

Penerapan Metode Skoring Dan Pembobotan Dalam Identifikasi Potensi Energi Terbarukan Di Indonesia

Muhamad Arif Jumansa¹, Fadhli Aslama Afghani^{1*}, Imawan Mashuri¹, Muhammad Labieb Muzakkie¹, Ramadoni Khirtin¹, Yahya Darmawan¹

¹Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Perhubungan 1 No.5, Pondok Betung, Pondok Aren, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia, 15221

*E-mail: fadhli.aslama.afghani@gmail.com

Received: 30 09 2023 / Accepted: 17 05 2024 / Published online: 18 07 2024

ABSTRAK

Tingkat emisi karbon di Indonesia yang terus meningkat hingga mencapai urutan ke-10 di dunia yang disebabkan oleh pembangkit listrik tenaga uap sebagai penyokong utama penghasil Energi Listrik dengan Emisi Karbon yang tinggi. Kebijakan pemerintah pada Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 untuk mempercepat implementasi program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*Battery Electric Vehicle* - BEV) dalam sektor transportasi. Selain itu, adanya kebijakan dengan pemberian bantuan subsidi Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai, yang berupaya untuk menyelesaikan permasalahan emisi karbon dari sektor transportasi bahkan menjadi bumerang bagi pemerintah. Hal tersebut dikarenakan peningkatan penggunaan energi Listrik akan meningkatkan emisi karbon akibat Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Oleh karena itu, perlunya sumber energi terbarukan yang bersih dan ramah lingkungan guna menyelesaikan akar permasalahan dari peningkatan karbon. Pencarian sumber energi terbarukan yang merupakan tujuan dalam penelitian ini dengan menggunakan metode *scoring* dan pembobotan. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa potensi energi terbarukan berupa tenaga surya, angin, dan gelombang laut di wilayah Indonesia menunjukkan potensi yang sangat besar dengan estimasi total daya rerata yang dihasilkan oleh tenaga surya yaitu $2,14 \times 10^{13}$ kW dengan potensi tertinggi berada di wilayah Provinsi Papua Tengah. Total daya rerata yang dihasilkan oleh tenaga angin yaitu $5,07 \times 10^5$ kW dengan potensi tertinggi berada di Wilayah Provinsi Maluku, dan total daya rerata yang dihasilkan oleh tenaga gelombang laut yaitu 55,2 kW/m dengan potensi tertinggi berada di wilayah Perairan barat dan Selatan pulau Sumatera.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, Pembobotan, *Scoring*, Daya, Karbon

ABSTRACT

The carbon emission levels in Indonesia have been steadily increasing, reaching the 10th position globally. This rise is primarily attributed to steam power plants as the main contributors to high carbon emissions in electricity production. Government policies, such as Presidential Regulation No. 55 of 2019, aimed at accelerating the implementation of battery electric vehicles (BEV) in the road transportation sector and providing subsidies for Battery Electric Vehicle-based Motor Vehicles, have been intended to address carbon emission issues in the transportation sector. However, these policies have turned into a double-edged sword for the government, as the increased demand for electricity could exacerbate carbon emissions from Steam Power Plants. Therefore, there is a crucial need for clean and environmentally friendly renewable energy sources to address the root cause of the carbon increase. The research aims to explore renewable energy sources using scoring and weighting methods. The research findings indicate significant potential for renewable energy, specifically solar, wind, and wave energy, in the Indonesian region. The estimated average power output from solar energy is 2.14×10^{13} kW, with the highest

potential in the Central Papua Province. Wind energy has a potential of $5,07 \times 10^5 \text{ kW}$, with the highest in the Maluku Province. Wave energy potential is 55.2 kW/m , with the highest in the waters west and south of Sumatra.

Keywords: *Renewable energy, Weighting, Scoring, Power, Carbon*

PENDAHULUAN

Beberapa dekade terakhir, masalah emisi karbon telah menjadi perhatian global yang mendesak. Emisi karbon dari pembakaran bahan bakar fosil memiliki dampak serius terhadap pemanasan global dan perubahan iklim (Bahriansyah & Ginting, 2022; Nugroho et al., 2022). Dampak negatif ini meliputi kenaikan suhu rata-rata bumi, peningkatan tingkat permukaan air laut, ancaman ekosistem alam, dan risiko kesehatan manusia (Damayanti, 2016; Hansen et al., 2012; Kurane, 2010; Latuconsina, 2010; Sarkawi, 2011). Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif yang bersih dan berkelanjutan dalam memenuhi kebutuhan energi.

Indonesia sebagai salah satu negara dengan populasi penduduk dengan jumlah besar dan pertumbuhan industri yang pesat juga mengalami tantangan serupa terkait emisi karbon yang dibuktikan dengan penyumbang terbesar ke-10 emisi karbon di dunia (M. et al., 2022). Tingginya penggunaan bahan bakar fosil pada sektor energi menyebabkan kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca di Indonesia (Bahriansyah & Ginting, 2022). Kondisi ini menuntut adanya langkah konkret untuk mengurangi emisi karbon serta meningkatkan efisiensi sumber daya energi.

Pemerintah Indonesia telah mengambil langkah nyata untuk mengatasi masalah emisi karbon dengan merilis Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 55 Tahun 2019. Perpres ini bertujuan mempercepat implementasi program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*Battery Electric Vehicle* - BEV) dalam sektor transportasi jalan. Tujuan utamanya adalah mengurangi emisi gas rumah kaca

dari sektor transportasi serta mendorong adopsi kendaraan listrik di Indonesia. Untuk mendukung peraturan tersebut, maka pemerintah membuat kebijakan dengan pemberian bantuan subsidi Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB).

Namun, perlu dicatat bahwa permintaan kebutuhan listrik akan meningkat seiring dengan bertambahnya penggunaan kendaraan listrik. Menurut laporan BPS tahun 2021, kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia mencapai 66.514 MW dari berbagai sumber. Pembangkit Listrik Tenaga Uap menjadi yang terbesar dengan 33.092 MW atau 66% dari total kapasitas. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap menyumbang 12.429,83 MW (13%), sementara Pembangkit Listrik Tenaga Air 5.661,18 MW (6%). Sementara Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) masing-masing 5.083,34 MW dan 4.202,91 MW, keduanya menyumbang sekitar 2%. Sumber pembangkit listrik lainnya berkontribusi 6.045,05 MW atau sekitar 11% dari total kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2021).

Faktanya, Indonesia memiliki banyak sumber energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhannya. Tenaga Surya, angin, dan gelombang laut adalah beberapa jenis di antara banyak sumber energi terbarukan yang tersedia. Indonesia memiliki wilayah maritim yang luas, mencakup sekitar dua pertiga dari keseluruhan wilayahnya. Memiliki garis pantai dengan panjang mencapai sekitar 18.000 km, dan gugusan kepulauan sebanyak 17.508 pulau (Andriani, 2018; Arsana, 2018). Kekayaan wilayah laut ini

menawarkan potensi energi laut yang signifikan untuk Indonesia. Sumber energi tersebut berasal dari gerakan dan variasi suhu lapisan samudera, termasuk energi pasang surut, gelombang, arus, dan perbedaan suhu antar lapisan. Pantai selatan Jawa hingga Nusa Tenggara khususnya, menunjukkan potensi energi gelombang yang mencapai 10-20 kW per meter gelombang (Parjiman et al., 2018). Indonesia memiliki potensi energi angin yang cukup besar dengan kecepatan angin rata-rata sekitar 3-5 m/s dan total daya yang dapat dibangkitkan sebesar 9.290 MW (Fachri & Hendrayana, 2017). Ini merupakan salah satu potensi energi yang cukup besar, mengingat di Indonesia hanya memanfaatkannya sekitar 1% dari potensinya (Nelwan, 2012). Sebagai negara yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi yang besar dalam energi surya karena memiliki intensitas cahaya matahari yang tinggi sepanjang tahun.

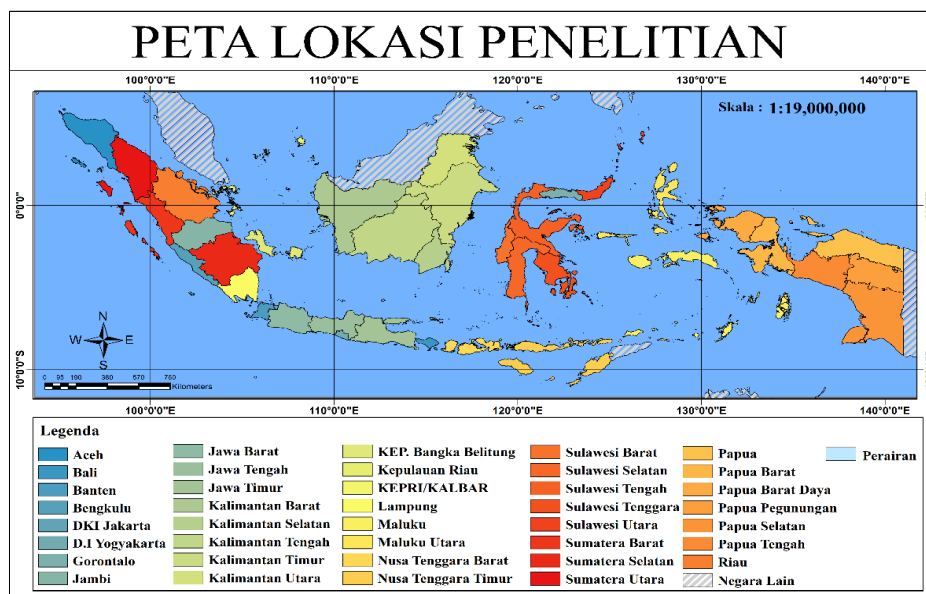
Berbagai penelitian sebelumnya menghasilkan potensi tenaga surya (Rahwanda et al., 2022), tenaga angin (Ardiana et al., 2023), dan tenaga

gelombang laut (Marelsa et al., 2020) yang terbatas pada satu wilayah tertentu dan relatif kecil. Disamping itu, penggunaan metode *scoring* dan pembobotan masih terbatas pada pemetaan potensi banjir (Darmawan et al., 2023) dan longsor (Erfani et al., 2023) belum diterapkan pada bidang atau sektor lain khususnya energi. Tujuan penelitian ini yaitu untuk memetakan wilayah potensi tenaga surya, angin, dan gelombang laut di Indonesia menggunakan metode *scoring* dan pembobotan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan untuk mencapai Indonesia bebas karbon dengan penentuan potensi energi hijau berupa tenaga surya, angin, dan gelombang laut.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

Wilayah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu wilayah maritim Indonesia yang berada pada koordinat 6°LU-11°LS dan 95°BT-141°BT. Kajian penelitian berfokus pada penjelajahan potensi energi terbarukan di Indonesia yang meliputi energi surya, angin, dan gelombang laut (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Sumber	Kegunaan
ArcGIS	Environmental Systems Research Institute	Pengolahan data dan visualisasi geospasial.
Excel	Microsoft Office	Perhitungan dan penyajian hasil

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan gabungan antara jenis penelitian kuantitatif dan deskriptif. Tujuan utamanya adalah untuk menghitung dan mengukur terkait dengan data numerik, serta analisa mengenai distribusi geografisnya, serta faktor-faktor yang memiliki dampak pada potensi energi bersih tersebut.

Penggunaan pendekatan kuantitatif, dalam penelitian bertujuan untuk menilai tingkat potensi energi listrik di suatu wilayah. Tingkat potensi energi bersih ini ditentukan dari besarnya nilai variabel-variabel iklim yang berhubungan dengan berbagai jenis sumber energi bersih

Selain itu, pendekatan kuantitatif juga digunakan menghitung besarnya potensi energi bersih pada wilayah potensial. Besarnya potensi energi bersih ini ditentukan dari daya listrik yang dihasilkan. Perhitungan daya listrik menggunakan data masukan yang mencakup berbagai variabel yang relevan dan rumus daya yang sesuai diterapkan pada masing-masing jenis energi bersih. Hasil dari pendekatan kuantitatif ini dapat berupa nilai daya listrik dan informasi numerik terkait dengan luas geografis yang tercakup.

Penggunaan pendekatan deskriptif, dalam penelitian untuk menganalisis spasial peta yang menunjukkan distribusi potensi energi bersih di wilayah Indonesia. Analisis berupa identifikasi zona-zona dengan potensi tinggi atau rendah. Hasil dari pendekatan deskriptif ini berupa peta yang menyoroti berbagai tingkat potensi energi bersih di wilayah Indonesia.

Metode Pengumpulan, Pengolahan, Dan Analisis Data

Metode yang digunakan dalam penelitian adalah pembobotan ArcMap versi 10.8 untuk menentukan potensi sebaran energi terbarukan dengan pembuatan peta energi hijau menggunakan metode skoring atau pembobotan. Data yang digunakan dalam penelitian menggunakan data periode tahun 1973-2022 sehingga dapat mewakili keadaan klimatologis antara lain

1. Data reanalisis ERA-5 dengan variabel angin 10 dan 100 meter, tinggi gelombang signifikan, periode gelombang rerata, tekanan udara, suhu udara permukaan, total tutupan awan, dan intensitas matahari. ERA-5 memiliki resolusi $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ yang berisi kumpulan parameter cuaca untuk semua lapisan atmosfer yang dihasilkan oleh European Center for Medium-Range Forecast (ECMWF).
2. Data kelerengan Indonesia yang diperoleh dari *Data Elevation Model Nasional* ASTER 30 m versi 3 dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Produk data DEMNAS memiliki resolusi 30 meter dan ubin 1 x 1 derajat.
3. Data batimetri perairan laut Indonesia yang diunduh dari Sistem Informasi Batimetri Nasional (SIBATNAS). Resolusi spasial data SIBATNAS adalah 6 detik busur dan datum yang digunakan adalah MSL.
4. Data massa jenis udara (*air density*) yang diolah dari variabel suhu dan

tekanan menggunakan Persamaan 1 (Yang et al., 2021).

$$\rho = \frac{0,001276}{1+0,00366t} \left(\frac{P-0,378P_{vap}}{100000} \right) \quad (1)$$

Dengan ρ merupakan massa jenis udara (kg/m^3), P adalah tekanan udara permukaan (hPa), P_{vap} adalah tekanan uap (hPa), dan t adalah suhu ($^{\circ}\text{C}$). Dimana persamaan untuk mencari tekanan uap (P_{vap}) dihitung menggunakan Persamaan 2 (Yang et al., 2021).

$$P_{vap} = \frac{10(10,286T-2148,4909)}{T-35,85} \quad (2)$$

Dimana T adalah suhu ($^{\circ}\text{K}$)

Selanjutnya, dilakukan perhitungan daya listrik yang dihasilkan oleh masing-masing pembangkit listrik tenaga surya, angin, dan gelombang laut untuk wilayah yang potensial menggunakan persamaan sebagai berikut:

1. Pembangkit listrik tenaga surya menggunakan perhitungan matematis untuk mendapatkan nilai daya dengan Persamaan 3 (Wasistha et al., 2021).

$$P = E \times A \quad (3)$$

Dengan P adalah daya (watt) E adalah intensitas radiasi matahari (W/m^2) dan A adalah luas penampang *photovoltaic* (m^2).

2. Pembangkit listrik tenaga angin menggunakan persamaan matematis untuk mendapatkan nilai daya dengan Persamaan 4 (Sembiring et al., 2018).

$$P = \frac{\rho AV^3 C_p}{2} \quad (4)$$

Dimana P adalah daya spesifik (watt), A adalah luas penampang m^2 , V adalah kecepatan angin (m/s), dan C_p adalah koefisien daya (0,48). Kemudian nilai

A didapat dengan Persamaan 5 yaitu luas penampang (Maulana et al., 2021).

$$A = 1,5 \times d^2 \quad (5)$$

Dengan A adalah luas penampang turbin (m^2), d adalah diameter turbin dengan nilai 126 meter (Sarkar & Behera, 2012).

Di sisi lain, nilai V didapat dengan Persamaan kecepatan angin (Persamaan 6) (P.Dida et al., 2016).

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

Dimana u adalah kecepatan angin zonal (m/s) dan v adalah kecepatan angin meridional (m/s).

3. Pembangkit listrik tenaga gelombang laut menggunakan persamaan matematis untuk mendapatkan nilai daya dengan Persamaan 7 (Suherman & Raharjo, 2020).

$$P_W = \frac{\rho g^2 T H^2}{64\pi} \quad (7)$$

Dimana P_W adalah daya (watt/m), ρ adalah massa jenis air laut (1025 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$), T adalah periode rerata gelombang (s), H adalah tinggi gelombang signifikan (m). Tahapan penelitian secara alur disajikan pada Gambar 2.

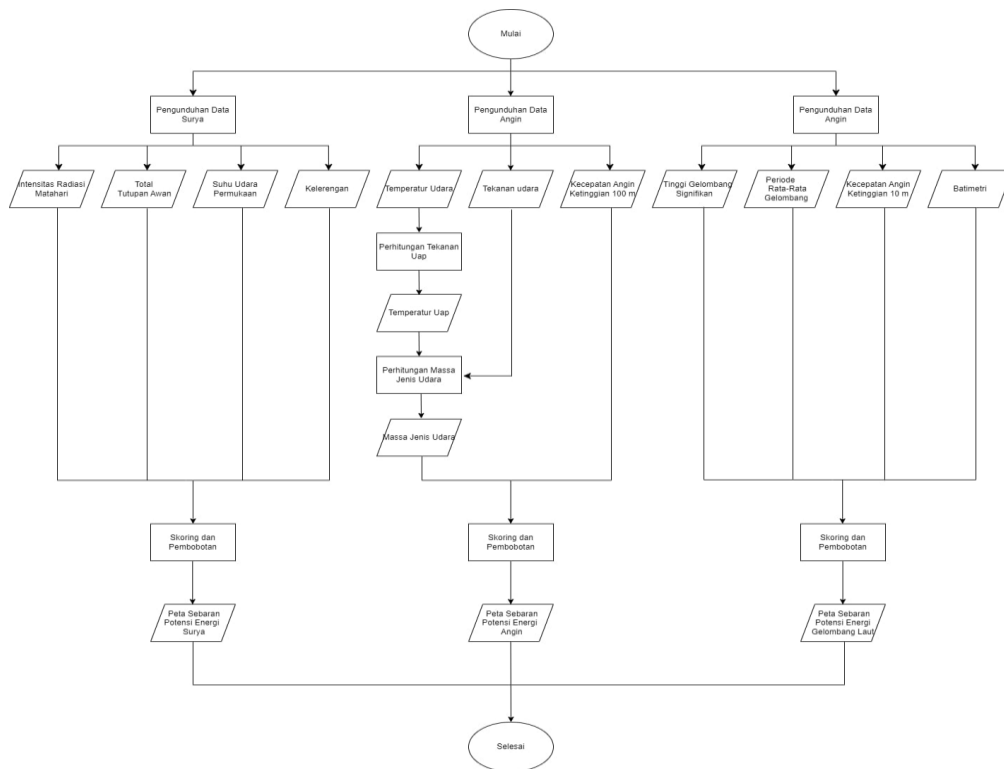
HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan bahwa potensi energi surya di Indonesia sangat besar dan berpotensi untuk terus dikembangkan. Wilayah-wilayah Indonesia bagian timur seperti Pulau Sulawesi, Pulau Nusa Tenggara, Pulau Maluku, dan Pulau Papua sebagian

besar termasuk dalam kategori sangat potensial. Nilai intensitas radiasi matahari yang besar dan total tutupan awan yang kecil menyebabkan wilayah tersebut sangat potensial untuk pemanfaatan pembangkit listrik tenaga surya. Untuk kategori cukup potensial dan potensial energi surya terjadi pada wilayah Pulau Sumatera dan Pulau Jawa bagian Selatan hingga Pulau Bali serta sebagian kecil

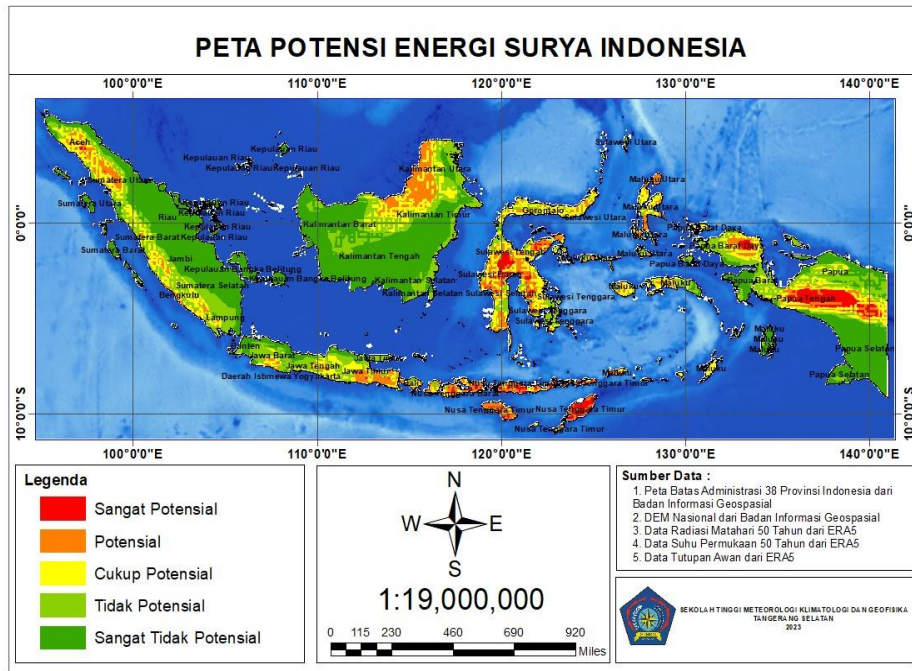
Pulau Kalimantan bagian Utara. Sementara itu, sebagian besar Pulau Kalimantan serta Pulau Sumatera dan Pulau Jawa bagian utara termasuk dalam kategori tidak potensial sampai sangat tidak potensial energi surya. Penyebab utamanya yaitu nilai intensitas radiasi yang kecil dan total tutupan awan yang besar.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Tabel 2, potensi tenaga surya dibagi menjadi lima kategori sesuai total *scoring*. Semakin potensial tenaga surya justru memiliki luas sebaran yang semakin kecil. Beberapa variabel yang digunakan untuk *scoring* diantaranya intensitas radiasi matahari dengan bobot 40%, tutupan awan dengan bobot 30%, kelerenggan (*slope*) dengan bobot 15%, dan suhu permukaan dengan bobot 15%. Variabel intensitas radiasi matahari berbanding lurus dengan tingkat potensi

yang dihasilkan (Priatam et al., 2021). Semakin besar intensitas radiasi matahari, maka semakin potensial tenaga surya. Namun, variabel lain seperti tutupan awan, kelerenggan, dan suhu permukaan berbanding terbalik dengan tingkat potensi yang dihasilkan (Anggrenia et al., 2018; D.L et al., 2013; Suryana & Ali, 2016). Semakin besar tutupan awan, kelerenggan, dan suhu permukaan mengakibatkan tenaga surya semakin tidak potensial.



Gambar 3. Peta Potensi Energi Surya Indonesia

Tabel 2. Tingkat Potensi Tenaga Surya

Tingkat Potensi	Total Scoring	Luas Sebaran (m ²)
Sangat Tidak Potensial	1,45-2,20	7,61x10 ¹¹
Tidak Potensial	2,21-2,60	3,97x10 ¹¹
Cukup Potensial	2,61-2,95	3,22x10 ¹¹
Potensial	2,96-3,30	2,15x10 ¹¹
Sangat Potensial	3,31-4,10	7,05x10 ¹⁰

Tabel 3. Sebaran Sangat Potensial Tenaga

Provinsi	Luas Sebaran (m ²)	Daya Rerata (Watt)
Aceh	9,44x10 ⁸	2,86x10 ¹¹
Sumatera Utara	1,35x10 ⁸	4,09x10 ¹⁰
Jawa Barat	6,27x10 ⁸	1,84x10 ⁸
Jawa Timur	3,16x10 ⁸	9,38x10 ¹⁰
Nusa Tenggara Barat	1,92 x10 ⁹	5,63x10 ¹¹
Nusa Tenggara Timur	1,43x10 ¹⁰	4,20x10 ¹²
Sulawesi Selatan	7,03x10 ⁹	2,13x10 ¹²
Sulawesi Tenggara	1,46x10 ⁹	4,35x10 ¹¹

Sulawesi Barat	8,34x10 ⁸	2,52x10 ¹¹
Sulawesi Tengah	4,47x10 ⁹	1,35x10 ¹²
Maluku	5,08x10 ⁸	1,51x10 ¹¹
Papua Barat	2,16x10 ⁹	6,59x10 ¹¹
Papua Barat Daya	1,8x10 ⁹	5,49x10 ¹¹
Papua Pegunungan	1,55x10 ¹⁰	4,79x10 ¹²
Papua Tengah	1,89x10 ¹⁰	5,86x10 ¹²
Total	7,05x10¹⁰	2,14x10¹³

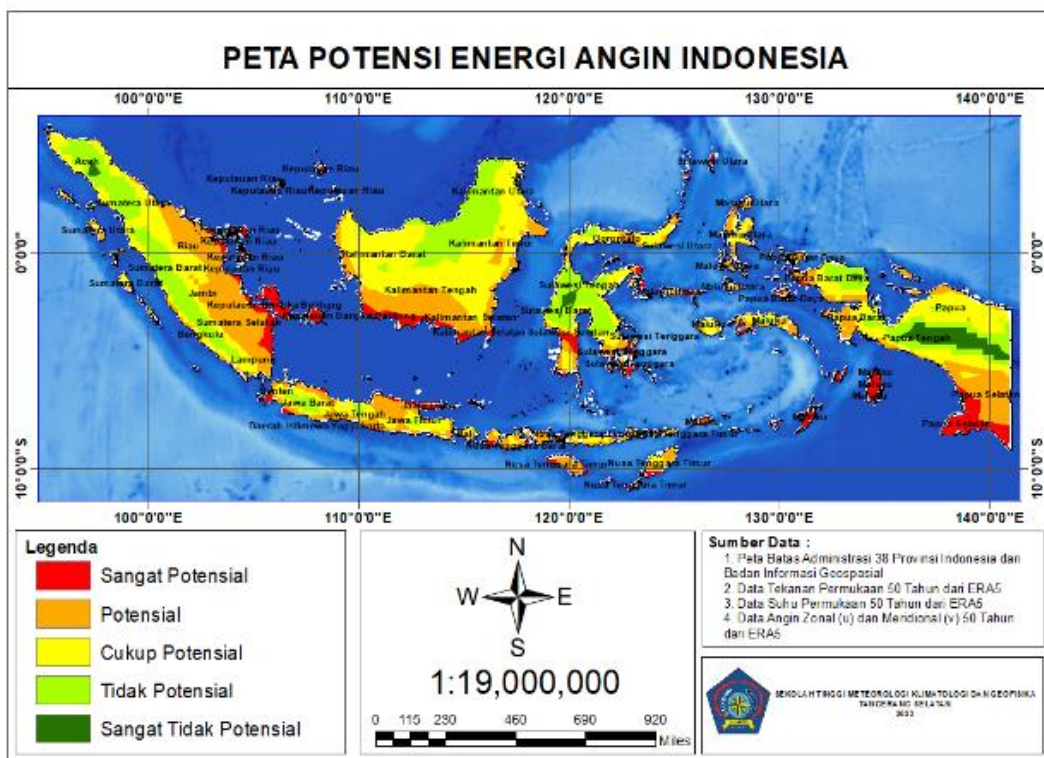
Tabel 3 menunjukkan bahwa sebaran sangat potensial tenaga surya di Indonesia sangat bervariasi. Daerah yang memiliki sebaran sangat potensial tenaga surya yang paling besar yaitu provinsi Papua Tengah dengan luas 1,89x10¹⁰ m². Selain itu, provinsi Papua Tengah juga menjadi daerah dengan daya input rerata yang paling besar yaitu 5,86x10¹² Watt. Luas sebaran yang besar dan nilai intensitas radiasi matahari sebesar 315 Watt/ m² menjadi faktor utama provinsi Papua Tengah memiliki daya listrik tenaga surya yang paling besar.

Disisi lain, daerah yang memiliki sebaran sangat potensial tenaga surya yang paling kecil yaitu provinsi Jawa Barat dengan luas $6,27 \times 10^5 \text{ m}^2$. Selain itu, provinsi Jawa Barat menjadi daerah dengan daya input rerata yang paling kecil yaitu $1,84 \times 10^{12} \text{ Watt}$. Luas sebaran yang kecil dan nilai intensitas radiasi matahari sebesar 295 Watt/m^2 menjadi faktor utama provinsi Jawa Barat memiliki daya listrik tenaga surya yang paling kecil.

Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa energi angin merupakan salah satu energi yang sangat besar potensi dan peluangnya untuk dikembangkan di Indonesia khususnya di wilayah Indonesia bagian timur dan pesisir pulau seperti wilayah Pulau Papua, Nusa Tenggara, Maluku, Kepulauan Riau, Kepulauan Bangka Belitung dan wilayah pesisir lainnya, yang

menunjukkan kategori sangat potensial energi angin. Hal ini disebabkan oleh kecepatan angin yang cukup tinggi di wilayah tersebut sehingga tinggi potensinya terhadap energi angin. Untuk kategori daerah potensial dan cukup potensial sangat tinggi sebarannya untuk wilayah Indonesia seperti di wilayah Provinsi Sumatera Selatan, Kalimantan Tengah, Jawa Tengah, Jawa Timur, dan Bali. Sementara untuk wilayah dengan kategori energi angin yang tidak potensial hingga sangat tidak potensial terdapat di wilayah yang dikelilingi oleh daratan, diantaranya Provinsi Papua Tengah, Sulawesi Tengah, dan bagian tengah di Provinsi Aceh. Hal ini dapat disebabkan oleh kecepatan angin di wilayah tersebut pada ketinggian 100 m yang cukup rendah dan letaknya yang dikelilingi daratan sehingga kerapatan udara di wilayah tersebut yang rendah.



Gambar 4. Peta Potensi Energi Angin Indonesia

Tabel 4. Tingkat Potensi Tenaga Angin

Tingkat Potensi	Total Scoring	Luas Sebaran (m ²)
Sangat Tidak Potensial	1,00	5,41x10 ¹⁰
Tidak Potensial	1,50-2,00	3,01x10 ¹¹
Cukup Potensial	2,50-3,00	6,51x10 ¹¹
Potensial	3,50-4,00	4,95x10 ¹¹
Sangat Potensial	4,50-5,00	1,25x10 ¹¹

Berdasarkan Tabel 4 potensi tenaga angin dengan metode *scoring* dibagi kedalam lima kategori sesuai dengan total *scoring*. Dari tabel tersebut memperlihatkan semakin tinggi tingkat potensial tenaga angin luas sebarannya semakin mengecil. Variabel yang digunakan dalam proses pemberian skor pada metode *scoring* untuk tenaga angin diantaranya adalah kecepatan angin dan kerapatan udara yang masing masing diberikan bobot 50%. Variabel kerapatan udara yang nilainya dipengaruhi oleh suhu dan tekanan udara dimana kerapatan udara berbanding terbalik dengan suhu dan berbanding lurus dengan tekanan, akan memberikan dampak terhadap kecepatan angin yang berada didaerah tersebut karena angin bergerak dari daerah dengan kerapatan udara yang tinggi ke daerah dengan kerapatan udara yang rendah. Oleh karena itu, semakin tinggi perbedaan kerapatan udara maka semaki tinggi juga kecepatan angin.

Tabel 5. Sebaran Sangat Potensial Tenaga Angin Per Provinsi

Provinsi	Luas Sebaran (m ²)	Daya Rerata (W)
Sumatera Selatan	8,95x10 ⁹	11548,20
Jambi	1,41x10 ⁹	10615,78
Kepulauan Riau	1,87x10 ⁹	26060,08
Riau	2,23x10 ⁹	13543,46
Bangka Belitung	1,35x10 ¹⁰	20206,77
Lampung	3,72x10 ⁹	9468,22

Banten	1,20x10 ⁹	16984,04
Jawa Barat	1,54x10 ⁹	23952,97
Jawa Tengah	9,70x10 ⁸	19453,78
Daerah Istimewa Yogyakarta	2,41x10 ⁸	32941,46
Jawa Timur	3,87x10 ⁹	14995,98
Nusa Tenggara Barat	1,52x10 ⁹	22881,45
Nusa Tenggara Timur	3,66x10 ⁹	22779,12
Kalimantan Barat	1,52x10 ⁹	13991,73
Kalimantan Tengah	1,10x10 ¹⁰	13498,63
Kalimantan Selatan	3,46x10 ⁹	14061,38
Kalimantan Timur	8,71x10 ⁷	12134,10
Sulawesi Selatan	5,97x10 ⁹	11946,65
Sulawesi Tenggara	2,74x10 ⁹	11966,86
Sulawesi Tengah	1,11x10 ⁹	19801,01
Sulawesi Utara	6,82x10 ⁸	27710,77
Gorontalo	2,54x10 ⁸	8212,40
Maluku	1,02x10 ¹⁰	51695,72
Maluku Utara	8,59x10 ⁸	11004,22
Papua Barat	2,36x10 ⁸	23756,35
Papua Barat Daya	1,51x10 ⁹	14471,81
Papua Selatan	3,32x10 ¹⁰	27852,64
Total	1,17x10¹¹	5,07x10⁵

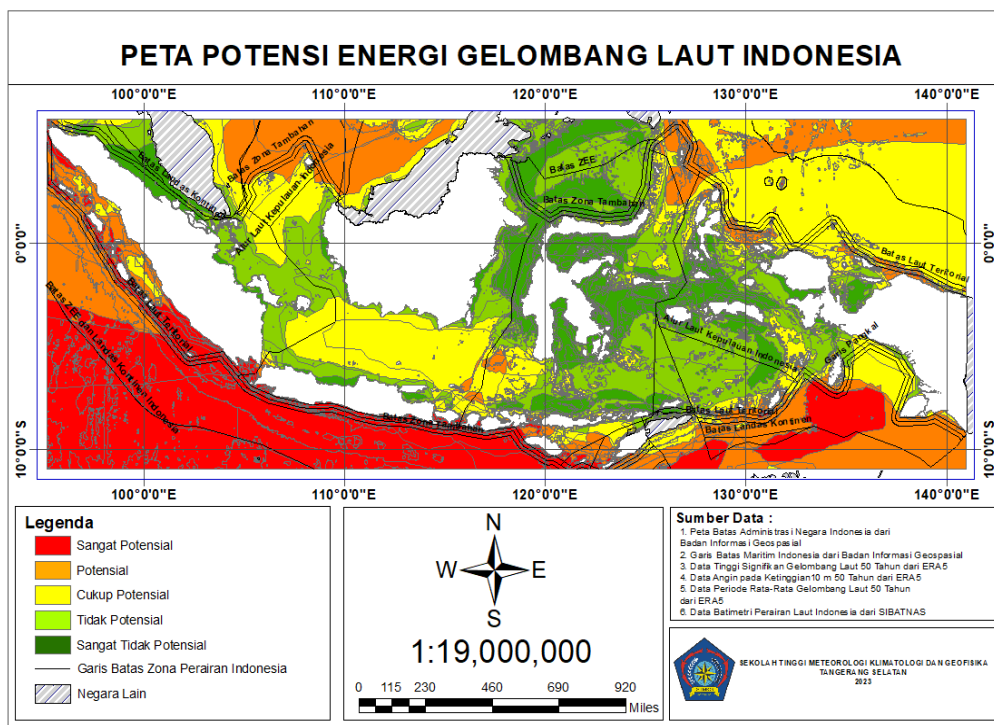
Berdasarkan Tabel 5 yang memperlihatkan sebaran luas wilayah dengan kategori sangat potensial di Indonesia sangat bervariasi di setiap provinsinya. Daerah Papua Selatan menjadi daerah dengan sebaran luas wilayah kategori sangat potensial yang paling tinggi dengan luas 3,32x10¹⁰ m², dengan daya rata-rata yang dapat dihasilkan oleh turbin angin dengan diameter 126 meter sebesar 2,78x10⁴ Watt. Nilai tersebut dipengaruhi oleh besarnya turbin angin yang digunakan dan kecepatan angin di daerah tersebut.

Provinsi Kalimantan Timur merupakan wilayah dengan luas sebaran sangat potensial tenaga angin yang paling kecil yaitu sebesar $8,71 \times 10^7 \text{ m}^2$, dengan daya rata-rata yang dapat dihasilkan oleh turbin angin sebesar $1,21 \times 10^4 \text{ Watt}$. Sedangkan, Provinsi Maluku menjadi wilayah dengan potensi tenaga angin paling tinggi dengan daya rata-rata tenaga angin yang dapat dihasilkan sebesar $5,16 \times 10^4 \text{ Watt}$.

Potensi Pembangkit Listrik Gelombang Laut

Variabel-variabel yang digunakan untuk *scoring* potensi pembangkit listrik tenaga gelombang adalah tinggi signifikan gelombang dengan bobot 30%, periode rata-rata gelombang dengan bobot 30%,

kedalaman laut dengan bobot 25%, dan angin pada ketinggian 10 m dengan bobot 15%. Variabel tinggi signifikan gelombang dan periode rata-rata gelombang memiliki hubungan berbanding lurus dengan besaran daya atau potensi yang dihasilkan (Suherman & Raharjo, 2020). Namun, variabel kecepatan angin berbanding lurus dengan potensi yang dihasilkan karena besar gelombang laut sangat dipengaruhi oleh angin. Apabila angin yang berhembus diatas permukaan laut semakin besar akan semakin besar tinggi gelombang dan semakin besar potensi energi yang dihasilkan (Syach et al., 2020). Hasil peta *scoring* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta Potensi Energi Gelombang Laut Indonesia

Berdasarkan Gambar 5, tingkat potensi wilayah pembangkit listrik tenaga gelombang diklasifikasikan menjadi lima tingkat sesuai total *scoring*-nya. Wilayah dengan *skoring* paling tinggi atau tingkat sangat potensial paling dominan

teridentifikasi di Perairan Selatan Indonesia atau di Samudera Hindia. Namun, laut Jawa didominasi oleh tingkat dengan *scoring* terendah atau sangat tidak potensial, tingkat tidak potensial, dan tingkat cukup potensial. Tingkat potensi

energi potensial hingga sangat tidak potensial energi gelombang laut teridentifikasi pada wilayah perairan laut utara dan tengah Indonesia. Dari peta tersebut, dapat diketahui luas sebaran kelasnya yang dapat ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Tingkat Potensi Energi Gelombang Laut

Tingkat Potensi	Total Scoring	Luas Sebaran (km ²)
Sangat Tidak Potensial	1,40-2,25	8,07x10 ⁵
Tidak Potensial	2,26-2,65	1,18x10 ⁶
Cukup Potensial	2,66-3,15	1,63x10 ⁶
Potensial	3,16-3,75	9,75x10 ⁵
Sangat Potensial	3,76-5,00	1,08x10 ⁶

Pada wilayah sangat potensial diperoleh luasan wilayah 1,08x10⁶ km². Wilayah sangat potensial ini dapat menghasilkan output daya yang lebih besar dari wilayah-wilayah lainnya. Dari sebaran wilayah sangat potensial ini dapat dibagi menjadi 4 region. Perairan Barat dan Selatan Sumatera, Perairan Selatan Jawa, Perairan Selatan Kepulauan Nusa Tenggara, Perairan Selatan Maluku. Besarnya daya dari masing-masing region ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Sebaran Sangat Potensial Tenaga Gelombang Laut Per Wilayah

Wilayah Perairan	Luas Sebaran (km ²)	Daya Rerata (kW/m)
Perairan Barat dan Selatan Sumatera	4,32x10 ⁵	17,94
Perairan Selatan Jawa	3,52x10 ⁵	19,67
Perairan Selatan Kepulauan Nusa Tenggara	1,56x10 ⁵	14,59
Perairan Selatan Kepulauan Maluku	1,17x10 ⁵	3,00
Total	1,06x10⁶	55,2

Berdasarkan Tabel 7 menunjukkan bahwa sebaran sangat potensial tenaga gelombang laut di Indonesia tergolong bervariasi. Wilayah yang memiliki sebaran sangat potensial tenaga gelombang laut yang paling besar yaitu Perairan Barat dan Selatan Sumatera dengan luas 4,32x10⁵ km² dan daya input rerata yang paling besar yaitu 17,94 kW/m. Luas sebaran yang besar, nilai tinggi gelombang signifikan, dan periode gelombang rata-rata yang tinggi menjadi faktor utama wilayah perairan ini memiliki daya listrik tenaga gelombang yang paling besar.

Disisi lain, wilayah perairan yang memiliki sebaran sangat potensial tenaga gelombang yang paling kecil yaitu Perairan Selatan Kepulauan Maluku dengan luas 1,17x10⁵ km². Wilayah ini menjadi daerah dengan daya input rerata yang paling kecil yaitu 3 kW/m. Luas sebaran yang sempit, nilai tinggi gelombang signifikan, dan periode gelombang rata-rata yang lebih rendah dari daerah persebaran sangat potensial lainnya menjadi faktor utama wilayah perairan ini memiliki daya listrik tenaga gelombang yang paling kecil.

Wilayah Perairan yang berpotensi untuk mengembangkan energi yang bersumber dari gelombang adalah wilayah dengan hasil daya tiap meternya sebesar 15 kW/m (Karimirad, 2014). Berdasarkan daya yang dihasilkan pada wilayah dengan tingkat sangat potensial, hanya wilayah Perairan barat dan Selatan Sumatera serta Perairan Selatan Jawa yang berpotensi untuk dikembangkan dengan masing-masing daya reratanya adalah 17,94 kW/m dan 19,67 kW/m.

KESIMPULAN

Energi bersih dari matahari, angin, dan gelombang laut bisa menggantikan energi fosil di Indonesia yang menyumbang emisi tinggi. Energi bersih punya potensi di berbagai wilayah, tergantung iklim. Pembangkit Listrik

Tenaga Surya sangat potensial di banyak wilayah, khususnya Papua Tengah, Papua Pegunungan, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Selatan, dan Sulawesi Tengah. Estimasi total daya rerata yang dihasilkan yaitu $2,14 \times 10^{13}$ MW. Selanjutnya, Pembangkit Listrik Tenaga Angin sangat potensial di berbagai wilayah, khususnya Maluku, Yogyakarta, Papua Selatan, Sulawesi, dan Kepulauan Riau. Estimasi total daya rerata yang dihasilkan yaitu $5,07 \times 10^5$ kW. Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut sangat potensial di perairan Indonesia, khususnya Perairan Selatan Jawa serta Perairan Barat dan Selatan Sumatera. Estimasi total daya rerata yang dihasilkan yaitu 55,2 kW/m.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, T., Pandey, A. C., & Kumar, A. (2019). Evaluating urban growth and its implication on flood hazard and vulnerability in Srinagar city, Kashmir Valley, using geoinformatics. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(9). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4458-1>.
- Andriani, A. (2018). *Saya Indonesia, Negara Maritim Jati Diri Negaraku* (C. Jejak (ed.)). CV Jejak.
- Anggrenia, R., Muliadia, & Adriat, R. (2018). Analisis Pengaruh Tutupan Awan Terhadap Radiasi Matahari di Kota Pontianak. *Prisma Fisika*, 6(3), 214–219.
- Ardiana, J. D. P., . Y., & . S. (2023). Analisis Potensi Energi Angin sebagai PLTB di Pantai Watu Ulo Jember Menggunakan data BMKG . *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 2(4 SE-Articles), 962–965. <https://doi.org/10.47233/jpst.v2i4.1313>
- Arsana, I. M. A. (2018). *Batas Maritim Antarnegara: Sebuah Tinjauan Teknis Dan Yuridis*. UGM PRESS.
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Kapasitas Terpasang PLN menurut Jenis Pembangkit Listrik (MW), 2019-2021*. Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id/indicator/7/321/1/kapasitas-terpasang-pln-menurut-jenis-pembangkit-listrik.html>
- Bahriansyah, R. I., & Ginting, Y. L. (2022). Pengungkapan Emisi Karbon Terhadap Nilai Perusahaan dengan Media Exposure Sebagai Variabel Moderasi. *Jurnal Riset Akuntansi Dan Perpajakan*, 9(2), 226–237. <https://doi.org/https://doi.org/10.35838/jrap.2022.009.02.21>
- D.L, P., Hermawan, & Karnoto. (2013). Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya Terhadap Radiasi Matahari Yang Diterima Oleh Panel Surya Tipe Larik Tetap. *TRANSIENT*, 2(4), 931–937.
- Damayanti, A. (2016). *Analisis Dampak Perubahan Iklim Berdasarkan Kenaikan Muka Air Laut terhadap Wilayah Kota Surabaya*. Institut Teknologi Sepuluh November.
- Darmawan, Y., Mashuri, I., Jumansa, M., Aslam, F., & Azzahra, A. (2023). Analisis Daerah Rawan Banjir dengan Metode Composite Mapping Analysis (CMA) di Kota Padang (Flood Vulnerability Analysis using Composite Mapping Analysis (CMA) in Padang City). *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 29, 89–97.
- Erfani, S., Naimullah, M., & Winardi, D. (2023). SIG Metode Skoring dan Overlay untuk Pemetaan Tingkat Kerawanan Longsor di Kabupaten Lebak, Banten. *Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 20(1), 61–79.
- Fachri, M. R., & Hendrayana. (2017). Analisa Potensi Energi Angin dengan Distribusi Weibull Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Banda Aceh. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah*

- Pendidikan Teknik Elektro*, 1(1), 1–8.
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of Climate Change. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, 109(37), E2415–E2423. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1205276109
- Karimirad, M. (2014). *Offshore Energy Structures. For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms*. Springer.
- Kurane, I. (2010). The Effect of Global Warming on Infectious Diseases. *Elsevier*, 1(1), 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.phrp.2010.12.004>
- Latuconsina, H. (2010). Dampak Pemanasan Global Terhadap Ekosistem Pesisir Dan Lautan. *Jurnal Ilmiah Agribisnis Dan Perikanan*, 3(1), 30–37.
- M., C., D., G., M., B., E., S., M., M., E., S., F., P., & F., M.-F. (2022). *CO2 Emissions of All World Countries*. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022
- Marelsa, N. F., Putra, R. D., & Syakti, A. D. (2020). *Studi Potensi Energi Gelombang Laut Sebagai Pembangkit Listrik Di Perairan Kepulauan Mentawai*. Universitas Maritim Raja Ali Haji.
- Maulana, E., Djatmiko, E., Mahandika, D., & Putra, R. C. (2021). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Turbin Angin Savonius Tipe-U untuk Kapasitas 100 W. *Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi*, 3(2), 183–190.
- Nelwan, A. F. (2012). Karakteristik Weibull PLTB Miangas. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.35793/jtek.v1i1.536>
- Nugroho, D. N., Darajati, & Rianto, A. (2022). Strategi Indonesia Dalam Mengurangi Emisi Karbon Dioksida (Co2) Di Masa New Normal. *Prosiding Ilmu Pemerintahan*, 1(1 SE-Articles). <https://e-journal.umc.ac.id/index.php/IP/article/view/2712>
- P.Dida, H., Suparman, S., & Widhiyanuriyawan, D. (2016). Pemetaan Potensi Energi Angin di Perairan Indonesia Berdasarkan Data Satelit QuikScat dan WindSat. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(2), 95–101.
- Parjiman, Subekti, M., Daryanto, & Rif'an, M. (2018). Simulasi Gelombang Laut Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL). *Jurnal Teknologi Elektro Universitas Mercuru Buana*, 9(2), 50–57.
- Priatam, P. P. T. D., Zambak, M. F., Suwarno, & Harahap, P. (2021). Analisa Radiasi Sinar Matahari Terhadap Panel Surya 50 WP. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, 4(1), 48–54.
- Rahwanda, R., Putra, Y. S., & Adriat, R. (2022). Pemetaan Dan Estimasi Potensi Energi Matahari Di Kota Pontianak. *Prisma Fisika*, 10(3), 285–290. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.26418/pf.v10i3.58096>
- Sarkar, A., & Behera, D. K. (2012). Wind Turbine Blade Efficiency and Power Calculation with Electrical Analogy. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(2), 1–5.
- Sarkawi, D. (2011). Pengaruh Pemanasan Global Terhadap Perubahan Iklim. *Cakrawala*, 11(2), 128–137.
- Sembiring, A., Sigalingging, R., & Daulay, S. B. (2018). Pemetaan Potensi Energi Angin Di Sumatera Utara. *Jurnal Rekayasa Pangan Dan Pertanian*, 6(4), 780–786.
- Suherman, I. H., & Raharjo, P. (2020). Potensi Energi Gelombang Laut Di Perairan Mentawai. *Jurnal Geologi Kelautan*, 18(2), 97–110.

- Suryana, D., & Ali, M. M. (2016). Pengaruh Temperatur / Suhu Terhadap Tegangan Yang Dihasilkan Panel Surya Jenis Monokristalin (Studi Kasus: Baristand Industri Surabaya). *Jurnal Teknologi Proses Dan Inovasi Industri*, 2(1), 49–52.
- Syach, M. F., Ayasy, M. F., & Safinatunnajah, N. (2020). Pemetaan Perkiraan Potensi Gelombang Laut Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Sistem Pelamis Di Perairan Nias. *Jurnal Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika*, 7(3), 11–19.
- Wasistha, B. D., Salam, B. E. M., Wibawa, D. I., & Rizal, M. (2021). Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid di Laboratorium Teknik Listrik Politeknik Negeri Jakarta. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Volume 6*, 76–82.
- Yang, F., Fan, R., Shao, S., Zhang, H., Zha, X., & Tang, Y. (2021). Study on Probability Distribution Model of Air Density for Transmission Lines Corridor in High_altitude Regions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2033/1/012203>