

Review Laju Penguapan Air Laut pada Kolam Garam Tertutup

Ahmad Ahdani, & 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: ahdanidani030@gmail.com, Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Evaporasi merupakan proses perubahan fase cair menjadi uap akibat perbedaan tekanan uap atau peningkatan energi panas. Proses ini penting karena menjadi dasar perpindahan energi dan massa dari permukaan air ke atmosfer serta berperan dalam berbagai aplikasi seperti desalinasi, produksi garam, pertanian, pengolahan limbah cair, sistem pendingin alami, dan kajian iklim. Kajian ini bertujuan menentukan parameter yang memengaruhi proses evaporasi air laut pada sistem kolam garam tertutup berdasarkan hasil tinjauan literatur. Metodologi yang digunakan adalah studi literatur terhadap berbagai penelitian yang membahas faktor-faktor yang memengaruhi laju penguapan air laut. Parameter yang ditinjau meliputi suhu air dan udara, kelembapan, kecepatan udara, tekanan, dan intensitas radiasi. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa suhu dan intensitas radiasi meningkatkan laju penguapan, sedangkan kelembapan dan tekanan tinggi menurunkannya. Kajian ini memberikan dasar bagi pengembangan kolam garam tertutup yang efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: evaporasi air laut, kolam garam tertutup, parameter.

Abstract

Evaporation is the process of changing liquid into vapor due to differences in vapor pressure or increased heat energy. This process is important because it forms the basis for the transfer of energy and mass from the water surface to the atmosphere and plays a role in various applications such as desalination, salt production, agriculture, liquid waste treatment, natural cooling systems, and climate studies. This study aims to determine the parameters that influence the evaporation process of seawater in a closed salt pond system based on a literature review. The methodology used is a literature study of various studies discussing the factors that influence the rate of seawater evaporation. The parameters reviewed include water and air temperature, humidity, air velocity, pressure, and radiation intensity. The review results show that temperature and radiation intensity increase the evaporation rate, while humidity and high pressure decrease it. This study provides a basis for the development of efficient and sustainable closed salt ponds.

Keywords: seawater evaporation, closed salt ponds, parameters.

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan garam di Indonesia pada tahun 2024 mencapai 4,9 juta ton, dan pada tahun 2025 diperkirakan meningkat sebesar 2,5% seiring pertumbuhan penduduk serta sektor industri [1]. Indonesia memiliki garis pantai yang sangat panjang dan kondisi geografis tropis dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 4,8 kWh/m²/hari [2], sehingga memiliki potensi besar dalam produksi garam laut. Namun, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal untuk memenuhi ketersediaan garam nasional. Penelitian yang dilakukan oleh Anshar et al. [3] menyebutkan bahwa setiap tahunnya Indonesia mengimpor sekitar 2,5 juta ton garam dari Australia dan India, yang menyumbang lebih dari 90% total impor garam dalam lima tahun terakhir.

Sebagian besar industri garam dalam negeri memproduksi garam sesuai standar SNI melalui metode evaporasi air laut [4], yaitu proses memisahkan garam dari air laut melalui peningkatan energi termal dan pengendalian kelembapan udara. Proses penguapan air laut menjadi faktor kunci yang menentukan waktu dan jumlah garam yang dihasilkan [5]. Namun, Sistem kolam garam terbuka yang umum digunakan di Indonesia sangat bergantung pada kondisi cuaca dan musim [6]. Kelembapan tinggi dan curah hujan pada musim penghujan menghambat proses penguapan, sehingga laju evaporasi dan produksi garam menurun [7]. Ketergantungan terhadap faktor iklim tersebut menurunkan efisiensi dan kontinuitas produksi, meskipun potensi energi surya di Indonesia tersedia melimpah sepanjang tahun.

Evaporasi merupakan proses perubahan fase cair menjadi uap akibat perbedaan tekanan uap atau peningkatan energi panas [8]. Proses ini menjadi dasar perpindahan energi dan massa dari permukaan air ke atmosfer serta digunakan secara luas dalam berbagai bidang, seperti desalinasi air laut, produksi garam, pertanian, pengolahan limbah cair, dan sistem pendinginan alami [9], [10], [11], [12], [13]. Laju evaporasi sangat dipengaruhi oleh keseimbangan energi dan kondisi lingkungan di sekitar permukaan air [10], [11].

Untuk mengatasi keterbatasan sistem terbuka, sistem kolam garam tertutup dikembangkan sebagai inovasi yang mampu mengurangi pengaruh cuaca eksternal. Sistem ini menggunakan penutup transparan yang memungkinkan radiasi matahari masuk sekaligus menahan panas dan mengurangi pengaruh angin serta hujan [14]. Dengan kondisi termal yang lebih stabil dan terkontrol, sistem tertutup berpotensi meningkatkan laju penguapan dibandingkan sistem terbuka [7], [8], [14].

Kajian ini dilakukan untuk menentukan parameter-parameter yang memengaruhi laju penguapan air laut pada sistem kolam garam tertutup. Parameter yang ditinjau meliputi suhu, kelembapan, kecepatan udara, tekanan udara, dan intensitas radiasi matahari [15]. Review ini memberikan pemahaman komprehensif mengenai kondisi optimal penguapan air laut, menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan desain kolam tertutup yang efisien, serta menjadi acuan bagi penelitian eksperimental lanjutan di bidang produksi garam ataupun desalinasi berkelanjutan.

2 SISTEM KOLAM GARAM TERTUTUP

Sistem kolam garam tertutup merupakan pengembangan dari metode penguapan terbuka yang bertujuan meningkatkan efisiensi proses evaporasi dan mengurangi ketergantungan terhadap kondisi cuaca eksternal. Prinsip kerjanya mengikuti mekanisme efek rumah kaca, di mana penutup transparan seperti kaca atau plastik UV memungkinkan radiasi matahari menembus ke dalam kolam, tetapi menahan radiasi gelombang panjang sehingga panas terperangkap di ruang penguapan [16]. Akibatnya, suhu air dan udara di dalam sistem meningkat di atas suhu lingkungan, mempercepat laju penguapan.

Desain sistem ini umumnya terdiri atas tiga komponen utama: (1) kolam penguapan sebagai wadah utama air laut, (2) penutup transparan yang berfungsi sebagai perangkap panas sekaligus media kondensasi, dan (3) sistem ventilasi yang menjaga

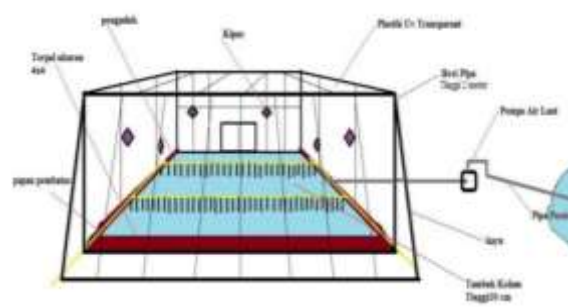
sirkulasi udara serta kelembapan agar tetap optimal [17]. Studi eksperimental menunjukkan bahwa ventilasi pasif pada sisi ruang dapat mempertahankan kelembapan 62-87%, sehingga meningkatkan laju penguapan tanpa kehilangan panas yang signifikan [14]. Penutup transparan memiliki fungsi ganda, yaitu mencegah kehilangan energi akibat konveksi dan menjaga kestabilan suhu di ruang penguapan. Selain itu, penerapan lapisan geomembran pada dasar kolam penguapan terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penyerapan panas [18].

Munatalim et al. [19] mengembangkan model rumah prisma dengan atap plastik UV putih dan alas geomembran yang mampu meningkatkan produktivitas 3-4 kali lipat dibandingkan metode terbuka. Model ini tidak terpengaruh oleh musim dan menghasilkan 100-125 ton garam per hektar per siklus produksi. Ristyandi et al. [20] juga melaporkan bahwa model prisma menjaga suhu ruang tetap stabil sepanjang tahun karena atap plastik UV menyerap dan memantulkan panas secara seimbang, sehingga proses kristalisasi berlangsung kontinu.



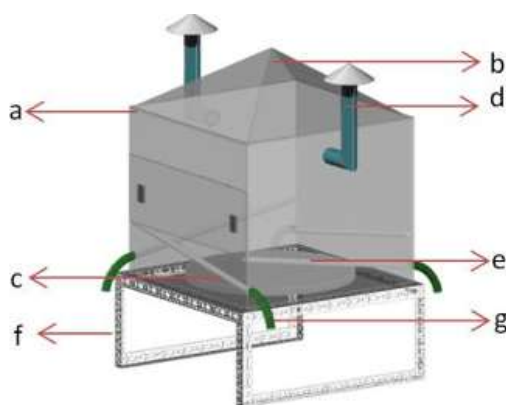
Gambar 1 Rumah garam prisma [21]

Pengembangan model sistem tertutup lainnya dilakukan oleh Nasution et al. [17] melalui rancangan rumah kubus, di mana setiap dindingnya dilapisi plastik UV transparan untuk meningkatkan suhu di dalam ruang penguapan. Model ini juga dilengkapi kipas untuk menjaga kestabilan kelembapan. Rancangan tersebut terbukti meningkatkan efisiensi proses penguapan karena suhu dan kelembapan di dalam ruang dapat dikontrol, sehingga produktivitas garam meningkat signifikan.

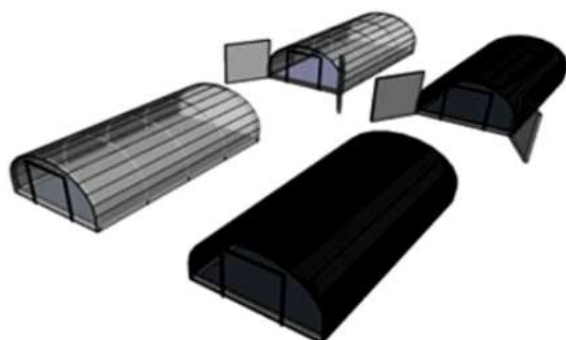


Gambar 2 Rumah garam kubus [17]

Menurut Djoyowasito et al. [22] sistem kolam garam tertutup dimodifikasi menggunakan model penutup limas berbahan kaca yang berfungsi menghasilkan air tawar dan garam dari air laut. Alat berbentuk ruang kubus berukuran 60 x 60 x 50 cm dengan atap limas setinggi 20 cm dan sudut kemiringan 34°. Sistem ini bekerja berdasarkan efek rumah kaca, di mana radiasi matahari yang masuk terperangkap di dalam ruang kaca sehingga meningkatkan suhu dan mempercepat proses evaporasi air laut.

**Gambar 3** Model rumah garam penutup limas [22]

Prayitno et al. [14] menunjukkan bahwa penerapan sistem kolam garam tertutup secara signifikan meningkatkan efisiensi penguapan dibandingkan sistem terbuka. Pada sistem ventilasi terbuka, suhu udara di atas permukaan kolam hanya mencapai kisaran 30-34 °C, sedangkan pada sistem tertutup dengan penutup *tunnel* berwarna hitam, suhu meningkat hingga 38-44 °C akibat efek rumah kaca dari bahan plastik yang menyerap dan menahan panas. Penggunaan pengarah angin memperlancar sirkulasi udara dan menurunkan kelembapan di ruang *tunnel*, sehingga tekanan uap antara permukaan air dan udara meningkat.

**Gambar 4** Sistem *tunnel* tertutup [14]

Secara umum, berbagai studi menunjukkan bahwa sistem kolam garam tertutup meningkatkan suhu

internal di atas suhu lingkungan, menghasilkan laju penguapan lebih tinggi, dan menjaga kemurnian produk garam dari kontaminasi eksternal. Efisiensi termal meningkat signifikan dengan penggunaan material penutup transparan dan sistem ventilasi yang dapat diatur. Dengan demikian, sistem kolam garam tertutup terbukti mampu meningkatkan produktivitas, efisiensi energi, dan kontinuitas produksi garam sepanjang tahun.

3 SUHU

Suhu merupakan parameter termal utama yang menentukan laju evaporasi air laut. Peningkatan suhu air mengakibatkan kenaikan energi kinetik molekul, yang mempercepat proses perubahan fase cair menjadi uap. Secara termodinamika, peningkatan suhu juga menaikkan tekanan uap jenuh pada permukaan air, sehingga gradien tekanan uap antara air dan udara meningkat dan proses penguapan berlangsung lebih cepat. Dalam sistem kolam garam tertutup, kenaikan suhu terjadi akibat efek rumah kaca, yaitu penahanan radiasi gelombang panjang oleh penutup transparan yang mengurangi kehilangan panas konvektif ke lingkungan. Selain itu, suhu udara di dalam sistem berperan dalam proses kondensasi uap air pada permukaan penutup, perbedaan suhu antara udara dalam dan permukaan penutup menciptakan kondensasi alami yang membantu menjaga keseimbangan kelembapan di ruang penguapan.

Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa suhu berperan dominan dalam mempercepat laju penguapan air laut pada sistem tertutup maupun terbuka. Peningkatan suhu air dari 60 °C menjadi 100 °C mampu menaikkan laju penguapan hingga lebih dari 71,43 % [23]. Pada sistem kaca tertutup dengan suhu lingkungan sekitar 31 °C, suhu air laut di dalam sistem dapat mencapai 57 °C, mempercepat perpindahan panas dengan energi panas sebesar 0,15151 kW/m² [22]. Efek penutup kaca membuktikan bahwa penyerapan panas dari lingkungan cukup optimal. Penggunaan sistem limas kaca dengan empat cermin pemantul dengan suhu lingkungan sebesar 38,5 °C mampu menghasilkan volume air tawar rata-rata 336,75 ml per hari [24], menegaskan hubungan positif antara peningkatan suhu dan percepatan laju penguapan menggunakan penutup kaca.

Konfigurasi sistem dengan kolektor panas berbentuk cermin cekung meningkatkan suhu dasar penguap dari 59,8 °C menjadi 70,9 °C, suhu tersebut meningkatkan hasil air tawar dari 1.180 ml menjadi 1.718 ml [24]. Desain pelat penyerap model sirip juga

menghasilkan suhu tertinggi dan laju penguapan tertinggi dengan efisiensi 48,41% [25], menunjukkan bahwa bentuk permukaan penyerap berperan penting terhadap peningkatan distribusi panas dan efisiensi energi. Model piramida kaca menghasilkan suhu ruang 50-60 °C dan air penguapan 100 ml/hari [26], menunjukkan bahwa geometri ruang memengaruhi distribusi panas dan efisiensi evaporasi. Sementara penggunaan alas pelat aluminium menghasilkan suhu air 49,9 °C dan suhu penutup 35,7 °C dengan efisiensi penguapan 48,07% memperlihatkan hubungan langsung antara suhu tinggi dan peningkatan volume air tawar [27]. Hasil ini memperlihatkan bahwa material penyerap dengan konduktivitas termal tinggi berkontribusi besar terhadap peningkatan suhu air.

Pemilihan warna pelat penyerap juga berpengaruh signifikan. Pelat penyerap berwarna hitam menghasilkan suhu tertinggi, yaitu 53,8 °C, dengan laju penguapan terbesar dibandingkan pelat berwarna putih dan transparan [28]. Peningkatan suhu secara langsung meningkatkan laju penguapan dan hasil produksi garam. Pemanas tenaga surya pada suhu 70 °C menghasilkan 6 gram garam dan 7-8 ml air kondensat, sedangkan suhu lebih rendah hanya menghasilkan 4 gram garam dan 5 mL air [29]. Penggunaan pemanas LPG dengan suhu uap 95-96 °C menghasilkan 814,5 ml air tawar dari 1 liter air laut dalam waktu 2 jam 12 menit dengan efisiensi 66,6% [30], menunjukkan bahwa sumber panas eksternal juga mampu meningkatkan laju evaporasi secara signifikan.

Secara umum penggunaan atap miring dengan sudut tertentu untuk menghasilkan distribusi panas lebih merata. Sudut penutup kaca 30° menghasilkan suhu air 57 °C dan memberikan laju penguapan tertinggi dibandingkan sudut 20° dan 50° [31]. Peningkatan suhu udara juga terbukti mempercepat penguapan. Model dengan empat lensa *loop* menghasilkan suhu air laut 99,8 °C dan suhu penutup 58,7 °C [32]. Pada rentang suhu 20-35 °C, laju penguapan mencapai 2-2,5 mm/hari, menunjukkan bahwa meskipun pada suhu sedang, evaporasi tetap terjadi secara efisien. Pada sistem *tunnel*, suhu ruang berkisar 32,98-33,48 °C, penggunaan plastik hitam dengan pengarah angin mampu meningkatkan suhu 1-1,3 °C dan mempercepat laju penguapan hingga 0,98 cm/hari [14]. Sementara itu, suhu air 34,8-36,18 °C dan suhu udara 30,63-31,40 °C menghasilkan laju penguapan 0,4-2,6 mm/hari [33]. Pada model rumah kristalisasi, suhu 31-38 °C mampu menjaga stabilitas termal ruang dan meningkatkan efisiensi panas, sehingga panas dapat terperangkap dengan baik dan meningkatkan laju penguapan air laut [34]. Pengamatan lain menunjukkan suhu air laut rata-rata 34,33-34,95 °C dengan laju penguapan maksimum

229,32 ml/hari pada suhu 32,75 °C [35]. Kecenderungan ini menegaskan bahwa setiap peningkatan suhu menghasilkan percepatan laju penguapan yang signifikan. Ini membuktikan jika semakin tinggi suhu air laut, semakin cepat laju penguapan yang terjadi, karena peningkatan suhu memperbesar energi kinetik molekul air yang mempercepat perubahan fase cair menjadi uap. Hal tersebut menjadi dasar bahwasannya suhu air laut berbanding lurus dengan laju penguapan. Pada suhu air laut 47°, laju penguapan mencapai 305,76 ml/jam, sedangkan pada suhu 36 °C, laju penguapan hanya sekitar 101,92 ml/jam [36].

Secara keseluruhan, suhu memiliki pengaruh langsung dan paling dominan terhadap laju penguapan air laut dalam sistem tertutup. Kenaikan suhu meningkatkan tekanan uap, mempercepat perpindahan massa, serta meningkatkan efisiensi energi sistem. Faktor-faktor seperti geometri alat, warna penyerap panas, dan jenis sumber energi turut menentukan efektivitas peningkatan suhu. Dengan demikian, pengendalian dan optimasi suhu menjadi kunci utama dalam desain kolam garam tertutup yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan.

4 KELEMBAPAN

Kelembapan udara merupakan faktor lingkungan penting yang menentukan perbedaan tekanan uap antara permukaan air dan udara di sekitarnya. Semakin tinggi kelembapan relatif (RH), semakin kecil gradien tekanan uap yang terjadi sehingga laju penguapan menurun. Kondisi udara yang jenuh uap air menyebabkan molekul air kesulitan berpindah dari permukaan cair ke atmosfer, sehingga proses evaporasi melambat. Pada kelembapan di atas 80%, laju penguapan dapat berkurang secara signifikan, sedangkan pada kelembapan 51–5% perbedaan tekanan uap meningkat dan proses evaporasi berlangsung lebih cepat [37]. Oleh karena itu, pengendalian kelembapan menjadi aspek penting dalam menjaga keseimbangan termodinamika ruang penguapan.

Dalam sistem tertutup, akumulasi uap air dari proses evaporasi meningkatkan kelembapan ruang secara progresif. Untuk mempertahankan efisiensi penguapan, sistem ini biasanya dilengkapi ventilasi pasif atau aktif agar sirkulasi udara dapat mengeluarkan udara lembap dari ruang penguapan. Pengaturan sirkulasi terbukti efektif menurunkan kelembapan dari 87% menjadi sekitar 62%, sehingga laju penguapan meningkat hingga 0,98 cm/hari [14]. Sebaliknya, pada sistem tanpa ventilasi aktif,

kelembapan dapat mencapai 75,7% dengan laju penguapan hanya 0,4-2,6 mm/hari [33]. Kondisi ini memperlambat evaporasi karena uap air hasil penguapan terperangkap dan menurunkan gradien tekanan uap. Fakta ini menunjukkan bahwa tanpa sirkulasi udara, sistem tertutup akan kehilangan efisiensinya akibat kejenuhan udara di dalam ruang.

Selain kelembapan di dalam sistem, kondisi kelembapan lingkungan sekitar juga berpengaruh terhadap laju penguapan. Nilai kelembapan pada pagi hari berkisar 71-78%, turun menjadi sekitar 54% pada siang hari, dan kembali meningkat menjadi 76-80% pada sore hari [34]. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa kelembapan rendah pada siang hari mendukung laju penguapan tertinggi karena suhu dan radiasi matahari juga sedang maksimum. Sebaliknya, kelembapan tinggi pada pagi dan sore hari menurunkan gradien tekanan uap sehingga memperlambat proses evaporasi. Dalam konteks sistem tertutup, kelembapan di dalam ruang cenderung lebih tinggi dibandingkan lingkungan luar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kelembapan di dalam sistem kaca berkisar 61-90% dengan rata-rata 84,04%, sedangkan kelembapan lingkungan luar hanya 51-81% (rata-rata 60%) [22]. Hal ini disebabkan oleh akumulasi uap air hasil penguapan yang tidak sepenuhnya keluar dari sistem, menyebabkan udara di dalam ruang cepat jenuh.

Jika dibandingkan, kelembapan dalam sistem kolam garam tertutup umumnya lebih tinggi daripada pada sistem terbuka. Pada tambak garam terbuka, kelembapan udara hanya sekitar 40,3% [38]. Sehingga gradien tekanan uap antara permukaan air dan udara lebih besar dan laju penguapan berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, pada sistem tertutup tanpa ventilasi efektif, kondisi udara jenuh menghambat proses perpindahan uap dari air ke udara.

Secara keseluruhan, peningkatan kelembapan memiliki hubungan terbalik dengan laju penguapan. Pengendalian kelembapan melalui ventilasi, sirkulasi udara, atau pengaturan bukaan sistem menjadi strategi penting dalam mempertahankan keseimbangan energi dan meningkatkan efisiensi penguapan. Dengan menjaga kelembapan ruang pada kisaran optimal 55-65%, sistem kolam garam tertutup dapat mempertahankan efisiensi termal tinggi tanpa kehilangan energi secara signifikan.

5 KECEPATAN

Kecepatan udara memegang peranan penting dalam mempercepat evaporasi melalui peningkatan konveksi dan perpindahan massa di atas permukaan air. Aliran udara membawa uap jenuh menjauh dari

permukaan, menjaga perbedaan tekanan uap agar proses penguapan tetap berlangsung. Dalam sistem tertutup, kecepatan udara dikendalikan melalui ventilasi atau kipas agar sirkulasi optimal tercapai tanpa menurunkan suhu ruang penguapan secara drastis.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan laju penguapan. Pada sistem tunnel tertutup, peningkatan kecepatan aliran udara dari 1,7 m/s menjadi 2,68 m/s mampu meningkatkan laju penguapan dari 0,59 cm/hari menjadi 0,98 cm/hari [14]. Meskipun peningkatannya relatif kecil, perubahan ini menghasilkan hampir dua kali lipat laju evaporasi, menegaskan bahwa sirkulasi udara efektif dalam mempercepat proses perpindahan uap air. Hal ini menunjukkan bahwa dalam sistem tertutup, kontrol kecepatan udara menjadi kunci untuk mengoptimalkan keseimbangan antara suhu, kelembapan, dan tekanan parsial uap air.

Pada skala lapangan, pengaruh kecepatan udara juga terlihat nyata. Kecepatan angin 4,6 m/s hingga 6,3 m/s menghasilkan laju penguapan antara 2-2,5 mm/hari [37]. Angin berfungsi membawa uap air jenuh dari permukaan kolam, menjaga gradien tekanan uap agar proses evaporasi terus berlangsung. Sementara itu, pada kecepatan angin yang lebih rendah, sekitar 2,56-2,58 knot, laju penguapan menurun menjadi 0,4-2,6 mm/hari [33]. Kondisi ini disebabkan oleh tingginya kelembapan di dalam sistem semi-tertutup yang menghambat penguapan meskipun kecepatan udara cukup tinggi. Namun, dalam sistem tertutup dengan sirkulasi alami, kecepatan udara sebesar 1,16 m/s masih mampu menjaga proses evaporasi berjalan stabil karena uap air tetap tersirkulasi dengan baik [34].

Analisis termal menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara juga meningkatkan energi konveksi disekitar evaporator. Ketika kecepatan angin naik dari 3,09 m/s menjadi 5,67 m/s, energi serapan sistem mencapai 3,72 kW/hari, mempercepat laju penguapan secara signifikan [39]. Kombinasi suhu tinggi (32-38 °C) dengan kecepatan udara 4-5 m/s terbukti menghasilkan kondisi optimum untuk evaporasi, terutama pada kelembapan relatif 45-50% [40]. Penelitian lain memperkuat temuan ini, menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata 3,26 m/s mampu mempercepat penguapan dan menghasilkan produksi garam maksimum pada kondisi tersebut [41]. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan kecepatan udara bukan hanya memengaruhi laju evaporasi, tetapi juga berdampak langsung pada produktivitas sistem secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, kecepatan udara memiliki peran penting dalam meningkatkan laju penguapan, terutama melalui peningkatan konveksi dan pengurangan kejenuhan udara di atas permukaan air. Namun, dalam sistem tertutup, kecepatan udara perlu diatur secara seimbang, kecepatan terlalu rendah dapat menyebabkan uap tidak bergerak, sedangkan kecepatan terlalu tinggi dapat menurunkan suhu ruang dan air serta menghambat proses kristalisasi. Oleh karena itu, pengaturan ventilasi atau sirkulasi udara menjadi faktor penting untuk mencapai keseimbangan antara laju evaporasi, kestabilan suhu, dan efisiensi energi pada sistem kolam garam tertutup.

6 TEKATAN UDARA

Tekanan udara merupakan faktor termodinamika yang memengaruhi laju penguapan melalui perubahan tekanan parsial uap air di atas permukaan cairan. Penurunan tekanan atmosfer menurunkan titik didih air, sehingga proses penguapan dapat terjadi pada suhu yang lebih rendah. Dalam konteks sistem kolam garam tertutup, kondisi tekanan rendah menciptakan lingkungan di mana energi panas dapat dimanfaatkan lebih efisien untuk mengubah fase cair menjadi uap, menjadikan tekanan sebagai salah satu parameter penting dalam pengendalian laju evaporasi.

Penerapan tekanan vakum terbukti secara signifikan meningkatkan laju penguapan air laut. Pada kondisi kevakuman -5 hingga -10 cmHg, laju penguapan dapat mencapai 611,52 ml/jam dengan intensitas radiasi 584-680 W/m² dan suhu rata-rata 34,95 °C [42]. Penurunan tekanan ini menyebabkan titik didih air menurun, sehingga meskipun suhu relatif rendah, proses evaporasi tetap berlangsung cepat dan efisien. Kondisi ini juga mempercepat kristalisasi garam karena uap air lebih mudah terbentuk [43]. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa tekanan rendah tidak hanya mempercepat penguapan, tetapi juga meningkatkan efisiensi proses termal secara keseluruhan.

Tekanan vakum ringan 1-2 inHg menghasilkan peningkatan laju penguapan hingga dua kali lipat dibandingkan kondisi tanpa vakum [44]. Namun, kevakuman yang berlebihan dapat menurunkan efisiensi kondensasi karena uap air keluar terlalu cepat sebelum sempat mengembun. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat titik optimum kevakuman di mana laju penguapan maksimum dapat dicapai tanpa kehilangan efisiensi sistem. Pada tekanan alami sekitar 0,9 atm, air laut dilaporkan menguap pada suhu 50 °C dengan hasil air tawar

mencapai 1,2 liter dalam waktu 8 jam operasi [45], memperkuat bukti bahwa tekanan lebih rendah memungkinkan penguapan pada suhu yang jauh lebih rendah dibanding kondisi atmosferis.

Tekanan memiliki hubungan berbanding terbalik dengan laju penguapan. Semakin rendah tekanan, semakin besar laju evaporasi yang terjadi. Namun, pada kondisi tekanan atmosferis tinggi (1 atm), peningkatan suhu hingga 102 °C juga dapat menghasilkan laju penguapan tinggi karena energi termal yang cukup besar mampu mengatasi hambatan tekanan udara [46]. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh tekanan dan suhu saling melengkapi, tekanan rendah menghasilkan penguapan suhu rendah, sementara suhu tinggi dapat mengkompensasi tekanan tinggi untuk menghasilkan evaporasi cepat.

Selain itu, hubungan antara tekanan dan geometri sistem juga berperan penting. Pada tekanan di bawah 1 atm, titik didih air turun hingga 54-57 °C, dan hasil penguapan tertinggi dicapai pada kemiringan atap 30°, di mana aliran udara internal mendukung proses kondensasi alami [31]. Perbedaan tekanan parsial antara permukaan air dan udara juga menimbulkan konveksi alami yang mempercepat penguapan. Pada tekanan atmosfer dengan suhu air 38,5 °C dan intensitas radiasi 600 W/m², laju penguapan tercatat sebesar $2,78671 \times 10^{-6}$ kg/s [47], menegaskan adanya hubungan kuat antara gradien tekanan uap dan kecepatan evaporasi.

Berbagai penelitian menunjukkan pola yang konsisten bahwa semakin besar kevakuman, semakin cepat laju penguapan. Pada tekanan -7,5 cmHg, laju penguapan mencapai 229,32 ml/jam dengan suhu 32,75 °C, namun menurun menjadi 101,92 ml/jam saat tekanan meningkat ke -5 cmHg [35]. Pada kevakuman yang lebih tinggi -22,5 cmHg, laju penguapan mencapai 118,2 ml/jam dengan efisiensi 5,97%, jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi atmosferis [48]. Sementara itu, pada tekanan -10 cmHg dengan suhu air 47 °C, laju penguapan mencapai 305,76 ml/jam [36], menunjukkan bahwa tekanan rendah secara konsisten memperkuat efektivitas proses evaporasi.

Secara keseluruhan, tekanan udara memiliki hubungan negatif dengan laju penguapan air laut. Penurunan tekanan menurunkan titik didih air, memperbesar perbedaan tekanan parsial antara air dan udara, serta mempercepat perpindahan massa dari fase cair ke uap. Dalam sistem kolam garam tertutup, penerapan tekanan vakum terbukti menjadi strategi efektif untuk meningkatkan laju penguapan tanpa menurunkan efisiensi kondensasi. Dengan demikian, optimasi tekanan udara menjadi faktor penting dalam

desain sistem evaporasi berbasis surya yang efisien dan berkelanjutan.

7 INTENSITAS RADIASI MATAHARI

Intensitas radiasi matahari merupakan sumber energi utama dalam proses evaporasi air laut. Energi radiasi yang diserap oleh permukaan air atau pelat penyerap diubah menjadi energi panas yang kemudian meningkatkan suhu sistem dan tekanan uap pada permukaan air. Peningkatan intensitas radiasi secara langsung memperbesar energi termal yang tersedia, sehingga mempercepat proses penguapan. Dalam sistem tertutup, energi radiasi sebagian besar terperangkap oleh efek rumah kaca dari penutup transparan, menyebabkan suhu internal lebih tinggi dibanding lingkungan.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa intensitas radiasi sebesar $6,47\text{--}10,47\text{ kJ/m}^2$ dengan lama penyinaran rata-rata 9,27 jam/hari meningkatkan suhu air hingga $36,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan menghasilkan laju penguapan $0,4\text{--}2,6\text{ mm/hari}$ [33]. Pada kondisi intensitas yang lebih tinggi, yaitu $584\text{--}680\text{ W/m}^2$, suhu air laut mencapai $34,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan laju penguapan tertinggi $611,52\text{ mL/jam}$ [42]. Hal ini memperlihatkan hubungan linier antara peningkatan intensitas radiasi, suhu, dan laju penguapan.

Dalam sistem rumah kaca, intensitas radiasi lingkungan mencapai $398,57\text{ W/m}^2$ (kisaran $5,03\text{--}679,89\text{ W/m}^2$) dengan intensitas internal sekitar $303,3\text{ W/m}^2$. Perbedaan ini menunjukkan efek rumah kaca yang signifikan, di mana sebagian energi terperangkap dan menaikkan suhu air hingga $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22]. Efek ini mendukung efisiensi termal karena panas yang diserap tetap berada di dalam sistem. Pada intensitas $145,78\text{--}487,12\text{ W/m}^2$, energi serapan kolektor mencapai $3,72\text{ kW/hari}$ [39], menunjukkan bahwa semakin besar intensitas radiasi, semakin tinggi pula energi panas yang dapat dimanfaatkan untuk mempercepat evaporasi.

Data lain menunjukkan bahwa pada intensitas radiasi sebesar $1.608,25\text{ lux}$ dengan suhu lingkungan $38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ terjadi peningkatan signifikan pada laju evaporasi [24]. Sistem penguapan berbasis surya yang menerima radiasi $14,62\text{--}17,74\text{ MJ/m}^2\text{/hari}$ dengan efisiensi transmisi kaca 88% menunjukkan bahwa desain pelat penyerap bersirip memberikan efisiensi tertinggi dalam konversi energi radiasi menjadi panas [25]. Desain pelat ini memungkinkan penyebaran panas yang lebih merata di seluruh permukaan air, meningkatkan laju penguapan secara konsisten.

Analisis termal lebih lanjut memperlihatkan bahwa intensitas rata-rata 880 W/m^2 selama 8 jam/hari mampu menghasilkan suhu ruang $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [26], cukup untuk menguapkan air laut secara efektif. Pada rentang intensitas $96,89\text{--}420,85\text{ W/m}^2$, energi panas yang terserap mencapai $6,28\text{ kWh}$ dengan efisiensi maksimum $58,89\%$ [39], memperkuat hubungan positif antara radiasi matahari, kenaikan suhu, dan efisiensi evaporasi.

Pada sistem kolam garam tertutup dengan intensitas $1.125\text{--}1.250\text{ W/m}^2$, efisiensi penguapan mencapai $21,9\%$ [32]. Intensitas $591\text{--}680\text{ W/m}^2$ juga menghasilkan peningkatan suhu air laut dan laju penguapan hingga $229,32\text{ mL/jam}$ [35], menunjukkan bahwa variabilitas radiasi berpengaruh langsung terhadap performa sistem.

Secara keseluruhan, seluruh hasil penelitian menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari memiliki hubungan linier positif dengan laju penguapan. Peningkatan radiasi meningkatkan suhu permukaan air, memperbesar gradien tekanan uap, dan mempercepat perpindahan massa dari air ke udara. Efektivitas konversi energi radiasi menjadi panas sangat bergantung pada bahan penutup, ketebalan penutup, dan alas kolam garam. Oleh karena itu, optimalisasi penerimaan dan distribusi radiasi menjadi aspek kunci dalam peningkatan efisiensi termal, stabilitas suhu internal, dan produktivitas kolam garam tertutup secara berkelanjutan.

8 KESIMPULAN

Laju penguapan air laut pada sistem kolam garam tertutup dipengaruhi oleh faktor termal dan kondisi lingkungan yang saling berhubungan. Suhu dan intensitas radiasi matahari merupakan faktor dominan yang secara langsung meningkatkan energi panas dan tekanan uap pada permukaan air, sehingga mempercepat proses evaporasi. Sementara itu, kelembapan dan tekanan udara menunjukkan hubungan berbanding terbalik dengan laju penguapan, di mana peningkatan keduanya menghambat gradien tekanan uap dan menurunkan efisiensi perpindahan massa. Kecepatan udara berperan dalam memperkuat konveksi dan mengurangi kejenuhan uap air di ruang penguapan, namun perlu dikendalikan agar tidak menurunkan suhu sistem.

Dalam sistem tertutup, penerapan desain berbasis efek rumah kaca terbukti efektif meningkatkan suhu internal dan menjaga kestabilan termal. Penggunaan tekanan rendah menurunkan titik didih air dan memungkinkan penguapan terjadi pada suhu lebih

rendah, sehingga efisiensi energi meningkat. Intensitas radiasi matahari yang tinggi memperkuat proses pemanasan dan mempercepat penguapan melalui peningkatan tekanan uap jenuh. Secara keseluruhan, kondisi optimal diperoleh pada kombinasi suhu tinggi, kelembapan 55-65%, kecepatan udara (2-4 m/s), tekanan rendah, dan intensitas radiasi di atas 600 W/m². Hasil review menunjukkan hal-hal penting sebagai berikut:

1. Kemiringan atap sistem tertutup memengaruhi laju penguapan secara signifikan. Sudut kemiringan 30° menghasilkan intensitas radiasi optimal dan laju penguapan tertinggi mencapai 0,98 cm/hari.
2. Material alas kolam berperan dalam peningkatan serapan panas. Penggunaan alas geomembran atau pelat aluminium menghasilkan suhu dasar rata-rata 49-50 °C, meningkatkan efisiensi penguapan hingga 48%.
3. Material atap transparan menentukan kemampuan penyerapan dan transmisi radiasi. Plastik UV dan kaca terbukti optimal karena mampu menahan panas gelombang panjang sekaligus mentransmisikan cahaya tampak hingga 88%.
4. Ventilasi udara merupakan faktor penting pada sistem tertutup karena menjaga kelembapan ruang pada kisaran 60-65%, sehingga laju penguapan dapat meningkat hingga dua kali lipat dibanding sistem tanpa ventilasi.
5. Peningkatan suhu rata-rata 10 °C dapat meningkatkan laju penguapan hingga lebih dari 70%.
6. Penurunan kelembapan dari 85% menjadi 60% mampu meningkatkan laju penguapan hingga hampir dua kali lipat.
7. Peningkatan kecepatan udara dari 1,7 m/s menjadi 2,68 m/s meningkatkan laju penguapan dari 0,59 cm/hari menjadi 0,98 cm/hari.
8. Penurunan tekanan udara dari 1 atm menjadi sekitar -10 cmHg (vakum parsial) meningkatkan laju penguapan lebih dari 60%.
9. Peningkatan intensitas radiasi matahari dari 400 W/m² menjadi 600 W/m² meningkatkan suhu air hingga 36-38 °C dan laju penguapan mencapai lebih dari 600 mL/jam.
10. Model sistem kolam garam tertutup dengan atap segitiga dua sisi meningkatkan penerimaan radiasi matahari secara merata, menghasilkan distribusi panas yang optimal dan laju penguapan lebih stabil sepanjang hari.

Untuk pengembangan sistem kolam garam tertutup, dapat dilakukan terlebih dahulu analisis integratif antara parameter fisik dan desain sistem dan eksperimen numerik atau simulasi termodinamika, guna memprediksi laju penguapan berdasarkan kombinasi variabel lingkungan yang dinamis.

9 UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka (UHAMKA) atas dukungan, fasilitas, serta bimbingan yang diberikan selama penyusunan kajian ini. Dukungan tersebut menjadi bagian penting dalam terselesaikannya penulisan ini sebagai kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang Teknik Mesin.

KEPUSTAKAAN

- [1] Humas Ditjen Pengelolaan Kelautan dan Ruang Laut, "KKP Siapkan Strategi Capai Swasembada Garam 2027," Siaran Pers: Direktorat Jenderal Pengelolaan Kelautan. Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/djpk/kkp-siapkan-strategi-capai-swasembada-garam-2027-gpnY/detail.html>
- [2] S. Dewi, A. Agustina, Z. Stabita, and B. Purba, "Analisis Pengaruh Radiasi Matahari Terhadap Cahaya yang Dihasilkan oleh Panel Surya," *Edukasi Elita: Jurnal Inovasi Pendidikan*, vol. 2, no. 1, pp. 276–281, Dec. 2024, doi: 10.62383/edukasi.v2i1.1032.
- [3] A. M. Anshar, I. Raya, A. I. Latunra, A. C. Malina, and E. Mayasari, "Peningkatan Kualitas Garam Krosok di Desa Bontobahari, Kecamatan Bontoa, Kabupaten Maros," *Jurnal Aplikasi dan Inovasi Iptek (JASINTEK)*, vol. 7, no. 1, pp. 37–45, Aug. 2025, doi: <https://doi.org/10.52232/jasintek.v7.i1.18>.
- [4] B. Oktaviansyah, E. N. R. I. Firdausi, Soemargono, and L. Suprianti, "Kajian Proses Penguapan Air Laut Pada Evaporator Sederhana dengan Counter Current Sprayer," *Journal of Chemical and Process Engineering Jurnal ChemPro*, vol. 2, no. 2, pp. 57–62, 2021, doi: <https://doi.org/10.33005/chempro.v2i02.101>.

- [5] R. P. Pasaribu, A. Tanjung, A. K. Pranoto, and R. D. Ryani, "The Comparative Study of The Effectiveness of Seawater Aging with Traditional Techniques and Water Heater Technique for Salt Production," *Pelagicus: Jurnal IPTEK Terapan Perikanan dan Kelautan*, vol. 5, no. 1, pp. 47–59, Jan. 2024, doi: 10.15578/plgc.v5i1.14059.
- [6] E. Banowati and F. Firmanzah, "Cuaca Dan Kegiatan Pertanian Garam Di Kecamatan Kaliori - Rembang," *Bookchapter Alam Universitas Negeri Semarang*, vol. 1, no. 2, pp. 94–114, Jul. 2023, doi: 10.15294/ka.v1i2.142.
- [7] Mashuri, H. Z. Losu, H. Nurhadi, M. L. Hakim, and B. Sampurno, "Perancangan Sistem Model Scale Alat Pencegah Bercampurnya Air Hujan Dengan Air Laut Menggunakan Sistem Kontrol Otomatis Sensor Suhu Guna Menjaga Kestabilan Produksi Garam Pada Musim Hujan," *Jurnal AMORI*, vol. 2, no. 1, pp. 22–28, 2021, doi: DOI: 10.12962/j27213560.v2i1.9125.
- [8] A. A. Amin *et al.*, "Greenhouse Salt Tunnel as Innovation to Create Salt Production in the South Coast Malang Regency, Indonesia," *Jurnal Pembangunan dan Alam Lestari*, vol. 14, no. 1, pp. 14–21, Jul. 2023, doi: 10.21776/ub.jp.al.2023.014.01.03.
- [9] A. R. F. Gani, N. A. Putri, S. S. Habibi, D. A. B. Nasution, and D. A. Putri, "Desalinasi Dengan Metode Evaporasi Sebagai Penyedia Air Bersih Di Desa Kurandak," *Jurnal Pasopati*, vol. 4, no. 4, pp. 226–230, Nov. 2022, Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/pasopati/article/view/16126>
- [10] E. A. Verbiawan, R. M. Ramadhan, K. Sumada, S. Muljani, and C. Pujiastuti, "Teknologi Nozzle Spray Untuk Mempercepat Evaporasi Air Laut Dalam Produksi Garam Konvensional," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 18, no. 1, pp. 52–57, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v18i1.4125.
- [11] R. Tanggu, D. P. P. Ambali, R. Rantetasak, N. T. Saranga, W. Tandilabang, and A. Palullungan, "Tingkat Evaporasi di Kampus II Universitas Kristen Indonesia Toraja," *Journal Dynamic saint*, vol. 6, no. 2, pp. 53–56, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.47178/dynamicsaint.v6i2.1416>.
- [12] G. N. Affandi, P. C. G. Berlianti, N. R. Ramadhania, R. S. A. Shawaaba, and D. O. Radianto, "Efektivitas Pengolahan Limbah Fisik (Padat Dan Cair) Dengan Menggunakan Teknologi Inovatif," *JJurnal Wilayah, Kota dan Lingkungan Berkelanjutan*, vol. 3, no. 1, pp. 84–98, Apr. 2024, doi: 10.58169/jwikal.v3i1.368.
- [13] M. Mahmudi and Moh. M. Al Jinan, "Rancang Alat Peningkatan Efisiensi Pendingin Direct Evaporative Dengan Anyaman Serat Alam Batang Pisang," *Rekayasa Sistem Energi dan Manufaktur (ReSEM)*, vol. 3, no. 1, pp. 140–147, 2025, doi: <https://doi.org/10.30651/resem.v3i1.21898>.
- [14] M. R. E. Prayitno, Z. S. Hidayat, A. Kusdinar, A. Baswantara, and K. Sembiring, "Percepatan Penguapan Air pada Tunnel Garam Menggunakan Penutup Tunnel Berwarna Hitam dan Pengarah Angin," *Marine and Fisheries Science Technology Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 95–100, 2023, doi: 10.15578/marlin.V4.I2.2023.95-100.
- [15] H. Santoso, D. E. Putra, G. Angelina, Y. Hartanto, J. R. B. Witono, and K. C. Wanta, "Brine Evaporation Modeling in WAIV System Using Penman, Priestley-Taylor, and Harbeck Models," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 54, no. 6, pp. 1217–1228, Nov. 2022, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.9.
- [16] I. M. A. Nugraha, I. G. A. Budiadnyani, A. Khairunnisa, M. Cesrany, and D. A. S. Utami, "From Tradition To Innovation: Literature Review On Salt Processing And Its Replication Potential In Jembrana," *Jurnal Perikanan Unram*, vol. 15, no. 4, pp. 1741–1754, Aug. 2025, doi: 10.29303/jp.v15i4.1581.
- [17] T. A. Nasution, A. Imran, and S. A. Lestrari, "Otomatisasi Rumah Garam Kubus (Timah Gabus) Sinergi dalam Upaya Meningkatkan Produktivitas Garam Lokal," *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)*, vol. 2, no. 3, pp. 549–544, Dec. 2019, doi: 10.32734/ee.v2i3.776.
- [18] S. Sumiati, "Innovation In Improving The Quality Of Salt Production at Coastal Areas : A Literature Study," *In International*

- Conference on Coastal and Delta Areas*, vol. 1, no. 2, pp. 1–4, 2015.
- [19] Muntalim, I. Purnamasari, and N. K. Rosyidah, “Strategi Pengembangan Usaha Garam Dengan Metode Rumah Garam Salt Business Development Strategy Using Salt Prisma House Method In Sedayulawas Village Brondong Lamongan,” *Jurnal Grouper*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [20] B. Ristyanadi, Y. R. Dj, E. N. Sustyorini, and N. Khoiroh, “Analisis Bauran Pemasaran Usaha Garam Prisma di Desa Sedayulawas Marketing Mix Analysis of Prism Salt Business in Sedayulawas Village,” *Jurnal Grouper*, vol. 13, no. 1, pp. 100–107, 2022.
- [21] M. Muhammad, N. Za, S. Fachrurrazi, A. F. Ramadhani, and M. R. A. Sebayang, “Pengembangan Potensi Air Laut Menjadi Garam Industri Dan Garam Konsumsi Untuk Pemberdayaan Masyarakat Dengan Metode Rumah Prisma Di Desa Batuphat Barat Kota Lhokseumawe,” *Jurnal Malikussaleh Mengabdi*, vol. 2, no. 1, pp. 35–50, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.29103/jmm.v2i1.10474>.
- [22] G. Djoyowasito, A. M. Ahmad, M. Lutfi, and A. Anggra, “Rancang Bangun Model Penghasil Air Tawar dan Garam dari Air Laut Berbasis Efek Rumah Kaca Tipe Penutup Limas,” *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol. 6, no. 2, pp. 107–119, 2018, Accessed: Nov. 07, 2025. [Online]. Available: <https://jkptb.ub.ac.id/index.php/jkptb/article/view/456>
- [23] N. A. S. S, H. Putri, and A. Ramadhan, “Perbandingan Desalinasi Air Laut Berbasis Metode Evaporasi Dengan Tenaga Panas Api Dan Matahari,” *Jurnal Manajemen Pesisir dan Laut*, vol. 1, no. 1, pp. 8–3, 2023, Accessed: Nov. 07, 2025. [Online]. Available: <https://unars.ac.id/ojs/index.php/mapel/article/view/2777/2087>
- [24] D. Gaib, A. Arbie, and D. G. E. Setiawan, “Rancang Bangun Alat Destilasi Air Laut Menggunakan Tenaga Matahari Sebagai Alternatif Penyediaan Air Bersih,” *Jurnal Fisika : Fisika Sains Dan Aplikasinya*, vol. 8, no. 1, pp. 37–43, 2023, doi: <https://doi.org/10.35508/fisa.v8i1.11822>.
- [25] P. Suwandono and N. R. Ismail, “Pengaruh Bentuk Permukaan Absorber Pelat Terhadap Produktivitas dan Efisiensi Solar Still,” *JETM: Jurnal Energi dan Teknologi Manufaktur*, vol. 2, no. 2, pp. 25–30, 2019.
- [26] A. W. Krisdiarto, A. Ferhat, and M. P. Bimantio, “Penyediaan Air Bagi Masyarakat Pesisir Terdampak Kekeringan dengan Teknologi Desalinasi Air Laut Sederhana,” *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Dikemas*, vol. 4, no. 2, pp. 25–31, 2020, Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: <https://journal.pnm.ac.id/index.php/dikemas/article/view/148>
- [27] R. A. Putra, G. A. Pauzi, and A. Surtono, “Rancang Bangun Alat Destilasi Air Laut dengan Metode Ketinggian Permukaan Air Selalu Sama Menggunakan Energi Matahari,” *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 06, no. 01, pp. 101–108, 2018, Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: <https://jtaf.fmipa.unila.ac.id/index.php/jtaf/article/view/171>
- [28] Haryadi, I. Rosyadi, N. K. Caturwati, and A. Maulana, “Rancang Bangun Alat Destilasi Air Laut Menjadi Air Tawar Menggunakan Tenaga Surya,” *Jurnal TEKNIKA*, vol. 12, no. 3, pp. 431–438, 2016, doi: <https://dx.doi.org/10.36055/tjst.v12i2.6608>.
- [29] D. H. Anwar, Jamaaluddin, S. Syahririni, and I. Sulistiyowati, “Studi Produksi Garam Dengan Metode Plts Untuk Perbandingan Air Laut Dengan Air Tambak,” *Jurnal Al Ulum*, vol. 13, no. 2, pp. 173–180, 2025, doi: <https://doi.org/10.47662/alulum.v13i2.942>.
- [30] Ali. M, M. Lazim, A. Muin, and I. Badil, “Penyulingan Air Laut Menjadi Air Tawar,” *Jurnal Desiminasi Teknologi*, vol. 7, no. 2, pp. 138–142, 2019.
- [31] D. Wahyudi, “Uji Eksperimen Destilasi Air Laut dengan Variasi Sudut Kemiringan,” *Jurnal ENERGY (Jurnal Ilmiah Ilmu-ilmu Teknik)*, vol. 9, no. 2, pp. 74–80, 2019.
- [32] D. H. Setiabudi, B. Mardwianata, D. Prihandoko, and M. F. Arifin, “Laju Penguapan Air Laut Akibat Kenaikan Temperatur Pada Alat Penyulingan Dengan Memanfaatkan Sinar Matahari,” *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, vol. 22, pp. 1–6, 2022, doi: <https://doi.org/10.37412/jrl.v22i2.144>.
- [33] B. K. Mu'min, M. Efendy, and A. G. D. Kartika, “Parameter Lingkungan, Kadar Air dan NaCl Bunga Garam (Fleur De Sel),” *J*

- Mar Res*, vol. 10, no. 4, pp. 570–580, Nov. 2021, doi: 10.14710/jmr.v10i4.32290.
- [34] Abd. A. Amin *et al.*, “Aplikasi Tandon-Filter untuk meningkatkan Kualitas dan Kuantitas Garam dalam Teknologi Greenhouse Salt Tunnel di Pantai Selatan dan Utara Jawa Timur,” *Journal of Scorence and Techonology: Rekayasa*, vol. 17, no. 1, pp. 143–151, Apr. 2024, doi: 10.21107/rekayasa.v17i1.24877.
- [35] A. T. S. Haji, R. Wirosodarmo, and M. W. Tyas, “Analisis Nomografi Suhu, Laju Penguapan dan Tekanan Udara untuk Perancangan Alat Desalinasi Tenaga Surya Dengan Pengaturan Vakum,” *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, vol. 4, no. 2, pp. 1–6, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.21776/ub.jsal.2017.004.02.1>.
- [36] H. H. Tanusekar and A. T. Sutanhaji, “Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Desalinasi Sistem Penyulingan menggunakan Panas Matahari dengan Pengaturan Tekanan Udara,” *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019, Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: <https://jkptb.ub.ac.id/index.php/jkptb/article/view/163>
- [37] A. Kurniawan, A. A. Jaziri, A. A. Amin, and L. Ni'matus Salamah, “Indeks Kesesuaian Garam (Ikg) Untuk Menentukan Kesesuaian Lokasi Produksi Garam; Analisis Lokasi Produksi Garam Di Kabupaten Tuban Dan Kabupaten Probolinggo,” *Journal of Fisheries and Marine Research*, vol. 3, no. 2, pp. 236–244, 2019, doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2019.003.02.14>.
- [38] N. S. Lopez and T. Boski, “Is all Fleur de sel the same? Experience from artisanal saltworks in Castro Marim, Portugal,” *Bulletin of the Society of Sea Water Science Japan*, vol. 73, no. 1, pp. 76–80, 2019, doi: https://doi.org/10.11457/swsj.73.2_76.
- [39] W. S. Damanik, M. A. Siregar, S. Lubis, and A. M. Siregar, “Kajian Pengaruh Ketebalan Kaca Evaporator Terhadap Energi Yang Diserap Kolektor Pada Proses Desalinasi Air Laut,” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 4, no. 2, pp. 108–115, Sep. 2021, doi: 10.30596/rmme.v4i2.8071.
- [40] L. Maurina, Mahlinda, A. Thalib, and R. Kurniawan, “Produksi garam di lahan geomembran: Perhitungan kapasitas produksi, mutu dan perbandingannya dengan garam tradisional,” *Jurnal Litbang Industri*, vol. 11, no. 2, pp. 138–144, Dec. 2021, doi: 10.24960/jli.v11i2.6935.138-144.
- [41] A. A. Ashilah, A. Wirasatriya, and G. Handoyo, “Analisis Variabel Fisika Perairan Terhadap Kuantitas Produksi Garam di Kabupaten Rembang,” *Indonesian Journal of Oceanography*, vol. 04, pp. 68–76, 2022.
- [42] M. Tyas and A. T. S. H. R. Wirosodarmo, “Analisis Nomografi Suhu, Laju Penguapan Dan Tekanan Udara Pada Alat Desalinasi Tenaga Surya Dengan Pengaturan Vakum,” *Indonesian Journal of Oceanography*, vol. 1, no. 3, pp. 55–61, 2021, Accessed: Nov. 09, 2025. [Online]. Available: <https://jsal.ub.ac.id/index.php/jsal/article/view/148>
- [43] A. Azizah and N. N. Angelina, “Pola Kristalisasi Garam Dalam Kondisi Lingkungan Ekstrem,” *Journal of Science and Technology: Alpha*, vol. 1, no. 3, pp. 76–81, Jul. 2025, doi: 10.70716/alpha.v1i3.237.
- [44] A. M. Yusuf, D. Mugisidi, I. P. Aji, and O. Heriyani, “Pengaruh Vakum Pada Penguapan Air Laut,” *R.E.M Rekayasa Energi Manufaktur*, vol. 8, no. 2, pp. 55–62, 2023, doi: 10.21070/rem.v8i2.1672.
- [45] H. Ambarita, “Kajian Numerik Penguapan Pada Evaporator Desalinasi Air Laut Sistem Vakum Alami,” *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)*, vol. 1, no. 1, pp. 095–103, Oct. 2018, doi: 10.32734/ee.v1i1.117.
- [46] B. B. Taqwa, Rosalina, and H. Ramza, “Perancangan Alat Proses Distilasi Air Laut menggunakan Pemanas Elektrik,” *Prosiding Seminar Nasional Teknoka*, vol. 5, pp. 204–214, Dec. 2020, doi: 10.22236/teknoka.v5i.327.
- [47] H. V Sihombing, H. Ambarita, and H. S. Siagian, “Simulasi Laju Penguapan Air Laut Secara Natural Menggunakan ANSYS Fluent,” *Sprocket Journal of Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, 2024, doi: <https://doi.org/10.36655/sprocket.v6i1.1602>.
- [48] A. M. Lubis and Munawar, “Desalinasi Air Payau Dengan Teknik Evaporasi Surya dan Biomassa,” *Proceeding Seminar Nasional*

Politeknik Negeri Lhokseumawe, vol. 3, no. 1,
pp. 117–120, 2019, Accessed: Nov. 09, 2025.
[Online]. Available: <https://ejurnal.pnl.ac.id/semnaspnl/article/view/1674>