

Analisis Potensi Energi Osmosis sebagai Sumber Energi Terbarukan Inovatif: Analisis Bibliometrik

Bintang^{1*}, Muhammad Ashbar As-Silmy², Andika Prayoga Siswanto³, Erza Arkan Zharif⁴,
Rafa Aditya Dharmawangsa Nasution⁵.

^{1,2}Universitas Al-Azhar Medan, Sumatera Utara, Indonesia.

³Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Al-Azhar Medan

e-mail: *1bintang17605@gmail.com, ashbar401@gmail.com, andikachipasan@gmail.com, erzazharif@gmail.com, rafakisaran123@gmail.com.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi osmosis (blue energy) sebagai sumber energi terbarukan inovatif melalui pendekatan bibliometrik. Data diperoleh dari database Scopus dalam rentang tahun 2015–2025 dan dianalisis menggunakan perangkat lunak VOSviewer dan Bibliometrix. Hasil analisis menunjukkan bahwa penelitian terkait energi gradien salinitas mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, dengan fokus utama pada pengembangan material membran untuk teknologi pressure retarded osmosis (PRO) dan reverse electro dialysis (RED). Distribusi publikasi didominasi oleh negara-negara seperti China, India, dan Amerika Serikat, yang mencerminkan ketimpangan kapasitas riset global. Selain itu, pemetaan tematik mengindikasikan bahwa penelitian masih terfragmentasi dan belum terintegrasi secara komprehensif, terutama dalam aspek kelayakan ekonomi dan implementasi skala industri. Meskipun memiliki potensi besar sebagai sumber energi yang stabil dan ramah lingkungan, pengembangan energi osmosis masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomis yang signifikan.

Kata Kunci: Energi osmosis, Blue energy, Gradien salinitas, Energi terbarukan

Abstract: This study aims to analyze the potential of osmotic energy (blue energy) as an innovative renewable energy source using a bibliometric approach. Data were collected from the Scopus database covering the period 2015–2025 and analyzed using VOSviewer and Bibliometrix software. The results indicate a significant increase in research on salinity gradient energy in recent years, with a primary focus on membrane material development for pressure retarded osmosis (PRO) and reverse electro dialysis (RED) technologies. Scientific production is dominated by countries such as China, India, and the United States, highlighting global disparities in research capacity. Furthermore, thematic mapping reveals that existing studies remain fragmented and lack comprehensive integration, particularly in terms of economic feasibility and large-scale implementation. Despite its strong potential as a stable and environmentally friendly energy source, osmotic energy development still faces considerable technical and economic challenges.

Keywords: Osmotic energy, Blue energy, Salinity gradient, Renewable energy.

Kebutuhan energi global terus mengalami peningkatan signifikan seiring pertumbuhan populasi, industrialisasi, dan urbanisasi yang pesat. Ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam—tidak hanya menghadapi keterbatasan cadangan, tetapi juga berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca yang mempercepat perubahan iklim global [1], [2], [3]. Dampak yang ditimbulkan mencakup peningkatan suhu global, kenaikan permukaan laut, serta frekuensi kejadian cuaca ekstrem yang semakin intens. Dalam konteks ini, transisi menuju sistem energi yang berkelanjutan menjadi suatu keniscayaan strategis. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan yang bersih, efisien, dan berkelanjutan menjadi prioritas utama dalam agenda global untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil sekaligus menekan emisi karbon [4].

Salah satu pendekatan yang semakin berkembang adalah pemanfaatan energi berbasis air (water-based energy), yang mencakup hydropower konvensional serta energi laut (ocean energy) seperti energi gelombang, pasang surut, dan gradien suhu. Di antara berbagai bentuk tersebut, energi berbasis gradien salinitas atau dikenal sebagai energi osmosis (blue energy) muncul sebagai alternatif inovatif dengan potensi besar namun relatif belum dimanfaatkan secara optimal [5], [6]. Energi ini dihasilkan dari perbedaan konsentrasi garam antara air laut dan air tawar yang secara alami terjadi di muara sungai. Secara termodinamika, perbedaan salinitas ini menghasilkan energi bebas Gibbs yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui

mekanisme tertentu[7]. Teknologi utama yang digunakan dalam konversi ini meliputi *pressure retarded osmosis* (PRO), yang memanfaatkan tekanan osmotik untuk menggerakkan turbin, serta *reverse electrodialysis* (RED), yang menghasilkan arus listrik melalui perpindahan ion selektif pada membran[8].

Keunggulan utama energi osmosis terletak pada ketersediaan sumbernya yang melimpah dan berkelanjutan, terutama di wilayah pesisir dan muara sungai di seluruh dunia. Selain itu, energi ini bersifat non-intermiten dibandingkan energi terbarukan lain seperti tenaga surya dan angin, sehingga memiliki potensi sebagai sumber energi baseload yang stabil[9], [10]. Dari sisi lingkungan, blue energy menghasilkan emisi karbon yang sangat rendah, sehingga mendukung target dekarbonisasi global. Namun demikian, implementasi teknologi ini masih menghadapi berbagai tantangan signifikan, termasuk keterbatasan efisiensi membran, fouling, tingginya biaya produksi dan instalasi, serta kendala dalam skala komersialisasi[11]. Beberapa studi bahkan menunjukkan bahwa secara ekonomi, energi gradien salinitas masih belum kompetitif dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya, sehingga memerlukan inovasi teknologi yang lebih lanjut[12].

Meskipun penelitian mengenai blue energy telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) yang signifikan, khususnya terkait analisis komprehensif mengenai potensi energi osmosis dalam berbagai kondisi geografis, integrasi teknologi, serta evaluasi kelayakan teknis dan ekonominya secara holistik[13]. Selain itu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknologi secara parsial, seperti pengembangan membran atau optimasi sistem, tanpa mengkaji secara terpadu potensi energi dan implikasi implementasinya[14]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif potensi energi osmosis sebagai sumber energi terbarukan inovatif dengan meninjau aspek teknis, potensi sumber daya, serta tantangan pengembangannya. Novelty dari penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan analisis potensi energi, evaluasi teknologi PRO dan RED, serta identifikasi peluang pengembangan berbasis kondisi aktual, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi baru dalam pengembangan blue energy sebagai solusi energi masa depan[15].

METODE

Metode penelitian dalam studi ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis bibliometrik untuk menganalisis perkembangan dan tren riset terkait energi osmosis (blue energy). Pendekatan bibliometrik dipilih karena mampu memberikan gambaran sistematis, objektif, dan terukur mengenai dinamika publikasi ilmiah, pola kolaborasi, serta evolusi tema penelitian dalam suatu bidang[16]. Sumber data utama yang digunakan adalah database Scopus (alternatif: Web of Science) karena memiliki cakupan luas, kualitas terindeks tinggi, serta metadata yang lengkap untuk analisis bibliometrik. Data dikumpulkan dengan batasan tahun publikasi 2015–2025 untuk menangkap perkembangan mutakhir dalam bidang energi gradien salinitas. Strategi pencarian literatur dilakukan secara sistematis menggunakan kombinasi kata kunci seperti “blue energy”, “osmotic energy”, “salinity gradient energy”, “pressure retarded osmosis (PRO)”, dan “reverse electrodialysis (RED)” dengan operator Boolean (AND, OR) guna meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas pencarian. Pencarian difokuskan pada field TITLE-ABS-KEY untuk memastikan relevansi tinggi terhadap topik penelitian.

Proses seleksi data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis yang mengacu pada alur *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), yaitu tahap identifikasi, screening, dan final inclusion. Pada tahap identifikasi, seluruh dokumen hasil pencarian diekspor dalam format CSV atau RIS untuk dianalisis lebih lanjut. Tahap screening dilakukan dengan menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi, yaitu hanya artikel jurnal (*article*), berbahasa Inggris, berada dalam bidang energi, lingkungan, dan teknik, serta memiliki relevansi langsung dengan energi osmosis. Dokumen seperti prosiding, buku, editorial, dan artikel yang tidak relevan dieliminasi untuk menjaga kualitas dataset. Selanjutnya, pada tahap final inclusion diperoleh kumpulan data bersih yang siap dianalisis. Data yang diekstraksi meliputi informasi bibliografis utama seperti nama penulis, tahun publikasi, afiliasi negara, kata kunci, jumlah sitasi, serta sumber jurnal. Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer dan Bibliometrix (R package) karena keduanya memiliki kemampuan kuat dalam visualisasi jaringan ilmiah dan analisis statistik literatur[17]. Analisis yang dilakukan mencakup *co-occurrence* (kemunculan bersama kata kunci), *co-authorship* (kolaborasi penulis dan negara), *citation analysis*, *co-citation*, serta *trend analysis* untuk mengidentifikasi arah perkembangan penelitian[18].

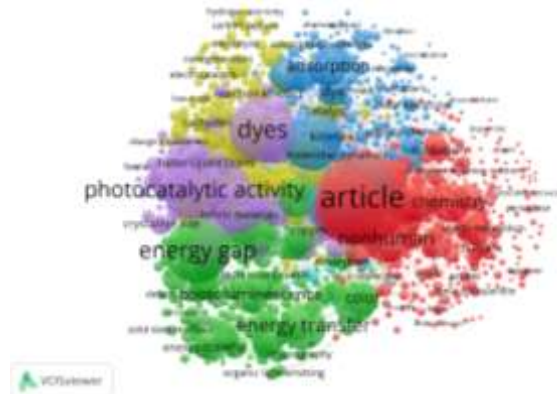
Dalam proses pemetaan jaringan, ditetapkan parameter analisis seperti *minimum occurrence*, *threshold*, dan teknik *clustering* untuk mengelompokkan topik penelitian berdasarkan kedekatan konseptual. Sebagai contoh, dalam analisis kata kunci, nilai minimum kemunculan tertentu (misalnya ≥ 5 atau ≥ 10) digunakan untuk menyaring istilah yang signifikan secara statistik, sehingga menghasilkan peta visual yang representatif[19]. Tahapan penelitian dilakukan secara runtut mulai dari pengumpulan data, pembersihan dan normalisasi data, analisis kuantitatif, visualisasi jaringan, hingga interpretasi hasil untuk

menarik kesimpulan ilmiah. Secara naratif, diagram alur penelitian (flowchart) dimulai dari tahap *data retrieval* (pengumpulan data dari Scopus), dilanjutkan dengan *data screening* (penyaringan berdasarkan kriteria), *data processing* (ekstraksi dan normalisasi), *bibliometric analysis* (analisis menggunakan VOSviewer/Bibliometrix), *visualization* (pemetaan jaringan), dan diakhiri dengan *interpretation and reporting*. Justifikasi penggunaan metode bibliometrik dalam penelitian ini didasarkan pada kemampuannya untuk mengidentifikasi pola penelitian secara makro, mengungkap kesenjangan penelitian, serta memberikan dasar empiris dalam merumuskan arah pengembangan energi osmosis di masa depan secara lebih terstruktur dan berbasis data[20].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Network Visualization (Pemetaan Jaringan Kata Kunci)

Untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai struktur konseptual bidang penelitian, analisis diawali dengan visualisasi jaringan kata kunci yang merepresentasikan hubungan antar topik dalam literatur ilmiah.

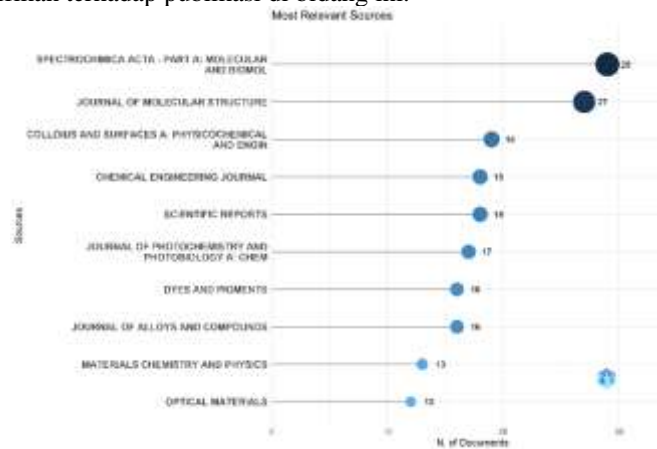


Visualisasi ini memperlihatkan bahwa kata kunci seperti photocatalytic activity, energy gap, dan dyes mendominasi jaringan dengan ukuran node yang besar, menandakan frekuensi kemunculan yang tinggi dalam publikasi ilmiah[21]. Keterhubungan antar node menunjukkan adanya interaksi erat antara bidang kimia material, katalisis, dan fenomena optik, yang menjadi fondasi penting dalam pengembangan teknologi energi berbasis material, termasuk energi osmosis.

Selain itu, terbentuknya beberapa klaster berwarna mengindikasikan adanya pengelompokan tema penelitian yang spesifik. Klaster yang berkaitan dengan adsorption dan kinetics mencerminkan fokus pada mekanisme reaksi, sedangkan klaster lain seperti energy transfer dan photoluminescence menyoroti aspek sifat optik material. Fragmentasi ini menunjukkan bahwa integrasi antar bidang masih terbuka luas untuk mendorong inovasi yang lebih aplikatif dalam blue energy[22].

Most Relevant Sources (Sumber Jurnal Paling Relevan)

Dalam upaya mengidentifikasi pusat diseminasi ilmu pengetahuan, analisis selanjutnya menyoroti jurnal-jurnal yang memiliki kontribusi paling signifikan terhadap publikasi di bidang ini.



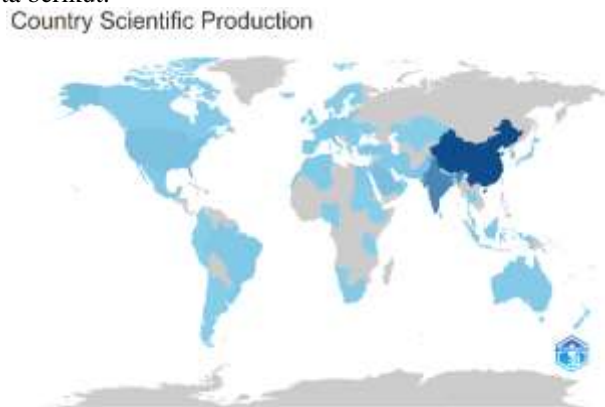
Grafik menunjukkan bahwa Spectrochimica Acta Part A dan Journal of Molecular Structure merupakan jurnal dengan jumlah publikasi tertinggi, yang mengindikasikan dominasi pendekatan berbasis kimia dan karakterisasi material. Selain itu,

kehadiran jurnal seperti Chemical Engineering Journal dan Colloids and Surfaces A menegaskan keterkaitan erat antara penelitian fundamental dan aplikasi teknik.

Dominasi jurnal dalam bidang kimia dan material mengindikasikan bahwa pengembangan energi osmosis masih sangat bergantung pada inovasi material, khususnya membran dan katalis. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian di masa depan perlu mengarah pada integrasi lintas disiplin untuk mempercepat implementasi teknologi dalam skala industri[23].

Country Scientific Production (Distribusi Produksi Ilmiah Global)

Dimensi geografis penelitian menjadi aspek penting dalam memahami distribusi kontribusi ilmiah secara global, sebagaimana ditunjukkan pada peta berikut.

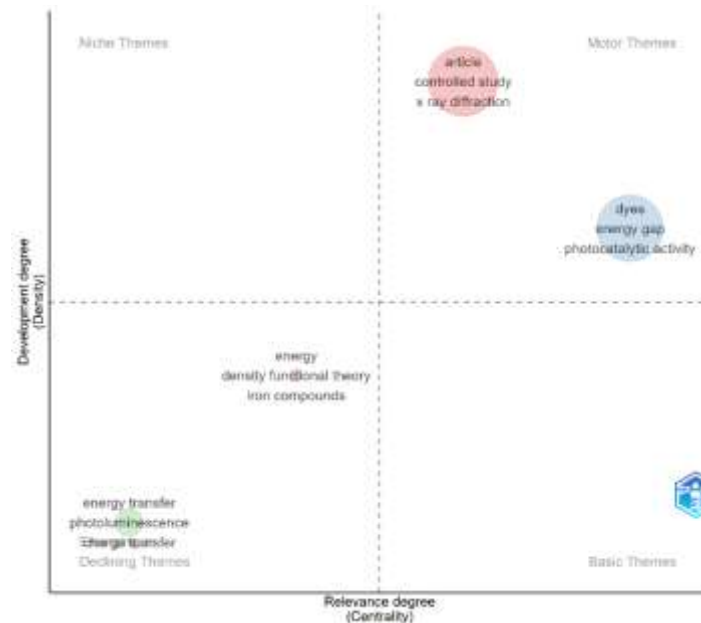


Peta ini menunjukkan bahwa negara-negara seperti China dan India memiliki kontribusi publikasi yang sangat tinggi, mencerminkan peningkatan kapasitas riset dan investasi dalam bidang energi dan material. Sementara itu, negara-negara maju seperti Amerika Serikat dan beberapa negara Eropa tetap mempertahankan peran strategis dalam produksi ilmu pengetahuan[24].

Namun demikian, kontribusi dari negara berkembang masih relatif terbatas, yang mengindikasikan adanya kesenjangan dalam akses terhadap sumber daya penelitian. Kondisi ini membuka peluang untuk memperkuat kolaborasi internasional guna mempercepat pengembangan teknologi energi osmosis secara global.

Thematic Map (Peta Tematik Penelitian)

Untuk mengkaji tingkat kematangan dan relevansi topik penelitian, peta tematik berikut digunakan sebagai alat analisis strategis dalam mengelompokkan tema-tema utama.

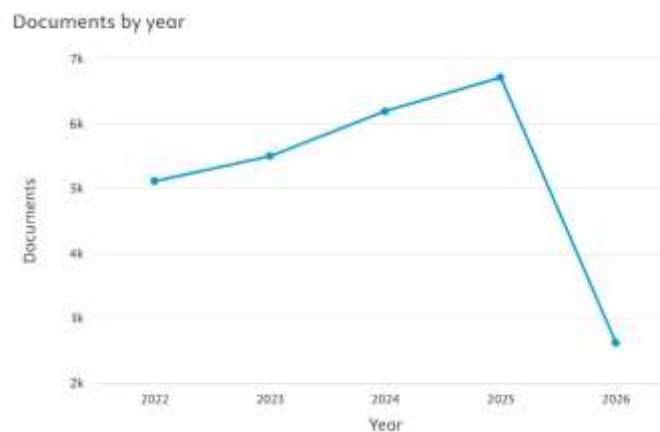


Peta ini mengelompokkan tema ke dalam empat kuadran berdasarkan centrality dan density. Tema seperti dyes, energy gap, dan photocatalytic activity berada pada kuadran motor themes, yang menunjukkan bahwa topik tersebut telah berkembang dengan baik dan memiliki pengaruh signifikan dalam jaringan penelitian.

Sebaliknya, tema seperti energy transfer dan photoluminescence berada pada kuadran declining themes, yang menandakan adanya penurunan perhatian atau pergeseran fokus riset. Sementara itu, tema dasar seperti energy dan density functional theory berada pada basic themes, yang tetap penting namun memerlukan penguatan untuk mendukung inovasi baru, termasuk dalam konteks energi osmosis.

Documents by Year (Tren Publikasi Tahunan)

Sebagai refleksi dinamika temporal penelitian, grafik berikut menyajikan perkembangan jumlah publikasi dari tahun ke tahun.



Data menunjukkan adanya tren peningkatan publikasi yang konsisten dari tahun 2022 hingga 2025, yang menandakan meningkatnya perhatian akademik terhadap bidang ini. Pertumbuhan ini sejalan dengan meningkatnya urgensi global dalam pengembangan energi terbarukan dan kemajuan teknologi material[25].

Penurunan jumlah publikasi pada tahun 2026 kemungkinan besar disebabkan oleh keterbatasan data tahun berjalan atau proses indeksasi yang belum lengkap. Oleh karena itu, tren ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati. Secara keseluruhan, pola pertumbuhan ini mengindikasikan bahwa bidang penelitian masih berkembang aktif dan memiliki potensi besar untuk eksplorasi lebih lanjut.

PENUTUP

Berdasarkan hasil analisis bibliometrik yang telah dilakukan, penelitian mengenai energi osmosis (blue energy) menunjukkan perkembangan yang signifikan dalam satu dekade terakhir, terutama didorong oleh meningkatnya kebutuhan global terhadap sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan rendah emisi. Tren publikasi yang terus meningkat mengindikasikan bahwa topik ini semakin mendapat perhatian dalam komunitas ilmiah. Selain itu, pemetaan kata kunci dan peta tematik menunjukkan bahwa penelitian masih didominasi oleh pendekatan berbasis material, khususnya dalam pengembangan membran dan kajian sifat kimia-fisika, yang menjadi komponen krusial dalam teknologi seperti pressure retarded osmosis (PRO) dan reverse electrodialysis (RED).

Dari sisi distribusi kontribusi ilmiah, terdapat ketimpangan antara negara maju dan berkembang, di mana negara seperti China, India, dan Amerika Serikat mendominasi produksi penelitian. Hal ini mencerminkan adanya perbedaan kapasitas riset, infrastruktur, serta investasi dalam bidang energi dan material. Sementara itu, hasil analisis juga menunjukkan bahwa penelitian energi osmosis masih bersifat parsial dan terfragmentasi, dengan fokus yang lebih besar pada aspek teknis dibandingkan integrasi sistem dan evaluasi kelayakan ekonomi. Kondisi ini menandakan masih adanya kesenjangan penelitian yang perlu diatasi melalui pendekatan multidisiplin dan kolaborasi internasional yang lebih kuat.

Secara keseluruhan, energi osmosis memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan yang stabil dan ramah lingkungan, terutama karena sifatnya yang non-intermiten dan ketersediaan sumber daya yang melimpah di wilayah pesisir. Namun, tantangan utama seperti efisiensi teknologi, fouling membran, serta tingginya biaya implementasi masih menjadi hambatan dalam skala komersialisasi. Oleh karena itu, diperlukan inovasi berkelanjutan, integrasi lintas disiplin ilmu, serta dukungan kebijakan dan investasi untuk mempercepat pengembangan dan penerapan teknologi blue energy sebagai bagian dari solusi energi masa depan.

.DAFTAR RUJUKAN

- [1] S. Algburi et al., "Environmental impact assessment of carbon-negative bio-based plastics advancing sustainable feedstock utilization," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 30, 2025, doi: 10.1016/j.biteb.2025.102124.
- [2] Z. H. Siregar et al., "The Effect of Fuel Mixture Composition on Gasoline," *J. Ilm. Tek. Mesin, Ind. Elektro, dan Sipil*, vol. 05, no. 02, pp. 394–402, 2024, doi: 10.54123/vorteks.v5i2.389.
- [3] Z. Hasrudy Siregar and A. Fadillah Nasution, "Ethanol Reduces Emissions But Damages Engines? aSystematic Literature Review and Meta-Analysis ofPerformance, Emissions, and Technological Risks of 4-Stroke Motor Engines," *J. Vor.*, vol. 06, no. 01, pp. 490–502, 2025, doi: 10.54123/vorteks.v6i1.442.
- [4] A. Kashyap, U. Singh, M. Chandel, and S. Kumar, "Multifunctional perovskite materials for energy harvesting and optoelectronic devices," *CrystEngComm*, 2026, doi: 10.1039/d6ce00101g.
- [5] M. Eti et al., "Further Development of Polyepichlorohydrin Based Anion Exchange Membranes for Reverse Electrodialysis by Tuning Cast Solution Properties," *Membranes (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2022, doi: 10.3390/membranes12121192.
- [6] Z. H. Siregar, Jufrizal, M. Hasanah, and Muhammad Dendy Agusdiandy, "Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 1, pp. 11–16, 2022, doi: 10.56862/irajtma.v1i1.1.
- [7] N. Abbasi, S. A. Khan, T. A. Khan, and S. S. Alharthi, "Statistical evaluation of liquid phase sequestration of acridine orange and Cr6+ by novel mesoporous glutamic acid-g-polyacrylamide/plaster of paris/riboflavin hydrogel nanocomposite," *Environ. Res.*, vol. 213, 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.113712.
- [8] A. Hadipour, M. Shakiba, A. Bozorg, A. Foroozandeh, Z. Pahnavar, and M. Abdouss, "Benzenesulfonamide-Functionalized Electrospun Polysulfone as an Antibacterial Support Layer of Thin-Film Composite Pressure-Retarded Osmosis Membrane: Fabrication and Performance Evaluation," *Int. J. Environ. Res.*, vol. 18, no. 3, 2024, doi: 10.1007/s41742-024-00583-9.
- [9] A. Mouaky and A. Rachek, "Multi-objective optimization of a solar-biomass multi-generation system with dual-stage desalination for brine minimization," *J. Clean. Prod.*, vol. 477, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143849.
- [10] Z. H. Siregar et al., "From the experimental results of briquettes using a portable," *J. Vor.*, vol. 1, no. 02, pp. 11–16, 2021, doi: 10.54123/vorteks.v5i2.389.
- [11] N. W. Elgalad et al., "Unified Modeling Architecture for Load Management in Extreme Heat: The New York City Case," *J. Eng. Sustain. Build. Cities*, vol. 7, no. 3, 2026, doi: 10.1115/1.4071100.

- [12] H. Yang, W. Li, Y. Gao, G. Zhong, H. Wang, and Y. Han, "Hierarchically aligned reduced graphene oxide/MXene foam enabling Marangoni-driven salt-resistant desalination via bidirectional ion reflux," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 700, 2025, doi: 10.1016/j.jcis.2025.138617.
- [13] Y. Altowairqi, A. M. El-Naggar, Z. K. Heiba, A. M. Kamal, M. E. Assal, and M. B. Mohamed, "Tailoring the optical, and dielectric features of flexible PVC/ZnMn₂O₄/CuCo₂O₄/x wt% TMAI nanocomposite polymers for use in optoelectronics and capacitance storage applications," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 56, no. 8, 2024, doi: 10.1007/s11082-024-07091-2.
- [14] F. Luo and M. Taghavi, "Environmental and exergoeconomic analysis of a low-carbon polygeneration process based on biomass energy, a geothermal source and a high-temperature fuel cell," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 19, pp. 110–119, 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctad116.
- [15] D. Golubenko et al., "Alkylation as a strategy for optimizing water uptake and enhancing selectivity in polyethyleneimine-based anion-exchange membranes for brine mining via electrodialysis," *Water Res.*, vol. 283, 2025, doi: 10.1016/j.watres.2025.123869.
- [16] A. Boubakri et al., "An in-depth analysis of membrane distillation research (1990–2023): Exploring trends and future directions through bibliometric approach," *J. Environ. Manage.*, vol. 367, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121942.
- [17] J. Wu, W. Jiang, and T. Yang, "A bibliometric analysis of oscillating-water-column wave energy converters: emerging trends and research frontiers," *Energy*, vol. 340, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.139365.
- [18] A. Aziz, W. Sultan, H. Shabbir, M. Shams, T. Aziz, and M. Asif, "Advancements in photovoltaic thermal cooling systems: analysis of nanofluid technologies," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2026, doi: 10.1007/s10973-026-15430-6.
- [19] R. P. Caldas, A. C. G. Melo, and D. M. Falcão, "Hybrid Linear and Support Vector Quantile Regression for Short-Term Probabilistic Forecasting of Solar PV Power," *Energies*, vol. 19, no. 2, 2026, doi: 10.3390/en19020569.
- [20] S. Suryanto et al., "Composite Buckling Performances for Energy Structures and Infrastructures: A Milestone Analysis Based on Finite Element Research (2000–2025)," *ES Mater. Manuf.*, vol. 31, 2026, doi: 10.30919/mm1992.
- [21] M. H. Meteab, A. Hashim, and B. H. Rabee, "Synthesis and tailoring the morphological, optical, electronic and photodegradation characteristics of PS–PC/MnO₂–SiC quaternary nanostructures," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 55, no. 2, 2023, doi: 10.1007/s11082-022-04447-4.
- [22] Z. Khan et al., "Recent advancements, modification strategies, and practical implications in semiconductor photocatalysts for efficient wastewater treatment: A review," *Environ. Eng. Res.*, vol. 31, no. 4, 2026, doi: 10.4491/eer.2025.435.
- [23] W. Sun, T. Li, Y. Hong, H. Chu, J. Liu, and L. Feng, "Dual-objective optimization of biofuel-based solid oxide fuel cell energy system for hydrogen fuel and desalinated water production," *Fuel*, vol. 334, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126598.
- [24] H. Attar, A. Alahmer, G. Borowski, and S. Alsaqoor, "Comprehensive review of advancements, challenges, design, and environmental impact in floating photovoltaic systems," *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 301–322, 2025, doi: 10.12912/27197050/199520.
- [25] J. Wei et al., "Regulation-oriented cascade hydropower coordinated operation with pumped storage: dispatch strategy and comprehensive evaluation," *Energy*, vol. 348, 2026, doi: 10.1016/j.energy.2026.140497.