

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan, analisis potensi, dan pembahasan mengenai implementasi sistem *Waste Heat Recovery* berbasis *Organic Rankine Cycle* (WHR-ORC) pada kapal kontainer MV Ever Obey, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama guna menjawab tujuan penelitian ini:

1. Sebelum penerapan teknologi terbarukan, kinerja energi MV Ever Obey (27.025 GT / 33.541 DWT) dievaluasi berdasarkan parameter IMO MARPOL Annex VI pada kondisi operasi mesin induk 70% MCR (10.612 kW) dan *Auxiliary Engine* (AE) 50% MCR. Hasil perhitungan menunjukkan nilai Attained EEXI awal sebesar 7,622 g-CO₂/t-mile yang berarti telah memenuhi batas ambang regulasi karena berada jauh di bawah nilai Required EEXI sebesar 17,16 g-CO₂/t-mile (untuk kategori kapal kontainer 15.000–40.000 DWT dengan faktor reduksi 20%). Hal ini membuktikan bahwa secara indeks desain teknis awal, kapal ini sebenarnya sudah mematuhi regulasi batas minimum yang diwajibkan oleh IMO.
2. Setelah diimplementasikan dengan teknologi sistem WHR-ORC (*Alfa Laval - Aalborg Marine System*) yang memanfaatkan gas buang mesin induk sebesar 245°C, dihasilkan daya konstan sebesar 572 kW selama jam operasi mesin. Berdasarkan profil operasional riil selama 12 bulan (total 5.619 jam operasi), sistem ini mampu menyuplai energi listrik untuk menggantikan (*offset*) beban kelistrikan AE yang beroperasi pada rata-rata 308 kW. Pemanfaatan daya sisa ini mereduksi beban kerja pembangkit daya bantu dan terbukti memberikan penghematan bahan bakar (*fuel saving*) serta penurunan emisi CO₂ bulanan yang signifikan dengan substitusi energi maksimal mencapai 295.724 kWh pada bulan ke-1 dan 292.292 kWh pada bulan ke-12. Integrasi ini berhasil menurunkan nilai Attained EEXI menjadi lebih rendah (lebih efisien) sekaligus mengamankan kepatuhan operasional jangka panjang kapal terhadap hukum maritim internasional.
3. Analisis penelitian ini mengonfirmasi bahwa teknologi WHR-ORC memiliki potensi pengembangan yang sangat tinggi untuk diterapkan pada armada kapal eksisting lainnya, khususnya kapal niaga besar dengan rute internasional jarak jauh yang stabil. Penggunaan fluida kerja R245fa terbukti optimal dan aman dalam mengonversi energi termal pada temperatur rendah–menengah (230–350 °C) dari gas buang menjadi daya listrik tanpa mengganggu performa sistem propulsi utama. Oleh karena itu, implementasi massal teknologi ini menjadi strategi mitigasi praktis yang sangat efektif untuk mendukung *Initial IMO GHG Strategy* dalam memangkas emisi gas rumah kaca global sebesar 2–3% dari sektor maritim.

5.1 Saran

Mengacu pada batasan penelitian yang telah ditetapkan serta hasil analisis yang diperoleh, berikut adalah beberapa saran yang direkomendasikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya di masa depan:

1. Analisis Tekno-Ekonomi: Perlu dilakukan perhitungan finansial komprehensif yang mencakup investasi modal awal (CAPEX), biaya operasional (OPEX), *Net Present Value*

- (NPV), serta *Payback Period* instalasi unit WHR-ORC untuk memberikan pertimbangan bisnis yang matang bagi pemilik kapal.
2. Perluasan Indikator Lingkungan: Disarankan untuk menganalisis indikator efisiensi operasional nyata seperti *Carbon Intensity Indicator* (CII) dan metode *Life Cycle Assessment* (LCA), guna melengkapi data EEXI yang hanya menilai efisiensi berbasis desain teknis.
 3. Optimasi Fluida Kerja: Diperlukan studi simulasi termodinamika lebih lanjut mengenai variasi fluida kerja organik selain R245fa yang memiliki efisiensi termal lebih tinggi serta nilai GWP dan ODP mendekati nol guna mengantisipasi regulasi lingkungan di masa depan.
 4. Validasi dan Integrasi Teknologi: Peneliti selanjutnya disarankan melakukan validasi melalui data eksperimen nyata atau simulasi *transient* pasca-retrofit, serta mengembangkan riset integrasi sistem WHR dengan teknologi hijau lain seperti *solar cell* atau *wind-assisted propulsion*.