

선박 폐열회수 시스템의 엔진 규모, 연료, 그리고 사이클별 편익 분석

김세규¹⁾ · 문정현²⁾ · 김현주³⁾ · 이덕주⁴⁾ · 문새다슬⁵⁾ · 이희연⁶⁾ · 유수정⁷⁾ · 김준한⁸⁾ · 최용석⁹⁾ · 오철¹⁰⁾ · 임승택^{11)*}

Analysis of Engine Scale, Fuel, and Cycle Benefits for Ship Waste Heat Recovery System

Se-Gyu Kim¹⁾ · Jung-Hyun Moon²⁾ · Hyeon-Ju Kim³⁾ · Deok-Joo Lee⁴⁾ · Sae-Da-Seul Moon⁵⁾ · Hee-Yeon Lee⁶⁾ · Soo-Jeong Yoon⁷⁾ · Joon-Han Kim⁸⁾ · Yong-Seok Choi⁹⁾ · Cheol Oh¹⁰⁾ · Seung-Taek Lim^{11)*}

Received 21 April 2026 Revised 14 May 2026 Accepted 26 May 2026 Published online 18 June 2026

ABSTRACT Here, we evaluated the benefits of applying an Organic Rankine Cycle-based waste heat recovery system (WHRS) to ships in response to EEXI/CII regulations of the International Maritime Organization and 2050 net-zero carbon emission target. Waste heat sources generated by the ships and the characteristics of each working fluid were analyzed; 170°C steam generated by the economizer was selected as the heat source, with R-1233zd(E) as the working fluid. Cycle performance with and without an internal heat exchanger was compared, and benefit equations for the WHRS application were derived. WHRS was applied considering US-UK as a regular ship; fuel consumption and carbon emission reductions per engine size and fuel type were summarized. Considering 10 operations annually, the 5S50ME engine with basic cycle on heavy fuel oil showed 89.93 ton/year fuel savings and 280 ton/year greenhouse gas reduction (total 61,501,115 KRW/year, lowest), whereas 7S50ME engine with internal heat exchanger cycle on ammonia achieved only 241.65 ton/year fuel savings (total 286,841,571 KRW/year, highest). Future analyses need to incorporate capital and operating expenditures, payback period, and benefit/cost ratio for a comprehensive economic assessment.

Key words Waste heat recovery system(폐열회수시스템), Organic rankine cycle(유기랭킨사이클), Benefit(편익), Fuel(연료)

1) Research Technician, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO)

2) Senior Engineer, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO)

3) Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO)

4) Professor, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

5) Professor, Department of Industrial Engineering, Kongju National University

6) Ph.D. Candidate, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

7) M.A. Candidate, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

8) Captain, Republic of Korea Army (ROKA)

9) Professor, Department of Marine Police, Korea Maritime & Ocean University

10) Professor, Department of Ship Systems Engineering, Korea Maritime & Ocean University

11) Researcher, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO)

*Corresponding author: limst@kriso.re.kr

Tel: +82-33-630-5023

Fax: +82-33-630-5005

Nomenclature

- B : benefit
- W : net power in waste heat recovery system
- SFC : specific fuel consumption
- H : hour of a single ship operation
- P : price
- C : correction factor
- i : engine load rate

Subscript

- ORC : organic rankine cycle
- K : fuel type
- CO₂ : carbon dioxide
- Fuel : fuel used on ships

1. 서론

전 세계 탄소 배출량의 약 3.4%는 해운 산업에서 발생하며, 이에 따라 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 글로벌 환경 문제의 심각성을 인식하고 탄소 배출 저감을 위한 다양한 정책을 추진하고 있다. 특히 IMO 해양환경보호위원회(MEPC, Marine Environment Protection Committee)는 2050년까지 해운 분야의 탄소 배출 감축 목표를 2008년 대비 50%에서 100%로 상향 조정하였으며, 향후 탄소 기반 연료 사용에 따른 부담금 부과 가능성도 제기되고 있다.^[1,2]

IMO는 2013년 신조선에 한해 시행되던 에너지효율설계 지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)의 적용 대상을 2023년부터 총톤수 400 GT 이상인 운항 선박으로 확대하여 선박에너지효율지수(EEXI, Energy Efficiency Existing Ship Index)를 도입하였다. 더불어 선박에너지효율관리계획서(SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan)는 탄소집약도지수(CII, Carbon Intensity Indicator)를 포함하는 SEEMP Part III 기준으로 강화되었다. 특히 CII 평가에서 3년 연속 D등급 또는 E등급을 부여받는 경우 운항이 제한되므로, 이는 선주사에 상당한 경제적 부담으로 작

용할 것으로 예상된다.^[3]

이와 같은 규제 강화에 대응하기 위하여 산·학·연에서는 친환경 선박으로의 전환을 목표로 저탄소·무탄소 추진 기술 개발뿐만 아니라, 선박 내 에너지 효율 향상을 위한 폐열회수설비(WHRS, Waste Heat Recovery System)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[4]

기존의 선박폐열 회수시스템은 주로 스팀터빈발전(STG, Steam Turbine Generator)과 파워터빈발전(PTG, Power Turbine Generator), 그리고 복합발전(STG-PTG, Steam & Power Turbine Generator)의 조합으로 구성되어 왔다. 그러나 선종의 다양화와 추진기관 기술의 고도화로 인해 기존 시스템의 경제성이 점차 저하되고 있다. 이에 따라, 저열원에서도 효율적인 발전이 가능한 유기 랭킨 사이클(ORC, Organic Rankine Cycle) 기반의 WHRS 기술이 새로운 대안으로 부상하고 있다.^[5~13]

이와 같은 산업적·기술적 변화 속에서 WHRS 기술은 단순한 탄소 저감 수단을 넘어 선박의 연료비 절감과 운영 효율 향상에 기여할 것으로 기대된다. 따라서 본 논문에서는 다양한 작동유체를 적용한 WHRS의 발전 효율을 분석하고, 이를 바탕으로 선박 연료 절감 효과 및 경제성을 종합적으로 평가하고자 한다.

2. 작동 유체별 폐열회수 성능 분석

WHRS 시스템을 구성하기 위해서는 대상 폐열원의 온도 범위에 적합한 작동유체를 선정하고, 이에 기반한 사이클 구성을 통해 발전 성능 분석하는 과정이 필요하다. 따라서 본 장에서는 선박 추진기관에서 회수 가능한 폐열원의 특성을 조사하고, 그에 적합한 작동유체 및 사이클별 시스템의 열역학적 성능을 비교·평가하고자 한다.

2.1 선박 폐열원 특성 분석

Fig. 1에서 MAN B&W엔진을 대상으로 연료 연소 과정에서 발생하는 폐열을 WHRS의 유무에 따라 구분하여 제시하였다. 또한, Fig. 2에서는 각 선박 엔진별 규모에 따른 배기가스의 온도 및 유량 특성과 Fig. 3에서는 엔진 냉각수의 온도 및 유량 특성을 나타내었다.

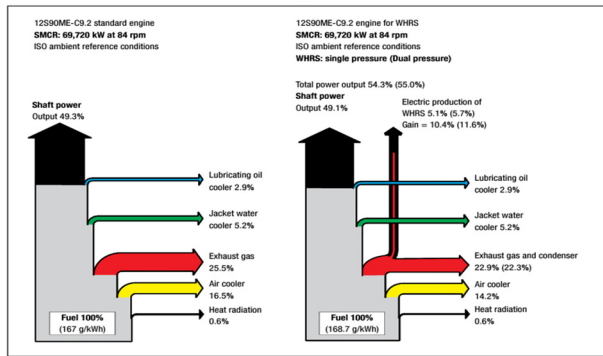
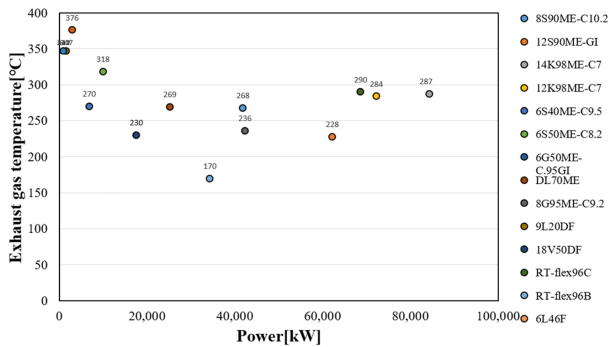
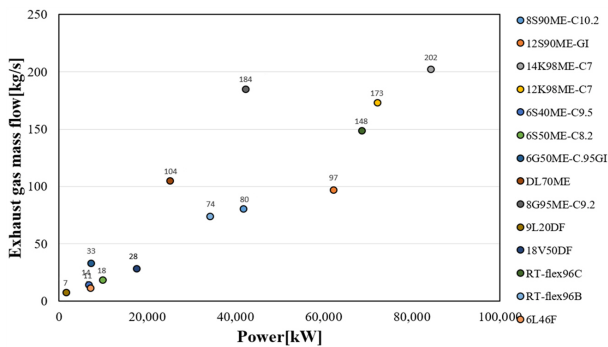


Fig. 1. Heat balance for large-bore MAN B&W engine types without and with WHRS



(a) Relation between Exhaust gas temperature and Power

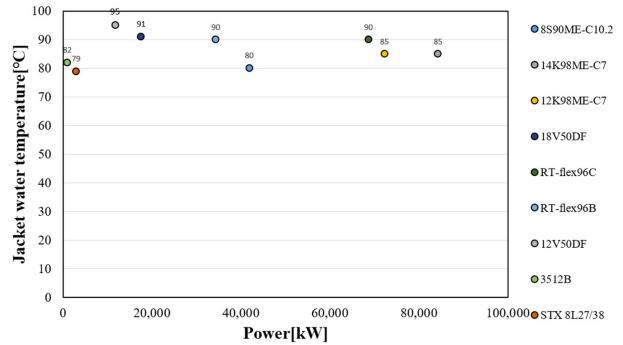


(b) Relation between Exhaust gas mass rate and Power

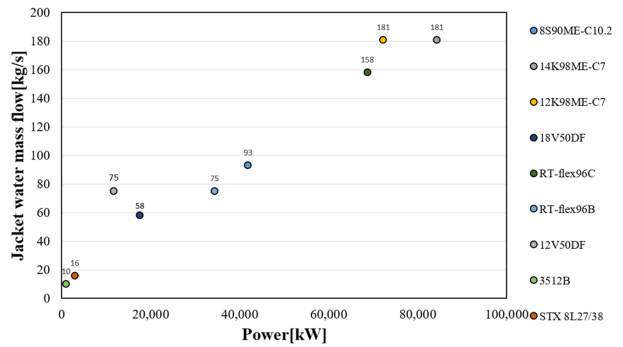
Fig. 2. Waste heat from ship's exhaust gas

분석 결과, 선박에서 발생하는 배기가스 온도는 약 200~400°C 범위에 분포하며, 엔진 냉각수의 온도는 80~95°C 범위에 분포하는 것으로 확인되었다. 두 폐열원 모두 엔진 출력에 비례하여 유량이 증가하는 경향을 보였다.

WHRs 시스템의 발전 효율 향상을 위해서는 가능한한 높은 온도와 풍부한 유량을 가진 열원을 활용하는 것이 유리하다. 이에 본 연구에서는 배기가스 폐열을 주요 열원으로 선정하였으며, 이코노마이저(Economizer)를 통해 배기



(a) Relation between Jacket water temperature and Power



(b) Relation between Jacket water mass rate and Power

Fig. 3. Waste heat from ship's jacket water

가스의 열에너지를 증기의 형태로 회수하여 WHRS에 공급하는 구성으로 채택하였다.

2.2 작동 유체 특성

CoolProp V7.2을 통해 작동유체별 물성치와 안전성을 Table 1에 정리하였다. 물을 제외한 작동유체들은 열원이

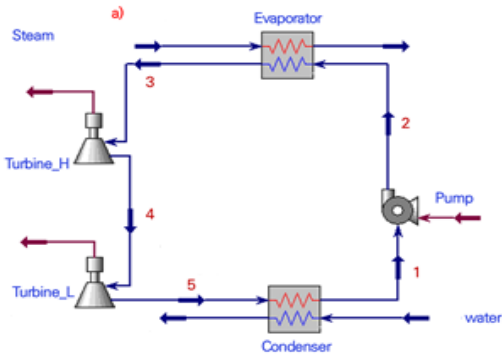
Table 1. Working Fluid's Property Data

Working Fluid	Standard Boiling Point [K]	Critical Temperature [K]	Critical Pressure [MPa]	ODP	GWP	Safety Group
Water	373	647	22	0	0	A1
R-245fa	288	427	3.7	0	1030	B1
R-1233zd(E)	291	440	3.6	0	1	A1
R-1234yf	244	368	3.4	0	4	A2L
R-1234ze(E)	254	383	3.6	0	4	A2L
R-1234ze(Z)	283	423	3.5	0	-	-
R-600a	261	408	3.6	0	3	A3
R-236ea	279	412	3.4	0	1370	-

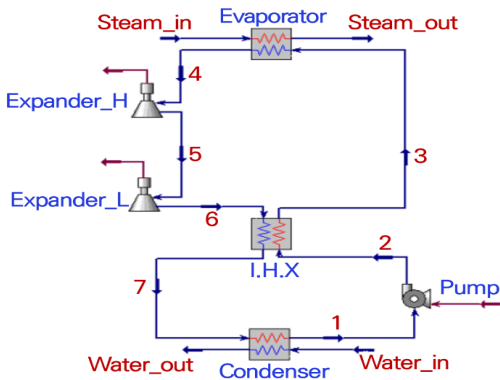
90~200°C 범위에서 활용 가능하다. 이에 따라, 친환경성 및 환경 규제를 고려하여 가장 우수한 성능을 나타내는 R-1233zd(E)를 작동유체로 선정하였다.

2.3 사이클별 성능 분석

Fig. 4는 단순사이클과 중간열교환기를 적용한 사이클의 구성도이다. 두 사이클을 Aspen사의 HYSYS 프로그램을 활용하여 비교 분석하였다. 동일한 열원(170°C, 1.5 ton/h, 스팀)과 열침(30°C, 138 ton/h, 냉각수) 조건에서는 기본 사이클은 88.5 kW의 출력을 나타내지만, 중간열교환기를 적용한 사이클은 100 kW의 출력을 얻을 수 있는 것으로 확인하였다. 또한, 두 사이클이 100 kW 출력이 나올 경우, 기본사이클에서는 170°C 스팀 열원이 약 2 ton/h 필요하지만 중간열교환기를 적용한 사이클은 약 1.5 ton/h이 필요하며, 30°C 냉각수 열침을 사용할때 기본사이클은 약 138.5 ton/h이나, 중간열교환기 적용 사이클은 약 138 ton/h이 필요한 것으로 확인하였다.



(a) Basic cycle diagram



(b) Cycle with an internal heat exchanger diagram

Fig. 4. Organic rankine cycle diagram

3. WHRS 적용에 따른 경제성 이론

선박에 WHRS 시스템을 적용할 경우, 시스템의 발전 성능 및 작동유체·사이클 조합에 따라 연료비 절감 및 탄소 배출 저감 효과가 달라질 수 있다. 따라서 본 장에서는 2장에서 산정한 WHRS 발전 성능을 바탕으로 선박 연료비 절감 효과와 온실가스 배출 저감에 따른 편익을 분석하고, 이를 종합하여 WHRS 적용에 따른 총 편익 항목을 확인하고자 한다.^[14~16]

3.1 선박 연료비 저감

선박의 전력 수요 중 일부를 WHRS가 대체할 경우, 보조발전기의 연료 소비량이 감소하며 이는 곧 연료비 절감으로 이어진다. 절감되는 연료량은 연료 단가를 곱하여 연료비 저감 금액으로 환산하였으며, 운항 1회당 선박 연료비 저감의 편익은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$B_{Fuel} = \sum_i W_{ORC}(i) \times SFC_k(i) \times H(i) \times P_k \quad (1)$$

3.2 온실가스 배출 저감

WHR스 적용으로 선박 연료 소비량이 감소하면, 이에 따른 CO₂ 등 온실가스 배출량 또한 감소하게 된다. 본 연구에서는 각 연료별 CO₂ 배출계수를 활용하여 운항 1회당 배출 저감량을 산정하여, 편익을 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$B_{CO_2} = \sum_i W_{ORC}(i) \times SFC_k(i) \times H(i) \times C \times P_{CO_2} \quad (2)$$

배출 저감량은 각 국가의 탄소 규제 정책에 따른 단위 배출량당 부과되는 사회적 비용을 기반으로 경제적 가치를 부여하였다.

3.3 총 편익 산정

본 연구에서는 선박 연료비와 온실가스 배출 저감의 편익 요소를 합산하여, WHRS 적용에 따른 총 편익을 산정하였다. 운항 1회당 총 편익은 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.^[17,18]

$$B = B_{Fuel} + B_{CO_2} \quad (3)$$

편익 식을 작성한 결과, 시스템의 순 출력 변화가 편익에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서, 시스템의 성능(출력, 효율)모두 편익에 일정 부분 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

4. 경제성 분석 결과

4.1 총 편익성 비교

총 편익을 계산하기 위해서는 선박 엔진의 SFC 정보가 필요하다. Table 2는 선박에서 사용하는 일부 엔진의 제원을 정리하였다.

선박이 미국에서 영국까지 정기적으로 운항하는 정기선 항로에서 약 390시간이 소요된다고 가정하였다. 또한, 엔진 로드 100%는 92시간, 80%는 263시간, 60%는 13시간, 40%는 11시간, 20%는 11시간으로 운전된다고 가정할 때,

Table 2. Engine specification

Engine Type	SMCR Power [kW]	SMCR Speed [rpm]
Engine_5S50ME	9,500	125
Engine_6G95ME	41,220	80
Engine_7G50ME	12,040	100
Engine_7S50ME	13,300	125

Table 3. Engine_5S50ME one-time benefit factor

[Unit: tons per voyage]			
Category	Heavy Fuel Oil	Diesel /Gas Oil	Ammonia
Fuel Reduction	9.74	9.17	19.09
Reducing Greenhouse Gas	30.32	29.39	0

Table 4. Engine_7S50ME one-time benefit factor

[Unit: tons per voyage]			
Category	Heavy Fuel Oil	Diesel /Gas Oil	Ammonia
Fuel Reduction	12.32	11.60	24.17
Reducing Greenhouse Gas	38.37	37.19	0

100 kW 출력의 중간열교환기를 적용한 사이클을 Engine_5S50ME와 Engine_7S50ME에 적용한 경우 1회 운항에 따른 연료 및 온실가스 저감량을 Table 3과 Table 4에 정리하였다.

고비용의 친환경 연료를 사용할 경우, 선박 연료비 절감 부분에서 높은 편익을 보였으나, 온실가스 배출 저감 측면에서는 상대적으로 낮은 편익을 보였다. 반대로 저비용 연료를 사용할 경우, 선박 연료비 저감에서의 편익은 상대적으로 낮은 반면, 온실가스 배출 저감에서는 높은 편익을 보이는 것으로 나타났다.

4.2 선박 적용성 분석

연간 선박이 10번의 운항을 진행한다고 가정한 경우, 엔진과 연료타입 그리고 사이클별 연료 및 온실가스 저감에 따른 총 편익을 원화로 환산할 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

5S50ME엔진에서 100kW출력의 기본사이클을 적용한 경우, 중유(HFO, Heavy Fuel Oil)에서 약 89.93 ton/년 연료 저감과 약 280 ton/년 온실가스 저감이 발생하여 총 61,501,115원/년으로 가장 낮은 값을 보였다. 반대로 7S50ME 엔진에서 100 kW 출력의 중간열교환기를 적용한 사이클을 적용한 경우, 암모니아(NH₃, Ammonia)에서 약 241.65 ton/년 연료 저감 효과만으로 총 286,841,571원/년으로 가장 높은 값을 보였다.^[11,12]

또한, 엔진 규모와 사이클에 따른 비용 상승률 보다는 연료의 변경에 따른 금액 상승률 폭이 더욱 큰 것으로 확인되었다.

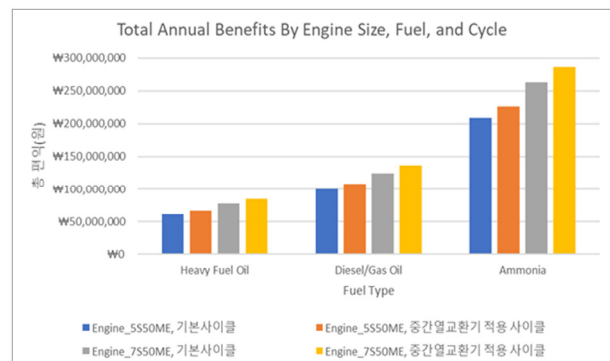


Fig. 5. Total annual benefits

5. 결론

본 논문에서는 선박에서 발생하는 폐열 범위를 조사하여, 가장 높은 효율을 보이는 배기 폐열을 스팀으로 회수하여 170°C 온도 범위에서 효율적인 작동유체 R-1233zd(E)를 선정하였다. 또한, 100 kW급 출력의 사이클을 비교 분석하고, WHRS를 선박에 적용 시 발생하는 편익 요소를 분석하였다. 이후 선박의 운항 조건을 가정하여, 1회 운항 당 선박 연료와 온실가스 배출 저감량과 연간 운항 시 편익 금액을 산출하였다. 엔진 규모, 연료, 그리고 사이클에 따른 편익과 상관관계를 분석하였다.

그러나, 분석에서는 WHRS의 비용분석(자본적 지출(CapEx, Capital Expenditure) 및 운영비용(OpEx, Operating Expenditure)이 반영되어 있지 않다. 따라서 향후에는 상기 요소를 반영하여, 투자회수기간(Payback Period), 비용-편익 비율(B/C Ratio) 등을 포함한 추가적인 경제성 분석을 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220634, 친환경선박 전주기 핵심 기술개발 사업).

References

- [1] IMO, “Draft regulations will set mandatory marine fuel standard and GHG emissions pricing for shipping to address climate change”, 2025.04.11., <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/imo-approves-netzero-regulations.aspx>.
- [2] IMO, “International Maritime Organization (IMO) adopts revised strategy to reduce greenhouse gas emissions from international shipping”, 2023.07.07., <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/revised-ghg-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>.
- [3] Lee, J.Y., Hwang, D.J., and Kim, M.G., 2023, “A Study on the Comprehensive Impact of the 2023 IMO GHG Strategy on International Shipping”, *J. Soc. Nav. Archit. Korea*, **60**(6), 397-405.
- [4] Insight Infineum International Limited, “How to stay CII compliant”, 2022.12.13., <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/how-to-stay-cii-compliant/>.
- [5] Díaz-Secades, L.A., Gonzalez, R., and Rivera, N., 2023, “Waste heat recovery from marine engines and their limiting factors: Bibliometric analysis and further systematic review”, *Cleaner Energy Systems*, **6**, 100083.
- [6] Whang, D.J., Park, S.K., Jee, J.H., Bang, E.S., and Oh, C., 2021, “A Study on the Thermal Flow of Waste Heat Recovery Unit (WHRU) for Ship’s Organic Rankine Cycle Power Generation System using CFD Method”, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, **27**(5), 647-655.
- [7] Hwang, D.J., Jee, J.H., Kim, J.S., Kim, S., and Oh, C., 2023, “A study on the design of Waste Heat Recovery Unit (WHRU) for 30kW Organic Rankine Cycle (ORC) power system for ships”, *J. Int. Marit. Saf. Environ. Aff. Shipp.*, **7**(1), <https://doi.org/10.1080/25725084.2023.2184603>.
- [8] Elkafas, A.G., 2024, “Thermodynamic Analysis and Economic Assessment of Organic Rankine Cycle Integrated with Thermoelectric Generator Onboard Container Ship”, *Processes*, **12**(2), 355.
- [9] Lyu, L., Kan, A., Chen, W., Zhang, Y., and Fu, B., 2023, “Energy, Exergy and Environmental Analysis of ORC Waste Heat Recovery from Container Ship Exhaust Gases Based on Voyage Cycle”, *J. Mar. Sci. Eng.*, **11**(10), 2029.
- [10] Civgin, M.G., and Deniz, C., 2024, “Thermodynamic Analysis of Exhaust Gas Waste Heat Recovery with Organic Rankine Cycle for Container Ship”, SSRN, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4706953>.
- [11] Theotokatos, G., Rentizelas, A., Guan, C., and Ancic, I., 2020, “Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles”, *J. Clean. Prod.*, **267**, 121837.
- [12] Hwang, D.J., Oh, C., Park, S.K., Jee, J.H., Bang, E.S., and Lee, B.G., 2022, “Design Study of a Brazed Plate Heat Exchanger Condenser Through Two-Phase Flow Analysis”, *New. Renew. Energy*, **18**(2), 73-81.

- [13] Han, S.H., Jo, J.H., Kwon, J.T., Park, K.W., and Choi, B.C., 2022, “Exergy Analysis of Waste Energy Recovery System in Regasification Process of LNG FSRU”, *New. Renew. Energy*, **18**(2), 82-89.
- [14] SFOC, “IMO Approves First-Ever Global Carbon Pricing for Shipping — But Is It Enough?”, 2025.04.25., <https://forourclimate.org/insights/50>.
- [15] European Commission, “2025 Carbon Market Report: EU ETS lowers power sector emissions and expands to maritime transport”, 2025.12.03., https://climate.ec.europa.eu/news-other-reads/news/2025-carbon-market-report-eu-ets-lowers-power-sector-emissions-and-expands-maritime-transport-2025-12-03_en.
- [16] European Commission, “Reducing emissions from the shipping sector”, 2026.05.06., https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector_en.
- [17] Ship & Bunker, “LNG May Be Cheapest Option for IMO 2028 Compliance: Report”, 2025.04.30., <https://shipandbunker.com/news/world/272962-lng-may-be-cheapest-option-for-imo-2028-compliance-report>.
- [18] Kuehne+Nagel, “LNG will remain the cheapest fuel through to 2035 under IMO rules”, 2025.04.22., <https://mykn.kuehne-nagel.com/news/article/lng-will-remain-the-cheapest-fuel-through-to-25-Apr-2025>.