



PAPER – OPEN ACCESS

Kajian Numerik Penguapan Pada Evaporator Desalinasi Air Laut Sistem Vakum Alami

Author : Himsar Ambarita
DOI : 10.32734/ee.v1i1.117
ISSN : 2654-7031
E-ISSN : 2654-704X

Volume 1 Issue 1 – 2018 TALENTA Conference Series: Energy and Engineering



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Kajian Numerik Penguapan Pada Evaporator Desalinasi Air Laut Sistem Vakum Alami

Himsar Ambarita*

**Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan 20155, Indonesia*

himsar@usu.ac.id

Abstrak

Fokus penelitian ini adalah alat desalinasi air laut energi surya dengan sistem vakum alami. Salah satu bagian terpenting yang menentukan performansi alat ini adalah proses penguapan pada kondisi vakum di dalam evaporator. Para peneliti umumnya menggunakan cara analitik dengan persamaan-persamaan empirik untuk menentukan laju penguapan pada evaporator. Pada penelitian ini diusulkan menggunakan metode numerik dengan menggunakan perangkat lunak CFD untuk menjelaskan proses penguapan pada evaporator. Hasil numerik dan analitik akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Peralatan eksperimen sederhana telah dirancang bangun untuk mendapatkan hasil eksperimen dan melakukan validasi. Hasil simulasi menunjukkan metode numerik dengan menggunakan perangkat lunak CFD dapat menggambarkan proses penguapan pada evaporator dengan baik. Perbandingan hasil analitik dan numerik menunjukkan laju penguapan di evaporator dengan metode numerik lebih dekat dengan hasil eksperimen. Metode numerik sebaiknya digunakan untuk melakukan inovasi agar dihasilkan peningkatan performansi desalinasi surya sistem vakum alami.

Kata Kunci: Desalinasi; Vakum Alami; Evaporasi; Numerik; Analitik;

1. Pendahuluan

Pemurnian air laut (*Desalination*) sudah lama dikenal dan digunakan umat manusia untuk memenuhi kebutuhannya akan air bersih. Saat ini, banyak daerah seperti di Timur Tengah, Negara-negara Arab, Amerika Utara, sebagian Asia, Eropa, Afrika, Amerikatengah, Amerika Selatan, dan Australia telah menggunakan sistem desalinasi air laut untuk memenuhi kebutuhan air bersih [3]. Di Indonesia pada beberapa daerah yang mengalami krisis air juga sudah menggunakan desalinasi air laut.

Sampai dengan saat ini para peneliti telah banyak mengajukan metode untuk melakukan desalinasi air laut. Antara lain adalah sistem *multi-stage flash*, *multi-effects distillation*, *vapor compression*, *reversal osmosis*, *elektro-dialysis*, dll. Sistem desalinasi air laut yang konvensional umumnya menggunakan energi yang berasal dari bahan bakar fosil. Berdasarkan suatu studi yang dilakukan oleh Kaligirou [6], sekitar 10.000 ton bahan bakar fosil dibakar setiap tahun untuk melakukan desalinasi. Oleh karena itu, sistem desalinasi termasuk sektor yang menghasilkan emisi Gas-gas

rumah kaca yang cukup besar. Fakta ini telah mendorong para peneliti untuk melakukan inovasi agar desalinasi dapat bekerja lebih efisien dan juga menggunakan sumber energy terbarukan untuk menggantikan energy fosil [8].

Sumber energy terbarukan yang umum digunakan untuk melakukan desalinasi air laut adalah energy surya, angin, dan geothermal. Dari ketiga sumber energi terbarukan ini, yang paling banyak digunakan adalah energi surya, yaitu sekitar 57% [3]. Berdasarkan kajian yang dilakukan, pada masa yang akan datang desalinasi air laut dengan menggunakan energi surya (disingkat desalinasi surya) akan semakin banyak digunakan. Bahkan negara-negara yang kaya minyak seperti Arab Saudi sedang mengarahkan sumber energi pemurnian air lautnya agar memanfaatkan energi surya demi proses yang berkelanjutan. Proses pemanfaatan energi surya untuk desalinasi air laut dapat dilakukan secara surya termal dan atau secara hybrid termal-fotovoltaik.

Salah satu metode desalinasi dengan memanfaatkan energi surya yang sangat potensial untuk diaplikasikan adalah alat desalinasi surya sistem vakum alami. Pada sistem ini, air laut dipaksa mengalami evaporasi pada tekanan yang vakum agar sumber energi panas pada suhu yang relatif rendah dapat digunakan. Energi surya yang dikumpulkan oleh kolektor surya pada temperatur rendah akan mempunyai efisiensi yang relatif tinggi. Maka penggunaan energi surya sebagai sumber energi desalinasi ini sangat cocok untuk diaplikasikan. Komponen utama desalinasi surya vakum ini adalah evaporator dan kondensor. Gaya gravitasi air dimanfaatkan untuk mendapatkan kondisi vakum secara alami [1].

Meskipun sangat menjanjikan, penelitian tentang desalinasi surya dengan sistem vakum alami ini masih jauh dari tahap aplikasi. Penelitian tentang desalinasi ini masih terus mendapat perhatian dari para peneliti [4][5][9]. Salah satu fenomena yang harus diteliti lebih lanjut adalah proses penguapan (evaporasi) pada evaporator yang terjadi pada kondisi vakum. Penelitian ini fokus pada kajian numerik penguapan pada evaporator. Perangkat lunak komersial Computational Fluid Dynamics (CFD) akan digunakan untuk melakukan simulasi proses penguapan. Hasil numerik dan analitik akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hasil dari penelitian ini diharapkan akan memberikan kontribusi dalam meningkatkan performansi desalinasi surya sistem vakum alami.

2. Metode dan Peralatan Eksperimen

2.1. Prinsip Kerja Desalinasi Vakum Alami

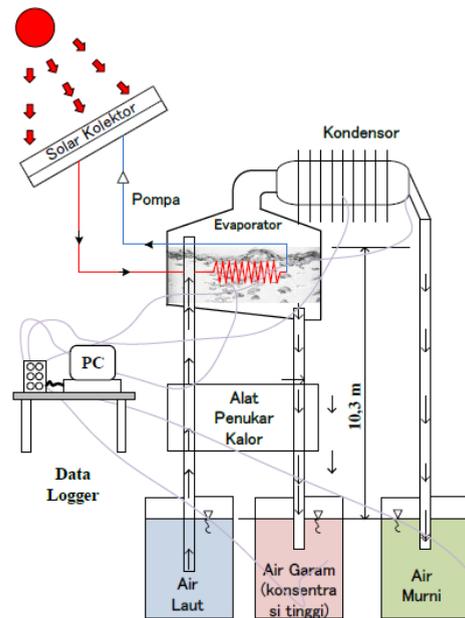
Prinsip kerja desalinasi secara umum sangat sederhana. Air laut dipanaskan hingga menguap, dan kemudian uap yang dihasilkan dikondensasikan kembali dan ditampung di sebuah wadah. Air kondensat tersebut adalah air bersih. Sedangkan air laut yang tidak ikut menguap selama pemanasan menjadi konsentrat garam. Kondisi vakum di dalam sistem akan diperoleh dengan membangun sistem pada ketinggian 10.3 m untuk memanfaatkan gaya gravitasi air. Sistem yang sederhana dari desalinasi surya vakum alami ini ditampilkan pada Gambar 1. Sistem ini terdiri dari unit pemanas energi surya, evaporator dan kondensor dimana keduanya berada pada ketinggian 10 m di atas tanah. Evaporator dihubungkan dengan tangki air laut dan tangki air garam, sementara kondensor dengan tangki air bersih. Dengan kondisi seperti ini akan terjadi vakum di dalam evaporator. Air laut yang masuk ke evaporator akan mendidih dengan adanya panas dari solar kolektor atau sumber panas lain.

Sebagai catatan, tekanan uap dari air laut adalah sekitar 1,8% lebih rendah dari tekanan uap air murni pada rentang suhu 0 - 100°C [1]. Hal ini berarti jika bagian atas evaporator dan kondensor berada pada temperatur yang sama, karena terhubung, maka air dari kondenser yang akan menguap dan diserap oleh air garam yang ada di evaporator. Dengan kata lain proses desalinasi tidak akan terjadi. Untuk menghindari hal ini, maka evaporator harus tetap diberi panas, sehingga air yang ada di dalam evaporator akan menguap dan mengalami kondensasi di kondensor. Setelah terjadi evaporasi, maka air garam akan terbentuk pada dasar evaporator dan akan turun kebawah dan berkumpul di tangki air garam. Karena temperaturnya masih tinggi, maka air garam yang panas ini akan dialirkan melalui sebuah alat penukar kalor, dan difungsikan untuk memanaskan air laut yang naik ke evaporator. Pada penelitian ini, untuk memudahkan mengontrol proses evaporasi pada evaporator, digunakan pemanas listrik sebagai pengganti pemanas surya.

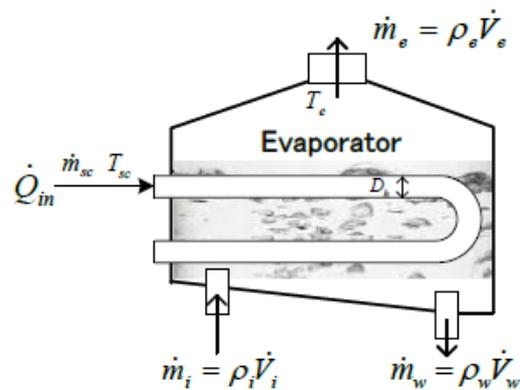
2.2. Analisis Evaporator

Analysis sistem desalinasi vakum ini dapat dijelaskan pada bagian ini. 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 pengumpulan pada laju aliran massa yang disimbolkan m_i [kg/s]. Di dalam evaporator akan terjadi penguapan dengan laju m_e [kg/s] yang akan mengalir dalam bentuk uap dan masuk ke kondensor. Sebagai sisanya akan terbentuk air garam yang akan keluar dari evaporator dengan laju m_w [kg/s].

Gambar 2 menampilkan diagram aliran pada evaporator. Pada saat terjadi penguapan diperlukan panas untuk menyuplai panas laten penguapan. Panas ini akan diambil dari kolektor surya dan diantar oleh fluida kerja yang laju alirannya disimbolkan dengan m_{sc} .



Gambar 1. Sistem desalinasi surya vakum alami



Gambar 2. Aliran massa dan energi di evaporator

Hukum kekekalan massa akan memberikan Persamaan (1):

$$\frac{d}{dt} (\rho V)_s = \rho_i V_i - \rho_w V_w - \rho_e V_e \quad (1)$$

Jika konsentrasi dinyatakan dengan C [%], maka perubahan konsentrasi garam di dalam tabung evaporator dapat dinyatakan dengan Persamaan (2):

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

Dimana huruf *s* menyatakan air laut (*seawater*) yang ada di dalam evaporator. Hukum kekekalan energi akan memberikan Persamaan (3):

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

Laju penguapan (evaporasi) dari air laut di dalam evaporator (dinyatakan dengan huruf "*s*") kedalam air murni di kondensor (dinyatakan dengan huruf "*f*") dapat dirumuskan dengan menggunakan Persamaan (4) berikut:

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

Dimana A_{surf} adalah luas permukaan air yang ada di evaporator. Parameter α_m adalah koefisien empiric yang diperoleh dengan cara eksperiment, menurut Bemporad (1995) nilainya $10^{-7} \leq \alpha_m \leq 10^{-6}$ [kg/m².Pa.s.K^{0,5}]. Beda tekanan evaporator dan kondensor disimbolkan dengan ΔP . Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (4) adalah persamaan analitik yang umum digunakan dalam analysis desalinasi surya sitem vakum alami. Pada penelitian ini, *Computational Fluid Dynamic* (CFD) akan digunakan untuk menganalisis laju evaporasi sebagai pengganti Persamaan (4).

2.3. Peralatan Eksperimen

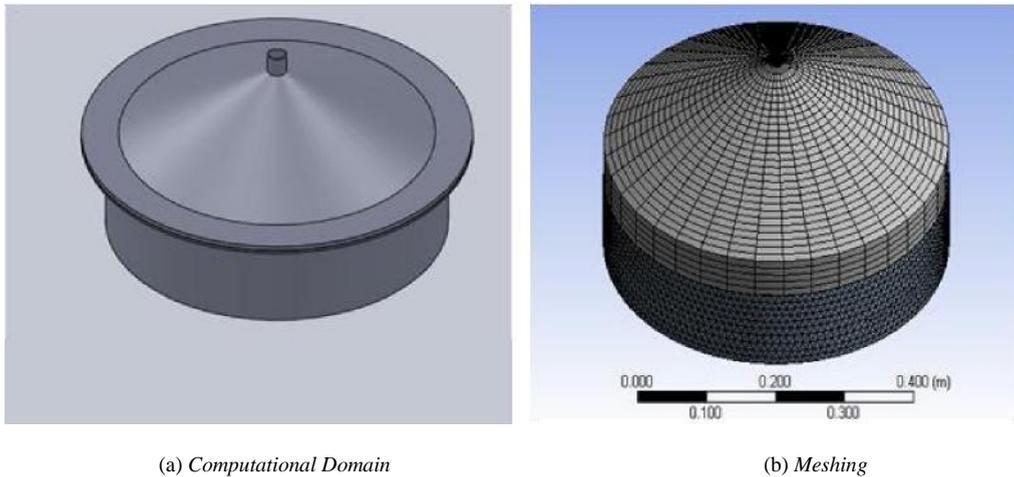
Pada penelitian ini satu unit desalinasi surya sistem vakum alami akan dirancangbangun. Evaporator terbuat dari *stainless steel* 304 seperti ditampilkan pada Gambar 3. Material evaporator mempunyai ukuran dengan bagian bawah berbentuk silinder dengan ukuran diameter 250 mm, tinggi 150 mm dan tebal 5 mm serta bagian atas berbentuk kerucut dengan ukuran diameter bawah 250 mm, diameter atas 12,7 mm dan tebal 3 mm yang disertai dengan pemanaslistrik yang memiliki ukuran diameter 50 mm dengan panjang 2400 mm. Temperatur pada evaporator diukur dengan menggunakan termokopel tipe J dengan akurasi 0,1°C dan direkam dengan menggunakan *Agilent Data logger*.



Gambar 3. Evaporator sebagai alat eksperimen

2.4. Computational Fluid Dynamics(CFD)

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak komersial CFD. Daerah perhitungan (*Computational Domain*) yang akan digunakan pada penelitian ini hanyalah evaporator, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4(a). Bentuk *meshing* yang digunakan juga ditampilkan pada Gambar 4(b).

(a) *Computational Domain*(b) *Meshing*

Gambar 4: Geometri evaporator

Tabel 1: Kondisi dan nilai batas

Kondisi Batas	Jenis	Nilai
Air Laut	Fluid	$\rho = 1023,475 \text{ kg/m}^3$ $C_p = 4001.45 \text{ J/Kg-K}$ $k = 0.6085 \text{ W/m-K}$ $\mu = 0.969 \text{ kg/m-s}$
Pemanas	Solid	$\rho = 8060 \text{ kg/m}^3$ $C_p = 530 \text{ J/Kg-K}$ $k = 17 \text{ W/m-K}$
Outlet	Pressout	-
Dinding	Wall	$\rho = 8060 \text{ kg/m}^3$

$$C_p = 530 \text{ J/Kg-K}$$

$$k = 17 \text{ W/m-K}$$

Persamaan pembentuk aliran yang digunakan pada simulasi ini adalah persamaan 3D. Masing-masing persamaan adalah:

Persamaan kontinuitas oleh Persamaan (5):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

Persamaan momentum oleh Persamaan (6) :

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu_{ef} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \rho f \quad (6)$$

Persamaan energi oleh Persamaan (7):

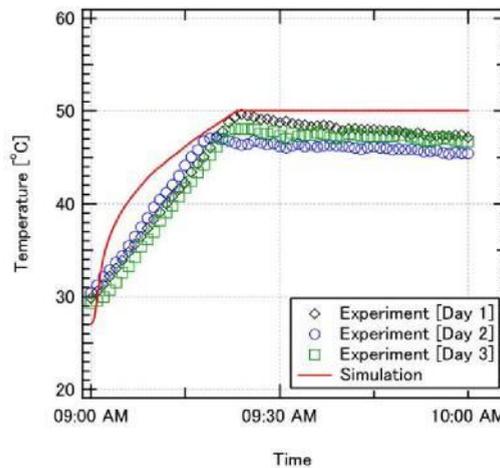
$$\frac{\partial (\rho C T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho C T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \dot{q} + \Phi \quad (7)$$

dimana i, j , dan $k \in 1, 2$, dan 3 masing-masing menyatakan sumbu x, y, z . Model *multi fasa Eulerian* digunakan untuk memodelkan proses kondensasi dan evaporasi. Kondisi dan nilai batas yang digunakan pada simulasi numerik ditampilkan pada Tabel 1. Algoritma SIMPLE digunakan untuk menggabungkan medan kecepatan dan medan tekanan. Persamaan momentum didiskritisasi dengan menggunakan *second order upwindscheme*.

3. Hasil dan Diskusi

Simulasi dan pengujian telah dilakukan pada evaporator ini dengan membuat temperatur air di dalam evaporator dijaga konstan pada 50°C . Pengujian dilakukan selama 6 hari. Pada tulisan ini, hanya hasil 3 hari yang ditampilkan.

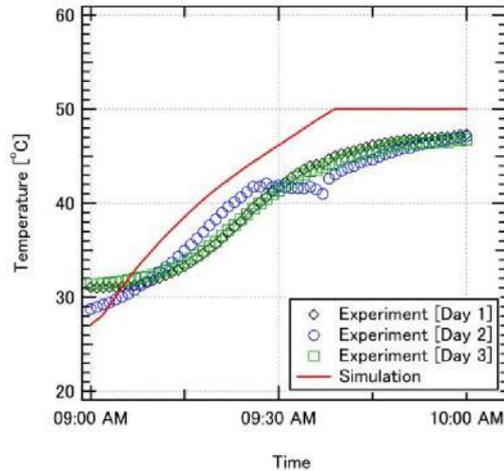
Perbandingan temperatur pada bagian dasar evaporator yang diperoleh dari hasil pengujian selama 3 hari dan hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 5. Posisi pengukuran yang ditampilkan adalah sebuah titik tepat pada permukaan dasar evaporator. Temperatur hasil eksperimen relatif sama untuk ketiga hari percobaan. Sementara hasil simulasi menunjukkan sedikit perbedaan. Hal ini dikarenakan asumsi simulasi yang digunakan bahwa evaporator diisolasi sempurna. Sementara kondisi aktual, sebagian panas dari evaporator masih terbuang ke lingkungan. Secara umum dapat dikatakan hasil simulasi tidak berbeda jauh dengan hasil eksperimen.



Gambar 5: Temperatur pada alas evaporator hasil pengujian dan simulasi

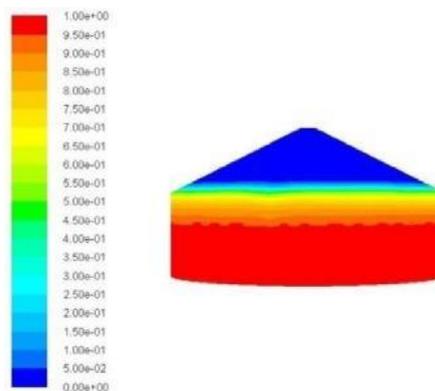
Pada gambar dapat dilihat bahwa, pemanasan sistem terjadi selama 20 menit pertama. Temperatur naik dari 30°C sampai 48°C . Setelah itu temperatur akan konstan. Hal ini menunjukkan pada temperatur 50°C terjadi evaporasi.

Karena terjadi perubahan fasa, maka panas yang diterima dari pemanas (*electric heater*) akan dipakai untuk panas penguapan dari fasa cair menjadi uap. Pada saat ini temperatur akan konstan dan proses penguapan berlangsung secara kontinu. Temperatur terjadinya perubahan fasa ini adalah sekitar 50°C. Temperatur pada dinding evaporator dari hasil eksperimen dan hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 6. Pada gambar dapat dilihat ada perbedaan antara hasil simulasi dan hasil eksperimen. Tetapi polanya masih tetap sama. Hal ini dikarenakan pada dinding evaporator kehilangan panas ke lingkungan cukup signifikan. Perbedaan ini perlu diperhatikan untuk mengurangi kehilangan energi ke lingkungan dan membuat laju evaporasi tetap besar.



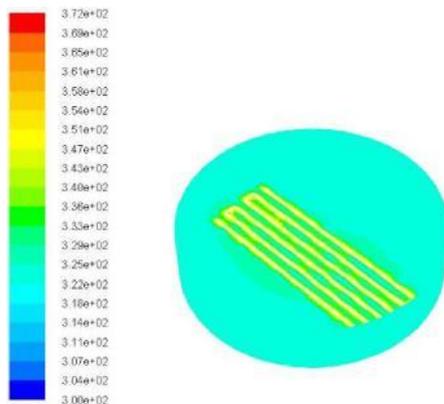
Gambar 6: Temperatur pada dinding evaporator hasil pengujian dan simulasi

Hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak CFD ditampilkan dalam bentuk kontur fraksi cair dan kontur temperatur. Kontur fraksi cair di dalam evaporator pada menit ke 45 ditampilkan pada Gambar 7. Kontur ini diambil tepat pada pertengahan evaporator.



Gambar 7: Kontour Fraksi cair pada menit ke 45

Gambar 7 menunjukkan bahwa pada bagian bawah evaporator fraksi cair nilainya sama dengan 1, sementara pada bagian atas nilainya mendekati nol. Sementara diantara keduanya fraksi cair bervariasi di antara 1 dan 0. Artinya air berangsur-angsur berubah menjadi uap dan akhirnya naik ke bagian atas sebelum bergerak menuju kondensator. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa proses evaporasi dapat disimulasikan dengan baik.



Gambar 8: Kontour Temperatur di dalam evaporator

Kontur temperatur di dalam evaporator pada menit yang ke 45 ditampilkan pada Gambar 8. Potongan gambar ini diambil pada bagian bawah evaporator dimana terdapat *heater* listrik. Temperatur di sekitar *heater* sangat tinggi sekitar 100°C sementara di bagian lainnya temperaturnya sekitar 50°C. Fakta ini menunjukkan proses evaporasi terjadi pada temperatur 50°C atau jauh di bawah 100°C. Hal ini bisa terjadi karena tekanan kerja evaporator ini dibuat pada vakum.

Analisis untuk mendapatkan laju penguapan dilakukan dengan cara analitik menggunakan Persamaan (4). Cara lainnya adalah menggunakan perangkat lunak CFD dan yang aktual dengan melakukan pengukuran. Pada penelitian ini setiap eksperimen dilakukan selama 8 jam. Volume air murni yang dihasilkan oleh desalinasi ini ditampilkan pada Tabel 2. Data pada tabel menunjukkan pendekatan dengan CFD memberikan hasil yang lebih dekat dengan hasil eksperimen.

Tabel 2: Volume air murni yang dihasilkan

Metode	Volume (Liter)
Eksperimental	1,20
Analitik, Persamaan (4)	0,97
CFD	1,02

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi proses penguapan pada evaporator sebuah desalinasi surya sistem vakum alami. Proses pemasukan panas kepada sistem diganti dengan pemanas listrik. Hasil simulasi menunjukkan perangkat lunak CFD dapat digunakan untuk melakukan simulasi proses penguapan dan hasilnya lebih dekat dengan eksperimen dibandingkan dengan pendekatan analitik yang umum dipakai. Metode ini disarankan untuk digunakan pada analisis desalinasi surya sistem vakum.

Referensi

[1] Al-Karabsheh S, Goswami DY. Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat. *Desalination* 156 (2003) 323–32.

[2] Bemporad, G. A., 1995, “Basic Hydrodynamic Aspects of a Solar Energy Based Desalination Process,” *Desalination*, 54, pp. 125–134.

[3] Eltawil MA, Zhengming Z, Yuan L. A review of renewable technologies integrated with desalination systems. *Renew Sustain Energy Rev* 13 (2009) 2245–62.

[4] Gude VG, Nirmalakandan N, Deng S, Maganti A. Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage. *Appl Energy* 91-1 (2012) 466–74.

- [5] Gude VG, Nirmalakandan N. Combined desalination and solar-assisted air-conditioning system. *Energy Convers Manag* 49 (2008) 3326–30.
- [6] Kalogirou S., Seawater desalination using renewable energy sources. *Prog Energy Combust Sci* 31 (2005) 242–81.
- [7] Maroo SC, Goswami DY. Theoretical analysis of a single-stage and two-stage solar driven flash desalination system based on passive vacuum generation. *Desalination* 249 (2009) 635–46.
- [8] Subramani A, Badruzzaman M, Oppenheimer J, Jacangelo JG. Energy mini-mization strategies and renewable energy utilization for desalination: a review. *Water Res* 45 (2011) 1907–20.
- [9] Teoman A, H Al Madani. Feasibility study of renewable energy powered seawater desalination technology using natural vacuum technique. *Renewable Energy* 35 (2010) 506-514.