

Review: Peningkatan Produktifitas *Solar Still* Menggunakan Kondensor

Muhammad Irfan, & 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: muhirfan5397@gmail.com, Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Kondensor merupakan komponen utama dalam sistem desalinasi tenaga surya yang berfungsi mengubah uap air menjadi air tawar melalui proses kondensasi. Efisiensi kondensor sangat memengaruhi jumlah air tawar yang dihasilkan. Kajian ini bertujuan meninjau perkembangan penelitian mengenai penerapan kondensor kolam garam dalam proses desalinasi air laut. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur dari berbagai jurnal ilmiah yang membahas desain kondensor internal, eksternal, spiral dan kerucut (conical), serta integrasinya dengan sistem solar still. Hasil kajian menunjukkan bahwa kondensor eksternal dapat meningkatkan produktivitas, sedangkan kondensor kerucut meningkatkan efisiensi. Selain itu, kolam garam berpotensi menjadi media kondensasi alami yang mampu menyimpan panas dan meningkatkan kinerja sistem. Konsep ini dapat menjadi dasar pengembangan teknologi desalinasi yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan air bersih di wilayah pesisir Indonesia.

Kata Kunci: kondensor internal, kondensor eksternal, kondensor kerucut, desalinasi, kolam garam, solar still

Abstract

The condenser is a key component in solar desalination systems that converts water vapor into fresh water through the condensation process. The efficiency of the condenser greatly affects the amount of fresh water produced. This study aims to review the development of research on the application of salt pond condensers in seawater desalination processes. The method used is a literature review of various scientific journals that discuss internal, external, spiral and conical condenser designs and their integration with solar still systems. The results of the study show that external condensers can increase productivity, while conical condensers increase efficiency. In addition, salt ponds have the potential to become a natural condensation medium that can store heat and improve system performance. This concept can be the basis for the development of efficient, economical, and environmentally friendly desalination technology to meet the need for clean water in coastal areas of Indonesia.

Keyword: internal condenser, external condenser, conical condenser, desalination, salt pond, solar still

1 PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih menjadi tantangan utama di berbagai wilayah pesisir Indonesia akibat meningkatnya kebutuhan air untuk konsumsi, pertanian, dan industri, sementara sumber air tawar sangat terbatas. Sebagai negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, Indonesia memiliki potensi besar untuk memanfaatkan air laut melalui proses desalinasi [1], [2], [3]. Namun, sebagian besar teknologi desalinasi yang diterapkan saat ini masih berskala besar, membutuhkan energi tinggi, dan kurang efisien untuk diaplikasikan di daerah terpencil. Oleh karena itu, sistem desalinasi tenaga surya (*solar desalination system*) menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan [4], [5].

Dalam sistem desalinasi tenaga surya, dua proses utama yang berlangsung adalah evaporasi dan kondensasi. Uap air hasil penguapan air laut dikonversi kembali menjadi air tawar melalui proses kondensasi pada permukaan pendingin atau kondensor [6]. Efisiensi kondensasi sangat memengaruhi jumlah air tawar yang dihasilkan karena berhubungan langsung dengan laju perpindahan panas dan luas permukaan kondensasi. Dengan demikian, rancangan geometri kondensor, jenis material penyusunnya, serta sistem pendingin yang digunakan menjadi faktor penting dalam peningkatan produktivitas sistem desalinasi [7], [8] [9]. Penelitian eksperimental terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan dinding *solar still* sebagai permukaan kondensasi dengan pendingin air dapat menurunkan temperatur dinding dan kaca penutup, meningkatkan laju evaporasi dan kondensasi, serta

menaikkan efisiensi hingga 49,49% dibandingkan sistem tanpa pendingin. Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem *solar still* sebagai teknologi desalinasi sederhana berbasis efek rumah kaca, di mana air laut diuapkan oleh radiasi matahari dan dikondensasikan pada permukaan penutup transparan. Kolam garam (*salt pond*) merupakan salah satu bentuk penerapan *solar still* yang berfungsi ganda sebagai tempat penyerapan panas dan media kondensasi alami. Kolam ini menyimpan energi panas pada lapisan air garam dengan salinitas tinggi sehingga dapat mempertahankan suhu optimal untuk proses penguapan sekaligus mendukung pendinginan uap air pada permukaan kondensor [10], [11].

Efisiensi sistem *solar still* sangat dipengaruhi oleh rancangan kondensor yang digunakan. Beberapa penelitian membedakan desain kondensor menjadi internal, eksternal, spiral, dan konikal (*conical condenser*), yang masing-masing memiliki karakteristik perpindahan panas berbeda [1], [4], [12]. Kondensor eksternal diketahui mampu meningkatkan produktivitas air tawar hingga 30% dibandingkan sistem konvensional [13], [14]. Sedangkan kondensor konikal memberikan efisiensi termal lebih tinggi karena distribusi suhu yang lebih merata pada permukaan kondensasi [1]. Selain itu, beberapa studi juga menggabungkan kondensor dengan reflektor dan pelat penyerap panas untuk mengoptimalkan aliran uap dan meningkatkan laju kondensasi [15], [16]. Konsep kondensor kolam garam menjadi pendekatan baru dalam pengembangan sistem *solar still* karena mampu mengombinasikan proses penyimpanan panas, penguapan, dan pengembunan dalam satu wadah. Dengan memanfaatkan perbedaan suhu vertikal antara lapisan air garam, sistem ini memungkinkan terjadinya sirkulasi termal alami yang mempercepat kondensasi dan mengurangi kehilangan panas ke lingkungan [17], [18], [19]. Kajian ini bertujuan meninjau berbagai penelitian terkait peningkatan produktivitas *solar still* melalui penerapan kondensor dengan berbagai konfigurasi dan material. Fokus pembahasan mencakup prinsip kerja kondensasi, jenis serta desain material kondensor, dan integrasinya dengan kolam garam sebagai sistem penyimpanan panas. Secara khusus, kajian ini diarahkan untuk mengidentifikasi parameter desain kondensor yang paling berpengaruh terhadap peningkatan laju kondensasi, menyajikan perbandingan kuantitatif peningkatan efisiensi dari masing-masing tipe kondensor (internal, eksternal, spiral, dan konikal), serta merumuskan rekomendasi desain yang dapat meningkatkan produktivitas *solar still* minimal 15–35% berdasarkan data empiris penelitian sebelumnya. Melalui tinjauan ini diharapkan diperoleh pemahaman yang komprehensif

mengenai strategi desain kondensor yang efektif untuk meningkatkan produktivitas *solar still*, khususnya tipe kolam garam, sebagai solusi desalinasi air laut yang efisien, hemat energi, dan berkelanjutan di wilayah pesisir Indonesia.

2 DESALINASI TENAGA SURYA

Desalinasi tenaga surya merupakan proses pemisahan garam dan mineral dari air laut dengan memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber panas utama. Prinsip dasarnya mengikuti mekanisme alamiah siklus hidrologi, di mana air laut mengalami evaporasi akibat pemanasan, kemudian uap yang terbentuk dikondensasikan menjadi air tawar pada permukaan dingin. Sistem ini dikenal dengan istilah *solar still* dan banyak diterapkan di wilayah pesisir dengan ketersediaan energi surya yang tinggi [1], [2], [20].

Proses desalinasi secara umum melibatkan dua tahapan utama: evaporasi dan kondensasi. Tahap pertama dimulai ketika radiasi matahari mengenai permukaan air laut di kolam penguapan, menyebabkan peningkatan energi kinetik molekul air dan menghasilkan uap. Uap air yang terbentuk mengandung panas laten yang kemudian dilepaskan pada tahap kondensasi ketika uap bersentuhan dengan permukaan dingin (*condensing cover*) [4], [21]. Energi panas yang dilepaskan selama kondensasi menjadi indikator utama efisiensi sistem desalinasi. Semakin besar perbedaan suhu antara permukaan air dan kondensor, semakin tinggi laju kondensasi dan volume air tawar yang dihasilkan [5].

Kinerja sistem desalinasi tenaga surya dipengaruhi oleh radiasi matahari, suhu air, kelembapan udara, tekanan uap, serta desain kondensor dan material penyerap panas [6]. Efisiensi energi pada sistem ini dapat dianalisis melalui keseimbangan termal antara energi yang diserap, digunakan untuk penguapan, dan hilang akibat konduksi serta konveksi. Untuk meningkatkan efisiensi, beberapa penelitian mengintegrasikan sistem desalinasi dengan kolektor panas surya, kolam garam sebagai penyimpan energi, atau kondensor eksternal berbasis logam konduktif tinggi [7].

Terdapat dua tipe utama sistem desalinasi tenaga surya, yaitu pasif dan aktif. Pada sistem pasif, pemanasan dan kondensasi terjadi secara alami tanpa bantuan mekanis, sedangkan sistem aktif menggunakan pompa atau kipas untuk meningkatkan sirkulasi udara dan laju perpindahan panas [8], [22]. Integrasi dengan kondensor eksternal terbukti dapat meningkatkan produktivitas air tawar hingga 30–40% dibandingkan sistem konvensional karena mampu mempercepat proses pendinginan uap air [4].

Sementara itu, kondensor kerucut (*conical condenser*) menawarkan efisiensi termal yang lebih baik melalui peningkatan luas permukaan kondensasi [1].

Peran kolam garam (*salt pond*) dalam sistem desalinasi tenaga surya semakin menarik perhatian karena kemampuannya menyimpan energi panas dalam lapisan bawah yang lebih pekat. Kolam ini bertindak sebagai penyimpan panas laten alami, mempertahankan suhu tinggi meskipun radiasi matahari berkurang, sehingga proses evaporasi dapat berlangsung lebih stabil sepanjang hari [10]. Dengan integrasi yang tepat, kombinasi antara kolam garam dan kondensor eksternal mampu meningkatkan laju kondensasi, mengurangi kehilangan energi, dan memperpanjang durasi operasi sistem desalinasi.

Secara keseluruhan, prinsip dasar desalinasi tenaga surya menekankan pada efisiensi perpindahan energi panas dan pengendalian kondisi termal antara evaporator dan kondensor. Pemilihan konfigurasi sistem, material penutup, dan mekanisme kondensasi menjadi faktor utama yang menentukan performa. Dengan optimalisasi faktor-faktor tersebut, teknologi desalinasi berbasis energi surya dapat menjadi solusi berkelanjutan dalam penyediaan air bersih di wilayah pesisir dengan keterbatasan sumber air tawar.

3 MEKANISME PROSES KONDENSASI

Proses kondensasi merupakan tahap penting dalam sistem desalinasi tenaga surya, di mana uap air hasil penguapan didinginkan hingga mencapai suhu jenuhnya dan berubah menjadi cairan. Mekanisme ini terjadi akibat perbedaan suhu antara uap air panas di ruang evaporator dan permukaan kondensor yang memiliki suhu lebih rendah. Energi panas yang dilepaskan selama proses perubahan fase tersebut dikenal sebagai panas laten kondensasi, yang secara langsung berpengaruh terhadap efisiensi sistem desalinasi [1].

Jenis kondensor yang digunakan dalam sistem desalinasi tenaga surya beragam, meliputi kondensor internal, eksternal, dan kerucut (*conical condenser*). Kondensor internal menggunakan permukaan kaca atau akrilik penutup *solar still* sebagai media kondensasi. Uap air mengembun di sisi dalam permukaan penutup dan mengalir ke saluran pengumpulan air tawar. Kondensor eksternal bekerja secara terpisah dari ruang evaporasi, dengan uap air dialirkan melalui saluran menuju tabung atau pipa pendingin. Sistem ini memungkinkan pengendalian suhu kondensasi secara aktif menggunakan pendingin udara atau air [5], [23]. Kondensor kerucut, seperti yang diterapkan pada desain *conical solar still*, memperluas area kontak dan memanfaatkan aliran

gravitasi untuk mempercepat pengumpulan kondensat. Desain ini terbukti meningkatkan efisiensi perpindahan panas hingga 35% dibandingkan desain konvensional [6].

Material seperti tembaga dan aluminium meningkatkan perpindahan panas, sementara permukaan hidrofobik dan tekstur mikro–nano mempercepat pelepasan tetesan air melalui mekanisme *dropwise condensation*, meningkatkan efisiensi hingga 50% [7]. Sebaliknya, permukaan hidrofilik menahan air dalam bentuk lapisan tipis yang menurunkan efisiensi, namun memberikan kestabilan suhu yang lebih baik pada area kondensasi luas [8].

Dalam beberapa penelitian terbaru, sistem kondensasi diintegrasikan dengan kolam garam (*salt pond*) sebagai media penyimpan panas dan pendingin alami. Kolam garam terdiri atas tiga lapisan termal: *upper convective zone* (UCZ), *non-convective zone* (NCZ), dan *lower convective zone* (LCZ). Lapisan bawah menyerap panas dari radiasi matahari, sementara lapisan atas menjaga suhu rendah untuk memperkuat perbedaan suhu antara uap dan kondensor [10]. Integrasi kolam garam terbukti meningkatkan efisiensi energi hingga 20–25% karena mempertahankan perbedaan suhu yang stabil sepanjang hari [24].

Selain itu, kemiringan kondensor 30–40° dan ventilasi pasif membantu mencegah pembentukan film air yang menghambat perpindahan panas. Secara keseluruhan, optimalisasi ΔT , sifat permukaan kondensor, dan stabilitas termal media pendingin menjadi kunci peningkatan efisiensi kondensasi dalam sistem *solar still* [25]. Penggunaan sistem pendinginan aktif dengan sirkulasi air atau udara juga dapat menggandakan koefisien perpindahan panas, namun memerlukan energi tambahan. Oleh karena itu, pendekatan pasif seperti penggunaan material berdaya serap tinggi dan desain geometris efisien lebih disarankan untuk sistem desalinasi skala kecil berbasis tenaga surya.

Secara keseluruhan, proses kondensasi dalam desalinasi tenaga surya merupakan fenomena termodinamika kompleks yang melibatkan interaksi antara energi panas, material, geometri sistem, dan kondisi lingkungan. Optimalisasi desain kondensor, baik melalui peningkatan konduktivitas termal maupun integrasi kolam garam sebagai pendingin alami, dapat meningkatkan produktivitas air tawar tanpa ketergantungan pada sumber energi tambahan. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme kondensasi ini menjadi dasar penting dalam pengembangan teknologi desalinasi masa depan yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

4 KONDENSOR INTERNAL

Kondensor internal merupakan desain paling sederhana yang banyak digunakan dalam sistem *single-basin solar still*. Pada sistem ini, proses kondensasi berlangsung di dalam ruang distilasi itu sendiri. Uap air yang terbentuk akibat pemanasan air laut oleh energi matahari naik ke bagian atas ruang evaporator, kemudian bersentuhan dengan permukaan penutup kaca atau pelat logam yang lebih dingin dan mengalami kondensasi. Tetesan air tawar hasil kondensasi kemudian mengalir ke saluran penampungan di sisi bawah [4], [26]. Berbagai studi menunjukkan bahwa pendinginan penutup kaca melalui aliran lapisan air tipis atau pengaturan ketebalan film pendingin dapat menurunkan suhu permukaan kondensor sehingga memperbesar selisih suhu dengan uap air dan meningkatkan laju kondensasi [27].

Kelebihan utama kondensor internal terletak pada efisiensi termalnya yang tinggi karena seluruh proses terjadi dalam satu ruang tertutup, sehingga kehilangan panas ke lingkungan sangat kecil. Desain ini juga tidak memerlukan tambahan energi pendingin maupun sistem pipa eksternal. Namun, keterbatasan yang muncul adalah area kondensasi yang terbatas, sulitnya menjaga kestabilan suhu permukaan kondensor. Selain itu, tetesan air yang terbentuk di bagian dalam kaca penutup dapat menurunkan transmisi cahaya matahari, sehingga mengurangi intensitas radiasi yang diterima oleh air laut di bawahnya [13]. Kondensor internal paling cocok digunakan untuk aplikasi skala kecil di daerah dengan intensitas radiasi tinggi dan kebutuhan air yang tidak terlalu besar. Potensi peningkatan performa kondensor internal masih dapat dilakukan melalui pemanfaatan area kondensasi tambahan pada dinding bagian dalam. Suwandono dkk. (2023) menunjukkan bahwa pemanfaatan dinding sisi utara pada *double-slope solar still* sebagai permukaan kondensasi aktif dapat meningkatkan efisiensi sistem hingga 68,58% [27]. Hal ini menegaskan bahwa optimalisasi distribusi suhu permukaan penutup, pengendalian pola aliran kondensat, serta perluasan area kondensasi pasif merupakan strategi penting untuk meningkatkan produktivitas kondensor internal.

5 KONDENSOR EKSTERNAL

Kondensor eksternal ditempatkan di luar ruang evaporator dan dihubungkan melalui saluran uap. Desain ini memungkinkan pemisahan antara proses penguapan dan pendinginan, sehingga suhu kondensor dapat dikontrol secara independen. Uap air

yang terbentuk di evaporator dialirkan melalui pipa menuju kondensor eksternal yang berfungsi sebagai media pendingin utama. Udara sekitar atau air pendingin sering dimanfaatkan untuk menurunkan suhu permukaan kondensor, baik melalui konveksi alami maupun sistem pendingin aktif [13], [14], [28]. Dengan pemisahan ruang evaporasi dan kondensasi, gradien suhu yang dihasilkan dapat dijaga lebih stabil sehingga kinerja kondensasi lebih konsisten sepanjang hari.

Penelitian oleh Abo-Elfadl dkk. [13] menunjukkan bahwa penerapan kondensor eksternal mampu meningkatkan produktivitas air tawar hingga 30% dibanding sistem konvensional. Desain ini juga memungkinkan penggunaan material kondensor dengan konduktivitas tinggi seperti tembaga atau aluminium tanpa terpapar langsung pada lingkungan salin yang korosif. Keuntungan lain dari sistem eksternal adalah fleksibilitas desain pipa dan penukar panas, sehingga kondensor dapat ditempatkan pada area yang mendapatkan aliran udara lebih baik untuk memperbesar koefisien konveksi. Selain itu, penerapan pipa kondensat eksternal sebagai sistem *heat recovery* juga terbukti efektif. Syafwansyah dkk. (2015) melaporkan peningkatan efisiensi 33,26 % pada *basin solar still* dengan penambahan *solar collector* sebagai pemanas awal dan pipa kondensat sebagai penukar panas sekunder [29]. Rahmani dan Boutriaa [19] melaporkan bahwa sistem distilasi dengan kondensor eksternal memiliki efisiensi termal lebih tinggi karena kehilangan panas dapat dikendalikan dengan baik melalui isolasi termal saluran uap dan penggunaan pelat logam tipis berpendingin udara.

Meskipun demikian, sistem eksternal memerlukan desain pipa uap yang baik agar tekanan dan kecepatan aliran uap tetap stabil. Penggunaan pipa yang terlalu panjang dapat menyebabkan kehilangan tekanan dan kondensasi dini sebelum mencapai unit pendingin. Untuk mencegah hal tersebut, diameter pipa, tingkat kemiringan, dan jarak antar-komponen harus dioptimalkan agar tekanan parsial uap tetap cukup tinggi untuk proses kondensasi efisien. Oleh sebab itu, optimasi jarak antara evaporator dan kondensor menjadi salah satu faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi sistem [4], [19].

6 KONDENSOR SPIRAL

Kondensor spiral merupakan inovasi yang bertujuan memperluas area kontak antara uap air dan permukaan pendingin tanpa memperbesar volume sistem. Desain ini biasanya menggunakan pipa tembaga melingkar yang dililitkan membentuk spiral horizontal atau vertikal. Uap air mengalir melalui

pipa tersebut dan mengembun pada dinding bagian dalamnya, sedangkan udara luar atau fluida pendingin mengalir di bagian luar spiral untuk mempercepat proses pelepasan panas [30], [31], [32], Konfigurasi spiral meningkatkan luas permukaan per satuan volume sehingga proses perpindahan panas berlangsung lebih intensif dibanding pipa lurus.

Penelitian oleh Kurniawan dkk. [24] menunjukkan bahwa kondensor spiral mampu meningkatkan efisiensi perpindahan panas secara signifikan dibanding desain pipa lurus karena luas permukaan kondensasi lebih besar. Selain itu, bentuk spiral memungkinkan sirkulasi udara alami di sekitar kondensor, sehingga mendukung pendinginan tanpa kebutuhan energi tambahan. Aliran udara di sekitar lilitan spiral juga menghasilkan gradien suhu yang lebih stabil, mengurangi fluktuasi termal yang sering terjadi pada desain sederhana. Desain ini juga memberikan distribusi suhu yang merata di sepanjang pipa, mengurangi risiko titik panas (*hot spots*) yang dapat menurunkan efisiensi kondensasi.



Gambar 1 Peralatan proses pirolisis sampah plastik, (A) reaktor distilasi, (B) kondensor pipa alur spiral, (C) tanki air pendingin, (D) temperatur indikator. [31]



Gambar 2 Pipa kondensor spiral hasil rancangan. [31]

Penerapan kondensor spiral juga terbukti efektif pada sistem pirolisis dan distilasi termal lainnya. Batutah dan Arifin [31] melaporkan peningkatan efisiensi perpindahan panas hingga 25% dibanding desain konvensional karena pola aliran uap yang lebih stabil dan pengendalian kondensat yang lebih baik. Selain itu, penurunan tekanan uap di sepanjang pipa spiral umumnya lebih rendah dibanding pipa yang memiliki belokan tajam, sehingga kondensasi lebih terkendali dan tidak terjadi pengembunan dini di area yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, desain spiral direkomendasikan untuk sistem desalinasi berskala kecil hingga menengah yang membutuhkan efisiensi tinggi dengan ruang instalasi terbatas.

7 KONDENSOR KONIKAL (KERUCUT)

Kondensor konikal atau berbentuk kerucut merupakan desain yang memberikan efisiensi termal paling tinggi di antara tipe lainnya. Mugisidi dkk. [1] melaporkan bahwa bentuk kerucut memungkinkan distribusi suhu yang merata pada seluruh permukaan kondensor, sehingga proses kondensasi terjadi lebih cepat dan merata. Uap air yang naik ke bagian puncak ruang distilasi mengalir ke bawah melalui permukaan *condensing plate* berbentuk kerucut dan mengembun sepanjang lintasan menuju saluran penampungan di dasar sistem. Bentuk kerucut alami ini juga membantu mempercepat aliran kondensat dengan memanfaatkan gaya gravitasi, sehingga mencegah akumulasi tetesan air di permukaan kondensor. Pada praktik lapangan, peningkatan performa desain *double-slope* dan varian geometri lain kerap dikaitkan dengan optimasi area kondensasi dan kontrol suhu permukaan, sejalan dengan temuan bahwa sudut kaca/penutup menentukan energi yang diteruskan dan pola kondensasi—konteks ini memperkuat argumen efisiensi bentuk kerucut yang meratakan distribusi suhu [33]. Geometri kerucut juga mengurangi hambatan termal karena luas permukaan meningkat seiring penurunan radius menuju dasar, sehingga laju kondensasi dapat berlangsung lebih kontinu.

Penelitian oleh Najjar dkk. [4] menunjukkan bahwa penggunaan kondensor konikal dapat meningkatkan efisiensi sistem hingga 20% dibandingkan desain datar konvensional. Sementara itu, Abdullah dan Omara [15] melaporkan peningkatan produktivitas air tawar sebesar 18–22% ketika kondensor konikal diintegrasikan dengan reflektor eksternal. Bentuk kerucut memberikan keunggulan aerodinamis dan termal, karena meminimalkan gradien suhu vertikal serta mendukung aliran uap yang lebih seragam dari seluruh arah ruang evaporator. Efektivitas ini diperkuat oleh kemampuan bentuk kerucut untuk mempertahankan suhu permukaan kondensor lebih rendah pada area yang lebih luas, sehingga memperbesar perbedaan suhu antara uap dan kondensor yang menjadi faktor utama percepatan kondensasi.



Gambar 3 Skema penyulingan surya yang terintegrasi dengan kondensor kerucut. [1]

Selain efisiensinya yang tinggi, desain konikal juga relatif mudah diintegrasikan dengan sistem kolam garam. Kolam garam berperan sebagai penyimpan panas sekaligus sumber pendinginan alami pada malam hari, menjaga suhu kondensasi tetap stabil dan mendukung operasi sistem secara berkelanjutan [34], [11], [19]. Integrasi ini memberikan keuntungan tambahan berupa stabilitas termal jangka panjang, karena kolam garam mampu mempertahankan suhu rendah pada permukaan kondensor meskipun terjadi fluktuasi suhu lingkungan. Dengan demikian, kondensor konikal dinilai paling potensial untuk dikembangkan dalam sistem desalinasi tropis yang memerlukan efisiensi tinggi, stabilitas termal, dan kemudahan perawatan.

8 DESAIN DAN MATERIAL KONDENSOR

Kondensor merupakan elemen kunci dalam sistem desalinasi tenaga surya yang berfungsi mengubah uap air menjadi air tawar melalui proses kondensasi. Efektivitasnya sangat bergantung pada desain geometri, karakteristik material, serta kemampuan sistem dalam mempertahankan perbedaan suhu antara uap air dan permukaan kondensasi. Dalam sistem kolam garam tertutup, kombinasi aspek desain dan material menentukan seberapa besar energi panas dapat ditransfer dan seberapa cepat proses kondensasi berlangsung [1], [4] [35].

Desain kondensor yang banyak digunakan meliputi bentuk datar, spiral, eksternal, dan kerucut (*conical condenser*). Kondensor eksternal memiliki efisiensi tinggi karena mampu menjaga gradien suhu besar antara uap air dan udara pendingin [3], [14]. Model spiral meningkatkan waktu kontak uap dengan dinding kondensor, memperbesar laju perpindahan panas [31]. Sedangkan desain kerucut terbukti meningkatkan luas permukaan kondensasi hingga 35% dibanding model datar dan memfasilitasi aliran gravitasi kondensat secara alami [1], [15]. Pemanfaatan *vortex generator* di sekitar saluran pendingin juga dapat meningkatkan turbulensi udara dan memperbesar laju perpindahan panas konvektif [10], [30].

Pemilihan material kondensor harus mempertimbangkan dua hal utama: konduktivitas termal dan ketahanan korosi. Tembaga memiliki konduktivitas termal tertinggi di antara material umum (sekitar 385 W/m·K), sehingga mampu menghantarkan panas lebih cepat namun rentan oksidasi di lingkungan garam [1]. Aluminium menjadi alternatif yang lebih ringan dan tahan korosi meskipun konduktivitasnya lebih rendah (sekitar 205 W/m·K) [25]. *Stainless steel* unggul dalam ketahanan kimia namun memiliki efisiensi perpindahan panas

lebih rendah, sehingga laju kondensasinya lebih lambat [17]. Bahan kaca digunakan pada sistem *solar still* karena transparan terhadap radiasi matahari dan dapat berfungsi ganda sebagai atap sekaligus kondensor [15], [19]. Sudut kemiringan sekitar 30° terbukti optimal untuk mempercepat aliran kondensat dan mengurangi retensi uap pada permukaan [18].

Inovasi terkini menekankan penggunaan lapisan permukaan hidrofobik untuk mendorong mekanisme *dropwise condensation*. Permukaan ini memungkinkan terbentuknya tetesan kecil yang cepat dilepaskan dari permukaan, mengurangi hambatan termal dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas [36], [37]. Penggunaan pelapis nanosilika atau fluoropolimer mampu menurunkan sudut kontak air di bawah 80°, sehingga meningkatkan laju pengumpulan air tawar. Selain itu, penerapan struktur mikro pada permukaan kondensor terbukti memperbesar densitas titik kondensasi dan efisiensi energi sistem secara keseluruhan.

Efisiensi kondensor dipengaruhi oleh perbedaan suhu antara uap air dan permukaan pendingin. Semakin besar selisih suhu, semakin tinggi laju kondensasi yang terjadi [3], [13]. Dalam sistem tanpa pendingin aktif, perbedaan suhu 5–15°C umumnya menghasilkan efisiensi 60–70%. Peningkatan performa hingga 80% dapat dicapai dengan menambahkan pendingin udara aktif atau sistem sirkulasi air [16]. Penambahan sirip aluminium, pipa spiral, atau lapisan pendingin cair memperluas area transfer panas dan mempercepat laju kondensasi [31], [38], [39]. Hasil eksperimen lain juga menegaskan bahwa penambahan dinding kondensasi berpendingin air mampu menurunkan temperatur kaca hingga 2–3 °C dan meningkatkan efisiensi sistem sebesar 5–6 % dibanding sistem tanpa pendingin [27], [40].

Integrasi kondensor dengan kolam garam juga memberikan keuntungan termal tambahan. Panas yang dilepaskan dari proses kondensasi diserap kembali oleh media air garam sehingga mempertahankan suhu evaporator. Dengan demikian, sistem bekerja secara siklik dan efisien tanpa kehilangan energi signifikan [34], [11]. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya sistem desalinasi tertutup yang hemat energi dan berkelanjutan untuk produksi air tawar di wilayah pesisir.

9 KESIMPULAN

Kondensor memiliki peran vital dalam sistem desalinasi tenaga surya karena menentukan efisiensi konversi uap air menjadi air tawar. Proses kondensasi berlangsung melalui perpindahan panas dari uap air ke permukaan padat yang memiliki suhu lebih rendah hingga terjadi perubahan fase dari gas menjadi cair.

Efisiensi proses ini sangat dipengaruhi oleh desain geometri kondensor, sifat termal material yang digunakan, kondisi pendinginan, serta interaksi antar parameter termodinamika sistem secara keseluruhan. Hasil kajian menunjukkan bahwa peningkatan perbedaan suhu antara uap dan permukaan kondensor (ΔT) sebesar 8–15°C dapat meningkatkan laju kondensasi secara signifikan, sehingga desain kondensor harus fokus mempertahankan stabilitas gradien suhu tersebut.

Secara umum, desain kondensor pada sistem desalinasi terbagi menjadi tiga jenis utama, yaitu kondensor internal, eksternal, dan konikal. Kondensor internal memiliki keunggulan dalam efisiensi energi karena uap air mengembun di dalam ruang yang sama dengan evaporator sehingga kehilangan panas dapat diminimalkan. Kondensor eksternal, sebaliknya, memungkinkan kontrol suhu yang lebih baik karena berada di luar sistem utama dan dapat menggunakan fluida pendingin tambahan. Penerapan kondensor eksternal terbukti meningkatkan produktivitas sistem desalinasi hingga 20–30% dibanding sistem tanpa kondensor tambahan. Sedangkan desain kondensor konikal memanfaatkan gaya gravitasi dan distribusi suhu yang merata pada permukaannya untuk mempercepat proses pengembunan dan memfasilitasi pengaliran kondensat menuju wadah penampung dengan efisiensi tinggi.

Faktor material kondensor juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi perpindahan panas. Material logam seperti tembaga dan aluminium dikenal memiliki konduktivitas termal tinggi, masing-masing sekitar 385 W/m·K sampai 205 W/m·K, sehingga mampu mempercepat proses pelepasan panas. Namun, karena lingkungan operasi bersifat korosif, material ini sering dilapisi dengan pelapis pelindung seperti *anodized layer* atau dipadukan dengan *stainless steel* untuk meningkatkan ketahanan. Lapisan hidrofobik terbukti meningkatkan efisiensi kondensasi hingga 60% melalui mekanisme *dropwise condensation*, yang mengurangi hambatan termal dan menjaga permukaan tetap aktif menerima uap baru. Penggunaan nanofluida sebagai media pendingin pada kondensor eksternal juga meningkatkan efisiensi sistem sebesar 25–35% berkat peningkatan konduktivitas termal fluida.

Penerapan lapisan hidrofobik menghasilkan mode kondensasi tipe *dropwise condensation* yang terbukti meningkatkan koefisien perpindahan panas hingga 60% dibanding *filmwise condensation*. Mekanisme ini menjaga permukaan kondensor tetap aktif untuk menerima uap baru karena tetesan air langsung tergelincir setelah terbentuk, sehingga tidak menghambat proses pendinginan. Selain itu,

penggunaan nanofluida sebagai media pendingin kondensor eksternal—misalnya campuran air dengan nanopartikel logam oksida seperti Al_2O_3 atau CuO —meningkatkan luas kontak termal antara fluida dan dinding kondensor. Efek konduktivitas termal yang lebih tinggi dari nanofluida ini dapat meningkatkan efisiensi sistem hingga 25–35%.

Penelitian juga menunjukkan bahwa desain spiral, sirip longitudinal, dan kondensor berbentuk kerucut meningkatkan distribusi panas secara merata serta memperpanjang waktu kontak antara uap air dan permukaan kondensasi. Penambahan elemen pengarah aliran seperti *vortex generator* meningkatkan turbulensi lokal sehingga laju konveksi termal meningkat tanpa penambahan energi signifikan. Sistem ventilasi pasif atau aktif pada kondensor kolam garam juga membantu menjaga sirkulasi udara sehingga proses kondensasi dapat berjalan berkesinambungan tanpa jenuh uap berlebih di dalam sistem.

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa kinerja kondensor dapat ditingkatkan melalui beberapa pendekatan terpadu:

1. Optimalisasi geometri kondensor, seperti bentuk konikal, spiral, atau ber-sirip untuk memperbesar luas permukaan pendinginan.
2. Pemilihan material dengan konduktivitas termal tinggi yang dipadukan dengan ketahanan korosi baik, seperti kombinasi aluminium anodized dan stainless steel.
3. Penerapan lapisan fungsional, misalnya lapisan hidrofobik atau nano-coating untuk mendorong *dropwise condensation*.
4. Pemanfaatan fluida kerja inovatif, termasuk nanofluida dengan partikel logam oksida untuk meningkatkan efisiensi pendinginan.
5. Integrasi sistem kontrol termal dan ventilasi, baik aktif maupun pasif, guna menjaga kestabilan suhu dan tekanan di ruang kondensasi.

Dengan kombinasi tersebut, sistem kondensor kolam garam mampu mencapai efisiensi termal hingga 35% lebih tinggi dibanding sistem konvensional, menjadikannya solusi potensial dalam pengembangan teknologi desalinasi tenaga surya yang ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan. Implementasi sistem ini sangat relevan bagi wilayah pesisir Indonesia yang menghadapi keterbatasan air bersih, sekaligus mendukung pengembangan energi terbarukan berbasis panas matahari.

KEPUSTAKAAN

- [1] D. Mugisidi, B. Fajar, S. Syaiful, and T.

- Utomo, "Solar Still with an Integrated Conical Condenser," vol. 8, no. 8, pp. 122–134, 2023.
- [2] Muhammad Irham, H. F. Sangian, and M. D. Bobanto, "Desain dan Konstruksi Alat Desalinasi Air Laut Dengan Menggunakan Metode Destilasi Konvektif Dipaksakan," *J. Lppm Bid. Sains Dan Teknol.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.35801/jlppmsains.9.1.2024.51260.
- [3] A. T. Sayuti, D. Mugisidi, R. Wirangga, O. Heriyani, and J. T. Mesin, "THE INFLUENCE OF WATER TEMPERATURE ON SEAWATER EVAPORATION IN THE DESALINATION PROCESS," pp. 113–119, 2023, doi: 10.24853/sintek.17.2.113-119.
- [4] A. Najjar, M. Nooman, and M. Elgendi, "Energy Conversion and Management: X Evaluating the effect of external and internal condensers on the productivity of solar stills : A review," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 24, no. September, p. 100763, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100763.
- [5] T. Rosari, W. Hadi, and A. Masduqi, "DESALINASI AIR PAYAU MENGGUNAKAN ENERGI SOLAR DENGAN PARABOLIC TROUGH BRACKISH WATER DESALINATION USING SOLAR ENERGY".
- [6] E. Equipment, "Experimental comparison of internal and external condensers effect on the energy consumption of household refrigerators," vol. 10, no. 1, pp. 13–26, 2022.
- [7] A. R. Fachrudin, "PENGARUH PANJANG KONDENSOR TERHADAP KINERJA TERMAL HEAT PIPE Arif Rochman Fachrudin," vol. 20, no. 1, pp. 47–52, 2020.
- [8] S. Iqbal, S. Sukmawaty, G. M. Dwi Putra, and D. A. Setiawati, "Analisis Kinerja Alat Desalinasi Air Laut Penghasil Air Tawar Dan Garam Dengan Menggunakan Tenaga Surya," *J. Agrotek Ummat*, vol. 6, no. 1, p. 29, 2019, doi: 10.31764/agrotek.v6i1.988.
- [9] Y. Effendi, A. Rosyidin, and B. Setiawan, "Peningkatan Performa Termal Dengan Menggunakan Vortex Generators Didalam Saluran Persegi Panjang Vortex generators (VGs) are an effective method for improving the thermal performance of heat exchangers . This study aims to optimize the heat transfer rat," vol. 13, no. 1, pp. 117–126, 2024.
- [10] D. Mugisidi, O. Heriyani, P. H. Gunawan, and D. Apriani, "Performance Improvement of a Forced Draught Cooling Tower Using a Vortex Generator," vol. 1, no. 1, pp. 45–57, 2021.
- [11] D. N. U. Agustina, . S., and . Y., "Analisis Potensi Pengembangan Teknologi Desalinasi Air Laut Sebagai Penyedia Air Bersih di Desa Watukarung Kabupaten Pacitan," *J. Phi J. Pendidik. Fis. dan Fis. Terap.*, vol. 2, no. 2, p. 7, 2021, doi: 10.22373/p-jpft.v2i2.9531.
- [12] A. E. Kabeel, Z. M. Omara, and F. A. Essa, "Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids : An experimental approach," vol. 78, pp. 493–498, 2014.
- [13] S. Abo-elfadl, M. S. Yousef, and H. Hassan, "Energy, exergy, economic and environmental assessment of using Different passive condenser designs of solar distiller," *Process Saf. Environ. Prot.*, no. October, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.10.022.
- [14] R. A. Kumar, G. Esakkimuthu, and K. K. Murugavel, "Performance enhancement of a single basin single slope solar still using agitation effect and external condenser," *DES*, vol. 399, pp. 198–202, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.09.006.
- [15] A. S. Abdullah and Z. M. Omara, "Experimental Heat Transfer : A Journal of Thermal Energy Generation , Transport , Storage , and Conversion Experimental Study of Stepped Solar Still Integrated with Reflectors and External Condenser," no. October 2014, pp. 37–41, 2015, doi: 10.1080/08916152.2014.890964.
- [16] A. Rahmani, F. Khemmar, and Z. Saadi, "Experimental investigation on the negative effect of the external condenser on the conventional solar still performance," *Desalination*, vol. 501, no. December 2020, p. 114914, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114914.
- [17] D. Mugisidi, A. Fajar, O. Heriyani, D. T. Mesin, F. Teknik, and U. M. Prof, "Peningkatan efisiensi dan efektivitas kondensor pada," vol. 12, no. 1, 2022.
- [18] H. H. Tanusekar and A. T. Sutanahaji, "Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Desalinasi Sistem Penyulingan menggunakan Panas Matahari dengan Pengaturan Tekanan Udara Design Build and Test Performance Tools Distillation Desalination System using Solar Heat with Air Pressure Settings," *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [19] A. Rahmani and A. Boutriaa, "Numerical and

- experimental study of a passive solar still integrated with an external condenser ScienceDirect Numerical and experimental study of a passive solar still integrated with an external condenser,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 48, pp. 29047–29055, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.242.
- [20] D. Gaib, A. Arbie, and D. G. E. Setiawan, “Rancang Bangun Alat Destilasi Air Laut Menggunakan Tenaga Matahari Sebagai Alternatif Penyediaan Air Bersih,” *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 8, no. 1, pp. 37–43, 2023, doi: 10.35508/fisa.v8i1.11822.
- [21] Haryadi, I. Rosyadi, N. K. Caturwati, and A. Maulana, “Rancang Bangun Alat Destilasi Air Laut,” *J. Tek.*, vol. 12, no. 3, pp. 431–438, 2016.
- [22] F. C. Nababan and H. Ambarita, “Rancang Bangun Alat Desalinasi Air Laut Sistem Vakum Natural dengan Media Evaporator dan Kondensor yang dimodifikasi Flange,” *Cylind. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 16–25, 2017, [Online]. Available: <https://ejournal.atmajaya.ac.id/index.php/cylinder/article/view/4265>
- [23] V. Haldkar, A. Kumar, R. K. Ranjan, and V. K. Bajpai, “An Energy Analysis of Condenser,” pp. 120–125, 2013.
- [24] D. Mulyadi, D. Rusirawan, and I. Novrita, “Desain Pembangkit Listrik Turbin Uap Berbahan Bakar Batu Bara yang Efektif dan Ramah Lingkungan,” vol. 17, no. 1, pp. 58–68, 2023.
- [25] S. F. Karo Karo, D. Darianto, and M. Idris, “Analisis Efektivitas Perpindahan Panas Kondensor pada Proses Destilasi Daun Serai Wangi,” *J. Ilm. Tek. Mesin Ind.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–40, 2023, doi: 10.31289/jitmi.v2i1.1951.
- [26] M. A. Al-nimr and M. Dahdolan, “ScienceDirect Modeling of a novel concentrated PV / T distillation system enhanced with a porous evaporator and an internal condenser,” vol. 120, pp. 593–602, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.08.006.
- [27] N. R. Ismail, P. Suwandono, D. Hermawan, and F. D. Anggraeni, “Pemanfaatan dinding sebagai permukaan kondensasi untuk meningkatkan kinerja solar still double slope,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 70–79, 2023, doi: 10.24127/trb.v12i1.2439.
- [28] A. E. Kabeel, Z. M. Omara, and F. A. Essa, “Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser,” vol. 75, pp. 77–86, 2017.
- [29] M. S. Effendi, A. Hendrawan, and N. Rahman, “Penggunaan Solar Collector Sebagai Pemanas Awal Air Masuk dan Pemanas Tambahan Bawah Heat Absorber Pada Basin Solar Still Untuk Meningkatkan Efisiensi,” *Poros Tek.*, vol. 8, no. 2, p. 68, 1970, doi: 10.31961/porosteknik.v8i2.369.
- [30] W. Kurniawan, M. Amin, and N. A. Abdullah, “Solar Distillation Experiment Parabolic dish integrated with Spiral Copper Tube Condenser,” no. 3, 2025.
- [31] M. A. Batutah and D. Arifin, “Perancangan Spiral Kondensor untuk Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Proses Pirolisis (Design of Spiral Condenser for Processing Plastic Waste into Oil Fuel by Pyrolysis Process) diinginkan dan pengerjaan dengan urutan pelaksan,” vol. 6, no. 2, pp. 174–183, 2021.
- [32] L. Xu, Y. P. Chen, P. H. Wu, and B. J. Huang, “Humidification-Dehumidification (HDH) desalination system with air-cooling condenser and cellulose evaporative pad,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/w12010142.
- [33] A. Ghazy, “Theoretical study of a double-slope solar still with solar air heater condenser,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 12, no. 6, pp. 977–986, 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.53928.
- [34] T. Putranto *et al.*, “Sistem Berkelanjutan Desalinasi Air Laut dan Produksi Garam Modern dengan Tenaga Surya di Eduwisata Mutiara Saghara,” *Sewagati*, vol. 8, no. 6, pp. 2477–2485, 2024, doi: 10.12962/j26139960.v8i6.2246.
- [35] J. jing Liu, B. Liang, J. Yang, J. Yang, and J. chun Cheng, “Generation of Non-aliased Two-dimensional Acoustic Vortex with Enclosed Metasurface,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-60836-3.
- [36] A. Alshehri, J. P. Rothstein, and H. P. Kavehpour, “Improving heat and mass transfer rates through continuous drop-wise condensation,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-98992-9.
- [37] S. Ali, T. Dbouk, G. Wang, D. Wang, and D. Drikakis, “Advancing thermal performance through vortex generators morphing,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi:

- 10.1038/s41598-022-25516-4.
- [38] M. Condensers, “Multi-Objective Constructal Optimization for Marine Condensers,” pp. 1–18, 2021.
- [39] P. K. Bansal and T. C. Chin, “Modelling and optimisation of wire-and-tube condenser ‘ lisation et optimisation d ’ un condenseur a ` tubes et fils Mode,” vol. 26, pp. 601–613, 2003.
- [40] F. D. A. Nova Risdiyanto Ismail , Purbo Suwandono , Dadang Hermawan, “PENAMBAHAN PENDINGIN PADA DINDING SEBAGAI PERMUKAAN KONDENSASI UNTUK MENINGKATKAN KINERJA SOLAR STILL DOUBLE SLOPE,” 2023.