

# Analisis Perhitungan Evaporator dan Kondensor yang Digunakan pada Alat Desalinasi Air Laut Sistem Vakum Alami Menggunakan Energi Surya

Eko Yohanes Setyawan<sup>1\*</sup>, Dody Suhendra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Teknologi Nasional Malang; Jl. Sigura-gura N0. 2 Malang, Telp; (0341) 551431

Jurusan Teknik Mesin, FT ITN Malang, Malang

<sup>2</sup>Universitas Sumatera Utara ; Jl. Dr. T. Mansur No.9, Padang Bulan, Medan, Telp; (061) 8214033

Jurusan Teknik Mesin, FT USU, Medan, Sumatera Utara

email: <sup>1\*</sup> yohanes@lecturer.itn.ac.id, <sup>2</sup> suhendrad760@gmail.com

## Abstrak

*Evaporator dan kondensor yang digunakan pada penelitian ini berfungsi untuk menguapkan air laut pada tekanan vakum dan mengembunkannya kembali sehingga didapatkan air bersih. Evaporator dibuat dari stainless steel 304 dengan ketebalan 0,4 cm, agar kuat untuk memvakumkan air dari ketinggian 10,34. Dibuat berbentuk silinder yang memiliki tutup berbentuk kerucut berdiameter 80 cm, dengan elemen pemanas didalamnya dengan diameter 5/6", sedangkan Kondensor dibuat bersipir dengan media pendingin udara. Proses pemvakuman dilakukan dengan meletakkan alat desalinasi pada ketinggian 10,34 m (ketinggian yang digunakan untuk menyeimbangkan tekanan atmosfer). Penelitian ini dilakukan mulai pukul 08.00-16.00 WIB. Dengan rata-rata suhu evaporasi 50°C pada tekanan vakum rata-rata 35 cmHg, dengan panas yang masuk kedalam evaporator sebesar 15.110,21 kJ, energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air laut sebesar 10.302,986 kJ, dan total kehilangan panas sebesar 4.092,775 kJ.*

**Kata kunci :** desalinasi, evaporator, evaporator cooling, vakum.

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan air bersih semakin meningkat dari hari ke hari yang disebabkan oleh faktor industrialisasi, motorisasi, dan peningkatan standar hidup umat manusia. Penelitian menunjukkan bahwa cadangan air bersih tidak akan mampu memenuhi kebutuhan penggunaan dikarenakan kurangnya ketersediaan air bersih. Hal ini sudah diperkirakan oleh United Nations Organization bahwa pada tahun 2025, hampir 1800 juta jiwa di dunia akan mengalami kelangkaan air bersih. (UN-Water., 2006). Kondisi ini dapat dicegah jika umat manusia dapat menemukan cara lain untuk memproduksi air bersih. Untungnya, teknologi desalinasi telah dikembangkan sejak lama menyerupai siklus hidrologi alami untuk mencegah permasalahan ini, tetapi teknologi ini tentunya memerlukan energi yang banyak dan mempunyai dampak negatif terhadap lingkungan. Desalinasi secara luas diadopsi dalam Timur Tengah, Negara Arab, Amerika Utara, Asia, Eropa, Afrika, Amerika Tengah, Amerika Selatan dan Australia untuk

memenuhi kebutuhan air bersih dan kebutuhan pengolahan air. Hampir 10000 ton minyak dibutuhkan setiap tahun untuk memproduksi 1000 m<sup>3</sup>/hari air bersih (Kalogirou *et al.*, 2005). Konsentrat garam yang dibuang keluar dari sistem desalinasi juga menjadi ancaman serius bagi kehidupan air laut (Roberts *et al.*, 2010). Sistem desalinasi yang paling umum digunakan adalah Multi Stage Flash (MSF), Multi-Effect Distillation (MED), Vapor Compression (VC), Reverse Osmosis (RO) dan Elektro-Dialysis (ED) (Ali *et al.*, 2011). Sistem desalinasi konvensional yang dioperasikan dengan menggunakan bahan bakar fosil juga turut berkontribusi emisi rumah kaca atau GHG (Green House Gas). Hal inilah yang mendorong para peneliti untuk mencari cara alternatif untuk memberi daya pada sistem dengan energi terbarukan.

Energi terbarukan yang digunakan oleh proses desalinasi umumnya berupa energi surya, angin, dan geothermal. Diantara ketiganya, 57% sistem

desalinasi disuplai dengan tenaga surya sebagai energi (Eltawil *et al.*, 2009). Bahkan Negara yang kaya akan bahan bakar fosil seperti Timur Tengah dan Bangsa Arab juga telah mengubah perhatian mereka pada energi surya dengan tujuan dapat menyediakan air bersih tanpa mencemari lingkungan.

Salah satu tantangan yang saat ini masih terus mendapat perhatian adalah bagaimana memodelkan proses desalinasi. Dengan mengetahui model evaporasi yang baik, diharapkan dapat melakukan perbaikan pada desain evaporator dan kondensor untuk menghasilkan air bersih yang lebih banyak dan efisien.

Pada penelitian ini akan dibahas mengenai analisa pada evaporator dan kondensor yang digunakan pada alat desalinasi.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip kerja desalinasi secara umum sebenarnya sangat sederhana. Air laut dipanaskan hingga menguap, dan kemudian uap yang dihasilkan dikondensasikan kembali dan ditampung di sebuah wadah. Air kondensat tersebut adalah air bersih. Sedangkan air laut yang tidak mendidih selama pemanasan adalah konsentrat garam. Proses desalinasi yang akan penulis bahas pada penelitian ini adalah desalinasi sistem vakum dengan modifikasi suplai panas yang bersumber dari air panas yang dihasilkan melalui kolektor penangkap panas. Konsep dari sistem ini adalah memanfaatkan ruang vakum yang dibentuk secara alami untuk dapat mengevaporasikan sejumlah air laut pada tekanan rendah sehingga dapat berevaporasi dengan suplai energi panas yang lebih sedikit dibanding dengan teknik konvensional. Suplai energi panas yang sedikit dapat diambil dari kolektor surya plat datar dan / atau panas yang dibuang. Namun pada penelitian ini akan digunakan elemen pemanas dari alat penukar kalor yang disuplai melalui kolektor penangkap panas agar suplai panas dalam evaporator konstan. Keunikan dari sistem ini adalah cara gaya gravitasi dan tekanan atmosfer digunakan dalam pembentukan kondisi vakum. Pembentukan sistem vakum bertujuan untuk menurunkan tekanan ruang evaporator agar pemanasan dapat berlangsung dengan suplai panas yang rendah. Tekanan atmosfer akan sama dengan tekanan hidrostatis yang dibentuk dengan pipa air yang tingginya sekitar 10,34 meter. Jadi, jika ketinggian pipa lebih dari 10,34 meter dan ditutup dari bagian atas dengan air, dan air dibiarkan

jatuh kebawah akibat gravitasi, air akan jatuh pada ketinggian sekitar 10,34 meter, dan membentuk ruang vakum diatasnya.

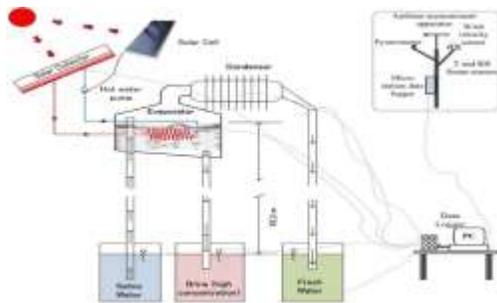
Komponen-komponen yang terdapat pada solar desalinasi sistem vakum natural adalah evaporator, kondensor, dan alat penukar kalor berupa *Tube-in-Tube*, kolektor penangkap panas, pompa, *photovoltaic*. Evaporator berfungsi sebagai ruang pemanasan air laut dengan suplai panas berasal dari *solar collector* yang dialirkan dengan fluida. Kondensor berfungsi untuk mengumpulkan uap yang dihasilkan oleh pemanasan air laut di evaporator untuk dikondensasikan kembali sehingga air kondensat dapat ditampung dan didapat air bersih sebagai produk sistem. Sedangkan *tube in tube heat exchanger* berfungsi sebagai *heat recovery* (pemulih panas), dimana air laut yang tidak mendidih akibat pemanasan di ruang evaporator akan jatuh melalui pipa luar dari *tube in tube* untuk memanaskan pipa dalam yang sedang dialiri air laut dari tangki pengumpan. Alasan penggunaan sistem solar desalinasi vakum natural dalam penelitian ini adalah karena tidak menggunakan listrik, cocok untuk pemakaian skala besar terutama di pesisir pantai, dan keunikan sistemnya yang tidak membutuhkan pompa vakum untuk menyuplai air laut ke evaporator yang tingginya 10,34 m. Gambar 2.1 menunjukkan solar desalinasi sistem vakum. Adapun kelebihan dan kelemahan dari sistem desalinasi vakum natural sebagai berikut.

Kelebihan menggunakan Desalinasi Vakum Natural :

1. Tidak membutuhkan pompa vakum untuk penyuplaian air laut
2. Biaya konstruksi termurah diantara semua jenis desalinasi tenaga surya
3. Pemanasan dapat menggunakan suplai panas rendah karena sistem dalam keadaan vakum

Kelemahan menggunakan Desalinasi Vakum Natural :

1. Konstruksi cukup sulit karena proses instalasi berhubungan dengan ketinggian
2. Hanya cocok untuk pemakaian skala besar (untuk luas alas evaporator yang besar)
3. Pemilihan bahan konstruksi sangat mempengaruhi *lifetime* sistem



Gambar 1. Solar desalinasi sistem vakum natural

### 2.1 Pemodelan Matematik Sistem

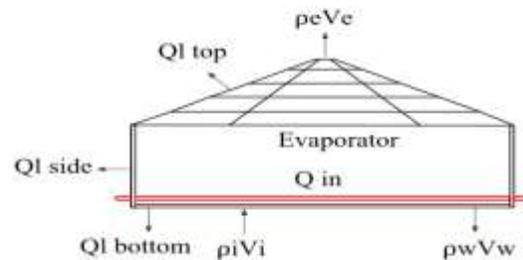
Pada subbab ini akan dijelaskan pemodelan matematis dari setiap komponen yang ada dalam desalinasi sistem vakum. Pemodelan matematis yang akan dibahas adalah pada evaporator, sumber panas (heat source), alat penukar kalor *tube in tube*, dan kondensor. Pembahasan akan lebih sederhana apabila telah ditetapkan beberapa asumsi, antara lain :

1. Kapasitas panas di evaporator dan kondensor diabaikan
2. Temperatur pada masing-masing komponen adalah seragam atau tidak ada variasi temperatur di evaporator dan kondensor
3. Sumber panas menggunakan pemanas yang dihasilkan dari *Solar Collector* melalui fluida kerja yang digerakkan oleh pompa
4. Aliran fluida dalam sistem diasumsikan laminar karena kecepatan fluida kerja baik dalam alat penukar kalor, evaporator dan kondensor sangat kecil
5. Kenaikan konsentrasi air laut dalam evaporator sangat kecil sehingga dapat diabaikan
6. Panas hilang secara konveksi natural
7. Ketinggian air laut dalam evaporator konstan.

#### 2.1.1 Analisis pada Evaporator

Pada subbab 2.1 telah dijelaskan bahwa fungsi dari evaporator adalah sebagai ruang pemanasan air laut hingga sejumlah air laut dapat menjadi air bersih. Air laut akan masuk ke evaporator dari pipa pengumpan pada laju aliran massa yang disimbolkan  $\dot{m}_i$  [kg/s]. Kemudian akan terjadi penguapan dengan laju  $\dot{m}_e$  [kg/s] yang akan mengalir dalam bentuk uap dan masuk ke

kondensor. Sebagai sisanya akan terbentur air garam yang akan keluar dari evaporator dengan laju  $\dot{m}_w$  [kg/s]. Pada saat terjadi penguapan diperlukan panas untuk menyuplai panas laten penguapan. Panas ini akan diambil dari elemen pemanas dengan daya pemanasan  $Q_{in}$ . Diagram Aliran pada evaporator ditampilkan pada gambar 2.16



Gambar 2. Diagram aliran massa pada evaporator

Penerapan hukum kekekalan massa diberikan oleh persamaan berikut :

$$\frac{d}{dt}(\rho V)_s = \rho_i \dot{V}_i - \rho_w \dot{V}_w - \rho_w \dot{V}_w \quad (1)$$

Dimana  $V$  [m<sup>3</sup>] adalah volume air laut di evaporator, dan  $\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] laju aliran volume pada masing-masing sisi masuk dan sisi keluar evaporator. Akibat adanya penguapan, maka konsentrasi garam di dalam evaporator akan bertambah. Jika konsentrasi dinyatakan dengan  $C$  [%], maka perubahan konsentrasi garam di dalam tabung evaporator dapat dinyatakan dengan :

$$\frac{d}{dt}(\rho C V)_s = (\rho C)_i \dot{V}_i - (\rho C)_s \dot{V}_w \quad (2)$$

Dimana huruf  $s$  menyatakan *sea water* yang ada di evaporator.

Hukum kekekalan energy pada evaporator dapat didefinisikan sebagai banyaknya panas yang masuk dikurangi dengan panas yang keluar akan digunakan untuk menaikkan temperatur fluida di evaporator. Dalam bentuk persamaan berikut ini:

$$\frac{d}{dt}(\rho C_p V T)_s = Q_{in} + (\rho C_p T)_i \dot{V}_i - (\rho C_p T)_s \dot{V}_w - Q_e - Q_{loss} \quad (3)$$

Pada persamaan ini  $C_p$  [J/kg.K] adalah panas jenis.

Laju penguapan (evaporasi) dari air laut di dalam evaporator (dinyatakan dengan huruf "s") ke dalam air murni di kondensor (dinyatakan dengan huruf "f") dapat dirumuskan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\dot{V}_e = A_{surface} \frac{\alpha_m}{\rho_f} \left[ f(C_s) \frac{P(T_s)}{(T_s+273)^{0,5}} - \frac{P(T_f)+\Delta P}{(T_f+273)^{0,5}} \right] \quad (4)$$

Dimana  $A_{surface}$  adalah luas permukaan air yang ada di evaporator. Parameter  $\alpha_m$  adalah koefisien

empiric yang diperoleh dengan cara eksperimen, nilainya  $10^{-7} \leq \alpha_m \leq 10^{-6}$  [kg/m<sup>2</sup>.Pa.s.K<sup>0.5</sup>] (Bemporad, 1995). Beda tekanan evaporator dan kondensor disimbolkan dengan  $\Delta P$ . Tekanan uap sebagai fungsi temperatur dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$P(T) = 100 \times e^{[63,042 - 7139,6/(T+273) - 6,2558 \ln(T+273)]} \text{ [Pa]} \quad (5)$$

Pada persamaan (2.4),  $f(C)$  adalah faktor koreksi yang dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$f(C) = 1 - \alpha_1 C \quad (6)$$

Dimana  $\alpha_1 = 0,0054$  [tanpa dimensi] adalah koefisien empirik. Pada persamaan (4), laju penguapan juga dipengaruhi oleh massa jenis fluida. Sementara massa jenis juga dipengaruhi oleh konsentrasi dan temperatur fluida, yang dirumuskan dengan

$$\rho(T, C) = \rho_0(1 - \beta_T \Delta T_0 + \beta_c \Delta C_0) \quad (7)$$

Dimana  $\beta_T = 5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$  adalah koefisien ekspansi thermal volumetric dan  $\beta_c = 8 \times 10^{-3}/\%$  adalah koefisien ekspansi larutan (Al-Kharabsheh dan Goswani, 2004).

Panas jenis air laut juga merupakan fungsi dari temperatur dan konsentrasi yang dapat dirumuskan dengan persamaan (Mamayev, 1975):

$$C_p(T, C) = 4186 \times [1,0049 - 0,0162C + 3,5261 \times 10^{-4}C^2 + AT + BT^2] \quad (8)$$

Konstanta A dan B dirumuskan dengan

$$A = -(3,2506 - 1,4795C + 0,07765C^2) \times 10^{-4}$$

$$\text{dan,} \quad B = (3,8013 - 1,2084C + 0,0612C^2) \times 10^{-6} \quad (9)$$

Laju panas penguapan di evaporator pada persamaan (3), dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_e = \rho_f h_{fg}(T_s) \dot{V}_e \quad (10)$$

Dimana  $h_{fg}(T_s)$  adalah panas laten penguapan air laut, yang dapat dihitung dengan persamaan (Incropera dan DeWitt, 1996):

$$h_{fg}(T) = 1000 \times [3146 - 2,36(T + 273)] \quad (11)$$

Untuk pengujian dengan suplai panas konstan, panas hilang dari evaporator dapat diasumsikan sebagai konveksi natural. Panas hilang diasumsikan dari tiga bagian, yaitu kerucut (atas), dinding, dan alas evaporator. Setiap bagian memiliki koefisien konveksi yang berbeda-beda. Panas hilang dari konduksi antara pipa outlet uap ke pipa kondensor diabaikan karena terdapat insulasi panas yang berbahan karet.

### 2.1.2 Analisis Pemasukan panas ke Evaporator

Asumsi yang digunakan di sini adalah fluida

kerja dengan laju aliran massa  $\dot{m}_{sc}$  [kg/s] mengalir

di dalam pipa yang diameternya  $D_h$  dan

panjangnya  $l_h$ . Temperatur fluida masuk ke dalam evaporator sama dengan temperatur solar kolektor

$T_{sc}$ . Fluida ini kemudian mengalami perpindahan panas ke dalam air garam yang ada di dalam

evaporator, pada temperatur  $T_w$ . Dengan

menggunakan asumsi ini, maka laju perpindahan

panas yang masuk ke dalam evaporator dapat

dihitung dengan menggunakan metode NTU-

efektivitas. Pada analisisnya yang dianggap fluida

minimum adalah aliran fluida kerja dan rasio

perbandingan kapasitas panasnya dianggap nol.

Maka panas yang disuplai ke dalam evaporator oleh

sumber panas dari solar kolektor dirumuskan

menjadi:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}C_{pf}(T_{sc} - T_w) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi D_h U_h l_h}{\dot{m}C_{pf}}\right) \right] \quad (12)$$

Dimana  $U_h$  adalah koefisien perpindahan panas

menyeluruh yang dihitung dengan persamaan

berikut:

$$U_h = \frac{1}{1/h_f + FT} \quad (13)$$

$FT$  adalah fouling factor pada pipa, yang

bervariasi dari 0,001 untuk pipa yang bersih dan

0,0005 W/m<sup>2</sup>.°C untuk pipa yang sudah digunakan

beberapa lama. Koefisien perpindahan panas pada

fluida kerja yang mengalir di dalam pipa ( $h_f$ )

dihitung dengan:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 3,66 \quad \text{jika} \quad Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \leq 2300 \quad (14)$$

$$\text{Atau} \quad Nu = \frac{hD}{k} = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^{0,4} \quad \text{jika} \quad Re_D > 2300 \quad (15)$$

Panas hilang dari alas evaporator ke lingkungan dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_{bottom} = \frac{T_{bottom} - T_a}{1/h_{bottom} A_s} \quad (16)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi natural diberikan dengan persamaan:

$$Nu = 0,27 Ra_L^{0,25} \quad (17)$$

Dengan  $Ra_L$  adalah bilangan tanpa dimensi Rayleigh diberikan dengan:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{bottom} - T_a)l^3}{\alpha\nu} \quad (18)$$

$l$  adalah panjang karakteristik yang dirumuskan dengan:

$$l = \frac{A_s}{p} \quad (19)$$

Dimana  $A_s$  dan  $p$  masing-masing adalah luas alas evaporator dan keliling evaporator.

Panas hilang dari sisi dinding diberikan dengan persamaan:

$$Q_{side} = \frac{T_{side} - T_a}{1/h_s 2\pi r_{ins,o} l_s} \quad (20)$$

Dimana  $r_{ins,o}$  dan  $l_s$  masing-masing merupakan radius dari pusat evaporator ke permukaan luar dari insulasi dan tinggi evaporator.

Koefisien perpindahan panas konveksi natural dari sisi dinding evaporator diberikan oleh :

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{0,25}}{[1 + (0,492/pr)]^{4/9}} \quad (21)$$

Bagian atas dari evaporator dibentuk seperti kerucut terpotong dimana dapat dianggap sebagai plat miring dengan sudut kemiringan  $\theta$ . Panas hilang dari bagian tersebut dapat dihitung dengan rumus:

$$Q_{top} = \frac{T_{top} - T_a}{1/h_{top} A_{top}} \quad (22)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi natural pada bagian atas evaporator dihitung dengan:

$$Nu = 0,56 (Ra_L \cos \theta)^{0,25} \quad (23)$$

### 3. METODE PENELITIAN

Untuk melakukan pengujian eksperimental ini, pertama yang dilakukan membuat sistem desalinasi vakum secara keseluruhan, dengan cara mengisi penuh air laut ke dalam sistem desalinasi (evaporator, alat penukar kalor tube-in-tube dan kondensor). Untuk membuat system vakum, masing-masing katup pada pipa pengumpan (pipa dalam alat penukar kalor) dibuka, sehingga air laut

di evaporator akan jatuh karena gaya grafitasi melalui pipa pengumpan, sehingga membentuk ruang vakum pada sistem desalinasi. Dengan bahan evaporator terbuat dari bahan stainless steel 304 yang berbentuk silinder dengan bagian atas kerucut, tinggi dan ketebalan evaporator masing-masing adalah 80 cm, 20 cm, dan 5 mm (Widi, 2017). Panas yang diambil dari solar kolektor akan dimasukkan ke dalam evaporator secara sirkulasi menggunakan fluida air, sehingga mampu memberikan energi untuk menguapkan air laut. Dengan bantuan sebuah pompa bertenaga listrik yang dihasilkan oleh *fotovoltaik* berkapasitas 100 Wp . seperti terlihat pada gambar 1 diagram skematik.

Secara sistematis air laut di dalam evaporator dipanaskan oleh koil pemanas dengan fluida air ditransfer dari kolektor surya. Karena tekanan di evaporator berada di bawah atmosfer dan mendekati hamparan absolut, air akan mudah menguap. Uap yang dihasilkan akan mengalir ke kondensor yang memiliki kejenuhan tekanan rendah. Di dalam kondensor, uap akan terkondensasi karena perbedaan temperatur (Temperatur lebih rendah). Dimana kondensor didinginkan dengan konveksi alami dari udara sekitar. Untuk menghindari panas dari evaporator ditransfer ke kondensor, ditambahkan *flens* diisi dengan lembaran karet yang memiliki konduktivitas rendah. Sistem ini membuat evaporator pada suhu yang lebih tinggi, sementara menjaga kondensor pada suhu kamar. Untuk memberikan perpindahan panas yang lebih baik pada kondensor, ditambahkan serangkaian sirip melingkar dipasang pada permukaan luarnya. Uap yang terkondensasi akan dikumpulkan sebagai produk dari sistem dan dialirkan ke dalam tempat penampungan air tawar. Konsentrasi garam di dalam air laut akan meningkat. Air asin akan mengalir ke dalam penampungan garam melalui penukar panas tipe anulus. Karena air asin dari evaporator masih memiliki suhu tinggi, panasnya akan ditukar dengan air laut yang masuk ke evaporator. Proses ini merupakan tahap *preheating* untuk air laut sebelum memasuki evaporator. Aliran air tawar hasil di air kondensor dan air garam dari evaporator akan membuat tekanan evaporator lebih rendah. Tekanan rendah pada evaporator akan membuat aliran air laut masuk ke evaporator melalui pipa air laut umpan. Fakta ini menunjukkan bahwa semua arus dalam sistem digerakkan secara alami tanpa ada kekuatan tambahan.

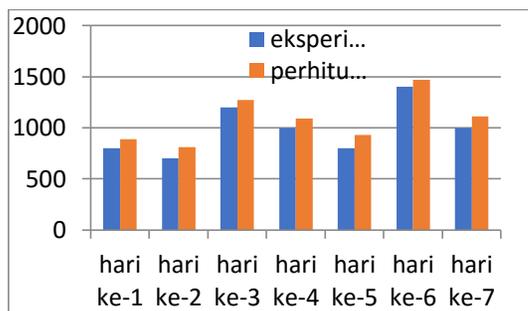


**Gambar 3.** Alat eksperimen desalinasi dan skema desalinasi

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Evaporator

Evaporator pada desalinasi system vakum secara alami ini, digunakan sebagai pemanas air laut, yang mampu menguapkan air laut di dalam evaporator. Sehingga air laut pada evaporator turun titik didihnya dan mempercepat laju penguapan. Kemudian uap yang dihasilkan oleh evaporator diterima oleh kondensor yaitu sebagai alat penukar kalor yang berfungsi mengkondensasikan uap air yang berasal dari ruang evaporator. karena perbedaan temperatur maka uap hasil kondensasi tadi berubah menjadi butiran air bersih yang ditampung dalam sebuah wadah seperti terlihat pada tabel no. 1 hasil air bersih harian..

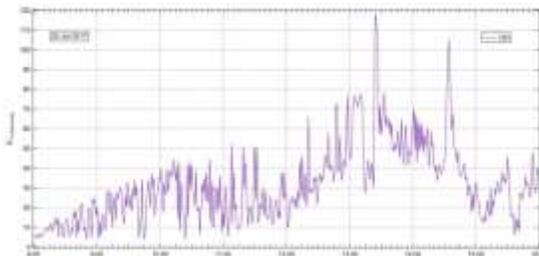


**Gambar 4.** Hasil Air Tawar Menurut Perhitungan dan Eksperimen

Pada Gambar 2. Selama proses pengujian eksperimental pada hari ke-1 sampai hari ke-7 didapatkan hasil air paling banyak pada hari ke-6 yang mempunyai rata-rata temperatur 33.895 °C dengan hasil air bersih 1.4 Liter sedangkan hasil perhitungan 1.47 dengan nilai deviasi 4.51%. Didapatkan rata-rata air bersih secara eksperimen selama 7 hari 6.9 Liter sedangkan berdasarkan perhitungan 7.56. Keberhasilan dalam proses desalinasi tergantung pada pencapaian energi yang digunakan lebih rendah dari panas laten. Dalam menggunakan operasi, rentang temperatur yang

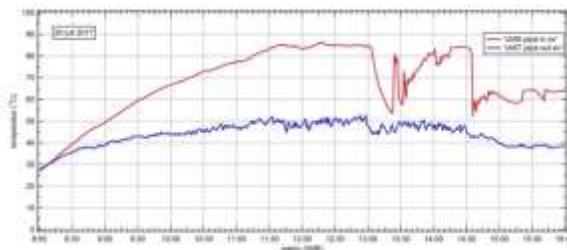
banyak, sehingga diketahui berapa banyak air bersih yang di dapat perhari dalam proses eksperimen.

Dari persamaan (12). dapat diketahui energi yang masuk tiap menit yang di produksi di solar kolektor. Energi yang datang dari sinar matahari ditangkap oleh solar kolektor. Ditransfer kedalam evaporator dengan bantuan fluida air untuk memanaskan air laut yang berada di dalam evaporator, kemudian terjadi proses penguapan. Hasil uap yang sudah di produksi evaporator dilanjutkan masuk ke dalam kondensor berubah menjadi air tawar. Seperti terlihat pada gambar 3, energi yang masuk ke dalam evaporator pada hari ke-6 mulai dari pukul 08.00-16.00.



**Gambar 5.** Energi yang Masuk ke dalam Evaporator

Dari gambar 5, diketahui energi yang masuk pada pada jam 08.00 WIB masih sangat rendah dan mulai meningkat pada jam 09.00 WIB. Energi yang paling besar pada pukul 13.30 setelah itu mulai berangsur-angsur menurun karena sinar matahari sudah mulai tenggelam. Dari gambar grafik pada no. 3 energi yang masuk ke dalam tidak stabil. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain adalah intensitas matahari, karena panas yang diterima kolektor untuk disalurkan ke evaporator, berasal dari energi surya. Faktor lainnya adalah suhu air yang bersirkulasi pada pipa pemanas di dalam evaporator yang berasal dari kolektor, grafiknya dapat dilihat sebagai berikut

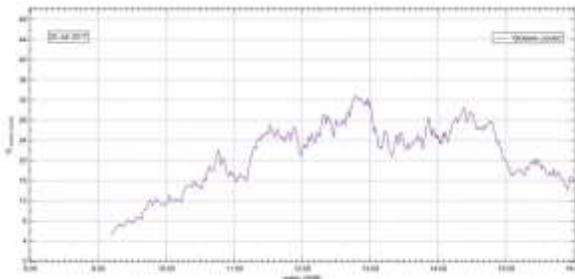


**Gambar 6.** Temperatur pipa pemanas masuk evaporator vs temperatur pipa pemanas keluar evaporator

Dapat di ketahui pada gambar 6, bahwa rata-rata pada 08.00 WIB sampai jam 13.00 WIB temperatur di pipa pemanas masuk evaporator mengalami peningkatan. Sedangkan pada jam 13.20 WIB secara bertahap mengalami penurunan. Karena semakin tinggi temperatur suatu zat cair maka pergerakan molekul di dalam evaporator akan semakin cepat hingga terjadi tabrakan antar molekul yang akan menyebabkan semakin cepatnya proses perpindahan massa dari cairan ke gas. Sedangkan proses kondensasi dipengaruhi oleh suhu kondensor. Uap yang terbentuk akan diubah menjadi bentuk cair apabila mengenai benda yang suhunya lebih rendah yaitu kondensor. Bila dilihat pada gambar 2 dan gambar 3 memiliki kesamaan. Karena sangat berpengaruh energi panas yang dihasilkan terhadap peningkatan produksi air laut. Dimana suhu lingkungan mulai menurun karena sinar matahari mulai berkurang. Sedangkan kerugian pada sistem berasal dari dinding atas evaporator, dinding bawah evaporator dan dinding samping evaporator.

**4.1.1 Kehilangan Panas pada Evaporator**

Dari persamaan diatas didapatkan grafik pada gambar 4, yaitu Kehilangan panas total, dari kehilangan panas pada dinding, tutup, dan alas sistem evaporator. Kehilangan panas mulai terjadi pada jam 09.00, karena pada jam 08.00 – 08.55 suhu lingkungan dan suhu evaporator sama, sehingga tidak ada panas yang hilang.



**Gambar 7.** Total kehilangan panas pada evaporator.

**4.2 Kondensor**

Pada penelitian ini diasumsikan uap air terkondensasi sempurna. Jadi analisis di fokuskan hanya pada keefektifan sirip. Dengan menggunakan rumus

$$M = \sqrt{\frac{h_f}{k_y}} \tag{24}$$

Dimana,  $h_f$  merupakan koefisien perpindahan kalor pada sisi udara, nilai yang kita gunakan adalah  $65 \text{ W/m}^2$ ,  $k$  merupakan daya hantar sirip, jenis material yang digunakan adalah aluminium, dengan nilai  $k$  sebesar  $202 \text{ W/m.K}$ ,  $y$  merupakan setengah tebal sirip dalam satuan m.

**5. KESIMPULAN**

1. Temperatur rata-rata pada bagian, sisi tutup evaporator, alas evaporator, dan dinding evaporator berturut-turut selama pengujian yaitu  $45,63^\circ\text{C}$ ,  $42,17^\circ\text{C}$ , dan  $49,17^\circ\text{C}$ .
2. Kinerja alat desalinasi air laut sistem vakum natural ini bekerja pada panas yang rendah dengan rentang temperatur  $27^\circ\text{C}$  -  $50^\circ\text{C}$ , dan dijaga konstan pada temperatur evaporasi  $50^\circ\text{C}$  dengan tekanan vakum rata-rata sebesar  $41 \text{ cmHg}$ .
3. Dari perhitungan yang diperoleh energi panas yang masuk kedalam evaporator sebesar  $15.110,21 \text{ kJ}$ , energi yang digunakan untuk menguapkan air laut yaitu sebesar  $10.302,986 \text{ kJ}$ , energi yang hilang di evaporator sebesar  $4.092,775 \text{ kJ}$ .
4. Dari perhitungan yang dilakukan pada analisa evaporator, diperoleh efisiensi evaporator,  $68,18 \%$  dan keefektifan sirip sebesar  $32 \%$
5. Dari perhitungan yang dilakukan, diperoleh laju penguapan rata-rata di dalam evaporator selama pengujian sebesar  $5,120 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
6. Kuantitas produksi rata-rata air bersih yang diperoleh selama pengujian adalah  $0,98 \text{ liter}$ .

**REFERENSI**

Ali MT, Fath HES, Armstrong PR. A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:4187-99.

Al-Kharabsheh, A. and Goswami, D. Y., Theoretical analysis of a water desalination system using low grade solar heat, *Journal of Solar Energy Engineering* 126 (2004)774-780.

Eltawil MA, Zhengming Z, Tuan L. A review of renewable technologies integrated with desalination systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:2245-62.

- Kalogirou S. Seawater desalination using renewable energy sources. *Prog Energy Combust Sci* 2005;31:242-81.
- Roberts DA, Johnston EL, Knott NA. Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. *Water Res* 2010;44:5117-28.
- UN-Water. 2006. *Coping With Water Scarcity : a Strategic Issue and Priority for System-Wide Action.*
- Widi K. A., Wardana ING, Suprpto W., Irawan Y. S., White Layer Control on AISI 316L Using Temperature and Gas Nitriding Diffusion Stage Process, *International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.)*, vol 11, 2017