

# POTENSI ENERGI BARU TERBARUKAN DI KAWASAN MARITIM INDONESIA: TINJAUAN TEKNOLOGI DAN TANTANGAN IMPLEMENTASI

Syamsul Ma'arif<sup>1</sup>, Irwanuddin H. I. Kulla<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa (UST), Yogyakarta

Email: syamsul.maarif@ustjogja.ac.id

<sup>2</sup> Pusat Pengkajian Inovasi Nuklir dan Energi Baru Terbarukan, Ikatan Cendekiawan Muslim se-Indonesia (PUSPINEBT-ICMI), Jakarta

Email: irwan\_irwanuddin@yahoo.com

Masuk : 28-11-2023, revisi: 05-12-2023, diterima untuk diterbitkan : 12-12-2023

## ABSTRAK

Kawasan maritim Indonesia memegang peran krusial dalam pertumbuhan ekonomi dan konektivitas global. Sejalan dengan pertumbuhan populasi dan ekspansi industri di wilayah maritim, permintaan energi semakin meningkat. Namun, untuk menjaga ekologi dan ekosistem di wilayah ini, keberlanjutan pemenuhan energi memerlukan sumber yang bersih dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi dan hambatan implementasi teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim di Indonesia. Metode yang digunakan adalah metode *literature review* dengan mengeksplorasi teknologi yang telah terimplementasi dan yang masih dalam pengembangan. Hasilnya menunjukkan bahwa beberapa teknologi telah berhasil diimplementasikan, seperti PLTN Terapung, PLTS Terapung, energi angin lepas pantai, dan energi gelombang laut. Sedangkan, teknologi seperti konversi energi panas laut (OTEC), hidrogen dari air laut, dan *biofuel* dari mikroalga masih berada dalam tahap pengembangan. Sejumlah proyek yang telah diimplementasikan di Indonesia antara lain PLTS Terapung Cirata dan energi gelombang laut di Bali, sementara rencana pengembangan PLTN Terapung dari perusahaan Amerika Serikat dan OTEC bersama Jepang sedang dalam persiapan. Tantangan utama dalam implementasi teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim melibatkan aspek ekonomi, teknis, lingkungan, dan regulasi. Oleh karena itu, disarankan untuk meningkatkan investasi dalam riset dan pengembangan, memperkuat kerjasama internasional, serta merumuskan kebijakan yang mendukung implementasi teknologi energi baru di kawasan maritim. Dengan langkah-langkah ini, diharapkan Indonesia dapat mencapai transisi energi yang berkelanjutan dan sesuai dengan kebutuhan wilayah maritimnya.

**Kata Kunci:** energi baru dan terbarukan; implementasi teknologi; Indonesia; maritim; tantangan

## ABSTRACT

Indonesia's maritime region is crucial to economic growth and global connectivity. The energy demand is increasing along with population growth and industrial expansion in the marine region. However, to preserve the ecology and ecosystems in this area, the sustainability of energy supply requires clean and environmentally friendly sources. This research identifies the potential barriers to implementing new and renewable energy technologies in Indonesia's maritime region. The method used is a literature review exploring technologies that have been implemented and those still in development. The results indicate that several technologies have been successfully implemented, such as floating nuclear power plants (FNPP), floating solar power plants (FSPP), offshore wind energy, and ocean wave energy. Meanwhile, technologies such as ocean thermal energy conversion (OTEC), seawater hydrogen, and microalgae biofuel are still developing. Projects implemented in Indonesia include the Cirata FSPP and ocean wave energy in Bali, while plans for the development of FNPP from a U.S. company and OTEC in collaboration with Japan are underway. The main challenges in implementing new and renewable energy technologies in the maritime region involve economic, technical, environmental, and regulatory aspects. Therefore, it is recommended that investment in research and development be increased, international collaboration strengthened, and policies supporting implementing new energy technologies in the maritime region formulated. With these steps, Indonesia can achieve a sustainable energy transition in line with the needs of its maritime region.

**Keywords:** new and renewable energy; technology implementation; Indonesia; maritime; challenges

## 1. PENDAHULUAN

Kawasan maritim Indonesia, yang mencakup wilayah pesisir yang luas, laut, dan perairan kepulauan, memegang peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan pembangunan nasional (Rochwulaningsih dkk., 2019). Sebagai sumber penghidupan bagi jutaan orang dan gerbang perdagangan internasional yang vital, kawasan maritim menjelma menjadi pusat kegiatan ekonomi dan konektivitas global (Prayoga, 2022). Meskipun berperan signifikan, kawasan maritim tidak luput dari tantangan energi yang semakin kompleks. Seiring pertumbuhan populasi dan ekspansi industri, permintaan energi terus meningkat, menimbulkan ketidakmampuan kawasan ini dalam memenuhi kebutuhan energinya (Oloruntobi dkk., 2023). Tantangan ini semakin diperparah oleh peningkatan kegiatan pelayaran internasional, yang berkontribusi pada emisi gas buang berbahaya seperti NO<sub>x</sub>, CO, HC, SO<sub>x</sub>, dan PM, merugikan kualitas udara dan kesehatan ekosistem maritim (Durán-Grados dkk., 2022). Oleh karena itu, peran kawasan maritim sebagai sumber daya strategis menghadapi risiko terkait ketahanan energi dan dampak lingkungan yang perlu diatasi dengan solusi berkelanjutan.

Berdasarkan kondisi tersebut, maka permasalahan yang dihadapi adalah bagaimana memenuhi kebutuhan energi di Kawasan maritim Indonesia yang memenuhi aspek keberlanjutan. Pencarian sumber energi yang handal, bersih, dan berkelanjutan menjadi krusial untuk memastikan integritas ekologi dan stabilitas sosial-ekonomi di kawasan maritim (Kyvelou dkk., 2023). Kehadiran sumber energi baru dan terbarukan menjanjikan solusi inovatif dengan memanfaatkan kekayaan sumber daya alam di wilayah pesisir dan laut (Gabbar & Esteves, 2023; Narula, 2019). Potensi besar kawasan maritim untuk energi baru dan terbarukan tercermin dalam luasnya perairan terbuka yang terpapar sinar matahari serta pola angin yang konsisten di sepanjang pantai (Kokusho & Emoto, 2022). Wilayah maritim, yang mencakup laut dan pantai, memberikan peluang inovatif, seperti pembangkit listrik tenaga surya terapung dan teknologi energi gelombang (Li dkk., 2022). Dalam rangka menjawab tantangan ini, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi dan hambatan implementasi teknologi energi baru terbarukan di kawasan maritim Indonesia. Berdasarkan kajian literatur, fokus penelitian akan diarahkan pada identifikasi teknologi energi baru dan terbarukan yang dapat diintegrasikan ke dalam wilayah maritim Indonesia. Tinjauan ini mencakup pembangkit listrik tenaga nuklir terapung (Wang dkk., 2023), pembangkit listrik tenaga surya terapung (Bataev dkk., 2020), energi angin lepas pantai (Yu dkk., 2022), energi gelombang laut (Cuttler dkk., 2020), *ocean thermal energy conversion* (OTEC) (Ohki, 2020), hidrogen dari air laut (Marin dkk., 2023), dan *biofuel* dari mikroalga (Merlo dkk., 2021). Selanjutnya, dalam upaya memperdalam pemahaman, penelitian ini juga akan mengevaluasi tantangan dalam implementasi teknologi energi baru dan terbarukan, mencakup aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan regulasi. Evaluasi perbandingan dari pengalaman berbagai negara akan dilibatkan untuk menggambarkan dengan lebih rinci tantangan yang dihadapi dalam menerapkan teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim.

Signifikansi penelitian ini adalah usaha untuk membentuk lanskap energi baru dan terbarukan di kawasan maritim Indonesia. Seiring sumber energi terbarukan memberikan peluang untuk pembangunan berkelanjutan dan keberhasilan implementasi dapat meningkatkan pelestarian lingkungan di kawasan maritim. Tinjauan potensi teknologi dan tantangan energi baru terbarukan dapat memberikan wawasan dan pengetahuan bagi para pembuat kebijakan, peneliti, dan pemangku kepentingan yang tertarik untuk memastikan masa pemanfaatan energi baru terbarukan yang berkelanjutan untuk kawasan maritim Indonesia.

## 2. METODE PENELITIAN

Tinjauan literatur ini dilakukan dengan menggunakan metodologi *literature review*, bukan *systematic literature review* (SLR). *Literature review* atau tinjauan literatur tradisional adalah analisis komprehensif dari studi penelitian yang ada dan karya ilmiah yang relevan dengan topik penelitian yang dipilih (Ma'arif dkk., 2022). Pendekatan ini memungkinkan pencarian terhadap pokok bahasan dengan mencakup berbagai sumber, termasuk jurnal ilmiah, prosiding konferensi, *book chapter*, buku, dan laporan penelitian (repositori). *Literature review* ini bertujuan untuk memberikan analisis yang komprehensif tentang potensi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim Indonesia, dengan fokus pembahasan pada teknologi dan tantangan implementasi.

Basis data utama yang digunakan untuk *literature review* adalah *platform* pencarian “Google Scholar” (Ma'arif dkk., 2023). “Google Scholar” adalah mesin pencari akademis yang diakui secara luas dan mudah diakses yang mencakup berbagai artikel ilmiah, jurnal ilmiah, prosiding konferensi, dan *book chapter*, buku, repositori, dan paten. Cakupan yang luas terhadap penelitian multidisiplin yang dapat ditelusuri melalui “Google Scholar”, menjadikannya sumber data utama yang ideal untuk mengumpulkan literatur yang relevan tentang energi baru dan terbarukan di kawasan maritim.

Meskipun “Google Scholar” memberikan sumber data yang sangat luas, perlu dipilih sumber-sumber data yang valid untuk dipertimbangkan dalam penelitian *literature review*. Sumber data yang valid antara lain adalah jurnal ilmiah, prosiding konferensi, dan *book chapter*. Jurnal ilmiah melalui proses *peer-review* sebelum diterbitkan (Candal-Pedreira dkk., 2023), sementara prosiding konferensi menyajikan perkembangan dan temuan terbaru di bidang tersebut dengan proses *peer-review* juga oleh panitia konferensi. Sedangkan *book chapter* memberikan pengetahuan yang komprehensif tentang pokok bahasan yang dilakukan proses *peer-review* juga sebelum buku tersebut diterbitkan. Oleh karena itu, fokus sumber data yang akan digunakan dalam *literature review* ini adalah ketiga sumber data tersebut.

Pemilihan literatur yang relevan dilakukan melalui pencarian dengan menggunakan kata kunci tertentu. Kata kunci yang digunakan melibatkan spektrum luas terkait sumber energi baru dan terbarukan, teknologinya, dan tantangan implementasinya di kawasan maritim. Kata kunci yang digunakan lebih banyak dengan Bahasa Inggris karena untuk melihat implementasi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim di berbagai daerah. Beberapa kata kunci yang digunakan antara lain “Renewable Energy,” “Maritime,” “Indonesia,” “Power Plants,” dan “Implementation Challenges.” Kata kunci-kata kunci ini dipilih untuk memastikan pencarian yang komprehensif dan menangkap berbagai literatur tentang topik tersebut.

Secara keseluruhan, tahapan dalam proses *literature review* potensi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan detail setiap langkahnya diuraikan sebagai berikut:

- 1) Menetapkan Tujuan: Tahapan pertama adalah menetapkan tujuan jelas dari *literature review*, yaitu, untuk memahami potensi sumber energi baru terbarukan di kawasan maritim Indonesia dan menganalisis tantangan implementasinya.
- 2) Pencarian dengan Kata Kunci: Langkah selanjutnya melibatkan pencarian literatur menggunakan kata kunci tertentu, seperti “Renewable Energy,” “Maritime,” “Indonesia,” “Power Plants,” “Implementation Challenges,” dan jenis-jenis energi tertentu (contohnya, solar, wind, ocean wave). Pencarian ini dilakukan di basis data “Google Scholar” untuk mengidentifikasi sumber-sumber yang relevan. Sumber yang dipilih hanyalah sumber data yang

berasal dari jurnal ilmiah, prosiding konferensi, dan *book chapter* yang terbit pada lima tahun terakhir.

- 3) Meringkas Temuan: Setelah literatur terkumpul, tahap ini melibatkan pembacaan dan pemahaman menyeluruh terhadap masing-masing sumber. Hasilnya kemudian dirangkum untuk menciptakan gambaran umum tentang potensi energi terbarukan di kawasan maritim, serta teknologinya dan tantangan implementasinya.
- 4) Klasifikasi Temuan: Temuan dari literatur kemudian diklasifikasikan berdasarkan kategori tertentu, seperti jenis energi terbarukan (surya, angin, gelombang laut), teknologi yang digunakan (misalnya, pembangkit listrik tenaga surya terapung), dan tantangan implementasi (aspek teknis, ekonomi, lingkungan, regulasi). Klasifikasi temuan ini dibuat dengan membuat tabel, seperti Tabel 1, yang mencantumkan temuan dan informasi utama dari setiap sumber.
- 5) Interpretasi Temuan: Tahap terakhir melibatkan interpretasi temuan secara komprehensif yang mencakup analisis terhadap keseluruhan literatur, mengidentifikasi dan meringkas hasil temuan, serta menyusun pemahaman yang lebih dalam tentang potensi serta hambatan implementasi energi baru terbarukan di kawasan maritim Indonesia. Pada uraian terkait kondisi di Indonesia ditambahkan dengan beberapa referensi yang mendukung berupa laporan kementerian, berita *online* terkini di Indonesia, dan informasi lainnya yang dapat dipercaya. Interpretasi ini memberikan dasar untuk menyusun kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya.



Gambar 1. Tahapan *literature review* potensi energi baru terbarukan di kawasan maritim

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, diuraikan hasil temuan dari tinjauan literatur terkait potensi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim. Hasil resume *literature review* disajikan secara komprehensif dalam Tabel 1, yang menjadi landasan bagi pembahasan rinci dalam artikel ini. Fokus pembahasan akan diuraikan lebih detail dalam sub-bagian pembahasan berdasarkan jenis teknologi energi baru dan terbarukan yang dapat diimplementasikan di wilayah maritim. Uraian dalam sub-bagian pembahasan mencakup pemahaman terhadap potensi sumber energi yang dapat dimanfaatkan, eksplorasi negara-negara yang telah menjadi pionir dalam menerapkan teknologi energi baru dan terbarukan tersebut, disertai dengan tantangan-tantangan yang dihadapi. Langkah selanjutnya membahas potensi Indonesia dalam mengadopsi dan mengimplementasikan teknologi energi baru dan terbarukan tersebut, dengan pemaparan secara rinci mengenai tantangan yang mungkin dihadapi dalam Indonesia. Terakhir, situasi dan kondisi Indonesia saat ini sehubungan dengan implementasi teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim akan dianalisis dengan cermat, memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan dan tantangan yang dihadapi negara ini dalam mencapai tujuan berkelanjutan dalam sektor energi.

Tabel 1. Resume hasil temuan terkait potensi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim

| Sumber Energi             | Teknologi                                 | Negara               | Daerah & Kapasitas                              | Deskripsi Proyek dan Hambatannya |                                                                                                                                              | Referensi                          |
|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Nuklir                    | Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Terapung | Rusia                | Akademik Lomonosov, Chukotka: 35 MW x 2 (70 MW) | -                                | Limbah Radioaktif                                                                                                                            | (Karavaeva, 2023)                  |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Potensi kecelakaan yang mengakibatkan pelepasan bahan radioaktif                                                                             |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Adanya oposisi penerimaan publik                                                                                                             |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Dampak lingkungan pada ekosistem laut                                                                                                        |                                    |
| Surya                     | Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung  | China                | Huainan: 70 MW                                  | -                                | Berada di atas danau bekas tambang yang menjadi area banjir.                                                                                 | (Pouran, 2018)                     |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Memiliki 194.700 panel surya, mencakup lebih dari 63 hektar area, dan dapat memasok 21.000 rumah                                             |                                    |
|                           |                                           | India                | Jodhpur: 1 MW                                   | -                                | Hambatan teknis dalam implementasi teknologi                                                                                                 | (Banik & Sengupta, 2021;           |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Biaya teknologi dan investasi tinggi                                                                                                         | D. Misra, 2021; Mittal dkk., 2017) |
|                           |                                           | Indonesia            | Cirata: 145 MW                                  | -                                | Tingkat kesulitan operasi dibandingkan di darat                                                                                              | (Febrian dkk., 2023)               |
| Angin                     | Energi Angin Lepas Pantai                 | Eropa                | 150 MW                                          | -                                | Biaya teknologi yang tinggi.                                                                                                                 | (Soares-Ramos dkk., 2020)          |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Pemilihan turbin dan struktur pondasi yang sesuai.                                                                                           |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Integrasi <i>grid</i> yang efisien ke jaringan darat.                                                                                        |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Kesesuaian lokasi terkait daya angin dan kedalaman air.                                                                                      |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Penyederhanaan proses perizinan                                                                                                              |                                    |
|                           |                                           | China                | Seluruh China: 328 GW                           | -                                | Pemilihan jenis turbin angin yang sesuai dengan kondisi.                                                                                     | (Yu dkk., 2022)                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Biaya teknologi yang tinggi                                                                                                                  |                                    |
|                           |                                           | Amerika Serikat (AS) | 30 MW                                           | -                                | Transmisi listrik ke pusat beban terbatas.                                                                                                   | (Costoya dkk., 2020)               |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Perairan AS lebih dalam                                                                                                                      |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Hambatan lain: jalur laut dan infrastruktur bawah air.                                                                                       |                                    |
| Gelombang                 | Energi Gelombang Laut                     | Australia            | Australia Barat: 40-60 kW/m                     | -                                | Fluktuasi sumber daya gelombang setiap tahunnya yang dipengaruhi oleh cuaca                                                                  | (Cuttler dkk., 2020)               |
|                           |                                           | China                | Hainan: 4 kW/m                                  | -                                | Distribusi sumber daya yang tidak merata.                                                                                                    | (Qiu dkk., 2019)                   |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Strategi pemerintah dan dukungan keuangan dalam implementasi                                                                                 |                                    |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Mitra kerjasama internasional                                                                                                                |                                    |
|                           |                                           | Indonesia            | Bali: 20-40 kW/m                                | -                                | Fluktuasi sumber daya gelombang setiap tahunnya yang dipengaruhi oleh cuaca                                                                  | (Rizal dkk., 2019)                 |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Perlu teknologi khusus untuk ekstraksi energi.                                                                                               |                                    |
| <b>Tahap Pengembangan</b> |                                           |                      |                                                 |                                  |                                                                                                                                              |                                    |
| Panas Laut                | Konversi Energi Panas Laut (OTEC)         | Jepang               | Okinawa: 100 kW                                 | -                                | Pembangunan fasilitas demonstrasi di Pulau Kumejima, Okinawa, Jepang masih taraf pengembangan dengan kapasitas 100 kW.                       | (Ohki, 2020)                       |
|                           |                                           | Amerika Serikat (AS) | Hawaii: 100 kW                                  | -                                | Efek lingkungan yang besar yaitu menyebabkan pendinginan air permukaan yang luas di sepanjang wilayah OTEC, tetapi memanaskan di tempat lain | (Jia dkk., 2018)                   |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Ketidakpastian dalam model, sehingga perlu pengembangan yang lebih komprehensif                                                              |                                    |
| Hidrogen                  | Hidrogen dari Air Laut                    | Australia            | RMIT University                                 | -                                | Masih taraf pengembangan                                                                                                                     | (Loomba dkk., 2023)                |
|                           |                                           |                      |                                                 | -                                | Efisiensi proses elektrolisis dan kebutuhan air laut dalam jumlah yang sangat besar.                                                         |                                    |

| Sumber Energi | Teknologi              | Negara               | Daerah & Kapasitas   | Deskripsi Proyek dan Hambatannya                                                                                               | Referensi          |
|---------------|------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|               |                        | Amerika Serikat (AS) | Standford University | - Masih taraf pengembangan                                                                                                     | (Marin dkk., 2023) |
| Mikroalga     | Biofuel dari Mikroalga | -                    | -                    | - Masih dalam taraf penelitian dan pengembangan<br>- Peningkatan dari sisi teknologi dan keekonomian, masih terus dikembangkan | (Merlo dkk., 2021) |

### Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Terapung

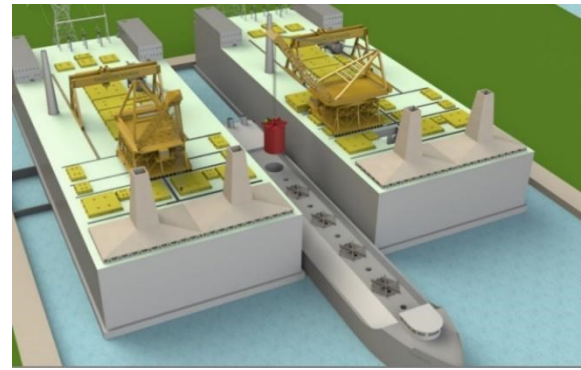
Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Terapung (PLTN Terapung) atau *Floating Nuclear Power Plants* (FNPP) adalah jenis pembangkit listrik tenaga nuklir yang terletak di atas platform di laut, dirancang khusus untuk menghasilkan listrik dan/atau melakukan desalinasi air laut (Wang dkk., 2023). Keuntungan utama dari teknologi PLTN Terapung adalah mobilitasnya dan kemampuannya untuk menyediakan pasokan listrik di lokasi yang sulit dijangkau, terutama di wilayah utara yang memiliki iklim dingin. Meskipun memiliki manfaat tersebut, PLTN Terapung juga menghadapi risiko dan tantangan serius, termasuk masalah limbah radioaktif, potensi kecelakaan, respons publik yang kompleks, dan dampak potensial pada ekosistem laut (Karavaeva, 2023).

Rusia menjadi negara pionir dalam mengimplementasikan PLTN Terapung dengan menggunakan reaktor KLT-40S, masing-masing dengan kapasitas 35 MW, sehingga totalnya mencapai 70 MW (Power Technology, 2020). Pengembangan stasiun PLTN Terapung pertama di Rusia dilaksanakan pada 14 September 2019 oleh Akademik Lomonosov, yang terletak di wilayah Chukotka (Gambar 2.a). Selain Rusia, beberapa negara, termasuk China, Denmark, dan Korea Selatan, juga tengah mengembangkan teknologi PLTN Terapung menurut data dari *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 2023). Meskipun beberapa negara sedang melakukan pengembangan, hingga saat ini, hanya satu negara yang telah mengimplementasikan PLTN Terapung, yaitu Rusia dengan stasiun Akademik Lomonosov.

Saat ini, Indonesia belum mengimplementasikan PLTN Terapung, namun pada Oktober 2023, perusahaan Amerika Serikat, NuScale Power dan ThorCon Power memiliki rencana untuk membangun pembangkit listrik tenaga nuklir baru di Indonesia. NuScale Power akan membangun *Small Modular Reactor* (SMR) dengan kapasitas 300 MWe per unit yang dijadwalkan beroperasi pada tahun 2032. Sementara itu, Thorcon Power akan membangun PLTN Terapung berbasis torium dengan kapasitas 500 MWe yang diharapkan beroperasi pada tahun 2030 seperti terlihat pada Gambar 2.b. (The Jakarta Post, 2023). Perkembangan ini mencerminkan upaya Indonesia untuk melibatkan teknologi nuklir dalam kebijakan energinya, yang dapat membuka potensi baru namun juga menuntut manajemen risiko dan regulasi yang cermat.



a) PLTN Terapung Akademik Lomonosov, Rusia (World Nuclear News, 2019)



b) Desain PLTN Terapung Indonesia dari ThorCon Power (The Jakarta Post, 2023)

Gambar 2. PLTN Terapung

### Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung

*Floating Solar Power Plants* (FSPP) atau Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung (PLTS Terapung) adalah infrastruktur pembangkit listrik tenaga surya yang terpasang di atas permukaan air, seperti waduk, danau, atau laut. Teknologi ini memiliki potensi besar untuk memanfaatkan lahan yang sebelumnya dianggap tidak produktif (Febrian dkk., 2023). Keunggulan tambahan termasuk kemampuannya mengurangi penguapan air di permukaan air terbuka dan menghambat pertumbuhan alga yang dapat merugikan (Vidović dkk., 2023).

Negara-negara yang menjadi pionir dalam mengimplementasikan PLTS Terapung termasuk China dan India. Contohnya, PLTS Terapung di Kota Huainan, Provinsi Anhui, China, terletak di atas danau bekas tambang batu bara dengan kapasitas mencapai 70 MW (Gambar 3.a.). PLTS Terapung ini terdiri dari 194.700 panel surya yang mencakup lebih dari 63 hektar area banjir dan dapat menyuplai listrik untuk 21.000 rumah (Pouren, 2018). Sementara itu, PLTS Terapung di India, di Jodhpur, memiliki kapasitas 1 MW dengan rasio kinerja tahunan dan faktor pemanfaatan kapasitas masing-masing mencapai 81,49% dan 19,58%. PLTS Terapung ini juga berhasil menghemat 191,174 juta liter air dari penguapan setiap tahunnya dan menunjukkan kinerja energi lebih tinggi dibandingkan dengan PLTS di darat (Mittal dkk., 2017). Meskipun berhasil, implementasi PLTS Terapung di India menghadapi tantangan teknis dan ekonomi, termasuk tantangan investasi yang signifikan (Banik & Sengupta, 2021). Selain China dan India, beberapa negara lain yang telah mengadopsi teknologi ini termasuk Amerika Serikat, Italia, Spanyol, Singapura, dan Korea Selatan (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020).

Indonesia telah berhasil mengimplementasikan PLTS Terapung, dan proyek terbesarnya adalah PLTS Terapung Cirata di Jawa Barat dengan kapasitas mencapai 145 MW atau 195 MWp, menjadikannya yang terbesar di Asia Tenggara, seperti terlihat pada Gambar 3.b. (Kencana, 2023; PT PLN, 2021). Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN 2021-2030, rencana pembangunan selanjutnya menargetkan PLTS Terapung di Waduk Saguling, Jawa Barat, dengan kapasitas 60 MW, dan Danau Singkarak, Sumatera Barat, dengan kapasitas 48 MW. Target kapasitas total PLTS Terapung dari berbagai lokasi mencapai 612 MW, termasuk lokasi di Waduk Wonogiri, Jawa Tengah (100 MW), Waduk Sutami, Jawa Timur (122 MW), Waduk Jatiluhur, Jawa Barat (100 MW), Waduk Mrica, Jawa Tengah (60 MW), dan Waduk Wonorejo, Jawa Timur (122 MW) (PT PLN, 2021). Meskipun belum ditemukan artikel ilmiah yang membahas secara khusus tantangan implementasi PLTS Terapung di Indonesia, RUPTL PT PLN 2021-2030 menunjukkan bahwa tingkat kesulitan operasional menjadi salah satu tantangan yang



dihadapi dalam penerapan teknologi ini dibandingkan dengan PLTS konvensional di darat (PT PLN, 2021). Tantangan ini menunjukkan perlunya pemahaman mendalam dan pemecahan masalah yang efektif dalam mendukung pertumbuhan dan keberlanjutan PLTS Terapung di Indonesia.



a) PLTS Terapung di Huainan, Anhui, China  
(Planete Energies, 2018)



b) PLTS Terapung Cirata, Jawa Barat,  
Indonesia (Wahyudi, 2023)

Gambar 3. PLTS Terapung

### Energi Angin Lepas Pantai

Energi angin lepas pantai atau *offshore wind energy*, merupakan sumber energi yang dihasilkan melalui penggunaan turbin angin yang terletak di lepas pantai, membentuk ladang angin yang mengubah energi angin menjadi listrik (Gambar 4). Keunggulan dari energi angin lepas pantai terletak pada kecepatan angin yang lebih tinggi di lepas pantai, menghasilkan lebih banyak energi (Keivanpour dkk., 2017). Namun, implementasinya dihadapkan pada sejumlah tantangan, termasuk biaya yang lebih tinggi akibat instalasi dan peralatan mahal, kondisi lingkungan dan kerja yang sulit, prosedur pemasangan yang rumit, dan kebutuhan akan langkah-langkah pencegahan korosi (Manwell, 2012).

Negara-negara yang memimpin dalam pengembangan energi angin lepas pantai antara lain Eropa, China, dan Amerika Serikat (deCastro dkk., 2019). Eropa memiliki kapasitas terpasang energi angin lepas pantai sebesar 150 MW (Soares-Ramos dkk., 2020), sementara Amerika Serikat memiliki 30 MW (Costoya dkk., 2020). China, dengan potensi energi angin lepas pantai mencapai 75% dari total potensi energi angin, memiliki distribusi potensial di provinsi pesisir seperti Liaoning, Zhejiang, Fujian, Guangdong, dan Shandong. Hingga akhir 2021, kapasitas terpasang kumulatif tenaga angin mencapai 328 GW (Yu dkk., 2022), dengan kapasitas terpasang energi angin lepas pantai di China mencapai 3,06 GW (Chao dkk., 2023).

Di Indonesia, potensi *offshore wind energy* tersebar di beberapa wilayah lepas pantai, seperti Banten, Sukabumi, Kupang, Pulau Wetar, Kabupaten Jeneponto, dan Kabupaten Kepulauan Tanimbar, sesuai dengan informasi dari Balai Besar Survei dan Pengujian Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (Dirjend EBTKE, 2021). Meskipun begitu, pengembangan energi angin di Indonesia masih menghadapi hambatan. Tantangan utamanya meliputi tingkat kesulitan dalam membangun struktur pondasi yang kokoh, instalasi *power supply*, transfer data, hingga pemeliharaan yang rumit dalam kasus kerusakan. Kesulitan ini menyebabkan biaya pengukuran angin di lepas pantai menjadi lebih mahal dibandingkan di darat (Bukhari, 2020).



## Energi Gelombang Laut

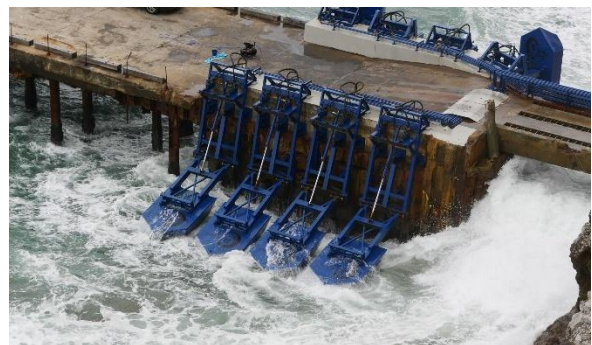
*Ocean wave energy* atau energi gelombang laut, memanfaatkan energi pada gelombang laut untuk menggerakkan generator pembangkit listrik dengan metode *floating piston* (Gambar 5). Sehingga, semakin tinggi gelombang, maka semakin tinggi pula arus, tegangan dan efisiensi. Australia, sebagai salah satu negara yang memiliki potensi besar, khususnya di wilayah Australia Barat, menawarkan kapasitas mencapai 40-60 kW/m. Namun, tantangan muncul dengan fluktuasi sumber daya gelombang yang dipengaruhi oleh perubahan cuaca tahunan, yang menjadi elemen yang perlu diatasi dalam mengoptimalkan pemanfaatan energi ini (Cuttler dkk., 2020).

Di negara lain seperti China, implementasi energi gelombang laut terjadi di wilayah Hainan dengan kapasitas sekitar 4 kW/m. Tantangan yang dihadapi mencakup distribusi sumber daya yang tidak merata, perumusan strategi pemerintah, dukungan keuangan, dan upaya kerjasama internasional. Adanya perbedaan distribusi sumber daya serta peran kunci pemerintah dan kolaborasi internasional menjadi elemen utama dalam mengatasi kompleksitas pengembangan energi gelombang laut di China (Qiu dkk., 2019).

Implementasi energi gelombang laut di Indonesia, salah satunya di Nusa Penida, Bali, juga memperlihatkan potensi yang signifikan untuk energi gelombang laut dengan kapasitas berkisar antara 20-40 kW/m (Rizal dkk., 2019). Tantangan di Indonesia mirip dengan Australia, yaitu fluktuasi sumber daya gelombang yang dipengaruhi oleh cuaca. Namun, tantangan tambahan muncul dalam bentuk kebutuhan akan teknologi khusus untuk ekstraksi energi, menandakan perlunya pendekatan yang disesuaikan dengan kondisi lokal dalam mewujudkan potensi penuh dari energi gelombang laut di Indonesia.



Gambar 4. Energi angin lepas pantai  
([www.energy.gov](http://www.energy.gov))



Gambar 5. Energi gelombang laut  
([www.ecowavepower.com](http://www.ecowavepower.com))

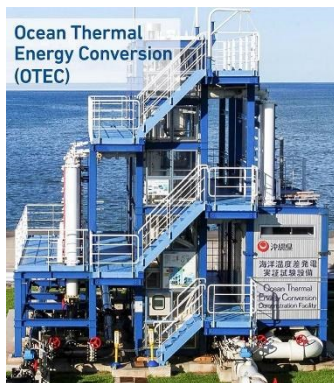
## Konversi Energi Panas Laut

Konversi energi panas laut, atau *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC), merupakan suatu metode inovatif untuk menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan perbedaan temperatur antara laut dalam dan perairan di dekat permukaan untuk mengoperasikan mesin kalor (N. Misra dkk., 2022). Meskipun saat ini masih dalam tahap pengembangan, beberapa negara telah aktif menggali potensi OTEC, termasuk Jepang dan Amerika Serikat.

Jepang telah mengimplementasikan teknologi OTEC di Pulau Kumejima, Okinawa (Gambar 6.a) dengan kapasitas sebesar 100 kW (Ohki, 2020). Meskipun telah berhasil membangun fasilitas demonstrasi, proyek ini masih dalam tahap pengembangan dan dihadapkan pada tantangan pembangunan yang perlu diatasi. Sedangkan di Amerika Serikat, implementasi OTEC sudah dilakukan di Hawaii (Gambar 6.b.) dengan kapasitas serupa, yaitu 100 kW (Jia dkk., 2018). Namun, tantangan yang dihadapi cukup kompleks, termasuk dampak lingkungan yang besar dengan

pendinginan air permukaan di sepanjang wilayah OTEC yang dapat mempengaruhi ekosistem setempat.

Sementara itu, Indonesia masih dalam tahap pengembangan OTEC, dan belum ada implementasi secara komersial. Namun, terdapat rencana kerja sama antara Jepang dan Indonesia untuk mengembangkan *pilot plant* pembangkit OTEC di Indonesia, menunjukkan upaya bersama dalam mewujudkan potensi OTEC sebagai sumber energi terbarukan di masa depan.



a) OTEC di Jepang (Ohki, 2020)



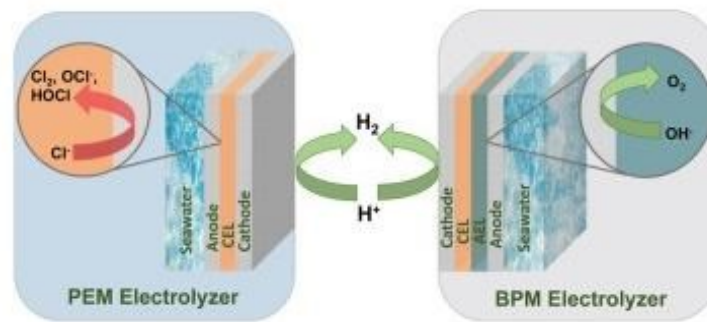
b) OTEC di Hawaii, AS (techxplore.com)

Gambar 6. Konversi energi panas laut atau *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC)

### Hidrogen dari Air Laut

Pengembangan hidrogen dari air laut menjadi sorotan utama di berbagai negara, termasuk Australia dan Amerika Serikat. Di Australia, proyek pengembangan dilakukan oleh RMIT *University* (Loomba dkk., 2023). Tantangan utama yang dihadapi adalah terkait efisiensi proses elektrolisis dan kebutuhan air laut yang sangat besar. Proyek ini masih dalam tahap pengembangan dan belum sepenuhnya terimplementasi secara luas. Sedangkan di Amerika Serikat, Stanford *University* juga melakukan pengembangan teknologi hidrogen dari air laut (Marin dkk., 2023). Proses elektrolisis dan kebutuhan air laut yang signifikan menjadi dua tantangan utama yang sedang dihadapi. Meskipun demikian, langkah-langkah inovatif yang diambil oleh Stanford *University* menandai upaya berkelanjutan untuk menciptakan solusi yang efisien dan ramah lingkungan. Indonesia juga masih dalam tahap penelitian dan pengembangan produksi hidrogen dari air laut.

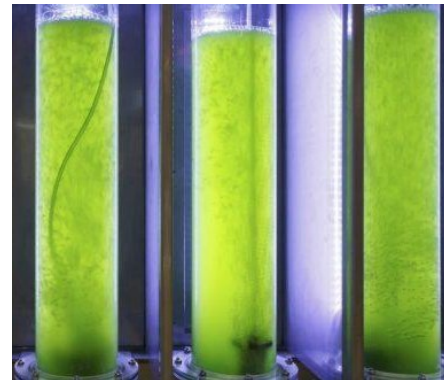
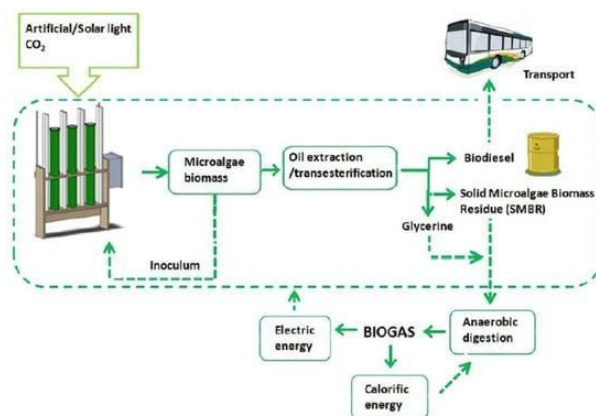
Penelitian dari Stanford *University* mengembangkan proses pembuatan hidrogen dari air laut dengan sistem membran bipolar dengan menggunakan dua jenis elektroliser, yaitu PEM (*Proton Exchange Membrane*) *Electrolyzer* dan BPM (*Base-Promoted Membrane*) *Electrolyzer* (Gambar 7). Dalam PEM *Electrolyzer*, membran proton memfasilitasi pergerakan proton dari katoda ke anoda, sementara BPM *Electrolyzer* menggunakan membran bersifat basa. Meskipun keduanya memiliki keunggulan dan kelemahan, sebagai sistem membran bipolar, keduanya memberikan potensi besar untuk menghasilkan hidrogen dari air laut. (Marin dkk., 2023).



Gambar 7. Proses pembuatan hidrogen dari air laut dengan sistem membrane bipolar (Marin dkk., 2023)

### Biofuel dari Mikroalga

Mikroalga laut merupakan sumber energi terbarukan potensial yang dapat diandalkan untuk mendukung tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan, pengembangan mikroalga sebagai *biofuel* terus dilakukan di berbagai negara termasuk Indonesia. Keuntungan pemanfaatan mikroalga untuk memproduksi energi adalah laju produksi biomassa yang tinggi, tidak bersaing dengan bahan pangan, dan cukup membutuhkan lahan yang terbatas. Pemanfaatan mikroalga sebagai *biofuel* fokus pada kandungan lipid dan biomassa (Gambar 8). Tantangan utama energi dari mikroalga adalah perlunya pengembangan teknologi lebih lanjut dan aspek ekonomi untuk membuat produksi *biofuel* mikroalga menjadi layak secara besar-besaran (Merlo dkk., 2021).



a) Skema proses produksi *biofuel* dari mikroalga (Merlo dkk., 2021)

b) proses produksi *biofuel* dari mikroalga dalam reaktor (plantlet.org)

Gambar 8. *Biofuel* dari mikroalga

Berdasarkan uraian implementasi teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim, mengevaluasi tantangan yang dihadapi oleh beberapa negara, dan menggambarkan kondisi terkini di Indonesia terkait adopsi teknologi energi baru dan terbarukan tersebut, maka tujuan penelitian ini telah tercapai. Implementasi berbagai teknologi energi baru dan terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga nuklir terapung, pembangkit listrik tenaga surya terapung, energi angin lepas pantai, energi gelombang laut, *ocean thermal energy conversion* (OTEC), hidrogen dari air laut, dan *biofuel* dari mikroalga, telah diulas secara rinci. Hasil analisis menyoroti tantangan teknis, ekonomi, lingkungan, dan regulasi yang dihadapi dalam menerapkan teknologi ini di kawasan maritim. Secara khusus, pembahasan mengenai pengalaman berbagai negara memberikan perspektif yang berharga para pemegang kebijakan yang relevan di tingkat lokal. Dengan demikian,

melalui eksplorasi tinjauan literatur, penelitian ini berhasil memberikan wawasan dan pengetahuan yang komprehensif, mendukung pencapaian tujuan untuk mengidentifikasi potensi dan hambatan implementasi teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim Indonesia.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Potensi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim sangat besar, bahkan masa depan energi baru dan terbarukan bisa diterapkan sebesar-besarnya di wilayah maritim. Beberapa teknologi energi baru dan terbarukan telah mencapai tahap implementasi dalam skala komersial, sementara yang lain masih dalam tahap pengembangan. PLTN Terapung menjadi salah satu contoh teknologi yang telah terimplementasi di Rusia, menunjukkan mobilitasnya dan kemampuannya untuk menyediakan pasokan listrik di lokasi terpencil. Begitu pula dengan PLTS Terapung yang telah sukses diimplementasikan di beberapa negara seperti China dan India, serta di Indonesia dengan proyek PLTS Terapung Cirata di Jawa Barat. Energi angin lepas pantai dan energi gelombang laut juga telah diimplementasikan dan terus dilakukan pengembangan, terutama di Eropa, China, dan Amerika Serikat. Sedangkan di Indonesia telah diimplementasikan energi gelombang laut namun masih terus ditingkatkan juga untuk menghadapi tantangan terkait biaya tinggi dan kondisi lingkungan sulit.

Sementara itu, beberapa teknologi lain masih berada dalam tahap pengembangan. Pengembangan teknologi OTEC menunjukkan potensi yang signifikan, namun implementasi baru dilakukan oleh Jepang dan Amerika Serikat. Pengembangan hidrogen dari air laut juga fokus pengembangan berbagai negara seperti Australia dan Amerika Serikat, sedangkan di Indonesia masih dalam tahap penelitian. Begitu pula dengan *biofuel* dari mikroalga, yang menjanjikan sebagai bahan bakar alternatif ramah lingkungan, namun memerlukan pengembangan teknologi dan aspek ekonomi yang lebih lanjut untuk meningkatkan produksi secara komersial.

Tantangan yang dihadapi dalam implementasi teknologi di kawasan maritim mencakup kendala ekonomi dan teknis, kesulitan dalam membangun infrastruktur yang kokoh, biaya investasi yang tinggi, dan dampak lingkungan. Meskipun demikian, upaya terus dilakukan untuk mengatasi kendala-kendala ini, sehingga dapat mewujudkan transformasi energi yang berkelanjutan di kawasan maritim.

Untuk mempercepat pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan di kawasan maritim Indonesia, disarankan untuk meningkatkan investasi dalam riset dan pengembangan, memperkuat kerjasama internasional, serta memperbaiki infrastruktur dan ketersediaan sumber daya untuk teknologi yang sudah terimplementasi. Pemerintah perlu merumuskan kebijakan yang mendukung implementasi teknologi energi baru pada sumber-sumber energi baru dan terbarukan dan melibatkan sektor swasta dalam pembangunan. Dengan ini, diharapkan wilayah maritim di Indonesia dapat dioptimalkan dalam mempercepat transisi energi yang berkelanjutan.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pusat Pengkajian Inovasi Nuklir dan Energi Baru Terbarukan, Ikatan Cendekiawan Muslim se-Indonesia (PUSPINEBT-ICMI) atas dukungan diberikan dalam pendanaan dan kontribusi *in-kind* selama proses penelitian dan penyusunan artikel ilmiah ini.

## REFERENSI

- Banik, A., & Sengupta, A. (2021). Scope, Challenges, Opportunities and Future Goal Assessment of Floating Solar Park. *2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources*(52042), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IEMRE52042.2021.9386735>
- Bataev, A., Potyarkin, V., Glushkova, A., & Samorukov, D. (2020). Assessment of development effectiveness of solar energy in Russia. *E3S Web of Conferences*, 221, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022103002>
- Bukhari, M. H. (2020, November 11). *Turbin Angin Lepas Pantai Adalah Masa Depan Indonesia*. Kumparan.com. <https://kumparan.com/hambukhari45/turbin-angin-lepas-pantai-adalah-masa-depan-indonesia-1uZFIIIRpdYn/3>
- Candal-Pedreira, C., Rey-Brandariz, J., Varela-Lema, L., Pérez-Ríos, M., & Ruano-Ravina, A. (2023). Challenges in peer review: how to guarantee the quality and transparency of the editorial process in scientific journals. *Anales de Pediatría (English Edition)*, 99(1), 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.anpede.2023.05.006>
- Chao, H., Zhang, W., Chen, H., Zhang, N., Qian, H., Gu, J., Gao, X., & Zhao, C. (2023). Summary of development of offshore wind power transmission technology and local hydrogen production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2486(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2486/1/012038>
- Costoya, X., deCastro, M., Carvalho, D., & Gómez-Gesteira, M. (2020). On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. *Applied Energy*, 262, 114537. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114537>
- Cuttler, M. V. W., Hansen, J. E., & Lowe, R. J. (2020). Seasonal and interannual variability of the wave climate at a wave energy hotspot off the southwestern coast of Australia. *Renewable Energy*, 146, 2337–2350. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.058>
- deCastro, M., Salvador, S., Gómez-Gesteira, M., Costoya, X., Carvalho, D., Sanz-Larruga, F. J., & Gimeno, L. (2019). Europe, China and the United States: Three different approaches to the development of offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 55–70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.025>
- Dirjend EBTKE. (2021, Januari 30). *Potensi Energi Angin Indonesia 2020*. Kementerian ESDM. [https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi\\_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020](https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020)
- Durán-Grados, V., Rodríguez-Moreno, R., Calderay-Cayetano, F., Amado-Sánchez, Y., Pájaro-Velázquez, E., Nunes, R. A. O., Alvim-Ferraz, M. C. M., Sousa, S. I. V., & Moreno-Gutiérrez, J. (2022). The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain). *Sustainability*, 14(19), 12507. <https://doi.org/10.3390/su141912507>
- Febrian, H. G., Supriyanto, A., & Purwanto, H. (2023). Calculating the energy capacity and capacity factor of floating photovoltaic (FPV) power plant in the cirata reservoir using different types of solar panels. *Journal of Physics: Conference Series*, 2498(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2498/1/012007>
- Gabbar, H. A., & Esteves, O. L. A. (2023). Planning and Evaluation of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Penetration for Marine and Waterfront Applications. *Energies*, 16(14), 5329.
- IAEA. (2023, November 21). *Floating Nuclear Power Plants: Benefits and Challenges discussed at IAEA Symposium*. International Atomic Energy Agency (IAEA). <https://www.iaea.org/newscenter/news/floating-nuclear-power-plants-benefits-and-challenges-discussed-at-iaea-symposium>
- Jia, Y., Nihous, G., & Rajagopalan, K. (2018). An Evaluation of the Large-Scale Implementation of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Using an Ocean General Circulation Model



- with Low-Complexity Atmospheric Feedback Effects. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(1), 12. <https://doi.org/10.3390/jmse6010012>
- Karavaeva, E. (2023). Floating nuclear power plants: Risks and opportunities for the development of Arctic ports. *AIP Conference Proceedings*, 060009. <https://doi.org/10.1063/5.0124967>
- Keivanpour, S., Ramudhin, A., & Ait Kadi, D. (2017). The sustainable worldwide offshore wind energy potential: A systematic review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(6). <https://doi.org/10.1063/1.5009948>
- Kencana, M. R. B. (2023, November 9). *Jokowi Resmikan PLTS Terapung Terbesar Asia Tenggara Hari ini*. Liputan6.com. <https://www.liputan6.com/bisnis/read/5448385/jokowi-resmikan-plts-terapung-terbesar-asia-tenggara-hari-ini>
- Kokusho, T., & Emoto, E. (2022). Realize 100% Renewable Energy by Sailing Mega-Solar Rafts in Low-Latitude Pacific Ocean. *Engineering Science & Technology*, 271–278. <https://doi.org/10.37256/est.3220221529>
- Kyvelou, S. S., Ierapetritis, D. G., & Chiotinis, M. (2023). The Future of Fisheries Co-Management in the Context of the Sustainable Blue Economy and the Green Deal: There Is No Green without Blue. *Sustainability*, 15(10), 7784. <https://doi.org/10.3390/su15107784>
- Li, M., Luo, H., Zhou, S., Kumar, G. M. S., Guo, X., Law, T. C., & Cao, S. (2022). State-of-the-art review of the flexibility and feasibility of emerging offshore and coastal ocean energy technologies in East and Southeast Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112404>
- Loomba, S., Khan, M. W., & Mahmood, N. (2023). Seawater to Green Hydrogen: Future of Green Energy. *ChemElectroChem*. <https://doi.org/10.1002/celec.202300471>
- Ma'arif, S., Sari, R. E., & Indraswari, N. M. (2023). Peran Perilaku Berkelanjutan dalam Manajemen Lingkungan untuk Pengembangan Desa Wisata Berbasis Energi Terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 202–207. <https://doi.org/10.24002/senapas.v1i1.7388>
- Ma'arif, S., Susanti, D. A., Rezalti, D. T., Irmaya, A. I., Yunita, L., Damayanti, D., & Wahyuningtyas, Y. F. (2022). A Review of Strategies for Managing Uncertainty in Crude Oil Prices by Indonesian Oil and Gas Companies and the Government. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 6(2), 68–84. <https://doi.org/10.30588/jo.v6i2.1449>
- Manwell, J. F. (2012). Offshore Wind Energy Technology Trends, Challenges, and Risks. Dalam *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (hlm. 7393–7425). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_697](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_697)
- Marin, D. H., Perryman, J. T., Hubert, M. A., Lindquist, G. A., Chen, L., Aleman, A. M., Kamat, G. A., Niemann, V. A., Stevens, M. B., Regmi, Y. N., Boettcher, S. W., Nielander, A. C., & Jaramillo, T. F. (2023). Hydrogen production with seawater-resilient bipolar membrane electrolyzers. *Joule*, 7(4), 765–781. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.03.005>
- Merlo, S., Gabarrell Durany, X., Pedrosa Tonon, A., & Rossi, S. (2021). Marine Microalgae Contribution to Sustainable Development. *Water*, 13(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/w13101373>
- Misra, D. (2021). Floating Photovoltaic Plant in India: Current Status and Future Prospect. Dalam *Advances in Thermal Engineering, Manufacturing, and Production Management* (hlm. 219–232). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2347-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2347-9_19)
- Misra, N., Mondal, I., & Mitra, R. (2022). Ocean Thermal Energy Conversion System. *JDC GeoBytes 2021*, 55–73.
- Mittal, D., Saxena, B. K., & Rao, K. V. S. (2017). Comparison of floating photovoltaic plant with solar photovoltaic plant for energy generation at Jodhpur in India. *2017 International*

- Conference on Technological Advancements in Power and Energy ( TAP Energy)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397348>
- Narula, K. (2019). Renewable Energy from Oceans. Dalam *The Maritime Dimension of Sustainable Energy Security* (Vol. 68, hlm. 163–186). [https://doi.org/10.1007/978-981-13-1589-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1589-3_8)
- Ohki, Y. (2020). News from Japan: Ocean thermal energy conversion development center in Okinawa. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 36(3), 47–50. <https://doi.org/10.1109/MEI.2020.9063563>
- Oliveira-Pinto, S., & Stokkermans, J. (2020). Assessment of the potential of different floating solar technologies – Overview and analysis of different case studies. *Energy Conversion and Management*, 211, 112747. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112747>
- Oloruntobi, O., Mokhtar, K., Gohari, A., Asif, S., & Chuah, L. F. (2023). Sustainable transition towards greener and cleaner seaborne shipping industry: Challenges and opportunities. *Cleaner Engineering and Technology*, 13, 100628. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100628>
- Planete Energies. (2018, November 7). *Huainan: Largest Floating Solar Farm in the World*. Planete Energies. <https://www.planete-energies.com/en/media/article/huainan-largest-floating-solar-farm-world>
- Pouran, H. M. (2018). From collapsed coal mines to floating solar farms, why China's new power stations matter. *Energy Policy*, 123, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.010>
- Power Technology. (2020, Mei 25). *Russia commissions world's first floating nuclear power plant*. Power-Technology.com. <https://www.power-technology.com/news/russia-floating-nuclear-power-plant/>
- Prayoga, P. (2022). The Indonesian Political-Economy: Maritime Development in Fisheries and Commerce. Dalam *ASEAN Maritime Security* (hlm. 43–63). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2362-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2362-3_4)
- PT PLN. (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021–2030. Dalam *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
- Qiu, S., Liu, K., Wang, D., Ye, J., & Liang, F. (2019). A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109271>
- Rizal, A. M., Ningsih, N. S., Sofian, I., Hanifah, F., & Hilmi, I. (2019). Preliminary study of wave energy resource assessment and its seasonal variation along the southern coasts of Java, Bali, and Nusa Tenggara waters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(1). <https://doi.org/10.1063/1.5034161>
- Rochwulaningsih, Y., Sulistiyono, S. T., Masrurroh, N. N., & Maulany, N. N. (2019). Marine policy basis of Indonesia as a maritime state: The importance of integrated economy. *Marine Policy*, 108, 103602. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103602>
- Soares-Ramos, E. P. P., de Oliveira-Assis, L., Sarrias-Mena, R., & Fernández-Ramírez, L. M. (2020). Current status and future trends of offshore wind power in Europe. *Energy*, 202, 117787. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117787>
- The Jakarta Post. (2023, Oktober 26). *US firms plan to build pioneering nuclear power plants in Indonesia*. thejakartapos.com. <https://www.thejakartapost.com/business/2023/10/26/us-firms-plan-to-build-pioneering-nuclear-power-plants-in-indonesia.html>
- Vidović, V., Krajačić, G., Matak, N., Stunjek, G., & Mimica, M. (2023). Review of the potentials for implementation of floating solar panels on lakes and water reservoirs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113237. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113237>



- Wahyudi, N. A. (2023, September 11). *PLTS Terapung Cirata Telan Rp1,7 Triliun, Terbesar di Asia Tenggara!* Bisnis.com. <https://ekonomi.bisnis.com/read/20230911/44/1693491/plts-terapung-cirata-telan-rp17-triliun-terbesar-di-asia-tenggara>
- Wang, Q., Zhang, Y., & Zhang, H. (2023). The Development of Floating Nuclear Power Platforms: Special Marine Environmental Risks, Existing Regulatory Dilemmas, and Potential Solutions. *Sustainability*, 15(4), 3022. <https://doi.org/10.3390/su15043022>
- World Nuclear News. (2019, Juni 27). *Russia gets operating licence for floating plant*. World Nuclear News. <https://world-nuclear-news.org/Articles/Russia-gets-operating-licence-for-floating-plant>
- Yu, S., Gui, H., & Yang, J. (2022). China's provincial wind power potential assessment and its potential contributions to the "dual carbon" targets. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(5), 13094–13117. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23021-9>