

DESAIN INOVASI PROTOTIPE TEKNOLOGI *SOLAR DISTILLATION* UNTUK KONVERSI AIR LAUT MENJADI AIR BERSIH

Dwipayogo Wibowo^{1*}, Muh. Imran Pagala¹, Wa Ndibale¹, Ilham Ilham², Diah Ayu
Wulandari Sulistyaningrum³

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia.

² Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia

³ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Malahayati, Lampung, Indonesia.

* Korespondensi: dwipayogo@umkendari.ac.id

Abstrak

Air bersih menjadi kebutuhan dasar bagi masyarakat pesisir dan pulau kecil di Indonesia dikarenakan keterbatasan sumber air tawar dan tingginya salinitas air tanah akibat intrusi air laut. Penelitian ini bertujuan untuk merancang inovasi prototipe teknologi destilasi air laut berbasis energi matahari (*solar distillation*) sebagai solusi berbiaya rendah dan ramah lingkungan. Teknologi ini menggunakan prinsip penguapan dan kondensasi untuk mengubah air laut menjadi air bersih yang memenuhi standar kualitas air bersih. Teknik pembuatan alat destilasi dirancang dengan bahan sederhana anti karat seperti kaca transparan dengan memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi utama dan butiran air dipanen melalui pipa yang dialirkan keluar untuk ditampung dalam penampungan air bersih. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa proses destilasi air laut sangat efektif dalam proses pemisahan air laut menjadi air bersih yang bebas dari kandungan garam, mikroba, dan kotoran. Proses destilasi menurunkan salinitas air laut mencapai 99% ppt dan tingkat pH 7,5. Selain itu, kadar kesadahan (66,58 mg/L), nitrat (NO_3^-) (1,10 mg/L), nitrit (NO_2^-) (0,026 mg/L), besi (Fe) (<0,0034 mg/L), dan mikrobiologi (MPN *Coliform* dan APM *E. Coli* = 0 MPN/CFU/100 mL) juga mengalami penurunan sesuai dengan ketentuan standar baku mutu kualitas air bersih. Efisiensi biaya dan kemudahan implementasi teknologi ini menawarkan solusi yang potensial untuk kebutuhan air bersih dalam mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan tentang penyediaan air bersih dan sanitasi.

Kata Kunci: air, destilasi, laut, teknologi, model.

Abstract

*Clean water is a fundamental need for coastal and small island communities in Indonesia due to limited freshwater sources and high groundwater salinity caused by seawater intrusion. This study aims to design an innovative prototype of a solar-based seawater distillation technology as a low-cost and environmentally friendly solution. Technology adopts evaporation and condensation principles to convert seawater into clean water that meets quality standards. The distillation device is constructed using simple, corrosion-resistant materials, such as transparent glass, utilizing sunlight as the primary energy source, with condensed water droplets collected through an outlet pipe into a clean-water reservoir. The results demonstrate that the seawater distillation process is highly effective in separating seawater into clean water free from salt content, microorganisms, and impurities. The distillation process can reduce the salt content of seawater by up to 99% ppt and the pH level to 7.5. In addition, the hardness level (66.58 mg/L), nitrate (NO_3^-) (1.10 mg/L), nitrite (NO_2^-) (0.026 mg/L), iron (Fe) (<0.0034 mg/L), and microbiology (MPN *Coliform* and APM *E. Coli* = 0 MPN/CFU/100 mL) also decreased in accordance with the standard quality standards for clean water. The cost efficiency and ease of implementation of this technology offer a promising solution for clean water provision, supporting the achievement of sustainable development goals related to clean water and sanitation.*

Keywords: water, distillation, marine, technology, model.

1. PENDAHULUAN

Air merupakan elemen penting bagi keberlanjutan kehidupan karena berperan dalam menjaga ekosistem, kesehatan, serta mendukung berbagai aktivitas manusia (Pambudi & Pramuj, 2025;

Sulistiyowati & Awaliyah, 2025). Walaupun permukaan bumi tertutup air mencapai 70%, namun sebagian kecil yang layak dimanfaatkan sebagai air bersih (Cipollina et al., 2009). Air tawar merupakan 3% dari seluruh air di dunia, namun hanya 0,5% yang dapat diakses melalui danau, sungai, dan dalam jarak yang dapat dijangkau di bawah permukaan bumi. Sementara 2,5% sisanya terisolasi di lokasi yang tidak dapat diakses seperti gletser dan terlalu jauh di bawah permukaan bumi (Mohammed et al., 2025; Wibowo & Koestoer, 2023). Kondisi ini menjadikan kebutuhan air bersih sebagai isu global dan menjadi barang mahal ” *luxury consumption*” sebab konsumsi air dunia mencapai ~3.900 km³/tahun, dengan persentase penggunaan terbesar dari sektor pertanian (69-72%) (Köksal et al., 2025), industri (18-20%) (Zhu et al., 2022), dan domestik (10-12%) (UNESCO, 2024). Maka ancaman terhadap kekurangan air bersih semakin nyata dihadapi oleh seluruh negara di dunia.

Ancaman terhadap kelangkaan air bersih juga dialami oleh negara Indonesia sebagai negara kepulauan dengan garis pantai sekitar 108.920 km menghadapi ancaman kekurangan air bersih, terutama pada musim kemarau (Hutomo & Moosa, 2005). Permasalahan semakin kompleks akibat peningkatan populasi (Wyman, 2013), distribusi air tawar yang tidak merata (Zhang, 2025), dan meningkatnya pencemaran limbah domestik akibat manajemen air limbah yang kurang baik sehingga berdampak pada penurunan kualitas air bersih (Wani et al., 2025). Indonesia pada peringkat ke-51 dunia dalam risiko krisis air bersih, meskipun memiliki potensi sumber daya air laut yang sangat besar (Sriwijayasih et al., 2024). Namun, air laut tidak dapat dikonsumsi secara langsung karena kandungan garam (salinitas) mencapai sekitar 33.000 mg/L (33-35 ppt), jauh melebihi standar air minum (Tang et al., 2025). Kondisi ini berdampak khususnya bagi masyarakat pesisir dan pulau kecil yang bergantung pada air tanah, tetapi rentan terhadap intrusi air laut sehingga kualitas air menjadi payau dan tidak layak konsumsi (Wibowo et al., 2024).

Berbagai teknologi telah digunakan untuk memenuhi kebutuhan air bersih, seperti desalinasi (Wibowo et al., 2024), penampungan air hujan (Rizky et al., 2022), dan destilasi (Kosasih & Bakhri, 2025). Destilasi menjadi salah satu metode yang paling sederhana dan berbiaya rendah karena memanfaatkan prinsip penguapan dan kondensasi untuk memisahkan garam serta kontaminan lainnya dari air laut. Penggunaan energi matahari dalam destilasi menawarkan solusi ramah lingkungan dan efisien, terutama di negara tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas penyinaran tinggi (Naryanto et al., 2025). Validasi kualitas air hasil destilasi dapat dilakukan melalui pengukuran salinitas dan pH untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar air bersih (Kholifah et al., 2025).

Hasil penelitian yang dilakukan oleh (Essa, 2024) memperlihatkan bahwa teknologi desalinasi berbasis *solar distillation* menjadi cara efektif untuk menghasilkan air bersih dengan ramah lingkungan dan berbiaya rendah. Selain itu, bentuk segitiga dan bulat pada permukaan desain sangat baik untuk proses pemanenan air yang dapat ditampung dalam rel penampungan dengan efisiensi energi sebesar 128,57% (Afshari et al., 2025). Desain efisien dan berbiaya murah penting untuk dikembangkan untuk pengembangan pada masyarakat pulau kecil yang kesulitan air bersih (Wibowo et al., 2024; Wibowo & Koestoer, 2023). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem destilasi berbasis energi matahari (*solar distillation*) untuk menghasilkan air bersih dari air asin secara efisien dan terjangkau. Sistem ini dilengkapi mekanisme penampungan air hujan sebagai sumber tambahan serta pemilihan produksi garam sebagai nilai ekonomi bagi masyarakat. Teknologi ini ditujukan untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga masyarakat pesisir sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan (Wibowo et al., 2024). Inovasi ini diharapkan menjadi solusi praktis bagi wilayah pesisir dan pulau kecil di Indonesia yang mengalami krisis air bersih, sehingga dapat meningkatkan akses air bersih dan kualitas hidup masyarakat.

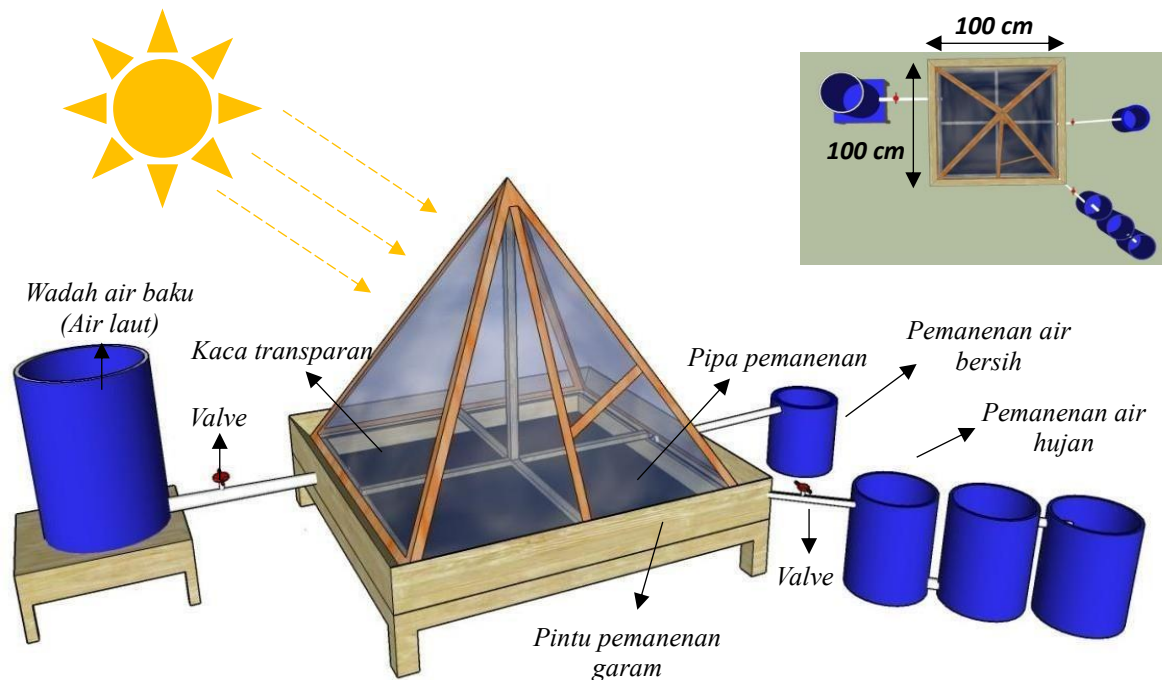
2. BAHAN DAN METODE

2.1 DESAIN INOVASI TEKNOLOGI DESTILASI

Proses penelitian mencakup empat (4) tahapan utama, yaitu perancangan alat (Gambar 1), pembuatan prototipe, pengujian prototipe, dan analisis data. Pada tahap perancangan, prototipe dirancang berdasarkan prinsip penguapan dan kondensasi dengan komponen utama seperti kaca transparan agar cahaya sinar matahari dapat menembus untuk memanaskan air garam/laut, sumber air baku (air laut) disimpan dalam wadah ember yang diberi *valve* untuk mengatur volume air yang akan dikondensasi dalam sistem *solar distillation*. Kaca transparan dapat dibuat pintu untuk pemanenan garam yang mengendap, proses pemanenan air tawar dapat ditampung dalam wadah air bersih hasil evaporasi. Desain alat difokuskan agar mudah dirakit, berbiaya rendah, dan sesuai untuk masyarakat pesisir dengan akses energi terbatas. Selanjutnya, pembuatan prototipe dilakukan menggunakan bahan yang tersedia seperti kaca transparan, plat aluminium, dan pipa PVC, dengan rancangan prototipe dimensi teknologi *solar distillation* 100 cm × 100 cm untuk desain prototipe model teknologi destilasi air laut.

Secara umum teknik perakitan dan cara kerja alat *solar distillation* (Gambar 1) dimana ukuran persegi (100 cm × 100 cm) dihubungkan dengan pipa inlet ukuran ½” yang dihubungkan dengan *valve* untuk mengontrol besaran volume air baku (air laut) yang dimasukkan dalam

sistem distilasi. Wadah yang digunakan untuk menampung air baku, pemanenan, dan air hujan menggunakan wadah tong air *green leaf* berukuran 60 L. Air hujan yang ditampung pada wadah air (Gambar 1) digunakan juga ketika ingin dilakukan proses pemurnian air hujan menjadi air yang layak, Oleh karena itu, teknologi solar distillation yang didesain memiliki fungsi ganda dalam proses penjernihan air.



Gambar 1. Skematik inovasi rekayasa teknologi *solar distillation* pemanenan air tawar dari air laut

2.2 IDENTIFIKASI KOMPOSISI AIR LAUT DAN AIR DESTILASI

Pengujian prototipe dilakukan dalam dua (2) tahap, yaitu pengujian fungsional rekayasa teknologi *solar distillation* dan pengujian hasil destilasi air laut. Pengujian fungsional bertujuan untuk mengukur volume air bersih yang dihasilkan per hari dalam kondisi cuaca cerah, sedangkan pengujian kualitas air dilakukan dengan menganalisis parameter fisik, kimia, dan biologi. Pengujian kualitas air dilakukan di Laboratorium Kesehatan Provinsi Sulawesi Tenggara terakreditasi KAN. Parameter fisik meliputi bau, rasa, warna, dan suhu, sementara parameter kimia meliputi salinitas, pH, nitrat, nitrit, kesadahan, dan kadar besi. Sedangkan, parameter biologi mencakup kandungan coliform dan *E. coli*. Data hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas teknologi destilasi berdasarkan standar baku mutu air minum nasional (Permenkes No. 2 Tahun 2023). Analisis juga mencakup efisiensi alat dalam mengurangi salinitas, kesadahan, dan kontaminan lainnya. Hasil penelitian diharapkan

memberikan solusi teknologi yang aplikatif bagi masyarakat pesisir dalam menyediakan air bersih yang berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 MODEL INOVASI TEKNOLOGI DESTILASI

Desain alat destilasi air laut berbasis energi surya ini dikembangkan untuk menjawab kebutuhan air bersih masyarakat pesisir dengan biaya rendah, desain sederhana, dan kemudahan perawatan (Gambar 1 dan 2). Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama yang mendukung proses destilasi dengan efisiensi tinggi. Komponen pertama adalah kaca transparan yang berfungsi sebagai penutup sekaligus penangkap panas matahari. Panas tersebut meningkatkan suhu air laut hingga mencapai titik penguapan. Pemilihan kaca transparan didasarkan pada kemampuannya mentransmisikan cahaya matahari secara efektif dan ketahanan terhadap korosi, menjadikannya ideal untuk penggunaan jangka panjang (Gajbhiye et al., 2023). Sejalan dengan kajian yang dilakukan oleh Sivakumar & Sundaram (2013), menjelaskan bahwa *single slope solar still* dengan menggunakan kaca *tempered* dapat meningkatkan efisiensi destilasi sebesar 20–25%.



Gambar 2. Model inovasi rekayasa teknologi *solar distillation* untuk pemanenan air tawar dari air laut

Air laut ditempatkan dalam wadah utama (Gambar 1) yang terbuat dari bahan tahan korosi seperti polimer PVC. Wadah ini berfungsi menampung air laut selama proses pemanasan dan penguapan berlangsung. Uap air hasil penguapan dialirkan menuju saluran kondensasi, dimana uap berubah menjadi air tawar melalui pendinginan alami. Selain itu, alat ini juga dilengkapi mekanisme penampungan air hujan, yang dapat dimanfaatkan selama musim penghujan untuk meningkatkan ketersediaan air bersih.

Pembuatan inovasi rekayasa teknologi *solar distillation* air laut berukuran dimensi 100 cm × 100 cm untuk memperoleh air bersih dan desainnya yang modular memungkinkan dapat disesuaikan untuk kebutuhan komunitas yang lebih besar. Keunggulan utama dari alat ini adalah ramah lingkungan karena tidak membutuhkan listrik atau bahan bakar fosil, sehingga tidak menghasilkan emisi karbon. Selain itu, biaya pembuatan relatif rendah karena menggunakan bahan lokal yang mudah ditemukan di pasaran. Pemanfaatan energi surya menjadikannya ideal untuk wilayah tropis dengan intensitas radiasi matahari tinggi. Namun, beberapa keterbatasan dari rekayasa teknologi *solar distillation* yang dirancang juga sangat bergantung terhadap cuaca, ketika cuaca berawan atau musim hujan mengurangi intensitas sinar matahari dan menurunkan laju proses hasil destilasi. Waktu yang dibutuhkan untuk menguapkan air laut dan mengkondensasinya cukup lama, yang menjadikannya kurang cocok untuk kebutuhan air dalam jumlah besar atau mendesak. Penelitian yang dilakukan oleh Shaaban *et al.* (2025) menggunakan elemen tambahan pada sistem *solar distillation* yang berfungsi untuk meningkatkan konduktivitas termal dapat meningkatkan laju destilasi hingga 32%. Penelitian ini cenderung lebih menekankan biaya rendah dan kemudahan perawatan dibanding efisiensi tinggi melalui teknologi lanjutan menggunakan konduktivitas termal. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut juga dapat diperlukan dengan penambahan sistem konduktivitas panas atau integrasi dengan sumber energi alternatif (*thermal engine exhaust*) untuk meningkatkan efisiensi destilasi untuk keperluan air bersih.

3.2 IDENTIFIKASI KOMPOSISI AIR LAUT DAN AIR DESTILASI

Hasil air olahan dari proses destilasi dari teknologi *solar distillation* ditentukan berdasarkan parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi (Tabel 1). Parameter fisika seperti bau, rasa, warna, dan suhu yang mengindikasikan bahwa suhu air laut sebelum destilasi adalah 29°C, sedangkan setelah proses destilasi suhu menjadi lebih rendah dengan rentang yang dapat diterima ±3°C, sebab tidak ada perubahan yang signifikan pada identifikasi suhu. Uji salinitas awal pada air laut teridentifikasi memiliki rasa asin, ketika setelah proses destilasi air berubah menjadi tawar yang menunjukkan bahwa teknologi destilasi bekerja dengan baik dapat mengurangi/menurunkan kandungan salinitas air laut. Pada kedua air (laut dan *permeat*) juga tidak menimbulkan bau yang terdeteksi baik sebelum maupun setelah destilasi. Parameter kimia diidentifikasi seperti kesadahan air mengalami penurunan mencapai 6458,42 mg/L dari kondisi air laut. Sedangkan, uji salinitas pada air laut sebelum destilasi mencapai 33 ppt (air laut), namun setelah destilasi nilai salinitas turun menjadi 0 ppt, hal ini sesuai dengan batas yang diizinkan untuk air bersih antara 0-0,5 ppt. Parameter pengujian kimia lainnya seperti pH,

kandungan logam besi (Fe), nitrat (NO_3^-) dan nitrit (NO_2^-) tidak mengalami penurunan yang signifikan dan masih masuk dalam kategori aman standar baku mutu (Permenkes No. 2 Tahun 2023).

Tabel 1. Hasil analisis perbandingan air laut dan air setelah destilasi

No.	Parameter Uji	Satuan	Air Laut	Air setelah destilasi	Standar Baku Mutu*
Fisik					
1	Bau	-	Tidak berbau	Tidak berbau	Tidak berbau
2	Rasa	-	Asin	Tidak berasa	Tidak berasa
3	Warna	Skala TCU	5	3	50
4	Suhu	$^{\circ}\text{C}$	29	27	± 3
Kimia					
5	Kesadahan	mg/L	6525	66,58	-
6	Nitrat (NO_3^-)	mg/L	1,04	1,10	20
7	Nitrit (NO_2^-)	mg/L	0,026	0,026	3
8	Besi (Fe)	mg/L	0,0729	< 0,0034	0,2
9	Salinitas	‰	33	0	0-0,5
10	pH	-	7,02	7,5	6,5-8,5
Biologi					
10	MPN <i>Coliform</i>	MPN/100 mL	494	0	1000
11	APM <i>E. Coli</i>	CFU/100 mL	0	0	0

(*Sumber: Permenkes No. 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan” Parameter Air untuk Keperluan *Higiene* dan Sanitasi” Hal. 33)

Analisis terhadap parameter biologi juga dilakukan seperti analisis MPN *coliform* dan APM *E. coli* untuk identifikasi kontaminasi bakteri terhadap adanya kontaminasi feses. Nilai 0 pada analisis keduanya menunjukkan bahwa setelah proses destilasi air laut tidak ada kontaminasi *E. coli* dan *coliform* yang terdeteksi. Total *coliform* pada air laut teridentifikasi sebesar 494 MPN/100 mL yang mengindikasikan bahwa kelompok bakteri menjadi indikator sanitasi air laut dan laut mengandung beberapa bakteri lainnya. Air hasil destilasi berupa air tawar yang dihasilkan bebas dari garam, mikroba, dan kotoran, sehingga aman untuk digunakan dan tidak diperlukan filtrasi tambahan, menjadikannya lebih sederhana dan efisien dibandingkan metode lainnya. Alat destilasi dapat dikembangkan dan digunakan di berbagai kondisi geografis, terutama di wilayah pesisir atau pulau kecil yang memiliki keterbatasan sumber air tawar. Alat ini juga dapat disesuaikan ukurannya untuk memenuhi kebutuhan komunitas yang lebih besar, menjadikannya solusi yang fleksibel untuk berbagai keperluan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang alat destilasi air laut berbasis energi matahari (*solar distillation*) yang dapat mengubah air laut menjadi air bersih. Hasil uji coba alat *solar distillation* yang dirancang sangat efektif dalam proses pemisahan air laut menjadi air bersih yang bebas dari kandungan garam, mikroba, dan kotoran. Proses destilasi dapat menurunkan salinitas air laut mencapai 99% ppt dan tingkat pH 7,5. Selain itu, kadar kesadahan (66,58 mg/L), nitrat (NO_3^-) (1,10 mg/L), nitrit (NO_2^-) (0,026 mg/L), besi (Fe) (<0,0034 mg/L), dan mikrobiologi (MPN *Coliform* dan APM *E. Coli* = 0 MPN/CFU/100 mL) juga mengalami penurunan sesuai dengan ketentuan standar baku mutu kualitas air bersih. Alat ini memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi utama untuk mengevaporasi air laut menghasilkan air tawar menjadi solusi ramah lingkungan dan berbiaya rendah. Model inovasi rekayasa desalinasi destilasi sangat memungkinkan digunakan pada wilayah pesisir dan pulau kecil dengan keterbatasan akses terhadap sumber daya air tawar. Desain alat yang sederhana, mudah dirakit, dan menggunakan bahan lokal sehingga memungkinkan penerapan teknologi ini secara luas di komunitas yang membutuhkan solusi cepat dan efisien untuk masalah krisis air bersih.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih para penulis ucapkan kepada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Kendari dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Afshari, F., Köse, M., Akyürek, E. F., & Mandev, E. (2025). Advanced mini solar still design: Spiral heating, triangular prism condensation, and comprehensive energy-exergy analysis. *Energy for Sustainable Development*, 85, 101632.
- Cipollina, A., Micale, G., & Rizzuti, L. (2009). Seawater desalination. In *Conventional and Renewable Energy Processes*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01150-4>
- Essa, F. A. (2024). Innovative integration: enhancing solar distillation efficiency with modified spherical solar stills. *Desalination*, 576, 117388.
- Gajbhiye, T. S., Waghmare, S. N., Sirsat, P. M., Borkar, P., & Awatade, S. M. (2023). Role of nanomaterials on solar desalination systems: A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.532>
- Hutomo, M., & Moosa, M. K. (2005). Indonesian marine and coastal biodiversity: Present

- status. *Indian Journal of Marine Sciences*, 34(1), 88–97.
- Kholifah, R. A. N., Suprayogi, D., Auvaria, S. W., & Agustina, E. (2025). Analisis Kualitas Air Bersih dari Berbagai Sumber di Laboratorium PT X. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(3), 2160–2169.
- Köksal, D. D., Ahi, Y., & Todorovic, M. (2025). Assessing Agricultural Reuse Potential of Treated Wastewater: A Hybrid Machine Learning Approach. *Agronomy*, 15(3), 703–727.
- Kosasih, K. R. I., & Bakhri, M. S. (2025). Performance Testing Of Seawater Distillation Equipment using Solar Power to Produce Fresh Water. *Journal of Mechanical Engineering and Applied Technology*, 3(3), 129–136.
- Mohammed, A., Alsagheer, F., Ghaithan, A. M., & Mazher, K. M. (2025). An optimization of hybrid renewable energy system for seawater desalination in Saudi Arabia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 4463–4480.
- Naryanto, R. F., Delimayanti, M. K., & Baride, L. (2025). Studi karakteristik energi surya untuk pemanenan energi: studi awal di Kota Kendari. *PISTON: Jurnal Teknologi*, 10(1), 8–18.
- Pambudi, A. S., & Pramujo, B. (2025). Peran Konservasi Sumber Daya Air dalam Pembangunan Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan Berkelanjutan. *Bulletin of Community Engagement*, 5(1), 1–17.
- Rizky, S., Ilham, I., & Assiddieq, M. (2022). Perencanaan Sistem Pemanenan Air Hujan (Rainwater Harvesting) di Masjid Al Mu'minin Kota Kendari. *Jurnal TELUK: Teknik Lingkungan UM Kendari*, 2(1), 1–7.
- Shaaban, S. M., Basem, A., Mohammed, S. A., Alawee, W. H., Aldabesh, A., Majdi, H. S., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2025). Synergistic thermal enhancement in hybrid solar desalination: A vertical wick-spherical still integration with nano-enhanced PCM. *Case Studies in Thermal Engineering*, 107221.
- Sivakumar, V., & Sundaram, E. G. (2013). Improvement techniques of solar still efficiency: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 246–264.
- Sriwijayasih, I., Novianarenti, E., Ramadani, T. A., & Leonard, R. (2024). Calculate The Thermal Efficiency Of a Distilled Water Evaporator Using Clean Water as Raw Material: Calculate The Thermal Efficiency Of a Distilled Water Evaporator Using Clean Water as Raw Material. *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology*, 1(1), 33–39.

- Sulistiyowati, E., & Awaliyah, D. P. (2025). *Empowerment and Sustainability: Pemantauan Kesehatan Sungai Berbasis Masyarakat*. Mafy Media Literasi.
- Tang, Z., Hu, S., Chu, D., Yang, F., Qu, S., & Yao, P. (2025). Al-Foam-Based Solar Interfacial Evaporator Prepared by Picosecond Laser Combined with Fire Burning Used for High-Efficiency Solar Desalination, Water Purification, and Salt Resistance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(38), 53648–53658.
- UNESCO. (2024). *UN World Water Development Report*. Water for Prosperity and Peace. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/s>
- Wani, S. A., Tari, V., & Mansoor, S. I. U. (2025). A Comprehensive Analysis of Wastewater Management Challenges in India: Infrastructure and Policy Perspectives. *Resource Resurgence: Mitigating Wastewater, Smart Recycling and Novel Technologies*, 297–316. <https://doi.org/10.3390/su17010361>
- Wibowo, D., & Koestoer, R. H. S. (2023). Synergies and potential of hybrid solar photovoltaic for enhanced desalination: A review of selected countries. *Environmental Research and Technology*, 6(4), 371–382. <https://doi.org/10.35208/ert.1325106>
- Wibowo, D., Utomo, S. W., Nurdin, M., & Laksmono, B. S. (2024). Advanced Sustainable Membrane Desalination Technology for The Bajau Tribe: A Comprehensive Exploration of Technological, Environmental, Social, and Economic Impacts. *Water Conservation and Management*, 8(3), 284–299. <https://doi.org/10.26480/wcm.03.2024.284.299>
- Wyman, R. J. (2013). The effects of population on the depletion of fresh water. *Population and Development Review*, 39(4), 687–704.
- Zhang, L. (2025). Water Resource Management. In *Sustainability Economics* (pp. 233–253). Springer.
- Zhu, C., Hu, M., Bai, X., & Zhang, L. (2022). Calculation Model and Case Study of Water-Saving Quantity in Typical Industrial Enterprises. *Journal of Applied Mathematics*, 2022(1), 2653671.