

PENINGKATAN EFISIENSI DAN EFEKTIVITAS KONDENSOR PADA SOLAR STILL

INCREASING THE EFFICIENCY AND EFFECTIVENESS OF THE CONDENSOR ON THE SOLAR STILL

Dan Mugisidi, Adittia Fajar, Rifky, dan Oktarina Heriyani

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr.
Hamka

Submitted:26-11-2021; Revised:21-04-2022; Accepted:30-05-2022

ABSTRACT

Water is a basic human need that must be fulfilled. The need for clean water is increasing while the availability of clean water is limited, so researchers are trying to use sea water as raw material for fresh water. Sea water is an abundant source of water but still contains salt, therefore it is necessary to separate sea water and its salt content to produce fresh water or desalination, one way is to use solar still. Solar stills are mostly used for desalination processes on the coast and remote area because they can be operated easily and can be manufactured at low cost. However, solar still has low productivity, so various studies have been carried out to increase desalination yields, such as the addition of a condenser. Aim of this study was to determine the thermal efficiency and effectiveness of the condenser on solar stills. The research was conducted in period March - May 2021. The materials used are aluminum with a length of 300 mm, a width of 300 mm and a thickness of 1.6 mm for the basin plate, double glass with a thickness of 3 mm for the top and sides of the solar still. The study was conducted indoor with radiation intensity using halogen lamps. The variables measured were water temperature, evaporation, inner glass surface, condenser, inlet and outlet of the condenser cooler using a fluke meter, radiation intensity using a solar power meter and desalinated water using a digital balance. From the results of the study, the average thermal efficiency of the condenser in the integrated solar still reached 83.94% and the desalination mass of seawater reached 451.32 grams with the effectiveness of condenser production of 96.4% and the correlation value of 0.99.

Keywords: solar still; distillation; desalination; condenser.

ABSTRAK

Air adalah kebutuhan pokok manusia yang harus tercukupi. Kebutuhan air bersih meningkat sedangkan ketersediaannya terbatas sehingga para peneliti berupaya menggunakan air laut sebagai bahan baku air tawar. Air laut merupakan sumber air yang melimpah, akan tetapi masih mengandung garam. Oleh karena itu, perlu pemisahan antara air laut dengan kandungan garamnya sehingga bisa menghasilkan air tawar atau desalinasi yang salah satu caranya adalah menggunakan solar still. Solar still banyak dipergunakan untuk proses desalinasi di pinggir pantai dan pedalaman karena dapat dioperasikan dengan mudah dan dapat dibuat dengan biaya murah. Akan tetapi, solar still memiliki produktivitas yang rendah, maka itu berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan hasil desalinasi yang salah satunya dengan penambahan kondensor. Tujuan dari penelitian ini untuk

*Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Copyright ©2022 THE AUTHOR(S). This article is distributed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Jurnal Teknosains is published by the Graduate School of Universitas Gadjah Mada.

menentukan tingkat efisiensi dan efektifitas kondensor berbentuk kerucut yang dipergunakan pada solar still. Penelitian di laksanakan di laboratorium konversi energi Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA. Alumunium dengan tebal 2 mm digunakan untuk membuat solar still yang memiliki panjang 300 mm dan lebar 300 mm. Dua lapis kaca yang masing-masing memiliki tebal 3 mm digunakan sebagai penutup atas dan samping untuk mencegah kondensasi di area kaca penutup. Pengambilan data dilaksanakan di dalam ruangan menggunakan lampu halogen dengan intensitas radiasi yang diatur sesuai penelitian sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi kondensor mencapai 83,94% dengan hasil kumulasi air bersih mencapai 451,32 gram. Perhitungan efektifitas kondensor membuktikan bahwa bentuk kondensor mengerucut memiliki efektifitas yang sangat tinggi hingga sebesar 96,4% dan nilai korelasi yang digunakan pada kondensor solar still sebesar 0.99.

Keywords: solar still; destilasi; desalinasi; kondensor.

PENGANTAR

Air merupakan komoditas penting bagi makhluk hidup karena banyak digunakan untuk berbagai keperluan. Manusia mengandalkan air bersih tidak hanya untuk minum, tetapi juga untuk pertanian, transportasi, produksi energi, proses industri, pembuangan limbah, ekstraksi ikan dan produk lainnya (Combes, 2005). Meskipun berbagai teknologi telah dibuat untuk memasok air bersih ke lebih banyak orang dari tahun ke tahun, kenyataannya 663 juta orang masih kekurangan sumber air bersih pada tahun 2013 (Guha-Sapir dkk., 2013). Ketersediaan sumber air bersih yang terbatas tentu harus mencukupi kebutuhan manusia sekitar 9.7 miliar pada tahun 2050 (Guppy dkk., 2017). Akan tetapi, karena ketersediaan air bersih hanya 2.5% dari 71% wilayah perairan bumi, maka diperlukan pemanfaatan sumber daya lain untuk menghasilkan air bersih (Youssef dkk., 2014). Oleh karena itu, banyak penelitian mengarah pada desalinasi air laut.

Desalinasi air laut merupakan proses pemurnian air laut untuk menghilangkan kandungan garam sehingga menghasilkan air tawar. Garam air laut sebagian besar terdiri dari

fluoride, kalsium karbonat (CaCO_3), natrium sulfat, dan kalium (Mugisidi & Heriyani, 2018) sehingga tidak layak untuk dikonsumsi sebagai air minum. Oleh karena itu, kadar garamnya harus dikurangi dengan proses desalinasi. Salah satu proses desalinasi adalah distilasi menggunakan solar still sehingga menghasilkan air murni tanpa kandungan garam (Abujazar dkk., 2016) atau disebut juga solar still desalination (Ahmed, 2012).

Solar still merupakan suatu perangkat di mana air laut akan dipanaskan oleh panas matahari hingga menguap. Kemudian, panas uap tersebut dikondensasikan sehingga menghasilkan tetesan air yang dialirkan menuju penampungan air bersih (Abujazar dkk., 2016). Ini merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan terutama di daerah pesisir yang terpencil (Tabrizi dkk., 2010), karena pengoperasiannya sangat sederhana. Pada dasarnya hanya ada dua peristiwa di dalam solar still, yaitu penguapan dan kondensasi. Penguapan di dalam solar still terjadi karena ada beda tekanan yang disebabkan oleh perbedaan temperatur air dengan temperatur kaca penutup (Mahian dkk., 2017), sedangkan kondensasi terjadi ketika uap air melalui permukaan yang memiliki temperatur lebih rendah dari titik embunnya dan terjadi secara random di permukaan kondensor atau *dropwise condensation* (Holman, 2010). Penambahan kondensor baik internal maupun eksternal terbukti meningkatkan efisiensi solar still (Tiwari dkk., 1997; El-Bahi and Inan, 1999b; Al-Hamadani & Shukla, 2013; Kabeel dkk., 2014; Belhadj dkk., 2015; El-Samadony dkk., 2015; Ahmed & Ibrahim, 2017; Essa dkk., 2020; Sivaram dkk., 2020), sehingga penelitian penggunaan kondensor pada solar still terus dilakukan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan produktifitas solar still, kondensor akan digunakan dalam penelitian ini.

Kondensor berperan sebagai alat penukar panas untuk mengubah uap menjadi zat cair, jika uap bersentuhan dengan pelat yang memiliki temperatur rendah maka akan

menghasilkan butiran air yang disebut dengan proses kondensasi (Rarindi dkk., 2018). Bentuk kondensor menjadi salah satu parameter yang berpengaruh terhadap hasil desalinasi *solar still* (Abujazar dkk., 2016) karena perbedaan tekanan akan mendorong uap air mengalir menuju kondensor yang bertekanan rendah (Fath & Elsherbiny, 1993) dengan aliran alami (Rahmani dkk., 2015). Lebih jauh lagi efektifitas kondensor dipengaruhi oleh jumlah uap air yang menyentuh dinding kondensor (Refalo dkk., 2016) sehingga upaya untuk memaksa uap air masuk ke dalam kondensor dan bersentuhan dengan dindingnya menjadi penting. Lebih jauh lagi, luas penampang untuk masuk kondensor harus memudahkan uap air mengalir masuk ke dalamnya. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan bentuk kondensor mengerucut serta menghitung efisiensi termal dan efektifitasnya.

Solar still dan perpindahan panas

Pada dasarnya desalinasi air laut merupakan proses untuk menghilangkan kadar garam berlebih di dalam air sehingga air tersebut dapat dikonsumsi manusia. Alat yang dapat digunakan untuk mengubah air laut menjadi air bersih adalah *solar still*. Di dalam *solar still*, panas yang berasal dari radiasi matahari, diserap oleh penyerap panas bercat hitam, kemudian dilepaskan ke air di *solar still*, meningkatkan suhunya (Srithar & Rajaseenivasan, 2018). Perbedaan suhu antara air dan permukaan kondensor meningkatkan perbedaan tekanan antara permukaan air dan permukaan kondensor sehingga air menguap (Boutriaa & Rahmani, 2017). Ketika uap bersentuhan dengan suatu permukaan yang memiliki temperatur lebih rendah maka terjadi proses kondensasi (Sharshir dkk., 2017).

Secara umum terdapat dua jenis *solar still*, yaitu *active solar still* dan *passive solar still* (Yadav dkk., 1994). Pada *active solar still* terintegrasi dengan kolektor, sedangkan *passive solar still* tidak terdapat kolektor sehingga hanya memiliki masukan eksergi dari panas (Tiwari dkk., 2009).

Perpindahan panas terjadi melalui tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi (Holman dkk., 2010). Pada perpindahan panas internal didalam *solar still*, perpindahan panas konveksi terjadi diantara permukaan air di *basin* dan permukaan kondensor (Zurigat & Abu-Arabi, 2004; Sharshir dkk., 2017).

$$q_{c,w-gi} = h_{c,w-gi} (T_w - T_{gi}) \dots\dots\dots(1)$$

di mana $q_{c,w-gi}$, T_w dan T_{gi} berturut - turut menyatakan laju perpindahan panas konveksi dari air ke kaca bagian dalam, temperatur air dan temperatur kaca bagian dalam.

Nilai yang merupakan koefisien perpindahan panas konveksi dari air ke kaca bagian dalam dapat ditentukan dengan persamaan (Tiwari dkk., 2003)

$$h_{c,w-gi} = \frac{K_f}{d_f} C (Gr Pr)^n \dots\dots\dots(2)$$

yang mana d_f dan k_f adalah jarak antara air ke kaca dan konduktivitas termal sedangkan C dan n merupakan nilai konstanta perpindahan panas konveksi. K_f ditentukan dengan persamaan (Tiwari & Tiwari, 2006)

$$K_f = 0,0244 + 0,00007673 T_w \dots\dots\dots(3)$$

Evaporasi adalah suatu proses berubahnya air menjadi uap air akibat pengaruh perbedaan tekanan, temperatur, angin, kualitas air dan permukaan bidang evaporasi (Jesiani dkk., 2019). Perpindahan panas evaporasi terjadi antara uap air dengan permukaan air ($q_{c,w-gi}$) dirumuskan di bawah ini (Sharshir dkk., 2017).

$$q_{e,w-gi} = h_{e,w-gi} (T_w - T_{gi}) \dots\dots\dots(4)$$

Nilai $h_{e,w-gi}$ sebagai koefisien perpindahan panas evaporasi dihitung dengan persamaan (Ahmed, 1988)

$$h_{e,w-g} = 16.237 \times 10^{-3} h_{c,w-gi} \frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} \dots\dots(5)$$

Nilai P_w adalah tekanan parsial air dan adalah tekanan parsial pada kaca bagian dalam dapat ditentukan dengan persamaan (Elango dkk., 2015).

$$P_w = \exp^{(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273})} \dots\dots\dots(6)$$

$$P_{gi} = \exp^{(25.317 - \frac{5144}{T_g + 273})} \dots\dots\dots(7)$$

Kesetimbangan energi solar still

Kesetimbangan energi pada solar still yaitu energi yang diterima sama dengan energi yang dilepaskan. Kemudian efisiensi termal pada solar still dipengaruhi oleh perbandingan jumlah energi yang masuk pada solar still dengan jumlah produksi air hasil desalinasi. Efisiensi termal solar still (η)(dapat diketahui dengan persamaan (Elango dkk., 2015).

$$\eta = \frac{\sum m_w \times h_{fg}}{\sum I(t)S \times A \times 3600} \dots\dots\dots(8)$$

Hasil desalinasi solar still per jam (m_w) dapat dihitung dengan persamaan (Ranjan, Kaushik and Panwar, 2016).

$$m_w = \frac{h_{e,w-gi} (T_w - T_{gi})}{h_{fg}} \times 3600 \dots\dots\dots(9)$$

Untuk nilai panas laten dari penguapan air (h_{fg}) ditentukan dengan persamaan (Boutriaa and Rahmani, 2017).

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 [1 - 94779 \times 10^{-4}T_w + 1.3132 \times 10^{-7}T_w^2 + 4.7974 \times 10^{-9}T_w^3] \dots\dots(10)$$

Untuk menentukan koefisien perpindahan panas maka perlu mengetahui bilangan Nusselt (Nu) pada solar still, menggunakan persamaan (Tiwari dkk., 2003).

$$Nu = \frac{h_{c,w-gi} d_f}{k_f} \dots\dots\dots(11)$$

atau

$$Nu = C(Ra)^n \dots\dots\dots(12)$$

Penentuan nilai C dan n menggunakan power model calculation (Mugisidi dkk., 2021).

Bilangan Grashof dan Prandtl ditentukan dengan persamaan

$$Gr = \frac{\beta g d_f^3 \rho^2 (\Delta T)}{\mu^2} \dots\dots\dots(13)$$

$$\Delta T = \left\{ (T_w - T_{gi}) + \frac{[P_w - P_{gi}][T_w + 273.15]}{268900 - P_w} \right\} \dots\dots(14)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{K_f} \dots\dots\dots(15)$$

Untuk melengkapi variabel yang dibutuhkan dalam menentukan bilangan Grashof (Gr) dan Prandtl (Pr) menggunakan persamaan (Tiwari & Tiwari, 2006)

$$c_p = 999,2 + (0,1434T_w) + (1,101. 10^{-4}T_w^2) - (6,7581. 10^{-8}T_w^3) \dots\dots(16)$$

$$\mu = (T_w 0,0000000462) + 0,00001718 \dots\dots\dots(17)$$

$$\beta = \frac{1}{T_w + 273,15} \dots\dots\dots(18)$$

$$\rho = \frac{353,44}{T_w + 273,15} \dots\dots\dots(19)$$

di mana c_p menyatakan panas spesifik, μ merupakan viskositas, dan berturut - turut adalah koefisien volumetric dan berat jenis uap.

Selanjutnya, menentukan bilangan Rayleigh (Ra) dengan persamaan (Holman, 2010)

$$Ra = Gr Pr \dots\dots\dots(20)$$

Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar panas (heat exchanger) yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi cairan melalui proses kondensasi atau pengembunan. Kondensor berfungsi untuk mengambil panas suatu zat melalui dinding kondensor secara konduksi sehingga temperatur zat turun dan pada akhirnya mengubah fasanya menjadi fasa cair (Siagian, 2015).

Analisis kesetimbangan energi di kondensor menggunakan hukum pertama

termodinamika bahwa perpindahan kalor rata-rata fluida panas (q_{fh}) sama dengan perpindahan kalor rata-rata fluida dingin (q_{fc}) (Incropera & Dewitt, 2015).

$$q_{fh} = q_{fc} \dots\dots\dots(21)$$

Di mana

$$q_{fh} = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \\ = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \dots\dots\dots(22)$$

$$q_{fc} = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \\ = C_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \dots\dots\dots(23)$$

Nilai C_h dan C_c merupakan laju kapasitas panas yang ditentukan berdasarkan laju aliran massa dan panas spesifik masing-masing fluida. Nilai ditentukan dengan persamaan (Çengel dkk., 2019).

$$\dot{m} = \rho v A = \rho Q \dots\dots\dots(24)$$

Di mana Q adalah debit

$$Q = \frac{V}{s} \dots\dots\dots(25)$$

Efisiensi termal kondensor sangat diperlukan untuk menunjukkan kinerja kondensor sebagai alat penukar panas dalam suatu sistem. Nilai efisiensi termal pada penukar panas bergantung pada geometri dan juga aliran fluida dari alat penukar panas (Nandiati dkk., 2019) dan merupakan rasio antara laju perpindahan panas aktual terhadap laju perpindahan panas maksimum yang mungkin (Navarro & Cabezas-Gómez, 2007)

$$\eta = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{\text{actual heat transfer}}{\text{maximum possible heat transfer}} \dots\dots\dots(26)$$

Fluida dingin akan dipanaskan dan mengalami perubahan temperatur lebih besar apabila nilai $C_c < C_h$ sedangkan Nilai q_{max} ditentukan dengan persamaan (Incropera and Dewitt, 2015).

$$q_{max} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots(27)$$

Sebaliknya, $C_c > C_h$ apabila nilai q_{max} maka fluida panas akan didinginkan dan mengalami perubahan temperatur yang lebih besar, sedangkan nilai ditentukan dengan persamaan:

$$q_{max} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots(28)$$

Sehingga nilai q_{max} dapat dituliskan dengan persamaan

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots(29)$$

sehingga efisiensi termal kondensor dapat dituliskan menjadi

$$\eta = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \dots\dots\dots(30)$$

Daya guna dari kondensor dapat diketahui dengan menghitung efektivitas produksi kondensor dengan membandingkan massa air aktual dan massa air teoritis. Massa aktual merupakan massa air hasil desalinasi selama proses pengambilan data, sedangkan massa teoritis berupa massa air secara matematis sebagai nilai tujuan (Purwadianto & Sambada, 2015). Efektivitas kondensor dituliskan dengan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{\sum m_w \text{ aktual}}{\sum m_w \text{ teori}} \dots\dots\dots(31)$$

METODE

Pada penelitian ini, kondensor yang digunakan memiliki bentuk yang mengerucut sehingga uap air yang terbentuk di ruang penguapan *solar still* mudah untuk masuk ke dalam kondensor karena memiliki luas yang besar. Uap yang bergerak masuk ke dalam akan dipaksa menyentuh dinding kondensor karena luas penampang kondensor semakin lama semakin mengecil. Untuk memastikan peristiwa kondensasi tidak terjadi di dalam ruang penguapan, tetapi terjadi di dalam kondensor maka kaca penutup *solar still* menggunakan kaca 2 lapis untuk mengurangi panas terlepas ke lingkungan. Selain itu,

bentuk *solar* dibuat lebih rendah daripada *solar still* pada umumnya, tetapi tetap memiliki kemiringan untuk memastikan uap yang naik mendekati kaca penutup bergerak menuju

kondensor. Penelitian ini menggunakan bentuk *solar still* dan kondensor yang berbeda dengan bentuk *solar still* konvensional. Untuk melakukan pengukuran maka alat yang dipergunakan di dalam penelitian ini adalah:

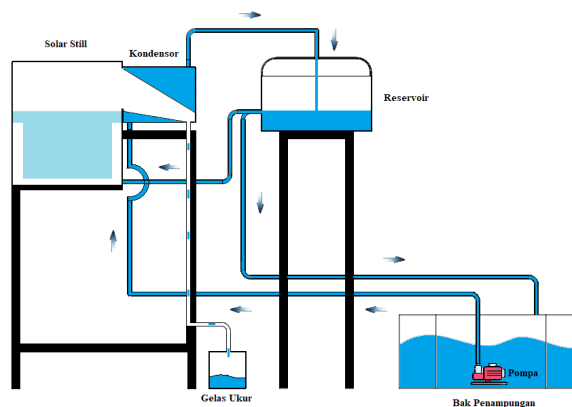
Tabel 1
Alat penelitian

Alat	Spesifikasi
Multimeter	Tegangan maksimum 1000 V AC/DC Arus maksimum 10 A Rentang suhu -40°C - 400°C Akurasi dasar 0,09 %
Solar power meter	Range intensitas cahaya 1-3999 W/m ²
Termometer digital	Range -50 ± 108 °C
Hygrometer digital	Temperatur range: -10 ± 50°C) Humidity range: 10% -99% RH
Hygrometer analog	Range <i>wet</i> : 0-50 °C Range <i>dry</i> : 0-50 °C
Lampu halogen	Daya max 2000 Watt

Solar still termasuk kondensornya dibuat dari plat alumunium dengan tebal 3 mm, sedangkan penutup kaca memiliki tebal 3 mm dan dipasang 2 lapis untuk mengurangi pengaruh lingkungan. Seluruh bagian luar *solar still* yang berbahan alumunium dilapisi dengan *styrofoam* 20 mm yang berfungsi sebagai insulator.

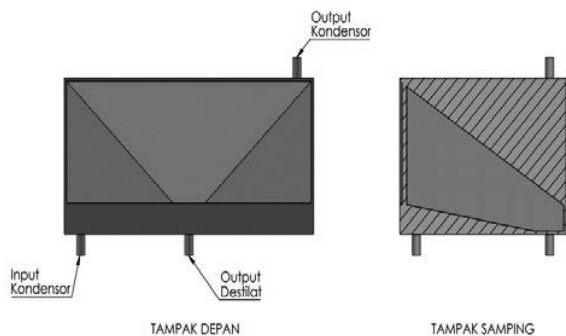
Jenis *solar still* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe terpadu. Dasar basin menggunakan material alumunium dengan panjang 300 mm, lebar 300 mm, dan tebal 1.6 mm. Pada bagian kondensor juga menggunakan material alumunium, penggunaan alumunium dipilih karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi dibandingkan menggunakan kaca dan plastik (Malaiyappan & Elumalai, 2015). Pada bagian penutup menggunakan kaca dengan tebal 3 mm karena nilai transmisivitas tinggi dan absorptivitas yang rendah dibanding kaca dengan ketebalan 5 mm dan 8 mm (Bara dkk., 2016). Di dasar basin terdapat pasir besi dengan ketinggian 15 mm dan terisi air laut 20 mm, penambahan pasir besi pada *solar*

still mampu meningkatkan efisiensi *solar still* sebesar 1,5% (Mugisidi dkk., 2020). Pelat alumunium dilapisi *styrofoam* sebagai isolator untuk meminimalkan kehilangan panas (Zeroual dkk., 2011). Pada beberapa titik di *solar still* terpadu diberikan sensor *thermocouple* untuk mengukur temperatur.



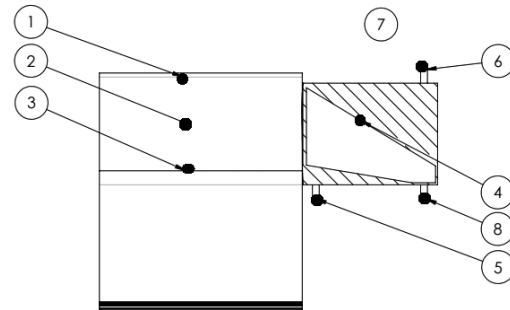
Gambar 1
Skema *solar still* terpadu

Gambar 1 menunjukkan skema *solar still* terpadu di mana air laut dari bak penampungan dialirkan dengan debit $0,000278 \text{ m}^3/\text{s}$ menuju ke kondensor yang terintegrasi dengan *solar still*. Air yang telah melewati kondensor dialirkan menuju ke *reservoir* melalui saluran *output* kondensor, *reservoir* berfungsi untuk menjaga ketinggian air di *solar still* agar konstan. Kemudian, air laut yang berada di *reservoir* mengalirkan air menuju ke dua tempat, yaitu ke *solar still* dan bak penampungan. Air laut yang berada di *solar still* akan dipanaskan. Penelitian ini dilakukan di dalam ruangan untuk mengurangi variabel yang mempengaruhi produktifitas *solar still* sehingga sumber panas menggunakan lampu halogen yang intensitas radiasinya diatur mengikuti intensitas matahari. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Energi, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA pada bulan Maret - Mei 2021.



Gambar 2
Kondensor

Kondensor diintegrasikan dengan *solar still* dengan bentuk seperti pada Gambar 2. Bentuk kondensor yang mengerucut akan memaksa uap air bersentuhan dengan dinding kondensor yang memiliki temperatur rendah. Dinding kondensor dibuat miring agar tetesan air hasil kondensasi mudah turun karena aksi gravitasi ke dasar kondensor (El-Bahi & Inan, 1999a) yang kemudian ditampung dan dialirkan ke tempat terpisah (Mohan dkk., 2019). Gambar 3 menunjukkan titik pengukuran.



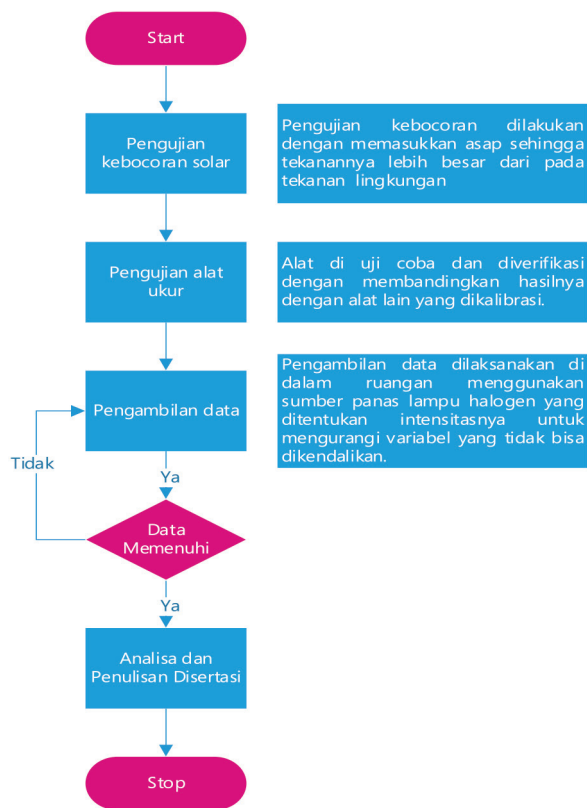
Gambar 3
Titik pengambilan data

Keterangan gambar:

1. : Temperatur permukaan kaca bagian dalam
2. : Temperatur evaporasi
3. : Temperatur permukaan air
4. : Temperatur kondensor
5. : Temperatur air masuk kondensor
6. : Temperatur air keluar kondensor
7. : Temperatur lingkungan
8. : Massa air hasil desalinasi

Sekeliling kondensor berisi air laut yang digunakan sebagai pendingin kondensor karena memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi sehingga laju perpindahan panas lebih cepat dibanding udara dengan nilai 0.6 W/m.K (Pranata dkk., 2019) dan digunakan sebagai air umpan *solar still*. Hasil pengukuran pada penelitian ini divalidasi secara teoritis (Fath & Elsherbiny, 1993; Dwivedi & Tiwari, 2009).

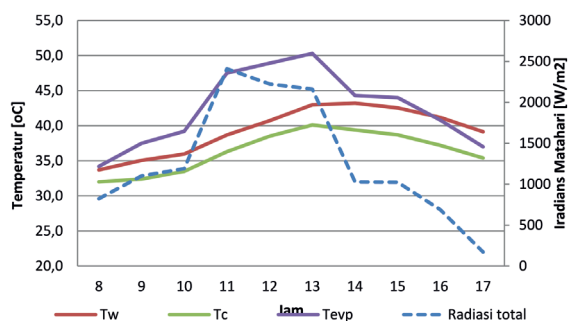
Penelitian ini dilaksanakan di dalam ruangan untuk mengurangi variabel yang tidak dapat dikendalikan seperti kecepatan angin dan perubahan intensitas radiasi matahari. Sumber panas menggunakan lampu halogen dengan intensitas matahari mengadopsi hasil penelitian Mugisidi tanggal 19 Agustus 2018 (Mugisidi dkk., 2019). Penelitian dilaksanakan sesuai tahapan pada Gambar 4.



Gambar 4 Tahapan penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter yang mempengaruhi air hasil desalinasi pada alat *solar still terpadu* adalah temperatur air (T_w), temperatur evaporasi (T_{evp}), temperatur kondensor (T_c), dan intensitas radiasi ($I(t)s$).

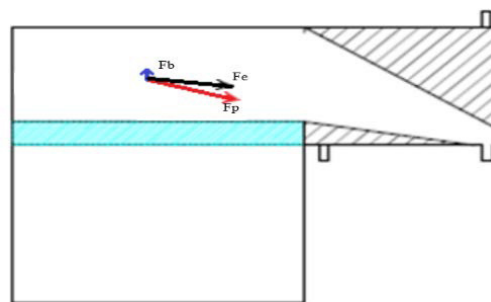


Gambar 5 Grafik temperatur *solar still*

Seperti di ditampilkan pada Gambar 5, temperatur evaporasi atau temperatur uap lebih

tinggi daripada temperatur air dan temperatur kondensor memiliki temperatur yang lebih tinggi dari kondensor dan temperatur air. Hasil ini sejalan dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa temperatur uap lebih tinggi dari pada temperatur air (Hansen dkk., 2015; Kumar dkk., 2016; Reddy & Sharon, 2016; Morad dkk., 2017; Ouar dkk., 2017; Sivaram dkk., 2021) sehingga membuat tekanan uap air lebih tinggi dari tekanan kondensor. Beda tekanan ini mendorong uap air bergerak menuju ke kondensor karena tekanan kondensor lebih rendah, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 6.

Gambar 6 menampilkan arah gaya uap air. F_b adalah gaya yang timbul karena adanya perbedaan berat jenis (*buoyancy*), sedangkan F_p adalah yang timbul akibat perbedaan tekanan antara tekanan uap air dengan tekanan lingkungan. Adanya gaya *buoyancy* dan gaya akibat perbedaan tekanan membuat uap bergerak sesuai arah resultan gaya F_e . Dapat dilihat arah gaya resultan F_e mengarah ke dinding kondensor. Pada saat uap air menyentuh dinding kondensor maka kondensasi akan terjadi.

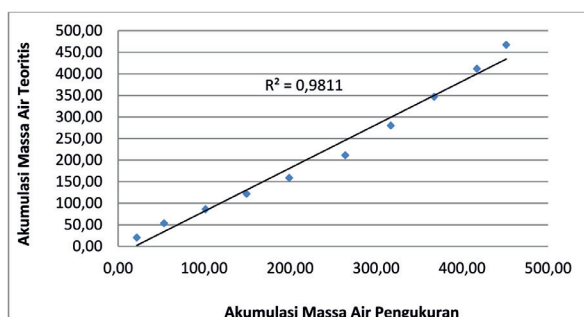


Gambar 6 Arah Gerakan uap air

Agar hasil air bersih dapat di buat pendekatannya secara teoritis maka perlu menentukan konstanta C dan n harus terlebih dahulu untuk menghitung bilangan Nusselt (Persamaan 11) dan Rayleigh (Persamaan 20). Bilangan Rayleigh dihasilkan dari perkalian antara bilangan Grashof dengan Prandtl dengan menggunakan persamaan (13) dan (14). Dengan menggunakan *power model* nilai Rayleigh dan Nusselt didapatkan nilai konstanta $C = 1,02365$ dan $n = 0,18927$ sehingga koefisien perpindahan

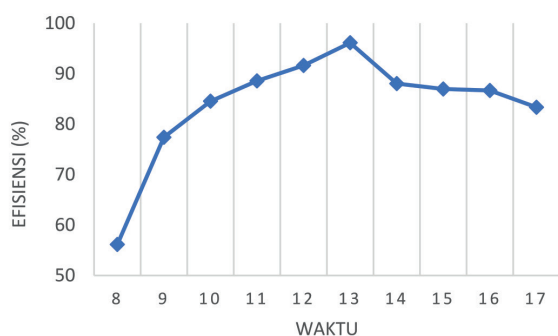
panas konveksi dapat ditentukan. Selanjutnya, mencari koefisien perpindahan panas evaporasi untuk menentukan massa air teoritis.

Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai C dan n menghasilkan massa air teoritis yang mendekati massa air hasil eksperimen dimana massa yang dihasilkan mencapai 451,32 gram, sedangkan secara teoritis mencapai 467,52 gram dan memiliki korelasi sebesar 0,9811 yang berarti nilai korelasinya sangat kuat (Rosyada dkk., 2015).



Gambar 7
Grafik massa air pengukuran dan massa air teoritis

Efisiensi termal maksimum pada kondensor sebesar 96,11% pada pukul 13.00 WIB dan efisiensi termal minimum sebesar 56,14% pada pukul 08.00 WIB dengan rata-rata efisiensi termal kondensor sebesar 83,94% sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8. Efisiensi termal di dalam solar still sangat dipengaruhi oleh temperatur uap sehingga tampak bahwa trend efisiensi thermal mengikuti temperatur uap.



Gambar 8.
Grafik efisiensi termal kondensor
Lebih jauh lagi, dengan melakukan studi teoritis dan eksperimental maka pengaruh

kondensor terhadap *solar still* dapat ditentukan. Seperti ditampilkan pada Tabel 2 total massa air teoritis 467,52 gram dan massa air aktual 451,31 gram sehingga diperoleh nilai efektivitas kondensor sebesar 96,4%. Meskipun kondensor sangat efektif untuk mengkondensasikan uap air yang terbentuk di dalam *solar still*, akan tetapi masih ada uap air yang mengalir keluar sebesar 3,6%.

Tabel 2
Massa air aktual dan massa air teoritis

$\sum m_w$ aktual (g)	$\sum m_w$ teoritis (g)	ϵ (%)
451,31	467,52	96,4 %

SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa efisiensi termal kondensor pada *solar still terpadu* sebesar 83,94% yang dipengaruhi oleh selisih temperatur dan laju kapasitas panas. Selain itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan kondensor dengan bentuk mengerucut sangat efektif karena 96,4% uap air yang dihasilkan pada ruang penguapan dapat dikondensasikan menjadi air bersih. Oleh karena itu, bentuk kondensor yang mengerucut dapat disarankan untuk dimanfaatkan pada penelitian desalinasasi yang menggunakan solar still. Meski demikian, masih terbuka ruang untuk perbaikan karena masih ada 3,6% yang hilang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengembangan Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka yang telah mendanai penelitian ini dengan nomor kontrak 215/F.03.07/2021.

DAFTAR PUSTAKA

Abdi Pranata, I. G., Dantes, K. R. Pasek Nugraha, I. N. (2019) 'Studi Komparasi Perbandingan Air Dan Udara Sebagai Media Pendingin Kondensor Terhadap Pencapaian Suhu Optimal Siklus Primer Pada Prototipe Water Chiller', *Jurnal*

- Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 7(1), p. 18. doi: 10.23887/jjtm.v7i1.18754.
- Abujazar, M. S. S, S. Fatihah, A.R. Rakmi, M.Z. Shahrom.(2016) 'The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review', *Desalination*. Elsevier B.V., 385, pp. 178-193. doi: 10.1016/j.desal.2016.02.025.
- Ahmed (1988) 'Study of Single Effect Solar Still With an Internal Condenser', 5(6), pp. 637-643.
- Ahmed, H. M. and Ibrahim, G. (2017) 'Thermal Performance of a Conventional Solar Still with a Built-in Passive Condenser: Experimental studies', *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 7(3), pp. 1-12.
- Al-Hamadani, A. and Shukla, S. (2013) 'Performance of single slope solar still with solar protected condenser', *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, 28(2), pp. 6-28. doi: 10.1080/21563306.2013.10677548.
- Bara, D. A., Gusnawati and Nurhayati (2016) 'Pengaruh Sudut Kaca Penutup dan Jenis Kaca terhadap Efisiensi Kolektor Surya pada Proses Destilasi Air Laut', *Lontar Jurnal Teknik Mesin Undana*, 03(02), pp. 01-10.
- Belhadj, M. M, H.Bouguettaï, Yacine Marif, Moussa Zerroukia. (2015) 'Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 94, pp. 245-252. doi: 10.1016/j.enconman.2015.01.069.
- Boutriaa, A. and Rahmani, A. (2017) 'Thermal modeling of a basin type solar still enhanced by a natural circulation loop', *Computers and Chemical Engineering*. Elsevier Ltd, 101, pp. 31-43. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.02.033.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. and Kanoğlu, M. (2019) *Thermodynamics: An Engineering Approach, Ninth Edition*.
- Combes, S. (2005) 'Protecting Freshwater Ecosystems in the Face of Global Climate Change', (Climate), pp. 117-216.
- Dwivedi, V. K. and Tiwari, G. N. (2009) 'Comparison of internal heat transfer coefficients in passive solar stills by different thermal models: An experimental validation', *DES*, 246, pp. 304-318. doi: 10.1016/j.desal.200.
- El-Bahi, A. and Inan, D. (1999a) 'A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser', *Desalination*, 123(1), pp. 79-83. doi: 10.1016/S0011-9164(99)00061-2.
- El-Bahi, A. and Inan, D. (1999b) 'Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser', *Renewable Energy*, 17(4), pp. 509-521. doi: 10.1016/S0960-1481(98)00768-X.
- El-Samadony, Y. A. F., Abdullah, A. S. and Omara, Z. M. (2015) 'Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser', *Experimental Heat Transfer*, 28(4), pp. 392-404. doi: 10.1080/08916152.2014.890964.
- Elango, C., Gunasekaran, N. and Sampathkumar, K. (2015) 'Thermal models of solar still - A comprehensive review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 47, pp. 856-911. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.054.
- Essa, F. A., Abd Elaziz, M. and Elsheikh, A. H. (2020) 'An enhanced productivity prediction model of active solar still using artificial neural network and Harris Hawks optimizer', *Applied Thermal Engineering*. Elsevier, 170(August 2019), p. 115020. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115020.
- Fath, H. E. S. and Elsherbiny, S. M. (1993) 'Effect of adding a passive condenser on solar still performance', *Energy*

- Conversion and Management*, 34(1), pp. 63–72. doi: 10.1016/0196-8904(93)90008-X.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P. and Below, R. (2013) 'Annual Disaster Stastical Review 2013', *Centre for Research on the Epidemiology of Disaasters*, pp. 1–50.
- G.N. Tiwari, Y.P. Yadav, P.C. Eames, B. Norton,. (1994) 'Solar distillation systems: The state-of-the-art in design development and performance analysis', *Renewable Energy*, 5(1–4), pp. 509–516. doi: 10.1016/0960-1481(94)90425-1.
- Guppy, L., Anderson, K., 2017. Water Crisis Report. United Nations University Institute for Water, Environment and Health, Hamilton, Canada.
- Hansen, R.S., Narayanan, C.S. and Murugavel, K. K. (2015) 'Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh', *Desalination*. Elsevier B.V., 358, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.desal.2014.12.006.
- Holman, J. P. (2010) *Heat Transfer*. Ten, McGraw-Hill. Ten. New York. doi: 10.1080/01973762.1999.9658510.
- Husham M. Ahmed (2012) 'Seasonal performance evaluation of solar stills connected to passive external condensers', *Scientific Research and Essays*, 7(13), pp. 1444–1460. doi: 10.5897/sre12.177.
- Incropera, F. and Dewitt, D. (2015) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th edn, John Wiley & Sons. 6th edn. Edited by M. Morgan. USA: John Willey & Sons. doi: 10.1007/978-3-319-15793-1_19.
- Jesiani, E. M., Apriansyah, A. and Adriat, R. (2019) 'Model Pendugaan Evaporasi dari Suhu Udara dan Kelembaban Udara Menggunakan Metode Regresi Linier Berganda di Kota Pontianak', *Prisma Fisika*, 7(1), p. 46. doi: 10.26418/pf.v7i1.32515.
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M. and Essa, F. A. (2014) 'Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 78, pp. 493–498. doi: 10.1016/j.enconman.2013.11.013.
- Kumar, R. A., Esakkimuthu, G. and Murugavel, K. K. (2016) 'Performance enhancement of a single basin single slope solar still using agitation effect and external condenser', *Desalination*. Elsevier B.V., 399, pp. 198–202. doi: 10.1016/j.desal.2016.09.006.
- Mahian, O. Ali Kianifar, Saeed Zeinali Heris, Dongsheng Wen, Ahmet Z. Sahin, Somchai Wongwises, (2017) 'Nanofluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger', *Nano Energy*, 36(April), pp. 134–155. doi: 10.1016/j.nanoen.2017.04.025.
- Malaiyappan, P. and Elumalai, N. (2015) 'Single basin and single slope solar still: Various basin material thermal research', *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 7(7), pp. 48–51.
- Mohan, I. Satyapal Yadav, Hitesh Panchal & Shivani Brahmhatt. (2019) 'A review on solar still: a simple desalination technology to obtain potable water', *International Journal of Ambient Energy*. Taylor & Francis, 40(3), pp. 335–342. doi: 10.1080/01430750.2017.1393776.
- Morad, M. M., El-Maghawry, H. A. M. and Wasfy, K. I. (2017) 'A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity', *Solar Energy*. Elsevier Ltd, 146, pp. 20–29. doi: 10.1016/j.solener.2017.02.002.
- Mugisidi, D. R.S Cahyani, O. Heryani, D. Agusman, Rifky. (2019) 'Effect of Iron Sand in Single Basin Solar Still: Experimental Study', *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

- Science*, 268(1). doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012158.
- Mugisidi, D. Berkah Fajar, Syaiful, Tony Utomo, Oktarina Heriyani, Delvis Agusman, Regita. (2020) 'Iron Sand as a Heat Absorber to Enhance Performance of a Single-Basin Solar Still', *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 70(1), pp. 125-135. doi: 10.37934/arfmts.70.1.125135.
- Mugisidi, D. Abdul Rahman, Oktarina Heriyani, Pancatutva Hesti Gunawan. (2021) 'DETERMINATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER CONSTANT (C AND N) IN A SOLAR STILL', *Teknosains*, 11(1), pp. 1-12. Available at: <https://jurnal.ugm.ac.id/teknosains>.
- Mugisidi, D. and Heriyani, O. (2018) 'Sea Water Characterization at Ujung Kulon Coastal Depth as Raw Water Source for Desalination and Potential Energy', in *The 2nd International Conference on Energy, Environmental and Information System (ICENIS 2017)*. doi: 10.1051/e3sconf/20183102005.
- Nandiati, S., Kirom, M. R. and Ajiwiguna, T. A. (2019) 'Evaluasi Kinerja pada Berbagai Variasi Susunan Heat Exchanger Menggunakan Metode LMTD dan NTU', 6(2), pp. 5058-5065.
- Navarro, H. A. and Cabezas-Gómez, L. C. (2007) 'Effectiveness-NTU Computation with A Mathematical Model for Cross-Flow Heat Exchangers', *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(4), pp. 509-521. doi: 10.1590/S0104-66322007000400005.
- Ouar, M. L. A. M.H. Sellami, S.E. Meddour, R. Touahir, S. Guemari, K. Loudiyi. (2017) 'Experimental yield analysis of groundwater solar desalination system using absorbent materials', *Groundwater for Sustainable Development*. Elsevier, 5(July 2016), pp. 261-267. doi: 10.1016/j.gsd.2017.08.001.
- Purwadianto, D. and Sambada, F. (2015) 'Efek Kapilaritas Absorber pada Unjuk Kerja Destilasi Air Energi Surya Jenis Vertikal', *Ilmiah widya teknik*, 14(1), pp. 54-57.
- Rahmani, A., Boutriaa, A. and Hadeif, A. (2015) 'An experimental approach to improve the basin type solar still using an integrated natural circulation loop', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 93, pp. 298-308. doi: 10.1016/j.enconman.2015.01.026.
- Ranjan, K. R., Kaushik, S. C. and Panwar, N. L. (2016) 'Energy and exergy analysis of passive solar distillation systems', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(2), pp. 211-221. doi: 10.1093/ijlct/ctt069.
- Rarindi, H., Priyono and Bagya, I. N. (2018) 'Merubah Air Laut Menjadi Air Tawar Dengan Desalinasi Tenaga', (September 2017).
- Reddy, K. S. and Sharon, H. (2016) 'Active multi-effect vertical solar still: Mathematical modeling, performance investigation and enviro-economic analyses', *Desalination*. Elsevier B.V., 395, pp. 99-120. doi: 10.1016/j.desal.2016.05.027.
- Refalo, P., Ghirlando, R. and Abela, S. (2016) 'The use of a solar chimney and condensers to enhance the productivity of a solar still', *Desalination and Water Treatment*, 57(48-49), pp. 23024-23037. doi: 10.1080/19443994.2015.1106096.
- Rosyada, M., Prasetyo, Y. and Haniah, H. (2015) 'Analisis Korelasi Suhu Permukaan Laut terhadap Curah Hujan dengan Metode Penginderaan Jauh Tahun 2021-2013', *Jurnal Geodesi Undip*, 4(1), pp. 85-94.
- Sharshir, S.W. A.H. Elsheikh, Guilong Peng, Nuo Yang, M.O.A. El-Samadony, A.E. Kabeel, (2017) 'Thermal

- performance and exergy analysis of solar stills - A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 73(June), pp. 521-544. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.156.
- Sharshir, S W. A.H. Elsheikh, Guilong Peng, Nuo Yang, M.O.A, El-Samadony, A.E. Kabeel.(2017) 'Thermal Performance and Exergy Analysis of Solar Stills - A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 73(December 2016), pp. 521-544. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.156.
- Siagian, S. (2015) 'Analysis Of Condensor Performance Analysis Of A Cooling System Using Freon R-134 A Based On A Cooling Fan Running Variation', II(124-130), p. 126.
- Sivaram, P. M. et.al. (2020) 'Experimental and numerical study of stepped solar still integrated with a passive external condenser and its application', *Environment, Development and Sustainability*. Springer Netherlands, (0123456789). doi: 10.1007/s10668-020-00667-4.
- Sivaram, P. M. et.al. (2021) 'Experimental and numerical study of stepped solar still integrated with a passive external condenser and its application', *Environment, Development and Sustainability*. Springer Netherlands, 23(2), pp. 2143-2171. doi: 10.1007/s10668-020-00667-4.
- Srithar, K. and Rajaseenivasan, T. (2018) 'Recent fresh water augmentation techniques in solar still and HDH desalination - A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 82(September 2017), pp. 629-644. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.056.
- Tabrizi, F. F., Dashtban, M. and Moghaddam, H. (2010) 'Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system', *Desalination*, 260(1), pp. 248-253. doi: 10.1016/j.desal.2010.03.033.
- Tiwari, A. K. and Tiwari, G. N. (2006) 'Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition', *Desalination*, 195(1-3), pp. 78-94. doi: 10.1016/j.desal.2005.11.014.
- Tiwari, G. N., Dimri, V. and Chel, A. (2009) 'Parametric study of an active and passive solar distillation system: Energy and exergy analysis', *Desalination*, 242(242), pp. 1-18. doi: 10.1016/j.desal.2009.05.014.
- Tiwari, G. N., Kupfermann, A. Aggarwal, S. (1997) 'A new design for a double-condensing chamber solar still', *Desalination*, 114(2), pp. 153-164. doi: 10.1016/S0011-9164(98)00007-1.
- Tiwari, G. N., Shukla, S. K. and Singh, I. P. (2003) 'Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature', *Desalination*, 154(2), pp. 171-185. doi: 10.1016/S0011-9164(03)80018-8.
- Youssef, P. G., Al-Dadah, R. K. Mahmoud, S. M. (2014) 'Comparative analysis of desalination technologies', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 61, pp. 2604-2607. doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.258.
- Zeroual, M. dkk. (2011) 'Experimental investigation on a double-slope solar still with partially cooled condenser in the region of Ouargla (Algeria)', *Energy Procedia*, 6, pp. 736-742. doi: 10.1016/j.egypro.2011.05.083.
- Zurigat, Y. H. Abu-Arabi, M. K. (2004) 'Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit', *Applied Thermal Engineering*, 24(7), pp. 1061-1072. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.11.010.