

Penerapan *Photovoltaic* Pada Kapal *Tug Boat* 28 M Sebagai Solusi Untuk Mengurangi Emisi dan Meningkatkan Efisiensi Bahan Bakar

Jansen Anugrah Siregar^{*1}, Benny Haddli Irawan^{1*} and Danang Cahyagi^{2*}

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: jansensiregar363@email.com

Abstrak

Peningkatan emisi karbon dari sektor maritim menjadi tantangan global yang mendorong penerapan energi terbarukan pada kapal. Kapal *tug boat* 28 M yang masih mengandalkan sistem kelistrikan diesel engine generator dapat menghasilkan emisi gas yang tinggi bahkan pada saat siaga. Penelitian ini bertujuan merancang sistem pembangkit listrik *hybrid* yang menggabungkan *photovoltaic* dengan *diesel engine generator* untuk menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang pada kapal. Metode penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data general arrangement dan electrical load kapal, serta analisis kebutuhan daya selama pelayaran. Dengan data yang didapatkan, dilakukan perhitungan jumlah dan kapasitas *photovoltaic*, baterai, *solar charge controller (SCC)*, dan *inverter*. Analisa data meliputi estimasi konsumsi bahan bakar harian dan bulanan, serta perbandingan emisi CO₂, NO_x, SO_x, dan PM antara sistem diesel konvensional dan sistem *hybrid*. Hasil penelitian menunjukkan rancangan sistem *hybrid* kelistrikan dengan 25 unit *photovoltaic* total daya 11.375 W, 8 unit baterai 3.200 Ah, 6 unit SCC 420 A, dan 8 unit inverter 36.000 W. Sistem ini mampu mengurangi konsumsi bahan bakar sebesar 8,33% per bulan dan menurunkan emisi CO₂ hingga 1.430.39 kg/bulan. Penempatan peralatan memperhatikan aspek keselamatan dan efisiensi ruang. Perancangan sistem *hybrid* ini layak secara teknis dan aplikatif untuk mendukung efisiensi energi serta dekarbonisasi sektor maritim.

Kata kunci: *photovoltaic*, kapal *tug boat*, sistem *hybrid*

Abstract

Increased carbon emissions from the maritime sector have become a global challenge that has prompted the implementation of renewable energy on ships. The 28 M tug boat, which still relies on a diesel engine generator electrical system, can produce high gas emissions even when on standby. This study aims to design a hybrid power generation system that combines photovoltaics with a diesel engine generator system to reduce fuel consumption and exhaust gas emissions on vessels. The research methods include literature review, data collection on the general arrangement and electrical load of the vessel, and analysis of power requirements during voyage. Using the obtained data, calculations were performed for the number and capacity of photovoltaic panels, batteries, solar charge controllers (SCC), and inverters. Data analysis includes estimation of daily and monthly fuel consumption, as well as a comparison of CO₂, NO_x, SO_x, and PM emissions between the conventional diesel system and the hybrid system. The research results show a hybrid electrical system design with 25 photovoltaic units totaling 11,375 W, 8 battery- units of 3,200 Ah, 6 SCC units of 420 A, and 8 inverters with a total capacity of 36,000 W. This system reduces fuel consumption by 8.33% per month and lowers CO₂ emissions by up to 1.430.39 kg/month. Equipment placement considers safety and space efficiency. The design of this hybrid system is technically and practically feasible to support energy efficiency and decarbonization in the maritime sector.

Keywords: *photovoltaic*, *tug boat*, *hybrid system*

1 Pendahuluan

Indonesia saat ini menghadapi tantangan pemanasan global yang disebabkan oleh pertumbuhan populasi, kurangnya kebijakan yang mendukung pengembangan energi terbarukan, serta meningkatnya aktivitas ekonomi, terutama di sektor transportasi maritim. Berdasarkan laporan *Climate Transparency 2022*, Indonesia telah menyumbang sekitar 733,2 MtCO₂ emisi. Menurut *Nationally Determined Contribution (NDC)*, emisi CO₂ Indonesia diperkirakan akan meningkat sebesar 421% hingga mencapai sekitar 1.661 MtCO₂e pada tahun 2030. Untuk menjaga suhu global tetap di bawah 1,5 °C, emisi Indonesia harus dibatasi hingga sekitar 449 MtCO₂e pada tahun 2030 [1]. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (DJEBTKE) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menargetkan penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 358 juta ton CO₂e di seluruh sektor hingga tahun 2030 [2]. Salah satu strategi yang dicanangkan adalah mendorong pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dalam sektor industri dan transportasi, termasuk sektor transportasi laut yang selama ini masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil.

Kapal *tug boat* adalah salah satu sektor yang memiliki potensi besar untuk efisiensi energi. Kapal *tug boat* banyak digunakan untuk menarik, mendorong, atau membantu manuver kapal-kapal besar/tongkang [3]. Umumnya, sistem kelistrikan pada kapal *tug boat* masih menggunakan *diesel engine generator*, yang menyebabkan emisi karbon tetap tinggi bahkan saat kapal dalam kondisi siaga [4]. Dalam penelitian ini, objek yang dianalisis adalah kapal *tug boat* 28 M yang saat ini sedang dalam tahap pembangunan di galangan kapal PT. Buana Mandala Shipyard. Tingginya permintaan terhadap pembangunan kapal serta meningkatnya biaya bahan bakar solar menjadi latar belakang dilakukannya penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengidentifikasi upaya-upaya yang dapat dilakukan guna mengurangi konsumsi bahan bakar pada kapal *tug boat* 28M, sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional kapal.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar pada kapal *tug boat* 28M adalah perancangan sistem pembangkit listrik *hybrid* yang menggabungkan *photovoltaic* dengan *diesel engine generator* [5]. Sistem *hybrid* ini dirancang untuk beroperasi secara bergantian. *Photovoltaic* berperan sebagai sumber energi tambahan yang menyuplai kebutuhan listrik kapal selama pelayaran. Energi listrik dari *photovoltaic* disimpan dalam baterai dan digunakan untuk mengoperasikan sistem kelistrikan kapal, seperti sistem navigasi, pencahayaan, komunikasi, dan permesinan bantu kapal [6]. Ketika daya dalam baterai habis, *diesel engine generator* akan diaktifkan kembali sebagai sumber utama energi listrik.

Penelitian ini bertujuan melakukan perhitungan jumlah baterai, *photovoltaic*, *solar charge controller (SCC)*, dan inverter yang akan dipasang berdasarkan kebutuhan daya listrik kapal. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menghitung persentase perbandingan pengurangan konsumsi bahan bakar solar selama 1 bulan kapal berlayar dan menghitung perbandingan emisi gas buang pada sistem *diesel engine generator* dengan sistem *hybrid*, perancangan desain diagram *hybrid*, serta perancangan ulang (*redesign*) untuk menentukan peletakan baterai, *photovoltaic*, *SCC*, dan inverter.

Penelitian ini tidak membahas terkait dengan perhitungan biaya pemasangan sistem *hybrid* yang terdiri dari *photovoltaic*, *SCC*, baterai, dan *inverter*. Penelitian ini juga tidak mencakup analisis kekuatan atau ketahanan konstruksi dari *photovoltaic*, *SCC*, baterai, dan *inverter*. Penelitian ini hanya bersifat konsep desain, dan melakukan perhitungan melalui excel tanpa simulasi teknis menggunakan software. Selain itu, aspek kelistrikan yang dikaji tidak memperhitungkan pengaruhnya terhadap stabilitas kapal, sehingga analisis *intact* dan total beban load di luar ruang lingkup penelitian ini.

Tinjauan penelitian terdahulu bertujuan untuk memperoleh referensi, menemukan celah penelitian, serta menegaskan orisinalitas studi. Pada bagian ini disajikan ringkasan hasil penelitian relevan, baik yang telah maupun belum dipublikasikan, sebagai landasan dan pembanding bagi penelitian yang dilakukan.

Pertama, penelitian yang dilakukan oleh [7] berjudul “*Simulation of a Hybrid Propulsion System on Tugboats Operating in the Strait of Istanbul*” merupakan studi simulasi numerik yang mengevaluasi efisiensi *Hybrid Propulsion System (HPS)* pada kapal tunda. Studi ini menunjukkan bahwa *HPS* mampu meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi, dengan penghematan bahan bakar antara 5,2% hingga 72,4%, tergantung konfigurasi sistem dan mode operasi. Namun, keterbatasan ruang dan bobot menjadi kendala pada kapal tunda. Persamaan dengan penelitian ini terletak pada tujuan mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi melalui integrasi energi terbarukan, yakni *diesel*, *photovoltaic*, dan baterai LiFePO₄. Keduanya juga menghitung emisi CO₂, NO_x, SO_x, dan PM. Perbedaannya, penelitian ini menggunakan pendekatan desain konseptual pada sistem kelistrikan kapal *tug boat* 28M, sedangkan Nuran et al. menganalisis sistem propulsi utama secara menyeluruh dengan simulasi teknis.

Kedua, Penelitian yang dilakukan oleh [8] berjudul “Desain *Hybrid* Panel Surya dan Generator Set Pada Kapal Ikan Pesisir Selatan Jawa” merupakan studi terapan dengan pendekatan rekayasa sistem kelistrikan berbasis energi terbarukan. Melalui observasi lapangan dan analisis kebutuhan daya pada kapal nelayan 3GT, dirancang sistem *hybrid* yang menggabungkan PLTS dan generator portabel. Sistem terdiri dari dua panel surya 1000 Wp dan empat baterai 12V 150Ah, mampu memenuhi kebutuhan listrik harian sebesar 7125,6 Wh. Persamaan dengan penelitian ini terletak pada penerapan sistem *hybrid* yang menggabungkan *photovoltaic* dan *generator diesel* untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Keduanya juga mencakup perancangan dan perhitungan kapasitas panel surya, baterai, *inverter*, dan *charge controller*. Perbedaannya, penelitian ini berfokus pada efisiensi energi dan pengurangan emisi dalam skala besar, sedangkan penelitian pada kapal 3GT menitikberatkan pada solusi aplikatif yang sederhana dan hemat biaya bagi nelayan.

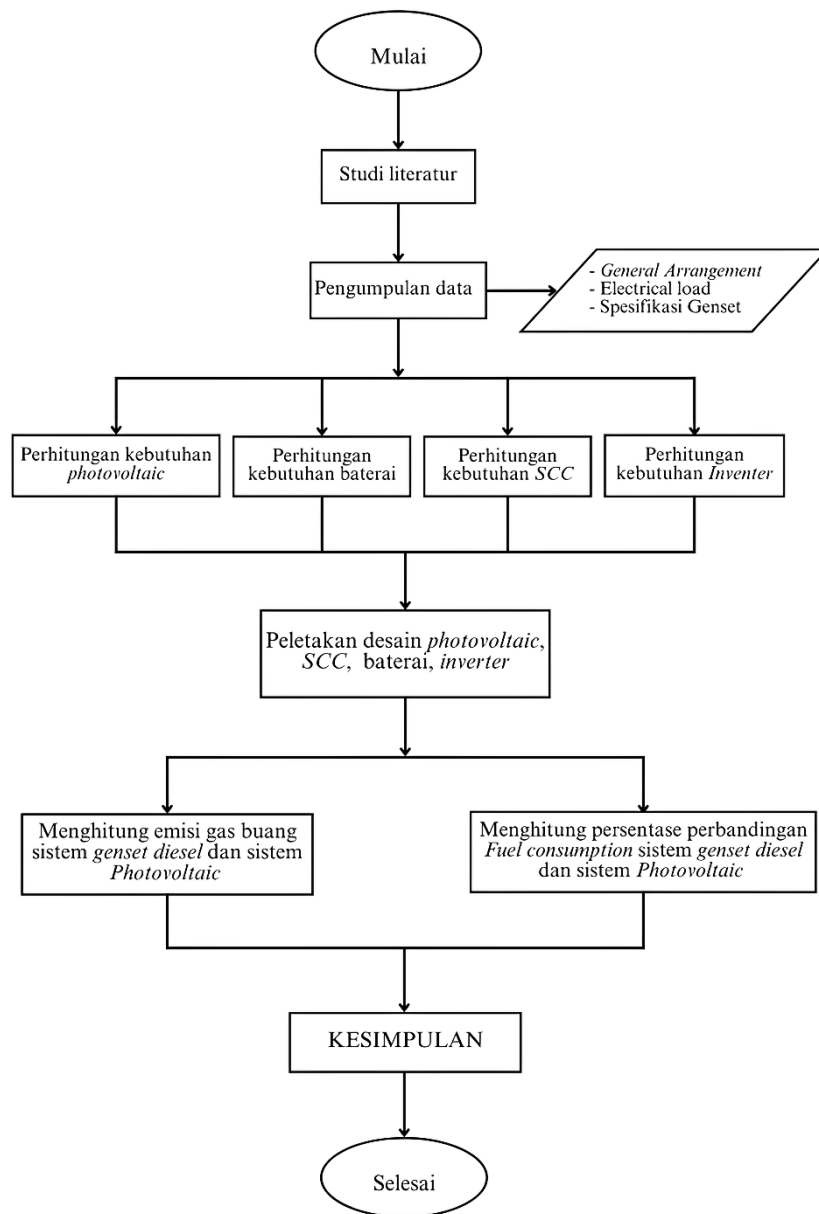
Ketiga, Penelitian yang dilakukan oleh [9] berjudul “*Simulation of Solar Energy Harvesting on a 25-Meter Electric Passenger Ferry*” merupakan studi kuantitatif berbasis simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Penelitian ini mengevaluasi potensi energi surya pada kapal feri listrik E.V. Calestia di Sungai Pasig, Manila. Hasil simulasi menunjukkan bahwa 20 panel surya 150 W mampu menghasilkan daya puncak 3 kW dan total energi sekitar 150 kWh per minggu dalam kondisi optimal. Meskipun kontribusinya kecil terhadap total kapasitas baterai 1848 kWh, sistem ini meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi ketergantungan pada listrik darat. Persamaannya dengan penelitian ini adalah penggunaan sistem *photovoltaic* sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung efisiensi operasional dan menurunkan emisi. Keduanya memanfaatkan baterai dan *inverter* sebagai bagian dari sistem penyimpanan dan distribusi energi. Perbedaannya, penelitian pada E.V. Calestia bersifat simulatif dan hanya menilai potensi energi surya tanpa integrasi sistem *hybrid*. Sebaliknya, penelitian ini bersifat konseptual teknis, menggabungkan *photovoltaic* dan *genset diesel*, serta menghitung pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang secara kuantitatif, termasuk perancangan komponen seperti *SCC*, *inverter*, dan baterai berdasarkan kebutuhan beban kapal.

Keempat, penelitian yang dilakukan oleh [10] berjudul “*Simulation of Design and Operation of a Hybrid PV/PEMFC/Battery Power System for a Tugboat*” merupakan simulasi berbasis MATLAB yang merancang sistem *hybrid PV, fuel cell (PEMFC)*, dan baterai untuk kapal tunda. Sistem ini mampu memenuhi kebutuhan daya harian tanpa emisi. *Case 2* menjadi konfigurasi terbaik dengan efisiensi hidrogen tertinggi dan *LPSP* terendah. Persamaannya dengan penelitian ini terletak pada fokus terhadap pengembangan sistem kelistrikan *hybrid* untuk kapal tug boat guna mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi gas buang (CO_2 , NO_x , SO_x , PM). Keduanya menggabungkan sumber energi utama dan energi terbarukan (PV), serta menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi. Perbedaannya, penelitian ini menggunakan pendekatan konseptual berbasis perhitungan manual dan integrasi PV dengan *diesel generator*. Sementara itu, studi oleh Rongbin Xin et al. menggunakan simulasi teknis MATLAB dengan sistem *zero-emission* berbasis PV, PEMFC, dan baterai tanpa keterlibatan diesel engine.

Kelima, penelitian yang dilakukan oleh [11] berjudul “*Photovoltaic-Based Electric Tourist Boat Design to Support Island Tourism at the Labuan Bajo*” merupakan studi rekayasa yang merancang kapal wisata listrik berbasis *photovoltaic*. Kapal sepanjang 14 meter dengan motor listrik 75 kW dan 182 panel surya 100 Wp mampu beroperasi selama 10 jam sejauh 9,13 km. Persamaannya dengan penelitian ini adalah sama-sama bertujuan mengurangi emisi, menghemat energi, dan menggunakan pendekatan konseptual dengan integrasi *photovoltaic* dan baterai. Perbedaannya, penelitian ini merancang kapal wisata sepenuhnya bertenaga surya tanpa sistem diesel, sedangkan penelitian ini fokus pada kapal tug boat dengan sistem *hybrid diesel-PV* dan analisis pengurangan konsumsi bahan bakar serta emisi secara kuantitatif.

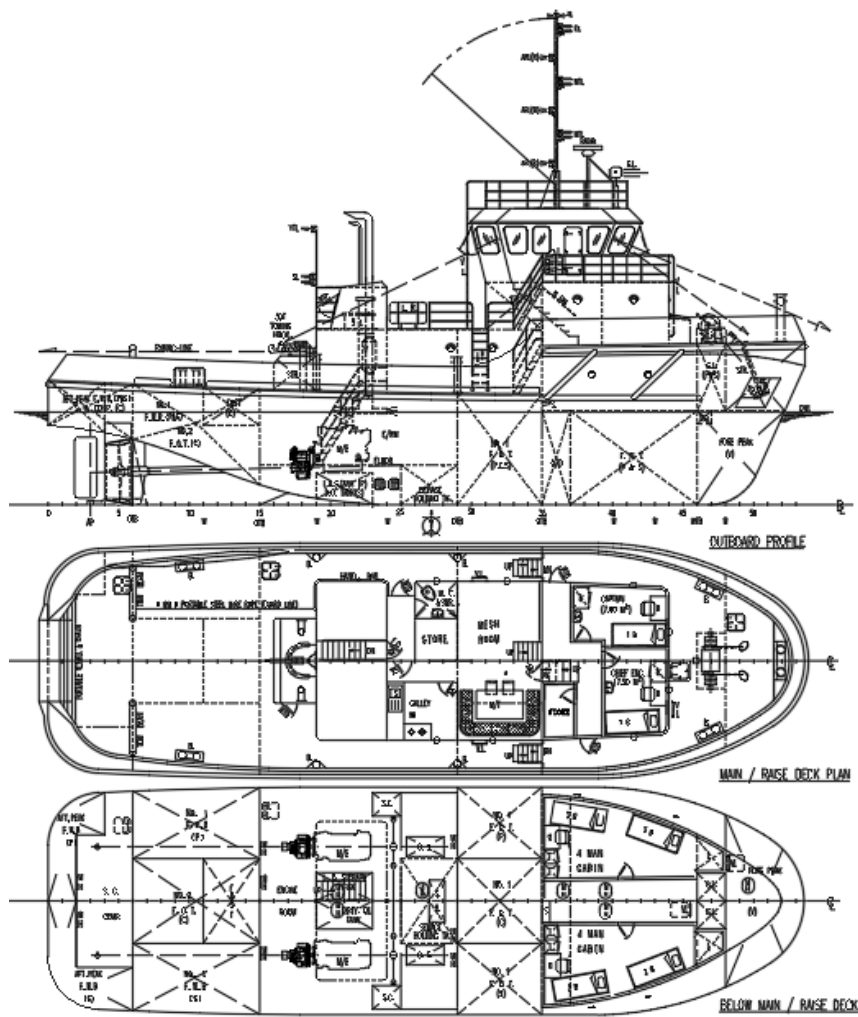
2 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur untuk mengkaji teori dan referensi terkait sistem *photovoltaic*, genset diesel, baterai, *inverter*, dan *solar charge controller (SCC)*. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data teknis seperti *general arrangement*, beban listrik, dan spesifikasi *genset*. Berdasarkan data tersebut, dilakukan perhitungan kebutuhan masing-masing komponen, yaitu *photovoltaic*, baterai, *SCC*, dan *inverter*. Setelah perhitungan selesai, dilakukan perancangan sistem secara menyeluruh. Tahap berikutnya adalah analisis perbandingan antara sistem genset diesel dan sistem *photovoltaic*, baik dari segi emisi gas buang maupun konsumsi bahan bakar. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam penarikan kesimpulan mengenai efisiensi dan dampak lingkungan dari masing-masing sistem. Penelitian diakhiri setelah semua tahapan diselesaikan. Gambar flow chart dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flow Chart Penelitian

Kapal *tug boat* 28 meter merupakan salah satu jenis kapal tunda yang menggunakan sumber energi listrik dari generator 3 *phase* sebanyak 2×42 kW dengan mesin Weichai WP4CD66E200. Kapal ini dibangun di bawah pengawasan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan dioperasikan oleh awak kapal sebanyak 10 orang. Gambar kapal bisa dilihat pada Gambar 2:



Gambar 2. Drawing kapal TB 28 meter (tampak samping dan tampak atas)

Ukuran utama kapal meliputi *Length Over All (LOA)* sebesar 28,587 meter dan *Length Between Perpendiculars (LBP)* sebesar 26,204 meter. *Beam (Moulded)* adalah 8,600 meter, sedangkan *Height (Moulded)* mencapai 4,200 meter. Kapal ini memiliki *Draught* sedalam 3,500 meter. Untuk sistem penggerak utama, kapal ini dilengkapi dengan dua unit mesin utama jenis MITSUBISHI S6R2-MTK3L yang masing-masing memiliki daya sebesar 759 kW dan beroperasi pada 1406 RPM. Sebagai pendukung kebutuhan daya listrik di atas kapal, terdapat dua unit generator dengan daya masing-masing sebesar 42 kW, menggunakan mesin Weichai tipe WP4CD66E200. Detail ukuran utama kapal dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran utama kapal Tug Boat 28M

Ukuran Utama	Dimensi
<i>Length Over All (LOA)</i>	28.587 M
<i>Length Between Perpendicular (LBP)</i>	26.204 M
<i>Beam (Moulded)</i>	8.600 M
<i>Height (Moulded)</i>	4.200 M
<i>Draught</i>	3.500 M
<i>Main Engine</i>	2X MITSUBISHI S6R2-MTK3L 759 KW (1030 PS) / 1406 RPM
<i>Generator</i>	2x42 KW Weichai WP4CD66E200

Tabel 2 menampilkan beban listrik kapal tug boat sepanjang 28 meter. Terdiri dari peralatan listrik beserta daya motor (dalam kilowatt), jumlah unit, dan total daya input masing-masing. Total kebutuhan daya listrik utama (Total A) adalah 24,51 kW. Sebagai cadangan, ditambahkan 20% dari total tersebut, yaitu sebesar 4,902 kW, sehingga total kebutuhan listrik keseluruhan (Total B) menjadi 29,41 kW. Nilai ini kemudian dikonversi ke satuan watt, yaitu sebesar 29.412 W. Data ini berguna untuk menentukan kapasitas sistem kelistrikan kapal secara menyeluruh.

Tabel 2. Electrical load Tug Boat 28M

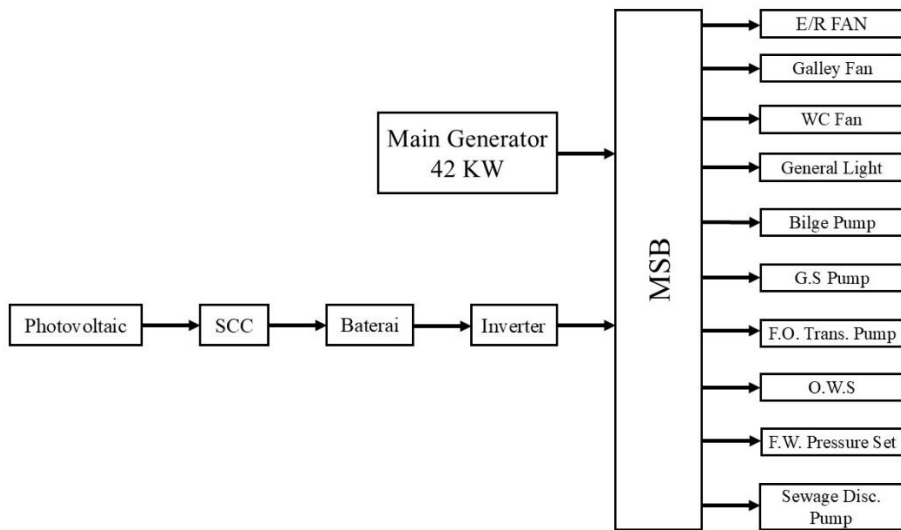
<i>Electrical load Tug Boat 28M</i>			
<i>SERVICE DESCRIPTION</i>	<i>MOTOR KW</i>	<i>TOTAL NO</i>	<i>INPUT KW</i>
<i>GALLEY FAN</i>	0.37	1	0.37
<i>WC FAN</i>	0.37	1	0.37
<i>AIR-CON</i>	0.70	5	3.50
<i>GENERAL LIGHT</i>	3.00	1	3.00
<i>BILGE PUMP</i>	5.50	1	5.50
<i>GENERAL SERVICE PUMP</i>	5.50	1	5.50
<i>F.O. TRANSFER PUMP</i>	2.20	1	2.20
<i>OILY WATER SEPARATOR</i>	0.37	1	0.37
<i>F.W. PRESSURE SET</i>	0.75	1	0.75
<i>S.W. PRESSURE SET</i>	0.75	1	0.75
<i>SEWAGE DISC. PUMP</i>	2.20	1	2.20
TOTAL A			24.51
CADANGAN ENERGI = 20% X TOTAL A			4.902
TOTAL B = TOTAL A+CADANGAN ENERGI			29.41
KW TO W			29412.00

Kapal tug boat 28M menggunakan spesifikasi teknis dari generator tipe WP4CD66E200 dengan daya sebesar 42 kW, diproduksi oleh XINGNUO. Generator ini memiliki kecepatan putaran (rate speed) sebesar 1500 rpm. Konsumsi bahan bakar tercatat sebesar 200 gram per kWh, atau setara dengan 10 liter per jam. Berat kering unit ini adalah 560 kg, dan dimensinya berukuran 1809 x 764 x 1212 mm. Spesifikasi ini menunjukkan bahwa generator tersebut cocok digunakan sebagai sumber daya listrik pada kapal dengan kebutuhan beban menengah. Spesifikasi *genset* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi genset Tug boat 28M

Keterangan	Spesifikasi
Type	WP4CD66E200 42KW XINGNUO
Rate power	42 KW
Rate speed	1500 rpm
Fuel Oil Consumption	200 g/kwh, 10 L/h
Dry weight	560 kg
Dimension	1809x764x1212 mm

Sistem ini adalah sistem kelistrikan *hybrid* yang menggunakan *photovoltaic* untuk mengurangi konsumsi bahan bakar *diesel engine generator*. Energi dari *photovoltaic* akan melewati SCC untuk mengatur arus searah yang menuju ke baterai dan digunakan melalui *inverter* menuju ke Main Switchboard (MSB) untuk disalurkan menuju ke *electrical load* pada kapal. Jika kebutuhan listrik melebihi kapasitas dari baterai atau saat kondisi cuaca tidak mendukung, generator utama akan menyuplai listrik ke MSB dan seluruh beban. Sistem ini meningkatkan efisiensi, mengurangi emisi, dan mendukung keberlanjutan energi. Sistem *hybrid* yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perencanaan wiring diagram

Photovoltaic berfungsi mengubah radiasi cahaya matahari menjadi energi Listrik [12]. Energi Listrik yang dihasilkan oleh *photovoltaic* akan terus meningkat tergantung pada intensitas radiasi matahari yang diterima. Efektifitas sinar matahari mengenai *photovoltaic* diasumsikan dalam satu hari rata-rata 5 jam [13]. Penentuan jumlah *photovoltaic* yang akan dirancang perlu diketahui terlebih dahulu luas area yang akan digunakan dan luas area *photovoltaic*. Untuk menentukan luas area yang akan digunakan dan jumlah energi *photovoltaic* yang akan di pasang digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{NPS} = \frac{\text{Luas area yang digunakan}}{\text{Luas area photovoltaic}} \quad (1)$$

$$\text{Energi photovoltaic (Ah)} = \frac{\text{Daya modul (Wp)} \times 5 \text{ Jam}}{\text{Tegangan (Vm)}} \quad (2)$$

$$\text{Total energi photovoltaic (Ah)} = \text{Energi photovoltaic} \times \text{Jumlah photovoltaic} \quad (3)$$

Dalam perencanaan sistem *hybrid* pada kapal *tug boat* 28M dipilih *photovoltaic* jenis mono crystalline. *photovoltaic* ini memiliki daya maksimum sebesar 455 Wp. Tegangan maksimum (Vm) adalah 34,8 V, dengan arus maksimum (Im) sebesar 13,02 A. Tegangan saat tidak berbeban (Voc) mencapai 41,6 V, sementara arus hubung singkat (Isc) adalah 13,73 A. Dimensi panel adalah 1909 x 1134 x 35 mm, dan panel ini dapat beroperasi pada suhu antara -40 hingga +85°C. Spesifikasi ini menunjukkan bahwa panel cocok digunakan untuk instalasi tenaga surya dengan efisiensi dan ketahanan suhu yang baik. Spesifikasi *photovoltaic* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi *photovoltaic*

Keterangan	Spesifikasi
Model	TOMMATECH 455 120PM10
Daya modul (Wp)	455
Tegangan max (Vm)	34.8
Arus max (Im)	13.02
Tegangan beban (Voc)	41.6
Arus hubungan singkat (Isc)	13.73
Dimensi	1909x1134x35 mm
Suhu ketika beroperasi	40 ~ +85°C

SCC digunakan untuk mengatur arus searah yang diisikan ke baterai dan diambil dari baterai menuju ke *Electrical load* [14]. Total daya *photovoltaic* dihitung dengan mengalikan daya satu modul *photovoltaic* (W_p) dengan jumlah unit *photovoltaic* yang digunakan. Kapasitas SCC dalam satuan ampere (A) ditentukan dengan membagi total daya *photovoltaic* yang telah dikalikan dengan faktor keamanan terhadap tegangan modul *photovoltaic* (V_m). Untuk menentukan jumlah SCC yang akan dipasang, digunakan persamaan sebagai berikut [15]:

$$\text{Total daya photovoltaic} = \text{Daya photovoltaic (wp)} \times \text{jumlah photovoltaic} \quad (4)$$

$$\text{kapasitas SCC (A)} = \frac{\text{Total daya photovoltaic} \times \text{faktor keamanan}}{\text{Tegangan photovoltaic (Vm)}} \quad (5)$$

Untuk mendukung sistem *hybrid* pada kapal *tug boat* 28M dipilih SCC jenis *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. SCC mendukung tegangan baterai 12/24/48 V dengan fitur auto select. Arus pengisian maksimum (rated charge current) adalah 70 A, dan daya nominal dari *photovoltaic* pada tegangan 48 V mencapai 4000 W. Arus maksimum dari panel yang dapat diterima adalah 35 A, dengan efisiensi maksimum mencapai 99%. Dimensi alat ini adalah 215 x 250 x 95 mm, menjadikannya kompak dan efisien untuk sistem tenaga surya berkapasitas menengah hingga besar. Spesifikasi SCC dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi SCC

Keterangan	Spesifikasi
Type	SmartSolar MPPT 250/70
Baterai voltage	12/24/48 V Auto Select
Rated charge current	70 A
Nominal PV power, 48 V	4000 W
Max Panel Current	35 A
Maximum efficiency	99%
Dimensions	215 x 250 x 95 mm

Kapasitas baterai mengacu pada jumlah muatan listrik yang dapat disuplai oleh baterai pada tegangan nominalnya. Kapasitas ini biasanya diukur dalam satuan ampere-hours (Ah) atau milliampere-jam (mAh). Pada penelitian ini, baterai yang digunakan adalah baterai berjenis $LiFePO_4$ yang dihubungkan secara paralel. Untuk menentukan jumlah baterai yang akan dipasang, digunakan persamaan sebagai berikut [16]:

Keterangan:

$$C = \frac{E}{\text{DoD} \times \eta \times V_s} \quad (6)$$

$C =$ kapasitas baterai yang dibutuhkan (Ah)
 $E =$ energi yang dibutuhkan dalam Wh (watt-hour)
 $\text{DoD} =$ *depth of discharge* (%)
 $\eta =$ efisiensi baterai dan inverter (%)
 $V_s =$ tegangan baterai (Volt)

Waktu pengisian diperlukan karena baterai tidak dapat terisi secara instan dan harus mengikuti kapasitas serta arus masuk yang tersedia. Energi dari *photovoltaic* terbatas dan dipengaruhi oleh cuaca serta efisiensi sistem. Perhitungan waktu pengisian membantu menjaga umur baterai, mencegah kerusakan, serta memastikan ketersediaan daya sesuai kebutuhan. Untuk menghitung berapa lama baterai dapat terisi penuh, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Waktu pengisian} = \frac{C}{\text{Total energi photovoltaic (Ah)} \times \text{Efisiensi}} \quad (7)$$

Dalam perencanaan sistem *hybrid* pada kapal *tug boat* 28M dipilih baterai jenis *Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)*. Spesifikasi teknis baterai yang di gunakan tipe XPD-12400 12V 400Ah. Baterai memiliki tegangan sebesar 12,8 V dan kapasitas 400 Ah, dengan arus pengosongan (discharge) dan arus pengisian maksimum masing-masing sebesar 40 A. Efisiensi baterai mencapai 90%, dengan usia pakai atau siklus penggunaan hingga 10 tahun. Baterai dirancang untuk beroperasi pada suhu maksimum 50°C, dan memiliki dimensi fisik 590 x 310 x 300 mm. Spesifikasi baterai dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Spesifikasi Baterai

Keterangan	Spesifikasi
Type	XPD-12400 12V 400 Ah
Tegangan	12.8 V
Kapasitas	400 Ah
Arus discharge	40 A
Arus Pengisian Maximum	40 A
Efisiensi Battery	90%
Siklus/umur	10 Tahun
Suhu ketika beroperasi	50 °C
Dimension	590x310x300 mm

Dalam sistem *hybrid*, inverter digunakan untuk mengonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) agar daya yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban. W_{max} adalah daya puncak beban dalam satuan watt, yaitu kebutuhan daya tertinggi dari seluruh peralatan yang digunakan secara bersamaan. 25% W_{max} merupakan cadangan daya yang ditambahkan untuk mengantisipasi lonjakan arus saat starting atau saat alat pertama kali dinyalakan. Untuk menentukan kapasitas inverter yang digunakan persamaan sebagai berikut [17]:

$$\text{Kapasitas inverter} = \frac{W_{max} + (25\% \times W_{max})}{\text{Daya inverter}} \quad (8)$$

Keterangan :

W_{max} = Daya puncak beban (watt)

25% = Daya cadangan untuk memenuhi kebutuhan starting alat

Dalam perencanaan sistem *hybrid* pada kapal *tug boat* 28M dipilih *inverter* Victron energy. Pemilihan didasarkan pada tingginya efisiensi pada inverter, dan mampu menstabilkan tegangan listrik. Inverter menerima input voltage dalam rentang 38–66 VDC dan menghasilkan tegangan keluaran sebesar 230 VAC. Daya output yang mampu disuplai oleh inverter ini adalah 4500 W, dengan frekuensi kerja 50 Hz dan efisiensi tinggi mencapai 97%. Dimensi fisik inverter ini adalah 425 x 440 x 125 mm, yang menunjukkan desain cukup ringkas untuk daya sebesar itu. Spesifikasi inverter dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Spesifikasi Inverter

Keterangan	Spesifikasi
Model	Victron Energy Inverter RS 48/6000 Smart
Input Voltage	38 – 66 VDC
Output	230 VAC
Output power	4500 W
Frekuensi	50 Hz
Efisiensi	97%
Dimensions	425 x 440 x 125 mm

Perhitungan perkiraan konsumsi bahan bakar *diesel engine generator* dianalisis dengan menggunakan persamaan (9). SFOC merupakan Specific Fuel Oil Consumption, P adalah daya generator dalam kilowatt (kW), dan t adalah waktu berlayar dalam jam. Perkiraan konsumsi bahan bakar menjadi acuan untuk menghitung perbandingan persentase bahan bakar pada sistem *diesel engine generator* dengan sistem *hybrid* yang akan dirancang [18].

$$Fuel\ consumption = SFOC \times BHP \times t \quad (9)$$

Keterangan :

$SFOC$ = *Specific Fuel Oil Consumption* (g/Kwh)

BHP = Daya Generator (Kw)

t = Waktu berlayar (jam)

Karbon dioksida (CO₂) adalah gas yang terdiri dari satu atom karbon dan dua atom oksigen. Nitrogen oksida (NO_x) adalah kelompok gas yang ada di udara, terutama berupa nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂). Sulfur oksida (SO_x) adalah gas-gas yang berasal dari belerang, terutama sulfur dioksida (SO₂) dan sulfur trioksida (SO₃). Particulate matter (PM) adalah partikel kecil yang ada di udara, bisa berupa debu atau asap. Sebagian bisa terlihat, tapi ada juga yang sangat kecil dan hanya bisa dilihat dengan mikroskop. Partikel berasal dari banyak sumber seperti *diesel engine generator* pada kapal [19]. Perhitungan emisi gas buang pada sistem *diesel engine generator* dengan sistem *hybrid* menggunakan rumus persamaan sebagai berikut:

$$CO_2 = \text{Konsumsi bahan bakar} \times \text{faktor emisi} \quad (\text{kg } CO_2/\text{kg bahan bakar}) \quad (10)$$

$$NO_x = \text{Konsumsi bahan bakar} \times \text{faktor emisi} \quad (\text{kg } NO_x/\text{kg bahan bakar}) \quad (11)$$

$$SO_x = \text{Konsumsi bahan bakar} \times \text{faktor emisi} \quad (\text{kg } SO_x/\text{kg bahan bakar}) \quad (12)$$

$$PM = \text{Konsumsi bahan bakar} \times \text{faktor emisi} \quad (\text{kg } PM/\text{kg bahan bakar}) \quad (13)$$

Faktor emisi merupakan nilai yang menghubungkan jumlah polutan yang dilepaskan ke atmosfer dengan konsumsi bahan bakar. Pada penelitian ini, faktor emisi yang digunakan mengacu pada standar internasional seperti MARPOL Annex VI dan IMO Tier II, dengan nilai CO₂ sebesar 2,68 kg CO₂ per kg bahan bakar, NO_x sebesar 0,077 kg per kWh, SO_x sebesar 0,02 kg per kg bahan bakar, dan PM sebesar 0,002 kg per kWh. Nilai-nilai ini merefleksikan emisi dari pembakaran bahan bakar diesel dengan kandungan sulfur rendah dan sesuai dengan regulasi lingkungan yang berlaku untuk mesin kapal atau mesin bergerak lainnya. Data faktor emisi dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Faktor Emisi

Jenis Emisi	Faktor Emisi
CO ₂ =	2,68 kg CO ₂ /kg bahan bakar
NO _x =	0,077 kg NO _x /kg bahan bakar (MARPOL Annex VI) [20]
SO _x =	0,02 kg SO _x /kg bahan bakar
PM =	0,002 kg PM/kg bahan bakar (IMO Tier II)

3 Analisa Data dan Pembahasan



Gambar 4. Isometric peletakan photovoltaic

Lokasi penempatan *photovoltaic* berada di *wheelhouse top* dengan mempertimbangkan luas area yang tersedia, dimensi *photovoltaic* yang digunakan, keselamatan Anak Buah Kapal (ABK), dan ketersediaan *maintenance space*. Peletakan *photovoltaic* dapat dilihat pada Gambar 4.

3.1 Perhitungan Kapasitas Photovoltaic

Pada Gambar 4, luas area perencanaan untuk peletakan *photovoltaic* adalah sebesar 54.247.571,40 mm², sedangkan luas total *photovoltaic* yang direncanakan adalah 2.164.806 mm². Berdasarkan Persamaan (1), jumlah *photovoltaic* yang akan dirancang pada kapal tug boat 28 meter dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{NPS} = \frac{\text{Luas area yang digunakan}}{\text{Luas area photovoltaic}} = \frac{54.247.571,40}{2.164.806} = 25 \text{ unit}$$

Modul *photovoltaic* dengan kapasitas daya sebesar 455 Wp yang beroperasi selama 5 jam dan memiliki tegangan keluaran sebesar 34,8 volt akan menghasilkan energi sebesar 65,37 Ah. Berdasarkan perhitungan menggunakan Persamaan (2), energi listrik yang dihasilkan oleh sistem *photovoltaic* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Energi photovoltaic (Ah)} = \frac{\text{Daya modul (Wp)} \times 5 \text{ Jam}}{\text{Tegangan (Vm)}} = \frac{455 \times 5}{34,8} = 65,37 \text{ Ah}$$

Untuk menghitung total energi *photovoltaic* (Ah) maka energi *photovoltaic* (Ah) dikalikan dengan jumlah *photovoltaic*. *Photovoltaic* yang digunakan sebanyak 25 unit dan dari perhitungan energi *photovoltaic* didapatkan daya 1 unit *photovoltaic* sebesar 65,37 Ah, maka total energi *photovoltaic* yang akan dirancang dapat dihitung dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$\text{Total energi photovoltaic (Ah)} = \text{Energi photovoltaic} \times \text{Jumlah photovoltaic} = 65,37 \times 25 = 1.634,34 \text{ Ah}$$

Untuk menghitung daya *photovoltaic* (watt) maka daya *photovoltaic* (wp) dikali jumlah *photovoltaic* yang akan dipasang. Dengan daya 1 unit *photovoltaic* sebesar 455 wp, dan jumlah unit *photovoltaic* yang akan di pasang pada kapal *tug boat* 28M sebanyak 25 unit, maka dengan persamaan (4) didapatkan total daya *photovoltaic* yang akan dipasang sebagai berikut:

$$\text{Total daya photovoltaic} = \text{Daya photovoltaic (wp)} \times \text{jumlah photovoltaic} = 455 \times 25 = 11.375 \text{ Watt-hour}$$

3.2 Perhitungan Kapasitas SCC

Berdasarkan hasil perhitungan total daya *photovoltaic*, total daya dari sistem *photovoltaic* adalah sebesar 11.375 watt. Untuk menentukan kapasitas *Solar Charge Controller* (SCC) yang dibutuhkan, total daya *photovoltaic* tersebut dikalikan dengan faktor keamanan sebesar 1,25, kemudian dibagi dengan tegangan sistem *photovoltaic* sebesar 34,8 volt (Vm). Berdasarkan hasil dari perhitungan kebutuhan kapasitas SCC didapatkan total kapasitas SCC sebesar 408,58 A, Spesifikasi SCC yang akan dipasang sebesar 70 A. Untuk mencapai total kapasitas SCC, maka SCC yang akan dipasang yaitu sebanyak 6 unit. Kapasitas SCC dapat dihitung menggunakan Persamaan (5) berikut:

$$\text{kapasitas SCC (A)} = \frac{\text{Total daya photovoltaic} \times \text{faktor keamanan}}{\text{Tegangan photovoltaic (Vm)}} = \frac{11.375 \times 1,25}{34,8} = 408,58 \text{ A}$$

3.3 Perhitungan Kapasitas Baterai

Agar baterai dapat beroperasi secara normal dan memiliki umur pakai yang optimal, kapasitas energi yang digunakan tidak boleh melebihi 20%. Sehingga, batas *Depth of Discharge* yang disarankan adalah sebesar 80% dari total kapasitas baterai 100%. Dengan menggunakan persamaan (6) didapatkan kapasitas arus minimum baterai yang dibutuhkan sebagai berikut:

$$C = \frac{E}{\text{DoD} \times \eta \times \text{vs}} = \frac{29412}{80\% \times 90\% \times 12,8} = 3.191,41 \text{ Ah}$$

3.4 Perhitungan Waktu Pengisian Baterai

Berdasarkan hasil perhitungan kapasitas baterai (Ah), diperoleh kebutuhan kapasitas baterai minimum sebesar 3.191,41 Ah. Oleh karena itu, digunakan baterai dengan kapasitas 400 Ah sebanyak 8 unit yang disusun secara paralel, sehingga total kapasitas arus baterai menjadi 3.200 Ah. Untuk menghitung waktu pengisian baterai, digunakan Persamaan (7), di mana total kapasitas baterai sebesar 3.200 Ah dibagi dengan total energi yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik sebesar 1.634,34 Ah, kemudian dikalikan dengan efisiensi sistem sebesar 80%. Dari perhitungan tersebut, diperoleh waktu pengisian baterai selama 2,4 jam.

$$\text{Waktu pengisian} = \frac{C}{\text{Total energi photovoltaic (Ah)} \times \text{Efisiensi}} = \frac{3.200}{1.634,34 \times 80\%} = 2,4 \text{ jam}$$

3.5 Perhitungan Waktu Operasional Sistem Hybrid

Dari perhitungan waktu pengisian baterai didapatkan waktu 2,4 jam untuk mengisi daya dari *photovoltaic* ke baterai dalam kondisi cuaca normal. Untuk menghitung waktu operasional sistem *hybrid* dengan menggunakan persamaan (14), maka kapasitas baterai 3.200 Ah dikali dengan tegangan 12,8 v dikali dengan efisiensi 80%, dibagi dengan electrical load 29,412 kwh, total waktu operasional kapal sistem *hybrid* sebagai berikut:

$$\text{Waktu operasional} = \frac{\text{kapasitas baterai (ah)} \times V \times 80\%}{\text{Electrical load (kw)}} = \frac{3200 \times 12,8 \times 80\%}{29.412} = 1 \text{ jam } 7 \text{ menit} \quad (14)$$

3.6 Perhitungan Kapasitas Inverter

Untuk menghitung kapasitas *inverter*, digunakan Persamaan (8) dengan mempertimbangkan daya puncak sebesar 29.412 W ditambah 25% dari daya puncak, yaitu sebesar 7.353 W. Total daya sebesar 36.765 W tersebut kemudian dibagi dengan kapasitas satu unit inverter sebesar 4.500 W. Berdasarkan perhitungan tersebut, jumlah inverter yang dibutuhkan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas inverter} = \frac{W_{\max} + (25\% \times W_{\max})}{\text{Daya inverter}} = \frac{29.412 + (25\% \times 29.412)}{4.500} = 8 \text{ unit}$$

3.7 Peletakan SCC dan Baterai

SCC dan baterai ditempatkan di ruang mesin (*engine room*) pada sisi *starboard*. Penempatan tersebut mempertimbangkan kemudahan dalam pengoperasian, ketersediaan ruang, serta aksesibilitas untuk keperluan perawatan (*maintenance space*). Tata letak SCC dan baterai ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Isometric peletakan SCC dan Baterai

3.8 Peletakan *Inverter*

Inverter diposisikan di ruang mesin (*engine room*) berdekatan dengan *Main Switchboard (MSB)* pada kapal. Penempatan ini bertujuan untuk mempermudah proses pengoperasian, pemantauan sistem, perakitan kabel tray, serta memberikan ruang yang memadai untuk keperluan perawatan. Tata letak *inverter* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Isometric *Inverter*

3.9 Perhitungan Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar

Dengan menggunakan persamaan (9) didapatkan perbandingan konsumsi bahan bakar pada sistem *diesel engine generator* dalam 1 jam sebesar 8.400 g, konsumsi bahan bakar dalam 1 hari sebesar 201.600 g, konsumsi bahan bakar dalam 1 bulan sebesar 6.048.000 g. Konsumsi bahan bakar pada sistem *Hybrid* didapatkan konsumsi bahan bakar dalam 1 jam sebesar 8.400 g, konsumsi bahan bakar dalam 1 hari sebesar 184.800 g, konsumsi bahan bakar dalam 1 bulan sebesar 5.544.000 g. Dari hasil tersebut maka dikonversikan dari gram ke kg, sehingga didapatkan hasil perbandingan bahan bakar pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan Konsumsi bahan bakar

Sistem <i>diesel engine generator</i>			Sistem <i>Hybrid</i>		
Fuel consumption 1 jam	=	8,4 kg	Fuel consumption 1 jam	=	8,4 kg
Fuel consumption 1 hari	=	201,6 kg	Fuel consumption 1 hari	=	184,8 kg
Fuel consumption 1 Bulan	=	6.048 kg	Fuel consumption 1 Bulan	=	5.544 kg

Dari Tabel 9 dapat dilihat perbandingan konsumsi bahan bakar *diesel engine generator* dan konsumsi bahan bakar dengan menggunakan sistem *hybrid*. Untuk menghitung persentase perbandingan konsumsi bahan bakar dengan menggunakan persamaan (15), maka konsumsi bahan bakar sistem *diesel* sebesar 6.048 kg/bulan, dikurangi dengan konsumsi bahan bakar sistem *hybrid* sebesar 5.544 kg/bulan dibagi dengan konsumsi bahan bakar sistem *diesel* sebesar 6.048 kg/bulan dikali dengan 100% didapatkan persentase pengurangan konsumsi bahan bakar sebagai berikut:

$$\text{Persentase bahan bakar} = \frac{\text{Fuel konsumsi sistem diesel} - \text{fuel konsumsi sistem hybrid}}{\text{Fuel konsumsi sistem diesel}} \times 100\% = \frac{6.048 - 5.544}{6.048} \times 100\% = 8,33\% \quad (15)$$

3.10 Perhitungan Perbandingan Emisi

Hasil dari emisi gas buang pada sistem *diesel engine generator* didapatkan CO₂ sebesar 16.208,64 kg CO₂/bulan, NO_x sebesar 456,696 kg/bulan, SO_x sebesar 120,96 kg/bulan, PM sebesar 12,48 kg/bulan. Untuk Hasil dari emisi gas buang pada sistem *hybrid* didapatkan CO₂ sebesar 14.857,92 kg CO₂/bulan, NO_x sebesar 426,888 kg/bulan, SO_x sebesar 110,88 kg/bulan, PM sebesar 11,088 kg/bulan. Maka perbandingan emisi pada sistem *diesel engine generator* dan sistem *hybrid* adalah CO₂ sebesar 1350,72 kg/bulan, NO_x sebesar 29,808 kg/bulan, SO_x sebesar 10,08 kg/bulan, dan PM sebesar 1,392 kg/bulan. Detail perbandingan konsumsi bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan emisi gas buang

Sistem <i>diesel engine generator</i>	Sistem <i>hybrid</i>
CO ₂ = 6.408 × 2,68 = 16.208,640 kg CO ₂ /bulan	CO ₂ = 5.544 × 2,68 = 14.857,92 kg CO ₂ /bulan
No _x = 6.408 x 0,077 = 456,696 kg NO _x /bulan	No _x = 5.544 x 0,077 = 426,888 kg NO _x /bulan
SO _x = 6.408 × 0,02 = 120,96 kg SO _x /bulan	SO _x = 5.544 × 0,02 = 110,88 kg SO _x /bulan
PM = 6.408 x 0,002 = 12,48 kg PM/bulan	PM = 5.544 x 0,002 = 11,088 kg PM/bulan

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang sistem pembangkit listrik hybrid yang menggabungkan photovoltaic dengan diesel engine generator berbahan bakar diesel pada kapal tug boat 28M. Sistem yang dirancang terdiri atas 25 unit photovoltaic monocrystalline dengan total daya 11.375 W, 8 unit baterai LiFePO₄ dengan total kapasitas 3.200 Ah, 6 unit SCC dengan total kapasitas 420 A, dan 8 unit inverter berdaya total 36.000 W. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem hybrid ini mampu mengurangi konsumsi bahan bakar bulanan dari 6.405 L menjadi 5.871 L, atau setara dengan penghematan sebesar 8,33%. Pengurangan konsumsi bahan bakar ini berdampak langsung terhadap penurunan emisi gas buang, yakni CO₂ sebesar 1.430,39 kg per bulan, NO_x sebesar 41,1 kg per bulan, SO_x sebesar 10,67 kg per bulan, dan PM sebesar 1,07 kg per bulan. Penempatan komponen sistem dilakukan dengan memperhatikan aspek keselamatan, kemudahan perawatan, serta efisiensi ruang di atas kapal, di mana photovoltaic dipasang pada wheelhouse top, sedangkan baterai, SCC, dan inverter diletakkan di ruang mesin. Meskipun penelitian ini telah mencapai tujuan utama dan memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi energi dan pengurangan emisi pada kapal tug boat 28M, terdapat beberapa batasan yang perlu dicatat. Penelitian ini belum mencakup aspek biaya pemasangan dan keekonomian sistem, tidak melakukan analisis kekuatan dan ketahanan komponen terhadap kondisi operasional kapal, serta tidak melibatkan simulasi teknis menggunakan software. Selain itu, pengaruh sistem terhadap stabilitas dan keselamatan kapal secara keseluruhan belum dianalisis. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bersifat konseptual dan dapat dijadikan dasar untuk studi lanjutan yang lebih komprehensif dan aplikatif. Secara keseluruhan, rancangan sistem hybrid ini dinilai layak secara teknis untuk diterapkan pada kapal tug boat 28M sebagai upaya mendukung efisiensi operasional dan transisi menuju penggunaan energi bersih di sektor transportasi laut.

5 Daftar Pustaka

- [1] CLIMATE TRANSPARENCY REPORT, “PER CAPITA GREENHOUSE GAS (GHG) EMISSIONS BELOW G20 AVERAGE RECENT DEVELOPMENTS,” 2022.
- [2] (RWS), “Genjot Penurunan Emisi, Kementerian/Lembaga dan Pemerintah Daerah Harus Lakukan Konservasi Energi,” Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/artikel/berita/genjot-penurunan-emisi-kementerianlembaga-dan-pemerintah-daerah-harus-lakukan-konservasi-energi>
- [3] Timothy Andromeda Saragih, “Desain Konseptual Hybrid Engine System pada Kapal Tugboat 1636 HP dengan Kombinasi Diesel Engine dan Electric Motor Yang di Suplai Tenaga Baterai,” 2020, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [4] I. M. A. Nugraha, “Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Sumber Energi Pada Kapal Nelayan: Suatu Kajian Literatur,” *JURNAL SUMBERDAYA AKUATIK INDOPASIFIK*, vol. 4, no. 2, p. 101, Nov. 2020, doi: 10.46252/jsai-fpik-unipa.2020.vol.4.no.2.76.
- [5] DS New Energi, “Sistem Solar PV dan Diesel Hybrid.” Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://id.dsnsolar.com/info/solar-pv-and-diesel-hybrid-system-49614061.html>
- [6] Riszky Irvana, “OPTIMASI DESAIN KAPAL IKAN MONOHULL MENJADI DEMIHULL

- HYBRID (DIESEL-SOLAR PV),” Aug. 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/364600392>
- [7] M. Nuran, M. Bayraktar, and O. Yuksel, “Simulation of a Hybrid Propulsion System on Tugboats Operating in the Strait of Istanbul,” *Sustainability*, vol. 17, no. 13, p. 5834, Jun. 2025, doi: 10.3390/su17135834.
- [8] P. Asri *et al.*, “DESAIN HYBRID PANEL SURYA dan GENERATOR SET PADA KAPAL IKAN PESISIR SELATAN JAWA,” vol. 12, no. 1, 2022.
- [9] D. Cahyagi, N. Abdurrahman, J. A. Siregar, and R. Ferdinand, “Simulation of Solar Energy Harvesting on a 25-Meter Electric Passenger Ferry,” 2025.
- [10] R. Xin, Z. Wang, J. Zhai, J. Zhang, D. Cui, and Y. Ji, “Simulation of Design and Operation of a Hybrid PV (Photovoltaic)/PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)/Battery Power System for a Tugboat,” in *Advances in Transdisciplinary Engineering*, IOS Press BV, Oct. 2023, pp. 250–262. doi: 10.3233/ATDE230297.
- [11] P. Pratama and M. Danil Arifin, “Photovoltaic-Based Electric Tourist Boat Design to Support Island Tourism at the Labuan Bajo,” 2023.
- [12] HILMANSYAH DWI TAMAPUTRA, “ANALISA WAKTU PENGISIAN BATERAI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA BENDUNGAN JATIBARANG KOTA SEMARANG,” 2023.
- [13] R. A. Setiawan *et al.*, “Maret 2025 e-ISSN: 3031-349X,” *Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 3, no. 2, pp. 11–26, 2025, doi: 10.61132/jupiter.v3i2.778.
- [14] A. N. Agus, “DESAIN SOLAR CHARGE CONTROLLER METODE FPPT ATAU PELACAKAN PENGISIAN DAYA PENUH UNTUK PANEL PV DAN POWER STATION PORTABEL,” *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 10, no. 1, pp. 135–145, Aug. 2024, doi: 10.56521/teknika.v10i1.1232.
- [15] Noor Hajir, “Noor Hajir, Muhamad Haddin, dan Agus Suprajitno Analisa Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap dengan Sistem Hybrid di PT. Koloni Timur,” 2022.
- [16] R. Rahman, S. Karim, and P. T. Elektro, “Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Offgrid Untuk Rumah Tinggal di Kota Banjarbaru,” 2020.
- [17] Dhea Sugiyanti, “RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA SOLAR HOME SYSTEM DENGAN KAPASITAS 100 WP UNTUK PENGISIAN DAYA PERANGKAT ELEKTRONIK,” *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, Jul. 2024, doi: 10.30596/rele.v7i1.20463.
- [18] RIZQY ILHAM TIRTHANA, “ESTIMASI KONSUMSI BAHAN BAKAR GENSET 1500 KVA TERHADAP PERUBAHAN BEBAN PADA RUMAH SAKIT ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG,” 2023.
- [19] Salman Alfarisi and Agung Zuhdi Muhammad Fatallah, “Menghitung Emisi Gas Buang pada Kapal Nelayan Kelurahan Brondong Kabupaten Lamongan Provinsi Jawa Timur,” 2020.
- [20] Dr Zabi Bazari REMPEC Consultant, “MARPOL Annex VI-Prevention of Air Pollution from Ships National Workshop (virtual) on Ratification and Effective Implementation of MARPOL Annex VI for Algeria,” 2020.