

PERANCANGAN KAPAL RAMAH LINGKUNGAN BERBASIS ENERGI HYBRID (DIESEL-LISTRIK)

Ramdhani Yusli Arbain Sugoro^{1*}, Moh. Hafidz Efendy², Anjelita Maharani Balqis³

^{1,2,3} Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia
e-mail: *¹ramdhanyy@uis.ac.id

Abstrak

Emisi dan konsumsi bahan bakar kapal feri cepat perlu ditekan seiring ketatnya regulasi lingkungan. Penelitian ini merancang sistem propulsi hybrid diesel-listrik untuk kapal feri penumpang 150 orang rute Batam–Singapura milik PT Batam Fast Ferry, Sekupang, Batam. Desain mengintegrasikan mesin diesel Tier III (2×1.200 kW), motor listrik PM (2×400 kW), baterai LFP 200 kWh/800 VDC, dan Energy Management System (EMS) berbasis algoritma prediktif, yang dimodelkan di MATLAB/Simulink R2024a. Simulasi operasi 8 jam menunjukkan penghematan bahan bakar 22,4%, reduksi NO_x 31,7%, SO_x 18,2%, dan CO₂ 19,8%. State of charge (SoC) baterai berkisar dari 80% pada awal operasi, minimum 42%, dan 68% pada akhir operasi, dengan depth of discharge rata-rata 18% per trip yang memprediksi umur baterai lebih dari 3.000 siklus (8 tahun). Analisis keuangan menghasilkan CAPEX Rp 8,4 miliar, payback period 3,35 tahun, NPV Rp 8,47 miliar (10 tahun, DR 8%), dan IRR 28,6%. Rancangan kompatibel dengan ZEZ Singapura 2027.

Kata kunci : kapal hybrid; propulsi diesel-listrik; baterai LFP; emisi kapal; EMS

Abstract

Emissions and fuel consumption of fast ferries must be reduced as environmental regulations tighten. This study designs a diesel-electric hybrid propulsion system for a 150-passenger ferry on the Batam–Singapore route owned by PT Batam Fast Ferry, Sekupang, Batam. The design integrates Tier III diesel engines ($2 \times 1,200$ kW), PM electric motors (2×400 kW), a 200 kWh/800 VDC LFP battery, and a predictive Energy Management System (EMS), modeled in MATLAB/Simulink R2024a. An 8-hour operating simulation shows 22.4% fuel savings and reductions of 31.7% in NO_x, 18.2% in SO_x, and 19.8% in CO₂. Battery state of charge (SoC) ranges from 80% at the start, a minimum of 42%, and 68% at the end, with an average depth of discharge of 18% per trip, predicting a battery life of more than 3,000 cycles (8 years). Financial analysis gives a CAPEX of IDR 8.4 billion, a payback period of 3.35 years, an NPV of IDR 8.47 billion (10 years, DR 8%), and an IRR of 28.6%. The design is compatible with Singapore ZEZ 2027.

Keywords : hybrid ship; diesel-electric propulsion; LFP battery; ship emissions; EMS

1. PENDAHULUAN

Transportasi laut menyumbang emisi gas rumah kaca dan polutan udara yang diatur melalui berbagai regulasi internasional (IMO, 2020). Salah satu upaya menurunkan emisi adalah menggunakan sistem propulsi *hybrid* yang memadukan mesin diesel dengan motor listrik dan baterai, sehingga mesin dapat beroperasi di titik yang lebih efisien (Kim et al., 2019; Sulligoi et al., 2016).

Kapal feri rute Batam–Singapura beroperasi dengan profil perjalanan yang berulang dan menuju pelabuhan yang semakin ketat terhadap emisi. Karena itu sistem *hybrid* berpotensi menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi pada rute ini (Tsekouras et al., 2014; Baldi et al., 2018).

Penelitian ini bertujuan merancang sistem propulsi *hybrid* diesel-listrik untuk kapal feri penumpang 150 orang milik PT Batam Fast Ferry, mengevaluasi kinerja emisi dan konsumsi bahan bakarnya melalui simulasi, serta menilai kelayakan finansialnya.

2. METODE PENELITIAN

Objek dan Data

Objek penelitian adalah kapal feri penumpang 150 orang rute Batam–Singapura milik PT Batam Fast Ferry, Sekupang, Batam. Data operasional kapal eksisting, konsumsi bahan bakar aktual, dan profil perjalanan diperoleh dari mitra. Sebagian data baterai LFP kelas maritim berasal dari literatur karena keterbatasan akses data produsen.

Pemodelan dan Simulasi

Pemodelan dilakukan di MATLAB/Simulink R2024a dengan *library* SimPowerSystems dan Simscape Powertrain Blockset. Simulasi dilakukan selama 8 jam operasi untuk membandingkan sistem diesel konvensional dengan sistem *hybrid*.

Strategi Pengendalian Energi

EMS menggunakan *Rule-Based Control* (RBC) dengan lapisan optimasi *dynamic programming* untuk mengatur pembagian daya antara mesin diesel dan baterai.

Analisis Keuangan

Kelayakan finansial dinilai dengan CAPEX, *payback period*, NPV selama 10 tahun pada *discount rate* 8%, dan IRR.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Sistem Propulsi Hybrid

Tabel 1. Spesifikasi sistem propulsi hybrid

Komponen	Spesifikasi
Mesin diesel	2 × 1.200 kW @ 1.800 rpm (Cummins QSK60, Tier III)
Motor listrik	2 × 400 kW (Permanent Magnet Synchronous Motor)
Generator diesel (auxiliary)	1 × 350 kW
Baterai LFP	200 kWh, 800 VDC
Inverter/konverter	2 × 500 kVA berbasis IGBT, efisiensi 97%
Propeller	CPP, D = 1,45 m, Z = 5 (<i>Controllable Pitch</i>)

Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi

Tabel 2. Perbandingan emisi dan konsumsi – diesel dan hybrid

Parameter	Diesel	Hybrid	Perubahan
Konsumsi BBM per trip (L)	480	372	–22,4%
Emisi CO ₂ per trip (kg)	1.267	1.016	–19,8%
Emisi NO _x (g/kWh)	12,4	8,5	–31,7%
Emisi SO _x (g/kWh)	0,28	0,23	–18,2%
Emisi PM _{2,5} (g/kWh)	0,15	0,09	–40,0%
Biaya BBM per hari (Rp)	25.920.000	20.088.000	–22,5%

Sistem *hybrid* menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 22,4% dan seluruh jenis emisi yang dianalisis, dengan penurunan terbesar pada PM_{2,5} (–40,0%) dan NO_x (–31,7%). Penurunan konsumsi bahan bakar juga menurunkan biaya bahan bakar harian dari Rp 25.920.000 menjadi Rp 20.088.000. Menurut hasil perancangan, sistem *hybrid* memenuhi regulasi IMO Tier III (NO_x ≤ 7,7 g/kWh di ECA) setelah integrasi SCR pada mesin diesel.

Kinerja Baterai

Pada simulasi 8 jam, SoC baterai dimulai dari 80%, turun hingga minimum 42% saat akselerasi penuh, dan berakhir pada 68%. *Depth of discharge* rata-rata sebesar 18% per trip memprediksi umur baterai lebih dari 3.000 siklus atau sekitar 8 tahun.

Kelayakan Finansial**Tabel 3.** Hasil analisis keuangan sistem hybrid

Indikator	Nilai
CAPEX	Rp 8,4 miliar
Payback period	3,35 tahun
NPV (10 tahun, DR 8%)	Rp 8,47 miliar
IRR	28,6%

Seluruh indikator menunjukkan bahwa investasi sistem *hybrid* layak secara finansial. Rancangan ini juga kompatibel dengan rencana ZEZ (*Zero Emission Zone*) Singapura 2027. Kendala penelitian adalah terbatasnya data spesifik produsen baterai LFP kelas maritim dan lamanya koordinasi dengan *Maritime and Port Authority of Singapore* (MPA) untuk verifikasi kesesuaian dengan regulasi ZEZ.

4. KESIMPULAN

1. Sistem propulsi *hybrid* diesel-listrik yang dirancang (diesel 2×1.200 kW, motor listrik 2×400 kW, baterai LFP 200 kWh) menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 22,4%.
2. Emisi turun pada seluruh parameter: NOx 31,7%, SOx 18,2%, CO₂ 19,8%, dan PM_{2,5} 40,0%.
3. Rancangan layak secara finansial dengan *payback period* 3,35 tahun, NPV Rp 8,47 miliar, dan IRR 28,6%.

5. SARAN

Berikut beberapa saran dari penelitian ini:

1. Perlu dikembangkan prototipe EMS skala laboratorium menggunakan simulasi *Hardware-in-the-Loop* (HiL).
2. Perlu dikaji integrasi panel surya pada atap superstruktur sebagai sumber energi terbarukan tambahan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

DAFTAR PUSTAKA

- Baldi, F., Ahlgren, F., et al. (2018). Energy and exergy analysis of a cruise ship. *Energies*, 11(10), 2508.
- DNV GL. (2021). *Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies*. Maritime Impact.
- IMO. (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020*. International Maritime Organization.
- Kim, K., Park, K., Roh, G., & Chun, K. (2019). Operational efficiency of parallel hybrid electric vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(2), 46.
- Skjong, E., et al. (2016). Past, present, and future challenges of the ship power system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 522–537.
- Sulligoi, G., Vicenzutti, A., & Menis, R. (2016). All-electric ship design. *IEEE Electrification Magazine*, 4(2), 46–55.
- Tsekouras, P., Kanellos, F. D., & Prousalidis, J. (2014). Operational carbon footprint of ships. *Proceedings of the ICE – Energy*, 167(2), 55–68.