

Tinjauan Pustaka: Pengaruh Temperatur Udara keluar Terhadap Proses Penguapan

Salman Alfariz, Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA
Alamat: Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp. Rambutan, Ps. Rebo, Jakarta Timur.
Telp.(021)840094 Fax. (021)87782739 E- mail:salmanalfrz86@gmail.com
Corresponding author : dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Proses penguapan sangat dipengaruhi oleh temperatur udara, khususnya temperatur udara keluar, yang menentukan laju penghilangan uap air serta efisiensi energi sistem. Tinjauan pustaka ini menganalisis berbagai penelitian mengenai pengaruh temperatur udara keluar terhadap kinerja proses penguapan pada berbagai aplikasi, seperti sistem pengeringan, menara pendingin, dan unit desalinasi. Hasil dari penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan temperatur udara keluar umumnya mempercepat laju penguapan karena perbedaan tekanan uap yang lebih besar, namun dapat menurunkan efisiensi energi apabila tidak dikendalikan dengan baik. Sebaliknya, pengaturan aliran udara dan gradien temperatur yang moderat dapat menghasilkan penguapan yang stabil dengan kehilangan energi yang lebih rendah. Kajian ini menekankan pentingnya keseimbangan antara parameter termal dan aerodinamik untuk mencapai proses penguapan yang efektif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Temperatur udara keluar, Proses penguapan, Efisiensi energi, Sistem pengeringan, Kinerja termal.

Abstract

The evaporation process is strongly influenced by air temperature, particularly the outlet air temperature, which determines the rate of moisture removal and energy efficiency. This literature review analyzes studies on the impact of outlet air temperature on evaporation performance across various applications, including drying systems, cooling towers, and desalination units. Findings from previous research indicate that higher outlet air temperatures generally increase the evaporation rate due to enhanced vapor pressure differences, yet may reduce overall energy efficiency if not properly controlled. Conversely, optimized airflow and moderate temperature gradients promote stable evaporation with lower energy losses. The reviewed literature highlights the importance of balancing thermal and aerodynamic parameters to achieve effective and sustainable evaporation processes. This review aims to provide a theoretical foundation for improving evaporative system design through precise control of outlet air temperature.

Keywords: Outlet air temperature, Evaporation process, Energy efficiency, Drying system, Thermal performance.

1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar manusia yang tidak tergantikan untuk mendukung kehidupan dan pembangunan berkelanjutan. Namun, ketersediaannya semakin terbatas akibat pertumbuhan penduduk, industrialisasi, serta perubahan iklim yang memengaruhi siklus hidrologi. Berdasarkan data United Nations World Water Development Report (UNESCO, 2023), lebih dari 2 miliar orang di dunia mengalami kekurangan akses terhadap air bersih, terutama di wilayah pesisir dan daerah kering. Di sisi

lain, sekitar 97 % air di bumi adalah air laut yang mengandung garam dan mineral terlarut, sehingga tidak dapat langsung dikonsumsi. Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi desalinasi air laut sebagai alternatif strategis dalam memenuhi kebutuhan air bersih global [1].

Teknologi desalinasi telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir dengan berbagai pendekatan, seperti reverse osmosis (RO), multi-

stage flash distillation (MSF), multi-effect distillation (MED), dan humidification-dehumidification

desalination (HDH). Di antara metode tersebut, proses berbasis penguapan (evaporasi) masih banyak digunakan karena kesederhanaan sistem, kemampuannya beroperasi dengan energi panas rendah, serta potensi integrasinya dengan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya atau panas limbah industri. Pada prinsipnya, proses penguapan memanfaatkan perpindahan panas dari udara panas ke permukaan air laut untuk menghasilkan uap air, yang kemudian dikondensasikan menjadi air tawar[2] .

Efisiensi sistem penguapan sangat dipengaruhi oleh sejumlah variabel operasi, antara lain temperatur dan kecepatan udara, temperatur air laut, kelembaban relatif udara, serta tekanan sistem. Di antara parameter tersebut, temperatur udara keluar (outlet air temperature) menjadi salah satu faktor penting yang kerap diabaikan dalam optimasi sistem. Temperatur udara keluar mencerminkan jumlah energi panas yang tersisa pada udara setelah terjadi perpindahan panas dengan air laut. Nilai temperatur udara keluar yang terlalu tinggi menunjukkan bahwa udara belum sepenuhnya melepaskan energi panasnya, sehingga proses penguapan menjadi kurang optimal. Sebaliknya, temperatur udara keluar yang terlalu rendah dapat mengindikasikan kehilangan energi berlebih, yang berdampak pada penurunan efisiensi energi sistem secara keseluruhan[3] .

Beberapa penelitian telah menyoroti hubungan antara variabel termal sistem dan performa penguapan dalam proses desalinasi. Sayuti et al. (2023) dalam SINTEK Jurnal meneliti pengaruh temperatur air laut terhadap proses penguapan dan menemukan bahwa peningkatan temperatur air dari 30 °C hingga 70 °C dengan kecepatan udara 2,6 m/s dapat meningkatkan laju penguapan secara signifikan, meskipun menurunkan laju kondensasi akibat perubahan kelembaban relatif udara . Sementara itu, Oktavian et al. (2022) melalui penelitian Convective Coefficient and Evaporative in Forced Flow Solar Still menunjukkan bahwa kenaikan temperatur udara dan kecepatan aliran mempengaruhi koefisien perpindahan panas konveksi serta laju penguapan secara linier, dimana udara keluar berperan dalam menentukan keseimbangan energi sistem. Selain itu, Liu et al. (2023) dalam jurnal Separations dari MDPI mengembangkan model teoritis sistem desalinasi siklus tertutup dan menegaskan bahwa perubahan kondisi udara, khususnya temperatur udara keluar, memiliki

pengaruh signifikan terhadap output air tawar dan efisiensi termodinamika sistem[4] .

Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa temperatur udara keluar tidak hanya mempengaruhi laju penguapan, tetapi juga menentukan efisiensi penggunaan energi dan kapasitas produksi air tawar. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada temperatur udara masuk atau temperatur air laut, sementara peran spesifik temperatur udara keluar dalam dinamika perpindahan panas dan massa pada sistem desalinasi berbasis evaporasi belum banyak dikaji secara mendalam. Dengan demikian, terdapat kesenjangan pengetahuan (research gap) yang perlu dijawab melalui penelitian eksperimental maupun pemodelan termal yang menitikberatkan pada pengaruh temperatur udara keluar terhadap laju penguapan dan performa sistem secara keseluruhan[5] .

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur udara keluar terhadap laju penguapan air laut dalam proses desalinasi berbasis evaporasi. Fokus utama penelitian adalah menentukan hubungan antara perubahan temperatur udara keluar dengan laju penguapan, efisiensi termal, serta keluaran air tawar. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan dasar ilmiah dalam perancangan dan optimasi sistem desalinasi, terutama dalam pemanfaatan energi panas rendah seperti panas surya atau panas buangan industri, untuk menciptakan sistem desalinasi yang berkelanjutan, hemat energi, dan ramah lingkungan [6].

Kajian literatur dalam penelitian ini disusun melalui proses pengumpulan dan seleksi artikel ilmiah yang relevan dengan topik desalinasi berbasis evaporasi dan parameter temperatur udara keluar. Literatur diperoleh dari basis data Google Scholar, Science Direct, Scopus, dan MDPI, dengan rentang publikasi 2021-2025. Seleksi dilakukan melalui telaah judul, abstrak, dan isi penuh untuk memastikan kesesuaian dengan topik pengaruh temperatur udara keluar terhadap proses penguapan dan efisiensi energi.

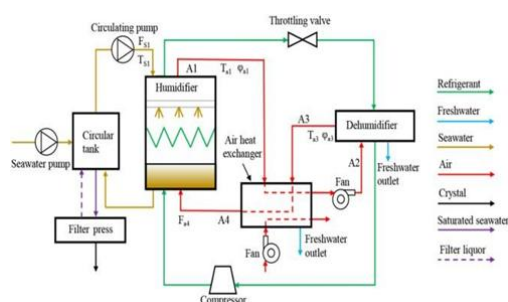
Tujuan tinjauan pustaka ini adalah untuk menganalisis secara sistematis pengaruh temperatur udara keluar terhadap laju penguapan air laut, efisiensi energi sistem, serta performa berbagai teknologi desalinasi berbasis evaporasi. Kajian ini juga bertujuan mengidentifikasi celah penelitian (research gap) terkait peran parameter ini dalam proses perpindahan panas dan massa, serta memberikan dasar teoritis bagi pengembangan sistem

desalinasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan mampu memanfaatkan sumber panas bergrade rendah seperti panas buang AC atau energi surya.

2. HUBUNGAN ANTARA TEMPERATUR UDARA KELUAR DAN LAJU PENGUAPAN AIR LAUT

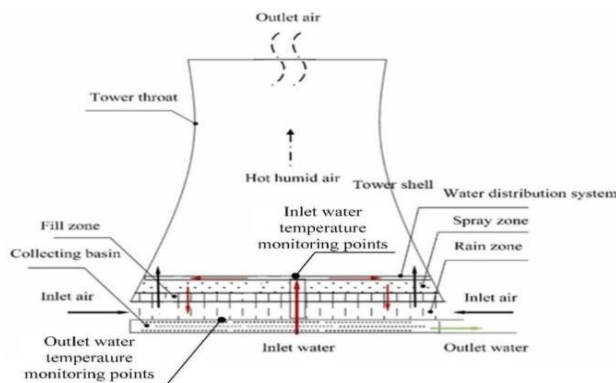
Hubungan antara temperatur udara keluar dan laju penguapan air laut merupakan aspek fundamental dalam proses desalinasi berbasis evaporasi, seperti pada sistem Humidification-Dehumidification (HDH), solar still, maupun evaporator konvensional. Prinsip dasarnya terletak pada kemampuan udara untuk menampung uap air, yang sangat dipengaruhi oleh suhunya. Udara panas memiliki tekanan uap jenuh yang lebih tinggi dibandingkan udara dingin, sehingga dapat menampung lebih banyak uap air sebelum mencapai kondisi jenuh. Oleh karena itu, ketika udara keluar dari humidifier dengan temperatur yang lebih tinggi, udara tersebut akan memiliki kapasitas penyerapan uap yang lebih besar, dan ini secara langsung meningkatkan laju penguapan dari permukaan air laut [7].

Secara termodinamika, laju penguapan dapat dijelaskan melalui perbedaan tekanan uap antara permukaan air dan udara di atasnya. Semakin besar perbedaan tekanan uap tersebut, semakin kuat dorongan molekul air untuk berpindah dari fase cair ke fase gas. Ketika udara memiliki suhu yang tinggi, tekanan uap jenuhnya meningkat, namun kelembapan relatifnya (pada kelembapan absolut tetap) menurun, sehingga udara “lebih haus” terhadap uap air. Akibatnya, molekul-molekul air di permukaan laut lebih cepat meninggalkan permukaannya untuk memenuhi keseimbangan kelembapan udara, mempercepat proses penguapan. Proses ini juga didukung oleh peningkatan energi kinetik molekul air yang lebih mudah mengatasi gaya kohesi antar molekul air pada temperatur tinggi.



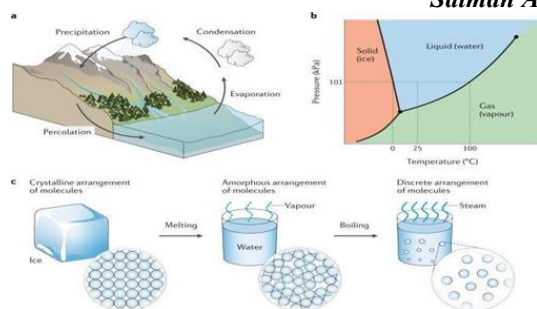
Gambar 1 Skema Sistem HDH dengan Kompresor dan Pendingin (Refrigeration-Assisted HDH) [2]

Dari sisi perpindahan panas dan massa (heat and mass transfer), peningkatan temperatur udara keluar memengaruhi dua mekanisme utama penguapan: konveksi dan difusi. Pada suhu udara yang lebih tinggi, perbedaan densitas antara udara lembab dan udara kering menyebabkan peningkatan konveksi alami, sehingga terjadi sirkulasi udara yang mempercepat pelepasan uap air. Selain itu, koefisien difusi uap air dalam udara meningkat dengan kenaikan suhu, sehingga uap air dapat berpindah lebih cepat dari permukaan laut menuju udara bebas. Kombinasi dua mekanisme ini menjelaskan mengapa pada kondisi udara panas dan kering, penguapan air laut terjadi dengan sangat intensif, seperti pada siang hari di wilayah tropis [8].



Gambar 2 Skema Cooling/Desalination [8]

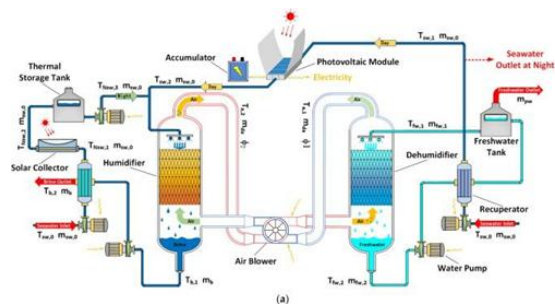
Dalam aplikasi praktis seperti sistem HDH, udara panas biasanya dihasilkan melalui pemanas udara (air heater) yang memanfaatkan energi surya, energi buang dari sistem pendingin (waste heat recovery), atau energi termal dari sumber lain. Udara panas tersebut kemudian dialirkan melalui humidifier, dimana kontak antara udara panas dan air laut menyebabkan udara menyerap uap air. Setelah proses ini, udara menjadi lembab (humid air) dan dialirkan ke dehumidifier atau kondensor untuk mengubah kembali uap air menjadi air tawar. Semakin tinggi temperatur udara keluar dari humidifier, semakin besar kandungan uap air yang dibawa udara menuju kondensor, sehingga volume kondensat yang dihasilkan meningkat. Ini menjelaskan mengapa kontrol terhadap temperatur udara keluar menjadi parameter penting dalam desain dan operasi sistem HDH.



Gambar 3 Siklus Alamiah Air dan Fase Perubahan [9]

Namun demikian, peningkatan temperatur udara tidak selalu memberikan peningkatan efisiensi yang linear. Pada suhu tertentu, sistem mencapai titik optimum di mana laju penguapan dan laju kondensasi berada dalam keseimbangan ideal. Jika suhu udara keluar terlalu tinggi, kelembaban relatif udara mendekati 100%, menyebabkan perbedaan kelembaban antara udara dan permukaan air menurun. Dalam kondisi ini, udara tidak lagi mampu menampung banyak uap air tambahan, dan laju penguapan menurun meskipun suhu tinggi. Selain itu, suhu udara yang terlalu panas dapat menurunkan perbedaan suhu antara udara lembab panas dan permukaan kondensor, sehingga efisiensi kondensasi menurun. Hal ini menyebabkan sebagian uap tidak terkondensasi dengan baik dan justru terbangun bersama aliran udara keluar [9].

Selain pengaruh langsung terhadap laju penguapan, temperatur udara keluar juga berperan dalam menentukan efisiensi energi sistem desalinasi secara keseluruhan. Penguapan pada suhu tinggi membutuhkan energi panas yang besar. Oleh karena itu, strategi pemanfaatan panas buang atau energi surya menjadi penting untuk menjaga agar proses tetap efisien dan ekonomis. Dalam beberapa studi, ditemukan bahwa peningkatan suhu udara keluar hingga kisaran 60–80°C dapat meningkatkan laju penguapan secara signifikan tanpa menyebabkan penurunan kinerja kondensasi yang berarti, tetapi melampaui rentang tersebut efisiensi total sistem cenderung menurun [10].



Gambar 4 Sistem Desalinasi HDH Terintegrasi Energi Surya (Solar-PV HDH Hybrid System) [11]

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara temperatur udara keluar dan laju penguapan air laut bersifat kompleks dan saling bergantung pada variabel lain seperti kelembaban relatif, kecepatan udara, luas permukaan penguapan, serta perbedaan suhu antara udara lembab dan kondensor. Pada prinsipnya, kenaikan temperatur udara meningkatkan kemampuan udara menyerap uap air dan mempercepat laju penguapan, tetapi hanya efektif hingga batas tertentu. Di atas titik optimum, faktor-faktor pembatas seperti kejenuhan udara dan penurunan gradien suhu pada kondensor akan menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu, dalam perancangan dan pengoperasian sistem evaporasi air laut, pengendalian suhu udara keluar menjadi kunci untuk mencapai kinerja maksimal dengan konsumsi energi yang efisien [11].

Berbagai penelitian yang menjadi dasar tinjauan ini menunjukkan kecenderungan yang konsisten mengenai pengaruh temperatur udara keluar terhadap proses penguapan. Sayuti et al. (2023) menemukan bahwa peningkatan temperatur air laut dari 30 hingga 70 °C menghasilkan kenaikan laju penguapan yang signifikan, terutama pada kondisi aliran udara yang stabil, meskipun terjadi penurunan efektivitas kondensasi akibat perubahan kelembaban relatif. Penelitian lain oleh Oktavian et al. (2024) pada sistem solar still aliran paksa menunjukkan bahwa kenaikan temperatur udara dan kecepatan aliran secara langsung meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi serta laju evaporasi, sehingga udara keluar memiliki peran penting sebagai indikator seberapa besar energi panas tersisa setelah proses humidifikasi.

Temuan serupa dilaporkan oleh Liu et al. (2023) dalam studi model sistem HDH siklus tertutup, dimana variasi temperatur udara keluar terbukti mempengaruhi output air tawar dan efisiensi termodinamika sistem. Pada kondisi temperatur udara keluar yang lebih tinggi, kapasitas udara dalam membawa uap meningkat sehingga menghasilkan volume kondensat lebih besar, selama tidak mencapai titik kejenuhan. Selain itu, Gude (2018) menegaskan bahwa pada sistem skala industri seperti MED dan MSF, peningkatan temperatur operasi hingga rentang 60-120°C memberikan peningkatan Gain Output Ratio (GOR), meskipun tetap dibatasi oleh risiko scaling dan korosi material. Secara keseluruhan, temuan-temuan ini memperlihatkan bahwa temperatur udara keluar merupakan parameter kritis yang memengaruhi laju penguapan, efisiensi energi, serta performa sistem desalinasi berbasis evaporasi pada berbagai konfigurasi teknologi.

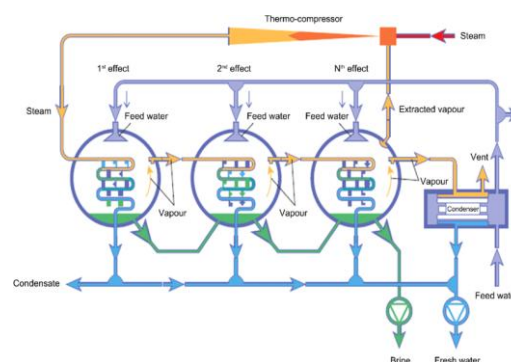
karena aspek fouling, scaling, dan kebutuhan material juga meningkat dengan temperatur [13].

3. PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP EFISIENSI ENERGI SISTEM DESALINASI

Variasi suhu umpan air laut (atau air brine) memiliki pengaruh langsung pada efisiensi energi sistem desalinasi termal. Ketika temperatur umpan dinaikkan, maka energi panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu tersebut menjadi lebih sedikit persentasenya dibanding total beban penguapan—karena sebagian dari panas tambahan tersebut sudah dalam bentuk “preheat” sebelum evaporasi utama terjadi. Dengan kata lain, pemanasan awal (preheating) meningkatkan kondisi awal air jadi lebih “siap” untuk menguap, yang mengurangi selisih suhu yang harus dicapai oleh proses penguapan utama. Sebagai contoh, sebuah studi untuk sistem Multi-Effect Distillation (MED) menunjukkan bahwa konfigurasi dengan pre-heating memberi performa yang lebih baik dibanding tanpa pre-heating untuk berbagai temperatur umpan laut.

Dengan demikian, pada sistem skala menengah atau kecil yang memanfaatkan panas sumber rendah (low- grade heat) atau pemanasan awal, menjaga temperatur umpan pada nilai “cukup tinggi” namun tetap dalam batas material dan fouling memungkinkan penurunan konsumsi energi spesifik (kWh/m^3) secara nyata [12].

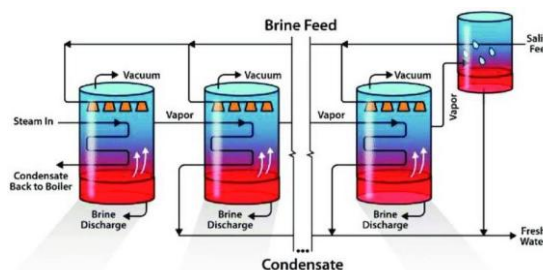
Pada sistem desalinasi berbasis banyak efek (MED/MEE) ataupun proses seperti Multi-Stage Flash (MSF), salah satu parameter kunci adalah rasio performansi termal atau Gain Output Ratio (GOR). GOR didefinisikan sebagai jumlah air tawar yang dihasilkan dibagi dengan jumlah uap atau kalor panas yang disuplai. Semakin besar jumlah efek (atau stage) yang bisa dioperasikan—yang pada gilirannya bergantung pada adanya rentang temperatur (top-brine temperature minus temperatur akhir tiap efek) yang cukup—maka GOR bisa meningkat. Rentang temperatur yang lebih tinggi pada “top brine temperature (TBT)” memberikan kesempatan bagi lebih banyak efek untuk beroperasi sebelum selisih temperatur terlalu kecil untuk mendukung proses penguapan. Sebagai contoh, literatur menunjukkan bahwa sistem MED yang bekerja pada TBT sekitar 70°C dapat mencapai GOR yang lebih tinggi dibanding sistem TBT yang jauh lebih rendah. Namun, ini bukan berarti “semakin tinggi TBT semakin baik tanpa batas” —



Gambar 5 Illustration-of-Multiple-Effect Distillation-MED-desalination-technique [14]

Pada sistem berbasis udara seperti Humidification–Dehumidification (HDH) atau solar- still, pemanasan udara atau media humidifikasi hingga suhu optimal juga meningkatkan kapasitas humidifikasi dan transfer massa (evaporasi). Udara yang lebih hangat mampu menampung uap lebih banyak, meningkatkan gradien kelembaban antara air laut dan udara, sehingga mempercepat penguapan. Namun, pemanasan udara tersebut membutuhkan energi (elektrik atau panas) sehingga ada trade-off: jika terlalu hangat, maka efisiensi energi (volume air tawar per unit energi) bisa menurun karena kenaikan konsumsi pemanasan udara yang tidak sebanding dengan kenaikan produksi [14].

Dalam praktiknya, sistem HDH skala kecil menengah cenderung lebih efisien jika dioperasikan pada rentang temperatur rendah hingga sedang menggunakan sumber panas gratis atau panas buang (waste heat) daripada memaksimalkan temperatur ke level industri besar. Hal ini karena kenaikan suhu operasi yang terlalu tinggi menghadirkan peningkatan kehilangan panas, peningkatan beban sistem, dan potensi pemborosan. Sehingga, perancangan sistem harus mempertimbangkan temperatur optimum – bukan sekadar “maksimum”.



Gambar 6 Diagram-of-a-multi-effect-desalination-MED [15]

Secara umum, peningkatan temperatur operasi pada sistem desalinasi termal membawa manfaat dalam bentuk penurunan konsumsi panas spesifik dan meningkatnya GOR, tetapi hanya hingga batas kondisi operasional dan material memungkinkan. Misalnya, literatur mengindikasikan bahwa pada sistem MED, konsumsi energi spesifik (SEC) bisa diturunkan saat temperatur umpan atau TBT dinaikkan, namun perubahan desain (jumlah efek, perbedaan temperatur antar efek yang kecil) menjadi pembatas utama [15].

Di sisi lain, operasi pada temperatur yang lebih rendah namun mendapatkan pemulihan panas internal yang baik (seperti menggunakan banyak efek, pre-heat, pemanfaatan panas buang) bisa menghasilkan efisiensi yang kompetitif—terutama pada skala kecil-menengah atau aplikasi terdesentralisasi. Sebagai contoh, proses yang mengoperasikan TBT rendah (misalnya $< 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) namun dengan banyak efek bisa menurunkan konsumsi listrik/termal dibanding sistem yang memaksimalkan temperatur tanpa optimasi lainnya.

Dalam memilih suhu operasi, penting juga mempertimbangkan isu-lain: fouling, scaling, material tahan korosi, pemeliharaan, dan umur sistem — yang semuanya cenderung memburuk pada temperatur yang sangat tinggi. Karena itu, optimasi temperatur bukan hanya soal “lebih tinggi = lebih baik” tetapi soal “berapa tinggi yang optimal” disesuaikan dengan sumber panas, kapasitas sistem, ukuran skala, dan kondisi lokal [16].

Walaupun berbagai penelitian telah menunjukkan pengaruh positif peningkatan temperatur terhadap laju penguapan dan efisiensi energi, sebagian besar studi masih dilakukan pada kondisi laboratorium dengan skala kecil sehingga generalisasi hasil ke sistem industri berskala besar masih terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian menitikberatkan pada temperatur udara masuk atau temperatur umpan, sehingga peran temperatur udara keluar sebagai parameter kontrol belum banyak digali secara spesifik. Variabel lain seperti kecepatan udara, turbulensi, dan kondisi lingkungan sering kali tidak dikaji secara simultan, padahal variabel tersebut berinteraksi langsung dengan temperatur udara keluar dan mempengaruhi proses humidifikasi-dehumidifikasi. Keterbatasan ini menegaskan perlunya penelitian eksperimental lanjutan yang mempertimbangkan dinamika multi-

variabel serta uji performa pada sistem yang memanfaatkan panas buang, seperti AC atau sumber panas rendah lainnya, untuk memperkuat validitas penerapan pada dunia nyata.

4. IMPLIKASI PADA BERBAGAI SISTEM DESALINASI

Sistem Solar Still merupakan salah satu teknologi desalinasi air laut yang paling sederhana dan ramah lingkungan, karena hanya memanfaatkan energi matahari sebagai sumber panas utama untuk proses penguapan dan kondensasi. Prinsip kerjanya menyerupai siklus alami hujan — air laut dipanaskan oleh radiasi matahari hingga menguap, kemudian uap air tersebut mengembun di permukaan penutup transparan (biasanya kaca atau akrilik), dan tetesan kondensat dikumpulkan sebagai air tawar. Proses ini berlangsung secara pasif dan mandiri, tanpa memerlukan sumber energi eksternal yang signifikan, menjadikannya solusi ideal untuk daerah terpencil atau wilayah dengan ketersediaan energi terbatas.

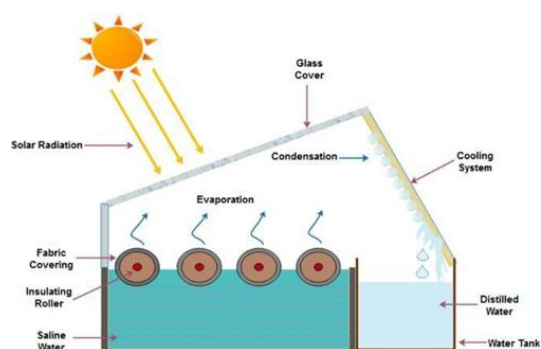
Secara termodinamika, kenaikan suhu permukaan air dalam basin merupakan faktor paling penting yang mempengaruhi laju penguapan dan produktivitas solar still (biasanya dinyatakan dalam liter per meter persegi per hari, $\text{L/m}^2\cdot\text{hari}$). Semakin tinggi temperatur air, semakin besar energi kinetik molekul air, sehingga lebih banyak molekul yang berhasil lepas dari permukaan cair menuju fase uap. Radiasi matahari yang diterima oleh permukaan absorber di dasar basin dikonversi menjadi panas, yang kemudian ditransfer ke air laut di atasnya. Apabila energi radiasi cukup besar untuk menaikkan suhu air di atas suhu ambang tertentu (biasanya $>60^{\circ}\text{C}$), maka laju penguapan meningkat tajam. Oleh karena itu, berbagai studi menunjukkan adanya hubungan hampir linier antara suhu air dan volume distilat yang dihasilkan per satuan waktu, terutama pada kisaran suhu sedang hingga tinggi [17].

Namun, efisiensi termal sistem solar still konvensional umumnya rendah, biasanya berkisar antara 20–45%, karena sebagian besar energi matahari yang diserap hilang melalui konduksi ke tanah, konveksi ke udara sekitar, atau radiasi kembali ke atmosfer. Permukaan kaca penutup juga mengalami kehilangan panas karena pendinginan oleh angin dan udara luar, yang mengurangi suhu uap di ruang atas dan menurunkan gradien suhu

yang diperlukan untuk kondensasi optimal. Kehilangan energi inilah yang menyebabkan perbedaan besar antara energi radiasi yang masuk dan energi yang benar-benar digunakan untuk menguapkan air [18].

Untuk meningkatkan efisiensi, berbagai modifikasi desain solar still telah dikembangkan. Salah satu pendekatan utama adalah meningkatkan suhu air dalam basin dengan cara menambahkan kolektor surya eksternal (solar collector) yang memanaskan air sebelum masuk ke still. Teknik lain melibatkan penggunaan nanofluida (air yang dicampur dengan partikel nano konduktif seperti CuO , Al_2O_3 , atau TiO_2) yang mampu menyerap dan mentransfer panas lebih cepat dibandingkan air biasa, sehingga mempercepat proses pemanasan dan penguapan. Beberapa penelitian juga menambahkan absorber hitam bertekstur atau material fase berubah (phase change material / PCM) di dasar basin untuk menyimpan energi panas saat intensitas matahari tinggi dan melepaskannya kembali saat malam hari, menjaga kontinuitas penguapan [19].

Selain meningkatkan suhu air, efisiensi solar still juga dapat ditingkatkan dengan menurunkan kedalaman air dalam basin. Air yang dangkal lebih cepat menyerap panas dan mencapai suhu penguapan, karena volume termalnya lebih kecil. Studi eksperimental menunjukkan bahwa pengurangan kedalaman air dari 2 cm menjadi 0,5 cm dapat meningkatkan produktivitas harian hingga 30%, meskipun perawatan dan kontrol terhadap salinitas harus lebih hati-hati. Di sisi lain, peningkatan efisiensi kondensasi juga menjadi fokus utama. Pendinginan permukaan kaca dengan air mengalir di bagian luar, atau penggunaan kondensor eksternal terpisah, dapat memperbesar gradien suhu antara uap air dan permukaan kondensasi, sehingga memperbanyak volume distilat yang terbentuk [20].



Gambar 7 solar still using textiles and polyurethane Rollers [21]

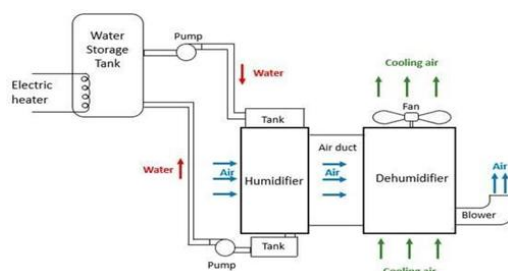
Selain itu, modifikasi dengan sirkulasi udara atau kipas bantu juga dapat memperbaiki proses evaporasi. Dengan mempercepat pergerakan udara di ruang atas still, kelembaban relatif udara di atas permukaan air dapat dikurangi, sehingga meningkatkan kemampuan udara untuk menampung uap baru. Namun, karena penggunaan kipas membutuhkan energi listrik tambahan, pendekatan ini lebih cocok untuk sistem hybrid yang menggunakan panel surya untuk menggerakkan kipas atau pompa air, agar tetap mempertahankan sifat mandiri dan berkelanjutan dari sistem solar still [21].

Secara keseluruhan, kenaikan temperatur—baik dari radiasi langsung, bantuan kolektor, atau penggunaan material berdaya serap tinggi—memiliki pengaruh paling besar terhadap peningkatan efisiensi dan produktivitas solar still. Namun, pendekatan yang efektif biasanya tidak hanya berfokus pada satu aspek pemanasan saja, melainkan pada kombinasi beberapa teknik seperti peningkatan penyerapan panas, pengurangan kehilangan energi, optimasi kedalaman air, dan peningkatan efisiensi kondensasi. Melalui integrasi berbagai inovasi ini, efisiensi sistem solar still dapat ditingkatkan hingga dua atau tiga kali lipat dibandingkan desain konvensional, menjadikannya solusi desalinasi yang sederhana, berbiaya rendah, dan berkelanjutan untuk wilayah beriklim panas dan kering. Sistem HDH meniru siklus alami evaporasi-kondensasi — udara dipanaskan, kemudian melewati kontak dengan air laut dalam humidifier sehingga menjadi jenuh uap, lalu udara lembap ini didinginkan di dehumidifier sehingga uap air mengembun menjadi air tawar. Komponen utama siklus ini adalah: humidifier (di mana massa air berpindah ke udara), dan dehumidifier (di mana uap dikondensasikan) [22].

Suhu udara masuk-atau lebih spesifik: suhu udara yang telah dipanaskan sebelum memasuki humidifier merupakan parameter kunci dalam performa HDH. Semakin tinggi suhu udara (atau juga suhu air umpan, bila air juga dipanaskan), maka udara memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menyerap uap air (lebih tinggi kelembaban absolut) dan gradien massa antara permukaan air dan udara meningkat. Hal ini berarti produksi kondensat per satuan waktu akan meningkat hingga suatu batas.

Misalnya, studi menunjukkan bahwa sistem dengan *pre-heated* air atau *pre-heated* air + air umpan menghasilkan GOR (Gain Output Ratio)

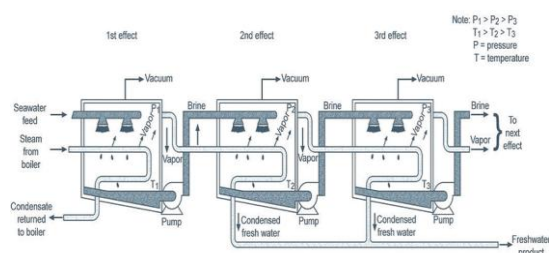
yang lebih tinggi dibandingkan yang hanya satu sisi dipanaskan[23].



Gambar 8 Sistem Dehumidifier dengan Heat Recovery [23]

Dengan suhu udara masuk yang lebih tinggi, terjadi peningkatan laju penguapan di humidifier, dan juga potensi pemulihan panas di dehumidifier menjadi lebih optimal (karena udara lembab memiliki entalpi lebih besar yang bisa dilepaskan lewat kondensasi

Sistem MEE/MED merupakan teknologi desalinasi termal dimana prinsip dasar adalah memanfaatkan uap yang terbentuk pada tiap tahap (efek) sebagai sumber panas untuk tahap berikutnya. Dengan demikian, panas yang awalnya disuplai eksternal (misalnya uap atau air panas) tidak dibuang langsung setelah satu evaporasi, tetapi dimanfaatkan secara berulang—ini yang menyebabkan rasio performansi termal (seperti GOR = Gain Output Ratio) menjadi lebih tinggi daripada sistem tunggal efek[24].



Gambar 9 -schematic-diagram-of-a-multi-effect-distillation-MED-process [24]

Salah satu parameter kunci di sistem ini adalah *Top-Brine Temperature (TBT)* — yaitu suhu air brine di tahap awal (atau bagian atas) sebelum evaporasi. Semakin tinggi TBT, semakin besar potensi jumlah efek yang bisa dijalankan karena masih tersedia selisih suhu untuk tiap efek berikutnya. Namun, suhu yang sangat tinggi juga membawa tantangan: kenaikan risiko scaling/fouling pada permukaan panas, korosi, serta kebutuhan material yang tahan suhu tinggi dan salinitas tinggi

Selain itu, perbedaan temperatur antar-efek (ΔT antar tahap) sangat penting. Untuk tiap efek, idealnya beban panas turun sedikit demi sedikit, sehingga efek berikutnya bisa bekerja dengan suhu dan tekanan yang sedikit lebih rendah. Konfigurasi seperti forward-feed, backward-feed, parallel/cross feed juga mempengaruhi bagaimana feed brine, uap dan kondensat dialirkan serta bagaimana distribusi suhu/tekanan antar efek dibuat [25].

Desain modern MEE/MED sering mengkombinasikan pemilihan jumlah efek (misalnya 5, 10, 15 efek) dengan rentang TBT optimal, serta integrasi dengan sumber energi terbarukan atau pemulihan panas (waste heat). Contohnya: integrasi dengan geotermal, atau menggunakan uap turbin sebagai sumber panas awal. Sistem kombinasi seperti MEE+membran atau MEE+MVC (Mechanical Vapour Compression) juga mulai banyak dilakukan untuk mengurangi konsumsi energi primer.

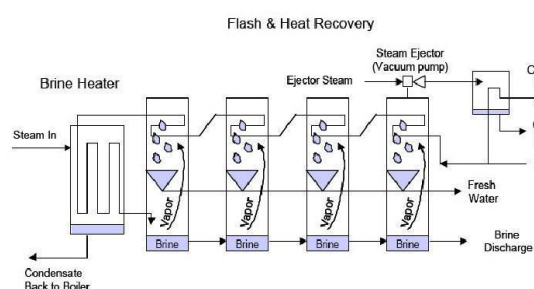
Dalam praktiknya, pengoperasian pada suhu yang lebih tinggi bisa meningkatkan produksi air per unit panas (karena lebih banyak efek yang dapat digunakan), tapi harus diimbangi dengan risiko teknis (scaling, maintenance) dan ekonomi (investasi material, operasional). Oleh karena itu analisis termo-ekonomi (termasuk Exergy analysis, optimasi aliran feed, optimasi ΔT , dan optimasi jumlah efek) menjadi sangat penting[26].

Sistem *Multi-Stage Flash (MSF)* merupakan salah satu teknologi desalinasi termal paling banyak digunakan di instalasi skala industri besar, terutama di kawasan pesisir Timur Tengah. Prinsip dasarnya adalah memanaskan air laut (brine) hingga mencapai *top-brine temperature (TBT)* tertentu, biasanya berkisar antara 90–120 °C tergantung desain sistem. Setelah dipanaskan, air laut dialirkan ke serangkaian ruang bertekanan menurun (stage), dimana sebagian dari brine tersebut mengalami *flashing*, yaitu penguapan spontan akibat tekanan yang lebih rendah dari tekanan uap jenuhnya. Uap yang dihasilkan di setiap tahap ini kemudian dikondensasikan pada permukaan penukar panas dengan air laut masuk, menghasilkan air tawar sekaligus memanaskan feed untuk tahap berikutnya. Proses ini berulang di setiap stage, dengan tekanan dan suhu yang menurun bertahap dari inlet hingga outlet[27].

Dari sisi termodinamika, kenaikan *TBT* umumnya meningkatkan efisiensi dan laju produksi, karena lebih banyak energi panas tersedia untuk

menguapkan air dan selisih tekanan antar stage menjadi lebih besar. Namun, suhu tinggi juga membawa dampak negatif yang signifikan: laju pembentukan kerak (scaling) dan fouling meningkat, terutama akibat presipitasi garam kalsium dan magnesium. Selain itu, suhu tinggi mempercepat korosi pada permukaan logam dan memperpendek umur peralatan. Oleh karena itu, desain sistem MSF modern harus mempertimbangkan keseimbangan antara suhu operasi tinggi untuk meningkatkan *recovery ratio* dengan risiko fouling dan biaya perawatan yang meningkat. Biasanya, pabrikan memilih kombinasi jumlah stage dan TBT optimum (misalnya 20–25 stage dengan TBT sekitar 110 °C) agar diperoleh *performance ratio* (PR) atau *gain output ratio* (GOR) yang tinggi tanpa mengorbankan keandalan operasi[28].

Sistem MSF memerlukan pasokan panas berkualitas tinggi — biasanya berupa uap dari turbin atau boiler tekanan menengah — sehingga paling sesuai untuk pembangkit listrik terintegrasi (cogeneration) yang mampu menyediakan energi termal besar dan stabil. Karena itu, teknologi MSF banyak diterapkan di instalasi dual-purpose plants, di mana uap dari pembangkit listrik dimanfaatkan untuk desalinasi, meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem energi. Sebaliknya, untuk aplikasi berskala kecil atau daerah yang hanya memiliki energi panas bergrade rendah seperti panas buang industri atau kolektor surya sederhana, sistem MSF kurang efisien tanpa rekayasa tambahan seperti *low-temperature MSF* atau integrasi dengan sistem pemulihan panas[29].



Gambar 10 Schematic-diagram-of-a-basic-multi-stage-flash-MSF-desalination-process [29]

Secara keseluruhan, MSF unggul dalam kapasitas besar dan keandalan jangka panjang, namun memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas energi dan efisiensi untuk suhu rendah. Karena itu, penelitian terkini banyak mengarah pada integrasi MSF dengan teknologi lain seperti *Multi-Effect Evaporation* (MEE), *Mechanical Vapor*

Compression (MVC), atau *membrane distillation* (MD) guna mengoptimalkan pemanfaatan panas dan mengurangi konsumsi energi spesifik[7].

5. KESIMPULAN

Tinjauan pustaka ini menegaskan bahwa temperatur udara keluar merupakan parameter penting yang mempengaruhi laju penguapan, kapasitas penyerapan uap, serta efisiensi energi pada berbagai sistem desalinasi berbasis evaporasi. Peningkatan temperatur udara keluar meningkatkan tekanan uap jenuh dan transfer massa, namun hanya efektif hingga batas optimum sebelum kejenuhan udara dan penurunan efisiensi kondensasi terjadi.

Dari perspektif energi, sistem seperti MED dan MSF menunjukkan peningkatan Gain Output Ratio (GOR) pada temperatur operasi yang lebih tinggi, namun memiliki batas terkait scaling dan korosi. Sistem berbasis udara seperti HDH dan solar still juga sangat sensitif terhadap variasi temperatur udara keluar, terutama dalam pemulihan panas dan kapasitas humidifikasi.

Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan: (1) eksperimen khusus untuk menentukan suhu udara keluar optimum pada sistem memanfaatkan panas buang seperti AC; (2) pengembangan model prediksi laju penguapan berbasis temperatur udara keluar; dan (3) integrasi sistem pemulihan panas untuk meningkatkan efisiensi termal pada operasi suhu rendah hingga menengah.

KEPUSTAKAAN

- [1] R. K. Das and A. Date, “Sustainable watedesalination using eductor and waste heat: A review and suggestion for future research,” *Desalination*, vol. 603, no. October 2024, p. 118687, 2025, doi: 10.1016/j.desal.2025.118687.
- [2] M. Shojaei *et al.*, “Performance analysis of a direct contact humidifier of a humidification-dehumidification desalination system: A heat and mass transfer,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 12, no. 1, pp. 49–55, 2017, doi: 10.23960/mech.v6.i1.201507.
- [3] W. Zhang, X. Du, L. Yang, and Y. Yang, “Research on Performance of Finned Tube Bundles of Indirect Air-cooled Heat Exchangers,” *Math. Model. Eng. Probl.*, vol. 3, no. 1, pp. 47–51, 2016, doi: 10.18280/mmep.030108.

- [4] D. Charitar and A. Madhlopa, "Integration of waste heat in thermal desalination technologies: A review," *J. Energy South. Africa*, vol. 33, no. 1, pp. 68–84, 2022, doi: 10.17159/2413-3051/2022/v33i1a5434.
- [5] S. KUMAR and P. CHANDRA, "Experimental investigation of axial finned tube evaporator thermal distillation system using for diesel engine waste heat recovery process," *J. Therm. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 479–489, 2024, doi: 10.18186/thermal.1456708.
- [6] D. S. Wijayanto, Soenarto, M. B. Triyono, W. Prasetyo, and I. Widiastuti, "Analysis of Longitudinal Finned Pipes in Cross-Flow Heat Exchanger," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 39, no. 6, pp. 1909–1916, 2021, doi: 10.18280/ijht.390627.
- [7] M. O. Khalaf, M. R. Özdemir, and H. S. Sultan, "A Comprehensive Review of Solar Still Technologies and Cost: Innovations in Materials, Design, and Techniques for Enhanced Water Desalination Efficiency," *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 10, pp. 1–55, 2025, doi: 10.3390/w17101515.
- [8] G. Cui, M. Bi, and C. Liu, "Design and experimental validation of a six-effect multi-effect evaporation plant utilized in oilfield," *Desalin. Water Treat.*, vol. 217, pp. 111–126, 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.26891.
- [9] A. T. S. Haji, R. Wirosedarmo, and M. W. Tyas, "Analisis Nomografi Suhu, Laju Penguapan dan Tekanan Udara untuk Perancangan Alat Desalinasi Tenaga Surya Dengan Pengaturan Vakum," *J. Sumberd. Alam dan Lingkung.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–6, 2017, doi: 10.21776/ub.jsal.2017.004.02.1.
- [10] I. Sulistiono, D. Mugisidi, Nurkholid, and Oktarina Heriyani, "Effect of wind speed on evaporation rate in air conditioner based desalination units," *TEKNOSAINS J. Sains, Teknol. dan Inform.*, vol. 12, no. 1, pp. 54–61, 2025, doi: 10.37373/tekno.v12i1.1238.
- [11] Y. Effendi and A. Rosyidin, "Efek vortex generators terhadap peningkatan perpindahan panas pada aliran melewati heated tubes," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 221–227, 2020, doi: 10.24127/trb.v9i2.1303.
- [12] T. M. Thomas and P. S. Mahapatra, "A plate-type condenser platform with engineered wettability for space applications," 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2305.19070>
- [13] O. Heriyani, D. Mugisidi, and I. Hilmi, "Effect of Cylinder Surface Roughness To the Distance Formation of Vortex," *SINTEK J. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 14, no. 2, p. 94, 2020, doi: 10.24853/sintek.14.2.94-98.
- [14] A. T. Sayuti, D. Mugisidi, R. Wirangga, and O. Heriyani, "The Influence of Water Temperature on Seawater Evaporation in the Desalination Process," *SINTEK J. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 17, no. 2, p. 113, 2023, doi: 10.24853/sintek.17.2.113-119.
- [15] M. Fahri Fadlu Robbi and B. Yunianto, "Studi Numerik Pengaruh Aspek Rasio Dari Perforated Concave Delta Winglet Terhadap Performa Termal-Hidrolik Aliran Udara Melewati Tube Di Dalam Saluran," *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 11, no. 3, p. 201, 2023.
- [16] I. Yaningsih and T. Istanto, "Pengaruh Jenis Humidifier (Spray Humidifier dan Pad Humidifier) Terhadap Produktivitas Unit Desalinasi Berbasis Pompa Kalor Dengan Menggunakan Proses Humidifikasi dan Dehumidifikasi," *Mechanical*, vol. 6, no. 1, pp. 49–55, 2015, doi: 10.23960/mech.v6.i1.201507.
- [17] A. P. H. J. Gajanan Kalyankar, "Heat Transfer Enhancement Through Swirl Flow Devices," *Int. J. Innov. Eng. Res. Technol.*, vol. 2018, pp. 198–200, 2018.
- [18] M. Fiebig, A. Grosse-Gorgemann, Y. Chen, and N. K. Mitra, "Conjugate heat transfer of a finned tube part a: Heat transfer behavior and occurrence of heat transfer reversal," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 133–146, 1995, doi: 10.1080/10407789508913737.
- [19] M. D. De Carvalho, J. S. Dos Reis Coimbra, T. S. M. Lemos, J. D. A. Bellido, and A. M. de O. Siqueira, "a Review of Humidification-Dehumidification Desalination Systems," *Int. J. Res. -GRANTHAALAYAH*, vol. 8, no. 5, pp. 290–311, 2020, doi: 10.29121/granthaalayah.v8.i5.2020.225.
- [20] V. G. Gude, "Exergy evaluation of desalination processes," *ChemEngineering*, vol. 2, no. 2, pp. 1–27, 2018, doi: 10.3390/chemengineering2020028.
- [21] T. " Peringkat, A. Oktavian, D. Mugisidi, R. Alamsyach, and O. Heriyani, "Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi Convective Coefficient and Evaporative in Forced Flow Solar Still Koefisien Konveksi dan Evaporasi pada Solar Still Aliran Paksa Article information," vol. 6, pp. 351–360, 2024.
- [22] W. Chamsa-ard, D. Fawcett, C. C. Fung, and G. Poinern, "Solar Thermal Energy Stills for Desalination: A Review of Designs, Operational Parameters and Material

- Advances,” *J. Energy Power Technol.*, vol. 2, no. 4, 2020, doi: 10.21926/jept.2004018.
- [23] H. Yang, C. Yang, and L. Geng, “Thermodynamic limits of humidifiers and dehumidifiers,” *iScience*, vol. 27, no. 7, p. 110277, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.110277.
- [24] A. H. Mohammed, A. N. Shmroukh, N. M. Ghazaly, and A. E. Kabeel, “Active solar still with solar concentrating systems, Review,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, no. 17, pp. 8777–8792, 2023, doi: 10.1007/s10973-023-12285-z.
- [25] C. Z. Liang, M. Askari, L. T. (Simon) Choong, and T. S. Chung, “Ultra-strong polymeric hollow fiber membranes for saline dewatering and desalination,” *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22684-1.
- [26] J. Liu, Y. Sun, Y. Zhang, and J. Wang, “Theoretical Study of a Closed-Cycle Evaporation System for Seawater Desalination,” *Separations*, vol. 10, no. 5, 2023, doi: 10.3390/separations10050319.
- [27] O. Younis *et al.*, “Comprehensive Review on Solar Stills—Latest Developments and Overview,” *Sustain.*, vol. 14, no. 16, 2022, doi: 10.3390/su141610136.
- [28] N. Ghazouani *et al.*, “Greenhouse Desalination by Humidification–Dehumidification Using a Novel Green Packing Material,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/w14060869.
- [29] N. Ghazouani, A. A. El-bary, G. E. Hassan, N. Becheikh, and A. Bawadekji, “Solar Desalination by Humidification – Dehumidification :,” 2022.