendekati keadaan tunak (*steady*). Waktu yang ditempuh untuk mencapai keadaan tunak pada masing-masing temperatur evaporator tidak terlihat perbedaan secara signifikan. Pada temperatur evaporator 40°C keadaan tunak dicapai pada menit ke-16 sementara pada temperatur evaporator 60°C dan 80°C dicapai pada menit ke-20.

*Heat pipe* bekerja dengan adanya proses pendidihan fluida kerja untuk mentransfer panas dari evaporator menuju kondensor, proses pendidihan fluida kerja membutuhkan waktu sehingga pada saat 15 menit awal perubahan temperatur sangat signifikan yang menandai adanya proses pemanasan fluida kerja hingga terjadi pendidihan. Oleh karena itu dengan semakin lamanya waktu perubahan temperatur semakin kecil karena proses pendidihan dan kondensasi sudah berjalan secara seimbang.

Perbedaan waktu tunak (*steady*) dipengaruhi oleh capaian temperatur kerja dari *heat pipe*, dengan semakin tinggi capaian temperatur kerja maka semakin besar kebutuhan energi yang harus disuplai pemanas hingga sampai pada temperatur yang dikehendaki *heat pipe* bekerja. Dengan demikian semakin tinggi capaian temperatur

*heat pipe* bekerja membutuhkan waktu yang lebih lama untuk tercapainya keadaan tunak.

Selain itu, pada Gambar 2 juga terlihat bahwa dengan semakin tingginya temperatur evaporator berdampak pada semakin besarnya perbedaan temperatur antara evaporator dan kondensor dengan semakin lamanya waktu. Hal ini karena dengan semakin besar temperatur permukaan pipa *heat pipe* maka semakin besar perpindahan panas secara konveksi yang terjadi pada dinding pipa *heat pipe* yang mengakibatkan panas yang dilepaskan melalui dinding pipa *heat pipe* semakin besar. Kondisi tersebut berdampak pada penurunan temperatur kondensor lebih besar seiring dengan besarnya temperatur evaporator.



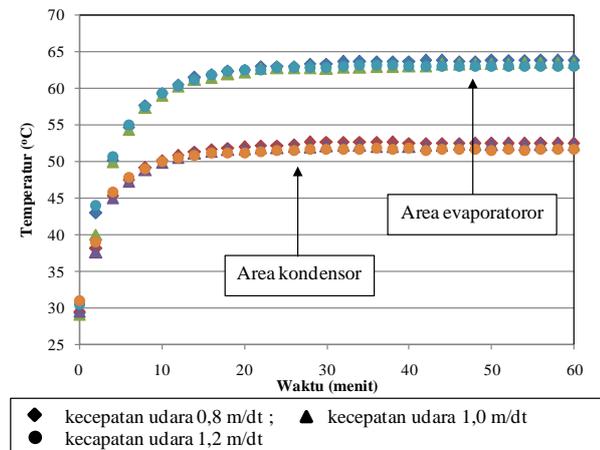
1 → Temperatur evaporator 40°C; 2 → Temperatur evaporator 60°C  
3 → Temperatur evaporator 80°C

Gambar 2. Distribusi temperatur terhadap waktu pada temperatur evaporator 40°C, 60°C dan 80°C

Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara temperatur evaporator dan kondensor *heat pipe* terhadap waktu pada kecepatan udara pendingin yang berbeda. Pada Gambar 3 terlihat bahwa dengan perbedaan kecepatan udara pendingin tidak berpengaruh signifikan terhadap temperatur evaporator dan kondensor *heat pipe*.

*Heat pipe* bekerja melalui proses pendidihan dan pengembunan secara kontinu sehingga dengan semakin besar laju pendinginan pada kondensor maka semakin cepat proses pengembunan fluida kerja yang kemudian terisi dengan uap yang berasal dari evaporator yang masih panas. Hal ini yang melatar belakangi perubahan laju pendinginan yang

tidak berdampak signifikan pada temperatur evaporator dan kondensor *heat pipe*.



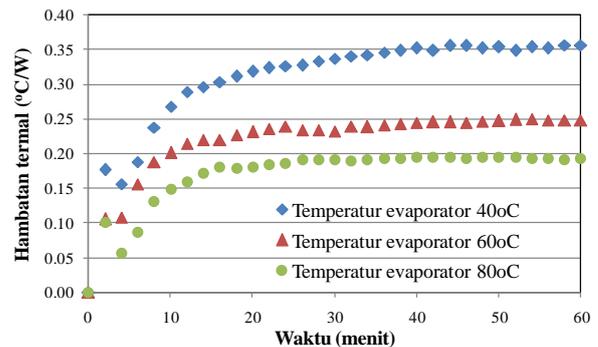
Gambar 3. Distribusi temperatur terhadap waktu pada kecepatan udara pendingin 0,8m/dt, 1,0 m/dt dan 1,2 m/dt

### Unjuk kerja *heat pipe*

Unjuk kerja *heat pipe* ditunjukkan dalam hambatan termal dan efektifitas perpindahan panas. Gambar 4 menunjukkan hubungan antara hambatan termal terhadap waktu pada *heat pipe* dengan temperatur evaporator 40°C, 60°C dan 80°C. Pada Gambar 4 terlihat bahwa dengan semakin lama waktu maka semakin besar hambatan termal *heat pipe*. Hal ini karena dengan semakin lama waktu semakin besar perbedaan temperatur antara evaporator dan kondensor akibat dari proses pemanasan pada evaporator dan proses pendinginan pada kondensor *heat pipe*.

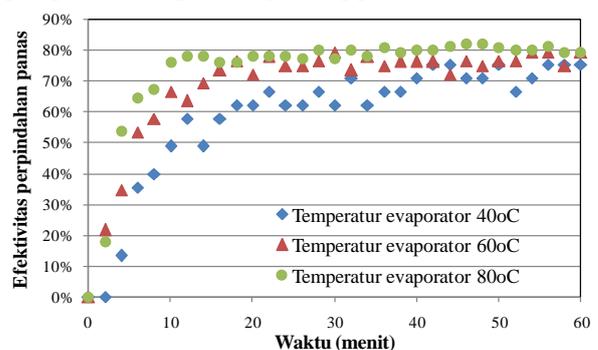
Pada Gambar 4 terlihat bahwa pada menit ke-4 hambatan termal pada *heat pipe* temperatur evaporator 40°C dan 80°C turun sementara pada *heat pipe* evaporator 60°C tetap. Hal ini terjadi karena penurunan laju perubahan temperatur evaporator yang mana sampai menit ke-2 laju perubahan temperatur evaporator sangat besar kemudian terjadi penurunan pada menit ke-4. Kondisi ini dipengaruhi oleh beda temperatur antara kondensor dan evaporator turun pada menit ke-4 yang disebabkan oleh proses pendidihan fluida kerja. Pendidihan menyerap kalor laten dalam jumlah energi yang besar dari pada kalor sensibel dan terjadi pada temperatur konstan. Akibatnya, laju perubahan temperatur pada evaporator *heat pipe* rendah dan berdampak pada turunnya hambatan termal *heat pipe*.

Selain itu, Gambar 4 juga memperlihatkan bahwa dengan semakin besar temperatur evaporator maka hambatan termal *heat pipe* semakin rendah. Rendahnya nilai hambatan termal pada *heat pipe* mengindikasikan tingginya nilai efektifitas perpindahan panas seperti terlihat pada Gambar 5.



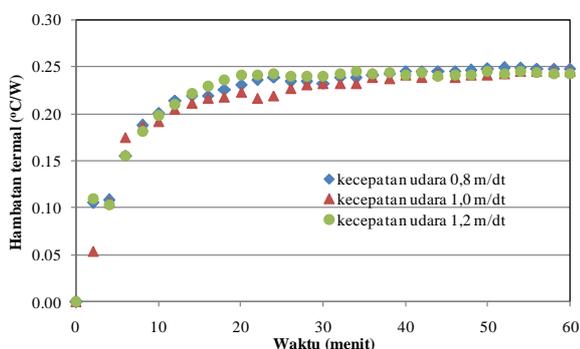
Gambar 4. Hambatan termal *heat pipe* terhadap waktu pada temperatur evaporator 40°C, 60°C dan 80°C

Pada Gambar 5 secara umum terlihat bahwa dengan semakin besar temperatur evaporator maka semakin besar efektifitas perpindahan panas *heat pipe*. Hal ini karena dengan semakin besar temperatur evaporator maka laju pendidihan fluida kerja semakin besar yang berdampak pada tingginya laju energi yang dipindahkan oleh fluida kerja. Selain itu dengan proses perpindahan energi melalui sistem dua fasa terjadi peningkatan koefisien konveksi pada fluida kerja saat mendidih dan mengembun. Peningkatan koefisien konveksi tersebut berdampak pada besarnya energi yang diserap pada evaporator dan dilepaskan pada kondensor *heat pipe* sehingga efektifitas perpindahan panasnya tinggi.



Gambar 5. Efektivitas perpindahan panas *heat pipe* terhadap waktu pada temperatur evaporator 40°C, 60°C dan 80°C

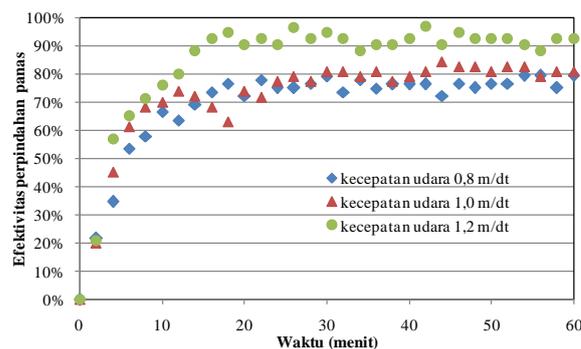
Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara hambatan termal *heat pipe* terhadap waktu pada kecepatan udara pendingin 0,8m/dt, 1,0 m/dt dan 1,2 m/dt. Terlihat pada Gambar 6 bahwa dengan semakin besar laju udara pendingin tidak berpengaruh signifikan terhadap hambatan termal *heat pipe*. Hal ini karena *heat pipe* berisi fluida yang bergerak secara aktif akibat penguapan dan pengembunan sehingga temperatur evaporator dan kondensor tidak terjadi perubahan yang signifikan dengan perubahan laju pendinginan.



Gambar 6. Hambatan termal *heat pipe* terhadap waktu pada kecepatan udara pendingin 0,8m/dt, 1,0 m/dt dan 1,2 m/dt

Efektivitas perpindahan panas dipengaruhi oleh laju pendingin udara pada kondensor *heat pipe* seperti terlihat pada Gambar 7. Dengan semakin besar laju udara maka semakin besar efektivitas perpindahan panas *heat pipe*.

*Heat pipe* bekerja melalui pendidihan dan pengembunan fluida kerja yang mana dengan semakin besar laju pendinginan maka semakin besar laju sirkulasi fluida kerja dalam pipa yang berakibat semakin tingginya Angka Reynolds. Begitu pula pada aliran udara pendingin, dengan semakin besar laju kecepatan udara pendingin maka semakin besar Angka Reynolds. Semakin besarnya Angka Reynolds berdampak pada semakin besarnya turbulensi aliran dan koefisien konveksi [14] yang pada akhirnya berimbas pada tingginya nilai efektivitas perpindahan panas.



Gambar 7. Efektivitas perpindahan panas *heat pipe* terhadap waktu pada kecepatan udara pendingin 0,8m/dt, 1,0 m/dt dan 1,2 m/dt

### Kesimpulan

Penelitian secara eksperimental pada proses perpindahan panas *heat pipe* kondisi transien dan steady telah dilakukan. Hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan semakin lama waktu maka semakin besar temperatur baik kondensor maupun evaporator *heat pipe* disertai semakin besarnya beda temperatur antara evaporator dan kondensor. Sementara itu, kecepatan udara pendingin tidak berpengaruh signifikan terhadap temperatur evaporator dan kondensor *heat pipe*.

Hambatan termal dan efektivitas perpindahan panas dipengaruhi oleh temperatur evaporator *heat pipe*. Dengan semakin besarnya temperatur evaporator maka semakin kecil hambatan termal yang berdampak pada tingginya efektivitas perpindahan panas *heat pipe*. Sementara itu, kecepatan udara pendingin tidak berpengaruh terhadap hambatan termal *heat pipe*, tetapi berpengaruh signifikan terhadap efektivitas perpindahan panas *heat pipe*.

### Referensi

- [1] Bai, L., Lin, G., Mu, Z. and Wen, D. Theoretical Analysis of Steady-State Performance of A Loop Heat Pipe with A Novel Evaporator. *Applied Thermal Engineering*. 64 (2014) 233-241.
- [2] Yang, F., Yuan, X. and Lin, G. Waste Heat Recovery Using Heat Pipe Heat Exchanger for Heating Automobile Using Exhaust Gas. *Applied Thermal Engineering*. 23 (2003) 367-372.

- [3] Abd El-Baky, MA. and Mohamed MM. Heat Pipe Heat Exchanger for Heat Recovery in Air Conditioning. *Applied Thermal Engineering*. 27 (2007) 795-801.
- [4] Meena, P., Rittidech, S. and Poomsadam, N. Application of Closed-Loop Oscillating Heat-Pipe with Check Valves (CLOHP/CV) Air-Preheater for Reduced Relative-Humidity in Drying Systems. *Applied Energy*. 84 (2007) 553-564.
- [5] Zou, H., Wang, W., Zhang, G., Qin, F., Tian, C. and Yan Y. Experimental Investigation on An Integrated Thermal Management System with Heat Pipe Heat Exchanger for Electric Vehicle. *Energy Conversion and Management*. 118 (2016) 8-95.
- [6] Daghigh, R. and Shafieian, A. Theoretical and Experimental Analysis of Thermal Performance of A Solar Water Heating System with Evacuated Tube Heat Pipe Collector. *Applied Thermal Engineering*. 103 (2016) 1219–1227.
- [7] Jiansheng, W., Zhenchuan, W. and Meijun L. Thermal Performance of Pulsating Heat Pipes with Different Heating. *Applied Thermal Engineering*. 64 (2014) 209-212.
- [8] Tharayil, T., Asirvatham, LG., Ravindran, V. and Wongwises, S. Effect of Filling Ratio on The Performance of A Novel Miniature Loop Heat Pipe Having Different Diameter Transport Lines. *Applied Thermal Engineering*. 106 (2016) 588-600.
- [9] Goshayeshi, HR., Goodarzi, M., Safaei, MR. and Dahari, M. Experimental Study on the Effect of Inclination Angle on Heat Transfer Enhancement of a Ferrofluid in a Closed Loop Oscillating Heat Pipe under Magnetic Field. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 74 (2016) 265-270.
- [10] Jahan, SA., Ali, M. and Islam, MQ. Effect of Inclination Angles on Heat Transfer Characteristics of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe (CLPHP). *Procedia Engineering*. 56 (2013) 82-87.
- [11] Gedik, E., Yılmaz, M. and Kurt, H. Experimental Investigation on The Thermal Performance of Heat Recovery System with Gravity Assisted Heat Pipe Charged with R134a and R140A. *Applied Thermal Engineering*. 99 (2016) 334-342.
- [12] Driss, A., Maalej, S. and Zaghdoudi, MC. Experimentation and Modeling of The Steady-State and Transient Thermal Performances of a Helicoidally Grooved Cylindrical Heat Pipe. *Microelectronics Reliability*. 62 (2016) 102-112.
- [13] Meena, P. and Rittidech, S. Comparisons of Heat Transfer Performance of a Closed-looped Oscillating Heat Pipe and Closed-looped Oscillating Heat Pipe with Check Valves Heat Exchangers. *American J. of Engineering and Applied Sciences*. 1 (2008) 7-11.
- [14] Zhang, X., Wang, Y., Cang, P. and Wang, R. Experimental Investigation of Thermal Hydraulic Performance of Heat Exchangers with Different Reynolds Numbers on Both Air-Side and Water-Side. *Applied Thermal Engineering*, 99 (2016) 1331-1333