

**DESALINASI AIR LAUT MENGGUNAKAN *DIRECT SPRAY*
EVAPORATOR DAN *COOLING COIL CONDENSER* SKALA
LABORATORIUM**

Oleh:

Dr. Riana Ayu Kusumadewi, ST, MT

NIK: 3543/USAKTI

Februari 2026

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS ARSITEKTUR LANSKAP DAN TEKNOLOGI
LINGKUNGAN
UNIVERSITAS TRISAKTI**

LEMBAR PENGESAHAN

**DESALINASI AIR LAUT MENGGUNAKAN *DIRECT SPRAY*
EVAPORATOR DAN *COOLING COIL CONDENSER* SKALA
LABORATORIUM**

Jakarta, 27 Februari 2026

DRPMF FALTL



Dr. Tazkiaturrizki, ST, MT

NIK: 3279/USAKTI

Penulis



Dr. Riana Ayu Kusumadewi, ST, MT

NIK: 3543/USAKTI

Dekan

Fakultas Arsitektur Lanskap dan Teknologi Lingkungan



Dr. Ir. Silia Yuslim, MT

NIK: 1961/USAKTI

KATA PENGANTAR

Makalah ini merupakan suatu kajian dalam bidang pengolahan air laut menjadi air bersih yang bertujuan untuk memperoleh gambaran yang jelas dan terukur mengenai kinerja dari *direct spray evaporator* dan *cooling coil condenser* yang digunakan pada skala laboratorium dengan meninjau kuantitas dan kualitas air umpan, air distilat yang dihasilkan, dan *brine* sisa proses desalinasi.

Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum yang lebih mudah dalam pengambilan keputusan mengenai kondisi optimum yang dibutuhkan dalam operasional alat desalinasi air laut dengan proses distilasi, guna pencapaian efisiensi penyisihan garam dalam air laut sehingga air distilat yang dihasilkan memenuhi persyaratan kualitas air bersih dan air minum sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan RI yang berlaku.

Penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran, maupun diskusi konstruktif sebagai perbaikan dan peningkatan mutu makalah ini. Demikian kajian ini kami susun, semoga dapat bermanfaat baik dalam bidang air minum, maupun sebagai masukan dalam pendidikan dan pengajaran.

Jakarta, 26 Februari 2026

Dr. Riana Ayu Kusumadewi, ST, MT

ABSTRAK

Keterbatasan akses air bersih di wilayah pesisir Indonesia serta tingginya salinitas air laut menuntut pengembangan teknologi desalinasi yang lebih kompak, efisien, dan berbiaya lebih rendah untuk menghasilkan air layak konsumsi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem desalinasi skala laboratorium yang mengintegrasikan *direct spray evaporator* dan *cooling coil condenser* dalam mengolah *tap water*, air laut artifisial, dan air laut asli sehingga dihasilkan air distilat yang memenuhi baku mutu kualitas air bersih dan air minum. Metodologi meliputi perancangan dan pengoperasian unit desalinasi di bawah kondisi vakum dengan variasi temperatur air umpan ($50\text{--}80^\circ\text{C}$), laju alir air umpan ($0,4\text{--}0,6$ L/menit), tekanan vakum ($-0,4$ sampai $-0,6$ bar), dan temperatur air pendingin ($25\text{--}29^\circ\text{C}$), disertai analisis kuantitas distilat serta kualitas air umpan, air distilat, dan *brine* berdasarkan pH, konduktivitas, TDS, dan salinitas. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan temperatur air umpan, penguatan vakum, dan kenaikan laju alir hingga $0,6$ L/menit, secara signifikan meningkatkan volume air distilat, sementara salinitas umpan yang lebih tinggi menurunkan produktivitas; kondisi operasi optimum diperoleh pada temperatur air umpan 80°C , laju alir $0,6$ L/menit, tekanan vakum $-0,6$ bar, dan temperatur air pendingin 29°C , dimana kualitas air distilat memenuhi standar air bersih (Permenkes No. 32/2017) dan, untuk air laut artifisial dan air laut pada temperatur tinggi, memenuhi standar air minum (Permenkes No. 2/2023). Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa sistem *direct spray evaporator–cooling coil condenser* mampu menghasilkan air distilat dengan kuantitas dan kualitas yang memadai pada kondisi optimum tersebut, sehingga signifikan untuk dikembangkan lebih lanjut, terutama bila dipadukan dengan energi surya, sebagai solusi desalinasi yang ramah lingkungan dan aplikatif bagi masyarakat pesisir dan daerah terpencil di Indonesia.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Maksud dan Tujuan	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Karakteristik Air Laut	3
2.2 Desalinasi Air Laut	4
2.3 Evaporasi dan Kondensasi	4
2.4 <i>Direct Spray Evaporator</i>	6
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	8
3.1 Tahapan Penelitian	8
3.2 <i>Experimental Setup</i>	9
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	11
4.1 Pengaruh Temperatur Air Umpan terhadap Volume Air Distilat	11
4.2 Pengaruh Laju Alir Air Umpan terhadap Volume Air Distilat	13
4.3 Pengaruh Temperatur <i>Cooling Water</i> terhadap Volume Air Distilat	15
4.4 Pengaruh Tekanan Vakum terhadap Volume Air Distilat	16
4.5 Pengaruh Jenis Air Umpan terhadap Volume Air Distilat	17
4.6 Analisis Termal pada <i>Direct Spray Evaporator</i>	18
4.7 Analisis Kualitas Air Umpan, Air Distilat, dan <i>Brine</i>	19
BAB V KESIMPULAN	22
DAFTAR PUSTAKA	23

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selama beberapa tahun terakhir, isu ketersediaan air bersih telah menjadi salah satu tantangan paling mendasar di berbagai wilayah di dunia. Air minum yang aman sangat penting dalam berbagai sektor seperti pertanian, domestik, dan industri, terutama di daerah gersang dan terpencil (Shoeibi, Saemian, Khiadani, Kargarsharifabad, & Ali Agha Mirjalily, 2023). Kesulitan akses air bersih di Indonesia umumnya terjadi di wilayah pesisir. Jumlah desa pesisir di seluruh Indonesia mencapai 12.827 desa. Dari jumlah tersebut, desa yang sudah mendapatkan akses air bersih hanya sebesar 66,54% (Susilawaty, Amansyah, & Nildawati, 2016).

Desalinasi air laut merupakan salah satu teknologi untuk memenuhi permintaan air bersih yang terus meningkat (Khalilmoghadam, Rajabi-Ghahnavieh, & Shafii, 2021). Untuk menghadirkan proses desalinasi ke tempat-tempat terpencil, telah dilakukan upaya signifikan untuk menciptakan perangkat desalinasi tenaga surya (Anand et al., 2021; Omar, Nashed, Li, Leslie, & Taylor, 2020). Penerapan sistem desalinasi tenaga surya ini terbatas karena investasi awal yang mahal yang dibutuhkan untuk ladang surya dan unit desalinasi. Oleh karena itu, ada kebutuhan signifikan untuk menciptakan metode desalinasi tenaga surya yang hemat biaya. Selama beberapa dekade terakhir, berbagai teknologi desalinasi yang dapat dikombinasikan dengan energi surya telah dikembangkan. Ini termasuk desalinasi humidifikasi-dehumidifikasi (HDH), distilasi membran (MD), dan *direct contact-spray desalination* (Qian Chen, Burhan, M, Li, & Ng, 2021).

Teknologi *direct-contact spray-assisted evaporation and condensation* (DCSEC) memiliki kapasitas untuk meringankan tantangan operasional yang dihadapi oleh sistem desalinasi saat ini (Q. Chen, Kum, & Chua, 2018). Penggunaan langsung air laut yang dipanaskan dari luar (biasanya mencapai temperatur hingga 65°C selama tahap *brine* bagian atas) menawarkan dua manfaat yang jelas: Pertama, biaya desain awal bejana evaporator dan kondensor berkurang secara signifikan. Pengurangan ini biasanya diukur dalam satuan meter kubik distilat yang dihasilkan per hari, dan CAPEX mungkin kurang dari US\$700/m³ per hari. Selanjutnya, penyemprotan *brine* ke dalam kompartemen kosong di setiap tahap secara efektif mengurangi pembentukan kerak dengan memastikan bahwa area yang kekurangan kelembapan di dalam ruang tersebut seminimal mungkin (R. Alrowais et al., 2020).

El-Agouz (El-Agouz, Abd El-Aziz, & Awad, 2014) melakukan studi eksperimental untuk

mengevaluasi efisiensi alat *spray desalination* bertenaga surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produktivitas, efisiensi, tingkat produktivitas, dan rasio output yang diperoleh dari unit desalinasi sangat dipengaruhi oleh temperatur air panas masuk dan laju alirannya. Produktivitas harian maksimum dalam batas yang diamati adalah 9 L/m². Chen et al. (Q Chen et al., 2016) mensimulasikan proses penguapan tetesan dalam *spray evaporator* ke bawah. Temuan utama menunjukkan bahwa tetesan yang lebih kecil menyebabkan proses penguapan yang lebih cepat, sedangkan kecepatan awal tetesan yang lebih tinggi meningkatkan produktivitas air.

Pada makalah ini, dipaparkan analisis kinerja *direct contact spray evaporator* dan *cooling coil condenser* yang dirancang secara kompak untuk menghasilkan air distilat secara efisien. Evaporator beroperasi di bawah kondisi vakum untuk meningkatkan laju penguapan. Analisis keseimbangan panas dan massa dalam sistem dilakukan. Produktivitas air distilat diukur dengan memvariasikan laju aliran air umpan, temperatur air umpan, tekanan vakum, dan temperatur air pendingin.

1.2 Maksud dan Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji kinerja dari alat desalinasi yang terdiri dari *direct spray evaporator* dan *cooling coil condenser* dalam mengolah air laut menjadi air distilat yang memenuhi baku mutu kualitas air bersih dan air minum.

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah:

- Mengevaluasi kondisi operasional yang optimum dari *direct spray evaporator* dan *cooling coil condenser* dengan memvariasikan temperatur air umpan, laju alir air umpan, tekanan vakum, dan temperatur air pendingin.
- Menganalisis pengaruh jenis air umpan, yaitu *tap water*, air laut artifisial, dan air laut asli terhadap kuantitas dan kualitas air distilat yang dihasilkan,
- Menganalisis kuantitas dan kualitas air umpan, air distilat, dan *brine* dari alat desalinasi air laut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Air Laut

Air laut merupakan air yang mengandung 3,5% garam- garaman, gas-gas, bahan-bahan organik, dan partikel-partikel tak terlarut. Dalam 1000 gram air laut, 96,5% berupa air murni dan 3,5% merupakan zat terlarut. Ini artinya, terdapat 35 gram senyawa terlarut dalam setiap 1000 gram air laut. Senyawa- senyawa terlarut ini disebut dengan garam. Konsentrasi rata - rata seluruh garam yang terlarut dalam air laut disebut dengan salinitas. Keberadaan garam-garaman ini mempengaruhi sifat fisis air laut, seperti densitas, kompresibilitas, titik beku, dan temperatur dimana densitasnya menjadi maksimum. Dua sifat yang dipengaruhi oleh jumlah garam di laut (salinitas) adalah daya hantar listrik (konduktivitas) dan tekanan osmosis (Adriani, 2020).

Air laut merupakan campuran dari 96,5% air murni dan 3,5% material lainnya seperti garam-garaman, gas-gas terlarut, bahan - bahan organik, dan partikel-partikel tak terlarut (Safitri, 2011). Garam- garaman utama yang terdapat dalam air laut adalah klorida (55%), natrium (31%), sulfat (8%), magnesium (4%), kalsium (1%), potassium (1%), dan sisanya terdiri dari bikarbonat, bromide, asam borat, strontium dan fluorida. Kandungan garam yang terbanyak dalam air laut adalah NaCl dengan ion Cl^- terlarut rata - rata 55% dari jumlah garam. Komposisi ion garam dalam air laut yang salinitasnya 35‰ diperlihatkan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Komposisi Ion Garam dalam Air Laut

Ion	g/kg
Cl^-	19,354
SO_4^{2-}	2,712
Br^-	0,0673
F^-	0,0013
B	0,0045
Na^+	10,77
Mg^{2+}	1,8651
Ca^{2+}	0,4121
K^+	0,3990
Sr^{2+}	0,0079

Sumber: (Safitri, 2011)

Perbedaan salinitas pada air laut terjadi karena perbedaan dalam penguapan dan presipitasi (Prastuti, 2017). Salinitas laut di daerah tropik lebih tinggi karena evaporasi lebih tinggi, sedangkan pada lautan di daerah beriklim sedang salinitasnya lebih rendah karena evaporasi

lebih rendah, di daerah pantai dan laut yang tertutup sebagian, salinitasnya lebih bervariasi dan memungkinkan mendekati 0 dimana sungai – sungai besar mengalirkan air tawar, sedangkan di Laut Merah dan Teluk Persia salinitasnya hampir 40%. Klasifikasi air alami berdasarkan kandungan TDS, DHL, dan kloridanya dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Klasifikasi Tingkat Keasinan Air

Tipe Air	TDS (mg/L)	DHL (mmhos/cm)	Cl ⁻ (mg/L)
Tawar	0 - 1000	<1500	<500
Agak Payau	1000 - 3000	1500 - 5000	500 - 2000
Payau	3000 - 10.000	5000 - 15.000	2000 - 5000
Asin	10.000 - 35.000	15.000 - 50.000	5000 - 19.000
Brine	>35.000	>50.000	>19.000

Sumber: (Safitri, 2011)

2.2 Desalinasi Air Laut

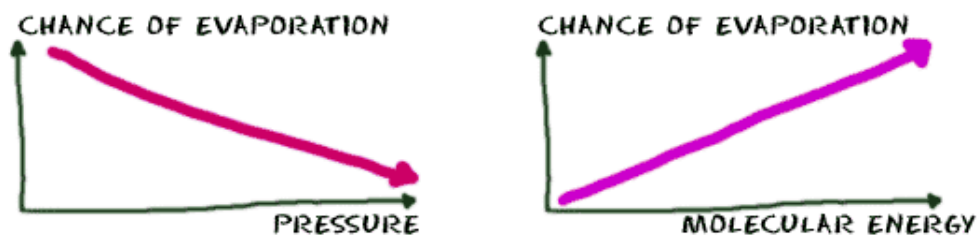
Desalinasi adalah suatu proses pemisahan untuk menghilangkan kadar garam berlebih pada air laut. Desalinasi merupakan sebuah proses untuk membuat air tawar dari air laut. Pada proses desalinasi akan dihasilkan produk utama berupa air tawar dan produk sampingan berupa garam (Dewantara, Suyitno, & Lesmana, 2018). Ada dua tipe desalinasi yang umum digunakan yaitu desalinasi dengan perubahan fase dan desalinasi dengan membran. Desalinasi dengan perubahan fase dapat dibagi lagi menjadi beberapa sub kategori seperti *multi-stage flash* (MSF) dengan prinsip kerja pemanasan aliran air secara bertahap dan *multi-effect distillation* (MED) dengan prinsip kerja penyemprotkan air pada evaporator. Sementara, sub kategori untuk desalinasi dengan membran adalah *Reverse Osmosis* dengan prinsip kerja pemisahan oleh dinding semi *permeable* (Abdulloh, 2015).

2.3 Evaporasi dan Kondensasi

Liquid dengan titik didih tinggi (liquid yang mendidih pada temperatur sangat tinggi) cenderung menguap lebih lambat dibandingkan liquid dengan temperatur didih lebih rendah. Kecepatan penguapan bergantung pada sejumlah permukaan yang terbuka, kelembaban udara, dan suhu. Penguapan (evaporasi) terjadi dikarenakan diantara molekul - molekul yang dekat dengan permukaan zat cair tersebut selalu terdapat cukup energi panas untuk mengatasi gaya kohesi sesama molekul kemudian melepaskan. Pada permukaan, beberapa partikel dapat melepaskan diri ke udara, sementara yang lain tidak memiliki cukup energi untuk melepaskan diri dan tetap dalam liquid. Ketika partikel berenergi tinggi melepaskan diri, energi rata - rata partikel yang tersisa lebih kecil sehingga liquid dingin. Liquid yang dingin kemudian mendinginkan permukaan dimana partikel - partikel tersebut beristirahat. Ini disebut evaporasi

pendinginan. Evaporasi adalah proses liquid beralih ke gas melalui mekanisme berikut (Kryukov & Levashov, 2011):

- Molekul - molekul bergerak sangat cepat (dengan energi kinetik sangat tinggi) pada permukaan liquid sehingga molekul - molekul tersebut memiliki cukup energi untuk memutuskan ikatan tarik - menarik dengan molekul lain. Molekul - molekul tersebut kemudian terlepas dari permukaan substansi. Jelas ini hanya terjadi dengan molekul - molekul pada permukaan substansi.
- Saat temperatur sangat tinggi, molekul memiliki energi kinetik berlebih, sebagian besar dari molekul tersebut cenderung untuk melepaskan diri, sehingga evaporasi terjadi lebih cepat pada temperatur yang lebih tinggi.
- Secara umum, evaporasi terjadi karena sistem mencari kesetimbangan (ada suatu konsentrasi rendah dari molekul di udara dan konsentrasi tinggi dalam liquid).



Gambar 2. 1 Hubungan mekanisme evaporasi dengan tekanan dan energi molekuler

Sumber: (Semenov, Starov, Rubio, Agogo, & Velarde, 2011)

Temperatur pengembunan berubah sejalan dengan tekanan uap. Oleh karena itu temperatur pengembunan didefinisikan sebagai temperatur pada kondisi jenuh yang dicapai bila udara didinginkan pada tekanan tetap tanpa penambahan kelembaban. Untuk menghasilkan pengembunan dilakukan dua cara, yaitu (Rose, 2004):

- Menurunkan temperatur sehingga mereduksi kapasitas dari uap air.
- Menambah jumlah uap air.

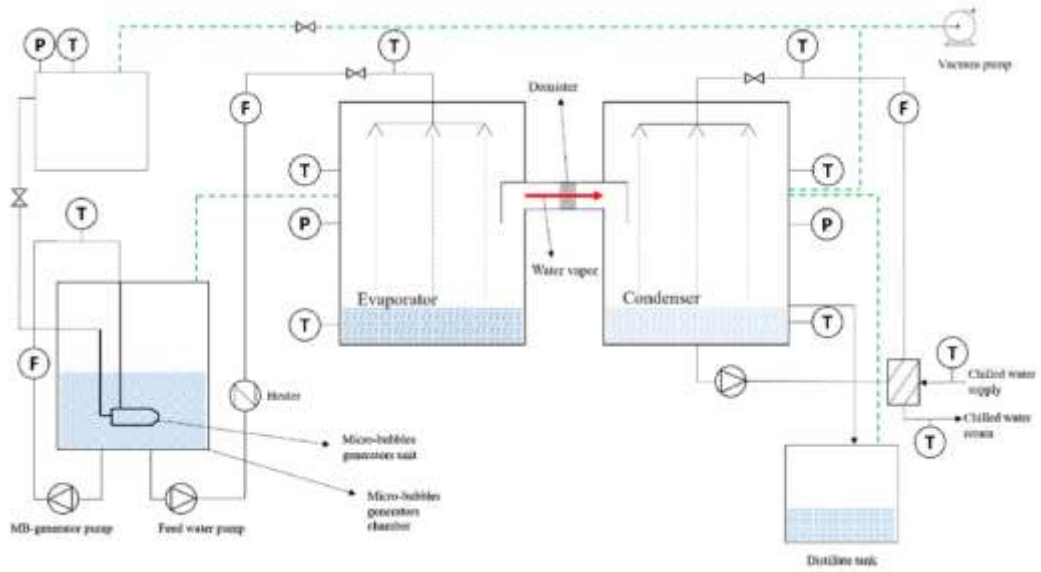
Gas dapat berubah menjadi cair dengan menurunkan temperaturnya atau meningkatkan tekanan. Umumnya, pendekatan yang digunakan adalah dengan menurunkan temperatur, sedangkan dengan meningkatkan tekanan gas lebih mahal (Rose, 2004). Jika gas polutan yang panas berkontak dengan media pendingin (air atau udara), maka terjadi transfer panas dari gas panas ke medium pendingin, temperatur uap gas akan turun, maka energi kinetik molekul gas akan berkurang sehingga molekul - molekul gas akan bergerak saling berdekatan (Gaya van der Waals) yang akan menyebabkan gas terkondensasi menjadi liquid. Kondisi aktual dimana

molekul gas akan terkondensasi tergantung pada sifat fisik dan kimia dari molekul gas tersebut mencapai (sama dengan) tekanan uapnya. Ada tiga cara untuk menurunkan tekanan uap parsial gas, yaitu: (1) dengan cara meningkatkan tekanan uap gas, (2) gas didinginkan sampai tekanan parsial gas tersebut mencapai tekanan uapnya, (3) gabungan kedua cara tersebut, yaitu dengan cara meningkatkan tekanan gas dan mendinginkannya (Lukita, Hermana, & Boedisantoso, 2015).

2.4 Direct Spray Evaporator

Metodologi *direct-contact spray-assisted evaporation and condensation* (DCSEC) berpotensi untuk mengurangi masalah operasional yang dihadapi oleh sistem desalinasi yang ada. Karena tidak menggunakan tabung di dalam bejana, *direct spray* air laut yang dipanaskan secara eksternal (biasanya hingga 65°C pada tahap *brine* atas) memiliki dua keuntungan yang berbeda: Pertama, biaya desain awal bejana evaporator dan kondensor sangat berkurang, biasanya dalam hal meter kubik distilat per hari, biaya modalnya bisa kurang dari US\$700/m³ per hari. Kedua, semprotan *brine* ke dalam ruang kosong di setiap tahap dapat mengurangi pembentukan kerak karena relatif tidak ada titik kering di dalam ruang tersebut. Akibatnya, penurunan tekanan langsung *brine* cair di nosel menghasilkan pembentukan tetesan cairan. Entalpi air berlebih yang dimiliki tetesan, saat keluar dari *nozzles*, akan menghasilkan fenomena “penguapan kilat”, yaitu uap air menguap dari permukaan tetesan cairan, mengurangi diameternya saat tetesan bergerak menuruni jalur lintasan. Uap yang dihasilkan di evaporator kemudian bermigrasi ke ruang kondensor yang berdekatan. Karena diatur pada temperatur uap beberapa derajat lebih rendah di dalam setiap pasangan evaporator ke kondensor, gradien temperatur yang menguntungkan, uap mengembun pada permukaan yang lebih dingin dari tetesan distilat atau air minum yang diambil dari tahap yang lebih rendah berikutnya (Qian Chen & Chua, 2018).

Parameter penting yang mengatur metode *direct contact spray evaporation and condensation* (DCSEC) untuk desalinasi air laut menunjukkan perlunya desain optimal dari (i) perbedaan temperatur antara temperatur air umpan dan ruang penguapan, (ii) umpan air laut ke evaporator dan air tawar ke kondensor, (iii) ukuran tetesan air untuk proses penguapan. Namun, semua laju penguapan yang dilaporkan dalam literatur relatif rendah dibandingkan dengan laju aliran air umpan (Raid Alrowais et al., 2020).



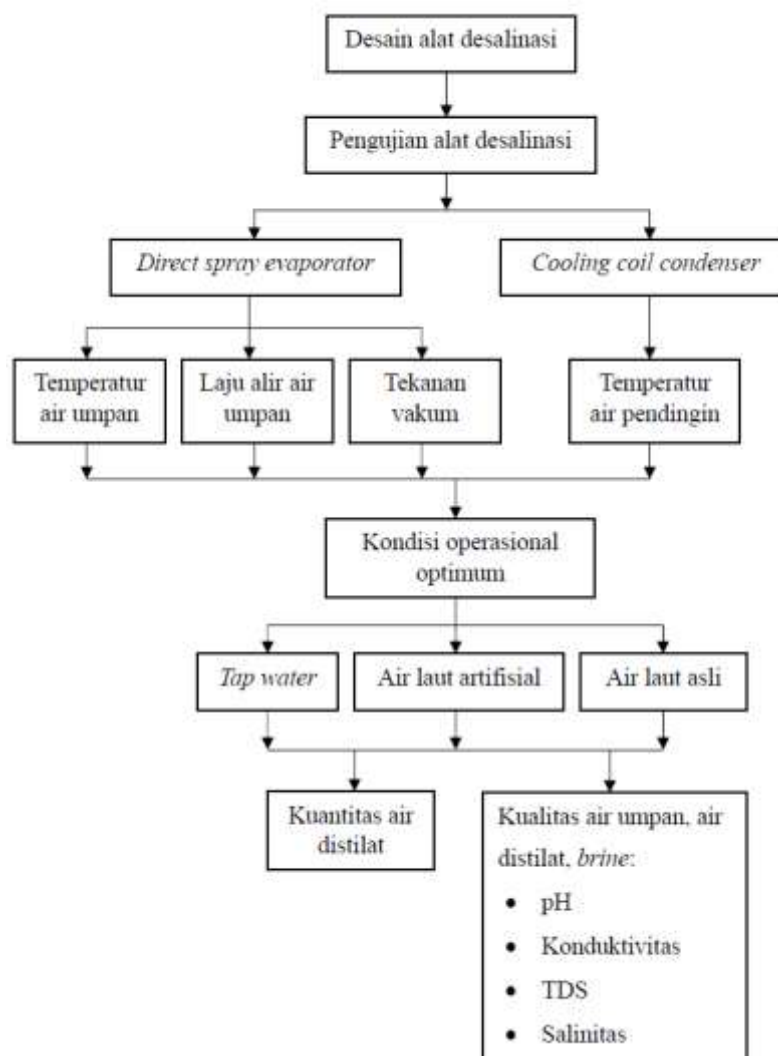
Gambar 2.2 Diagram skematis percobaan *direct contact spray evaporation and condensation* (DCSEC). Simbol F, T, dan P masing-masing mengacu pada sensor laju aliran, temperatur, dan tekanan.

Sumber: (Raid Alrowais et al., 2020)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan desain alat desalinasi yang mengintegrasikan *direct spray evaporator* dan *cooling coil condenser* dalam satu reactor. Kemudian dilakukan pengujian alat desalinasi dengan menggunakan *heater* sebagai sumber panas untuk meningkatkan temperatur air umpan. Variasi yang digunakan untuk memperoleh kondisi operasional yang optimum diantaranya temperatur air umpan, laju alir air umpan, tekanan vakum, dan temperatur air pendingin. Setelah diperoleh kondisi optimum, kemudian dilakukan pengujian alat desalinasi dengan menggunakan *tap water*, air laut artifisial, dan air laut asli. Tahap selanjutnya adalah analisis kuantitas air distilat dan kualitas air umpan, air distilat, dan *brine*. Kualitas air umpan, air distilat, dan *brine* yang diuji diantaranya pH, konduktivitas, *total dissolved solid* (TDS), dan salinitas.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Experimental Setup

Untuk mengetahui kondisi operasi optimum dari *direct spray evaporator*, dilakukan pengujian pada evaporator menggunakan *heater* sebagai sumber panasnya. Variasi yang digunakan pada pengujian ini diantaranya temperatur air umpan, laju alir air umpan, temperatur *cooling water*, dan tekanan vakum. Setiap variasi pengujian dari *direct spray evaporator* dilakukan secara duplo. Variasi kondisi operasi pada pengujian alat desalinasi ditampilkan pada Tabel 3.1.

Jenis air umpan yang digunakan adalah *tap water*, air garam, dan air laut. *Tap water* diperoleh dari kran yang terdapat di Laboratorium Perpindahan Panas, Departemen Teknik Mesin, Gedung MRC Lt. 6, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Air garam dibuat dengan mencampurkan garam dapur dan aquadest 50 L sehingga diperoleh air umpan dengan konduktivitas 38.400 $\mu\text{S/cm}$. Air laut diperoleh dari inlet *Seawater Reverse Osmosis* (SWRO) Ancol, Pademangan, Jakarta, Indonesia.

Tabel 3. 1 Variasi pada Pengujian *Direct Spray Evaporator* dan *Cooling Coil Condenser*

No.	Parameter	Variasi
1.	Temperatur air umpan	50, 55, dan 60°C
2.	Laju alir air umpan	0,4; 0,5; dan 0,6 L/menit
3.	Temperatur <i>cooling water</i>	25, 27, dan 29°C
4.	Tekanan vakum	-0,4; -0,5; dan -0,6 bar

Air umpan dari tangki air umpan akan meningkat temperaturnya dengan penggunaan *heater* pada bagian bawah tangki. *Heater* yang digunakan sebanyak satu buah dengan spesifikasi: *Heater* Chromalox 240 V, 5 kW, nepel 1. Air umpan panas dari tangki air akan mengalir melalui pompa air, masuk ke dalam *direct spray evaporator* melalui *springkler nozzle* berukuran $\frac{1}{2}$ inch. Evaporator berada dalam kondisi vakum menggunakan pompa vakum dan terdapat *pressure gauge* untuk melihat tekanan di dalam evaporator. Sebagian air umpan akan menguap dan uap air akan masuk ke dalam kondensor yang terletak di bagian atas dari evaporator. Uap air akan kontak dengan *coil condenser* yang berisi *cooling water* dari *circulating thermostatic bath* (CTB). Setelah itu, uap air akan terkondensasi membentuk kondensat (air distilat). Kuantitas air distilat yang dihasilkan diukur pada setiap pengujian. Sementara air umpan yang tidak menguap (*brine*) diresirkulasikan kembali ke dalam tangki air. Resirkulasi *brine* ini dilakukan setiap 30 menit sekali agar *brine* tidak meluap ke bagian kondensor. Air distilat, air umpan, dan *brine* dari setiap eksperimen diuji kualitasnya berdasarkan parameter fisik dan

kimia: pH, konduktivitas, TDS, salinitas, dan DOC. Pengukuran temperatur menggunakan *National Instrument* (NI) dilakukan pada beberapa titik pengukuran, yaitu: (1) temperatur air umpan, (2) temperatur uap air, (3) temperatur *brine*, (4) temperatur *cooling water inlet*, dan (5) temperatur *cooling water outlet*. Susunan eksperimen *direct spray evaporator* ditampilkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Susunan Eksperimen *Direct Spray Evaporator* dan *Cooling Coil Condenser* Skala Laboratorium

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Temperatur Air Umpan terhadap Volume Air Distilat

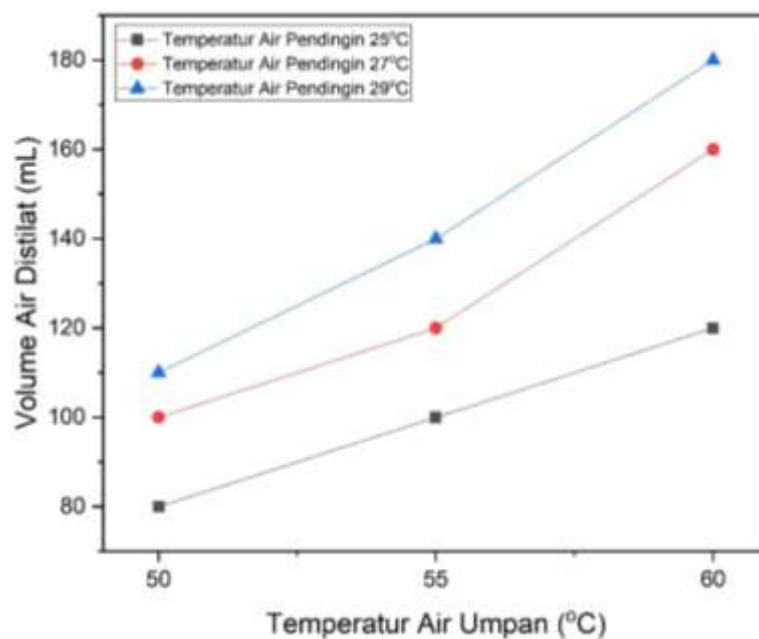
Pada sistem desalinasi dengan proses distilasi, air distilat dihasilkan melalui proses evaporasi dan kondensasi. Berdasarkan data yang diberikan, terdapat hubungan antara temperatur air umpan dengan volume air distilat yang dihasilkan. Hubungan ini dapat dianalisis menggunakan konsep laju perpindahan panas (*heat transfer rate*) yang terlibat dalam proses evaporasi dan kondensasi. Pengaruh temperatur air umpan terhadap volume air distilat disajikan pada Gambar 4.1.

Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa pada peningkatan temperatur air umpan dari 50°C ke 80°C untuk air bersih, air laut artifisial, dan air laut, terjadi peningkatan volume air distilat yang dihasilkan. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur air umpan, semakin besar jumlah air yang menguap dan kemudian terkondensasi menjadi air distilat. Distilasi melibatkan pemanasan air umpan hingga mendidih atau menguap. Pada temperatur yang lebih tinggi, sebagian besar molekul air di permukaan memiliki energi kinetik yang cukup untuk mengatasi gaya antarmolekul, sehingga menghasilkan penguapan yang lebih cepat (Shojaei, Nosrati, Attarnejad, & Saghafian, 2020). Laju penguapan berhubungan langsung dengan perbedaan antara tekanan uap di permukaan air (yang meningkat seiring dengan temperatur) dan tekanan parsial uap air di udara sekitar atau vakum. Saat temperatur air umpan meingkat, perbedaan ini melebar, sehingga mempercepat produksi uap (Al-Shammiri, 2002).

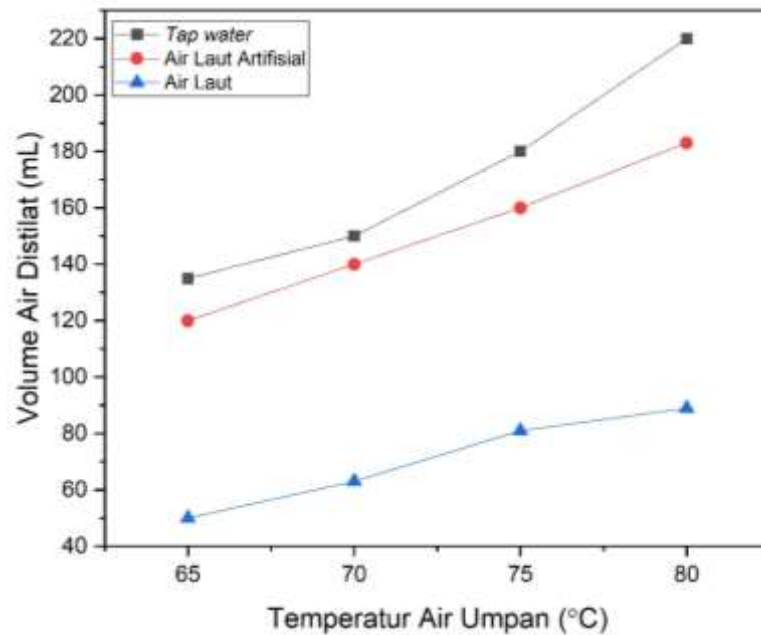
Untuk mengubah air menjadi uap, energi harus disuplai dalam bentuk panas laten. Semakin tinggi temperatur, semakin efisien energi ini digunakan, dan semakin banyak uap yang dihasilkan per satuan waktu (Hadi, Permadi, Syamsuddin, & Zufar, 2024). Temperatur air umpan yang lebih tinggi mempercepat laju penguapan secara eksponensial karena panas laten penguapan ($Q = m \cdot L$) dimana Q adalah total energi panas yang disuplai (Joule), m adalah massa air yang diuapkan (kg), dan L adalah panas laten penguapan (jumlah panas yang dibutuhkan untuk mengkonversi 1 kg air dari liquid menjadi uap tanpa mengubah temperaturnya, biasanya sebesar 2260 kJ/kg untuk air pada 100°C). Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Sayuti, Mugisidi, Wirangga, & Heriyani, 2023) bahwa menaikkan temperatur air umpan dari 60°C ke 70°C meningkatkan penguapan hingga 33%, sehingga menghasilkan lebih banyak uap, yang membawa energi termal lebih besar ke tahap kondensasi.

Untuk menguapkan air, panas yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan kalor. Laju aliran massa air yang akan dipanaskan adalah \dot{m} (kg/det) dan perubahan temperatur yang terjadi adalah ΔT (K), maka laju aliran panas \dot{Q} (Joule) dapat dihitung dengan persamaan $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$. Dengan asumsi kapasitas panas spesifik air (c) adalah sekitar $4,18 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, energi yang diberikan pada air umpan hingga mencapai titik didih dapat dihitung (Bejan, 1987). Dengan memahami hubungan ini, dapat disimpulkan bahwa optimasi temperatur air umpan merupakan faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi produksi air distilat pada system desalinasi ini. Kenaikan temperatur air umpan menyebabkan peningkatan energi panas yang tersedia untuk proses evaporasi. Hal ini menghasilkan laju evaporasi yang lebih tinggi dan akhirnya meningkatkan jumlah air distilat yang dihasilkan.

Penelitian ini menggunakan tiga jenis air umpan: air bersih, air laut artifisial, dan air laut. Air bersih, air laut artifisial (air garam), dan air laut asli (air asin) masing-masing memiliki salinitas 76; 31.200; dan 28.400 mg/L. Air laut artifisial memiliki salinitas tertinggi dibandingkan dengan dua jenis air umpan lainnya. Gambar 4.2 mengilustrasikan dampak salinitas air umpan terhadap produksi air tawar. Laju produksi menunjukkan proporsionalitas terbalik dengan salinitas umpan. Keberadaan garam terlarut dalam air umpan menurunkan temperatur uap. Akibatnya, temperatur outlet air pendingin menurun, sehingga membutuhkan energi tambahan untuk memanaskan air umpan. Akibatnya, laju produksi menurun seiring dengan meningkatnya kadar salinitas (Q Chen, Ja, Li, & Chua, 2018).



Gambar 4.1 Volume Air Distilat pada (a) Temperatur Air Umpan 50,55, dan 60°C untuk *Tap Water*: Tekanan Vakum -0,6 bar, Laju Alir Air Umpan 0,6 L/min.



Gambar 4.2 Volume air distilat pada temperatur air umpan 65, 70, 75, dan 80°C untuk *tap water*, air laut artifisial, dan air laut: tekanan vakum -0,6 bar, laju aliran air umpan 0,6 L/min, temperatur air pendingin 29°C.

4.2 Pengaruh Laju Alir Air Umpan terhadap Volume Air Distilat

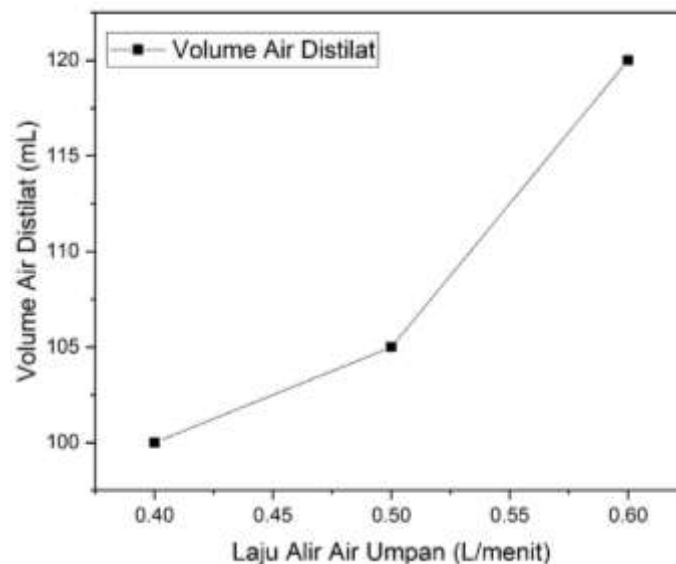
Gambar 4.3 mengilustrasikan hubungan antara produktivitas dan laju aliran air umpan. Produktivitas meningkat seiring dengan peningkatan laju aliran umpan dari 0,4 menjadi 0,6 L/menit. Peningkatan laju aliran umpan akan menghasilkan ekstraksi panas yang lebih besar dari tangki penyimpanan, sehingga mengurangi temperatur tangki. Penurunan temperatur tangki menghasilkan dua efek yang berlawanan. Pertama, hal ini akan meningkatkan efisiensi kolektor dan memfasilitasi pengumpulan energi surya. Akibatnya, konsumsi energi spesifik dari proses desalinasi akan meningkat karena pemulihan panas yang tidak memadai. Produktivitas maksimum yang diamati pada laju aliran umpan 0,6 L/menit muncul dari *trade-off* antara dua efek yang berlawanan ini (Qian Chen, Alrowais, et al., 2020).

Peningkatan laju aliran air umpan akan membawa volume air umpan yang lebih besar pada tertentu tertentu ke dalam evaporator. Hal ini membantu menjaga temperatur yang stabil dan lebih tinggi di permukaan penguapan karena air umpan mengisi ulang panas secara lebih efektif, mencegah pendinginan lokal akibat penguapan (R. Alrowais et al., 2020). Selain itu, aliran umpan yang lebih tinggi mengurangi polarisasi temperatur dan lapisan batas termal, memungkinkan perpindahan panas yang lebih efisien dari sumber pemanas ke air umpan, sehingga meningkatkan laju penguapan. Saat laju penguapan meningkat, lebih banyak uap air

dihasilkan, menghasilkan volume distilat yang lebih tinggi setelah kondensasi (Chandra, Mudgal, & Patel, 2024).

Studi tentang *vacuum multi-effect membrane distillation* (V-MEMD) (Qian Chen, Muhammad, et al., 2020) menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran umpan dari 90 menjadi 150 L/jam pada temperatur umpan panas 75°C meningkatkan fluks distilat secara signifikan, mencapai 8,5 L/jam·m². Namun, di luar laju aliran tertentu, kapasitas kondensor menjadi faktor pembatas, yang menyebabkan panas berlebih dan penumpukan tekanan, yang mengurangi efisiensi. Hal ini menggambarkan pentingnya menyeimbangkan aliran umpan dengan kapasitas pendinginan sistem. Studi lain mengenai distilasi air laut (Morton, Callister, & Wade, 1997) mencatat bahwa laju aliran air umpan biasanya 8–10 kali lebih besar dari laju produksi air tawar untuk memastikan pendinginan dan komposisi umpan yang memadai, sehingga menyoroti peran penting aliran umpan dalam operasi sistem.

Efek dari laju aliran air umpan pada sistem desalinasi mencakup beberapa aspek penting. Pertama, sistem pemanas harus cukup kuat untuk memanaskan laju aliran air yang lebih tinggi; jika tidak, efisiensi proses bisa menurun. Kedua, efisiensi transfer panas antara air umpan dan sumber panas harus optimal agar laju evaporasi meningkat. Terakhir, sistem kondensasi harus mampu menangani uap air yang dihasilkan dari laju aliran yang lebih tinggi, memastikan bahwa semua uap dapat mengembun menjadi air destilat (Chandra et al., 2024).

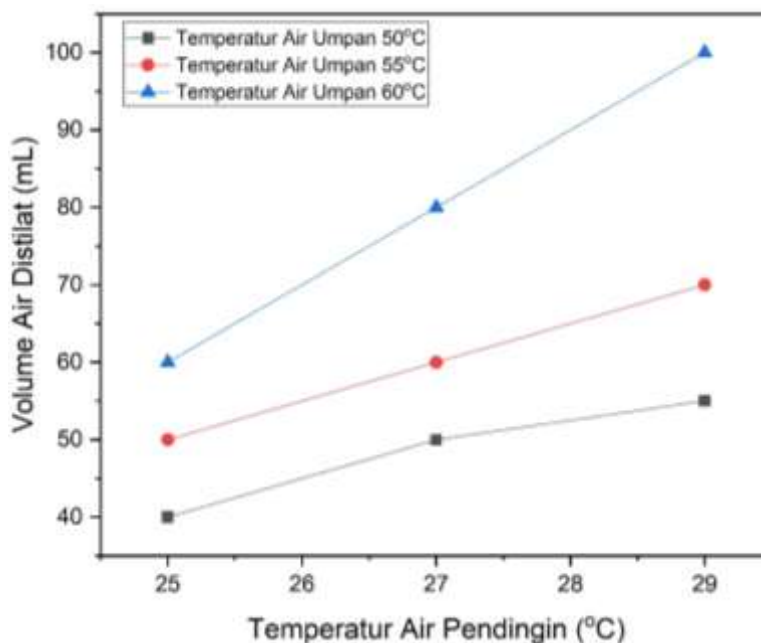


Gambar 4.3 Volume Air Distilat pada Laju Aliran Air Umpan 0,4, 0,5, dan 0,6 L/menit untuk *Tap Water*: tekanan vakum -0,6 bar, temperatur air umpan 80°C, temperatur air pendingin 29°C.

4.3 Pengaruh Temperatur *Cooling Water* terhadap Volume Air Distilat

Peralatan *spray desalination* dioperasikan di bawah gradien temperatur yang analog dengan air umpan yang dipanaskan oleh *heater* yang dipasang di bagian bawah tangki air umpan. Kisaran temperatur air umpan adalah 50, 55, dan 60°C, sedangkan temperatur air pendingin adalah 25, 27, dan 29°C lebih rendah dari temperatur air umpan. Laju aliran air umpan adalah 0,6 L/menit, sedangkan laju aliran air pendingin adalah 1,4 L/menit. Data dicatat selama 60 menit di setiap uji coba, kemudian volume air distilat dihitung. Gambar 4.4 menggambarkan produktivitas air distilat pada berbagai temperatur air umpan dan air pendingin.

Produktivitas berbanding lurus dengan temperatur air panas dan temperatur *cooling water*. Sistem beroperasi berdasarkan perbedaan temperatur antara air umpan dan *cooling water*. Pada perbedaan temperatur yang konstan, peningkatan temperatur air umpan meningkatkan produktivitas, yang dikaitkan dengan kehilangan termal ke lingkungan sekitar (Qian Chen et al., 2021). Peningkatan temperatur pengoperasian sistem mengakibatkan hilangnya panas yang lebih besar ke lingkungan. Hilangnya panas berfungsi sebagai kapasitas kondensasi tambahan dan meningkatkan laju penguapan. Laju produksi meningkat saat sistem berfungsi pada temperatur air umpan yang tinggi. Hal ini sebagian disebabkan oleh berkurangnya panas laten penguapan (Q Chen et al., 2018).

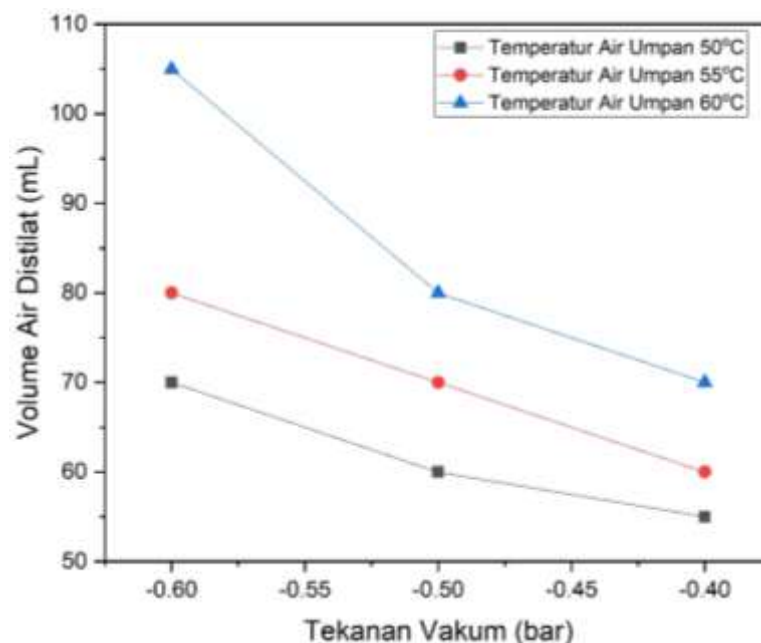


Gambar 4.4 Volume Air Distilat pada Temperatur Air Pendingin 25, 27, dan 29°C untuk *Tap Water*: tekanan vakum -0,6 bar, laju aliran air umpan 0,6 L/min.

Dari Gambar 4.4 juga terlihat bahwa temperatur air umpan yang lebih tinggi meningkatkan tekanan uap air, yang menyebabkan laju penguapan yang lebih tinggi sehingga lebih banyak uap yang tersedia untuk kondensasi. Hal ini sesuai dengan hubungan Clausius-Clapeyron, yang menyatakan bahwa tekanan uap meningkat secara eksponensial seiring dengan temperatur, meningkatkan gaya pendorong untuk perubahan fase (Si et al., 2019).

4.4 Pengaruh Tekanan Vakum terhadap Volume Air Distilat

Tekanan vakum berpengaruh signifikan terhadap titik didih air. Pada tekanan yang lebih rendah, titik didih air menurun. Hal ini sesuai dengan prinsip termodinamika yang terlihat pada diagram fase air, dimana tekanan lebih rendah menyebabkan air mendidih pada temperatur yang lebih rendah. Pengaruh tekanan vakum terhadap volume air distilat disajikan pada Gambar 4.5.



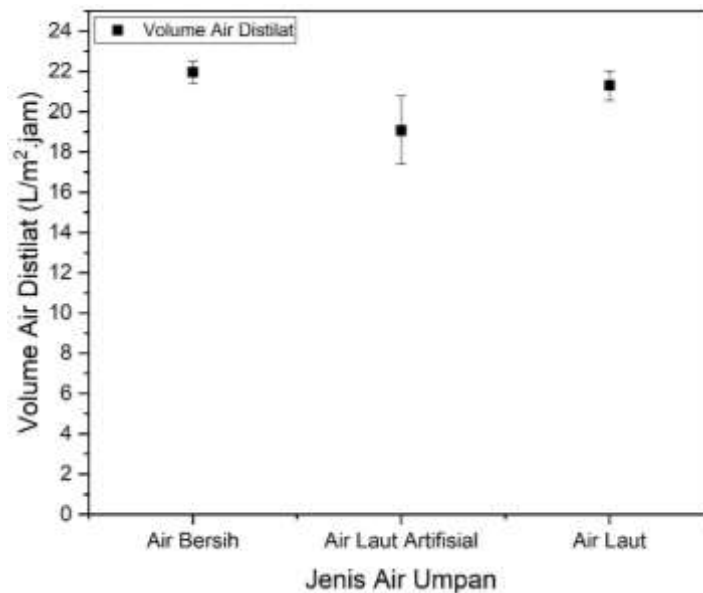
Gambar 4.5 Volume Air Distilat pada Tekanan Vakum -0,4, -0,5, dan -0,6 bar untuk *Tap Water*: laju alir air umpan 0,6 L/menit, temperatur air pendingin 29°C.

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa tekanan vakum yang lebih rendah (lebih negatif) (yaitu, vakum yang lebih kuat) menghasilkan volume air distilat yang lebih tinggi untuk setiap jenis air umpan. Peningkatan temperatur air umpan akan meningkatkan tekanan uap air, yang menyebabkan peningkatan penguapan sehingga menyebabkan lebih banyak air distilat yang terbentuk. Peningkatan vakum (penurunan tekanan absolut) akan menurunkan titik didih air, sehingga memudahkan penguapan dan meningkatkan produksi air distilat. Efek gabungan dari temperatur yang lebih tinggi dan vakum yang lebih kuat memaksimalkan gaya dorong untuk

perubahan fase dari cair ke uap, sehingga menghasilkan volume air distilat tertinggi (Iqbal, Asif, Jafry, & Bibi, 2024).

4.5 Pengaruh Jenis Air Umpan terhadap Volume Air Distilat

Penelitian ini menggunakan tiga jenis air umpan: air bersih, air laut artifisial, dan air laut. Air bersih, air laut artifisial, dan air laut memiliki salinitas masing-masing 76; 22.900; dan 26.700 ppm. Air laut memiliki salinitas tertinggi dibandingkan dengan dua jenis air umpan lainnya. Gambar 4.6 menggambarkan dampak salinitas air umpan terhadap produksi air distilat. Laju produksi menunjukkan proporsionalitas terbalik dengan salinitas umpan. Keberadaan garam terlarut dalam air umpan mengurangi temperatur uap. Akibatnya, temperatur outlet *cooling water* menurun, sehingga memerlukan energi tambahan untuk memanaskan air umpan. Akibatnya, laju produksi menurun seiring dengan meningkatnya kadar salinitas (Q Chen et al., 2018).



Gambar 4.6 Volume Air Distilat dalam Berbagai Jenis Air Umpan

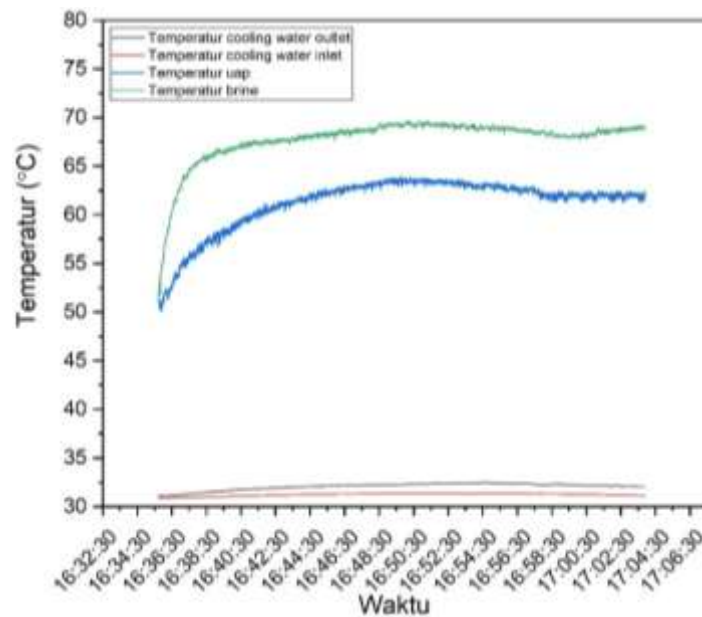
Tap water atau air bersih (dengan kadar garam terendah) menghasilkan air distilat paling banyak karena memiliki tekanan uap tertinggi pada temperatur tertentu dan tidak mengandung garam terlarut untuk menekan penguapan. Air laut artifisial dan air laut (mengandung garam) menghasilkan air distilat lebih sedikit daripada air bersih karena garam terlarut menurunkan tekanan uap, sehingga mengurangi laju penguapan. Keberadaan garam dalam air garam dan air laut meningkatkan titik didih (ketinggian titik didih) dan menurunkan tekanan uap (Hukum Raoult), yang keduanya mengurangi gaya pendorong penguapan dibandingkan dengan air murni. Oleh karena itu, pada temperatur yang sama, lebih sedikit air yang menguap dari air

garam dan air laut, sehingga menghasilkan volume air distilat yang lebih rendah (Wang, Xu, Lior, & Zeng, 2015).

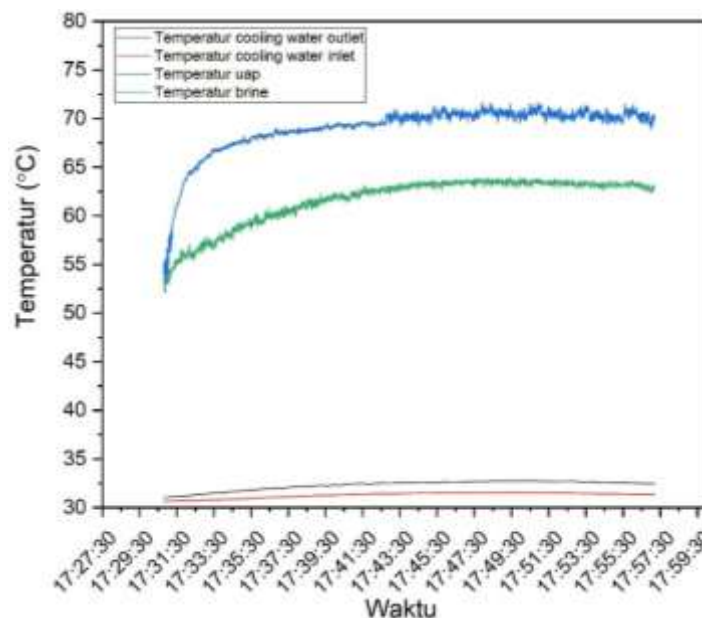
4.6 Analisis Termal pada *Direct Spray Evaporator*

Gambar 4.7 menunjukkan tren temperatur untuk *outlet cooling water*, *inlet cooling water*, uap, dan *brine* pada temperatur air umpan 80°C dengan laju aliran air umpan 0,6 L/menit, dan temperatur *cooling water* 29°C. Analisis dilakukan dalam dua periode waktu, yaitu 30 menit pertama dan 30 menit kedua. Pada 30 menit pertama, temperatur *inlet cooling water* menunjukkan peningkatan yang signifikan di awal operasi, mencapai puncak sekitar 70°C setelah beberapa menit. Setelah mencapai puncak, temperatur ini cenderung stabil atau sedikit menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pendinginan berhasil mengontrol temperatur setelah fase awal kenaikan. Temperatur *outlet cooling water* juga mengalami peningkatan cepat pada awal operasi, namun puncak temperatur yang dicapai sedikit lebih rendah dibandingkan *inlet cooling water*. Setelah mencapai puncak, temperatur *outlet cooling water* stabil, menunjukkan efisiensi transfer panas dalam sistem. Temperatur *brine* menunjukkan peningkatan yang lebih lambat dibandingkan *cooling water* dan stabil di sekitar nilai tertentu setelah beberapa menit. Temperatur uap menunjukkan fluktuasi yang minimal dan cenderung stabil di sekitar 35°C, yang menunjukkan peranannya dalam menjaga keseimbangan temperatur dalam sistem.

Pada 30 menit kedua (lihat Gambar 4.7(b)), tren temperatur menunjukkan pola yang mirip dengan periode sebelumnya. Temperatur *inlet cooling water* tetap stabil setelah mencapai puncaknya, dengan sedikit variasi yang dapat terjadi karena perubahan kondisi operasional. Temperatur *outlet cooling water* juga menunjukkan stabilitas serupa, mengindikasikan bahwa sistem pendinginan bekerja secara konsisten dalam mengatur temperatur. Temperatur *brine* tetap stabil pada nilai yang lebih rendah dibandingkan *cooling water*, menunjukkan efektifitas sistem dalam mengisolasi dan membuang panas. Temperatur uap mempertahankan stabilitasnya di sekitar 35°C, mempertegas perannya sebagai media pendingin yang stabil. Dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin lama waktu operasi, temperatur puncak yang dapat dicapai semakin tinggi pada awal operasi, namun kemudian stabil setelah sistem mencapai kondisi keseimbangan. Efisiensi sistem pendinginan dapat dinilai dari kemampuan mempertahankan temperatur stabil setelah fase awal peningkatan.



(a)



(b)

Gambar 4.7 Profil Temperatur Inlet *Cooling Water*, Outlet *Cooling Water*, *Brine*, dan Uap untuk Temperatur Air Umpan 80°C dengan Laju Alir Air Umpan 0,6 L/menit dan Temperatur *Cooling Water* 29°C pada 30 menit pertama (a) dan 30 menit kedua (b)

4.7 Analisis Kualitas Air Umpan, Air Distilat, dan *Brine*

Data kualitas air untuk air umpan, air distilat, dan *brine* ditampilkan pada Tabel 4.1. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa kualitas air distilat tertinggi diperoleh dengan *tap water* sebagai air umpan, diikuti oleh air laut artifisial, sedangkan air laut menghasilkan kualitas terendah. Dari Tabel 4.1 juga dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur air umpan, semakin baik kualitas

air distilat yang dihasilkan. Hasil pengolahan air umpan pada alat desalinasi ini menunjukkan bahwa kualitas air distilat memenuhi standar kualitas air bersih berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 32 Tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan untuk Media Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi. Air distilat hasil pengolahan air laut artifisial dan air laut pada temperatur air umpan 75 dan 80°C memenuhi standar kualitas air minum berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, namun pada temperatur air garam dan air laut 65 dan 70°C belum memenuhi standar kualitas air minum.

Kualitas air distilat terbaik dicapai pada temperatur air umpan yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan pada temperatur yang lebih tinggi, molekul air memperoleh lebih banyak energi kinetik, sehingga lebih mudah untuk bertransisi dari cair ke uap. Uap yang dihasilkan pada temperatur tinggi mengandung lebih sedikit padatan terlarut dan pengotor yang tidak mudah menguap, karena zat-zat ini tidak mudah menguap bersama air (Luo & Lior, 2017). Sebagian besar garam dan mineral terlarut memiliki volatilitas yang sangat rendah dan tetap berada dalam fase cair selama penguapan. Temperatur yang lebih tinggi mempercepat pemisahan, meminimalkan kemungkinan pengotor yang tidak mudah menguap terbawa ke dalam distilat. Selain itu, temperatur yang tinggi menghancurkan atau menguapkan banyak kontaminan organik dan mikroorganisme, menghasilkan air distilat yang lebih murni (Nathoo, Ismail, Aziz, & Randall, 2022). Seperti yang terlihat pada data eksperimen, peningkatan temperatur air umpan menyebabkan konduktivitas, total padatan terlarut (TDS), dan salinitas yang lebih rendah dalam distilat, yang menunjukkan kemurnian yang lebih tinggi.

Tabel 4. 1 Analisis Kualitas Air pada Air Umpan, Air Distilat, dan *Brine* dalam Berbagai Jenis Air Umpan

Parameter	Satuan	Standar kualitas air bersih*	Standar kualitas air minum**	Air Bersih			Air Garam						Air Laut				
				Air umpan	Air Distilat	<i>Brine</i>	Air umpan	Air Distilat				<i>Brine</i>	Air umpan	Air Distilat			<i>Brine</i>
					Temp. air umpan = 60°C			Temp. air umpan = 65°C	Temp. air umpan = 70°C	Temp. air umpan = 75°C	Temp. air umpan = 80°C			Temp. air umpan = 70°C	Temp. air umpan = 75°C	Temp. air umpan = 80°C	
pH	-	6,5-8,5	6,5-8,5	7,50	7,18	7,81	7,82	7,11	6,91	7,43	7,50	7,90	7,78	7,32	7,27	7,08	7,81
Konduktivitas	$\mu\text{S/cm}$	-	-	153	82	147	38.400	1266	716	468	298	38.100	44.700	619	333	247	43.600
<i>Total Dissolved Solid (TDS)</i>	ppm	1000	<300 g/L	76	41	73	19.000	633	352	234	149	18.800	22.200	311	166	124	22.100
Salinitas	ppm	-	-	76	41	73	22.900	635	353	234	149	22.800	26.700	311	166	125	26.800
	%	-	-	0,00	0,00	0,00	2,28	0,06	0,03	0,02	0,01	2,27	2,67	0,03	0,01	0,01	2,67

* Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 32 Tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan untuk Media Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi

* Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum

BAB V KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa alat desalinasi air laut berbasis *direct spray evaporator* dan *cooling coil condenser* skala laboratorium mampu menghasilkan air distilat dengan kuantitas dan kualitas optimal melalui variasi parameter seperti temperatur air umpan (50-80°C), laju alir (0,4-0,6 L/menit), tekanan vakum (-0,4 hingga -0,6 bar), dan temperatur air pendingin (25-29°C), dimana kondisi optimum dicapai pada temperatur air umpan 80°C, laju alir air umpan 0,6 L/menit, tekanan vakum -0,6 bar, dan temperatur air pendingin 29°C. Peningkatan temperatur air umpan dan vakum secara signifikan meningkatkan volume air distilat karena percepatan penguapan dan penurunan titik didih, sementara salinitas air umpan (tap water < air laut artifisial < air laut asli) menunjukkan hubungan terbalik dengan produktivitas akibat penurunan tekanan uap. *Tap water* atau air bersih (dengan kadar garam terendah) menghasilkan air distilat paling banyak karena memiliki tekanan uap tertinggi pada temperatur tertentu dan tidak mengandung garam terlarut untuk menekan penguapan. Kualitas air distilat memenuhi standar air bersih (Permenkes No. 32/2017) dan sebagian air minum (Permenkes No. 2/2023) pada kondisi optimum, dengan TDS, konduktivitas, dan salinitas rendah, menjadikan teknologi ini potensial untuk aplikasi di wilayah pesisir Indonesia dengan integrasi energi surya lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulloh, S. H. (2015). Desalinasi Air dengan Memanfaatkan Energi Terbarukan. *Pengolahan Air dengan Menggunakan Energi Terbarukan*. Hal, 1-8.
- Adriani, A. (2020). PEMANFAATAN AIR LAUT SEBAGAI SUMBER CADANGAN ENERGI LISTRIK. *VERTEX ELEKTRO*, 12(2), 22-33.
- Al-Shammiri, M. (2002). Evaporation rate as a function of water salinity. *Desalination*, 150(2), 189-203.
- Alrowais, R., Qian, C., Burhan, M., Ybyraiymkul, D., Shahzad, M. W., & Ng, K. C. (2020). A greener seawater desalination method by direct-contact spray evaporation and condensation (DCSEC): Experiments. *Applied Thermal Engineering*, 179. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115629
- Alrowais, R., Qian, C., Burhan, M., Ybyraiymkul, D., Shahzad, M. W., & Ng, K. C. (2020). A greener seawater desalination method by direct-contact spray evaporation and condensation (DCSEC): Experiments. *Applied thermal engineering*, 179, 115629.
- Anand, B., Shankar, R., Murugavelh, S., Rivera, W., Prasad, K. M., & Nagarajan, R. (2021). A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110787.
- Bejan, A. (1987). The thermodynamic design of heat and mass transfer processes and devices. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 8(4), 258-276.
- Chandra, P., Mudgal, A., & Patel, J. (2024). Effect of feed water temperature on the performance and economics of thermal energy driven multiple effect distillation system for water treatment. *Hybrid Advances*, 6, 100179.
- Chen, Q., Alrowais, R., Burhan, M., Ybyraiymkul, D., Shahzad, M. W., Li, Y., & Ng, K. C. (2020). A self-sustainable solar desalination system using direct spray technology. *Energy*, 205, 118037.
- Chen, Q., Burhan, M., M, K. J., Li, Y., & Ng, K. C. (2021). An ocean thermocline desalination system using the direct spray method. *Desalination*, 520, 115373. doi:10.1016/j.desal.2021.115373
- Chen, Q., & Chua, K. J. (2018). A spray assisted low-temperature desalination technology. In *Emerging technologies for sustainable desalination handbook* (pp. 255-284): Elsevier.
- Chen, Q., Ja, M. K., Li, Y., & Chua, K. (2018). Evaluation of a solar-powered spray-assisted low-temperature desalination technology. *Applied Energy*, 211, 997-1008.
- Chen, Q., Kum, J. M., & Chua, K. J. (2018). A spray assisted low-temperature desalination technology. In *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook* (pp. 255-284).
- Chen, Q., Muhammad, B., Akhtar, F. H., Ybyraiymkul, D., Muhammad, W. S., Li, Y., & Ng, K. C. (2020). Thermo-economic analysis and optimization of a vacuum multi-effect membrane distillation system. *Desalination*, 483, 114413.
- Chen, Q., Thu, K., Bui, T., Li, Y., Ng, K. C., & Chua, K. (2016). Development of a model for spray evaporation based on droplet analysis. *Desalination*, 399, 69-77.
- Dewantara, I. G. Y., Suyitno, B. M., & Lesmana, I. G. E. (2018). Desalinasi air laut berbasis energi surya sebagai alternatif penyediaan air bersih. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 7(1), 1-4.
- El-Agouz, S., Abd El-Aziz, G. B., & Awad, A. (2014). Solar desalination system using spray evaporation. *Energy*, 76, 276-283.
- Hadi, S., Permadi, A., Syamsuddin, A., & Zufar, A. F. (2024). Analysis Water Content of Seawater Desalination Technology by Using Multistage Distillation. *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, 2(1), 22-28.

- Iqbal, F., Asif, M., Jafry, A. T., & Bibi, W. (2024). *Experimental Investigation of Vacuum Membrane Distillation (VMD) Performance Based on Operational Parameters for Clean Water Production*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Khalilmoghadam, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Shafii, M. B. (2021). A novel energy storage system for latent heat recovery in solar still using phase change material and pulsating heat pipe. *Renewable Energy*, *163*, 2115-2127. doi:10.1016/j.renene.2020.10.073
- Kryukov, A., & Levashov, V. Y. (2011). About evaporation–condensation coefficients on the vapor–liquid interface of high thermal conductivity matters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *54*(13-14), 3042-3048.
- Lukita, C. W., Hermana, J., & Boedisantoso, R. (2015). Inventarisasi serapan karbon oleh ruang terbuka hijau di Kota Malang, Jawa Timur. *Surabaya: Tesis Program Magister Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Luo, A., & Lior, N. (2017). Study of advancement to higher temperature membrane distillation. *Desalination*, *419*, 88-100.
- Morton, A., Callister, I., & Wade, N. (1997). Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes. *Desalination*, *108*(1-3), 1-10.
- Nathoo, J., Ismail, A. A., Aziz, M., & Randall, D. (2022). ESSENTIAL CONSIDERATIONS FOR THE IMPLEMENTATION OF MEMBRANE DISTILLATION CRYSTALLISATION IN THE TREATMENT OF HYPERSALINE BRINES.
- Omar, A., Nashed, A., Li, Q., Leslie, G., & Taylor, R. A. (2020). Pathways for integrated concentrated solar power-Desalination: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *119*, 109609.
- Prastuti, O. P. (2017). Pengaruh Komposisi Air Laut dan Pasir Laut Sebagai Sumber Energi Listrik. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, *1*(1), 35-41.
- Rose, J. (2004). Surface tension effects and enhancement of condensation heat transfer. *Chemical Engineering Research and Design*, *82*(4), 419-429.
- Safitri, M. A. (2011). Penelitian Kualitas dan Kuantitas Air Destilat dengan Pengembangan Multiple Trays Tilted Still (Studi: Penambahan Kolektor Kain Hitam). *Tugas Akhir. Program Sarjana Teknik Lingkungan ITB. Bandung, Indonesia*.
- Sayuti, A. T., Mugisidi, D., Wirangga, R., & Heriyani, O. (2023). The Influence of Water Temperature on Seawater Evaporation in the Desalination Process. *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, *17*(2), 113-119.
- Semenov, S., Starov, V., Rubio, R., Agogo, H., & Velarde, M. (2011). Evaporation of sessile water droplets: Universal behaviour in presence of contact angle hysteresis. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *391*(1-3), 135-144.
- Shoeibi, S., Saemian, M., Khiadani, M., Kargarsharifabad, H., & Ali Agha Mirjalily, S. (2023). Influence of PV/T waste heat on water productivity and electricity generation of solar stills using heat pipes and thermoelectric generator: An experimental study and environmental analysis. *Energy Conversion and Management*, *276*. doi:10.1016/j.enconman.2022.116504
- Shojaei, M., Nosrati, M., Attarnejad, R., & Saghafian, B. (2020). Seawater desalination through natural temperature difference: an experimental, theoretical, and place case study. *Desalination and Water Treatment*, *195*, 64-78.
- Si, Z., Han, D., Song, Y., Chen, J., Luo, L., & Li, R. (2019). Experimental investigation on a combined system of vacuum membrane distillation and mechanical vapor recompression. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, *139*, 172-182.

- Susilawaty, A., Amansyah, M., & Nildawati, N. (2016). Kerentanan ketersediaan air bersih di daerah pesisir dan pulau-pulau kecil Sulawesi Selatan Indonesia. *Al-Sihah: The Public Health Science Journal*.
- Wang, Y., Xu, Z., Lior, N., & Zeng, H. (2015). An experimental study of solar thermal vacuum membrane distillation desalination. *Desalination and Water Treatment*, 53(4), 887-897.