

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA UDARA TERHADAP PRODUKTIVITAS AIR TAWAR UNIT DESALINASI BERBASIS POMPA KALOR DENGAN MENGGUNAKAN PROSES HUMIDIFIKASI DAN DEHUMIDIFIKASI

Indri Yaningsih^{*}, Tri Istanto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami No 36A, Ketingan, Surakarta 57126

^{*}Email: minding87@yahoo.com

Abstrak

Desalinasi dengan proses humidifikasi dan dehumidifikasi dianggap sebagai cara yang efisien dan menjanjikan dimana memanfaatkan kondenser dan evaporator dari pompa kalor untuk menghasilkan air tawar dari air laut. Penelitian ini menguji pengaruh laju aliran massa udara terhadap produktivitas air tawar unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses humidifikasi dan dehumidifikasi. Pada penelitian ini laju aliran massa udara divariasikan sebesar 0,0103 kg/s, 0,0153 kg/s, 0,0202 kg/s, 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s dengan cara mengatur kecepatan udara sebesar 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Untuk setiap pengujian, laju aliran massa air laut masuk humidifier dijaga konstan sebesar 0,0858 kg/s, temperatur air laut masuk humidifier dijaga konstan sebesar 45°C, salinitas air laut umpan sebesar 31.342 ppm dan air laut dalam sistem ini disirkulasi ulang dan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produktivitas air tawar unit desalinasi meningkat dengan kenaikan laju aliran massa udara hingga ke sebuah nilai optimum dan menurun setelah nilai optimum tersebut. Produksi air tawar optimum diperoleh pada laju aliran massa udara 0,0202 kg/s yaitu sebesar 24,48 liter/hari. Produksi air tawar unit desalinasi ini pada laju aliran massa air laut 0,0858 kg/s untuk laju aliran massa udara 0,0103 kg/s, 0,0153 kg/s, 0,0202 kg/s, 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s berturut-turut rata-rata sebesar 11,28 liter/hari, 18,72 liter/hari, 24,48 liter/hari, 23,04 liter/hari dan 21,60 liter/hari. Air tawar hasil unit desalinasi memiliki nilai salinitas 620 ppm.

Kata kunci: dehumidifikasi, desalinasi, humidifikasi, pompa kalor

1. PENDAHULUAN

Air dan energi adalah dua komoditas yang tidak terpisahkan yang terus mempengaruhi perkembangan peradaban manusia. Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk di satu sisi, dan pertumbuhan industrialisasi yang pesat di sisi yang lain, dunia saat ini sedang menghadapi tantangan untuk memenuhi kebutuhan dua komoditas tersebut dan juga untuk memastikan kebutuhan tersebut untuk generasi mendatang. Sejak dimulainya kehidupan di bumi, jumlah sumber air tawar yang ada di dunia dapat dikatakan hampir mendekati konstan. Namun dalam kurun waktu kurang dari 200 tahun, jumlah penduduk di dunia terus meningkat dengan cepat. Hal ini diikuti dengan peningkatan konsumsi air di dunia, yang meningkat dua kali lipat setiap 20 tahun melampaui dua kali laju pertumbuhan penduduk (Sinha, 2010).

Meskipun air merupakan salah satu sumber daya yang paling berlimpah meliputi tiga perempat dari permukaan planet bumi, sekitar 97% dari volume ini adalah air garam, dan hanya 3% adalah air tawar yang cocok untuk manusia, tanaman, dan hewan (Kalogirou, 1997). 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 1.000 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 (Kalogirou, 2004). Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu cara untuk mengurangi kadar garam tersebut. Salah satunya adalah dengan proses desalinasi.

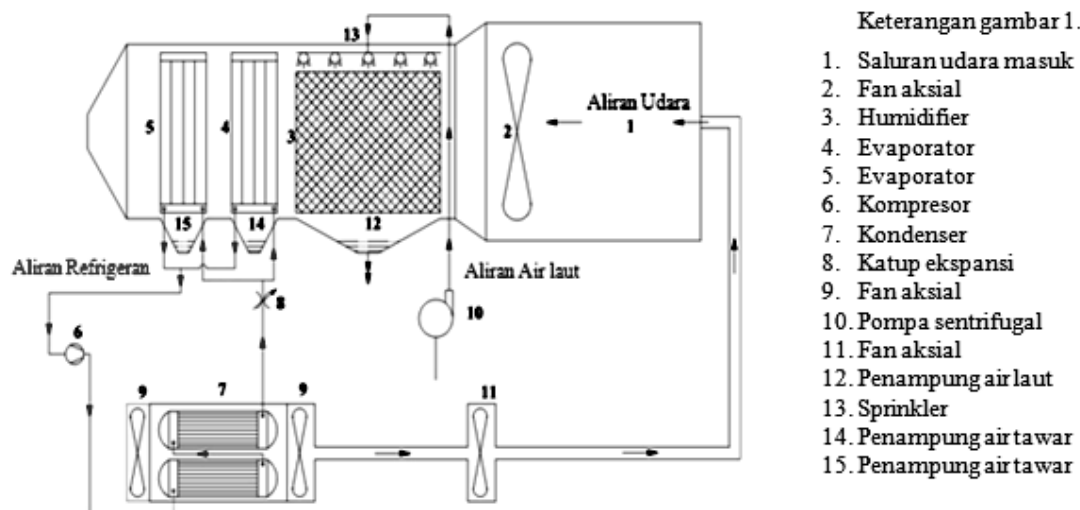
Desalinasi, secara umum bertujuan untuk menghilangkan garam dari air yang mengandung larutan garam. Tujuan dari sistem desalinasi adalah untuk membersihkan dan memurnikan air laut atau air payau serta mendapatkan air dengan total padatan terlarut dalam batas yang diijinkan yaitu

500 ppm atau kurang. Proses desalinasi ini melibatkan tiga aliran cairan, yaitu umpan berupa air garam (misalnya air laut), produk bersalinitas rendah, dan konsentrat bersalinitas tinggi. Salah satu perkembangan teknologi desalinasi adalah dengan menggunakan pompa kalor (*heat pump*) dengan menggunakan proses humidifikasi dan dehumidifikasi (HD) (Gao dkk, 2008). 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 geothermal. 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.

Unjuk kerja dari sistem 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, dan laju aliran massa udara (Yamali and Solmus, 2007; Gao dkk, 2008; Amer dkk, 2009). Oleh karena itu penelitian untuk mengetahui unjuk kerja dari sistem desalinasi ini sangat penting. Penelitian ini akan menguji pengaruh laju aliran massa udara terhadap produktivitas air tawar unit desalinasi berbasis pompa kalor dengan menggunakan proses HD.

2. METODOLOGI

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



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

Sistem ini terdiri dari 3 bagian utama yaitu pemanas udara (kondensor), unit humidifikasi dan dehumidifikasi, dan unit pompa kalor. Dalam sistem ini, udara dipanaskan ketika melalui kondenser 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 kondenser.

Refrigeran yang digunakan pada unit pompa kalor adalah HFC 134-a, dan kompresor yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe torak 2 silinder. Kondensor yang digunakan adalah kondensor AC mobil yang berjumlah 2 buah dengan dimensi panjang 58 cm, lebar 36 cm dan tebal

1,5 cm tiap kondensor. Evaporator yang digunakan adalah tipe window 2 PK berjumlah 2 buah yang dipasang secara paralel. Humidifier yang digunakan terbuat dari aluminium dengan dimensi panjang 30 cm, lebar 37 cm, tinggi 35 cm yang disusun secara sejajar sebanyak 72 buah dengan jarak antar plat 5 mm dan sudut elevasi 45° tiap gelombangnya. *Sprinkler* pada penelitian ini berjumlah 5 buah yang dipasang di atas humidifier, disusun membentuk segiempat dengan jarak antar *sprinkler* 16,5 cm. 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.

Parameter yang dibuat konstan yaitu laju aliran volumetrik air laut sebesar 300 liter/jam atau mempunyai laju aliran massa air laut 0,0858 kg/s, dan temperatur air laut sebesar 45°C . Air laut yang digunakan mempunyai salinitas sebesar 31.342 ppm dan pada sistem ini air laut disirkulasi ulang. Pada penelitian ini laju aliran massa udara divariasi sebesar 0,0103 kg/s, 0,0153 kg/s, 0,0202 kg/s, 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s dengan cara mengatur kecepatan putaran fan aksial sehingga diperoleh kecepatan udara sebesar 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. 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 udara, dimana pengambilan data dilakukan setiap 20 menit.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung laju aliran massa udara :

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

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

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

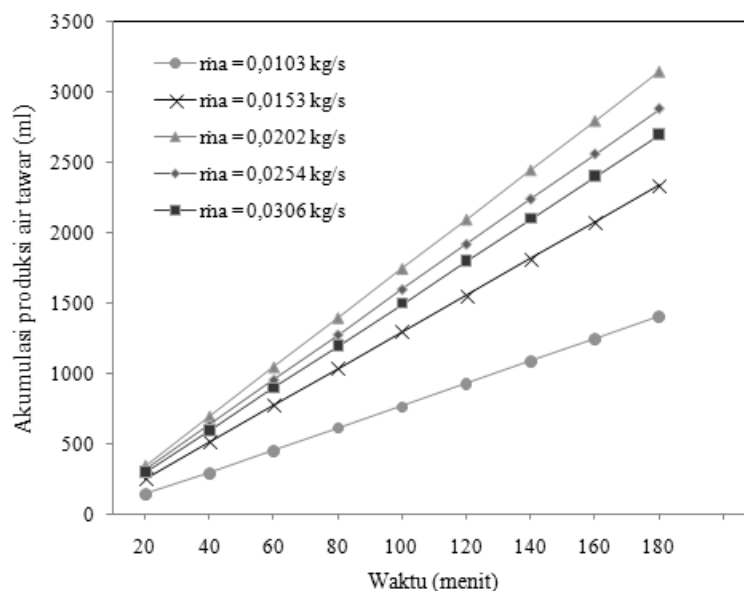
Pengurangan massa uap air total setelah melewati dehumidifier dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta W_2 = \dot{m}_a (w_2 - w_3) \quad (3)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Laju Aliran Massa Udara Terhadap Produksi Air Tawar

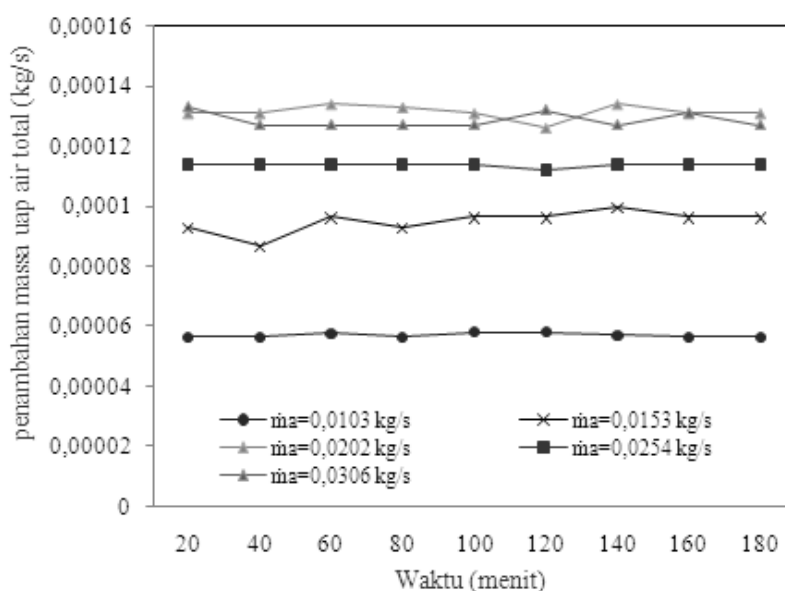
Gambar 2 menunjukkan grafik akumulasi produksi air tawar aktual terhadap waktu dengan variasi laju aliran massa udara pada unit desalinasi.



Gambar 2. Grafik akumulasi produksi air tawar terhadap waktu

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa akumulasi produksi air tawar meningkat dengan kenaikan laju aliran massa udara ke sebuah nilai optimum dan setelah itu menurun. Fenomena ini serupa dengan penelitian dari Dai dan Zhang (2000), Dai dkk (2002), Yanniotis dan Xerodemas (2003), dan Yamali dan Solmus (2007). Akumulasi produksi air tawar meningkat dari laju aliran massa udara 0,0103 kg/s hingga 0,0202 kg/s, kemudian ketika laju aliran massa udara 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s akumulasi produksi air tawar menurun. Nilai optimum laju aliran massa udara terjadi pada laju aliran udara 0,0202 kg/s. Pada laju aliran massa air laut 0,0858 kg/s dan temperatur air laut masuk humidifier yang konstan 45°C, semakin besar laju aliran massa udara maka semakin banyak udara yang kontak dengan air laut yang disemprotkan oleh *sprinkler*, sehingga udara membawa lebih banyak uap air meninggalkan humidifier.

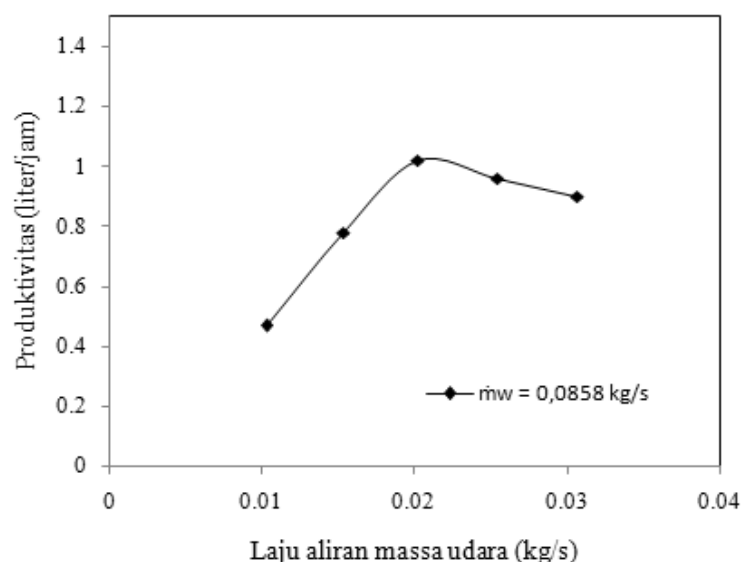
Grafik penambahan massa air total dalam udara setelah melewati humidifier terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik penambahan massa uap air total terhadap waktu

Pada laju aliran massa udara 0,0103 kg/s hingga 0,0202 kg/s, temperatur udara masuk humidifier semakin tinggi, sehingga pada rentang laju aliran massa udara tersebut produksi air tawar semakin besar. Laju aliran massa udara 0,0202 kg/s merupakan nilai optimum laju aliran massa udara yang menghasilkan produksi air tawar maksimum. Setelah laju aliran massa udara 0,0202 kg/s, semakin besar laju aliran udara maka temperatur udara masuk humidifier menurun. Dengan temperatur udara yang masuk ke humidifier lebih rendah, maka laju penguapan air laut di humidifier berkurang, kemampuan udara untuk menyerap uap air juga semakin rendah sehingga penambahan massa air total dalam udara setelah melewati humidifier juga semakin rendah, seperti terlihat pada Gambar 3. Selain itu, tingginya laju aliran massa udara dalam saluran juga mengakibatkan tidak seluruhnya udara lembab terkondensasi di evaporator karena terlalu cepat melewati evaporator.

Volume air tawar yang dihasilkan setiap 20 menit untuk setiap variasi laju aliran massa udara relatif sama. Produksi air tawar rata-rata selama 20 menit untuk laju aliran massa udara 0,0103 kg/s, 0,0153 kg/s, 0,0202 kg/s, 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s berturut-turut 156,7 ml, 260 ml, 340 ml, 320 ml dan 300 ml. Sehingga produktivitas unit desalinasi ini pada laju aliran massa air laut 0,0858 kg/s untuk laju aliran massa udara 0,0103 kg/s, 0,0153 kg/s, 0,0202 kg/s, 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s berturut-turut rata-rata sebesar 0,47 liter/jam, 0,78 liter/jam, 1,02 liter/jam, 0,96 liter/jam dan 0,9 liter/jam atau berturut-turut rata-rata sebesar 11,28 liter/hari, 18,72 liter/hari, 24,48 liter/hari, 23,04 liter/hari dan 21,60 liter/hari. Hubungan produktivitas unit desalinasi dengan laju aliran massa udara pada laju aliran massa air laut 0,0858 kg/s dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Produktivitas unit desalinasi terhadap laju aliran massa udara

Dari Gambar 4 terlihat bahwa produktivitas unit desalinasi meningkat dengan kenaikan laju aliran massa udara hingga 0,0202 kg/s, kemudian setelah itu produktivitas unit desalinasi menurun. Nilai optimum laju aliran massa udara terjadi pada laju aliran massa udara 0,0202 kg/s dengan menghasilkan produktivitas maksimum sebesar 1,02 liter/jam.

3.2. Salinitas Air Tawar Hasil Proses Desalinasi

Produk air tawar hasil proses desalinasi ini memiliki nilai salinitas 620 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 (El-Dessouky dan Ettouney, 2002). Klasifikasi dari beberapa jenis air berdasarkan tujuan penggunaannya, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi dari beberapa jenis air berdasarkan tujuan penggunaannya

No	Salinitas air (ppm)	Kegunaan
1	5 – 1.000	Air minum, kebutuhan rumah tangga (memasak, mencuci, berkebun, dll) dan beberapa keperluan industri.
2	1.000 – 3.000	Irigasi dan pendingin dalam industri

4. KESIMPULAN

Produktivitas air tawar unit desalinasi meningkat dengan kenaikan laju aliran massa udara hingga ke sebuah nilai optimum dan menurun setelah nilai optimum tersebut. Produksi air tawar optimum diperoleh pada laju aliran massa udara 0,0202 kg/s yaitu sebesar 24,48 liter/hari. Produksi air tawar unit desalinasi ini pada laju aliran massa air laut 0,0858 kg/s untuk laju aliran massa udara 0,0103 kg/s, 0,0153 kg/s, 0,0202 kg/s, 0,0254 kg/s dan 0,0306 kg/s berturut-turut rata-rata sebesar 11,28 liter/hari, 18,72 liter/hari, 24,48 liter/hari, 23,04 liter/hari dan 21,60 liter/hari. Air tawar hasil unit desalinasi memiliki nilai salinitas 620 ppm.

DAFTAR NOTASI

\dot{m}_a	= laju aliran massa udara (kg/s)
\dot{m}_w	= laju aliran massa air laut (kg/s)
V_a	= kecepatan udara (m/s)

w_1	= rasio kelembaban udara masuk humidifier (kg uap air/kg udara kering)
w_2	= rasio kelembaban udara keluar humidifier (kg uap air/kg udara kering)
w_3	= rasio kelembaban udara keluar humidifier (kg uap air/kg udara kering)
ρ_{udara}	= densitas udara (kg/m^3)
ΔW_1	= penambahan massa uap air total (kg/s)
ΔW_2	= pengurangan massa uap air total (kg/s)

DAFTAR PUSTAKA

- Amer, E.H., Kotb, H., Mostafa, G.H., El-Ghalban, A.R., (2009), Theoretical and Experimental Investigation of Humidification–Dehumidification Desalination Unit, *Desalination*, 249, pp. 949–959
- Dai, Y.J., Zhang, F., (2000), Experimental Investigation of A Solar Desalination Unit With Humidification and Dehumidification, *Desalination*, 130, pp. 169-175.
- Dai, Y.J., Wang, R.Z., Zhang, F., (2002), Parametric Analysis To Improve The Performance of A Solar Desalination Unit With Humidification and Dehumidification, *Desalination*, 142, pp. 107-118.
- El-Dessouky. H T. and Ettouney, H.M., (2002), *Fundamentals of Salt Water Desalination*, 1st Ed, Elsevier, Netherland
- Gao, P., Zhang, L., Zhang, H., (2008), Performance Analysis of A New Type Desalination Unit of Heat Pump With Humidification and Dehumidification, *Desalination*, 220, pp. 531-537.
- Kalogirou, S.A., (1997), Survey of Solar Desalination Systems and System Selection, *Energy*, 22, pp. 69-81.
- Kalogirou, S.A., (2004), Solar Thermal Collectors and Applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, pp. 231–295
- Sinha, R.K., (2010), *Desalination & Water Purification Technologies*, Government of India, Mumbai.
- Yamali, C., Solmus, I., (2007), Theoretical Investigation of Humidification-Dehumidification Desalination System Configured by Double-Pass Flat Plate Solar Air Heater, *Desalination*, 205, pp. 163-177.
- Yanniotis, S., Xerodemas, K., (2003), Air Humidification for Seawater Desalination, *Desalination*, 158, pp. 313- 319.