

Fuel efficiency and investment feasibility of marine shaft generator installation: A case study on a very large gas carrier (VLGC)

Achmad Riadi^{a,1}, Zoe Gladstone Tarigan^a, Dimas Angga Fakhri Muzhoffar^a, Haryanti Rivai^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 16424

^bDepartemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa, Sulawesi Selatan, 92171

¹Email korespondensi: achmadriadi@ui.ac.id

Abstrak. Penelitian ini mengkaji pengaruh instalasi dan penggunaan *marine shaft generator* (*shaft generator*) khususnya pada mode *Power Take-Off* (PTO) terhadap konsumsi bahan bakar kapal tipe *Very Large Gas Carrier* (VLGC). Analisis kelayakan investasi juga dilakukan untuk menilai potensi investasi sistem *shaft generator* pada kapal yang sudah beroperasi tetapi belum memiliki sistem tersebut. Studi ini menggunakan pendekatan kuantitatif berdasarkan data operasional kapal selama satu tahun, dengan mempertimbangkan beberapa skenario penggunaan *main engine*, *auxiliary engine*, dan *shaft generator* pada kondisi PTO aktif (*on*) maupun nonaktif (*off*). Hasil analisis menunjukkan bahwa pengoperasian *shaft generator* dengan mode PTO *on* secara signifikan menurunkan konsumsi bahan bakar *auxiliary engine*, meskipun memberikan dampak penurunan kecepatan yang mempengaruhi *sailing days*. Secara keseluruhan, efisiensi energi kapal meningkat saat PTO *on*. Selain itu, analisis kelayakan investasi membuktikan bahwa investasi pada *shaft generator* layak untuk diterapkan, terutama pada kapal dengan rute pelayaran jarak jauh dan jam operasional tahunan yang tinggi.

Kata kunci: *Shaft Generator*, *Power Take-Off* (PTO), efisiensi bahan bakar, kelayakan investasi, *Very Large Gas Carrier* (VLGC)

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/yt7std05>

PENDAHULUAN

Efisiensi energi menjadi isu strategis dalam industri modern, baik untuk menekan dampak lingkungan maupun mengurangi biaya operasional yang pada akhirnya menentukan daya saing dan keberlanjutan bisnis. Hal ini sangat relevan bagi industri pelayaran yang berperan sebagai moda transportasi utama perdagangan global dengan mengangkut lebih dari 80% volume perdagangan dunia [1]. Meskipun pelayaran diakui sebagai moda transportasi kargo yang relatif efisien dan berkelanjutan dibandingkan moda transportasi lainnya, konsumsi bahan bakar yang sangat tinggi tetap menjadikannya penyumbang signifikan emisi gas rumah kaca (GHG) [2]. *International Maritime Organization* (IMO) memperkirakan bahwa emisi CO₂ dari sektor maritim dapat meningkat antara 50% hingga 250% pada tahun 2050 jika tidak dilakukan langkah mitigasi yang substansial [3]. Selain berdampak pada lingkungan, bahan bakar juga masih menyumbang sekitar 50–60% dari total biaya operasional kapal [4], sehingga pengendalian konsumsi bahan bakar merupakan faktor kunci dalam meningkatkan profitabilitas sekaligus memenuhi target keberlanjutan [5].

Salah satu teknologi yang menawarkan potensi besar dalam efisiensi energi dan pengurangan biaya operasional kapal adalah *marine shaft generator* (*shaft generator*). Secara sederhana, *shaft generator* adalah sistem yang terhubung dengan poros penggerak utama kapal dan dapat menghasilkan maupun memanfaatkan

tenaga listrik sesuai kebutuhan operasi. Sistem ini biasanya memiliki dua mode utama, yaitu *Power Take-Off* (PTO) dan *Power Take-In* (PTI) [6]. Pada mode PTO, *shaft generator* mengambil daya dari mesin utama untuk menghasilkan listrik bagi kebutuhan kapal, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada mesin bantu atau *auxiliary engine* berbahan bakar diesel [7]. Sebaliknya, pada mode PTI, sistem ini dapat memasok tenaga listrik tambahan untuk meningkatkan daya propulsi, misalnya dengan memanfaatkan *generator* atau baterai, sehingga memberikan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi [6]. Lebih lanjut, *shaft generator* juga dapat berkontribusi pada efisiensi energi saat kapal bermanuver di pelabuhan dengan menyediakan kebutuhan listrik tanpa harus menyalakan *auxiliary engine*.

Sejumlah penelitian terdahulu telah banyak membahas aspek teknis dari *shaft generator* yang meliputi; desain, tipe, optimasi sistem konverter, hingga strategi manajemen daya (*power management*) [8], [9], [10], [11]. Hasil studi menunjukkan bahwa strategi kontrol propulsi yang efisien dapat menghasilkan penghematan bahan bakar hingga 30% [12], sementara manajemen energi yang tepat dapat menurunkan emisi CO₂ sebesar 1–10% per ton-mil [13]. Meskipun demikian, kajian yang secara spesifik menilai dampak implementasi *shaft generator* terhadap konsumsi bahan bakar dan biaya operasional kapal masih terbatas [14].

Penerapan sistem hibrida yang mengkombinasikan *shaft generator* dalam mode *Power Take-Off* (PTO)

maupun *Power Take-In* (PTI) telah mulai diuji pada kapal angkatan laut, kapal tunda, maupun kapal penumpang [15]. Namun, implementasinya pada kapal kargo berukuran besar masih jarang diteliti, padahal jenis kapal inilah yang menjadi konsumen bahan bakar terbesar di sektor maritim [11]. Beberapa studi terbaru memang telah menganalisis penerapan *shaft generator* pada kapal LNG carrier dan produk tanker, dengan hasil yang menunjukkan peningkatan efisiensi bahan bakar serta pengurangan emisi CO₂ [6], [14], [16]. Namun, penelitian yang mengangkat kasus nyata kapal tipe *Very Large Gas Carrier* (VLGC) masih sangat terbatas, terutama dalam konteks evaluasi kuantitatif konsumsi bahan bakar dan analisis kelayakan investasinya.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, studi ini menawarkan kebaruan dalam bentuk analisis kuantitatif pengaruh penggunaan *shaft generator* pada mode PTO terhadap konsumsi bahan bakar *auxiliary engine* serta evaluasi kelayakan investasi pada kapal tipe VLGC. Fokus penelitian ini adalah pada sebuah kapal VLGC aktual milik salah satu perusahaan pelayaran internasional yang mana kapal tersebut telah dilakukan *retrofit* penambahan *shaft generator*. Dengan membatasi sumber daya kelistrikan hanya dari *auxiliary engine* dan *shaft generator*, penelitian ini memberikan gambaran lebih realistis mengenai penghematan bahan bakar serta implikasi ekonominya.

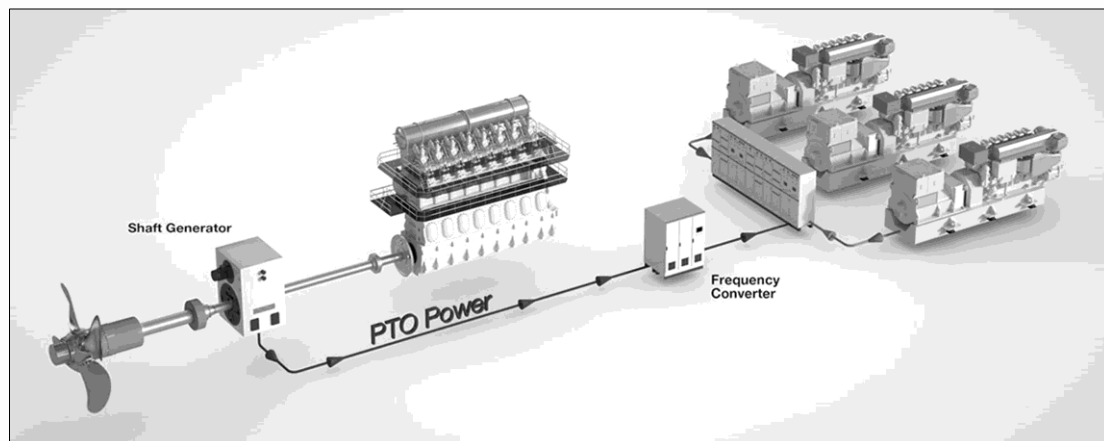
Secara metodologis, studi ini menggunakan data operasional kapal selama satu tahun penuh yang

dianalisis berdasarkan beberapa skenario penggunaan mesin utama, mesin bantu, dan *shaft generator* pada kondisi PTO aktif dan nonaktif. Efisiensi bahan bakar dihitung melalui pendekatan perbandingan konsumsi energi, sementara kelayakan investasi dievaluasi dengan indikator finansial umum, yaitu *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), *Benefit-Cost Ratio* (BCR), dan *Return on Investment* (ROI). Analisis dilakukan dengan asumsi kondisi perairan tenang (*calm water*) serta pendekatan kurva *Effective Horse Power* (EHP)–kecepatan dari kapal pembanding.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris dan praktis terkait potensi penerapan *shaft generator* pada kapal VLGC, baik dalam aspek teknis efisiensi energi maupun kelayakan investasinya, serta menjadi referensi bagi industri pelayaran dalam mengevaluasi strategi efisiensi bahan bakar jangka panjang.

METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik. Fokus penelitian adalah pada analisis efisiensi konsumsi bahan bakar serta kelayakan investasi penggunaan *shaft generator* dalam mode PTO. Gambar 1 menunjukkan skema mode PTO yang digunakan dalam penelitian [17]. Tahapan penelitian dideskripsikan dalam diagram alir penelitian seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Skema mode PTO [17]

Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan untuk kebutuhan penelitian termasuk data spesifikasi kapal meliputi data *principal dimension* kapal, spesifikasi *Main Engine* (ME), *Auxiliary Engine* (AE), dan *Shaft Generator* (SG) kapal. Selain itu, juga terdapat data operasional kapal meliputi kecepatan rata-rata kapal, *port time* dan *sailing days* kapal selama satu tahun, dan biaya *Capital Expenditure* (CAPEX) dan *Operational Expenditure* (OPEX) kapal selama periode operasional kapal.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui sumber internal perusahaan pelayaran pemilik kapal maupun sumber eksternal yaitu melalui jurnal ataupun penelitian terkait. Data *principal dimension* kapal, spesifikasi ME, AE, dan SG kapal dapat dilihat pada Tabel 1. Data operasional kapal dikumpulkan berdasarkan *log book* kapal dan laporan operasional selama periode 12 bulan terakhir dapat dilihat pada Tabel 2. Data biaya CAPEX yang diperlukan adalah biaya *shaft generator* dan biaya instalasinya diperoleh

dari internal perusahaan yaitu sebesar USD 2,160,000. Sementara untuk OPEX *shaft generator* meliputi biaya pemeliharaan dan *overhaul* berdasarkan *running hour* dalam satu tahun seperti terlihat pada Tabel 3.

Skenario Operasional Kapal

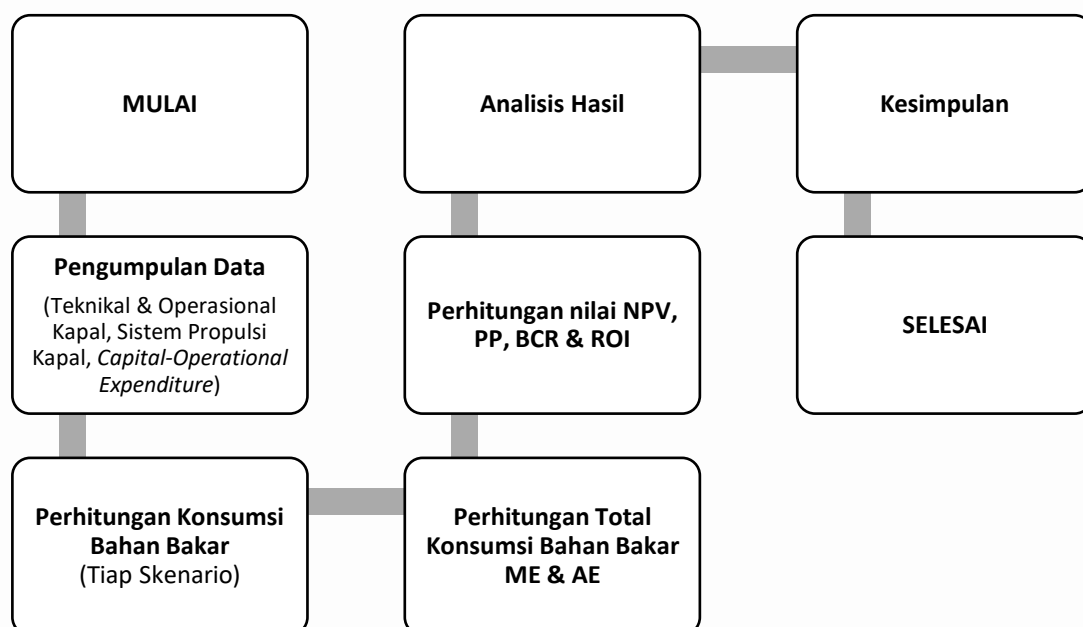
Penelitian dilakukan dengan menyusun skenario operasional kapal yang merepresentasikan variasi kondisi nyata di lapangan. Variasi ditetapkan pada beban *Main Engine* (ME), yaitu 90%, 80%, dan 75% dari daya nominal, yang menggambarkan operasi penuh, operasi ekonomis, dan operasi pada beban minimum. Untuk setiap variasi beban ME, disusun delapan kombinasi sistem kelistrikan berdasarkan distribusi daya antara *Auxiliary Engine* (AE) dan *shaft generator* (SG). Skenario tersebut dibagi ke dalam dua kondisi utama, yaitu dengan PTO *on*/aktif (SG beroperasi) dan PTO *off*/nonaktif (hanya AE yang beroperasi).

Kebutuhan daya listrik yang dihasilkan dari AE maupun SG divariasikan pada 4 nilai kebutuhan daya; 1000 kW, 2000 kW, 3000 kW dan 4000 kW, sehingga dihasilkan power load (%) pada AE maupun SG yaitu pada sekitar angka 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hal ini dilakukan untuk memungkinkan perbandingan langsung antara sistem kelistrikan konvensional

berbasis AE dengan sistem hibrida AE–SG. Dengan 4 nilai kebutuhan daya tersebut dan 2 variasi status PTO (*on* dan *off*), maka dihasilkan delapan kombinasi sistem kelistrikan berdasarkan distribusi daya antara AE dan SG. Dengan demikian, tiga variasi beban ME dan delapan kombinasi AE–SG, diperoleh total 24 skenario operasional seperti yang ditampilkan pada Tabel 4. Perlu diketahui bahwa skenario dengan nomor ganjil (misalnya skenario 1, 3, ..., 23) adalah skenario dengan status PTO *off*, sedangkan skenario dengan nomor genap (misalnya skenario 2, 4, ..., 24) adalah skenario dengan status PTO *on*.

Skenario Operasional Kapal

Penelitian dilakukan dengan menyusun skenario operasional kapal yang merepresentasikan variasi kondisi nyata di lapangan. Variasi ditetapkan pada beban *Main Engine* (ME), yaitu 90%, 80%, dan 75% dari daya nominal, yang menggambarkan operasi penuh, operasi ekonomis, dan operasi pada beban minimum. Untuk setiap variasi beban ME, disusun delapan kombinasi sistem kelistrikan berdasarkan distribusi daya antara *Auxiliary Engine* (AE) dan *shaft generator* (SG). Skenario tersebut dibagi ke dalam dua kondisi utama, yaitu dengan PTO *on*/aktif (SG beroperasi) dan PTO *off*/nonaktif (hanya AE yang beroperasi).



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Data *principal dimension* kapal, spesifikasi ME, AE, dan SG

Principal Dimension		
NAME	Anonymous	
Type of Ship	VLGC	
IMO NUMBER	9937074	
Year Built	2024	
<i>Length Overall</i> (LOA)	229,9	m
Breadth (B)	36,6	m
Height (H)	23,6	m
Draft (T)	12,22	m
Deadweight Tonnage (DWT)	58256,7	ton
Speed (Vs)	13,80	knot
Main Engine (ME)		
MCR	12980	kW
Nmc	97	RPM
SFOC	158	g/kWh
Auxiliary Engine (AE)		
Quantity, n	2	
Power, P	1975	kW
SFOC	190	g/kWh
Shaft Generator (SG)		
<i>PTO available</i>	2364	kW
n	95	RPM
S	3111	kVA
f	12,35	Hz
<i>PTO efficiency rates</i>	0,917	

Tabel 2. Data operasional kapal

Trip	Pelabuhan	Tanggal Kedatangan	Tanggal Keberangkatan	Port Time (days)	Sailing Time (days)	Distance (NM)
-	Panama Canal Transit - Balboa, Panama	10/07/2024	10/07/2024	0	0	0
Trip 1	Balboa, Panama - Ningbo, Tiongkok	10/07/2024	10/07/2024	0	27	8571
Trip 2	Ningbo, Tiongkok - Houston, AS	06/08/2024	09/08/2024	3	51	10138
Trip 3	Houston, AS - Terneuzen, Belanda	29/09/2024	02/10/2024	3	18	5019
Trip 4	Terneuzen, Belanda - Port Louis, Mauritius	20/10/2024	25/10/2024	5	49	6964
Trip 5	Port Louis, Mauritius - Kalbut, Situbondo, ID	13/12/2024	15/12/2024	2	9	3390
Trip 6	Kalbut, Situbondo, ID - Houston, AS	24/12/2024	27/12/2024	3	43	11866
Trip 7	Houston, AS - Vlissingen, Belanda	08/02/2025	11/02/2025	3	16	5007
Trip 8	Vlissingen, Belanda - Antwerp, Belgia	27/02/2025	28/02/2025	1	6	50
Trip 9	Antwerp, Belgia - Houston, AS	06/03/2025	09/03/2025	3	27	5057
-	Houston, AS	05/04/2025	09/04/2025	4	0	0

Tabel 3. OPEX shaft generator

Item Biaya	Nominal Biaya (USD)
<i>Shaft generator Maintenance Price</i>	0,015/Kw
Inspection & Lubrication Price	1000
Harga BBM (VLSFO)	559,5/t

Tabel 4. Skenario operasional kapal berdasarkan variasi beban ME dan kombinasi AE-SG

Skenario	Power Load %				P (kW)	Status PTO (On / Off)
	ME	AE1	AE2	SG or PTO		
Scenario 1	90	25	25,63	0	1000	Off
Scenario 2	90	0	25	23,35	1000	On
Scenario 3	90	50	51,27	0	2000	Off
Scenario 4	90	0	50	46,71	2000	On
Scenario 5	90	75	76,90	0	3000	Off
Scenario 6	90	0	75	70,06	3000	On
Scenario 7	90	100	100	0	4000	Off
Scenario 8	90	0	100	91,11	4000	On
Scenario 9	80	25	25,63	0	1000	Off
Scenario 10	80	0	25	23,35	1000	On
Scenario 11	80	50	51,27	0	2000	Off
Scenario 12	80	0	50	46,71	2000	On
Scenario 13	80	75	76,90	0	3000	Off
Scenario 14	80	0	75	70,06	3000	On
Scenario 15	80	100	100	0	4000	Off
Scenario 16	80	0	100	91,11	4000	On
Scenario 17	75	25	25,63	0	1000	Off
Scenario 18	75	0	25	23,35	1000	On
Scenario 19	75	50	51,27	0	2000	Off
Scenario 20	75	0	50	46,71	2000	On
Scenario 21	75	75	76,90	0	3000	Off
Scenario 22	75	0	75	70,06	3000	On
Scenario 23	75	100	100	0	4000	Off
Scenario 24	75	0	100	91,11	4000	On

Kebutuhan daya listrik yang dihasilkan dari AE maupun SG divariasikan pada 4 nilai kebutuhan daya: 1000 kW, 2000 kW, 3000 kW, dan 4000 kW, sehingga dihasilkan power load (%) pada AE maupun SG yaitu sekitar angka 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hal ini dilakukan untuk memungkinkan perbandingan langsung antara sistem kelistrikan konvensional berbasis AE dengan sistem hibrida AE-SG. Dengan 4 nilai kebutuhan daya tersebut dan 2 variasi status PTO (*on* dan *off*), maka dihasilkan delapan kombinasi sistem kelistrikan berdasarkan distribusi daya antara AE dan SG. Dengan demikian, dari tiga variasi beban ME dan delapan kombinasi AE-SG, diperoleh total 24 skenario operasional seperti yang ditampilkan pada

Tabel 4. Perlu diketahui bahwa skenario dengan nomor ganjil (misalnya skenario 1, 3, ..., 23) adalah skenario dengan status PTO *off*, sedangkan skenario dengan nomor genap (misalnya skenario 2, 4, ..., 24) adalah skenario dengan status PTO *on*.

Menghitung Konsumsi Bahan Bakar Setiap Skenario dan Konsumsi Bahan Bakar Total

Untuk setiap skenario, dilakukan beberapa perhitungan teknis untuk mendapatkan besar konsumsi bahan bakar. Perhitungan dilakukan berdasarkan data teknis kapal, karakteristik mesin, serta rujukan dari literatur yang relevan. Analisis komparatif kemudian digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana implementasi *shaft generator* dalam mode PTO dapat

meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar. Perhitungan teknis untuk mendapatkan besar konsumsi

bahan bakar diawali dengan perhitungan daya output untuk ME, AE dan SG menggunakan persamaan 1 - 3.

$$P_{ME} = ME\% \times P_{MCR} \quad (1)$$

$$P_{AE} = AE\% \times P \quad (2)$$

$$P_{SG} = SG\% \times PTO_{avl} \times \eta_{SG} \quad (3)$$

Dimana, P_{ME} , P_{AE} , P_{SG} adalah masing-masing daya keluaran ME, AE dan SG. Untuk $ME\%$, $AE\%$, $SG\%$ adalah masing-masing persentase penggunaan ME, AE dan SG. Untuk P_{MCR} , P adalah masing-masing daya maksimum dari ME dan AE kapal. Sementara untuk

PTO_{avl} dan η_{SG} adalah daya tersedia yang dapat diserap oleh SG dan efisiensi SG. Setelah memperoleh daya output, langkah selanjutnya adalah menghitung konsumsi bahan bakar per jam pada setiap skenario operasional kapal menggunakan persamaan 4.

$$FOC_{(t/h)} = (P_{ME} \times SFOC_{ME}) + (P_{AE1} \times SFOC_{AE}) + (P_{AE2} \times SFOC_{AE}) \quad (4)$$

Dimana $FOC_{(t/h)}$ adalah konsumsi bahan bakar per jam untuk setiap skenario operasional kapal dan $SFOC$ adalah gram konsumsi bahan bakar tiap kWh dari ME maupun AE. Konsumsi bahan bakar ini kemudian dijadikan dasar untuk perhitungan konsumsi total dalam periode operasi yang lebih panjang.

Untuk menentukan kecepatan kapal pada setiap skenario, dilakukan perhitungan *Effective Horse Power (EHP)* berdasarkan *Brake Horse Power (BHP)* yang tersedia dengan mempertimbangkan efisiensi transmisi daya dari mesin ke propeller serta *losses* yang terjadi dalam sistem propulsi seperti pada persamaan 5.

$$SHP = BHP \times \eta_{gear} \quad (5)$$

Dimana, SHP adalah daya yang ditransmisikan oleh *shaft* ke *propeller*, BHP adalah daya yang keluar dari mesin utama, dan η_{gear} adalah efisiensi mekanis

mesin. Setelah mendapatkan nilai SHP , nilai EHP dihitung dengan persamaan 6.

$$EHP = \eta_{gear} \times \eta_{shaft} \times \eta_{propeller} \times \eta_{hull} \times SHP \quad (6)$$

Dimana η_{shaft} , $\eta_{propeller}$, η_{hull} adalah masing-masing efisiensi *shaft*, efisiensi *propeller*, dan efisiensi lambung kapal. Nilai EHP yang diperoleh berguna dalam menghitung kecepatan kapal dengan menggunakan pendekatan interpolasi antara kesepatan dan EHP dari kapal pembanding. Kecepatan kapal yang didapatkan diperlukan untuk menentukan total jam operasi (waktu pelayaran) dalam satu *voyage*.

Konsumsi bahan bakar untuk setiap *voyage* kemudian dihitung dengan mengalikan konsumsi

bahan bakar per jam dengan total jam operasi dalam *voyage*. Jam operasi kapal mempertimbangkan berbagai fase operasi termasuk *departure*, *cruising*, *maneuvering*, dan *berthing*. Total jam operasi dihitung berdasarkan jarak tempuh, kecepatan rata-rata, dan waktu tambahan untuk operasi di pelabuhan. Setiap skenario memiliki profil operasi yang berbeda sehingga menghasilkan total jam operasi yang bervariasi. Konsumsi bahan bakar untuk setiap *voyage* dihitung menggunakan persamaan 7.

$$FOC_{(t)} = \left(FOC_{\left(\frac{t}{h}\right)} \times t_{sailing} \right) + (FOC_{AE} \times t_{berthing}) \quad (7)$$

Dimana, $FOC_{(t)}$ adalah konsumsi bahan bakar di tiap *voyage*, $t_{sailing}$ adalah waktu berlayar kapal, FOC_{AE} adalah konsumsi bahan bakar AE kapal, dan $t_{berthing}$ adalah lama waktu *berthing* kapal.

Konsumsi bahan bakar total untuk seluruh *voyage* dalam satu tahun dihitung dengan mengalikan

konsumsi bahan bakar setiap *voyage* dengan frekuensi pelayaran tahunan. Perhitungan ini memberikan gambaran menyeluruh tentang kebutuhan bahan bakar operasional kapal dalam periode satu tahun untuk setiap skenario yang diteliti. Konsumsi bahan bakar total untuk seluruh *voyage* dihitung menggunakan persamaan 8.

$$FOC_{total} = \sum FOC_{(t)} \quad (8)$$

Dimana, FOC_{total} adalah konsumsi bahan bakar total dari seluruh *voyage* dalam satu tahun untuk setiap skenario. Konsumsi bahan bakar dalam satu tahun ini menjadi dasar untuk menganalisa *fuel consumption* dan *fuel savings* antar skenario. Perbandingan konsumsi bahan bakar memberikan informasi penting mengenai efisiensi relatif dari setiap alternatif operasional.

Menghitung Kelayakan Investasi Shaft Generator

Langkah pertama dalam analisa kelayakan investasi SG adalah menghitung aliran kas bersih (*net cash flow*)

untuk setiap tahun selama periode analisa. Aliran kas bersih diperoleh dengan mengurangi total pengeluaran dari total pendapatan. Komponen pendapatan meliputi penghematan biaya operasional yang diperoleh dari efisiensi bahan bakar, dan pengurangan *maintenance* AE untuk skenario PTO on. Sementara komponen pengeluaran mencakup biaya investasi awal untuk tahun ke-0 dan biaya pemeliharaan SG. Aliran kas bersih tahunan dapat dihitung menggunakan persamaan 9.

$$C_t = (fuel\ sav. + AE\ maint.\ sav.) - SG\ maint.\ price \quad (9)$$

Dimana, C_t adalah aliran kas bersih tiap tahun mulai dari tahun pertama, *fuel sav.* adalah penghematan bahan bakar terhadap skenario normal kapal, *AE maint. sav.* adalah penghematan dari *maintenance* AE, dan *SG maint. price* adalah biaya *maintenance* dari SG.

Untuk mempertimbangkan nilai waktu dari uang, setiap aliran kas tahunan dikonversi menjadi *present value* menggunakan *discount rate* sebesar 8%. Pemilihan *discount rate* ini didasarkan pada tingkat suku bunga yang berlaku dan tingkat risiko investasi di sektor maritim. *Present value* dihitung menggunakan persamaan 10.

$$PV = \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (10)$$

Dimana, PV adalah nilai *present value*, r adalah besar *discount rate*, dan t adalah tahun ke- n dari perhitungan. Sedangkan untuk *Net Present Value* (NPV) dihitung dengan menjumlahkan seluruh PV dari aliran kas bersih selama periode analisis dikurangi dengan investasi awal. NPV memberikan indikasi nilai absolut dari keuntungan atau kerugian yang dihasilkan oleh setiap skenario dalam nilai PV . Skenario dengan NPV positif menunjukkan bahwa investasi tersebut layak secara ekonomis, sementara NPV negatif mengindikasikan bahwa investasi tidak menguntungkan. Perbandingan NPV antar skenario membantu dalam pemilihan alternatif terbaik.

Benefit Cost Ratio (BCR) dihitung dengan membagi total *present value* dari *benefit* dengan total *present value* dari *cost*. BCR memberikan indikasi efisiensi investasi dengan menunjukkan seberapa besar *benefit* yang dihasilkan untuk setiap unit *cost* yang dikeluarkan. BCR yang lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa *benefit* melebihi *cost*, sehingga investasi layak untuk dilaksanakan. Semakin tinggi nilai BCR , semakin efisien investasi tersebut dari perspektif perbandingan *benefit* dan *cost*.

Return on Investment (ROI) dihitung untuk mengevaluasi tingkat pengembalian yang dihasilkan oleh setiap skenario investasi. ROI memberikan informasi tentang persentase keuntungan yang

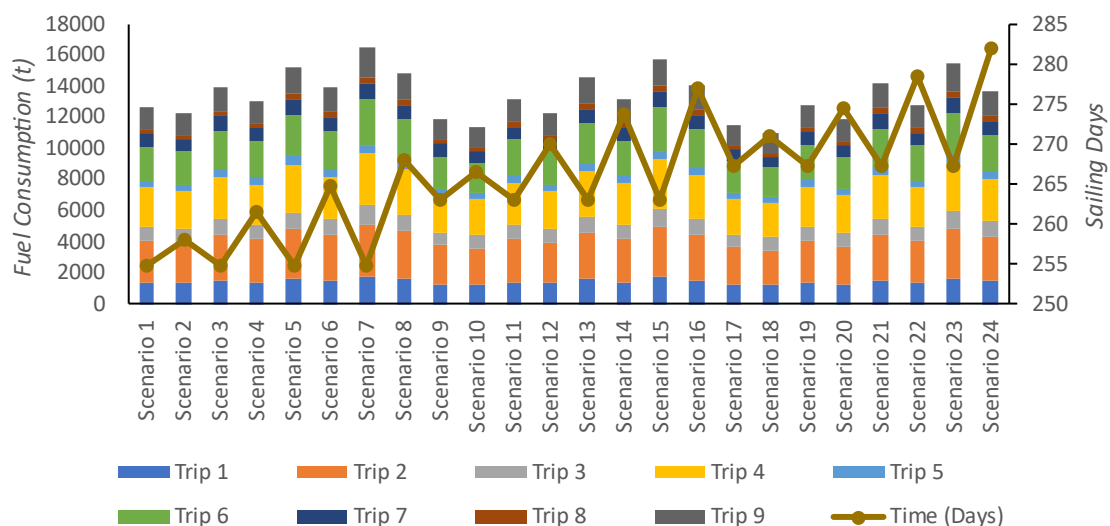
diperoleh relatif terhadap nilai investasi awal. Perhitungan *ROI* mempertimbangkan seluruh aliran kas selama periode analisa dan memberikan indikasi yang mudah dipahami tentang profitabilitas investasi. *ROI* yang lebih tinggi menunjukkan tingkat pengembalian yang lebih menarik..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar

Dari hasil perhitungan yang dilakukan, diperoleh konsumsi bahan bakar untuk setiap skenario operasional kapal (skenario 1 – 24). Gambar 3 menunjukkan konsumsi bahan bakar untuk masing-masing skenario pada setiap trip/voyage kapal. Selain itu juga ditampilkan waktu *sailing days* atau lama kapal berlayar. Skenario dengan nomor ganjil merupakan skenario dengan status PTO *off*, sedangkan

skenario dengan nomor genap merupakan skenario dengan status PTO *on*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa konsumsi bahan bakar pada skenario dengan status PTO *on* selalu lebih rendah dibandingkan dengan skenario dengan status PTO *off*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan SG di kapal dapat menurunkan konsumsi bahan bakar. Walaupun demikian, jika melihat waktu *sailing days*, skenario dengan status PTO *on* membuat waktu *sailing days* menjadi lebih lama dibandingkan dengan skenario dengan status PTO *off*. Hal ini diakibatkan karena sejumlah daya dari *shaft* atau *SHP* dimanfaatkan sistem SG untuk menghasilkan energi listrik bagi kebutuhan kapal. Peningkatan waktu *sailing days* ini adalah akibat penurunan daya *SHP* sampai ke *SHP* yang berdampak pada penurunan kecepatan kapal.



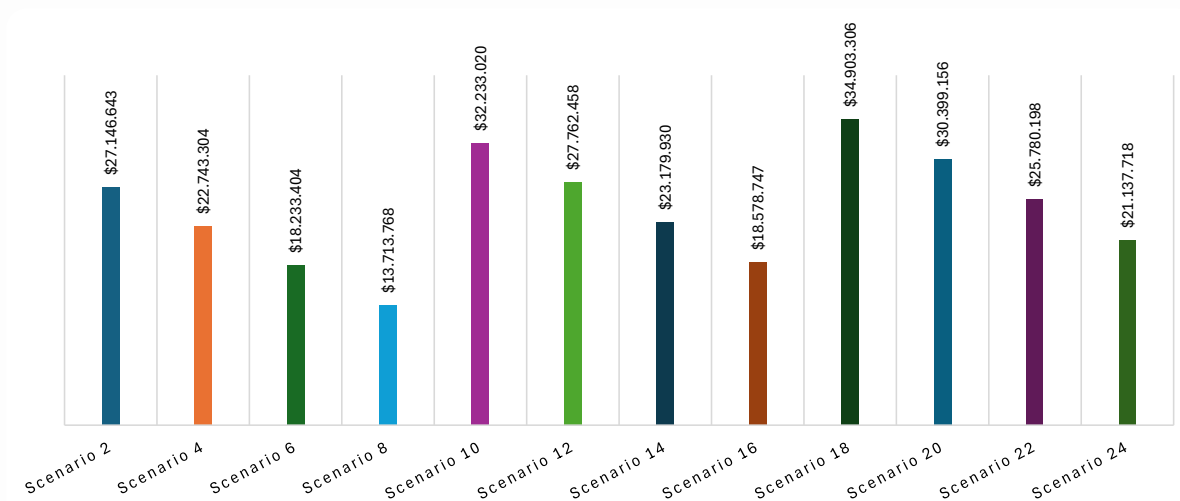
Gambar 3. Konsumsi bahan bakar dan *sailing days*

Hal tersebut menunjukkan adanya *trade-off* antara efisiensi energi yang dihasilkan dan waktu *sailing days*.

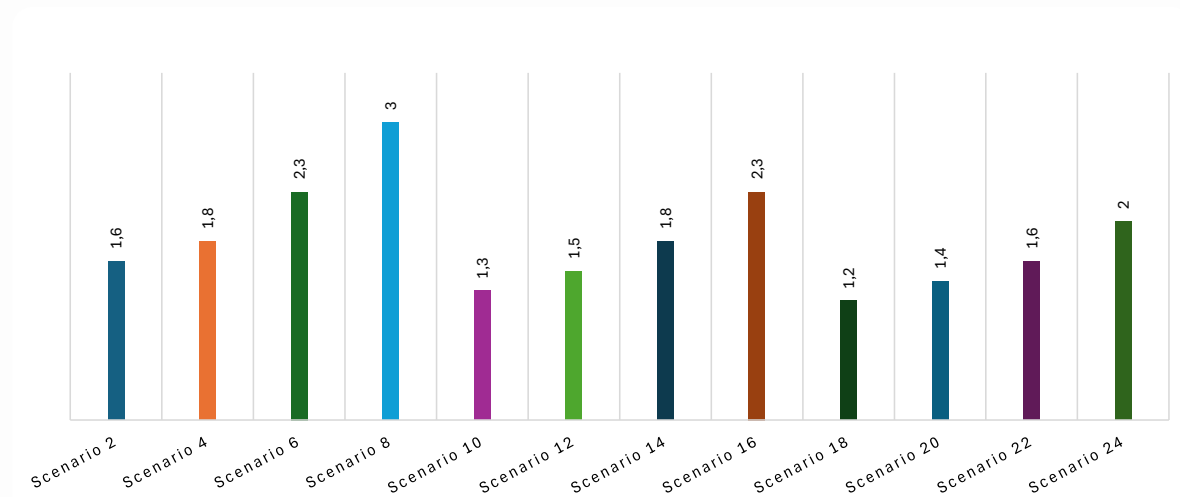
Rata-rata efisiensi energi yang bisa didapatkan dari skenario PTO *on* adalah sekitar 1242 ton. Jumlah ini sangat signifikan dari sisi ekonomi. Sementara untuk *sailing days*, walaupun dengan skenario PTO *on* menghasilkan waktu *sailing days* yang lebih lama, rata-rata kenaikan waktunya adalah sekitar 8,7 hari. Kenaikan waktu *sailing days* ini untuk kapal dengan rute pelayaran jarak jauh dan jam operasional tahunan yang tinggi dianggap masih dalam batas normal. Walau terdapat *trade-off* antara efisiensi energi yang dihasilkan dan waktu *sailing days*, jumlah efisiensi bahan bakar yang dihasilkan dari PTO *on* tersebut masih jauh lebih menguntungkan.

Hasil Analisis Kelayakan Investasi Shaft Generator

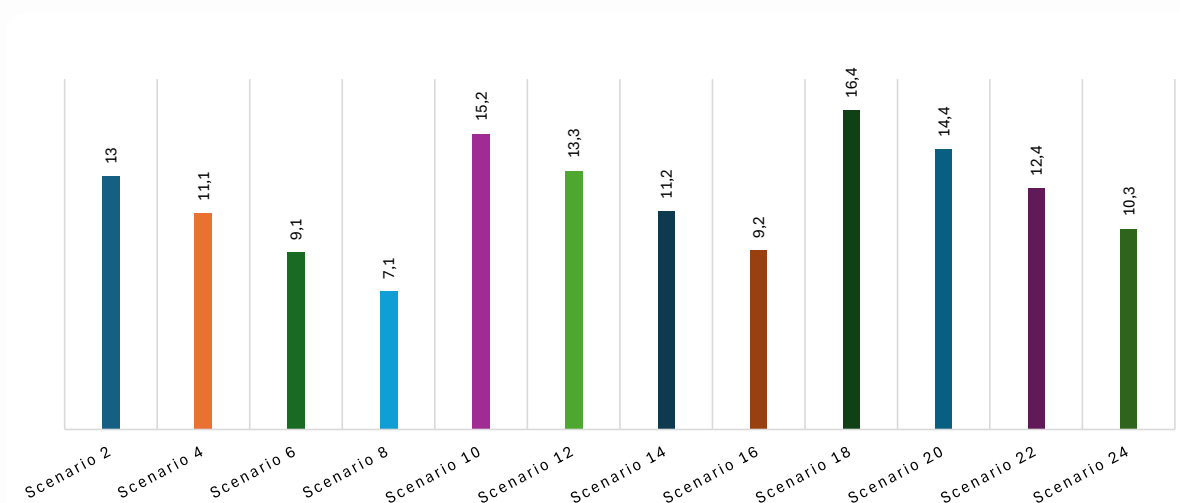
Analisis kelayakan investasi SG dilakukan dengan menganalisis nilai *NPV*, *PP*, *BCR*, dan *ROI*. Gambar 4 memperlihatkan hasil perhitungan nilai *NPV* pada kondisi skenario dengan status PTO *on* (skenario nomor genap). Dari hasil tersebut terlihat bahwa skenario 18 menghasilkan nilai *NPV* yang lebih besar dibandingkan dengan skenario lainnya. Skenario 18 merupakan skenario dengan konfigurasi penggunaan ME 75%, AE 25%, dan PTO 23,35%, berarti bahwa konfigurasi tersebut memberikan tingkat manfaat finansial tertinggi dibandingkan dengan konfigurasi pada skenario lain.



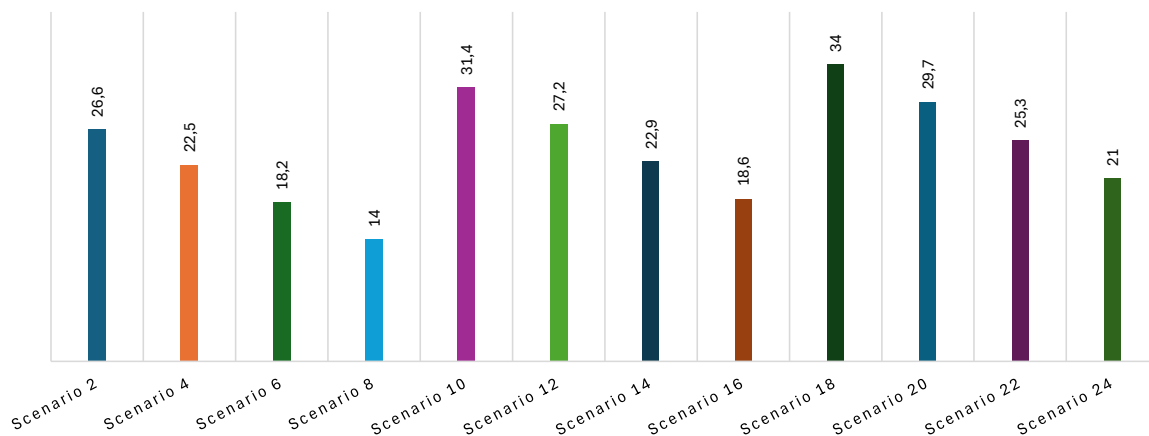
Gambar 4. *Net Present Value (NPV)* investasi SG pada berbagai skenario operasional (dalam USD)



Gambar 5. *Payback Period (PP)* investasi SG pada berbagai skenario operasional (dalam tahun)



Gambar 6. *Benefit-Cost Ratio (BCR)* investasi SG pada berbagai skenario operasional



Gambar 7. *Return on Investment (ROI)* investasi SG pada berbagai skenario operasional (dalam %)

Dari sisi *Payback Period (PP)*, rata-rata *PP* yang dihasilkan berkisar pada 1,8 tahun. Gambar 5 memperlihatkan hasil perhitungan *PP* pada kondisi skenario dengan status PTO *on*. Waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal SG dari arus kas bersih dinilai cukup rendah. Hal ini wajar mengingat jumlah efisiensi energi (sebagai *cash in* pada arus kas) membantu pengembalian investasi awal SG. Dari gambar terlihat bahwa skenario 18 menghasilkan nilai *PP* yang paling kecil (1,2 tahun). Sekali lagi, skenario 18 merupakan skenario dengan konfigurasi penggunaan ME 75%, AE 25%, dan PTO 23,35%, berarti bahwa konfigurasi tersebut memberikan waktu pengembalian investasi SG yang lebih cepat dibandingkan konfigurasi pada skenario lain.

Untuk hasil perhitungan *Benefit-Cost Ratio (BCR)* dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan hasil perhitungan nilai *BCR* pada setiap skenario, seluruh skenario yang ditinjau menunjukkan nilai *BCR* lebih besar dari satu, sehingga dapat disimpulkan bahwa implementasi SG secara umum layak secara finansial. Namun demikian, tingkat kelayakannya bervariasi cukup signifikan antar skenario. Skenario 18 menempati posisi tertinggi dengan nilai *BCR* sebesar 16,4, yang berarti setiap satu satuan biaya yang dikeluarkan mampu menghasilkan manfaat hingga 16,4 kali lipat. Kondisi ini menjadikan skenario 18 sebagai pilihan paling optimal dari sisi rasio manfaat terhadap biaya.

Untuk hasil perhitungan *Return on Investment (ROI)* dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan hasil perhitungan *ROI* pada setiap skenario, terlihat bahwa seluruh skenario memberikan nilai positif, yang menunjukkan bahwa investasi SG menghasilkan tingkat pengembalian yang layak. Namun demikian, tingkat *ROI* bervariasi cukup besar antar skenario. Skenario 18 menjadi yang paling unggul dengan nilai *ROI* sebesar 34%, menegaskan bahwa skenario ini

memberikan tingkat keuntungan relatif terhadap biaya investasi yang paling tinggi dibandingkan skenario lainnya.

Analisis kelayakan investasi *shaft generator (SG)* menunjukkan bahwa seluruh indikator finansial yang ditinjau—*Net Present Value (NPV)*, *Payback Period (PP)*, *Benefit-Cost Ratio (BCR)*, dan *Return on Investment (ROI)*—memberikan hasil positif dan menegaskan bahwa implementasi SG layak secara ekonomi. Hasil perhitungan *NPV* memperlihatkan bahwa skenario 18 dengan konfigurasi penggunaan *Main Engine (ME)* 75%, *Auxiliary Engine (AE)* 25%, dan *Power Take-Off (PTO)* 23,35% menghasilkan nilai *NPV* tertinggi dibandingkan skenario lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut mampu memberikan tingkat manfaat finansial terbesar sepanjang umur investasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, implementasi *shaft generator* terbukti secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar *auxiliary engine (AE)*. Pemanfaatan energi mekanis dari *main engine (ME)* melalui mode *Power Take-Off (PTO)*, terbukti meningkatkan efisiensi energi, terutama pada rute pelayaran panjang. Hal ini juga berdampak pada penurunan biaya operasional tahunan secara keseluruhan, meskipun ada peningkatan *sailing days* yang berdampak juga pada biaya *maintenance shaft generator* akibat jam operasi yang lebih tinggi.

Dari analisis investasi menunjukkan bahwa skenario dengan proporsi penggunaan ME 75%, AE 25%, dan PTO 23,35% memberikan hasil terbaik dengan konsumsi bahan bakar terendah. Nilai *Net Present Value (NPV)* yang besar, *Return of Investment (ROI)* yang besar, dan *Benefit Cost Ratio (BCR)* positif, serta *Payback Period (PP)* yang lebih pendek dari umur ekonomis sistem, menjadikannya pilihan paling optimal secara finansial.

Studi ini memiliki keterbatasan karena hanya fokus pada satu tipe kapal (VLGC) dan mode PTO saja, tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti fluktuasi harga bahan bakar dan kebijakan pelabuhan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mencakup beberapa opsi jenis kapal dan seluruh mode operasi *shaft generator*. Kajian lebih dalam juga dapat dilakukan melalui integrasi dengan teknologi energi terbarukan serta mempertimbangkan aspek sosial-ekonomi serta regulasi lingkungan guna mendukung pengembangan sistem propulsi kapal yang adaptif dan relevan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menuliskan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penelitian yang dipublikasikan dalam jurnal ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama berkontribusi dalam konseptualisasi penelitian, perumusan tujuan, penyusunan metodologi, serta penulisan *draft*. Penulis kedua bertanggung jawab pada pengumpulan data, pengolahan informasi, dan pelaksanaan analisis kuantitatif. Penulis ketiga berperan dalam kajian literatur, validasi hasil, serta penyusunan pembahasan. Penulis keempat memberikan arahan konseptual, serta melakukan peninjauan dan penyuntingan naskah hingga versi akhir. Seluruh penulis membaca dan menyetujui naskah akhir untuk dipublikasikan.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan secara independen tanpa menerima dukungan pendanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] UNCTAD, "Review of Maritime Transport 2017." Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2017>
- [2] Ø. Endresen *et al.*, "Emission from international sea transportation and environmental impact," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108, no. D17, Sep. 2003, doi: 10.1029/2002JD002898.
- [3] International Maritime Organization, "Fourth Greenhouse Gas Study 2020." Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>
- [4] L. P. Perera, B. Mo, L. A. Kristjánsson, P. Chr. Jönvik, and J. Ø. Svandal, "Evaluations on Ship Performance Under Varying Operational Conditions," in *Volume 7: Ocean Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, May 2015. doi: 10.1115/OMAE2015-41793.
- [5] K. Andersson, F. Baldi, S. Brynolf, J. F. Lindgren, L. Granhag, and E. Svensson, "Shipping and the Environment," in *Shipping and the Environment*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 3–27. doi: 10.1007/978-3-662-49045-7_1.
- [6] Eemi Rautiainen, "Fuel savings and emission reduction in large ocean-going vessels by using permanent magnet shaft generators," University of Vaasa, 2004. Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://osuva.uwasa.fi/items/c1dd75bd-44ae-4cf7-9f20-8b1654daefde>
- [7] C. Sui, P. de Vos, D. Stapersma, K. Visser, and Y. Ding, "Fuel Consumption and Emissions of Ocean-Going Cargo Ship with Hybrid Propulsion and Different Fuels over Voyage," *J Mar Sci Eng*, vol. 8, no. 8, p. 588, Aug. 2020, doi: 10.3390/jmse8080588.
- [8] J. Prousalidis, C. Patsios, F. Kanellos, A. Sarigiannidis, N. Tsekouras, and G. Antonopoulos, "Exploiting shaft generators to improve ship efficiency," in *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, IEEE, Oct. 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/ESARS.2012.6387443.
- [9] Mateusz Dziuba, "Permanent Magnet Synchronous Generators in marine applications." Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://vesselautomation.com/permanent-magnet-synchronous-generators-in-marine-applications-interview-with-expert-dr-jussi-puranen/>
- [10] A. G. Sarigiannidis, E. Chatzinikolaou, C. Patsios, and A. G. Kladas, "Shaft Generator System Design and Ship Operation Improvement Involving SFOC Minimization, Electric Grid Conditioning, and Auxiliary Propulsion," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 558–569, Dec. 2016, doi: 10.1109/TTE.2016.2614999.
- [11] R. D. Geertsma, K. Visser, and R. R. Negenborn, "Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion," *Appl Energy*, vol. 228, pp. 2490–2509, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.
- [12] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, M. A. Loonstijn, and J. J. Hopman, "Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modelling, validation and performance quantification," *Appl Energy*, vol. 206, pp. 1609–1631, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.103.
- [13] International Maritime Organization, "Second IMO Greenhouse Gas Study 2009." Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/greenhouse-gas-study-2009.aspx>
- [14] A. Souflis-Rigas, J. Prousalidis, and G. Dimopoulos, "Assessing the implementation of Power Take Off (PTO) system onboard Liquefied Natural Gas (LNG) carriers," in *2021 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, IEEE, Aug. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/ESTS49166.2021.9512353.
- [15] S. Jafarzadeh and I. Schjøberg, "Operational profiles of ships in Norwegian waters: An activity-based approach to assess the benefits of hybrid and electric propulsion," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 65, pp. 500–523, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.09.021.

- [16] K. Gkotzia, G. J. Tsekouras, F. D. Kanellos, P. Michalopoulos, J. M. Prousalidis, and N. E. Mastorakis, "Shaft-Generators in Ships: Techno-Economic Sensitivity Analysis Study," in *2016 Third International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*, IEEE, Aug. 2016, pp. 20–25. doi: 10.1109/MCSI.2016.015.
- [17] Wartsila, "Shaft Generator Systems." Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shaft-generator>