

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

## M5-007 Kaji Eksperimental Pompa Kalor Temperatur Tinggi Sebagai Penghasil Uap Menggunakan Refrigeran R-600a

Djuanda<sup>1</sup>, Aryadi Suwono<sup>2</sup>, Ari Darmawan Pasek<sup>2</sup>, Nathanael P. Tandian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin  
Universitas Negeri Makassar,  
Kampus UNM Parangtambung Makassar, 90224  
<sup>2</sup>Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung  
Lab. Termodinamika PPAU-IR ITB  
Phone: 022-2502342, E-mail: djuanda@students.itb.ac.id

### ABSTRAK

*Pompa kalor adalah sistem konversi energi yang menawarkan teknologi untuk memanfaatkan sumber-sumber kalor yang tersedia di lingkungan seperti dari udara, tanah, air, matahari maupun sumber lainnya menjadi kalor yang berguna. Dengan menggunakan sedikit masukan energi, pompa kalor dapat meningkatkan temperatur ruangan maupun air ke temperatur yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan pompa kalor kompresi uap dengan mengkonversi kalor masukan pada evaporator untuk menghasilkan uap. Sistem terbagi atas dua bagian yaitu sub-sistem pemanas evaporator yang digunakan sebagai sumber kalor, dan yang kedua adalah sub-sistem pompa kalor. Sub-sistem pemanas evaporator menggunakan pemanas boiler yang pada penelitian selanjutnya akan digantikan oleh sistem pemanas energi surya. Sub-sistem pompa kalor menggunakan steam generator vertikal berfungsi sebagai kondensor, selain itu terdapat peralatan double pipe internal heat exchanger, preheater, dan evaporator. Sebagai penggerak utama digunakan kompresor torak. Penggunaan konfigurasi ini disesuaikan dengan tujuan utama pompa kalor sebagai penghasil uap. Isobutana dipilih sebagai fluida kerja dengan berbagai pertimbangan, selain ramah terhadap lingkungan juga dengan pertimbangan tekanan jenuh refrigeran yang cukup rendah serta ketersediaan dengan minyak pelumas. Dari hasil pengujian diperoleh koefisien performansi (COP) pompa kalor ketika evaporator diberi kalor akan mencapai harga 4 dengan rasio tekanan maksimum yang dapat dicapai adalah 4,4. Temperatur uap keluar steam generator mencapai 120°C dengan laju aliran mencapai 0,11 kg/menit. Lift temperatur (perbedaan antara temperatur uap keluar steam generator dan temperatur sumber kalor) maksimum hasil pengujian yang diperoleh adalah 60°C. Pada kondisi ini tujuan utama pompa kalor temperatur tinggi sebagai penghasil uap dapat dicapai.*

**Kata kunci:** Pompa kalor, temperatur tinggi, isobutan, performansi pompa kalor

## 1. Pendahuluan

---

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Kepedulian terhadap lingkungan menjadikan fokus akan pemanfaatan sumber-sumber energi yang ramah terhadap lingkungan semakin meningkat. Pengembangan teknologi baru dalam bidang energi, serta aplikasinya dalam kehidupan manusia semata-mata agar suatu teknologi semakin efisien dan berdayaguna.

Dalam bidang pemanas ruangan maupun air, sistem pompa kalor menyediakan teknologi yang efisien dan hemat energi. Sistem ini juga terbukti memberikan kontribusi dalam pengurangan gas-gas yang menyebabkan terjadinya pemanasan global.

Pompa kalor menawarkan teknologi yang dapat memanfaatkan sumber-sumber panas yang tersedia dilingkungan seperti dari udara, tanah, air, matahari maupun sumber lainnya. Dengan menggunakan sedikit energi, pompa kalor dapat meningkatkan temperatur ruangan maupun air ketingkat yang diinginkan. Perbandingan beberapa sistem pemanas air ditinjau dari biaya awal, biaya operasi, dan efisiensi sistem dapat dilihat pada Tabel 1 [6].

Tabel 1. Perbandingan beberapa sistem pemanas air.

<b>Tipe Pemanas Air</b>	<b>Biaya Awal</b>	<b>Biaya Operasi</b>	<b>Efisiensi</b>
Listrik	Rendah	Tinggi	92%
Gas	Rendah	Tinggi	70%
Energi Surya	Tinggi	Sangat rendah	N.A
Pompa Kalor	Sedang	Rendah	300 – 600%

Pompa kalor juga terbukti mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub>. Data tahun 1997 menunjukkan total emisi CO<sub>2</sub> global sebesar 22 milyar ton [5]. Dari jumlah tersebut pemakaian energi untuk pemanas ruangan menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> 30% sedangkan kegiatan industri menghasilkan emisi sebesar 35%. Dengan penggunaan pompa kalor maka pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dari sektor pemanas ruangan sebesar 31% dibandingkan dengan penggunaan pemanas ruangan dengan menggunakan *oil-fired boiler*. Tahun 2002 Total penghematan emisi CO<sub>2</sub> dengan pemakaian pompa kalor sebesar 1,2 milyar ton, ini berarti sekitar 6% dari total emisi CO<sub>2</sub>. Pengurangan emisi ini adalah pengurangan emisi penyebab pemanasan global terbesar yang ditawarkan oleh satu teknologi. Dengan peningkatan efisiensi pembangkit listrik dan pompa kalor diharapkan dimasa depan pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dapat mencapai 16%.

Melihat berbagai kelebihan pompa kalor dibandingkan dengan sistem lain, maka pengembangan teknologi pompa kalor sebagai sistem pemanas memiliki prospek yang baik. Teknologi pompa kalor yang terdapat pada negara beriklim dingin lebih banyak ditujukan untuk keperluan pemanas ruangan dan pemanas air, sedangkan untuk daerah tropis seperti Indonesia, pengembangan pompa kalor ditujukan untuk pemenuhan pemanas air dan sistem pengeringan baik untuk perkantoran, hotel maupun industri.

Berbagai jenis pompa kalor saat ini telah tersedia di pasaran pada umumnya dari jenis kompresi uap dengan menggunakan berbagai jenis refrigeran seperti R-22, R114, R-407 maupun R-134a. Karena sistem ini kebanyakan digunakan sebagai pemanas ruangan dan air maka kemampuan pompa kalor saat ini masih terbatas utamanya pada temperatur air yang masih berkisar 60 – 65°C [12].

Beberapa sistem telah dicoba seperti pemakaian siklus EVI (*Enhanced Vapor Injection*) yang dapat menghasilkan temperatur aliran keluaran sampai 90°C [14].

## 2. Pompa Kalor Temperatur Tinggi

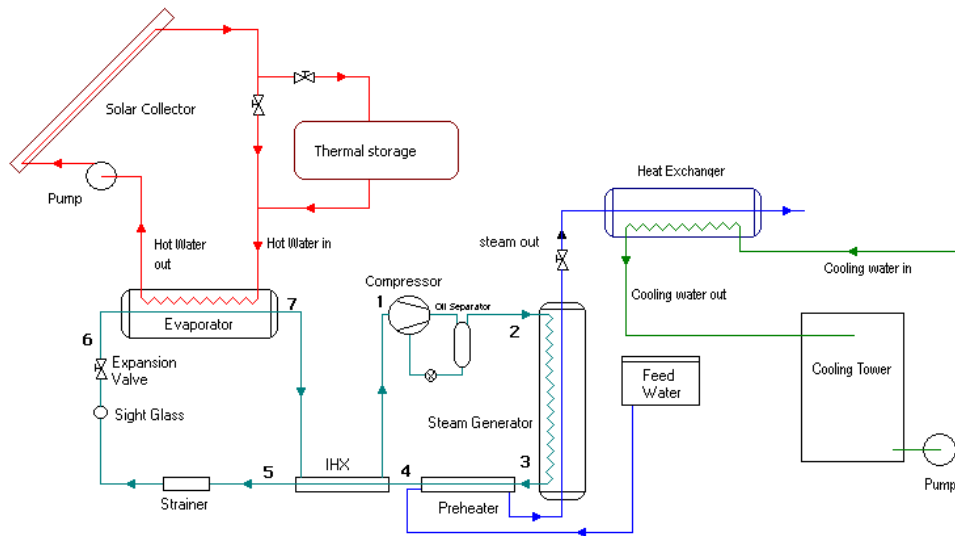
Secara alamiah kalor mengalir dari tempat bertemperatur lebih tinggi ke tempat bertemperatur lebih rendah. Dengan menggunakan sejumlah kecil energi arah aliran dapat dibalik dengan menggunakan teknologi pompa kalor. Teknologi ini bermanfaat karena dapat memindahkan kalor dari sumber-sumber alamiah seperti udara, air, tanah, panas buangan maupun energi surya ke ruangan maupun dimanfaatkan oleh industri.

Terdapat dua jenis utama pompa kalor, yaitu pompa kalor kompresi uap dan pompa kalor absorpsi. Secara teoritis pemompaan kalor dapat dicapai melalui berbagai siklus termodinamika dan proses seperti *Siklus Stirling*, *Siklus Vuilleumier*, *solid-vapor sorbtion system*, *hybrid system* dan proses elektromagnetik dan akustik. Dengan pertimbangan COP yang lebih tinggi maka penelitian ini difokuskan pada pengembangan pompa kalor kompresi uap.

Teori pompa kalor kompresi uap mulai dikembangkan pada akhir abad 19 dan mulai diwujudkan pada permulaan abad 20. Komponen utama dari siklus ini adalah kompressor, alat ekspansi dan dua penukar kalor yang masing-masing berfungsi sebagai evaporator dan kondensor. Pada beberapa sistem pompa kalor CO<sub>2</sub>, fungsi kondensor digantikan oleh *gas cooler*.

Pompa kalor temperatur tinggi yang digunakan memanfaatkan sistem kolektor surya sebagai sumber panas serta *steam generator* (pembangkit uap) untuk menggantikan fungsi kondensor. Skema sistem ini dapat dilihat pada Gambar 1, Sistem terbagi atas dua bagian, yaitu sub-sistem pemanas surya yang digunakan sebagai sumber kalor untuk pompa kalor, dan yang kedua adalah sub-sistem pompa kalor.

---



Gambar 1. Pompa kalor temperatur tinggi berbantuan pemanas energi surya

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*

Evaporator memindahkan energi dari sumber kalor yaitu dari sub-sistem pemanas surya ke sub-sistem pompa kalor. Aliran refrigeran dari evaporator melewati penukar kalor internal kemudian dikompresi di kompresor hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi. Refrigeran kemudian mengalir melalui *steam generator*, kalor kemudian dipindahkan ke aliran air yang mengalir melalui pembangkit uap yang akan merubahnya menjadi aliran uap. Sebelum memasuki pembangkit uap, air terlebih dahulu dialirkan melalui pemanas awal yang akan meningkatkan temperatur air dari kondisi awal.

Beberapa penelitian penggunaan pompa kalor yang dikombinasikan dengan sumber kalor lainnya juga telah dipublikasikan. Odeh dkk [10] melakukan penelitian pada pompa kalor kombinasi energi surya yang menggunakan pemanasan efek ganda pada evaporator. Refrigeran yang digunakan adalah R-134a dan air digunakan sebagai fluida kerja pada sistem energi surya. Evaporator efek ganda diperoleh dengan menggabungkan kalor yang diperoleh pada evaporator dari air dan udara sekeliling. Laju aliran air yang meningkat pada evaporator akan meningkatkan kalor yang dilepaskan oleh kondensor demikian pula dengan peningkatan temperatur air masuk kondensor akan meningkatkan kalor yang dilepaskan oleh kondensor serta COP pompa kalor.

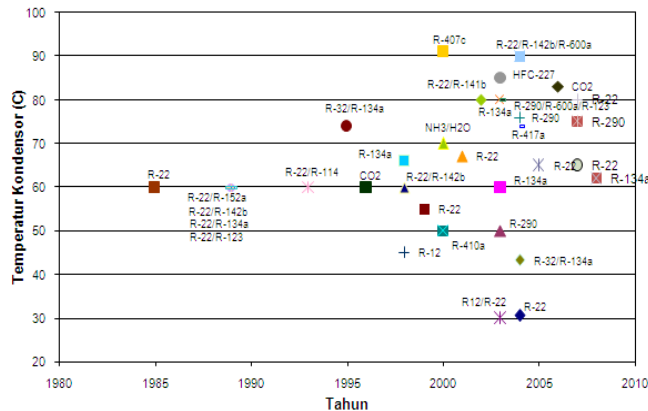
Pompa kalor dikombinasikan dengan energi surya digunakan oleh Yumrutas dan Kaska [15] untuk keperluan pemanasan ruangan. Pompa kalor menggunakan refrigeran R-22 dan thermal storage menggunakan air sebagai fluida kerjanya. COP pompa kalor berkisar 2.5 untuk cuaca berawan dan 3.5 untuk cuaca terik. Secara keseluruhan COP pompa kalor 15 – 20% lebih rendah dibandingkan dengan COP sistem.

C. Chaichana dkk [16] membandingkan unjuk kerja refrigerant R-22 terhadap refrigeran hidrokarbon (R-290, R-600, R-600a, R-1270), R-717 dan R-744 pada *solar-boosted heat pump*. Hasil analisa menunjukkan bahwa R-717 memiliki keunggulan lebih bila dibandingkan dengan refrigerant lainnya. Dengan tanpa melihat kompatibilitas terhadap material, R-717 dapat menggunakan compressor R-22. selain itu dengan panas latent yang tinggi massa refrigerant yang dibutuhkan juga semakin kecil. Kelemahan R-717 terletak pada sifatnya yang beracun, korosif terhadap tembaga serta temperatur keluar kompresor yang tinggi yang mencapai 200°C sehingga dapat mengakibatkan dekomposisi dari minyak pelumas. R-290 dan R-1270 dapat langsung disubstitusi ke dalam sistem R-22 dengan sedikit modifikasi untuk pertimbangan keselamatan, hanya saja COP sistem akan sedikit berkurang bila dibandingkan dengan R-22.

Devotta [4] melakukan penelitian berbagai refrigeran sebagai pengganti refrigerant CFC, refrigerant HFE-134 sangat menjanjikan sebagai untuk digunakan pada aplikasi temperatur tinggi sebagai pengganti CFC-114. Sementara untuk pengganti CFC-11 digunakan HCFC-123, sedangkan untuk HFC-245ca dan HFC-143 digunakan sebagai pengganti CFC-11 untuk jangka waktu panjang.

Dari berbagai kajian pompa kalor yang ada saat ini, keberadaan pompa kalor kompresi uap dari tahun 1985 sampai 2008 dapat ditampilkan dalam bentuk diagram

seperti pada Gambar 2. Diagram ini menunjukkan berbagai jenis refrigeran yang dipergunakan pada pompa kalor selama ini serta temperatur kondensor yang dicapai baik refrigeran murni maupun refrigeran campuran. Temperatur maksimum kondensor dari pompa kalor yang ada hanya berada pada kisaran 90°C.



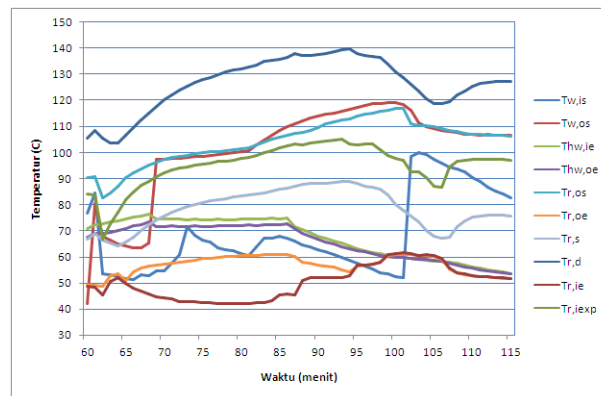
Gambar 2. Diagram keberadaan pompa kalor kompresi uap dari tahun 1985 – 2008

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa keberadaan pompa kalor sebagai penghasil uap selama ini belum dilakukan. Dengan berbagai keuntungan pompa kalor yang dimiliki serta kombinasi dengan energi surya sebagai sumber panas pada evaporator, maka pengkajian pompa kalor sebagai penghasil uap berpotensi untuk dikembangkan.

### 3. Hasil Pengujian

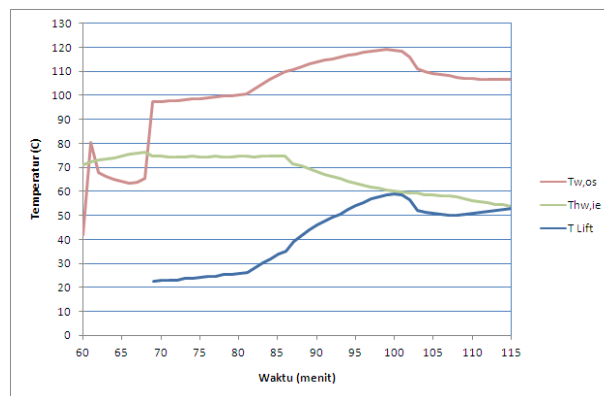
Simulasi pengujian pada sub-sistem pompa kalor dilakukan dengan menggunakan masukan kalor dari uap yang dihasilkan oleh boiler. Uap dilewatkan ke penukar kalor sehingga kalor yang diberikan ke evaporator dapat dikontrol. Pengujian dilakukan dengan menggunakan refrigeran isobutana (R-600a). Kontrol massa refrigeran yang mengalir dalam sistem dilakukan melalui katup ekspansi.

Hasil pengujian pada sub-sistem pompa kalor ditampilkan pada Gambar 3. Dari grafik temperatur yang terjadi pada sistem menunjukkan bahwa temperatur kondensor mengalami peningkatan saat evaporator diberi kalor dari sumber kalor (*boiler*). Temperatur maksimum mencapai 140°C dalam waktu 95 menit dari awal pengujian. Pada waktu yang bersamaan air di dalam *steam generator* juga mengalami proses perubahan fasa, uap terbentuk pada saat temperatur masukan sumber kalor mencapai 75°C. Temperatur uap maksimum yang dihasilkan oleh sub-sistem mencapai 120°C dengan laju aliran mencapai 0,11 kg/menit. Temperatur ini dicapai sesuai dengan kondisi temperatur refrigeran masuk *steam generator* mencapai 130°C.



Gambar 3. Sejarah temperatur pompa kalor

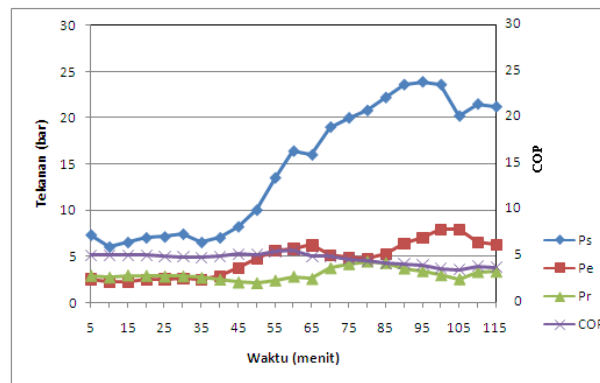
Hal lain yang menjadi perhatian adalah peningkatan temperatur (*lift temperature*) yang dihasilkan oleh sistem pompa kalor. *Lift temperature* didefinisikan sebagai perbedaan temperatur yang dihasilkan antara keluaran *steam generator* dan masukan kalor pada evaporator ( $Tr,os - Thw,ie$ ). Hasil pengujian pada sistem dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Lift temperatur pompa kalor

Saat evaporator diberi kalor dari boiler, lift temperatur mengalami penurunan. Hal ini sejalan dengan peningkatan temperatur air masukan ke evaporator sementara temperatur air dalam *steam generator* tidak mengalami peningkatan yang sebanding. Pada saat uap mulai terbentuk dalam *steam generator* terjadi peningkatan temperatur yang sangat tinggi. Lift temperatur maksimum yang dapat dicapai adalah  $60^{\circ}\text{C}$ . Yang kemudian mengalami penurunan dengan semakin naiknya kalor masukan pada evaporator kemudian mencapai stabil pada temperatur sekitar  $50^{\circ}\text{C}$ .

Peningkatan temperatur sistem juga dengan sendirinya mempengaruhi tekanan yang terjadi pada sistem. Tekanan pada *steam generator* juga mengalami peningkatan yang berarti pada saat kalor diberikan ke evaporator. Tekanan maksimum yang dicapai oleh *steam generator* mencapai 24 bar serta 8 bar pada evaporator. Rasio tekanan (*pressure ratio*) yang dapat diperoleh dari sistem pompa kalor juga dapat diketahui dari Gambar 5.



Gambar 5. Rasio tekanan dan koefisien performansi pompa kalor

Rasio tekanan maksimum yang dapat dicapai oleh sistem pompa kalor dengan menggunakan isobutan mencapai 5, sedangkan rasio minimum mencapai 2,5. Koefisien performansi (COP) maksimum yang dicapai oleh sistem adalah 5. Koefisien performansi mengalami penurunan saat evaporator diberi kalor. COP akan mengalami penurunan dan berada pada kisaran 3,5. Penurunan ini terjadi disebabkan kondisi kerja refrigeran yang bergeser mendekati titik kritik dari kubah jenuh refrigeran.

#### 4. Kesimpulan

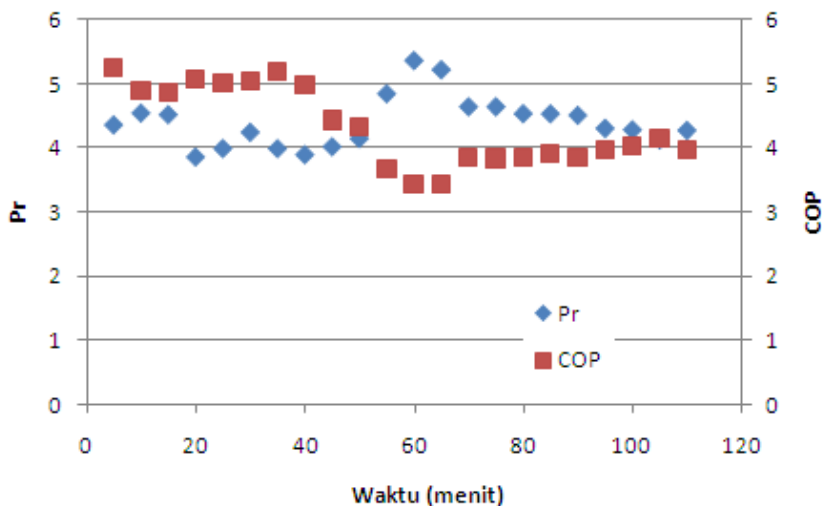
Refrigeran isobutan telah digunakan sebagai fluida kerja pada pompa kalor temperatur tinggi. Dengan memberikan masukan kalor pada evaporator maka lift temperatur pompa kalor dapat ditingkatkan mencapai  $60^{\circ}\text{C}$  sehingga dapat mengubah fasa air dalam *steam generator* menjadi uap. Meskipun demikian performansi pompa kalor (COP) mengalami penurunan sebesar 37%.

Selain itu tekanan keluaran kompresor juga mengalami peningkatan yang mencapai 300% dibandingkan sebelum kalor diberikan ke evaporator. Dan rasio tekanan maksimum yang dicapai oleh pompa kalor mencapai 5. Dari semua hasil yang diperoleh pada penelitian diperoleh kesimpulan akhir bahwa refrigeran isobutan memiliki potensi untuk penerapan pada pompa kalor temperatur tinggi.



# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009



## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih peneliti berikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITB atas dukungan dana yang diberikan melalui Program Riset KK ITB Tahun Anggaran 2008.

## Referensi

- [1] Brunin, O., M. Feidt and B. Hivet. *Comparison of the working domains of some compression heat pumps and a compression-absorption heat pump*, Int. J. Refrigeration 20:5 (1997) 308 – 318.
- [2] Coelho, L.M.R. *Basics of Heat Pump Technology*, Workshop Groundhit, Brussel, 2006.
- [3] Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral. *Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi (Energi Hijau)*, Jakarta, 2003.
- [4] Devotta, S. *Alternatif heat pump Working fluids to CFCs*, Heat Recovery Systems & CHP 15: 3 (1995) 273-279.
- [5] Halozan, Hermann, Gilli, Paul Viktor. *Heat pump for different world region-Now, and in the future*, 18<sup>th</sup> World Energy Congress, 2002.
- [6] Hawaiian Electric Company Inc. *Guide to Heat Pump Water Heating for Condomoniums, Comercial, and Institutional Facilities*, Energy Services Department, 2003.
- [7] IEA Heat Pump Centre. *Norwegian heat pump sales boom*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, 1:4 (2003)7.
- [8] Kenisarin, M, Khamid,M. *Solar energy storage using phase change materials*, Renewable and Sustainable Energy Review, 2006.
- [9] Narodoslawsky, M., , F. Windisch, F. Mose. *New compression heat pump media for medium and high temperature aplication*, Heat Recovery system & CHP 8:1 (1998) 23-31.
- [10] Odeh, S., Salem N., Bilal A. *Performance evaluation of solar-assisted double-tube evaporator heat pump system*, Int. Comm. Heat Mass Transfer 31:2 (2004) 191 – 201.

## Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

---

*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*

- [11] Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.R. *Natural refrigerant-based subcritical and transcritical cycles for high temperature heating*, International Journal of Refrigeration, (2006) 1-8.
  - [12] Smith, F.J., Meyer JP. *Potential of Non-Zeotropic Refrigerant Mixture as Working Refrigerant in Hot Water Heat Pumps*, Research Group for Heating and Cooling Technology, Laboratory for Energy, Auckland Park, South Africa. 2006
  - [13] Ure, Z.. *Positive temperature eutectic (PCM) thermal energy storage systems*, International Congress of Refrigeration, Washington DC. ICR0606, 2003.
  - [14] Viessmann. *Technical Series Heat Pumps*, 2004.
  - [15] Yumrutas, R., Onder, K, *Experimental investigation of thermal performance of a solar assisted heat pump system with a thermal storage*, International of Journal Energy Research, 28 (2004) 163 – 175.
  - [16] Chaichana, C., Aye L., Charters W.W.S., *Natural Working Fluids for Solar-boosted heat pumps*, International Journal of Refrigeration 26 (2003) 1-8.
-