

Tinjauan Pustaka: Kinerja Kondensor terhadap Produksi Air Tawar pada Proses Desalinasi Air Laut

Ahmad Faiz Rahmatullah, & Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Jl. Tanah Merdeka No 6 Ciracas Jakarta Timur.

E-mail: ahmadfais0809@gmail.com, Corresponding author : dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan panas buang dari sistem pendingin udara (AC) berpotensi menjadi sumber energi alternatif untuk proses desalinasi air laut. Namun, efisiensi termal sistem desalinasi sangat dipengaruhi oleh tahap kondensasi, terutama oleh bentuk dan desain kondensor yang digunakan. Tinjauan ini bertujuan untuk mengulas dan membandingkan berbagai bentuk kondensor seperti shell and tube, coiled tube, plate, dan finned condenser dalam konteks peningkatan efisiensi kondensasi dan produksi air tawar. Kajian dilakukan melalui analisis literatur dengan meninjau parameter utama seperti laju perpindahan panas, laju aliran pendingin, serta perbedaan temperatur antar fluida. Hasil review menunjukkan bahwa shell and tube condenser memiliki efektivitas perpindahan panas paling tinggi, sedangkan finned condenser lebih efisien secara energi dan mudah dirawat. Kesimpulannya, pemilihan bentuk kondensor yang tepat dapat meningkatkan efisiensi sistem desalinasi berbasis panas buang AC secara signifikan.

Kata Kunci: desalinasi, kondensor, panas buang AC, efisiensi termal, desain penukar kalor

Abstract

The utilization of waste heat from air conditioning (AC) systems has the potential to serve as an alternative energy source for seawater desalination processes. However, the thermal efficiency of desalination systems is strongly influenced by the condensation stage, particularly by the shape and design of the condenser used. This review aims to examine and compare various condenser configurations such as shell and tube, coiled tube, plate, and finned condensers in the context of improving condensation efficiency and freshwater production. The study is conducted through a literature analysis that reviews key parameters such as heat transfer rate, coolant flow rate, and temperature differences between fluids. The review results show that shell and tube condensers provide the highest heat transfer effectiveness, while plate condensers offer better energy efficiency and ease of maintenance. In conclusion, selecting the appropriate condenser design can significantly enhance the efficiency of seawater desalination systems utilizing AC waste heat.

Keywords: desalination, condenser, air conditioner waste heat, thermal efficiency, heat exchanger design

1 PENDAHULUAN

Krisis air tawar terus menjadi tantangan global, terutama di kawasan pesisir dan pulau-pulau yang memiliki keterbatasan sumber daya air tanah dan infrastruktur pengaliran. Kapasitas desalinasi global akan terus meningkat untuk memenuhi kebutuhan air tawar yang semakin besar. Dalam banyak aplikasi industri dan komersial, proses desalinasi termal (evaporasi dan kondensasi) masih digunakan karena kemampuannya untuk menangani air laut atau air dengan salinitas tinggi. Namun demikian, konsumsi energi termal yang tinggi dan biaya operasional yang besar menjadi hambatan utama dalam pengembangan teknologi ini [1], [2].

Di sisi lain, sistem pendingin udara (AC) pada bangunan dan industri melepaskan sejumlah

besar panas buang ke lingkungan. Studi menunjukkan bahwa unit AC residensial membuang panas, baik melalui kondensor maupun *superheating refrigeran*, dengan temperatur keluar yang dapat mencapai 50–60 °C atau lebih setelah kompresor [3], [4]. Pemanfaatan panas buang tersebut sebagai sumber energi alternatif untuk proses desalinasi menawarkan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Integrasi antara pemulihan panas buang AC dan sistem desalinasi termal dapat menjadi strategi penting menuju solusi air bersih yang berkelanjutan dan hemat energi [5], [6].

Tahap kondensasi yaitu proses perubahan uap hasil evaporasi menjadi air tawar, merupakan salah satu elemen paling krusial pada sistem desalinasi termal. Kinerja kondensor dalam tahap ini menentukan laju kondensasi, efisiensi perpindahan

panas, dan akhirnya produksi air tawar [7]. Berbagai penelitian mengungkap bahwa geometri kondensor, jenis aliran fluida (air laut, air pendingin, udara) material permukaan perpindahan panas, serta kondisi operasional seperti perbedaan temperatur antar fluida sangat memengaruhi performa kondensasi [8]. Misalnya, kondensor tipe *shell-and-tube* dikenal memiliki kapasitas perpindahan panas yang tinggi tetapi memerlukan ruang instalasi yang lebih besar, sementara kondensor plate atau *finned-tube* menawarkan desain yang lebih kompak dan efisien secara energi dalam kondisi tertentu [9].

Meskipun banyak studi telah membahas pemanfaatan panas buang dan pengembangan sistem desalinasi, masih terdapat gap penelitian penting terkait optimalisasi tahap kondensasi khususnya dalam konteks pemanfaatan panas buang AC bersuhu rendah (*low-grade heat*). Banyak kajian fokus pada tahap evaporasi atau penggunaan sumber panas tradisional, namun sedikit yang membandingkan secara sistematis berbagai desain kondensor dan parameternya (luas permukaan, tipe aliran, drop suhu) dalam skenario sistem desalinasi berbasis panas buang AC [10].

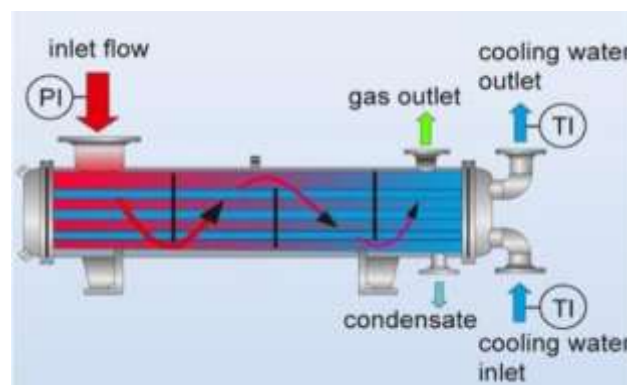
Tujuan kajian ini adalah untuk meninjau dan membandingkan kinerja berbagai bentuk kondensor dalam proses kondensasi pada sistem desalinasi air laut yang memanfaatkan panas buang dari sistem pendingin udara. Pendekatan kajian meliputi analisis literatur terkini yang membahas hubungan antara desain kondensor, parameter operasional (seperti laju aliran media pendingin, perbedaan temperatur masuk/keluar, dan material perpindahan panas), serta performa termal sistem secara keseluruhan (misalnya produksi air tawar dan efisiensi energi). Hasil tinjauan diharapkan memberikan gambaran komprehensif mengenai pengaruh desain kondensor terhadap efisiensi sistem desalinasi serta menjadi acuan awal dalam pengembangan alat desalinasi berbasis energi terbarukan. Selain itu, hasil kajian ini juga dapat menjadi dasar bagi penelitian eksperimental berikutnya yang bertujuan meningkatkan pemanfaatan panas buang dari sistem pendingin udara untuk penyediaan air bersih secara berkelanjutan.

2 SHELL AND TUBE CONDENSER

Kondensor tipe *shell and tube* merupakan salah satu desain paling konvensional yang banyak digunakan pada sistem penukar panas dan desalinasi termal berskala besar. Struktur

dasarnya terdiri dari sejumlah tabung (*tubes*) yang ditempatkan di dalam sebuah cangkang (*shell*), di mana satu fluida mengalir di dalam tabung dan fluida lainnya mengalir melintang di sisi cangkang. Desain ini memungkinkan area perpindahan panas yang luas serta kemampuan operasi pada tekanan tinggi, menjadikannya cocok untuk proses kondensasi uap air hasil desalinasi [11], [12], [13].

Dalam konteks pemanfaatan panas buang dari sistem pendingin udara (AC), tipe *shell and tube* menunjukkan potensi efisiensi termal yang tinggi karena mampu memanfaatkan temperatur buang 45–60 °C secara efektif untuk mengkondensasikan uap air laut [14]. Menurut Rady *et al.* [3], integrasi kondensor tipe ini pada sistem pemulihan panas buang AC residensial mampu meningkatkan produksi air tawar hingga 35% dibandingkan dengan sistem yang menggunakan kondensor udara konvensional. Nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan (*U*) pada desain ini dapat mencapai 1500–3000 W/m²K tergantung pada jenis material dan kondisi aliran pendingin [15].



Gambar 1 kondensor shell and tube [16]

Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Poredoš *et al.* [8] menyoroti bahwa peningkatan laju aliran fluida pendingin pada sisi tabung dari 0,5 m/s menjadi 1,5 m/s dapat meningkatkan laju kondensasi hingga 40%. Namun, peningkatan tersebut juga disertai dengan kenaikan kehilangan tekanan dan konsumsi daya pompa. Oleh karena itu, diperlukan optimasi kecepatan aliran agar diperoleh keseimbangan antara

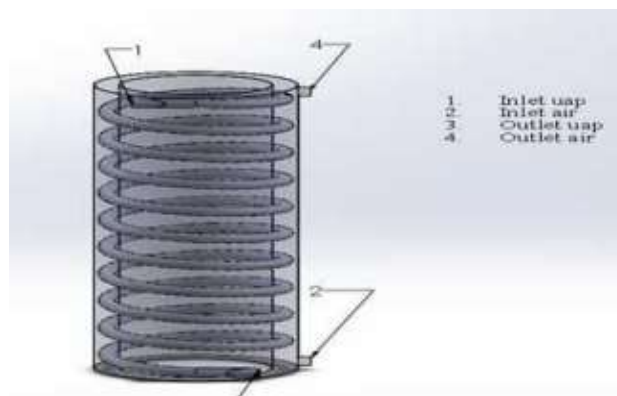
efisiensi perpindahan panas dan kebutuhan energi tambahan.

Material merupakan faktor penting yang memengaruhi performa kondensor tipe *shell and tube*. Logam dengan konduktivitas termal tinggi seperti tembaga dan kuningan banyak digunakan pada sisi tabung karena memberikan perpindahan panas yang cepat. Namun, untuk aplikasi air laut, material ini memerlukan perlindungan terhadap korosi dengan lapisan nikel atau titanium. Alternatif lainnya adalah baja nirkarat (*stainless steel*) yang lebih tahan terhadap lingkungan korosif, meskipun memiliki konduktivitas termal lebih rendah ($\sim 16 \text{ W/mK}$) [1], [17].

3 COILED TUBE CONDENSER

Kondensor tipe *coiled tube* atau spiral merupakan salah satu inovasi desain penukar panas yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi termal melalui perluasan area kontak dan pembentukan aliran turbulen alami. Struktur spiral memberikan jalur aliran yang lebih panjang dan menghasilkan gradien suhu yang lebih merata dibandingkan dengan tabung lurus, sehingga proses kondensasi berlangsung lebih efisien pada volume yang relatif kecil [1], [10], [18].

Dalam sistem desalinasi berbasis panas buang AC, tipe *coiled tube condenser* menjadi pilihan menarik karena dapat bekerja optimal pada suhu menengah ($40\text{--}60^\circ\text{C}$), yang merupakan karakteristik umum temperatur buang dari unit pendingin udara [19]. Poredoš *et al.* [8] menunjukkan bahwa desain tabung spiral dengan diameter 10 mm dan panjang efektif 2 m mampu meningkatkan laju kondensasi hingga 25 % dibandingkan tabung lurus dengan luas permukaan yang sama. Hal ini disebabkan oleh peningkatan turbulensi aliran dan koefisien perpindahan panas lokal yang lebih tinggi di sepanjang permukaan spiral.



Gambar 2 coiled tube condensor [20]

Menurut Charitar dan Madhlopa [10], efisiensi termal pada *coiled tube condenser* dapat mencapai 80–85 % dengan debit air tawar sekitar 0,8–0,9 L/jam saat digunakan bersama sumber panas rendah (*low-grade heat*). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa desain spiral memberikan keseimbangan antara efisiensi perpindahan panas dan kebutuhan ruang instalasi yang minimal.

Das dan Date [1] melaporkan bahwa peningkatan rasio kelengkungan (*curvature ratio*) pada tabung spiral memperkuat efek gaya sentrifugal yang menginduksi aliran sekunder di dalam tabung. Aliran sekunder ini memperbaiki distribusi suhu fluida, meningkatkan nilai *nusselt number*, dan mengurangi resistansi termal dinding. Secara umum, peningkatan rasio kelengkungan dari 0,1 menjadi 0,3 dapat menaikkan efisiensi kondensasi hingga 15 %.

Selain bentuk spiral tunggal, beberapa penelitian terbaru juga mengeksplorasi desain *multi-coiled condenser*, yaitu beberapa lilitan spiral disusun sejajar atau bertingkat dalam ruang kondensasi untuk memperbesar luas permukaan efektif [21]. Ammar [11] menyebutkan bahwa penggunaan tiga spiral sejajar dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas keseluruhan (U) hingga $2\,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ dengan efisiensi termal mencapai 88 %, tanpa peningkatan tekanan yang signifikan.

Kelebihan utama kondensor spiral adalah kemampuannya menghasilkan laju perpindahan panas tinggi dalam konfigurasi yang kompak. Namun, desain ini juga memiliki keterbatasan berupa peningkatan *pressure drop* pada laju

aliran tinggi dan kesulitan dalam pembersihan akibat geometri melingkar yang rumit [19]. Oleh karena itu, aplikasi kondensor spiral lebih sesuai untuk sistem desalinasi berskala kecil hingga menengah, di mana kebutuhan pemeliharaan relatif rendah [22].

Sami *et al.* [5] menekankan bahwa integrasi kondensor spiral pada sistem AC domestik mampu menurunkan temperatur refrigeran keluar kondensor hingga 5 °C lebih rendah dibandingkan kondensor sirip konvensional, yang secara tidak langsung meningkatkan *coefficient of performance* (COP) sistem hingga 3,7. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penggunaan kondensor spiral tidak hanya meningkatkan produksi air tawar, tetapi juga memperbaiki efisiensi pendinginan [23].

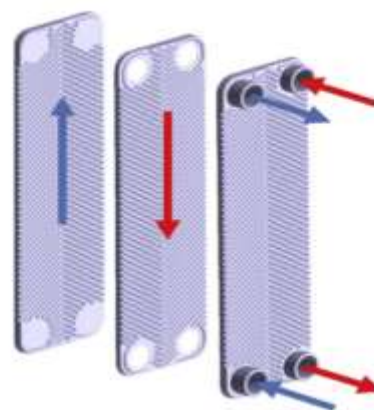
Secara keseluruhan, *coiled tube condenser* menawarkan kompromi yang ideal antara efisiensi termal, ukuran kompak, dan fleksibilitas integrasi dengan sistem pendingin udara [24]. Pengembangannya menuju konfigurasi multi-spiral dan material konduktivitas tinggi (seperti paduan aluminium–tembaga) berpotensi menghasilkan efisiensi termal di atas 85 % dengan stabilitas operasi yang baik dalam jangka panjang [25].

4 PLATE CONDENSER

Kondensor tipe pelat (*plate condenser*) merupakan salah satu bentuk penukar panas kompak yang banyak digunakan pada sistem desalinasi bersuhu rendah (*low-grade heat desalination*) karena efisiensinya tinggi, ukuran kecil, serta kemudahan integrasi ke berbagai sistem termal [26], [27]. Prinsip kerjanya didasarkan pada aliran fluida yang melewati saluran sempit di antara pelat-pelat logam tipis yang disusun sejajar. Permukaan pelat biasanya dilengkapi dengan pola gelombang atau chevron untuk meningkatkan turbulensi dan memperbesar koefisien perpindahan panas [28].

Dibandingkan dengan tipe *shell and tube*, kondensor pelat memiliki luas permukaan perpindahan panas per satuan volume yang lebih besar, sehingga mampu menghasilkan efisiensi termal tinggi pada perbedaan temperatur kecil

($\Delta T < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) [29], [30]. Ammar [5] melaporkan bahwa kondensor pelat berbahan aluminium dengan konfigurasi chevron 30° menghasilkan koefisien perpindahan panas keseluruhan sebesar 2000 W/m²K pada suhu operasi 60 °C dengan efisiensi termal mencapai 87 %. Studi tersebut juga menunjukkan bahwa tekanan jatuh (*pressure drop*) meningkat sekitar 12 % dibandingkan tabung lurus, namun peningkatan tersebut masih dapat diterima untuk sistem berskala kecil.



Gambar 3 Plate kondensor [31]

Menurut Charitar dan Madhlopa [10], penggunaan kondensor pelat dalam sistem desalinasi dengan sumber panas rendah mampu menurunkan kebutuhan energi hingga 25 % dibandingkan dengan sistem berbasis kondensor udara. Hal ini disebabkan oleh jarak antar pelat yang sempit (2–5 mm) yang menciptakan gradien temperatur tinggi di seluruh permukaan, mempercepat proses kondensasi.

Das dan Date [1] menyatakan bahwa integrasi *plate heat exchanger* sebagai kondensor dalam sistem desalinasi berbasis panas buang menghasilkan performa optimal ketika digunakan pada konfigurasi *counter-flow*. Dalam konfigurasi ini, fluida pendingin masuk dari arah berlawanan dengan aliran uap, sehingga perbedaan temperatur logaritmik (ΔT_{lm}) maksimum dapat tercapai. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan efisiensi termal hingga 15 % dibandingkan konfigurasi searah (*parallel flow*).

Poredoš *et al.* [8] dalam penelitian *multistage membrane distillation* menekankan bahwa stabilitas proses kondensasi sangat bergantung pada pengaturan laju aliran pendingin. Ketika laju aliran meningkat dari 0,4 m/s ke 1,0 m/s, laju kondensasi naik hampir 35 % karena turbulensi meningkat di dalam kanal antar pelat. Namun, peningkatan tersebut harus diimbangi dengan kontrol debit untuk menghindari keausan dini akibat erosi fluida.

Selain aluminium, beberapa penelitian mulai mengeksplorasi material komposit dan lapisan pelindung korosi untuk memperpanjang umur operasi kondensor pelat. Penggunaan pelapisan *graphene oxide* atau TiO_2 pada permukaan pelat terbukti meningkatkan ketahanan terhadap air laut sekaligus mempertahankan koefisien perpindahan panas pada kisaran 1 800–2 200 W/m²K [18].

Keunggulan utama kondensor pelat adalah dimensinya yang kompak, efisiensi tinggi pada suhu rendah, dan kemudahan pabrikaan. Namun, kelemahannya meliputi sensitivitas terhadap *fouling* dan kesulitan pembersihan bila digunakan dengan air laut tanpa sistem filtrasi. Oleh karena itu, kondensor pelat lebih direkomendasikan untuk sistem desalinasi yang memanfaatkan panas buang AC bersih atau fluida sekunder non-korosif [18], [32].

Secara umum, hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa *plate condenser* mampu memberikan efisiensi termal 80–88 % pada suhu operasi 55–70 °C dengan laju produksi air tawar mencapai 1,0–1,2 L/jam. Dengan efisiensi tinggi dan ukuran yang ringkas, tipe ini menjadi alternatif ideal untuk sistem desalinasi kompak berbasis panas buang AC, khususnya untuk aplikasi rumah tangga atau bangunan komersial skala kecil.

5 FINNED CONDENSER

Kondensor bersirip (*finned condenser*) merupakan tipe kondensor berpendingin udara yang banyak diaplikasikan pada sistem pendingin udara (AC) residensial maupun komersial. Prinsip utamanya adalah memperbesar luas area perpindahan panas

dengan menambahkan sirip logam (*fins*) pada permukaan tabung tempat *refrigeran* atau uap air mengalir. Penambahan sirip meningkatkan koefisien perpindahan panas secara signifikan, terutama pada sisi udara yang secara alami memiliki konduktivitas termal rendah [33], [34], [35].

Dalam konteks desalinasi air laut berbasis panas buang AC, *finned condenser* memiliki keunggulan tersendiri karena sudah menjadi bagian integral dari sistem AC. Hal ini memungkinkan pemanfaatan panas buang secara langsung tanpa memerlukan modifikasi besar [36]. Rady *et al.* [3] melaporkan bahwa unit AC berkapasitas 1,5 ton yang memanfaatkan kondensor bersirip sebagai sumber panas untuk proses desalinasi mampu menghasilkan air tawar sebanyak 0,7 L/jam pada suhu udara keluar kondensor sekitar 72 °C.

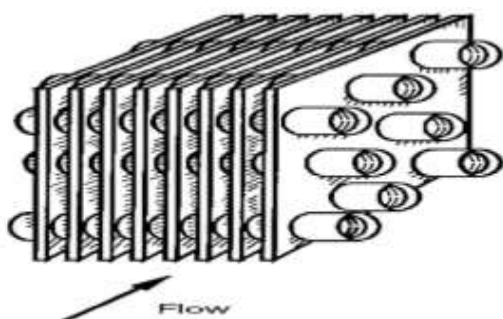
Keberadaan sirip pada kondensor meningkatkan area perpindahan panas hingga 30–50 % dibandingkan tabung polos, tergantung pada jarak antar sirip dan kecepatan udara [37]. Charitar dan Madhlopa [10] melaporkan bahwa peningkatan kecepatan udara dari 1,0 m/s menjadi 2,5 m/s dapat meningkatkan efisiensi kondensasi sebesar 18–22 %. Namun, peningkatan tersebut harus diimbangi dengan konsumsi daya kipas yang lebih tinggi, sehingga optimalisasi kecepatan udara menjadi hal penting dalam desain sistem desalinasi berbasis kondensor bersirip.

Sami *et al.* [5] melakukan studi eksperimental dengan menempatkan modul desalinasi di jalur buang kondensor udara dari sistem AC domestik. Hasilnya menunjukkan bahwa penyerapan panas buang melalui *finned condenser* dapat menurunkan suhu udara keluar sebesar 5–8 °C dan meningkatkan rasio konversi uap menjadi air tawar hingga 40 %. Efisiensi termal sistem gabungan mencapai 78 %, sedangkan *coefficient of performance* (COP) sistem pendingin meningkat menjadi 3,7 berkat penurunan beban panas pada kompresor.

Menurut Das dan Date [1], material sirip memiliki peran penting dalam menjaga efisiensi jangka panjang. Aluminium merupakan bahan yang paling banyak digunakan karena ringan,

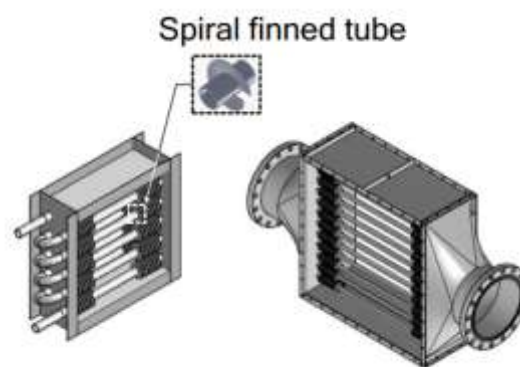
memiliki konduktivitas tinggi ($\approx 205 \text{ W/mK}$), dan relatif murah. Namun, dalam kondisi udara lembap atau lingkungan laut, korosi dapat terjadi sehingga diperlukan pelapisan tambahan, seperti *epoxy coating* atau anodisasi. Penggunaan bahan paduan seperti aluminium-magnesium terbukti meningkatkan ketahanan korosi hingga 25 % tanpa menurunkan efisiensi termal secara signifikan.

Dari sisi desain, efisiensi termal *finned condenser* juga bergantung pada bentuk sirip. Sirip datar (*flat fin*) menghasilkan distribusi udara yang seragam, sedangkan sirip bergelombang (*wavy fin*) meningkatkan turbulensi aliran dan efisiensi perpindahan panas [38]. Poredoš *et al.* [8] menunjukkan bahwa penggunaan sirip bergelombang dengan jarak antarfin 3 mm dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas sebesar 15 % dibandingkan sirip datar pada kondisi udara lingkungan 30 °C.



Gambar 4 finned condensor [31]

Kelebihan utama *finned condenser* adalah kemudahan implementasi dan biaya rendah karena dapat langsung memanfaatkan komponen yang sudah ada pada sistem AC. Namun, performanya sangat dipengaruhi oleh kondisi udara sekitar. Pada suhu lingkungan yang tinggi ($> 35 \text{ °C}$) atau kelembapan rendah, efisiensi perpindahan panas menurun signifikan, sehingga laju kondensasi juga berkurang. Selain itu, penumpukan debu dan kotoran pada sirip dapat menghambat sirkulasi udara dan menurunkan efisiensi hingga 10–20 % [39], [40].



Gambar 5 Spiral fin [41]

Secara keseluruhan, *finned condenser* merupakan solusi praktis untuk sistem desalinasi berbasis panas buang AC skala rumah tangga. Meskipun efisiensi termalnya lebih rendah dibanding tipe pelat atau spiral, keunggulan dari sisi biaya, ketersediaan, dan kemudahan integrasi menjadikannya pilihan yang sangat menarik untuk aplikasi sederhana dan demonstratif.

6 KESIMPULAN

Kajian ini meninjau berbagai jenis kondensor yang digunakan pada sistem desalinasi air laut berbasis panas buang dari sistem pendingin udara (AC), meliputi tipe *shell and tube*, *coiled tube*, *plate*, *finned*, dan *radiator condenser*. Analisis menunjukkan bahwa pemilihan desain kondensor memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi termal, laju kondensasi, serta total produksi air tawar. Secara umum, hasil tinjauan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Efisiensi termal tertinggi diperoleh pada *plate condenser* dan *coiled tube condenser*, dengan kisaran 82–88 %, berkat luas permukaan perpindahan panas yang besar dan distribusi aliran turbulen yang merata.
2. *Shell and tube condenser* tetap menjadi pilihan unggulan untuk sistem berskala industri karena kestabilan termal dan kemampuan operasi pada tekanan tinggi, meskipun membutuhkan ruang lebih besar.

3. *Finned condenser* menonjol dari segi kemudahan implementasi dan biaya rendah, cocok untuk aplikasi rumah tangga atau bangunan kecil yang sudah memiliki sistem AC eksisting.
4. Produksi air tawar dari berbagai tipe kondensor berkisar antara 0,6–1,2 L/jam tergantung desain dan kondisi operasi, dengan efisiensi optimal pada suhu panas buang 50–65 °C—karakteristik umum dari unit pendingin udara.

Temuan ini memperkuat potensi besar teknologi pemulihan panas buang AC sebagai solusi *dual benefit*: meningkatkan efisiensi energi dan menyediakan air tawar berkelanjutan, terutama di kawasan pesisir dan pulau kecil yang rawan kekeringan. Untuk mengoptimalkan pemanfaatan panas buang AC pada sistem desalinasi, beberapa poin berikut direkomendasikan untuk penelitian lebih lanjut :

1. Mengembangkan desain kondensor *hybrid*, misalnya penggabungan plate condenser dengan fins eksternal atau penggunaan *heat pipe* untuk meningkatkan waktu kontak termal dan memperbesar koefisien perpindahan panas.
2. Mengintegrasikan sistem desalinasi berbasis panas buang AC dengan sumber energi terbarukan, seperti panel surya termal atau *fotovoltaik*, untuk mendukung konsep *zero-energy desalination*.
3. Mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis IoT atau sensor suhu dan kelembaban untuk mengoptimalkan operasi kondensasi dan meminimalkan kehilangan panas.

KEPUSTAKAAN

- [1] R. K. Das and A. Date, “Sustainable water desalination 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] F. Muhammad, J. W. Hidayat, Solikhin, A. Rusdiyanto, and H. R. Devara, “Pemanfaatan Air Laut Menjadi Air Tawar Menggunakan Prinsip Desalinasi (Studi Kasus: Desa Punjulharjo, Kabupaten Rembang),” *Abdi Insa.*, vol. 8, no. 1, pp. 25–31, 2021, doi: 10.29303/abdiinsani.v8i1.367.
- [3] M. Rady, F. Albatati, A. Hegab, A. Abuhabaya, and A. Attar, “Design and analysis of waste heat recovery from residential air conditioning units for cooling and pure water production,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 1018–1032, 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctab033.
- [4] Aziz, “Potensi Pemanfaatan Energi Panas Terbuang Pada Kondensor,” *J. Mek.*, vol. 6, no. 2, pp. 569–576, 2015.
- [5] M. Sami, “Experimental study of a coupled unit for space cooling and water desalination,” 2023.
- [6] H. Hendradinata, F. Irawan, and ..., “Rancang Bangun Water Heater Dengan Memanfaatkan Panas Air Conditioning,” *PETRA J. Teknol.* ..., vol. 5, no. 2, p. 44, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.polsky.ac.id/index.php/petra/article/download/172/166>
- [7] C. Pan *et al.*, “Optimization of Evaporation and Condensation Architectures for Solar-Driven Interfacial Evaporation Desalination,” *Membranes (Basel)*, vol. 12, no. 9, 2022, doi: 10.3390/membranes12090899.
- [8] P. Poredoš *et al.*, “Ultra-high freshwater production in multistage solar membrane distillation via waste heat injection to condenser,” *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, 2024, doi: 10.1038/s41467-024-51880-y.
- [9] V. Turek, B. Kilkovský, J. Daxner, D. Babička Fialová, and Z. Jegla, “Industrial Waste Heat Utilization in the European Union—An Engineering-Centric Review,” *Energies*, vol. 17, no. 9, 2024, doi: 10.3390/en17092084.
- [10] 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.
- [11] S. M. Ammar, Z. Ramadan, and C. W. Park, “Performance evaluation of novel plate-type condenser for an absorption/adsorption refrigeration system: Experimental and CFD study,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 56, no. November 2023, p. 104260, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104260.
- [12] B. L. Salvi, T. Soni, S. Jindal, and N. L. Panwar, “Design improvement and experimental study on shell and tube condenser for bio-oil recovery from fast pyrolysis of wheat straw biomass,” *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04165-8.
- [13] N. Apriandi MS, Y. D. Herlambang, A. S. Alfauzi, and S.-C. Lee, “Shell and Tube Heat Exchanger Design: Utilization of Wasted Energy in Air Conditioning Systems,” *Eksergi*, vol. 19, no. 2, p. 39, 2023, doi: 10.32497/eksergi.v19i2.4461.
- [14] X. Cao, T. Du, Z. Liu, H. Zhai, and Z. Duan, “Experimental and numerical investigation on heat transfer and fluid flow performance of sextant helical baffle heat exchangers,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 142, p. 118437, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118437.
- [15] Reza Dyota Ahmad, Donny Ivananda, Ramadhani Santoso, and Dyah Ratna Wulan, “Analisis Nilai Transfer Panas Dalam Heat Exchanger Type 1-1 Shell and Tube Aliran Counter Current Menggunakan Computational Fluid Dynamics,” *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 9, no. 2, pp. 130–136, 2023, doi: 10.33795/distilat.v9i2.2688.
- [16] Z. Rifaldo, Burhan Hafid, Zakir Husin, Etanto Heiliano Wijayanto, and M. Idris, “Analysis of Heat Transfer in Shell and Tube Type Condensers,” *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 67–74, 2024, doi: 10.31289/jmemme.v8i1.6238.
- [17] D. Agustina Sari, “SINERGI Polmed : JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN STUDI PERGANTIAN MATERIAL TUBE DARI CARBON STEEL MENJADI 309 STAINLESS STEEL PADA PENUKAR PANAS KONDENSER SHELL AND TUBE INFO ARTIKEL,” vol. 05, no. 02, pp. 12–18, 2024, [Online]. Available: <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index>
- [18] A. Behrozifard, H. R. Goshayeshi, I. Zahmatkesh, I. Chaer, S. Salahshour, and D. Toghraie, “Experimental optimization of the performance of a plate heat exchanger with Graphene oxide/water and Al₂O₃/water nanofluids,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 59, no. April, p. 104525, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104525.
- [19] M. Luberti and M. Capocelli, “Enhanced Humidification–Dehumidification (HDH) Systems for Sustainable Water Desalination,” *Energies*, vol. 16, no. 17, 2023, doi: 10.3390/en16176352.
- [20] C. S. E. Tupamahu and S. J. E. Sarwuna, “Pengaruh Laju Aliran Fluida Helical Coil Terhadap Efektivitas Kondensor Minyak Atsiri Cengkeh Berbasis Shell,” *J. Asimetri J. Ilm. Rekayasa Inov.*, vol. 3, pp. 215–220, 2021, doi: 10.35814/asiimetrik.v3i2.2298.
- [21] S. Missaoui, Z. Driss, R. Ben Slama, and B. Chaouachi, “Effects of pipe turns on vertical helically coiled tube heat exchangers for water heating in a household refrigerator,” *Int. J. Air-Conditioning Refrig.*, vol. 30, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s44189-022-00005-5.
- [22] W. Z. Fengzhi Li, Jie Chen, Yiqiang Jiang, “Characteristics Inside Spiral Tubes,” 2023.
- [23] L. Dong, C. Dong, and X. Wu, “Numerical simulation of heat transfer performance of spiral wound heat exchanger under sloshing condition,” *PLoS One*, vol. 18, no. 12 December, pp. 1–25, 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0295315.
- [24] A. H. Elsheikh, H. N. Panchal, S.

- Sengottain, N. A. Alsaleh, and M. Ahmadein, "Applications of Heat Exchanger in Solar Desalination: Current Issues and Future Challenges," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3390/w14060852.
- [25] A. Y. Adam, A. N. Oumer, G. Najafi, M. Ishak, M. Firdaus, and T. B. Aklilu, "State of the art on flow and heat transfer performance of compact fin-and-tube heat exchangers," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 139, no. 4, pp. 2739–2768, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08971-6.
- [26] D. U. Lawal *et al.*, "Experimental Investigation of a Plate–Frame Water Gap Membrane Distillation System for Seawater Desalination," *Membranes (Basel)*, vol. 13, no. 9, pp. 1–18, 2023, doi: 10.3390/membranes13090804.
- [27] 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.
- [28] S. Mohebbi and F. Veysi, "An experimental investigation on the heat transfer and friction coefficients of a small plate heat exchanger with chevron angle," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 56, no. 3, pp. 849–858, 2020, doi: 10.1007/s00231-019-02749-0.
- [29] J. S. Pal, S. N. Sapali, and P. W. Deshmukh, "Estimation and analysis of exergy loss and performance evaluation of marine freshwater generating system," *J. Therm. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 1266–1274, 2024, doi: 10.14744/thermal.0000857.
- [30] 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>
- [31] J. Zhang, X. Zhu, M. E. Mondejar, and F. Haglind, "A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, no. December 2017, pp. 305–328, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.017.
- [32] A. A. Azmi *et al.*, "Basic design optimization of power and desalinated water for hybrid cycle ocean thermal energy conversion system integrated with desalination plant," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 333–352, 2024, doi: 10.1007/s00773-024-00988-3.
- [33] M. K. R. Pulagam, S. K. Rout, K. K. Muduli, S. A. Syed, D. Barik, and A. K. Hussein, "Internal Finned Heat Exchangers: Thermal and Hydraulic Performance Review," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 42, no. 2, pp. 583–592, 2024, doi: 10.18280/ijht.420225.
- [34] N. Jing, Y. Xia, Q. Ding, Y. Chen, Z. Wang, and X. Zhang, "Simulation and Optimization Study on the Performance of Fin-and-Tube Heat Exchanger," *Sustain.*, vol. 15, no. 15, 2023, doi: 10.3390/su151511587.
- [35] 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.
- [36] Y. Rong, W. Su, S. Wang, B. Du, J. Wei, and S. Zhang, "Optimization of Finned-Tube Heat Exchanger in a Gravity-Assisted Separated Heat Pipe," *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 22, no. 4, pp. 1209–1229, 2024, doi: 10.32604/fhmt.2024.052415.
- [37] A. Elshabrawy, S. A. E. S. Ahmed, M. A. Abdelatif, E. Ibrahim, and M. Adel, "Thermal Analysis of a Two-Phase Closed Thermosyphon With Internal Semi-Cylindrical Finned Condenser: an Experimental Study," *JP J. Heat Mass Transf.*, vol. 34, pp. 35–52, 2023, doi: 10.17654/0973576323031.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] L. Morozyuk, V. Sokolovska-Yefymenko, A. Moshkatiuk, V. Ierin, and A. Basov, “Experimental study and analysis of an air-cooled condenser with the fouling on the heat exchange surface for small-scale commercial refrigeration systems,” *Int. J. Air-Conditioning Refrig.*, vol. 31, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s44189-023-00034-8.
- [41] P. Pongsoi, S. Pikulkajorn, and S. Wongwises, “Heat transfer and flow characteristics of spiral fin-and-tube heat exchangers: A review,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 79, pp. 417–431, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.072.