Pengaruh Kondisi Kalor Masukan Evaporator Terhadap Unjuk Kerja Pompa Kalor Temperatur Tinggi

Djuanda
Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar
Kampus Parangtambung Jl. Daeng. Tata Raya Makassar
E-mail: djuanda89@yahoo.com

Abstrak

Kondisi kalor masukan pada evaporator sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja pompa kalor. Kajian analitis telah dilakukan dengan dua variabel utama yaitu temperatur dan beban masukan pada evaporator. Refrigeran yang digunakan dalam studi ini adalah isobutana (R-600a). Kajian ini berguna sebagai penentuan kondisi kerja evaporator pada pompa kalor temperatur tinggi berbantuan pemanas energi surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk kompresor dengan tekanan kerja maksimum 25 bar maka tempeatur evaporator maksimum yang dibolehkan untuk rasio tekanan PR = 3 tidak boleh melebihi 60 °C. Sedangkan untuk PR = 2,5 tidak boleh melebihi temperatur 67 °C, untuk PR = 2 tidak boleh melebihi 78 °C, dan PR = 1,5 temperatur evaporator maksimum yang diizinkan dapat mencapai 90 °C. Koefisien performansi (COP) pompa kalor akan semakin kecil jika temperatur evaporator dan rasio tekanan semakin meningkat. Terdapat hubungan polinomial antara temperatur evaporator, rasio tekanan dan COP pompa kalor.

Kata kunci: *Pompa kalor temperatur tinggi, koefisien performansi, rasio tekanan*

I. PENDAHULUAN

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 absorbsi. 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 akuistik.

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.

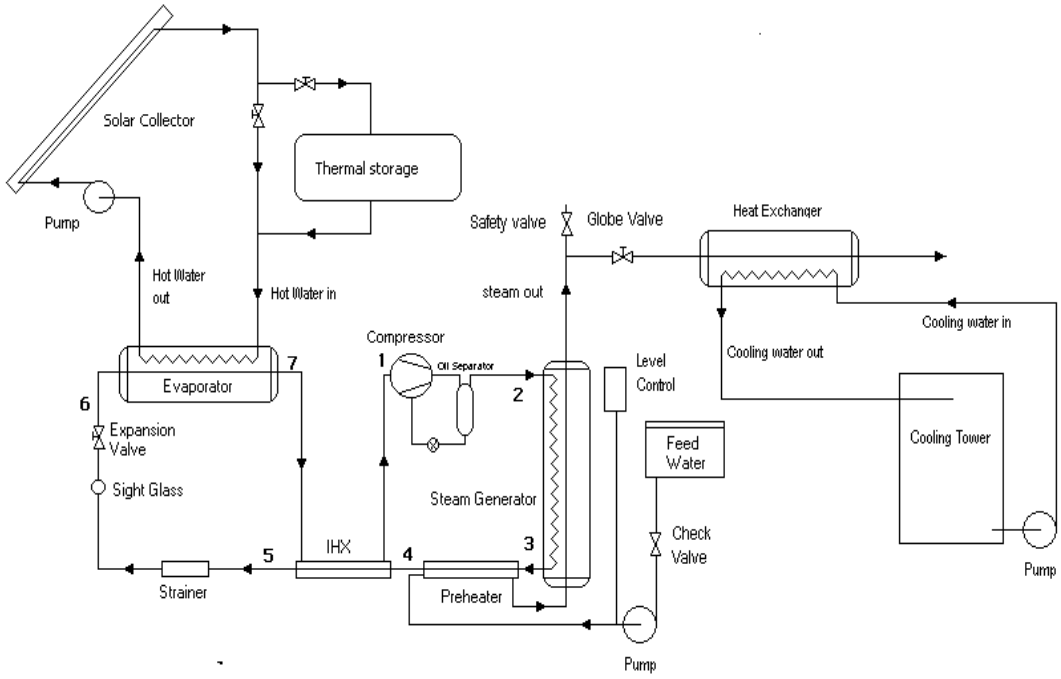
II. KAJIAN PUSTAKA

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

sistem pemanas energi surya yang digunakan sebagai sumber kalor untuk pompa kalor, dan yang kedua adalah sub-sistem pompa kalor.

Evaporator memindahkan energi dari sumber kalor ke sub-sistem pompa kalor. Aliran refrigeran dari evaporator melewati penukar kalor internal kemudian dikompresi di kompresor hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi.

Refrigeran yang mengalir melalui pembangkit uap kemudian memindahkan kalor ke aliran air yang melalui pembangkit uap yang akan merubahnya menjadi fasa uap. Sebelum memasuki pembangkit uap, air terlebih dahulu dialirkan melalui pemanas awal *(preheater)* yang akan meningkatkan temperatur air dari kondisi awal.



Gambar 1. Pompa kalor temperatur tinggi berbantuan pemanas energi surya

Efisiensi sistem secara keseluruhan sangat dipengaruhi oleh efektifitas solar kolektor serta unjuk kerja dari pompa kalor. Efektifitas solar kolektor tergantung pada jenis solar kolektor yang digunakan, sedangkan unjuk kerja pompa kalor selain bergantung pada desain dan konstruksi pompa kalor juga amat dipengaruhi oleh jenis refrigeran dan kalor masukan pada evaporator.

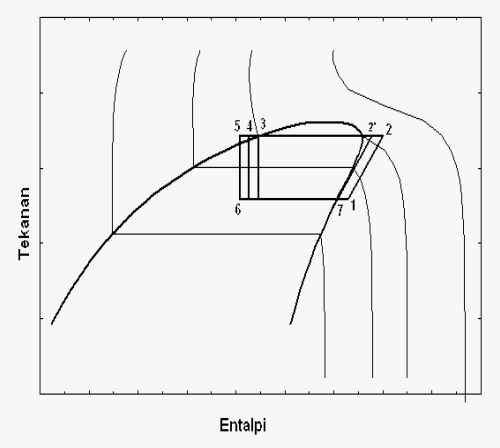
Beberapa penelitian terdahulu mengenai pompa kalor yang dikombinasikan dengan sistem energi surya seperti penelitian yang dilakukan oleh Odeh dkk (2004). Pengujian pompa kalor yang dikombinasi dengan energi surya menggunakan pemanasan efek ganda pada evaporator. Refrigeran yang digunakan adalah R-134a. Evaporator efek ganda diperoleh dengan menggabungkan kalor masukan 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 COP pompa kalor.

Fang dkk (2003) menggunakan metode koreksi untuk mengetahui

perpindahan kalor yang terjadi di evaporator, hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian. Evaporator bersirip digunakan untuk menyerap kalor dari lingkungan serta radiasi matahari. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan kalor sebesar 36% bila evaporator mendapat radiasi matahari serta kalor keluaran pada kondensor meningkat 6%.

Torres dan Gortari (2001) melakukan pengujian pompa kalor berbantuan pemanas energi surya menggunakan refrigeran R-22. Hasil pengujian dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan beberapa metode. Hasil perhitungan menghasilkan rasio optimal antara konduktansi kondensor dan kolektor-evaporator (UA) menentukan koefisien performansi (COP) pompa kalor.

Diagram tekanan-entalpi sistem pompa kalor yang beroperasi pada temperatur tinggi ditampilkan pada pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram entalpi tekanan pompa kalor

Unjuk kerja sistem diukur dari parameter koefisien prestasi atau COP. Parameter ini merupakan rasio antara kalor yang diperoleh pada pembangkit uap dan energi yang diberikan ke kompressor.

Untuk pompa kalor COP diberikan dalam persamaan:

$$COP = \frac{Q_{sg} + Q_{ph}}{W_{comp}} \quad \text{..... (1)}$$

Sedangkan untuk COP system secara keseluruhan adalah:

$$COP_{tot} = \frac{Q_{sg} + Q_{ph}}{W_{comp} + W_{pump}} \quad \text{..... (2)}$$

Dimana Q_{sg} dan Q_{ph} adalah kalor yang dihasilkan oleh pembangkit uap dan pemanas awal, W_{comp} dan W_{pump} adalah daya yang diberikan ke kompresor dan pompa.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah bersifat simulasi perhitungan terhadap pompa kalor temperatur tinggi. Pompa kalor yang digunakan adalah dari jenis kompresi uap dengan menggunakan refrigeran isobutan (R-600a). Pemilihan jenis kompresi uap didasari pada koefisien prestasi (COP) yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis lainnya. Keterbatasannya adalah ketersediaan kompresor yang dapat beroperasi pada tekanan tinggi.

Penelitian dimulai dengan kajian pompa kalor temperatur tinggi yang menghasilkan spesifikasi pompa kalor yang akan digunakan. Penyusunan persamaan dan simulasi program dilakukan dengan komponen-komponen seperti kompresor, evaporator, steam generator, internal heat exchanger, preheater, dan katup ekspansi.

Variasi beban masukan evaporator menjadi variabel penting untuk mengetahui karakteristik dan unjuk kerja dari pompa kalor. Dengan variasi tersebut diperoleh koefisien prestasi pompa kalor, tekanan masuk dan keluar kompresor, temperatur refrigeran kondensor, dan temperatur evaporator. Hasil penelitian nantinya

ditampilakan dalam bentuk grafik terhadap masing-masing variabel.

IV. MODEL MATEMATIKA

Simulasi yang dikembangkan bertujuan untuk mengetahui pengaruh kalor masukan pada evaporator terhadap unjuk kerja dari pompa kalor. Dari simulasi akan diperoleh koefisien prestasi (COP) sistem serta batasan temperatur masukan evaporator yang disesuaikan dengan jenis kompresor yang digunakan. Dengan data tersebut dihasilkan kondisi optimum dari pompa kalor.

Model matematika dibangun dengan menggunakan komponen-komponen utama dari suatu pompa kalor yaitu: kompresor torak, evaporator, kondensor, dan katup ekspansi. Dua variabel penting dalam model ini adalah temperatur masukan pada evaporator dan rasio tekanan kompresor. Kedua variabel tersebut akan menentukan koefisien prestasi sistem serta tekanan maksimum kompresor yang diijinkan.

Dalam pengembangan model matematika sistem, beberapa asumsi digunakan untuk penyederhanaan penyelesaian. Beberapa asumsi model antara lain:

(a) Refrigeran yang digunakan dalam sistem ini adalah isobutana (R-600a), penggunaan refrigeran ini mengingat isobutana memiliki tekanan uap yang cukup rendah serta sifat yang ramah terhadap lingkungan.
(b) Model matematika dibangun hanya untuk sistem pompa kalor kompresi uap tanpa mengikutsertakan sistem energi surya dan penyimpan kalor termal.
(c) Proses kompresi pada kompresor terjadi secara politropik.
(d) Proses ekspansi pada katup ekspansi terjadi secara iseentalpik.
(e) Tidak terjadi penurunan temperatur sepanjang pipa.

a. Kompresor

Kapasitas spesifik kompresor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Stocker and Jones, 1988):

$$W = NP_1V_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{N-1}{N}} - 1\right]/(N-1) \quad \ldots\ldots (3)$$

Dalam persamaan ini, N adalah pangkat politropik dari refrigeran. Untuk refrigeran isobutana harga N adalah 1,097.

Kesetimbangan energi yang terjadi di kompresor adalah:

$$h_2 = W + h_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

b. Evaporator

Persamaan perpindahan kalor pada evaporator diberikan oleh (Stocker and Jones, 1988):

$$\dot{m}_w(c_p)_w(T_{hwi} - T_{hwo}) = (UA)_E(T_1 - T_6) \quad .. (5)$$

dimana:

$$(UA)_E = c + d(T_1 - T_6) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

c dan d adalah kosntanta yang bergantung pada desain evaporator.

Kesetimbangan energi pada evaporator memberikan:

$$\dot{m}_{hw}(c_p)_{hw}(T_{hwi} - T_{hwo}) = \dot{m}_{ref}(T_1 - T_6) \quad \ldots (7)$$

Dimana:

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{v}n\eta_{vol}}{V_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

c. Kondensor

Persamaan perpindahan kalor yang terjadi di kondensor dapat dinyatakan dengan:

$$\dot{m}_w(c_p)_w(T_{wo} - T_{wi}) = (UA)_C\Delta T_{LM} \quad \ldots\ldots (9)$$

Kesetimbangan energi pada kondensor memberikan:

$$\dot{m}_w\left(c_p\right)_w(T_{wo} - T_{wi}) = \dot{m}_{ref}(T_2 - T_4) \text{ ..... (10)}$$

d. Katup Ekspansi

Kesetimbangan energi yang terjadi pada katup ekspansi ditunjukkan dengan persamaan:

$$h_6 = h_5 \quad (11)$$

Sehingga koefisien prestasi pompa kalor diberikan dengan persamaan:

$$COP = \frac{(h_2 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (12)$$

V. HASIL PENELITIAN

Dua variabel masukan pompa kalor yang menjadi faktor penting dalam desain sistem yaitu temperatur evaporator pada pompa kalor serta rasio tekanan pompa kalor. Kedua variabel ini akan sangat menentukan dalam desain pompa kalor khususnya dalam penggunaan jenis kompresor.

Simulasi sistem pompa kalor menggunakan kondisi operasi seperti pada Tabel 1.

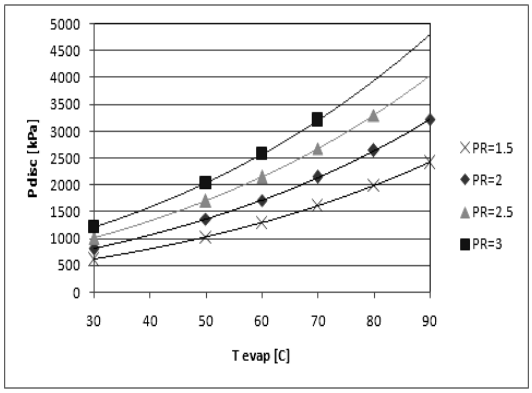
Tabel 1. Kondisi operasi pompa kalor

Refrigeran	R-600a
Temperatur evaporator	30°C - 90°C
Rasio tekanan	1,5 - 3
Tipe kompressor	Terbuka
Efisiensi isentropik	0,7
Temperatur	5°C
Temperatur subcooling	5°C
Heat Loss Factor	10%
Q kondensor	7 kW

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan antara temperatur evaporator dan rasio tekanan pompa kalor. Hasil simulasi menunjukkan adanya hubungan antara temperatur evaporator dan rasio tekanan kompresor seperti terlihat pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 6.

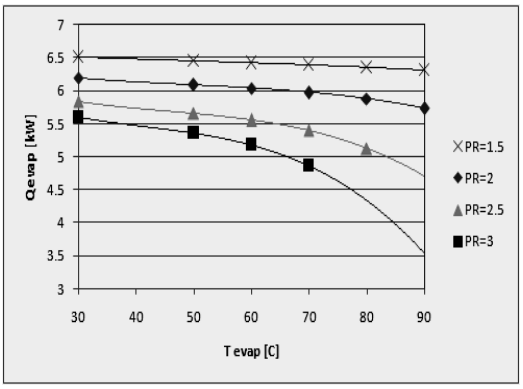
Gambar 3 menunjukkan hubungan antara temperatur evaporator dan tekanan keluaran *(discharge)* kompresor pompa kalor untuk berbagai rasio tekanan. Semakin tinggi temperatur evaporator pompa kalor maka tekanan keluaran kompresor juga semakin besar.

Demikian juga dengan rasio tekanan semakin besar akan meningkatkan tekanan keluaran kompresor. Untuk kompresor dengan tekanan kerja maksimum 25 bar yang saat ini banyak beredar maka tempeatur evaporator maksimum yang dibolehkan untuk rasio tekanan PR = 3 tidak boleh melebihi 60°C. Sedangkan untuk PR = 2,5 tidak boleh melebihi temperatur 67°C, untuk PR = 2 tidak boleh melebihi 78°C, dan PR = 1,5 temperatur evaporator maksimum yang diijinkan dapat mencapai 90°C.



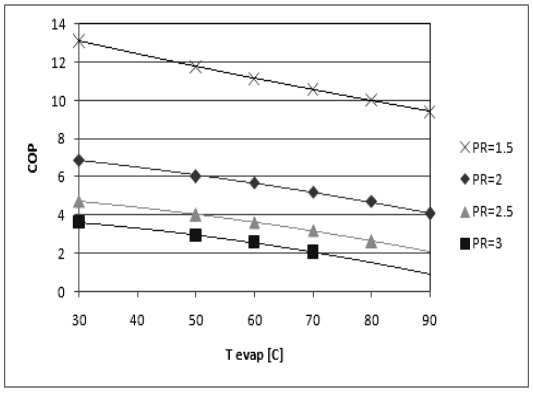
Gambar 3. Hubungan antara temperatur evaporator dan tekanan keluar kompresor

Beberapa kompresor torak didesain khusus bekerja pada tekanan operasi 40 bar. Pada kondisi ini temperatur evaporator maksimum yang diijinkan untuk PR = 3 dapat mencapai 80°C dan untuk PR = 2.5 dapat mencapai 90°C.



Gambar 4. Hubungan antara kalor masukan evaporator dan temperatur kondensor

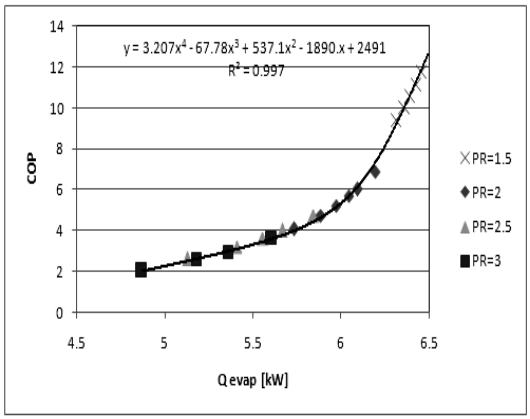
Kalor masukan pada evaporator yang dapat dicapai untuk keluaran kalor kondensor 7 kW serta hubungannya dengan temperatur kondensor dapat dilihat pada Gambar 4. Temperatur evaporator yang semakin meningkat akan menurunkan kalor masukan evaporator. Penurunan terbesar dicapai pada rasio tekanan PR = 3 dan PR = 2,5. Juga dapat dilihat bahwa kalor masukan terbesar dapat dicapai pada rasio tekanan terkecil yaitu PR = 1,5.



Gambar 5. Pengaruh temperatur evaporator dan rasio tekanan terhadap COP

Koefisien prestasi pompa kalor juga dipengaruhi oleh kondisi masukan pada evaporator. Seiring naiknya temperatur evaporator akan menurunkan koefisien performansi (COP) pompa kalor. Penurunan COP ini terjadi dipengarahui oleh kemampuan sistem dalam menyerap kalor yang diberikan dari luar, sehingga kalor yang dapat dihantarkan ke kondensor juga semakin kecil. Agar sistem tetap dalam kondisi kesetimbangan maka kekurangan kalor akan mengakibatkan kerja kompresor semakin tinggi. Hal inilah yang memacu turunnya COP pompa kalor.

Gambar 5 juga memperlihatkan pengaruh rasio tekanan terhadap COP pompa kalor. Semakin tinggi rasio tekanan sistem justru akan mengakibatkan semakin rendah COP pompa kalor. Dengan semakin rendahnya rasio tekanan pompa kalor akan berdampak terhadap rendahnya kerja kompresor. COP tertinggi dihasilkan oleh pompa kalor dengan rasio tekanan 1,5 yaitu antara 8,7 sampai 13, sedangankan COP terendah dihasilkan oleh pompa kalor yang bekerja pada rasio tekanan 3 yaitu antara 2 sampai 3,6.



Gambar 6. Hubungan antara kalor masukan dan COP

Hubungan antara kalor masukan pada evaporator dan koefisien prestasi dari pompa kalor ditampilkan pada Gambar 6. Plot Kalor masukan evaporator untuk berbagai rasio tekanan pada satu bidang grafik menghasilkan suatu kecendrungan yang unik, dimulai dari rasio tekanan PR = 3 akan menghasilkan COP terendah sedangkan rasio tekanan terendah PR = 1,5 akan memberikan COP tertinggi.

Hubungan umum antara variabel tersebut dapat diperoleh dengan persamaan polinomial:

$$y = 3{,}207x^4 - 67{,}78x^3 + 537{,}1x^2 - 1890x + 2491 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

Dengan R = 0,997.

VI. KESIMPULAN

1. Temperatur evaporator yang semakin meningkat akan miningkatkan tekanan keluaran kompresor. Untuk kompresor dengan tekanan kerja maksimum 25 bar yang saat ini banyak beredar maka tempeatur evaporator maksimum yang dibolehkan untuk rasio tekanan PR = 3 tidak boleh melebihi 60°C. Sedangkan untuk PR = 2,5 tidak boleh melebihi temperatur 67°C, untuk PR = 2 tidak boleh melebihi 78°C, dan PR = 1,5 temperatur evaporator maksimum yang diijinkan dapat mencapai 90°C.
2. Temperatur evaporator yang semakin meningkat akan menurunkan kalor masukan evaporator. Penurunan terbesar dicapai pada rasio tekanan PR = 3 dan PR = 2,5. Juga dapat dilihat bahwa kalor masukan terbesar dapat dicapai pada rasio tekanan terkecil yaitu PR = 1,5.
3. Temperatur evaporator dan rasio tekanan semakin meningkat akan menurunkan COP pompa kalor. COP tertinggi dihasilkan oleh pompa kalor dengan rasio tekanan 1,5 yaitu antara 8,7 sampai 13, sedangankan COP terendah dihasilkan oleh pompa kalor yang bekerja pada rasio tekanan 3 yaitu antara 2 sampai 3,6.
4. Terdapat hubungan polinomial antara temperatur evaporator, rasio tekanan dan COP pompa kalor.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan pada Lembaga Penelitian Universitas Negeri Makassar atas bantuan pendanaan melalui PNBP tahun anggaran 2010.

Nomenklatur

A	:	Luas perpindahan kalor (m^2)
$(cp)_w$	:	panas spesifik air (kJ/kgK)
COP	:	Coeficient of performance
h	:	Entalpi (kJ/kg)
$\dot{m}_w$	:	Laju aliran air (kg/s)
$\dot{m}_{ref}$	:	Laju aliran refrigeran (kg/s)
N	:	Konstanta politropik
n	:	kecepatan kompresor (rpm)
P	:	Tekanan (bar)
Q_{sg}	:	Kalor yang dilepaskan di steam generator (kW)
Q_{ph}	:	Kalor yang dilepaskan di preheater (kW)
T	:	Temperatur (°C)
U	:	Koefisien perpindahan kalor keseluruhan ($W/m^2°C$)
V_1	:	Volume spesifik masuk kompresor (m^3/kg)
W_{comp}	:	Daya kompresor (kW)
W_{pump}	:	Daya pompa (kW)
η_{vol}	:	Efisiensi volumetrik kompresor
ΔT_{LM}	:	Beda temperatur logaritmik

Daftar Pustaka

Coelho, L.M.R, 2006, *Basics of Heat Pump Technology*, Workshop Groundhit, Brussel.

Comakli, O., Bayromoklu, M., Kayguzus, K., 1996, A Thermodynamic Model of a Solar Assissted Heat Pump System With Energy Storage, *Solar Energy* Vol. 56 No. 6, pp. 485-492.

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

Hawaiian Electric Company Inc., 2003, *Guide to Heat Pump Water Heating for Condomoniums, Comercial, and*

Institutional Facilities, Energy Services Department.

Halozan, Hermann, Gilli, Paul Viktor, 2002, *Heat Pump for Different World Region-Now, and in The Future*, 18th World Energy Congress.

Odeh, S., Salem N., Bilal A., 2004, Performance Evaluation of Solar-Assisted Double-Tube Evaporator Heat Pump System, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31 No. 2, pp 191 – 201.

Stocker, W.E. and Jones, J,W., 1988, Refrigeration & Air Conditioning, McGrawHill Inc.,Singapore.

Viessmann, 2004, *Technical Series Heat Pumps*.

Yumrutas, R., Onder, K, 2004, Experimental Investigation of Thermal Performance of a Solar Assisted Heat Pump System with an Thermal Storage, *Internatonal of Journal Energy Research*, Vol. 28, pp 163 – 175.