

UNJUK KERJA PANEL SURYA TERHADAP INTENSITAS CAHAYA MATAHARI PADA SISTEM PENDINGIN PORTABEL BERBASIS *THERMOELECTRIC COOLER* UNTUK NELAYAN DI DAERAH PESISIR BELAWAN

SOLAR PANEL PERFORMANCE RELATIVE TO SUNLIGHT INTENSITY IN A THERMOELECTRIC COOLER-BASED PORTABLE COOLING SYSTEM FOR FISHERMEN IN THE BELAWAN COASTAL AREA

Oleh :

Nadia Fadilla¹, Supermono², Sutan Pardede³, Fahrul Roji⁴, Joko Arif Setiawan⁵

^{1,2,3}Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan

⁴Jurusan Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Panca Budi

⁵Jurusan Teknik Elektro, Universitas Amir Hamzah

nadiafadilla@student.polmed.ac.id¹, supermono@polmed.ac.id², sutanpardede@polmed.ac.id³,
froji33@gmail.com⁴, jokoarifst@gmail.com⁵

Abstract

This study aims to evaluate the performance of a solar panel against sunlight intensity in a portable cooling system based on Thermoelectric Cooler (TEC) technology, designed specifically for fishermen in the coastal area of Belawan. The main issue faced by fishermen is the limited access to efficient and eco-friendly cooling systems while at sea. The designed system consists of a 120 Wp monocrystalline solar panel, three TEC modules (each 72 watts), a 12V 100Ah battery, and a solar charge controller with various measurement sensors. Testing was conducted over seven days under different weather conditions, including sunny, cloudy, and overcast, by observing parameters such as voltage, current, power, light intensity, temperature, and humidity. The results showed that the panel produced a maximum of 41.65 W and about 185 Wh of energy per day under clear skies, while the system required 1,080 Wh to operate for five hours. Even with a battery capacity of 960 Wh (based on 80% DOD), the system was still insufficient on cloudy days. It is concluded that the system cannot operate independently. Suggested improvements include increasing the solar panel and battery capacities, and optimizing operation time to ensure efficient cooling performance in dynamic field conditions.

Keywords: *Solar Panel, Sunlight Intensity, Thermoelectric Cooler, Cooling System, Electrical Energy*

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi unjuk kerja panel surya terhadap intensitas cahaya matahari pada sistem pendingin portabel berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) yang dirancang khusus bagi nelayan di daerah pesisir Belawan. Permasalahan utama yang dihadapi nelayan adalah keterbatasan akses terhadap sistem pendingin yang efisien dan ramah lingkungan saat berada di laut. Sistem yang dirancang terdiri dari satu panel surya monocrystalline 120 Wp, tiga buah modul TEC masing-masing 72 watt, baterai 12V 100Ah, serta pengatur daya dan sensor pengukuran. Pengujian dilakukan selama tujuh hari pada berbagai kondisi cuaca, termasuk cerah, berawan, dan mendung, dengan parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya, intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban. Hasil menunjukkan bahwa panel menghasilkan daya maksimum 41,65 W dan energi harian sekitar 185 Wh pada kondisi cerah, sedangkan sistem membutuhkan energi 1.080 Wh untuk beroperasi selama 5 jam. Dukungan baterai dengan kapasitas 960 Wh (karena DOD 80%) masih belum cukup bila cuaca tidak mendukung. Dapat disimpulkan bahwa sistem belum mampu beroperasi secara mandiri. Solusi yang disarankan adalah penambahan kapasitas panel surya dan baterai, serta pengaturan waktu operasional agar pendinginan tetap berjalan efisien dalam kondisi lapangan yang dinamis.

Kata Kunci: Panel Surya, Intensitas Cahaya, *Thermoelectric Cooler*, Sistem Pendingin, Energi Listrik

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki garis pantai yang membentang ribuan kilometer dengan wilayah pesisir yang dihuni oleh penduduk yang mayoritas bermata pencaharian sebagai nelayan tradisional. Dalam menjalankan roda perekonomiannya, para nelayan sering kali harus melaut dalam jangka waktu yang relatif lama serta menempuh jarak yang jauh dari daratan guna mendapatkan hasil tangkapan yang optimal. Selama proses penangkapan ikan di laut, salah satu kendala terbesar yang dihadapi adalah penurunan kualitas dan kesegaran produk perikanan akibat paparan suhu tinggi. Hingga saat ini, sebagian besar nelayan tradisional masih mengandalkan balok es konvensional sebagai media pendingin sementara di atas kapal. Penggunaan media pendingin tradisional ini dinilai kurang efektif karena balok es memiliki laju pencairan yang sangat cepat, memakan ruang penyimpanan yang signifikan, serta berisiko merusak struktur fisik ikan akibat tekanan dari gundukan es kasar yang memicu pertumbuhan bakteri pembusuk. Kendala ini diperparah oleh keterbatasan akses energi listrik di kawasan pesisir, sehingga teknologi pendingin kompresi uap konvensional seperti kulkas rumahan sangat sulit untuk diimplementasikan di atas perahu nelayan ukuran kecil.

Daerah pesisir Belawan yang terletak di Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, merupakan salah satu wilayah pesisir yang memiliki karakteristik iklim tropis dengan tingkat intensitas radiasi matahari yang tinggi dan suhu lingkungan yang cukup panas. Letak geografis Indonesia di sepanjang garis khatulistiwa memberikan potensi energi surya yang luar biasa besar, dengan rata-rata insolasi harian mencapai $4,8 \text{ kWh/m}^2$ atau setara dengan kapasitas total 112.000 GWp. Meskipun potensinya melimpah, implementasi pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi utama di sektor maritim masih sangat minim, yakni baru terealisasi sekitar 10 MWp secara nasional. Kementerian Perindustrian sendiri menargetkan peningkatan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) pada industri panel surya hingga mencapai 90% pada tahun 2025 untuk mendukung transisi energi hijau yang mandiri. Energi surya dipandang sebagai solusi mutakhir bagi permasalahan nelayan karena sifatnya yang melimpah, bebas emisi gas buang, mudah dipasang pada armada perahu, dan bebas biaya operasional bahan bakar (INSTITUT TEKNOLOGI BATAM, 2025).

Sebagai solusi alternatif untuk mengatasi kelemahan sistem pendingin konvensional, teknologi pendingin portabel berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) atau modul *Peltier* dapat diterapkan di atas kapal nelayan. Sistem pendingin termoelektrik bekerja berdasarkan efek *Peltier*, di mana pengaliran arus listrik searah (DC) pada sambungan dua material semikonduktor yang berbeda akan menyebabkan penyerapan kalor di satu sisi pelat (sisi dingin) dan pembuangan kalor di sisi pelat lainnya (sisi panas). Teknologi pendingin solid-state ini dinilai sangat ideal untuk aplikasi maritim skala kecil karena tidak menggunakan komponen mekanis yang bergerak, bebas getaran, berdimensi kompak, serta tidak membutuhkan refrigeran kimia berbahaya seperti *freon* atau *chlorofluorocarbon* (CFC) yang dapat merusak lapisan ozon dan memicu pemanasan global. Berdasarkan latar belakang geografis dan kebutuhan teknologi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara komprehensif unjuk kerja panel surya *monocrystalline* berkapasitas 120 Wp terhadap intensitas cahaya matahari pada sistem pendingin portabel berbasis tiga modul TEC 72 Watt yang dirancang khusus bagi nelayan tradisional di daerah pesisir Belawan (Bakteriostatik & Ikan, 2022).

Eksperimen lapangan ini membatasi ruang lingkup analisis pada pengaruh kondisi cuaca cerah, berawan, dan mendung terhadap daya listrik keluaran panel surya tanpa mempertimbangkan adanya beban eksternal sekunder lainnya di luar sistem pendingin portabel. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat dirumuskan karakteristik fungsional kelistrikan fotovoltaik di lingkungan maritim, menganalisis korelasi kuantitatif antara lux cahaya matahari dengan efisiensi pendinginan termoelektrik, serta merumuskan rekomendasi konfigurasi optimal bagi pengembangan sistem penyimpanan ikan lepas pantai bertenaga surya di masa mendatang.

2. TINJAUAN TEORITIS

Evaluasi mengenai karakteristik sel surya terhadap variabilitas parameter lingkungan telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu guna mengoptimalkan konversi energi fotovoltaik. Studi eksperimental yang dipublikasikan oleh Darwin dkk. (2020) menyimpulkan bahwa peningkatan intensitas radiasi sinar matahari secara linier akan meningkatkan arus hubung singkat (I_{sc}) yang dibangkitkan oleh sel surya tipe *monocrystalline*, sementara parameter tegangan *open-circuit* (V_{oc}) cenderung mengalami kejenuhan dan relatif konstan pada rentang tegangan kerja tertentu. Namun, studi tersebut juga menyoroti kelemahan sel surya di mana suhu permukaan panel yang terlalu tinggi dapat mendegradasi nilai tegangan keluaran, yang berimplikasi pada penurunan efisiensi konversi daya secara keseluruhan. Widyawati Putri dkk. (2022) mengevaluasi unjuk kerja panel surya *polycrystalline* berkapasitas tinggi di bawah pengaruh pembebanan dinamis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penurunan intensitas cahaya matahari dari $1.544,2 \text{ W/m}^2$ saat kondisi cerah berawan menjadi hanya 355 W/m^2 pada saat cuaca mendung secara signifikan menurunkan kemampuan panel dalam mempertahankan kestabilan tegangan operasi ketika dibebani (Kiswanto, Harsono, Oscar, & Putranto, 2025).

Studi komprehensif oleh Li dkk. (2021) menggunakan pendekatan matematis dan numerik untuk memodelkan hubungan linier antara peningkatan daya maksimum sel surya terhadap intensitas cahaya matahari, dengan penekanan pada perlunya manajemen termal permukaan panel surya guna meminimalkan efek koefisien suhu negatif. Prasetyo (2018) memperluas kajian tersebut dengan mengintegrasikan variabel sudut kemiringan panel fotovoltaik, di mana posisi panel yang tegak lurus terhadap datangnya sinar matahari pada suhu permukaan optimal terbukti menghasilkan daya maksimum yang jauh lebih stabil sepanjang hari. Lebih lanjut, Yuliananda dkk. (2015) menganalisis fluktuasi harian arus dan tegangan keluaran panel surya dari pagi hingga sore hari, yang menegaskan ketergantungan mutlak performa pembangkitan energi surya terhadap pergerakan matahari dan kondisi tutupan awan lokal (Sahar, Tampubolon, & Gunawan, 2022).

Secara historis, konversi energi matahari menjadi energi listrik memanfaatkan efek fotovoltaik dimulai dari penemuan awal oleh fisikawan Prancis Alexandre-Edmond Becquerel pada tahun 1839. Fenomena konduktivitas material selenium yang sensitif terhadap cahaya kemudian dikembangkan oleh Willoughby Smith (1873) serta William Grylls Adams dan Richard Evans Day (1876) yang membuktikan pembentukan arus listrik langsung tanpa bantuan komponen mekanis. Charles Fritts pada tahun 1883 merancang sel surya pertama berbahan selenium berlapis tipis emas dengan tingkat efisiensi sekitar 1%. Pemahaman teoretis efek fotolistrik ini disempurnakan oleh Albert Einstein pada tahun 1905 yang membawanya meraih Nobel Fisika pada tahun 1921, sebelum Bell Labs berhasil merevolusi industri ini pada tahun 1954 dengan menciptakan sel surya berbahan silikon pertama yang mencapai efisiensi 6%.

Di Indonesia, posisi geografis di lintasan garis khatulistiwa memberikan potensi radiasi energi matahari yang melimpah rata-rata sebesar $4,8 \text{ kWh/m}^2$ per hari atau setara dengan daya nominal 112.000 GWp . Meskipun demikian, laporan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2012 mencatat bahwa pemanfaatan potensi tersebut masih berada pada kisaran minimal 10 MWp . Dalam perkembangannya, pemerintah melalui Kementerian Perindustrian menetapkan target peningkatan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) pada industri panel surya nasional hingga mencapai 90% pada tahun 2025, dari nilai TKDN saat ini yang berkisar antara 40% hingga 47%. Dengan estimasi potensi energi surya nasional yang mencapai lebih dari 3.200 GW , akselerasi implementasi PLTS *off-grid* maupun *on-grid* di berbagai sektor menjadi prioritas strategis dalam mendukung transisi menuju kemandirian energi bersih.

Teknologi panel surya komersial saat ini terbagi menjadi beberapa kategori material penyusun yang memengaruhi efisiensi, durabilitas dan biaya produksi, antara lain :

- a. Panel Surya *Monocrystalline*, dibuat dari kristal silikon tunggal murni menggunakan metode penarikan Czochralski yang ditemukan pada tahun 1916. Panel jenis ini memiliki ciri fisik

- berwarna hitam pekat dengan potongan sudut sel. Keunggulannya meliputi efisiensi konversi tertinggi berkisar antara 15% hingga 22%, performa optimal pada kondisi minim cahaya atau cuaca panas ekstrem, serta usia pakai (*life expectancy*) yang panjang mencapai lebih dari 25 tahun. Namun, proses manufakturnya sangat kompleks sehingga harga jualnya relatif mahal.
- b. Panel Surya *Polycrystalline*, diproduksi dengan meleburkan silikon mentah dalam cetakan persegi yang menghasilkan banyak struktur kristal silikon. Panel ini memiliki ciri fisik berwarna biru metalik. Meskipun harga produksinya lebih murah, tingkat efisiensi konversi energinya lebih rendah berkisar antara 13% hingga 16%, serta memerlukan luasan area instalasi yang lebih besar untuk menghasilkan daya nominal yang setara.
 - c. *Thin-Film Solar Cell*, merupakan teknologi generasi kedua yang memanfaatkan struktur lapisan tipis mikrokristal-silikon atau amorphous silikon pada substrat fleksibel. Efisiensi konversinya berkisar antara 6% hingga 18%. Panel jenis ini sangat ringan dan toleran terhadap suhu tinggi, namun memiliki masa pakai yang relatif pendek sekitar 10 tahun.
 - d. *Organic Photovoltaic Cell* (OPV), menggunakan material polimer organik konduktif untuk menghasilkan arus listrik melalui penyerapan foton. OPV menawarkan fleksibilitas mekanis yang sangat tinggi serta transparansi warna, namun efisiensi konversinya masih sangat rendah berkisar antara 3% hingga 8,3% dan sangat rentan terhadap degradasi akibat kelembaban tinggi.

Sistem pembangkitan listrik tenaga surya dirancang berdasarkan kebutuhan pembebanan serta ketersediaan jaringan listrik utilitas utama, yaitu :

- a. PLTS On-Grid, beroperasi secara paralel dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini dapat dirancang menggunakan baterai cadangan (*with battery backup*) maupun tanpa baterai (*without battery backup*). Konfigurasi distribusinya terbagi menjadi *Grid-connected distributed PV* yang terpasang tersebar pada atap konsumen, serta *Grid-connected centralized PV* berskala besar (*solar farm*) yang menyuplai langsung jaringan transmisi utama.
- b. PLTS Off-Grid, merupakan sistem mandiri yang tidak terhubung dengan jaringan PLN, sehingga sangat cocok diterapkan pada wilayah pesisir terpencil, pulau-pulau kecil, atau di atas kapal nelayan. Berdasarkan klasifikasinya, PLTS *off-grid* dibedakan menjadi Off-Grid Domestic untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga secara individu, serta *Off-Grid Non-Domestic* untuk menyuplai fasilitas publik, telekomunikasi, atau sektor industri skala kecil.
- c. PLTS Hybrid, menggabungkan modul surya dengan sumber pembangkit sekunder seperti mesin diesel (*genset*) atau kincir angin. Sistem ini membutuhkan manajemen kontrol mikro yang kompleks untuk mengatur perpindahan beban dan pengisian baterai berdasarkan ambang batas *State of Charge* (SOC) tertentu.

Konversi langsung energi radiasi menjadi energi kelistrikan terjadi pada sel fotovoltaik yang pada dasarnya merupakan dioda semikonduktor berbasis silikon. Struktur internal sel surya terdiri dari sambungan lapisan tipe-P (*P-type*) dan tipe-N (*N-type*), sebagai berikut :

- a. Semikonduktor Tipe-N, dibuat dengan mendoping kristal silikon intrinsik menggunakan material impuritas bervalensi lima (*pentavalen*) seperti fosfor atau antimon (Sb). Atom donor ini menyumbangkan elektron bebas ke dalam pita konduksi, menjadikannya pembawa muatan mayoritas.
- b. Semikonduktor Tipe-P, dibuat dengan mendoping silikon menggunakan atom bervalensi tiga (*trivalen*) seperti boron, galium, atau indium. Hal ini menciptakan kekosongan elektron yang disebut *hole* (lubang), bertindak sebagai pembawa muatan mayoritas yang siap menerima elektron (akseptor).

Pada batas pertemuan kedua lapisan ini terbentuk area netral yang dinamakan daerah deplesi (*depletion layer*) yang menghasilkan medan listrik internal. Ketika foton cahaya matahari dengan tingkat energi yang cukup menembus kaca pelindung sel surya dan menabrak atom silikon, energi foton tersebut diserap dan memutuskan ikatan kovalen, menghasilkan pasangan elektron-hole bebas. Medan listrik

internal pada daerah deplesi kemudian menggerakkan elektron menuju wilayah tipe-N dan hole menuju wilayah tipe-P. Pemisahan muatan ini menimbulkan beda potensial listrik pada kedua ujung terminal logam kontak, sehingga menghasilkan aliran arus listrik searah (DC) saat dihubungkan ke sirkuit beban luar.

Solar Charge Controller bertindak sebagai regulator tegangan dan arus pengisian dari panel surya menuju bank baterai guna mencegah kerusakan sel aki. SCC dilengkapi fitur diode proteksi untuk mencegah mengalirnya arus balik (*dark current*) dari baterai menuju panel surya pada malam hari. Berdasarkan metode pengaturannya, terdapat dua jenis SCC komersial, yaitu :

- a. *Pulse Width Modulation* (PWM), bekerja dengan mengatur lebar pulsa arus listrik secara bertahap saat baterai mulai mendekati kapasitas penuh untuk mencegah pengisian berlebih (*overcharge*). SCC jenis ini sangat andal dan ekonomis untuk sistem berkapasitas kecil, namun efisiensinya sangat rendah apabila tegangan nominal panel surya jauh lebih tinggi daripada tegangan nominal baterai.
- b. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT): Dilengkapi sirkuit *DC-to-DC converter* cerdas yang mampu melacak titik daya maksimum (P_{max}) dari modul surya pada berbagai kondisi cuaca. MPPT mengonversi kelebihan tegangan menjadi arus pengisian tambahan, sehingga meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan sebesar 20% hingga 30% dibandingkan tipe PWM.

Baterai kimia bertindak sebagai media penyimpanan energi listrik DC dalam bentuk energi potensial kimia. Sejarah baterai diawali dari pembuatan tumpukan cakram logam tembaga dan seng oleh Alessandro Volta pada tahun 1800 (*voltaic pile*), sebelum Gaston Planté pada tahun 1859 menciptakan baterai asam-timbal (*lead-acid*) isi ulang pertama di dunia. Berdasarkan karakteristik penggunaannya, baterai dibedakan menjadi :

- a. *Starting Battery*, dirancang untuk melepaskan arus listrik tinggi dalam durasi singkat guna menghidupkan mesin *starter*, menggunakan susunan pelat timbal tipis paralel dengan resistansi rendah.
- b. *Deep Cycle Battery*, dirancang khusus untuk melepaskan arus listrik yang konstan secara stabil dalam durasi yang sangat lama serta tahan terhadap siklus pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) yang berulang-ulang. Jenis baterai *deep cycle* yang umum digunakan adalah *Flooded Lead-Acid* (FLA) tipe basah yang membutuhkan perawatan rutin cairan elektrolit, serta *Valve-Regulated Lead-Acid* (VRLA) tipe kering tertutup yang bebas perawatan (*maintenance-free*).
- c. Baterai *Lithium-Ion* (*Li-ion*), menggunakan senyawa litium interkalasi sebagai elektroda aktif. Baterai lithium menawarkan efisiensi pengisian muatan yang sangat tinggi mencapai 95%, densitas energi per satuan berat yang besar, serta masa pakai yang sangat panjang. Namun, sistem ini memerlukan *Battery Management System* (BMS) yang ketat karena rentan terhadap risiko kegagalan termal (*thermal runaway*) yang memicu kebakaran apabila terjadi pengisian berlebih atau hubung singkat.

Thermoelectric Cooler (TEC) merupakan komponen pendingin berbasis zat padat (*solid-state*) yang bekerja berdasarkan fenomena efek *Peltier*. Ketika arus listrik DC dialirkan melalui sirkuit tertutup pasangan semikonduktor tipe-P dan tipe-N yang terjepit di antara dua pelat keramik isolator, panas akan diserap pada satu sisi pelat dan dibuang pada sisi pelat yang berlawanan. Modul TEC komersial seperti TEC1-12706 memiliki spesifikasi teknis 127 pasangan semikonduktor internal dengan tegangan operasi maksimum 12-15 V dan konsumsi arus batas 6 Ampere. Agar proses penyerapan kalor di ruang pendingin dapat berlangsung konstan, panas yang menumpuk di sisi panas modul *Peltier* harus dibuang secara cepat menggunakan pelat heatsink aluminium besar berpori disertai kipas hembus DC. Distribusi udara dingin di dalam *box* dibantu oleh heatsink aluminium kecil dan kipas sirkulasi internal. Kontrol temperatur ruang pendingin dikendalikan secara otomatis menggunakan thermostat digital berbasis mikrokontroler yang memutuskan aliran listrik ke modul TEC ketika suhu target telah tercapai.

3. METODE PENELITIAN

Prosedur perancangan dan pengujian sistem pendingin portabel bertenaga surya ini dirancang secara sistematis untuk mengevaluasi interaksi dinamis antara parameter cuaca pesisir terhadap efisiensi pendinginan.

Eksperimen ini memanfaatkan seperangkat peralatan pengukuran serta bahan komponen perakitan yang tercantum pada Tabel 1 dibawah ini.

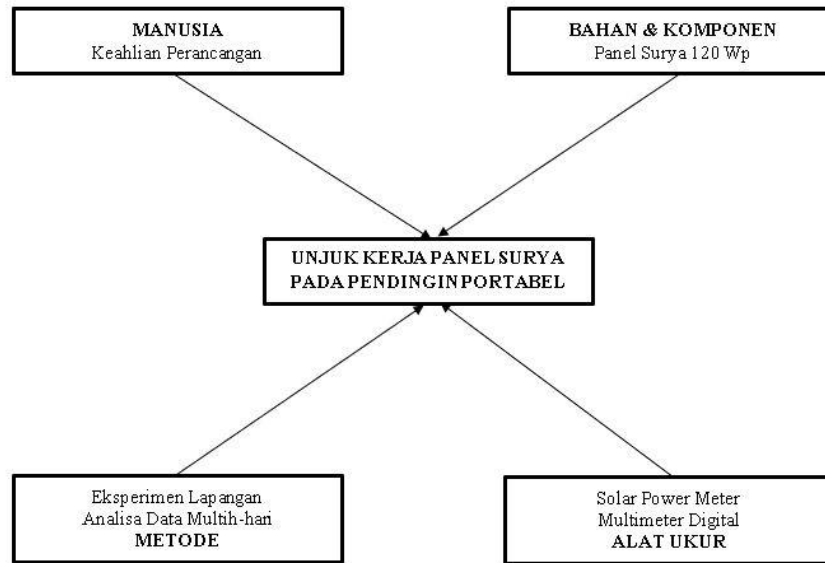
Tabel 1. Peralatan Pengukuran dan Bahan Komponen Perakitan

No.	Kategori	Nama Alat / Komponen	Spesifikasi Teknis	Jumlah
1.	Alat Ukur	- Solar Power Meter - Mini Temp Humidity Meter - Multimeter Digital - Infrared Thermometer	- SM206-Solar, akurasi tinggi - UT333, sensor kelembaban - Auto-ranging, pengukuran V dan I - Contactless temperature sensor	- 1 Unit - 1 Unit - 1 Unit - 1 Unit
2.	Bahan dan Komponen	- Panel Surya - Solar Charge Controller - Baterai VRLA - Modul Peltier - Thermostat Digital - Kabel Penghantar - Media Isolasi dan Box	- Maysun Solar MS120M-36, 120 Wp - W88-B, tipe PWM, 20 A - Leoch FT12-100, 12 V 100 Ah - TEC1-12706, daya nominal 72 W - Kontrol temperatur otomatis, 12 V - Tipe NYAF fleksibel tembaga murni Box styrofoam, isolasi selongsong bakar	- 1 Unit - 1 Unit - 1 Unit - 3 Unit - 1 Unit - 10 Meter - Secukupnya

Pengumpulan data primer dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu :

- Studi Literatur, dilakukan dengan menelaah jurnal ilmiah nasional dan internasional, laporan penelitian tugas akhir terdahulu, buku teks kelistrikan, serta dokumen panduan instalasi kelistrikan (PUIL 2000) guna memperoleh landasan teoretis perancangan sirkuit fotovoltaiik dan sistem termoelektrik.
- Penelitian Lapangan, peneliti melakukan observasi dan wawancara langsung kepada para nelayan tradisional di pesisir Belawan guna mengidentifikasi kebutuhan ruang pendingin portabel, pola operasional kapal, serta kondisi ekstrem lingkungan laut.

Alur kerja komprehensif dari penelitian ini digambarkan menggunakan diagram tulang ikan (*fishbone diagram*) pada Gambar 1.



Gambar 1. Fishbone Diagram Faktor Karakteristik Pengujian Sistem

Rangkaian elektrik utama menghubungkan panel surya Maysun MS120M-36 menuju terminal panel pada *Solar Charge Controller* W88-B menggunakan kabel tembaga NYAF. Terminal baterai pada SCC dihubungkan ke baterai VRLA Leoch FT12-100 sebagai bank penyimpanan energi utama. Selanjutnya, beban sirkuit pendingin berupa tiga buah modul termoelektrik TEC1-12706 disusun secara paralel dan dihubungkan ke terminal output beban (*load*) pada SCC melalui rangkaian kontak thermostat digital.

Perhitungan dimensi kapasitas kelistrikan dihitung berdasarkan konsumsi daya konstan sirkuit pendingin termoelektrik. Total daya beban (P_{total}) dari tiga modul TEC1-12706 bertegangan nominal 12 V dihitung dengan rumus :

$$P_{total} = V \times I_{total}$$

Mengingat setiap modul mengonsumsi arus konstan sekitar 6 A, maka total arus sirkuit paralel adalah 18 A. Dengan demikian, daya total beban aktif adalah :

$$P_{total} = 12 \times 18 \text{ A} = 216 \text{ Watt}$$

Energi harian yang dikonsumsi oleh sistem selama target waktu operasi melaut nelayan selama 5 jam per hari (E_{beban}) adalah :

$$E_{beban} = P_{total} \times H = 216 \text{ W} \times 5 \text{ jam} = 1.080 \text{ Wh/hari}$$

Untuk memperhitungkan rugi-rugi disipasi daya (*losses*) akibat tahanan kabel NYAF, efisiensi konversi kimiawi baterai, dan rugi daya *switching* pada pengatur PWM sebesar 20%, maka kebutuhan energi total sistem (ET) dirumuskan sebagai berikut:

$$ET = E_{beban} + (20\% \times E_{beban}) = 1.080 \text{ Wh} + 216 \text{ Wh} = 1$$

Berdasarkan parameter jam penyinaran matahari efektif di pesisir Belawan rata-rata selama 5 jam per hari, kapasitas minimum panel surya teoritis (P_{PV}) yang diperlukan agar sistem dapat berjalan mandiri secara penuh adalah :

$$PPV = \frac{ET}{Jam\ Penyinaran\ Efektif} = \frac{1.296\ Wh}{5\ jam} = 259,2\ Wp$$

Oleh karena itu, sistem yang ideal membutuhkan panel surya dengan kapasitas minimal 260 Wp. Namun, dalam pengujian eksperimental ini, panel surya yang digunakan hanya berkapasitas 120 Wp. Akibatnya, kapasitas produksi energi harian maksimum (E_{max}) yang mampu disuplai oleh panel surya di bawah terik matahari optimal hanyalah sebesar :

$$E_{max} = 120\ Wp \times 5\ jam = 600\ Wh$$

Nilai ini menunjukkan adanya defisit pasokan energi harian secara langsung dari panel surya sebesar 53,7% dari total kebutuhan riil beban (1.296 Wh).

Sisa kebutuhan energi sebesar 696 Wh dibebankan kepada penyimpanan baterai *Leoch* 12 V, 100 Ah yang memiliki kapasitas penyimpanan teoritis total sebesar 1.200 Wh. Dengan membatasi nilai pengosongan terdalam (*Depth of Discharge/DOD*) baterai *lead-acid* sebesar 80% untuk memperpanjang usia pakai sel elektroda, kapasitas energi aman harian yang dapat dilepaskan oleh baterai dihitung melalui persamaan :

$$E_{baterai} = V_{nominal} \times Kapasitas \times DOD = 12\ V \times 100\ Ah$$

Secara matematis, kapasitas aman baterai (960 Wh) sangat memadai untuk menutupi sisa defisit energi harian sistem (696 Wh) pada hari pertama pengoperasian.

Sizing sirkuit *Solar Charge Controller* dihitung untuk memastikan arus nominal dari panel surya tidak melampaui kapasitas kerja SCC. Batas arus nominal SCC dihitung melalui persamaan :

$$I_{scc} = \frac{P_{max_PV}}{V_{sistem_baterai}} = \frac{120\ Wp}{12\ V} = 10\ Ampere$$

Dengan menggunakan *Solar Charge Controller* W88-B yang memiliki Rated Current kerja 20 A, sistem berada pada batas aman operasional yang sangat tinggi dengan margin pengaman sebesar 50%.

Alat pendingin portabel ini diuji secara langsung di daerah pesisir Belawan, Kota Medan, yang terletak pada koordinat geografis 3,8487400° LU dan 98,7411590° BT. Lokasi pengujian ini berjarak sekitar 38 kilometer dari kampus Politeknik Negeri Medan dengan waktu tempuh transportasi darat berkisar antara 1 hingga 1,5 jam. Di atas kapal nelayan tradisional, box pendingin portabel diletakkan pada dek perahu yang aman dari cipratan langsung air laut dan terlindung di bawah naungan terpal. Panel surya dipasang pada bagian atap terpal perahu dengan sudut kemiringan optimal menghadap tegak lurus ke arah datangnya sinar matahari guna memaksimalkan penyerapan radiasi foton sepanjang hari.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dasar sel surya monocrystalline Maysun 120 Wp dievaluasi terlebih dahulu tanpa beban aktif guna mengukur tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) dan laju pengisian teoritis. Pengukuran dilakukan pada dua kondisi cuaca ekstrem, yaitu hari cerah (27 Mei 2025) dan hari berawan/mendung (28 Mei 2025).

Tabel 2. Karakteristik Panel Surya Tanpa Beban pada Cuaca Cerah (27 Mei 2025)

Waktu (Pukul)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Intensitas Cahaya (Lux)	Suhu Udara (°C)	Keterangan
08.00	12,65 V	2,33 A	29,47 W	126.680 Lux	30°C	Cerah
09.00	12,65 V	2,49 A	31,56 W	129.427 Lux	32°C	Cerah

10.00	12,80 V	2,49 A	31,94 W	130.145 Lux	34°C	Cerah
11.00	12,92 V	3,55 A	45,94 W	157.449 Lux	36°C	Cerah
12.00	13,00 V	2,59 A	33,79 W	151.363 Lux	37°C	Cerah
13.00	12,81 V	3,19 A	40,96 W	145.630 Lux	37°C	Cerah
14.00	12,91 V	2,70 A	34,86 W	130.208 Lux	35°C	Cerah
15.00	12,95 V	1,24 A	16,06 W	56.536 Lux	34°C	Berawan
16.00	12,52 V	1,08 A	13,62 W	45.410 Lux	34°C	Berawan

Berdasarkan Tabel 2, daya kelistrikan yang dihasilkan panel surya tanpa beban pada kondisi cuaca cerah mengalami peningkatan signifikan sejak pagi hari. Puncak daya dicapai pada pukul 11.00 dengan nilai sebesar 45,94 W saat intensitas radiasi matahari berada pada tingkat tertinggi sebesar 157.449 Lux. Penurunan intensitas cahaya matahari setelah pukul 14.00 yang diiringi tutupan awan tipis pada sore hari secara linier menurunkan daya keluaran hingga menjadi 13,62 W pada pukul 16.00 (45.410 Lux). Karakteristik tegangan sel fotovoltaik menunjukkan tingkat kestabilan yang sangat tinggi, berfluktuasi rendah pada rentang sempit antara 12,52 V hingga 13,00 V.

Tabel 3. Karakteristik Panel Surya Tanpa Beban pada Cuaca Berawan/Mendung (28 Mei 2025)

Waktu (Pukul)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Intensitas Cahaya (Lux)	Suhu Udara (°C)	Keterangan
08.00	12,30 V	1,10 A	13,53 W	18.270 Lux	28°C	Mendung
09.00	12,25 V	1,15 A	15,31 W	18.900 Lux	29°C	Mendung
10.00	12,20 V	1,45 A	17,69 W	20.160 Lux	29°C	Mendung
11.00	12,18 V	1,70 A	20,71 W	21.420 Lux	30°C	Mendung
12.00	12,10 V	1,90 A	22,99 W	22.050 Lux	29°C	Mendung
13.00	12,05 V	1,75 A	21,04 W	20.790 Lux	31°C	Berawan
14.00	12,00 V	1,60 A	19,20 W	19.530 Lux	30°C	Berawan
15.00	11,90 V	1,30 A	15,47 W	17.640 Lux	31°C	Berawan
16.00	11,85 V	1,10 A	13,04 W	17.010 Lux	32°C	Berawan

Pada pengujian hari berawan dan mendung (Tabel 3), intensitas cahaya matahari harian tertekan secara ekstrem di mana nilai lux tertinggi hanya mencapai 22.050 Lux pada pukul 12.00. Kondisi atmosferik ini mengakibatkan daya maksimum harian yang dipanen panel surya merosot tajam menjadi hanya sebesar 22,99 W. Rata-rata daya harian yang diproduksi pada cuaca cerah terhitung sebesar 30,91 W dengan rata-rata intensitas sebesar 119.205 Lux, sedangkan pada cuaca berawan rata-rata daya merosot hingga 17,66 W dengan rata-rata intensitas hanya 19.530 Lux. Hubungan ini membuktikan bahwa tutupan awan maritim yang memotong intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 83,6% secara langsung mereduksi produksi daya listrik panel surya tanpa beban hingga sebesar 42,8%.

Pengujian sesungguhnya dilakukan dengan menghubungkan sirkuit kelistrikan panel surya menuju beban dinamis tiga buah modul TEC1-12706 dan kipas sirkulasi udara dingin. Karakteristik kelistrikan berbeban dipantau secara ketat dalam tiga variasi kondisi cuaca yang berbeda.

Tabel 4. Karakteristik Berbeban pada Cuaca Cerah (31 Mei 2025)

Waktu (Pukul)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Intensitas Cahaya (Lux)	Suhu Udara (°C)	Keterangan
08.00	11,75 V	2,45 A	28,79 W	19.279 Lux	30°C	Berawan
09.00	11,78 V	2,80 A	33,00 W	19.720 Lux	30°C	Berawan
10.00	11,80 V	3,00 A	35,40 W	20.987 Lux	31°C	Cerah
11.00	11,85 V	3,25 A	38,51 W	22.142 Lux	33°C	Cerah
12.00	11,88 V	3,40 A	40,39 W	21.870 Lux	34°C	Cerah

13.00	11,90 V	3,45 A	41,06 W	21.148 Lux	34°C	Cerah
14.00	11,85 V	3,50 A	41,48 W	20.302 Lux	33°C	Cerah
15.00	11,82 V	3,45 A	40,81 W	17.987 Lux	33°C	Cerah
16.00	11,80 V	3,30 A	38,94 W	17.385 Lux	32°C	Cerah

Pada cuaca cerah (Tabel 4), sirkuit fotovoltaik menunjukkan unjuk kerja optimal. Produksi daya listrik secara konstan merangkak naik dari 28,79 W di pagi hari hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 41,48 W pada pukul 14.00 saat intensitas cahaya matahari stabil pada tingkat tinggi berkisar antara 19.000-22.000 Lux. Sambungan paralel modul termoelektrik memaksa tegangan kerja panel surya tertekan (jatuh tegangan) ke kisaran stabil antara 11,75 V hingga 11,90 V. Penurunan tegangan ini terjadi karena resistansi internal rendah dari sirkuit paralel TEC yang menarik arus kerja yang besar mendekati kapasitas nominal *charging* baterai.

Tabel 5. Karakteristik Berbeban pada Cuaca Berawan (2 Juni 2025)

Waktu (Pukul)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Intensitas Cahaya (Lux)	Suhu Udara (°C)	Keterangan
08.00	11,30 V	0,90 A	10,17 W	12.558 Lux	30°C	Berawan
09.00	11,40 V	1,10 A	12,54 W	13.482 Lux	30°C	Berawan
10.00	11,50 V	1,25 A	14,38 W	14.304 Lux	31°C	Berawan
11.00	11,60 V	1,35 A	15,66 W	15.645 Lux	32°C	Berawan
12.00	11,65 V	1,45 A	16,89 W	15.983 Lux	33°C	Cerah
13.00	11,70 V	1,55 A	18,14 W	14.755 Lux	32°C	Cerah
14.00	11,65 V	1,50 A	17,48 W	13.493 Lux	31°C	Berawan
15.00	11,60 V	1,45 A	16,82 W	11.466 Lux	30°C	Berawan
16.00	11,55 V	1,40 A	16,17 W	10.862 Lux	28°C	Berawan

Ketika kondisi cuaca berawan dominan (Tabel 5), terjadi penurunan arus masukan sirkuit fotovoltaik yang sangat drastis. Arus kerja panel surya turun ke level terendah 0,90 A pada pagi hari, sehingga daya maksimum harian yang mampu dibangkitkan oleh panel berkapasitas 120 Wp tersebut tertekan menjadi hanya sebesar 18,14 W pada pukul 13.00. Tegangan sirkuit fotovoltaik berbeban juga mengalami penurunan dinamis, berfluktuasi rendah pada rentang 11,30-11,70 V.

Tabel 6. Karakteristik Berbeban pada Cuaca Mendung (1 Juni 2025)

Waktu (Pukul)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Intensitas Cahaya (Lux)	Suhu Udara (°C)	Keterangan
08.00	10,90 V	0,42 A	4,58 W	9.960 Lux	29°C	Mendung
09.00	11,00 V	0,50 A	5,50 W	10.710 Lux	30°C	Mendung
10.00	11,10 V	0,54 A	6,00 W	11.184 Lux	31°C	Berawan
11.00	11,15 V	0,58 A	6,47 W	12.417 Lux	32°C	Berawan
12.00	11,20 V	0,60 A	6,72 W	13.230 Lux	32°C	Berawan
13.00	11,10 V	0,57 A	6,33 W	12.010 Lux	30°C	Mendung
14.00	11,00 V	0,56 A	6,16 W	11.005 Lux	31°C	Mendung
15.00	11,90 V	0,50 A	5,45 W	9.813 Lux	29°C	Mendung
16.00	11,85 V	0,47 A	5,10 W	9.356 Lux	28°C	Mendung

Kondisi kelistrikan yang paling kritis teramati pada saat hari mendung tebal (Tabel 6), di mana tutupan awan memotong radiasi langsung matahari secara penuh. Arus kerja panel surya runtuh ke kisaran 0,42-0,60 A, sehingga daya maksimum harian yang diproduksi panel surya monocrystalline tersebut hanya mencapai nilai puncak sebesar 6,72 W pada pukul 12.00. Tegangan operasi kerja sirkuit ditarik ke bawah oleh beban dinamis hingga menyentuh level kritis 10,85 V pada pukul 16.00. Hal ini

menandakan bahwa sirkuit fotovoltaik tidak lagi berkontribusi dalam menyuplai daya, melainkan daya ditarik sepenuhnya dari pengosongan kapasitas baterai.

Korelasi dinamis antara intensitas radiasi matahari terhadap parameter kelistrikan sirkuit fotovoltaik di bawah pembebanan dinamis dihitung melalui perbandingan rata-rata tiga hari representatif yang disajikan pada Tabel 7 berikut ini.

Tabel 7. Analisis Performa Rata-Rata Multi-Hari Kelistrikan Panel Berbeban

No.	Parameter Kelistrikan Rata-Rata	Cuaca Cerah (31 Mei 2025)	Cuaca Berawan (2 Juni 2025)	Cuaca Mendung (1 Juni 2025)
1.	Tegangan Berbeban Rata-Rata (V)	11,82 V	11,63 V	11,03 V
2.	Arus Berbeban Rata-Rata (I)	3,17 A	2,14 A	0,51 A
3.	Daya Berbeban Rata-Rata (W)	37,59 W	25,03 W	5,81 W
4.	Intensitas Cahaya Rata-Rata (Lux)	20.091 Lux	13.616 Lux	11.076 Lux

Berdasarkan komparasi data pada Tabel 7, penurunan rata-rata intensitas cahaya matahari harian dari 20.091 Lux saat cuaca cerah menjadi 13.616 Lux pada saat cuaca berawan (penurunan intensitas sebesar 32,2%) diikuti oleh penurunan daya rata-rata sebesar 33,4% (dari 37,59 W menjadi 25,03 W). Namun, saat cuaca mendung tebal dengan rata-rata intensitas sebesar 11.076 Lux (turun 44,8% dibandingkan cuaca cerah), daya rata-rata keluaran panel surya mengalami penurunan drastis hingga mencapai 84,5% menjadi hanya sebesar 5,81 W.

Penurunan daya yang sangat ekstrem di bawah pembebanan dinamis ini dipicu oleh cara kerja *Solar Charge Controller* tipe PWM. Ketika arus keluaran dari panel surya turun di bawah ambang batas minimum pengisian akibat rendahnya intensitas cahaya matahari, sirkuit PWM kehilangan kemampuan *switching* pengatur daya. Energi listrik yang dihasilkan panel surya yang sangat minim akhirnya habis sebagai rugi-rugi panas (desipasi daya) di sepanjang sirkuit tembaga NYAF, sehingga seluruh beban dinamis sebesar 216 Watt dialihkan sepenuhnya kepada kapasitas penyimpanan baterai.

Studi eksperimental ini menyimpulkan bahwa sistem pendingin portabel berbasis termoelektrik dengan spesifikasi komponen saat ini belum mampu mencapai kemandirian energi (*fully self-sustaining off-grid*) untuk operasional nelayan di daerah pesisir Belawan.

Pada kondisi cuaca cerah optimal, panel surya *monocrystalline* berkapasitas 120 Wp hanya mampu memanen daya rata-rata sebesar 37 W selama 5 jam penyinaran matahari efektif harian, yang menghasilkan akumulasi energi harian sekitar 185 Wh. Sementara itu, kebutuhan energi total sistem pendingin portabel dengan beban tiga buah modul TEC (total daya konstan 216 W) untuk durasi operasional melaut selama 5 jam per hari adalah sebesar 1.080 Wh. Dengan demikian, terjadi defisit pasokan energi harian yang sangat signifikan dari panel surya menuju sirkuit beban sebesar 895 Wh per hari.

Untuk mempertahankan keberlangsungan proses pendinginan selama 5 jam melaut, sisa defisit energi harian ditopang oleh pelepasan kapasitas baterai VRLA Leoch FT12-100. Dengan batasan pengosongan aman (DOD) sebesar 80%, kapasitas penyimpanan energi efektif baterai adalah sebesar 960 Wh. Pada hari pertama melaut di bawah kondisi cuaca cerah optimal, kombinasi energi pengosongan aman baterai dan daya langsung panel surya (960 Wh + 185 Wh = 1.145 Wh) masih mencukupi untuk memenuhi kebutuhan sirkuit pendingin sebesar 1.080 Wh, sehingga target pendinginan 5 jam dapat tercapai dengan sukses.

Namun, siklus kelistrikan ini tidak dapat berjalan berkelanjutan pada hari-hari berikutnya. Agar baterai dapat menyuplai energi kembali secara stabil pada hari kedua melaut, baterai harus diisi ulang sebesar

energi defisit harian (895 Wh). Dengan memperhitungkan efisiensi pengisian kimiawi baterai jenis *lead-acid* sebesar 20%, maka energi pengisian aktual yang harus disuplai oleh panel surya adalah sebesar 1.074 Wh. Karena panel surya 120 Wp hanya mampu memanen energi harian sebesar 185 Wh pada cuaca cerah, maka dibutuhkan waktu pengisian daya matahari konstan selama hampir 6 hari penuh tanpa beban aktif hanya untuk memulihkan kapasitas pengosongan baterai setelah satu kali melaut selama 5 jam.

Krisis keseimbangan energi kelistrikan ini akan semakin memburuk apabila nelayan harus melaut di bawah kondisi cuaca berawan atau mendung. Pada hari berawan, energi harian yang dihasilkan panel surya merosot menjadi 125 Wh (25,03 W x 5 jam), sehingga meningkatkan defisit pengisian baterai menjadi 955 Wh per hari. Pada hari mendung, panel hanya mampu berkontribusi menghasilkan energi sebesar 29mWh (5,81 W x 5 jam), sehingga memaksa baterai untuk dikosongkan sebesar 1.051 Wh guna mempertahankan proses pendinginan. Nilai pengosongan paksa ini melampaui batas pengosongan aman baterai (960 Wh), memicu terjadinya pengosongan dalam (*deep discharge*) hingga kapasitas di bawah 10%. Pengosongan dalam yang terjadi secara berulang dalam pengoperasian lapangan akan memicu desintegrasi kimiawi pelat timbal peroksida, mempercepat proses sulfasi, serta merusak resistansi internal baterai secara permanen, yang berimplikasi pada runtuhnya usia pakai aki dalam waktu singkat.

5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Unjuk kerja daya keluaran panel surya *monocrystalline* Maysun 120 Wp sangat dipengaruhi oleh cuaca maritim menghasilkan daya puncak 41,65 W saat cerah namun anjlok hingga di bawah 7 W saat mendung tebal sehingga pembebanan dinamis dari tiga modul TEC1-12706 secara paralel memicu *voltage drop* hingga level kritis 10,85 V dan menyebabkan akumulasi energi harian panel (185 Wh) gagal memenuhi total kebutuhan energi melaut nelayan (1.080 Wh selama 5 jam) yang pada akhirnya menguras baterai VRLA Leoch FT12-100 (960 Wh) tanpa kemampuan pengisian ulang harian yang memadai.

5.2. Saran

Untuk mengatasi keterbatasan energi, kapasitas pembangkitan fotovoltaik perlu ditingkatkan menjadi minimal 300 Wp dan dipadukan dengan *Solar Charge Controller* tipe MPPT guna mengoptimalkan efisiensi pengisian, sementara baterai VRLA sebaiknya diganti dengan teknologi *Lithium* (90-95% DOD) yang lebih ringan dan efisien, serta sistem pendingin dilengkapi termostat digital cerdas berprinsip intermiten untuk menekan konsumsi energi harian agar tidak terus-menerus menyerap daya penuh 216 Watt.

DAFTAR PUSTAKA

- Aman, A., & Wahyudi, W. (2020). Sistem pemantau suhu cooler box berbasis telemetri dengan thermoelectric cooler sebagai bakteriostatik pada ikan. *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer*, 4(1), 32–40.
- Kiswanto, K., & Suprianto, S. (2021). Analisis eksperimental pengaruh sudut kemiringan dan intensitas cahaya terhadap kinerja panel surya portabel. *Wahana Fisika*, 6(1), 45–55.
- Musa, M. D., & Ismail, I. (2019). Development and experimental investigation of portable solar-powered thermoelectric cooler for preservation of perishable foods. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(3), 285–294.

- Pratama, A., & Sitorus, R. (2020). Analisis pengaruh energi matahari terhadap tegangan keluar solar cell pada rancang bangun. *Jurnal Otomasi, Kontrol & Instrumentasi (OJS Politeknik Negeri Medan)*, 12(2), 101–110.
- Rahman, F., & Hidayat, N. (2021). Analisis pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap daya keluaran pada panel surya. *Jurnal Syntax Admiration*, 2(5), 620–631.
- Setiawan, I. B., & Suarnada, I. W. (2018). Thermoelectric sebagai pendingin minuman kaleng dan pembangkit daya listrik (Laporan Penelitian/Tugas Akhir). Repository Politeknik Negeri Bali.
- Utomo, S., & Nugroho, A. (2022). Sistem monitoring lingkungan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya berbasis Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). *Jurnal Karya Ilmiah Multidisiplin (JURKIM)*, 2(1), 15–24.
- Wijaya, R., & Hartono, B. (2023). Design of a thermoelectric generator for battery charging using solar heat concentrator. *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, 2(1), 8–15.