

Analisis Emisi dan Ekonomi Pemanfaatan Gas Alam Terkompresi sebagai Bahan Bakar Alternatif Feri

RORO-Penumpang di Sungai Niger

Muhammad Regie^{*1}, Insan Kamil^{*}, Nurman Pamungkas^{*}

^{*}Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: m.regie2003@gmail.com

Abstrak

Saat ini, pemanfaatan energi fosil cair secara berkelanjutan, seperti diesel dan bensin, dapat berdampak signifikan terhadap kebersihan lingkungan, terutama di lingkungan maritim. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keluaran emisi gas rumah kaca (GRK) dan ekonomi berupa *net present cost* (NPC) dan *cost of energy* (COE) dari pemanfaatan gas alam terkompresi (*compressed natural gas* atau CNG) sebagai bahan bakar alternatif pada konsep feri RORO-penumpang di Sungai Niger. Metodologi yang digunakan berupa pengumpulan data berdasarkan studi literatur dan perhitungan secara kuantitatif-analitis, serta *HOMER Pro* dilibatkan sebagai alat simulasi untuk menguji performa sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan CNG menawarkan keunggulan berupa rendahnya emisi CO₂, materi partikulat, SO₂, dan NO_x yang terbentuk dibandingkan dengan pemanfaatan diesel. Namun demikian, emisi CO dan UHC yang terbentuk cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan pemanfaatan diesel. Selain itu, nilai NPC dan COE pada setiap kelipatan 5% dari variasi beban generator dapat meningkat, dengan median sebesar 2,46%, yang disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu asumsi kenaikan harga CNG dan suku cadang tahunan serta meningkatnya konsumsi bahan bakar CNG seiring meningkatnya kelipatan variasi beban minimum generator.

Kata Kunci: Emisi, NPC, COE, Alternatif, CNG, HOMER Pro

Abstract

Nowadays, the sustainability of liquid fossil energy usage, such as diesel and petrol, significantly affects the environment, particularly in maritime settings. This research primarily aims to analyse the greenhouse gas (GHG) emissions produced and the economic factors, such as net present cost (NPC) and cost of energy (COE), associated with utilising compressed natural gas (CNG) as an alternative fuel for the RORO-passenger ferry concept on the Niger River. The methodology includes gathering data through literature reviews and performing quantitative analytical calculations, with the HOMER Pro simulation tool used to assess system performance. The findings suggest that using CNG presents a benefit of reduced emissions of CO₂, particulate matter, SO₂, and NO_x compared to diesel fuel. However, the CO and UHC emissions are generally higher compared to diesel fuel. Furthermore, the NPC and COE for each 5% increase in the generator's minimum load ratio could rise by a median of 2.46%, attributed to two major factors: the assumption of annual increases in CNG fuel and spare parts costs, as well as the corresponding rise in CNG fuel consumption linked to the higher minimum load ratio of the generator.

Keywords: Emissions, NPC, COE, Alternative, CNG, HOMER Pro

1 Pendahuluan

Saat ini, energi fosil cair menjadi ‘bahan pokok’ utama bagi propulsi mekanis dan pembangkit listrik di sektor maritim dan perairan pedalaman. Di sisi lain, pemanfaatan energi fosil cair secara berkelanjutan berdampak pada kebersihan lingkungan. Sektor maritim telah menyumbang emisi karbon dioksida (CO₂) sekitar 3% dari emisi gas rumah kaca (GRK) global [1]. Sebagai hasilnya, *International Maritime Organization* (IMO) telah memprediksi bahwa emisi akan melonjak sebesar 250% pada tahun 2050 jika tidak ada tindakan lebih lanjut untuk menanggulangi emisi global [2].

Nigeria merupakan salah satu negara penghasil minyak bumi dan gas (migas) terbesar di Benua Afrika. Pada tahun 2022, Nigeria memproduksi rata-rata 1,2 juta barel minyak per hari dan pernah memproduksi 300 barel kondensat per hari [3]. Lebih lanjut, cadangan migas di Nigeria secara kasar diperkirakan mencapai 37 miliar barel dan 206 triliun kaki kubik (*trillion cubic feet* atau tcf). Posisi ini telah membantu Nigeria memperoleh pengakuan sebagai negara dengan cadangan minyak terbesar ke-10 dan cadangan gas terbesar ke-8 di dunia [4]. Namun demikian, penting untuk menyatakan bahwa ada urgensi dalam mengembangkan potensi energi alternatif secara berkelanjutan, mengingat energi fosil cair seperti bensin menjadi sumber energi utama bagi sektor perekonomian dan transportasi di Nigeria. Konsumsi bensin di Nigeria dalam sehari dapat mencapai 50 juta liter, dengan mayoritasnya dikonsumsi oleh sektor transportasi [5].

Energi fosil berbasis metana, seperti gas alam yang dikompresi (*Compressed Natural Gas* atau CNG) dan gas alam yang dicairkan (*Liquefied Natural Gas* atau LNG), memiliki kandungan metana (CH₄) yang tinggi. Terkait emisi yang dihasilkan, reaksi pembakaran gas alam dapat mengurangi pembentukan CO₂, karbon monoksida (CO), hidrokarbon yang tidak terbakar sempurna (*unburned hydrocarbon* atau UHC), dan nitrogen oksida (NO_x) masing-masing sebesar 20-25%, 34%, 79%, dan 29% dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya [6][7]. Hal ini disebabkan oleh karakteristik CH₄ yang memiliki satu atom karbon dibandingkan dengan solar (C₁₅H₃₄) dan bensin (C₈H₁₈) [6], dengan Persamaan (1) dan (2) yang masing-masing menunjukkan reaksi pembakaran secara ideal, dan pembakaran kurang sempurna yang membentuk CO. Umumnya, CNG disimpan dan didistribusikan dalam bentuk tangki bejana silinder bertekanan 20,6 MPa dan memiliki nomor oktana sekitar 130, sehingga mesin dengan rasio kompresi sampai dengan 16:1 dapat dijalankan tanpa mengalami ketukan (*knocking*) [6].



Namun demikian, setiap jenis bahan bakar tidak terlepas dari kekurangan, terutama gas alam seperti CNG. Penelitian yang telah dilakukan oleh Das dkk. [8] menjabarkan bahwa performa CNG dapat menurunkan nilai *brake thermal efficiency* (BTE) dibandingkan dengan hidrogen pada variasi kecepatan mesin, dengan masing-masing nilai BTE sebesar 27,59% dan 31,19%. Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai kalor terendah yang signifikan, dengan CNG memiliki nilai kalor terendah sebesar 44,24 MJ/kg dan hidrogen sebesar 119,93 MJ/kg. Performa CNG juga dapat menurunkan nilai *brake power* (BP) yang dihasilkan pada seluruh rentang kecepatan mesin dengan rata-rata 19,25% dan 10,86% lebih rendah dibandingkan dengan bensin pada masing-masing posisi *throttle* 50% dan 80% [9]. Hal ini disebabkan oleh adanya perpindahan udara oleh gas alam dan kecepatan nyala api yang lambat pada karakteristik CNG di dalam ruang pembakaran dibandingkan dengan bensin.

Gabbar dkk. [10] meneliti pemanfaatan *Nuclear-Hybrid Renewable Energy System* (NH-RES) sebagai bahan bakar maritim yang dipasang pada kapal *Baltic Sunrise* sebagai studi kasus, dengan metode kuantitatif-analitis disertai simulasi pada perangkat lunak *HOMER Pro*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa NH-RES terbukti mengeliminasi emisi yang dihasilkan secara total pada kapal dan menguntungkan

secara ekonomis pada variabel *cost of energy* (COE) dan *net present cost* (NPC), masing-masing sebesar 0.231 USD/kWh dan 271.09 juta USD.

Temiz dan Dincer [11] mengenalkan konsep produksi bahan bakar hidrogen melalui panel surya (*photovoltaic* atau PV) terapung, penyimpanan, dan pengisian untuk penyeberangan kapal feri di Danau Ontario sebagai studi kasus. Metode mencakup kuantitatif-analitis disertai simulasi di *HOMER Pro* dan *PVSyst*, menunjukkan bahwa konsep sirkulasi dari produksi hidrogen hingga pemanfaatan hidrogen dapat mengeliminasi emisi secara total, dan aspek ekonomis seperti *net present value* (NPV) dan *levelized cost of energy* (LCOE) dapat diuntungkan masing-masing sebesar 5,06 juta dolar Kanada dan 6,47 dolar Kanada/kg.

Animah dkk. [12] menginvestigasi pemanfaatan sistem hibrida gabungan PV, turbin angin, dan generator konvensional yang terpasang pada kapal patroli sebagai studi kasus. Metode yang terdiri atas kuantitatif-analitis disertai simulasi di *HOMER Pro* menunjukkan bahwa sistem hibrida gabungan tersebut dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 82% dibandingkan sistem generator konvensional, serta aspek ekonomis menawarkan nilai NPC terendah sebesar 161.476,40 USD.

Elnajjar dkk. [13] Membuat prototipe gabungan turbin angin dan PV sebagai alat eksperimental untuk menunjang konsep “Pelabuhan Hijau”, dengan menjadikan Pelabuhan Jebel Ali sebagai studi kasus, serta menjadikan prototipe sebagai konsep sistem hibrida gabungan PV, turbin angin, unit baterai, dan jaringan konvensional. Metode yang terdiri atas kuantitatif-analitis disertai simulasi di *HOMER Pro* sebagai alat verifikasi dari hasil eksperimen, menyimpulkan bahwa konsep sistem hibrida tersebut dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 42,52% dari sistem jaringan konvensional. Dengan demikian, aspek ekonomis pada sistem hibrida gabungan, berupa LCOE dan NPC, masing-masing menawarkan penurunan hingga 31,82% dan 28,7% dibandingkan dengan sistem jaringan konvensional.

Iqbal dkk. [14] membandingkan pemanfaatan tenaga hibrida yang terdiri atas PV, turbin angin, *fuel cell*, dua jenis baterai (*lead-acid* dan *lithium-ion*), dan generator konvensional dengan kapal penumpang *FCS Alsterwasser* sebagai studi kasus. Dengan metode kuantitatif-analitis dan disimulasikan menggunakan *HOMER Pro*, disimpulkan bahwa sistem hibrida PV/turbin angin/baterai (*lithium-ion*)/generator unggul dari aspek ekonomis, dengan LCOE dan NPC masing-masing sebesar 0,223 USD/kWh dan 883.101 USD. Sedangkan sistem hibrida PV/baterai (baik *lead-acid* maupun *lithium-ion*)/turbin angin unggul dalam aspek emisi nol yang dihasilkan.

Abdullah-Al-Mahbub dkk. [15] mengenalkan konsep baru berupa “menara bundar berbentuk bunga PV” sebagai solusi untuk memaksimalkan penyerapan radiasi serta mengatasi keterbatasan area yang tersedia di atas kapal. Metode kuantitatif-analitis serta simulasi dengan *HOMER Pro* dan *PVSyst*, menunjukkan bahwa konsep hibrida gabungan PV berbentuk bunga, unit baterai, dan generator konvensional dapat mengurangi emisi yang dihasilkan hingga 325,56 ton CO₂.

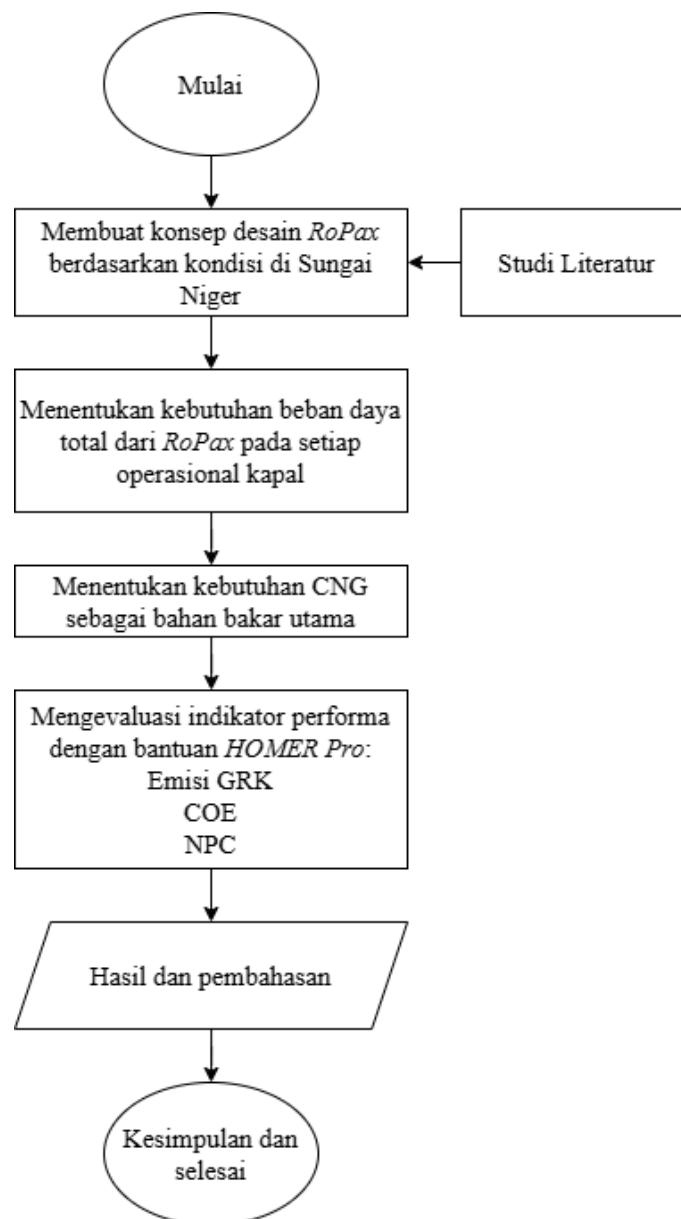
Serris dkk. [16] mengkaji pemanfaatan PV sebagai pendukung pemasokan daya selain generator pada saat operasional bongkar muatan di pelabuhan dengan kapal RORO sebagai studi kasus. Metode yang dimulai dari pengumpulan data, kuantitatif-analitis pada aspek teknis, dan evaluasi indikator emisi dan ekonomis, menunjukkan bahwa pemanfaatan PV pada operasional bongkar muatan dapat mengurangi emisi CO₂, NO_x, SO_x, dan partikulat masing-masing sebesar 199.865 kg, 2815 kg, 421 kg, dan 97 kg secara tahunan. Dengan demikian, aspek ekonomis pemanfaatan campuran *marine gas oil* (MGO)/*heavy fuel oil* (HFO) untuk generator unggul dalam hal NPV dan *payback period* masing-masing sebesar 79.931,21 EUR dan 20 tahun, dengan kenaikan harga bahan bakar tahunan sebesar 2,47%. Sedangkan pemanfaatan MGO untuk generator unggul dalam aspek kepatuhan terhadap regulasi emisi dan *payback period* yang singkat, yaitu 9 tahun.

Berdasarkan studi literatur sebelumnya dan pengetahuan penulis, penelitian yang berfokus pada keluaran emisi dan ekonomi CNG sebagai bahan bakar maritim alternatif, dengan simulasi *HOMER Pro* untuk kapal feri di perairan pedalaman, belum pernah dikaji. Oleh sebab itu, tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis keluaran emisi dan ekonomi dari pemanfaatan CNG sebagai bahan bakar maritim alternatif pada konsep feri RORO-penumpang (*RORO-Passenger* atau *RoPax*) yang beroperasi di Sungai Niger sebagai studi kasus, dengan memanfaatkan perangkat lunak *HOMER Pro* sebagai alat simulasi. Terdapat dua rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini sebagai berikut: (1) Bagaimana emisi GRK yang dihasilkan oleh CNG sebagai bahan bakar maritim alternatif? (2) Bagaimana performa ekonomis pemanfaatan CNG dalam hal NPC dan COE? Cakupan penelitian ini terfokus pada penjabaran aspek teknis berupa emisi GRK yang dihasilkan serta aspek ekonomis berupa NPC dan COE pada pemanfaatan CNG, dengan analisis sensitivitas berupa variasi beban minimum generator. Selain itu, pengujian pemanfaatan CNG pada *RoPax* secara eksperimental di lapangan tidak dapat dilakukan langsung di Nigeria karena keterbatasan sumber daya penulis. Oleh karena itu, metode yang dapat digunakan berupa analisis kuantitatif berbasis simulasi berdasarkan studi literatur. Pemanfaatan CNG di perairan pedalaman memberikan manfaat yang cukup besar dari aspek dampak lingkungan. Sebagai permulaan, pemanfaatan sumber energi alternatif seperti amonia hijau, hidrogen, atau sistem hibrida gabungan (seperti PV dan turbin angin yang terhubung dengan unit baterai) secara signifikan dapat menurunkan emisi GRK, sejalan dengan tujuan dekarbonisasi 2050 yang diusung oleh IMO [2]. Lebih lanjut, pemanfaatan CNG sebagai bahan bakar alternatif secara berkelanjutan juga mendukung kebijakan publik Nigeria yang berfokus pada nol karbon tahun 2060 [17], serta mengintegrasikan industri maritim dengan ambisi iklim nasional dan internasional yang lebih luas terkait krisis energi fosil dan emisi GRK global.

2 Metodologi

Tujuan penelitian akan tercapai dengan dilakukannya berbagai metode, yaitu pengumpulan data berdasarkan studi literatur dan perhitungan secara kuantitatif-analitis. Selanjutnya, teknik analitis akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak *HOMER Pro* untuk menguji performa emisi GRK yang dihasilkan serta performa ekonomis berupa NPC dan COE. Gambar 1 menjelaskan tahapan penelitian secara rinci.

Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER) Pro adalah perangkat lunak yang digunakan untuk merancang dan menganalisis kelayakan sistem hibrida energi alternatif atau terbarukan (PV, turbin angin, baterai, generator, hidrokinetik, dan sumber energi lainnya), dengan cakupan kelayakan sistem secara teknis, ekonomis, serta dampak lingkungan yang dihasilkan [18]. *HOMER Pro* dipilih untuk penelitian ini karena kemampuannya dalam menguji analisis sensitivitas terhadap performa indikator berupa NPC, COE, dan emisi GRK yang dihasilkan, sehingga cocok untuk menilai performa pemanfaatan CNG sebagai bahan bakar alternatif pada *RoPax* dalam kerangka kerja berbasis simulasi.



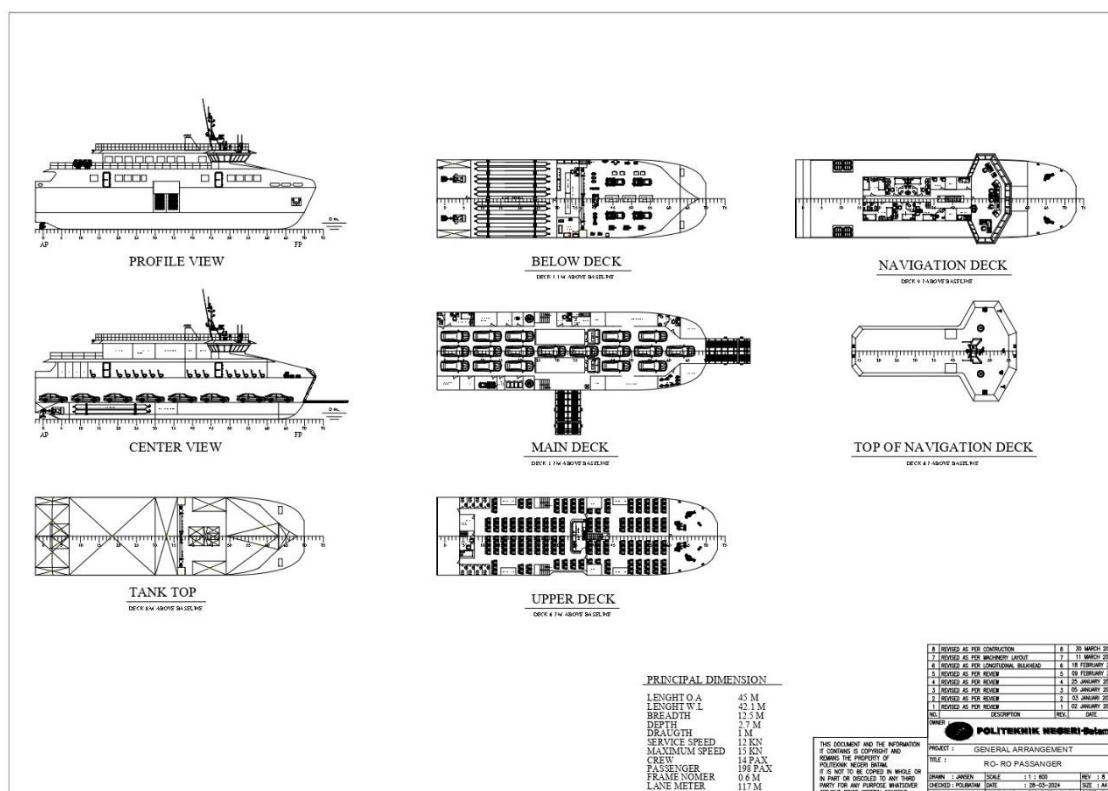
Gambar 1. Bagan alir penelitian keluaran emisi GRK dan ekonomis

2.1 Ringkasan Konsep Feri *RoPax* dan Rute Destinasi

Gambar 2 menunjukkan gambar rencana umum pada konsep desain feri *RoPax* yang terbagi menjadi lima dek, yaitu *main deck*, yang terdiri dari ruang penyimpanan sejuk, ruang penyimpanan kering, ruang untuk *emergency generator*, dan area parkir kendaraan. Pada *upper deck*, terdapat ruang akomodasi penumpang, kantin, dan ruang klinik. Pada *navigation deck*, terdapat ruang navigasi dan tempat istirahat kru. Pada *below deck*, terdapat ruang mesin dan ruang penyimpanan tangki CNG. Desain feri *RoPax* dirancang dengan lambung tunggal dan datar untuk memastikan stabilitas yang memadai serta ketahanan terhadap benturan saat berada di darat selama pemuatan atau pembongkaran di pelabuhan pedalaman. Kebutuhan beban daya pada *RoPax* dipengaruhi oleh beberapa parameter sensitif, termasuk kecepatan pelayaran, ukuran utama, hambatan gesekan utama dan gesekan sisa akibat kontak dengan air, dan penerapan metode Wyman. Asumsi parameter sensitif terintegrasi di dalam perhitungan bersama dengan ukuran utama *RoPax* secara detail tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran utama *RoPax* dan kategori sebagai parameter sensitif

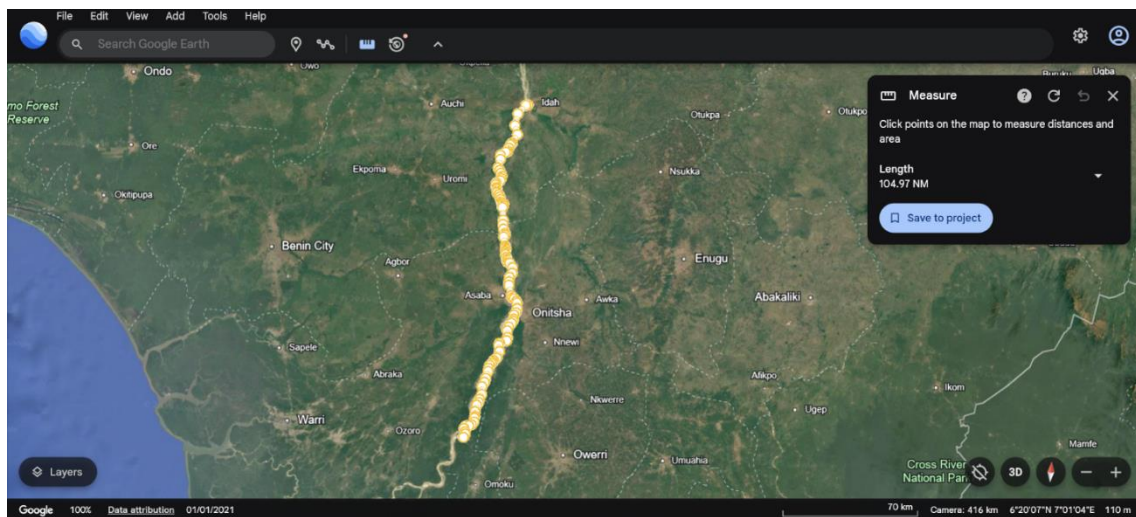
Ukuran utama	Pengukuran		Kategori	Referensi
	Nilai	Satuan		
Panjang keseluruhan (LOA)	45	m	-	-
Panjang garis air (LWL)	42.1	m	Parameter	-
Tinggi (D)	2.7	m	-	-
Lebar (B)	12.5	m	Parameter	-
Sarat (T)	1	m	Parameter	-
Tonase bobot ringan (LWT)	190.6	ton	Parameter	-
Tonase bobot mati (DWT)	225	ton	Parameter	-
Tonase perpindahan air (Δ)	415.9	ton	Parameter	-
Volume perpindahan air (∇)	414.09	m ³	Parameter	-
Densitas air tawar di Sungai Niger (ρ)	995.65	kg/m ³	Parameter	[19]
Kecepatan dinas ($V_{service}$)	12	knot	Parameter	-
Kecepatan maksimum (V_{max})	15	knot	Parameter	-
Jumlah penumpang	198	orang	Parameter	-
Jumlah kru	14	orang	Parameter	-
Kapasitas kendaraan	20	unit	Parameter	-

Gambar 2. Gambar rencana umum *RoPax*



Gambar 3. Tampak perspektif konsep desain *RoPax*

Jumlah pelabuhan yang disinggahi sepanjang Sungai Niger terdiri atas tiga pelabuhan: Idah, Onitsha, dan Ndoni. Onitsha akan menjadi pelabuhan utama bagi *RoPax*, dengan jarak antara Onitsha ↔ Idah dan Onitsha ↔ Ndoni masing-masing 62,2 mil laut dan 47,77 mil laut. Jadwal operasional *RoPax* dibuat berdasarkan keamanan, dimulai dari Senin sampai dengan Sabtu, pukul 06.00 pagi hingga 18.00 sore [20]. Gambar 4 menampilkan rute pelayaran secara rinci.

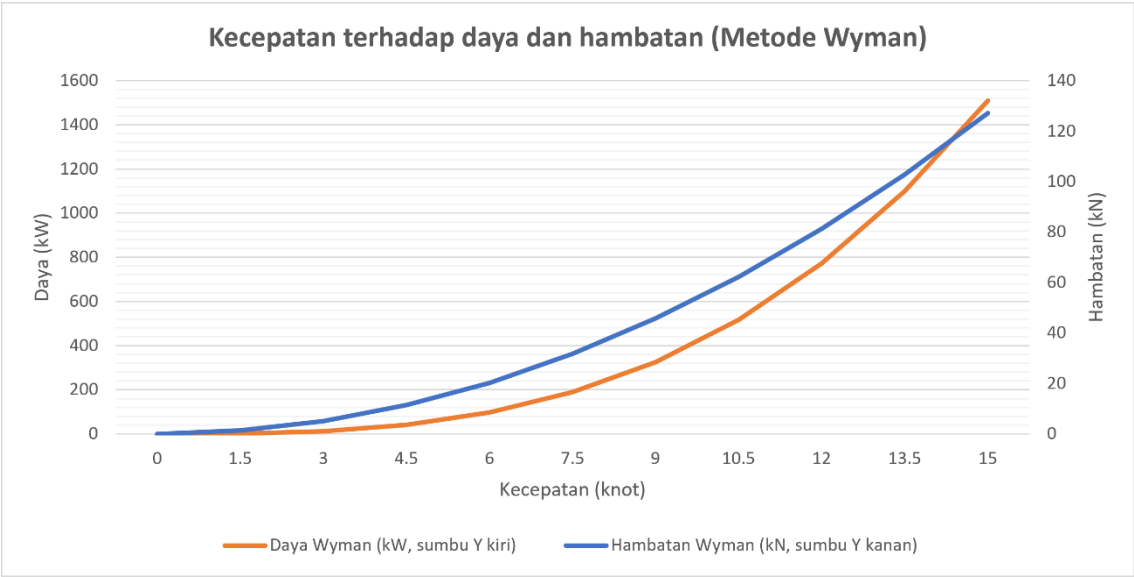


Gambar 4. Rute pelayaran di sepanjang Sungai Niger. Lokasi pelabuhan terdapat di Onitsha (tengah), Idah (utara), dan Ndoni (selatan)

2.2 Estimasi Kebutuhan Beban Daya

Gambar 5 menampilkan hasil simulasi pergerakan desain lambung feri *RoPax* yang berkontak dengan permukaan air, menggunakan bantuan *MAXSURF Resistance* yang mengacu pada metode Wyman dengan

asumsi efisiensi 65%. Metode Wyman dipilih dengan pertimbangan bahwa desain lambung *RoPax* memiliki karakteristik lambung dengan sarat air yang dalam (*displacement hull*) serta kecepatan berlayar yang cenderung rendah hingga moderat [21]. Kebutuhan daya listrik untuk menggerakkan desain *RoPax* pada kecepatan tertentu ditentukan oleh kapasitas daya keluaran propulsi motor listrik sebagai konsumen beban daya utama, di samping kebutuhan beban daya lainnya seperti beban akomodasi. Berdasarkan hasil analisis lambung *RoPax* terhadap kontak air, daya Wyman maksimum terhadap kecepatan menunjukkan bahwa sistem propulsi motor dengan daya keluaran sebesar 997 kW akan dipilih pada kecepatan dinas dan kecepatan maksimum, dengan daya dan hambatan masing-masing sebesar 772,5 kW dan 81,3 kN, serta 1508,7 kW dan 127,1 kN. Gambar 6 menunjukkan spesifikasi motor propulsi secara rinci.



Gambar 5. Kecepatan terhadap daya dan hambatan pada desain lambung *RoPax*

Marine Electric Motor Propulsion		
Brand	ABB	
Type	M3BP 450LC 4	
BKW/Output Power	997	kW
AC Voltage	460	V
AC Current	1505	A
Power Factor (100% Load)	0.86	
Efficiency (100% Load)	96.8%	
Speed	1800	r/min
Frequency	60	Hz
Dimensions	2147 x 1150 x 1293	mm
Weight	4.35	ton
Total Motor(s)	2	unit(s)



Gambar 6. Spesifikasi propulsi motor listrik

Sebelum menentukan total kebutuhan beban daya pada *RoPax*, tidak semua perlengkapan beban yang terhubung bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, setiap mode operasional *RoPax* memiliki puncak beban daya dalam waktu tertentu, yaitu pelayaran normal, meninggalkan pelabuhan, dan bersandar di pelabuhan [22]. Pada perhitungan ini, generator listrik utama menyuplai daya untuk “propulsi motor listrik” dan “beban akomodasi”. Kebutuhan daya untuk setiap mode operasional *RoPax* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan hasil analisis beban daya di setiap operasional

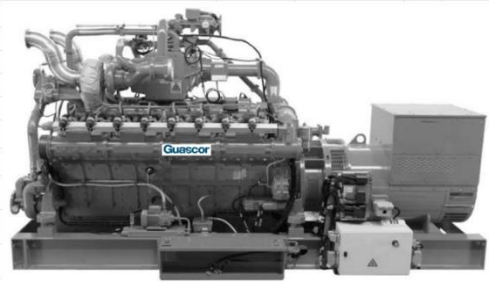
Kategori		Pelayaran normal	Meninggalkan pelabuhan	Bersandar di pelabuhan
Bagian permesinan	Beban kontinu (kW)	2,55	2,55	2,55
	Beban <i>intermittent</i> (kW)	3,09	3,09	2,82
Bagian perlengkapan	Beban kontinu (kW)	13,21	32,99	19,89
	Beban <i>intermittent</i> (kW)	0,00	0,00	0,00
Sistem kelistrikan pada akomodasi kru dan penumpang	Beban kontinu (kW)	48,40	33,48	18,28
	Beban <i>intermittent</i> (kW)	9,20	24,27	29,30
Total daya yang digunakan + daya masukan dari propulsi motor	Beban kontinu (kW)	2124,16	69,03	40,72
	Beban <i>intermittent</i> (kW)	12,29	2087,37	32,13
Total beban (kW)		2131,54	1321,45	59,996

Permintaan tertinggi dan terendah dari beban daya secara perhitungan terjadi pada mode “pelayaran normal” dan “bersandar di pelabuhan” masing-masing sebesar 2131,54 kW dan 59,996 kW, tanpa mempertimbangkan variabilitas acak harian. Mode “pelayaran normal” mengalami permintaan daya tertinggi dikarenakan beban sistem propulsi motor listrik, permesinan, dan akomodasi lainnya bekerja secara simultan, sedangkan mode “bersandar di pelabuhan” mengalami permintaan daya paling sedikit dikarenakan *RoPax* sedang melakukan pemuatan atau pembongkaran di pelabuhan. Perhitungan beban daya listrik mengacu pada peraturan *Bureau Veritas NR467 Steel Ships, Part C – Machinery, Electricity, Automation, and Fire Protection*, serta *Chapter 2 – Electrical Installation* [23].

2.3 Konfigurasi Sistem CNG

Secara umum, penentuan kapasitas keluaran daya pada generator bergantung pada seberapa besar permintaan daya listrik. Namun, hasil estimasi penentuan puncak beban daya tidak selalu mencerminkan nilai aktual pada pengoperasiannya karena sistem beban listrik tidak dapat dipastikan secara statis. Untuk mengatasi ketidakpastian, keluaran daya dari semua generator sekurang-kurangnya harus 15% lebih tinggi dari total puncak kebutuhan daya listrik sebagai margin [22]. Oleh sebab itu, kapasitas total keluaran daya tidak boleh kurang dari 2451,3 kW dan jumlah generator yang dibutuhkan dapat disesuaikan berdasarkan kapasitas ruang mesin. Spesifikasi generator lebih lanjut terlampir pada Gambar 7.

Marine Generator Set (Bertenaga gas alam)		
Merk	Guascor Energy	
Tipe	G-48SL	
Keluaran daya (Beban 100%)	721	kW
Keluaran daya (Beban 85%)	613	kW
Kecepatan	1500	RPM
Dimensi	3143 x 1368 x 1738	mm
Konsumsi bahan bakar (Beban 100%)	190	Nm ³ /h
Berat kosong	5450	kg
Jumlah Generator yang dibutuhkan	4	unit(s)



Gambar 7. Spesifikasi generator bertenaga CNG

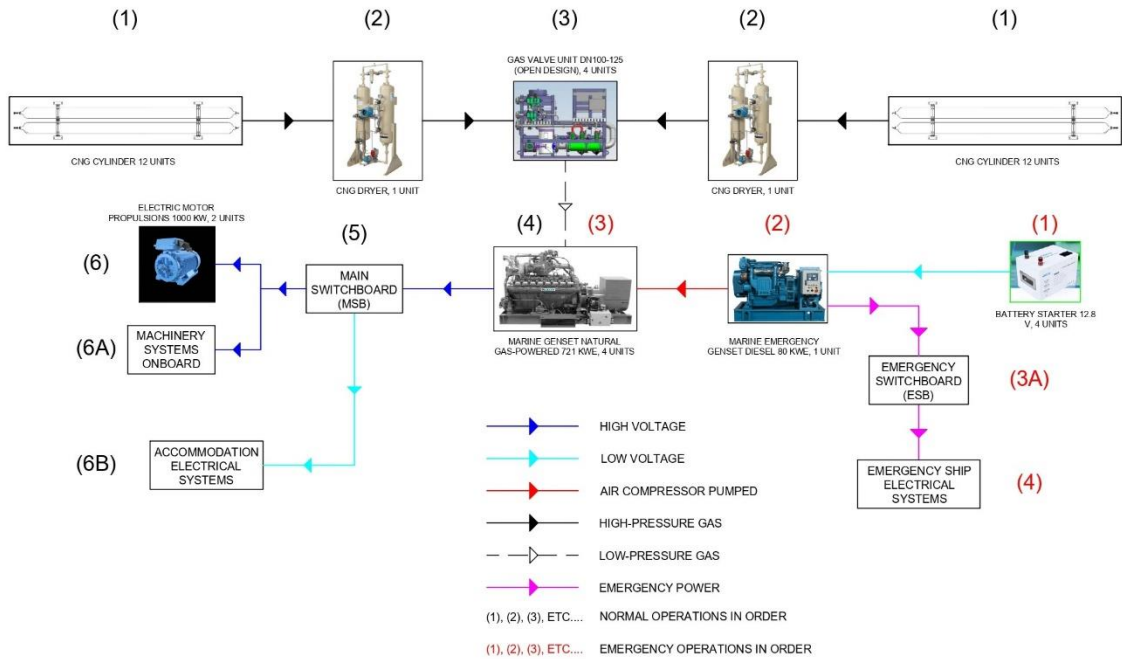
Dalam penentuan kuantitas bahan bakar CNG yang dibutuhkan, diasumsikan semua generator bekerja dengan beban 100%. Jumlah konsumsi bahan bakar dan durasi setiap pelayaran, baik rute Onitsha – Idah maupun rute Onitsha – Ndoni, masing-masing sebesar 3855.34 normal meter kubik (Nm³) dan 2627.09 Nm³, serta memakan waktu 5.1 jam dan 3.5 jam. Tangki silinder CNG sebanyak 24 silinder dapat disimpan di dalam *RoPax*, dengan kapasitas setiap silinder sebesar 696,1 Nm³ atau 19,7 standar kaki kubik (scf). Spesifikasi tangki silinder CNG terlampir pada Gambar 8.

Tangki Silinder CNG		
Merk	Sino Cleansky	
Tekanan kerja	25	MPa
Volume air	2,21	m ³
Volume gas (metrik)	696,1	Normal meter kubik (Nm ³)
Volume gas (imperial)	19,7	Standar kaki kubik (scf)
Berat	2769	kg
Panjang	11.522	mm
Lebar	559	mm
Ketebalan	17,4	mm



Gambar 8. Spesifikasi tangki silinder CNG

Gambar 9 mengilustrasikan skematik permesinan pada CNG Feri *RoPax*, dengan urutan dimulai dari tangki silinder CNG sebagai sumber bahan bakar, CNG *dryer* yang berfungsi mengeringkan gas alam dari uap air pada aliran bahan bakar jenuh menggunakan metode penyerapan ayunan bertekanan [24], serta Unit Katup Gas (*Gas Valve Units* atau GUVU) yang berfungsi mengatur tekanan dan aliran CNG dari tangki menuju generator. Tahapan ini berkelanjutan selama generator menerima aliran CNG sebagai bahan bakar utama untuk memenuhi kebutuhan beban layanan. Skematik permesinan yang diusulkan telah tunduk pada *International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code)*, terutama Part A-1 “*Specific Requirements for Ships Using Natural Gas as Fuel*” [25].



Gambar 9. Usulan skematik permesinan CNG pada Feri RoPax

Tabel 3 mendeskripsikan rincian modal komponen sistem permesinan *RoPax* sebagai langkah awal dalam menentukan parameter ekonomi. Karena setiap merek resmi pada komponen sistem tidak mendeskripsikan nominal harga yang pasti, digunakan merek yang berbeda; namun, kapasitas dan kebutuhan pada sistem permesinan *RoPax* tetap sama.

Tabel 3. Rincian modal komponen sistem permesinan *RoPax*

Komponen Sistem	Jumlah	Biaya Satuan (USD)	Sub-total biaya (USD)	Referensi
Generator utama bertenaga CNG	4	152.870	611.479	[26]
Generator darurat	1	6.615	6.615	[27]
Baterai penghidup generator darurat	4	154	615	[28]
Main switchboard	4	3.627	14.507	[29]
Tangki silinder CNG	24	4.980	119.532	[30]
Gas valve unit	4	2.119	8.474	[31]
CNG dehydrator	2	800	1.600	[32]
Biaya total sebagai modal (USD)			762.823	

Tabel 4 menampilkan ringkasan deskripsi parameter ekonomi pada skematik permesinan CNG sebagai variabel utama yang akan diinput ke *HOMER Pro*. Pada penelitian ini, variabel biaya operasional-perawatan dan penggantian, seperti suku cadang, diperoleh dari harga pasaran di laman internet, seperti *alibaba.com* dan *made-in-china.com*. Rincian suku cadang yang bersifat barang habis pakai (*consumable*) merujuk pada [33] dan [34].

Tabel 4. Ringkasan parameter ekonomis pada sistem permesinan *RoPax*

Parameter Ekonomis	Nilai	Referensi
Modal (USD)	762.823	-
Biaya operasional perawatan (USD/durasi operasional)	5,37	-
Biaya penggantian komponen (USD)	43.942	-
Waktu operasional generator (jam/tahun)	8.000	[35]
Harga CNG (USD/ <i>standard cubic meter</i>)	0,33	[36]
Asumsi kenaikan harga CNG tahunan (%)	8,72	[5]
Asumsi kenaikan harga suku cadang tahunan pada operasional dan perawatan proyek (%)	10	[37]
Tingkat diskonto nominal di Nigeria (%)	17,5	[38]
Tingkat inflasi di Nigeria (%)	18	
Umur proyek (tahun)	25	-

2.4 Indikator Performa

2.4.1 *Net Present Cost* (NPC)

NPC, yang disebut sebagai *life-cycle cost* (LCO), menunjukkan nilai masa kini dari semua biaya yang terkait dengan instalasi dan pengoperasian sistem selama durasi proyek, dikurangi nilai masa kini dari semua pendapatan yang dihasilkan oleh komponen tersebut selama periode tersebut. Untuk menginput nilai NPC, ada beberapa faktor yang harus dipertimbangkan, seperti modal, biaya operasional dan perawatan (O&M), biaya penggantian, biaya bahan bakar, denda emisi, pendapatan dari pemanfaatan proyek, serta biaya penonaktifan (*salvage*). Nilai NPC dari setiap komponen pada simulasi *HOMER Pro* dalam sistem dianalisis untuk mengalkulasi nilai NPC pada keseluruhan sistem proyek [39]. Kriteria penentuan nilai NPC sebagai berikut:

$$NPC = \frac{C_{(tahunan)Total}}{CRF(d, N)} \quad (3)$$

$$C_{(tahunan)Total} = C_{(tahunan)modal} + C_{(tahunan)penggantian} + C_{(tahunan)O\&M} + C_{(tahunan)bahan\ bakar} - C_{(tahunan)salvage} \quad (4)$$

$$CRF = \frac{d(1 + d)^N}{(1 + d)^N - 1} \quad (5)$$

$$d = \frac{i - f}{1 + f} \quad (6)$$

Di mana CRF adalah *capital recovery factor* atau faktor pemulihan modal, “d”, “N”, “i”, dan “f” masing-masing adalah tingkat diskonto nyata (%), rentang umur proyek (tahun), tingkat diskonto nominal (%), dan tingkat inflasi (%), $C_{(tahunan)modal}$ adalah biaya modal faktor (\$/tahun), $C_{(tahunan)total}$ adalah biaya tahunan keseluruhan sistem (\$/tahun), $C_{(tahunan)O\&M}$ adalah biaya operasional dan perawatan tahunan keseluruhan komponen pada proyek (\$/tahun), $C_{(tahunan)bahan\ bakar}$ adalah biaya bahan bakar tahunan (\$/tahun), $C_{(tahunan)salvage}$ adalah biaya penonaktifan tahunan keseluruhan komponen di akhir usia proyek (\$/tahun), dan $C_{(tahunan)penggantian}$ adalah biaya penggantian tahunan beberapa komponen proyek (\$/tahun) [14].

2.4.2 *Cost of Energy* (COE)

COE adalah biaya rata-rata yang dikeluarkan untuk setiap unit energi listrik yang dapat digunakan dalam satuan kilowatt-jam (kWh). COE dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [40]:

$$COE = \frac{C_{(tahunan)Total} - c_{BOILER} H_{SERVED}}{E_{SERVED}} \quad (7)$$

$C_{(tahunan)Total}$, c_{BOILER} , H_{SERVED} , dan E_{SERVED} masing-masing menunjukkan biaya tahunan keseluruhan sistem (\$/tahun), biaya margin ketel uap (\$/kWh), beban termal total yang diberikan (kWh/tahun), dan total beban daya yang disuplai (kWh/tahun). Dalam penelitian ini, variabel beban termal tidak dimasukkan karena tidak adanya ketel uap, rumus akhir dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$COE = \frac{C_{(tahunan)Total}}{E_{SERVED}} \quad (8)$$

2.4.3 Estimasi Emisi GRK

Umumnya, jenis polutan yang dihasilkan oleh generator adalah CO, materi partikulat, NO_x, CO₂, sulfur dioksida (SO₂), dan sisa UHC selama proses pembangkit listrik. Setiap jenis polutan yang dihasilkan oleh generator setiap tahunnya dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut [41]:

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p}) \quad (9)$$

Di mana:

- E_{Trip} : Emisi selama operasional per tahun (kg/tahun)
- FC : Konsumsi bahan bakar per tahun (ton/tahun)
- EF : Faktor emisi (kg/ton bahan bakar)
- i : Jenis polutan (CO, NO_x, UHC, atau materi partikulat)
- j : Tipe mesin (kecepatan rendah, sedang, atau tinggi; turbin gas; dan turbin uap)
- m : Jenis bahan bakar
- p : Mode operasional (pelayaran normal, meninggalkan pelabuhan, atau bersandar di pelabuhan)

Pada perangkat lunak *HOMER Pro*, semua jenis polutan dapat ditentukan menggunakan Persamaan (9), kecuali CO₂ dan SO₂. Dalam kerangka kerja estimasi ini, *HOMER Pro* menggunakan tiga asumsi utama dalam menentukan CO₂ dan SO₂. Pertama, setiap karbon dalam bahan bakar yang tidak menghasilkan produk CO atau UHC akan menghasilkan produk CO₂. Kedua, fraksi karbon dari emisi UHC sama dengan fraksi karbon dari bahan bakar itu sendiri. Terakhir, produk SO₂ akan terbentuk jika setiap sulfur dalam bahan bakar yang terbakar tidak menghasilkan materi partikulat [42].

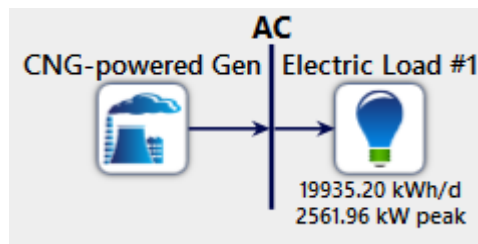
Sebelum menjalankan simulasi di *HOMER Pro*, nilai faktor emisi setiap jenis bahan bakar berbeda-beda karena perbedaan komposisi kimiawi. Tabel 5 menjabarkan nilai masing-masing faktor emisi antara diesel dan CNG yang menjadi acuan dalam membandingkan emisi GRK yang dihasilkan. Faktor-faktor emisi baik diesel dan CNG terlampir pada [35], [41], [43], [44], dan [45], dengan masing-masing satuan berupa g/liter diesel dan g/m³ CNG.

Tabel 5. Nilai faktor emisi antara diesel dan CNG sebagai komparasi

Senyawa-senyawa emisi GRK	Diesel	CNG
NO _x	50,274 g/liter diesel	0,474 g/m ³ CNG
CO	11,584 g/liter diesel	13,611 g/m ³ CNG
UHC	0,212 g/liter diesel	35,278 g/m ³ CNG
Materi partikulat	1,029 g/liter diesel	0,0175g/m ³ CNG
Sulfur bahan bakar yang berubah menjadi materi partikulat	0,3%	0,001%

3 Analisis Data dan Pembahasan

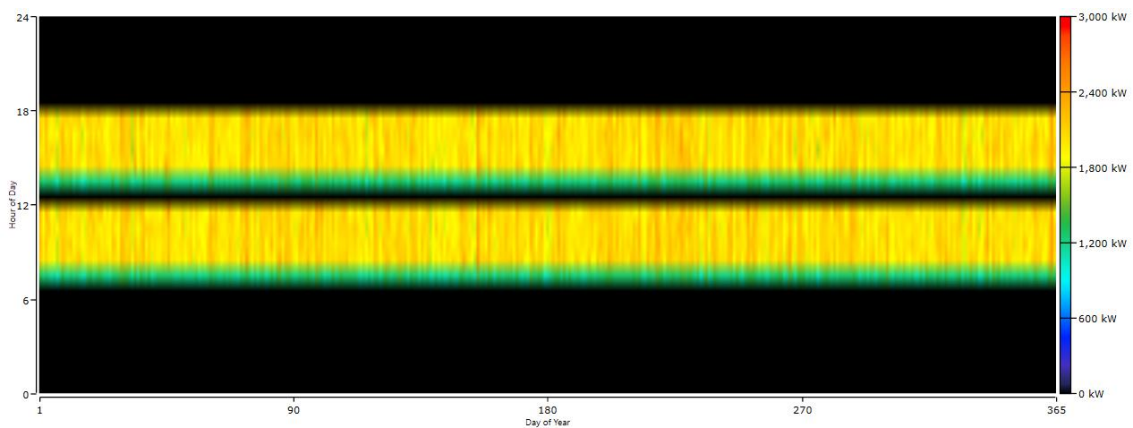
3.1 Pelayanan Generator terhadap Kebutuhan Beban Daya



Gambar 10. Sistem konfigurasi generator bertenaga CNG pada *HOMER Pro*

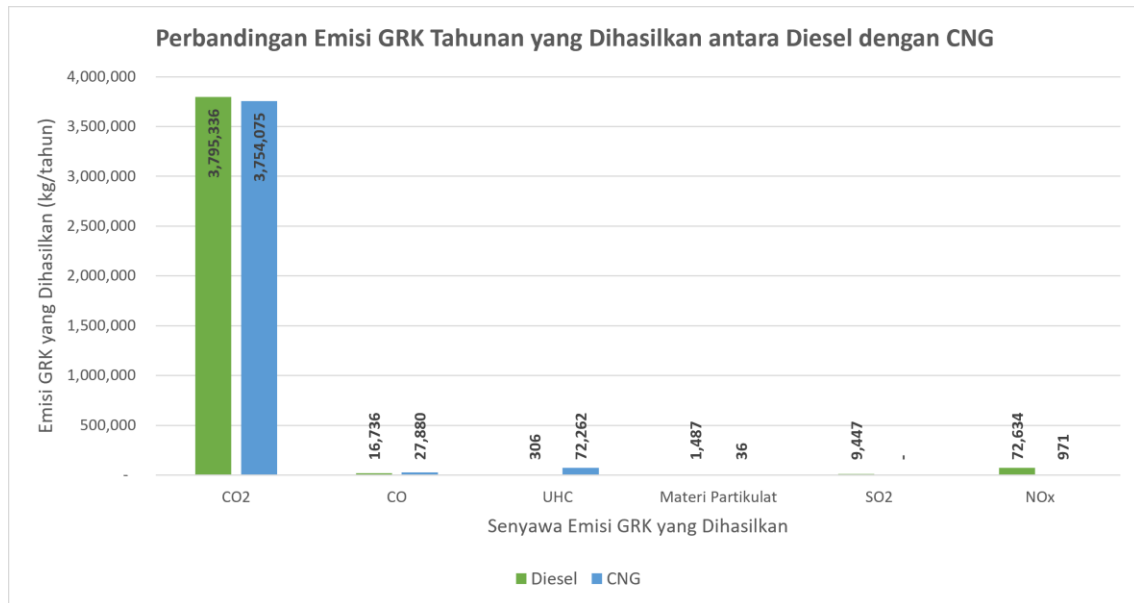
Gambar 10 menunjukkan sistem konfigurasi generator bertenaga CNG yang dihubungkan pada beban daya *RoPax*, dengan nilai rata-rata harian dan puncak masing-masing sebesar 19.935,20 kWh/hari dan 2.561,96 kW secara realistis, berdasarkan skenario asumsi variabilitas acak *day-to-day* dan *timestep* masing-masing sebesar 5% dan 3%. Oleh karena itu, generator mengalami fluktuasi harian dalam memenuhi kebutuhan daya yang dipengaruhi oleh berbagai parameter seperti cuaca dan gelombang sungai, tipe kapal, mode operasional kapal, serta lonjakan beban daya saat komponen dihidupkan.

Gambar 11 menampilkan grafik fluktuasi harian beban generator selama setahun penuh. Pada pukul enam pagi, sistem permesinan *RoPax* dihidupkan sebagai permulaan pelayaran dari Pelabuhan Onitsha ke pelabuhan tujuan, seperti Idah atau Ndoni. Sekitar pukul dua belas siang, *RoPax* telah sampai di pelabuhan tujuan dan generator hanya menyuplai sistem akomodasi hingga *RoPax* berangkat lagi ke Pelabuhan Onitsha sebagai tujuan akhir sekitar pukul satu siang hingga sekitar pukul lima sore. Di Pelabuhan Onitsha tersedia layanan *shore connection* sehingga generator dapat dimatikan dan kapal tetap melayani sistem akomodasi sepanjang malam.



Gambar 11. Fluktuasi harian beban daya pada generator bertenaga CNG secara tahunan dengan skenario asumsi

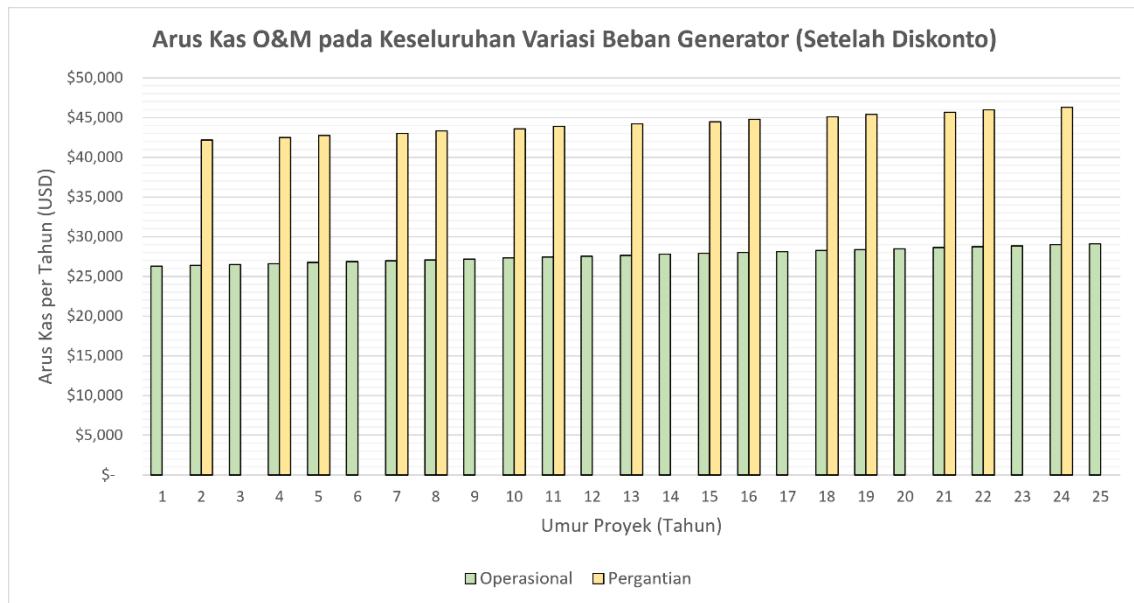
3.2 Emisi GRK Tahunan selama Umur Proyek



Gambar 12. Perbandingan emisi GRK yang dihasilkan

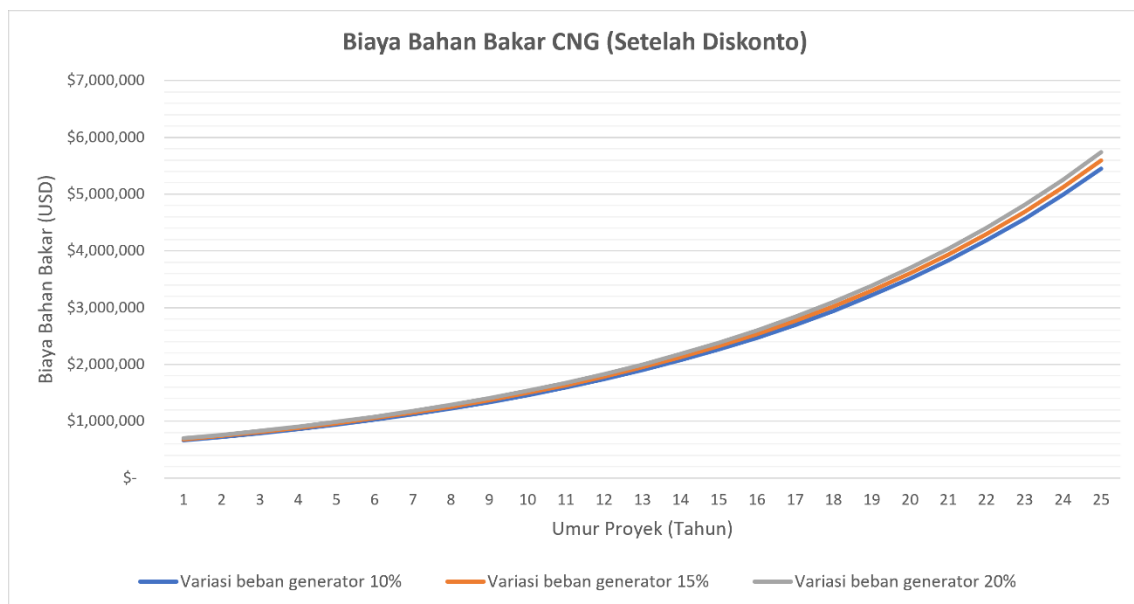
Gambar 12 menunjukkan perbandingan emisi GRK tahunan yang dihasilkan oleh diesel dan CNG. Emisi CO dan UHC yang dihasilkan oleh bahan bakar diesel lebih rendah dibandingkan dengan CNG, dengan selisih masing-masing sebesar 11.144 kg/tahun dan 71.956 kg/tahun. Jumlah emisi CO yang dihasilkan oleh CNG pada penelitian ini justru berbanding terbalik dengan yang dijelaskan oleh [46] yang mana emisi CO yang terbentuk terbukti lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil cair lainnya. Hal ini disebabkan oleh karakteristik gas alam, yaitu nilai kalor dan kecepatan penyebaran nyala yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil cair lainnya. Dua karakteristik tersebut disertai dengan kombinasi pembakaran dengan kelebihan udara (*lean-burn combustion*) dapat menurunkan suhu di dalam silinder setelah fase pembakaran selesai, sehingga jumlah emisi CO dan NO_x yang terbentuk lebih rendah, namun dengan konsekuensi berupa emisi UHC yang terbentuk melambung tinggi [46]. Emisi CO₂, materi partikulat, dan NO_x yang dihasilkan oleh CNG cenderung lebih rendah dibandingkan dengan diesel, dengan selisih masing-masing sebesar 1,09%, 1.451 kg/tahun, dan 71.663 kg/tahun. Selain itu, emisi SO₂ yang dihasilkan oleh CNG justru tidak muncul dalam simulasi *HOMER Pro*. Berdasarkan laporan [47] kandungan sulfur dan materi partikulat pada gas alam seperti CNG mendekati nol dibandingkan dengan bahan bakar fosil cair lainnya.

3.3 Perhitungan Ekonomis selama Umur Proyek



Gambar 13. Hasil simulasi arus kas O&M sepanjang umur proyek pada keseluruhan variasi beban generator

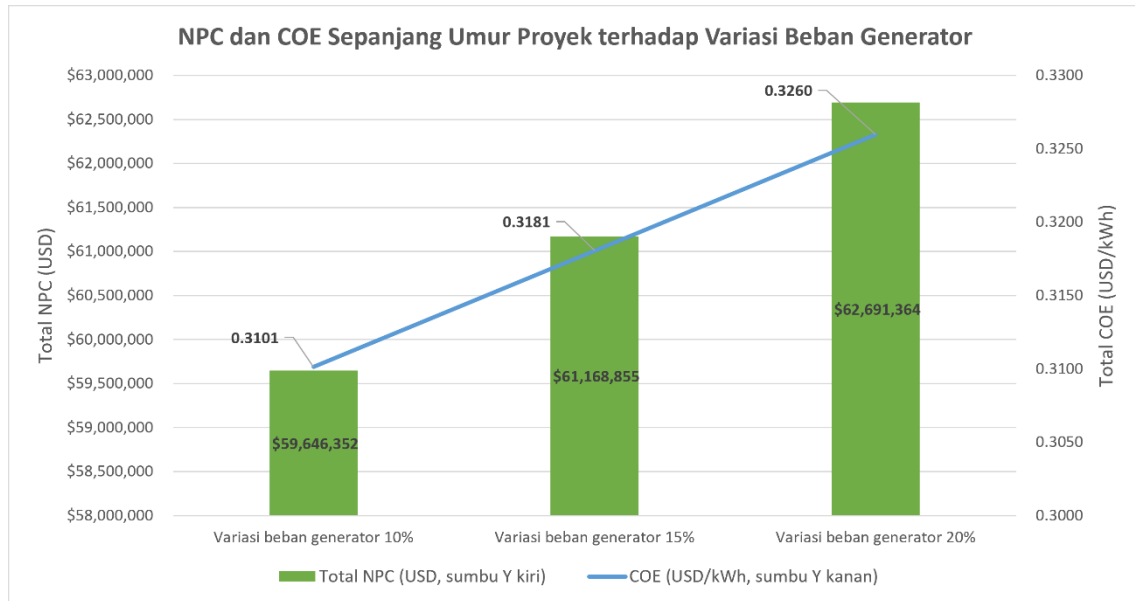
Gambar 13 melampirkan arus kas O&M sepanjang umur proyek yang dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu tingkat diskonto nominal dan tingkat inflasi masing-masing sebesar 17,5% dan 18% berdasarkan kondisi perekonomian di Nigeria [38], serta asumsi kenaikan harga suku cadang tahunan sebesar 10% [37]. Biaya operasional dan penggantian pada sistem permesinan CNG *RoPax* mengalami kenaikan yang cukup signifikan, dengan kenaikan per tahun berdasarkan hasil simulasi sekitar 0,43% hingga akhir proyek pada tahun ke-25. Kedua variabel tersebut memiliki nilai yang konstan terlepas dari kelipatan variasi beban generator. Biaya operasional dan penggantian suku cadang tertinggi dan terendah masing-masing sebesar 29.096 USD dan 46.294 USD, serta 26.277 USD dan 42.180 USD.



Gambar 14. Peningkatan biaya bahan bakar CNG terhadap kelipatan variasi beban generator

Grafik biaya bahan bakar CNG menunjukkan kenaikan signifikan per tahun dengan median sebesar 2,54% pada setiap kenaikan kelipatan 5% variasi beban generator pada Gambar 14. Peningkatan biaya bahan bakar CNG dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu asumsi kenaikan harga CNG tahunan sebesar 8,72% [5] dan

meningkatnya kuantitas bahan bakar yang dikonsumsi seiring dengan kenaikan variasi beban generator.



Gambar 15. Pengaruh variabel NPC dan COE terhadap variasi beban generator

Terdapat dua jenis ekonomi yang dikaji dalam penelitian ini, yaitu NPC dan COE. Nilai NPC ditentukan berdasarkan arus kas selama umur sistem proyek terhadap CRF, dan nilai COE ditentukan berdasarkan rasio antara biaya tahunan keseluruhan sistem dan total beban daya listrik tahunan yang disuplai. Seperti pada biaya operasional dan perawatan, nilai modal dan *salvage* konstan terlepas dari variasi beban generator, masing-masing sebesar 762.823 USD dan 1.456 USD. NPC dan COE terendah dan tertinggi pada Gambar 15 masing-masing pada sistem permesinan CNG *RoPax* adalah 59.646.352 USD dan 0,3101 USD/kWh, serta 62.691.364 USD dan 0,3260 USD/kWh.

3.4 Analisis Sensitif: Variasi beban Minimum Generator

Analisis sensitivitas digunakan untuk menganalisis variabel input berupa keluaran emisi dan ekonomi yang dapat memengaruhi performa sistem permesinan bertenaga CNG sebagai bahan bakar maritim alternatif. Variasi beban minimum generator adalah persentase kapasitas beban minimum yang diperbolehkan untuk generator beroperasi. Menentukan kapasitas beban minimum bukan untuk mencegah generator menjadi nonaktif secara otomatis. Hal ini bertujuan untuk mencegah generator bekerja pada beban yang terlalu rendah sehingga dapat memaksimalkan umur pakai generator. Beberapa katalog manufaktur menyarankan untuk tidak mengoperasikan generator di bawah nilai beban tertentu [48].

Pada kasus ini, katalog manufaktur generator bertenaga gas alam tidak melampirkan kapasitas beban minimum yang diperbolehkan untuk beroperasi. Oleh sebab itu, baik keluaran emisi GRK maupun ekonomi seperti NPC dan COE disimulasikan dalam *HOMER Pro* dengan memvariasikan asumsi beban minimum generator dari 10% hingga 20%, dengan interval kelipatan 5% [49].

4 Kesimpulan

Temuan dari artikel ini menunjukkan bahwa pemanfaatan CNG menawarkan keunggulan berupa jumlah emisi GRK, yaitu CO₂, materi partikulat, SO₂, dan NO_x, yang cukup rendah dibandingkan dengan pemanfaatan diesel, sehingga pemanfaatan CNG cukup layak dijadikan opsi alternatif dalam proses dekarbonisasi. Namun, sebaliknya, diesel justru menghasilkan emisi CO sebesar 40% lebih rendah dibandingkan CNG. Meskipun beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemanfaatan CNG menghasilkan emisi CO yang lebih rendah dibandingkan dengan pemanfaatan bahan bakar fosil cair lainnya, hasil simulasi ini menunjukkan tren yang berlawanan. Perbedaan ini kemungkinan terkait dengan pendekatan faktor emisi yang diinput dalam *HOMER Pro*, yang mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan hasil pembakaran CNG secara nyata. Selain itu, analisis ekonomi menunjukkan bahwa nilai NPC dan COE dapat meningkat dengan median sebesar 2,46% untuk setiap kenaikan kelipatan 5% dari variasi beban minimum generator. Peningkatan nilai kedua variabel ekonomi disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu asumsi kenaikan harga CNG dan suku cadang tahunan meski telah diterapkan tingkat diskonto nyata, serta meningkatnya konsumsi bahan bakar CNG seiring meningkatnya kelipatan variasi beban minimum generator.

5 Daftar Pustaka

- [1] H. P. Nguyen *et al.*, “The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO₂ emission in ocean shipping: A comprehensive review,” in *International Transactions on Electrical Energy Systems*, John Wiley and Sons Ltd, Nov. 2020, pp. 1–29. doi: 10.1002/2050-7038.12580.
- [2] Anon, “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.” Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>
- [3] A. A. Mas’ud *et al.*, “Wind power potentials in Cameroon and Nigeria: Lessons from South Africa,” *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 4, Mar. 2017, doi: 10.3390/en10040443.
- [4] Y. J. Amuda, S. Hassan, and U. Subramaniam, “Comparative Review of Energy, Crude Oil, and Natural Gas for Exchange Markets in Nigeria, India and Bangladesh,” Apr. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16073151.
- [5] J. L. Daser-Adams *et al.*, “Compressed Natural Gas Utilization in Nigeria’s Transport Sector: Fuel Balance, Economics and Environmental Considerations,” *Journal of Energy Research and Reviews*, vol. 17, no. 3, pp. 34–41, Mar. 2025, doi: 10.9734/jenrr/2025/v17i3400.
- [6] A. Leonardo and Semin, “Effect of CNG Engine Conversion on Performance Characteristic: A Review,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Feb. 2022. doi: 10.1088/1755-1315/972/1/012028.
- [7] V. Lam Tran, “Study Simulating Emission Efficiency of Engines When Using CNG Fuels to Replace Gasoline Fuel,” *International Journal of Scientific Engineering and Science*, vol. 7, no. 5, pp. 2456–7361, 2023, [Online]. Available: <http://ijses.com/>
- [8] L. M. Das, R. Gulati, and P. K. Gupta, “A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 783–793, Aug. 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(99\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00103-2).
- [9] M. I. Jahirul, H. H. Masjuki, R. Saidur, M. A. Kalam, M. H. Jayed, and M. A. Wazed, “Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 2219–2226, Oct. 2010, doi:

10.1016/j.applthermaleng.2010.05.037.

- [10] H. A. Gabbar, M. I. Adham, and M. R. Abdussami, "Analysis of nuclear-renewable hybrid energy system for marine ships," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2398–2417, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.04.030.
- [11] M. Temiz and I. Dincer, "Techno-economic analysis of green hydrogen ferries with a floating photovoltaic based marine fueling station," *Energy Convers. Manag.*, vol. 247, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114760.
- [12] I. Animah, P. Adjei, and E. K. Djamesi, "Techno-economic feasibility assessment model for integrating hybrid renewable energy systems into power systems of existing ships: A case study of a patrol boat," *Marine Engineering and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 22–37, 2023, doi: 10.1080/20464177.2022.2087272.
- [13] H. M. Elnajjar, A. S. Shehata, A. H. A. Elbatran, and M. F. Shehadeh, "Experimental and techno-economic feasibility analysis of renewable energy technologies for Jabel Ali Port in UAE," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 116–136, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.102.
- [14] R. Iqbal, Y. Liu, Y. Zeng, Q. Zhang, and M. Zeeshan, "Comparative study based on techno-economics analysis of different shipboard microgrid systems comprising PV/wind/fuel cell/battery/diesel generator with two battery technologies: A step toward green maritime transportation," *Renew. Energy*, vol. 221, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119670.
- [15] M. Abdullah-Al-Mahbub, A. R. Md. T. Islam, E. Alam, and M. R. Asha, "Sustainable solar energy potential on marine passenger ships of Bay of Bengal: A way of reducing carbon dioxide emissions and disaster risk reduction," *Energy Exploration and Exploitation*, vol. 41, no. 5, pp. 1697–1723, Sep. 2023, doi: 10.1177/01445987231173097.
- [16] M. Serris, P. Petrou, I. Iakovidis, and S. Dimitrellou, "Techno-Economic and Environmental Evaluation of a Solar Energy System on a Ro-Ro Vessel for Sustainability," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 18, pp. 1–20, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186523.
- [17] Anon, "Nigeria Energy Transition Plan." Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://energytransition.gov.ng/>
- [18] Anon, "HOMER Pro - Microgrid Optimization Software." Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: <https://homerenergy.com/homer-pro>
- [19] M. Ibrahim *et al.*, "Water balance analysis over the Niger Inland Delta-Mali: Spatio-temporal dynamics of the flooded area and water losses," *Hydrology*, vol. 4, no. 3, pp. 1–23, 2017, doi: 10.3390/hydrology4030040.
- [20] United Nations Office on Drugs and Crime, "PIRATES OF THE NIGER DELTA BETWEEN BLUE AND BROWN WATER," 2021. Accessed: Jun. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.unodc.org/res/piracy/index_html/UNODC_GMCP_Pirates_of_the_Niger_Delta_between_brown_and_blue_waters.pdf
- [21] M. Helmi and E. Haryanto, "Study of the Effect of Displacement Changes of the Polbeng 2 Vessel on Ship Performance Using the Wyman Method," in *International Conference on Industrial Technology and Business*, Dec. 2025, pp. 117–132.
- [22] M. R. Patel, *Shipboard Electrical Power Systems; Second Edition*, Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003191513>.
- [23] Bureau Veritas, "NR467: Rules for the classification of steel ships – Part C: Machinery, electricity and fire (July 2025 ed.)." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/467-NR_PartC_2025-07.pdf

- [24] Anon, "HLSXG Explosion Proof - Van Air Systems." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.vanairsystems.com/product/hlsxg-explosion-proof/>
- [25] International Maritime Organization, "Resolution MSC.391(95): Adoption of the International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code)." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.391\(95\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.391(95).pdf)
- [26] Anon, "Cummins Natural Gas Generator Set Open Type Gas Genset 500kw 600kw 700kw 800kw 1000kw Generator ." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Cummins-400Kw-Natural-Gas-Generator-Set_1601587953040.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.3bf813a0Tx5xDj&priceId=101111d703c9420681736f96db23633a
- [27] Anon, "Open Frame Heavy Duty Diesel Generator Set 300kva 500kva 800kva Industrial Continuous Power Generator For Mining Project." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Weichai-100kva-80kw-Diesel-Generator-Set_1601111853145.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.538b13a0jCZhXr&priceId=d0e25b2acb114e24a336af42cad209aa
- [28] Anon, "Uli Customizable 12.8v 100ah 1280wh Lifepo4 Lithium Ion Battery Pack For Golf Cart Solar Energy & Ups Backup Systems." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/ULi-Customizable-12-8V-100Ah-1280Wh_1601604014814.html?priceId=610c03438acf407caae4979bcb6be1be&spm=a2700.prosearch.0.i100.56fa67af7UjvyJ
- [29] Anon, "Abs Marine Equipment Corrosion Resistant Marine Power Distribution Panel Shore Power Box Emergency Switchboard." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Abs-Marine-Equipment-Corrosion-Resistant-Marine_1601568048146.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.2baa67af54ziCE&priceId=d614669b04524fe3ab9933ca3580b5eb
- [30] Anon, "4-tube Jumbo Large Volume Seamless Steel Cylinder Cascade For Storing Cng Gas Of Water Capacity 5.6 Cubic Meter." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/4-Tube-Jumbo-Large-Volume-Seamless_1600688834166.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.182d67afFTzzAy&priceId=b8f5be7e3a2748acabe720c1feebbd9b
- [31] Anon, "High Gas Regulator Most Popular Flow Control Valved Flow Controller." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Gas-Regulator-Most-Popular-Flow_1601872578526.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.551b67afc9TDbX&priceId=2c163c0e99794825ba95bd6edc17ec64
- [32] Anon, "Natural Gas Standard Combination Air Dryer Low Dew Point Micro Heat Combination Dryer Compressor Dryer." Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Natural-Gas-Standard-Combination-air-Dryer_1601674108431.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.1cc767afpfzTo2&priceId=0635934485e345ccaefc7177c1494c56
- [33] International Association of Classification Societies, *List of minimum recommended spare parts for each type of auxiliary internal combustion engine driving electric generators for essential services*

on board ships for unrestricted service. 2024, pp. 1–2.

- [34] Anon, “Diesel Engines - Operation and Maintenance Manual Book Guascor.” Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/815513227/Operation-and-Maintenance-Manua-for-Guascorl>
- [35] Anon, “Guascor Energy Diesel & Gas Engines (Marine).” Accessed: Aug. 01, 2026. [Online]. Available: https://guascor-energy.com/wp-content/uploads/2025/06/6012_GUASCOR-ENERGY_Portrait_marine-engines_en_A4_V2.pdf
- [36] O. Ogunjuyigbe, “CNG prices nearly double as government cuts subsidy.” Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://businessday.ng/energy/oilandgas/article/cng-prices-nearly-double-as-government-cuts-subsidy/>
- [37] Z. Zhao, X. Wang, H. Wang, S. Cheng, and W. Liu, “Fleet Deployment Optimization for LNG Shipping Vessels Considering the Influence of Mixed Factors,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 12, pp. 1–17, Dec. 2022, doi: 10.3390/jmse10122034.
- [38] Anon, “FINANCIAL REPORTING COUNCIL OF NIGERIA - Financial Statements,” Lagos, Dec. 2025. [Online]. Available: <http://www.frcnigeria.gov.ng>
- [39] Anon, “Net Present Cost.” Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: https://homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/net_present_cost.html
- [40] Anon, “Levelized Cost of Energy.” Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: https://homerenergy.com/products/pro/docs/latest/levelized_cost_of_energy.html
- [41] C. Trozzi, “Emission estimate methodology for maritime navigation,” Roma, 2010. Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://gaftp.epa.gov/air/nei/ei_conference/EI19/session10/trozzi.pdf
- [42] Anon, “How HOMER Calculates Emissions.” Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_calculates_emissions.html
- [43] P. Jun, M. Gillenwater, and W. Barbour, “CO₂, CH₄, AND N₂O EMISSIONS FROM TRANSPORTATION-WATER-BORNE NAVIGATION,” Paris, 2000. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_4_Water-borne_Navigation.pdf
- [44] C. Trozzi and R. Vaccaro, “Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships: a 2006 update,” in *Environment & Transport 2th International Scientific Symposium*, Reims, Jun. 2006, pp. 1–8.
- [45] D. Stenersen and O. Thonstad, “GHG and NO_x emissions from gas fuelled engines,” Jun. 2017.
- [46] M. I. Khan, T. Yasmin, and A. Shakoar, “Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 785–797, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.053.
- [47] F. Stuer-Lauridsen *et al.*, “Natural gas for ship propulsion in Denmark – Possibilities for using LNG and CNG on ferry and cargo routes,” Nov. 2010. Accessed: Jun. 14, 2026. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/991786>
- [48] Anon, “Generator Minimum Load Ratio.” Accessed: Jun. 22, 2026. [Online]. Available: https://homerenergy.com/products/pro/docs/latest/generator_minimum_load_ratio.html
- [49] J. O. Oladigbolu, M. A. M. Ramli, and Y. A. Al-Turki, “Techno-economic and sensitivity analyses for an optimal hybrid power system which is adaptable and effective for rural electrification: A case study of Nigeria,” *Sustainability*, vol. 11, no. 18, pp. 1–5, Sep. 2019, doi: 10.3390/su11184959.