

Pengaruh Kecepatan Putaran Kompresor Terhadap Produktivitas Unit Desalinasi Berbasis Pompa Kalor Dengan Proses Humidifikasi dan Dehumidifikasi

Indri Yaningsih, Tri Istanto, Wibawa Endra Juwana

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta

Jl. Ir Sutami No 36A Ketingan, Surakarta 57126

Telp/Fax : (0271) 632163

E-mail : minding87@yahoo.com, triis_meuns2000@yahoo.com

Abstract :

This study was conducted to examine the effect of the compressor rotation speed on the productivity of a desalination unit based heat pump with using humidification and dehumidification process. Desalination unit consists of a heat pump system, humidifier and dehumidifier, and seawater heater and air heater (condenser). In this study, the compressor rotation speed was varied at 500 rpm, 700 rpm and 900 rpm, using a variable frequency inverter that mounted on an electric motor driving the compressor. Research parameters were kept constant i.e. the seawater mass flow rate entering the humidifier at 0.086 kg/s, the temperature of seawater entering the humidifier was kept constant at 45°C, the air velocity entering the humidifier constant at 4 m/s, salinity seawater feed at 31,342 ppm, and seawater in the system was recirculated. The results of this study show that the production of freshwater increases with increasing the compressor rotation speed. The average of freshwater production rate of the desalination unit for the compressor rotation speed of 500 rpm, 700 rpm and 900 rpm were 20.33 l/day, 22.20 l/day, and 24.48 l/day, respectively.

Keywords : compressor rotation, dehumidification, desalination, heat pump, humidification

PENDAHULUAN

Jumlah air tawar yang ada di dunia dapat dikatakan mendekati konstan. Dalam kurun waktu kurang dari 200 tahun, jumlah penduduk di dunia terus meningkat dengan cepat dimana hal ini diikuti dengan peningkatan konsumsi air tawar di dunia, yang meningkat dua kali lipat setiap 20 tahun melampaui dua kali laju pertumbuhan penduduk [1]. Saat ini, sekitar 40% dari populasi dunia menderita kekurangan air yang serius. Pada tahun 2025, persentase kekurangan air diperkirakan akan meningkat menjadi lebih dari 60% [2]. Hal ini disebabkan karena peningkatan populasi dan industrialisasi yang pesat, perubahan gaya hidup, peningkatan kegiatan ekonomi, dan polusi yang membatasi penggunaan sumber daya air tawar, sehingga ketersediaan air tawar berkurang. Kekurangan air tawar ini dapat mengancam kehidupan penduduk di dunia, karena air tawar adalah salah satu kebutuhan primer. Selain itu, penggunaan umum dari air yang tidak sehat di negara berkembang menyebabkan 80-90% dari semua penyakit dan 30% dari seluruh kematian [2].

Air merupakan salah satu sumber daya yang paling melimpah meliputi tiga perempat dari permukaan bumi, dimana sekitar 97% dari volume ini adalah air garam, dan hanya 3% adalah air tawar [3]. Sebagian kecil air tawar di bumi ini, dimana memasok

sebagian besar kebutuhan manusia dan hewan terdapat di air tanah, danau dan sungai. Sumber air yang hampir tidak akan habis adalah lautan. Kekurangan utamanya adalah kadar garamnya yang tinggi. Air laut, air payau, dan air tawar memiliki tingkat salinitas yang berbeda, yang sering dinyatakan dengan konsentrasi total padatan terlarut. Menurut WHO, batas kadar garam yang diijinkan dalam air adalah 500 *parts per million* (ppm), dan untuk kasus khusus mencapai 1000 ppm. Sebagian besar air yang terdapat di dunia mempunyai kadar garam sampai 10.000 ppm, dan air laut secara normal mempunyai kadar garam dalam rentang 35.000 – 45.000 ppm dalam bentuk total garam terlarut [4]. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu cara untuk mengurangi kadar garam tersebut. Salah satunya adalah dengan proses desalinasi. Desalinasi air laut merupakan suatu proses penting untuk memenuhi meningkatnya permintaan akan kebutuhan air tawar.

Desalinasi, secara umum bertujuan untuk menghilangkan garam dari air yang mengandung larutan garam. Tujuan dari sistem desalinasi adalah untuk membersihkan dan memurnikan air laut atau air payau serta mendapatkan air dengan total padatan terlarut dalam batas yang diijinkan yaitu 500 ppm atau kurang. Proses desalinasi selalu melibatkan tiga aliran cairan, yaitu umpan berupa air garam (misalnya air laut), produk bersalinitas rendah, dan konsentrat bersalinitas tinggi. Teknologi desalinasi telah

mengalami perkembangan. Salah satu perkembangan teknologi desalinasi adalah berbasis pompa kalor (*heat pump*) dengan menggunakan proses humidifikasi dan dehumidifikasi (HD) [5]. Desalinasi dengan proses humidifikasi dan dehumidifikasi dianggap sebagai cara yang efisien dan menjanjikan dengan memanfaatkan kondensor dan evaporator pompa kalor untuk menghasilkan air tawar dari air laut. Proses HD mempunyai beberapa keuntungan seperti fleksibilitasnya dalam kapasitas air tawar yang dibutuhkan, instalasinya mudah, biaya operasi yang rendah, lebih sederhana, dan memungkinkan untuk dikombinasikan dengan energi panas tingkat rendah (*low grade thermal energy*) seperti energi surya dan geotermal. Proses HD diaplikasikan untuk skala kecil (produksi air dari 5 – 10 m³/hari). Prinsip dari proses ini berdasarkan fakta bahwa udara dapat bercampur dengan uap air karena perbedaan konsentrasi. Kandungan uap air yang dibawa udara akan meningkat bersamaan dengan meningkatnya temperatur udara. 1 kg udara kering dapat membawa 0,5 kg uap air atau sekitar 670 kkal ketika temperatur udara meningkat dari 30°C - 80°C. Proses HD terdiri dari tiga sub sistem, yaitu pemanas air atau udara, humidifier, dan dehumidifier atau evaporator.

Produktivitas unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan proses HD untuk meningkatkan produksi air tawar sangat tergantung pada temperatur air laut masuk humidifier, temperatur udara masuk humidifier, laju aliran massa air laut masuk humidifier, laju aliran massa udara masuk humidifier [5-7] dan putaran kompresor [8]. Produksi air tawar unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan proses HD meningkat dengan kenaikan temperatur air laut dan temperatur udara masuk humidifier [9], dan laju aliran massa udara masuk humidifier [10]. Penelitian ini akan menguji pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap produktivitas unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses HD.

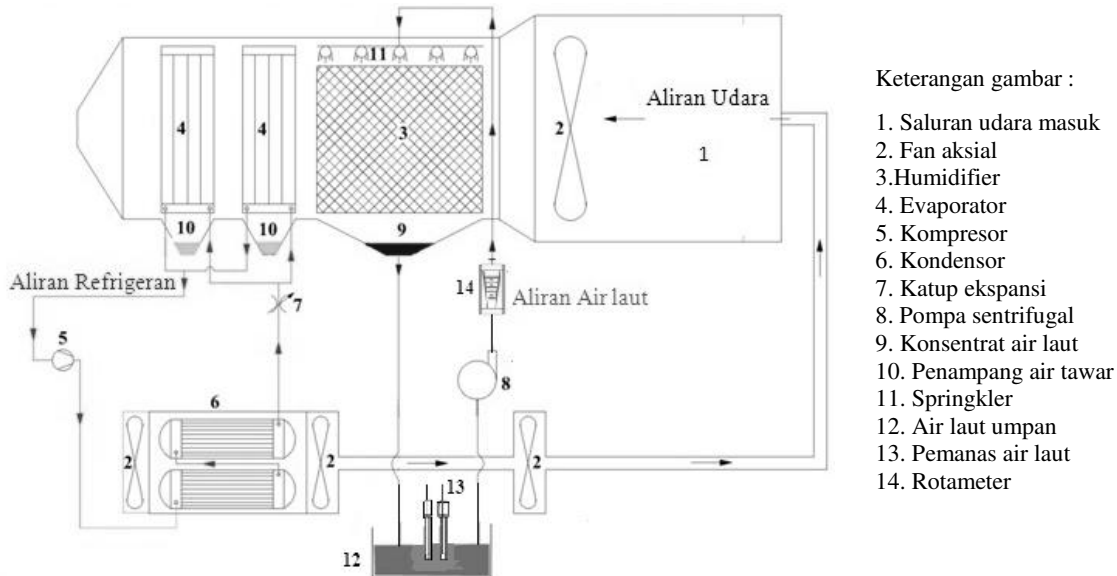
METODE

Skema unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses HD pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1. Pada dasarnya unit desalinasi ini terdiri dari 3 bagian. Bagian pertama adalah pemanas air laut dan pemanas udara (kondensor), bagian kedua adalah komponen proses HD meliputi humidifier dan dehumidifier (evaporator), dan bagian ketiga adalah komponen pompa kalor dimana terdiri dari kompresor, kondensor, katup ekspansi (*expansion valve*) dan evaporator. Prinsip kerja dari unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses HD ini adalah menggunakan udara panas untuk membawa uap air dari air laut, kemudian udara yang mengandung uap air ini diembunkan di evaporator

dari sistem pompa kalor dan kemudian diperoleh air tawar (*freshwater*). Dalam sistem ini, udara lingkungan dipanaskan ketika melalui kondensor kemudian dilembabkan di humidifier (karena bercampur dengan semprotan air laut oleh *sprinkler*) dengan dorongan fan aksial (proses humidifikasi). Udara lembab ini didinginkan ketika melewati evaporator (dehumidifier), sehingga udara mengembun menjadi air tawar (proses dehumidifikasi). Air laut diberi pemanasan awal (*preheating*) sebelum disemprotkan menggunakan *sprinkler* ke humidifier untuk menambah kelembaban udara kering dari kondensor.

Parameter-parameter yang berhubungan dengan unit desalinasi ini adalah sebagai berikut; refrigeran yang digunakan pada unit pompa kalor adalah HFC 134a, dan kompresor yang digunakan adalah tipe torak 2 silinder. Kondensor yang digunakan berjumlah 2 buah dengan dimensi masing-masing kondensor (cm) 58 x 36 x 1,5. Evaporator yang digunakan adalah tipe window 2 PK berjumlah 2 buah yang dipasang secara paralel. Humidifier yang digunakan terbuat dari aluminium dengan dimensi (cm) 30 x 37 x 35. Sketsa struktur humidifier ditunjukkan pada gambar 2. *Sprinkler* pada penelitian ini berjumlah 5 buah yang dipasang di atas humidifier, disusun membentuk segiempat dengan jarak antar *sprinkler* 16,5 cm. Untuk mengukur laju aliran volumetrik air laut digunakan sebuah rotameter, sedangkan untuk memanaskan air laut digunakan pemanas air listrik. Termokopel yang digunakan dalam penelitian ini adalah termokopel tipe T dengan diameter 0,1 mm. Flowmeter refrigeran yang digunakan adalah Variable Area Glass Flowmeter Dwyer tipe VA 20440.9. Parameter penelitian yang dibuat konstan yaitu; temperatur air laut masuk humidifier dijaga konstan sebesar 45°C, laju aliran volumetrik air laut masuk humidifier dijaga konstan sebesar 300 liter/jam sehingga diperoleh laju aliran massa air laut masuk humidifier konstan sebesar 0,086 kg/s, kecepatan udara masuk humidifier dijaga konstan sebesar 4 m/s dan air laut dalam sistem ini disirkulasi ulang. Air laut yang digunakan (*feed seawater*) mempunyai nilai salinitas sebesar 31.342 ppm berdasarkan pengujian di laboratorium MIPA Pusat UNS dengan menggunakan metode SNI 06-6989. 19-2004.

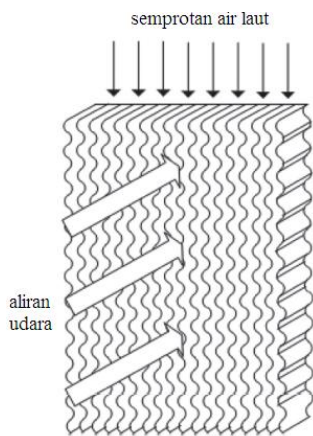
Pengujian pengaruh laju kecepatan putaran kompresor terhadap produktivitas unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan proses HD dilakukan pada kecepatan putaran kompresor sebesar 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm. Perubahan kecepatan putaran kompresor dilakukan dengan menggunakan variable frequency inverter yang dipasang di motor listrik penggerak kompresor.



Keterangan gambar :

1. Saluran udara masuk
2. Fan aksial
3. Humidifier
4. Evaporator
5. Kompresor
6. Kondensor
7. Katup ekspansi
8. Pompa sentrifugal
9. Konsentrat air laut
10. Penampang air tawar
11. Sprinkler
12. Air laut umpan
13. Pemanas air laut
14. Rotameter

Gambar 1. Skema unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses humidifikasi dan dehumidifikasi



Gambar 2. Sketsa humidifier

Data penelitian yang diambil adalah besar tekanan masuk dan keluar kompresor, kondensor, dan evaporator; temperatur refrigeran yang masuk dan keluar evaporator, temperatur refrigeran yang masuk dan keluar kondensor, temperatur udara sebelum dan sesudah humidifier, temperatur udara sebelum dan sesudah dehumidifier dan volume air tawar yang dihasilkan. Unit desalinasi dijalankan selama 180 menit untuk masing-masing variasi laju aliran massa air laut masuk humidifier, dimana pengambilan data dilakukan setiap 20 menit.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung laju aliran massa udara :

$$\dot{m}_a = \rho_{udara} \cdot V_a \cdot A \quad (1)$$

Penambahan massa uap air total setelah melewati humidifier dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta W_1 = \dot{m}_a (w_2 - w_1) \quad (2)$$

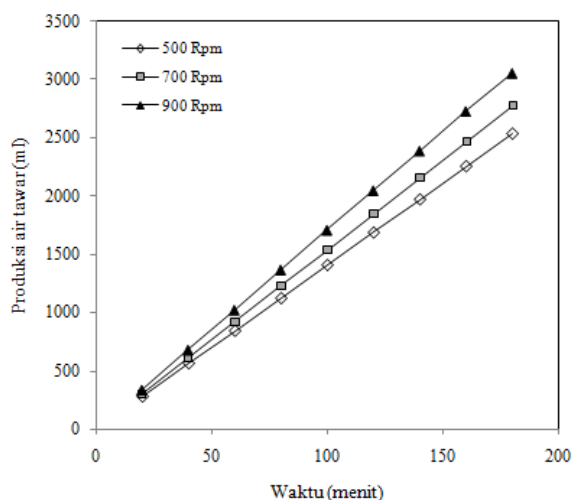
Persamaan untuk menghitung COP aktual pompa kalor dapat dihitung dengan persamaan :

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} = \frac{\dot{m}_{ref} \cdot (h_{2a} - h_3)}{\dot{m}_{ref} \cdot (h_{2a} - h_1)} \quad (3)$$

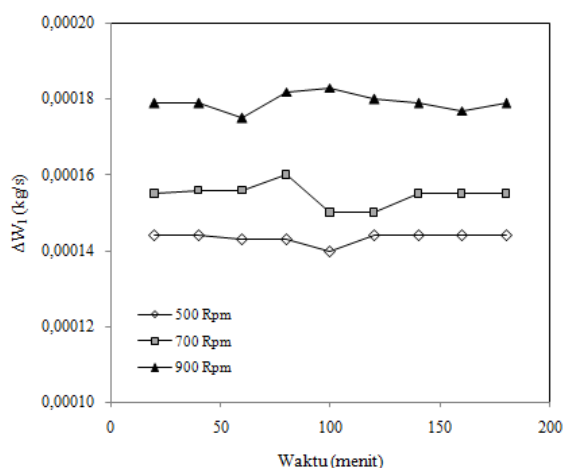
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Kecepatan Putaran Kompresor Terhadap Produksi Air Tawar

Pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap produksi air tawar dapat dilihat pada gambar 3. Dari gambar 3 dapat dilihat bahwa unit desalinasi yang dioperasikan dengan kecepatan putaran kompresor yang semakin tinggi, menghasilkan produksi air tawar yang semakin tinggi. Unit desalinasi yang dioperasikan dengan kecepatan putaran kompresor 900 rpm menghasilkan produksi air tawar paling banyak dibandingkan beroperasi dengan kecepatan putaran kompresor 500 rpm dan 700 rpm. Hal ini disebabkan unit desalinasi yang dioperasikan dengan kecepatan putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm terjadi penambahan massa uap air total yang berbeda di humidifier, karena panas dari kondensor yang diterima udara yang akan memasuki humidifier berbeda untuk tiap putaran kompresor. Gambar 4 menunjukkan grafik pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap penambahan massa uap air total pada proses humidifikasi di humidifier.



Gambar 3. Pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap produksi air tawar



Gambar 4. Pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap ΔW₁

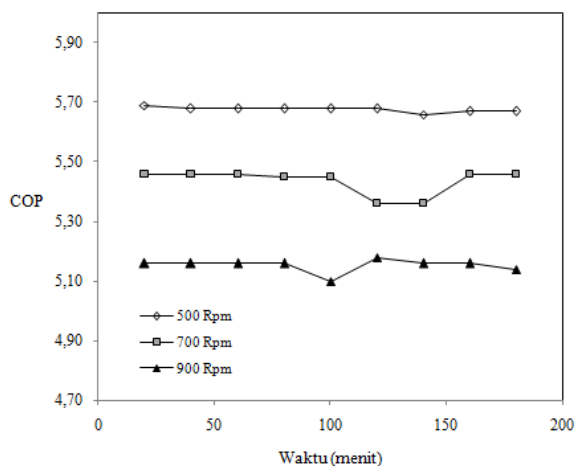
Kecepatan putaran kompresor yang semakin tinggi menyebabkan laju aliran massa refrigeran yang melewati kondensor semakin besar, sehingga kalor yang dilepas ke udara yang akan memasuki humidifier juga lebih besar. Temperatur udara rata-rata sebelum memasuki humidifier pada putaran 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm berturut-turut adalah 31°C, 32°C dan 33°C. Semakin tinggi temperatur udara masuk humidifier, maka kemampuan untuk menyerap uap air juga semakin tinggi. Semakin tinggi temperatur udara masuk humidifier maka penambahan massa air total dalam udara setelah melewati humidifier juga semakin tinggi. Penambahan massa uap air total dalam udara yang semakin tinggi ini dikarenakan udara pada temperatur yang lebih tinggi mempunyai kelembaban relatif (RH) yang lebih kecil daripada udara pada temperatur rendah, sehingga kemampuan untuk menyerap uap air menjadi semakin tinggi.

Unit desalinasi yang dioperasikan dengan kecepatan putaran kompresor 900 rpm menghasilkan produksi air tawar lebih banyak dibandingkan dengan dioperasikan pada kecepatan putaran kompresor 500 rpm dan 700 rpm, hal ini juga disebabkan karena kecepatan putaran kompresor 900 rpm memiliki laju aliran massa refrigeran yang lebih besar sehingga nilai kapasitas pendinginan yang lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putaran kompresor 500 rpm dan 700 rpm. Hal ini menyebabkan temperatur udara setelah melewati evaporator (dehumidifier) lebih rendah dibandingkan dengan dioperasikan pada kecepatan putaran kompresor 500 rpm dan 700 rpm. Temperatur udara rata-rata setelah melewati evaporator pada putaran 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm berturut-turut adalah 21°C, 19,4°C dan 18°C. Semakin rendah temperatur udara keluar evaporator, maka nilai rasio kelembaban udaranya (w) semakin rendah. Hal ini menyebabkan selisih rasio kelembaban udara sebelum dan sesudah melewati dehumidifier semakin besar, dimana menyebabkan semakin banyak produksi air tawar yang dihasilkan.

Volume air tawar yang dihasilkan setiap 20 menit untuk setiap variasi kecepatan putaran kompresor relatif sama. Produksi air tawar rata-rata selama 20 menit untuk kecepatan putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm berturut-turut sebesar 282,2 ml, 308,1 ml dan 339,7 ml. Sehingga unit desalinasi ini jika dioperasikan pada kecepatan putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm, dapat memproduksi air tawar berturut-turut rata-rata sebesar 0,847 liter/jam, 0,925 liter/jam dan 1,02 liter/jam. Sehingga unit desalinasi ini jika dioperasikan dengan kecepatan putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm dapat memproduksi air tawar berturut-turut sebesar 20,33 l/hari, 22,20 l/hari, dan 24,48 l/hari.

Pengaruh Kecepatan Putaran Kompresor Terhadap COP Pompa Kalor

Gambar 5 menunjukkan grafik pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap COP pompa kalor. Nilai COP pompa kalor untuk variasi kecepatan putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm, dan 900 rpm berturut-turut dalam kisaran 5,66 – 5,69; 5,36 – 5,46; dan 5,10 - 5,18. Dari gambar 5, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan putaran kompresor, maka semakin kecil COP pompa kalor. Hal ini disebabkan dengan semakin tinggi kecepatan putaran kompresor, maka akan menurunkan temperatur evaporator dan meningkatkan kerja kompresor. Hasil ini sesuai dengan penelitian dari Hawlader [8].



Gambar 5. Pengaruh kecepatan putaran kompresor terhadap COP pompa kalor

Salinitas Air Tawar Hasil Proses Desalinasi

Produk air tawar hasil proses desalinasi ini memiliki nilai salinitas 480 ppm, berdasarkan pengujian di laboratorium MIPA Pusat UNS dengan menggunakan metode SNI 06-6989.19-2004. Ini berarti air tawar yang dihasilkan dari unit desalinasi ini telah memenuhi standar air yang dapat digunakan untuk air minum, kebutuhan rumah tangga (memasak, mencuci, berkebun, dll) dan beberapa keperluan industri [2]. Klasifikasi dari beberapa jenis air berdasarkan tujuan penggunaannya, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi dari beberapa jenis air berdasarkan tujuan penggunaannya [2]

No	Salinitas air (ppm)	Kegunaan
1	5-1000	Air minum, kebutuhan rumah tangga (memasak, mencuci, berkebun, dll) dan beberapa keperluan industri.
2	1000-3000	Irigasi dan pendingin dalam industri

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putaran kompresor mempunyai pengaruh yang nyata terhadap produksi air tawar unit desalinasi. Produksi air tawar meningkat dengan kenaikan kecepatan putaran kompresor. Produksi air tawar rata-rata unit desalinasi ini pada kecepatan putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm dan 900 rpm berturut-turut sebesar 20,33 l/hari, 22,20 l/hari, dan 24,48 l/hari. Nilai COP pompa kalor untuk variasi putaran kompresor 500 rpm, 700 rpm, dan 900 rpm berturut-turut dalam

kisaran 5,66 – 5,69; 5,36 – 5,46; dan 5,10 - 5,18. Air tawar hasil unit desalinasi memiliki nilai salinitas 590 ppm.

DAFTAR NOTASI

- A = luas penampang saluran (m²)
- COP = *Coefficient of Performance*
- h₁ = entalpi refrigeran keluar evaporator (kJ/kg)
- h_{2a} = entalpi refrigeran masuk kondensor (kJ/kg)
- h₃ = entalpi refrigeran keluar kondensor (kJ/kg)
- \dot{m}_a = laju aliran massa udara (kg/s)
- \dot{m}_{ref} = laju aliran massa refrigeran (kg/s)
- Q_{cond} = panas yang dibuang oleh kondenser (kW)
- V_a = kecepatan udara (m/s)
- w₁ = rasio kelembaban udara masuk humidifier (kg uap air/kg udara kering)
- w₂ = rasio kelembaban udara keluar humidifier (kg uap air/kg udara kering)
- ΔW₁ = penambahan massa uap air total (kg/s)
- W_{comp} = daya kompresor (kW)
- ρ_a = densitas udara (kg/m³)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sinha, R.K., 2010, *Desalination & water purification technologies*, Government of India, Mumbai; 2010.
- [2] El-Dessouky, H.T., and Ettouney, H.M., 2002, *Fundamentals of salt water desalination*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- [3] Kalogirou, S.A., 1997, "Survey of solar desalination systems and system selection", *Energy*, Vol. 22, 69-81.
- [4] Kalogirou, S.A., 2004, Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, 231-295.
- [5] Gao, P., Zhang, L., Zhang, H., 2008, "Performance analysis of a new type desalination unit of heat pump with humidification and dehumidification", *Desalination*, Vol. 220, 531-537
- [6] Yamali, C., Solmus, I., 2007, "Theoretical investigation of humidification-dehumidification desalination system configured by double-pass flat plate solar air heater", *Desalination*, Vol. 205, 163-177.

- [7] Amer, E.H., Kotb, H., Mostafa, G.H., El-Ghalban, A.R., 2009, "Theoretical and experimental investigation of humidification–dehumidification desalination unit", *Desalination*, Vol. 249, 949–959.
- [8] Hawlader, M.N.A., Dey, P.K, Diab, S., Chung, C.Y., 2004, "Solar assisted heat pump desalination system, *Desalination*, Vol. 168, 49-54.
- [9] Istanto, T., Juwana, W.E., Yaningsih, I., Hermawan, D., 2011, "The Effect of feed seawater and air temperatures on performance of a desalination unit of heat pump with humidification and dehumidification", *Proceeding of International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICESEAM 2011)*, Engineering Faculty, Sebelas Maret University, Solo, October 3-4
- [10] Yaningsih, I., Istanto, T., 2014, "Studi eksperimental pengaruh laju aliran massa udara terhadap produktivitas air tawar unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses humidifikasi dan dehumidifikasi", *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi ke-5*, Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang, 25 Juni.