

Review Organic Rankine Cycle-: Penerapan di Kapal

Deddy Sakti Manopo¹, Dani Rusirawan²

¹Mahasiswa Magister Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

²Prodi Magister Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

Email: deddymanopo@gmail.com¹, danir@itenas.ac.id²

Received 25 Januari 2024 | Revised 23 Februari 2024 | Accepted 23 Maret 2024

ABSTRAK

Sektor maritim sebagai salah satu industri utama yang menggunakan bahan bakar minyak, turut berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca seperti CO₂, NO_x, dan SO_x, mencapai 2-3% dari total emisi dunia. Emisi gas buang kapal ini memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan, termasuk perubahan iklim, pencemaran udara, dan dampak negatif lainnya. Dampak tersebut dapat di kurangi salah satunya dengan menerapkan sistem pemulihan limbah panas di kapal menggunakan teknologi Siklus Rankine Organik (SRO)/Organic Rankine Cycle (ORC). Kajian literatur terkait konsep ORC di kapal dilakukan mulai dari penentuan sumber panas dari mesin kapal, pemilihan jenis fluida, pemilihan komponen, serta aspek ekonomi. Hasil yang diperoleh yaitu panas gas buang adalah yang paling cocok untuk penerapan ORC dikapal, fluida kerja yang digunakan yaitu R1234ze, R245fa, R600, dan R600a. Dengan penggunaan ORC, Penghematan bahan bakar pelayaran sekitar 10% - 15% dengan waktu pengembalian modal masing - masing 6,52 tahun (R1234z), 6,19 tahun (R245fa), 6,31 tahun (R600) dan 6,42 tahun (R600a).

Kata kunci: gas buang, siklus rankine, kapal, laut, diesel

ABSTRACT

The maritime sector, as one of the main industries that use fuel oil, contributes to greenhouse gas emissions such as CO₂, NO_x, and SO_x, reaching 2-3% of the world's total emissions. These ship exhaust emissions have a significant impact on the environment, including climate change, air pollution, and other negative impacts. These impacts can be reduced by implementing a waste heat recovery system on ships using Organic Rankine Cycle (SRO)/Organic Rankine Cycle (ORC) technology. A literature review related to the concept of ORC on ships is carried out starting from determining the heat source from the ship's engine, fluid type selection, component selection, and economic aspects. The results obtained are that exhaust gas heat is the most suitable for the application of ORC on ships, the working fluids used are R1234ze, R245fa, R600, and R600a. With the use of ORC, the cruise fuel saving is about 10% - 15% with payback period of 6.52 years (R1234z), 6.19 years (R245fa), 6.31 years (R600) and 6.42 years (R600a) respectively.

Keywords: exhaust gas, rankine cycle, ship, marine, diesel

1. PENDAHULUAN

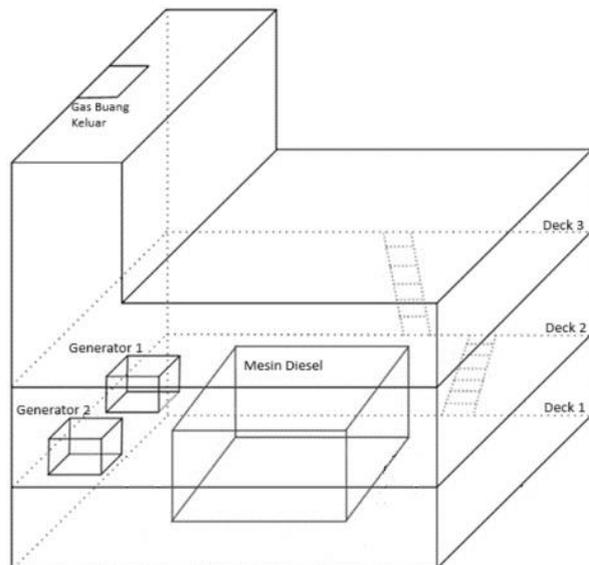
Dalam era ketidakstabilan energi global dimana penggunaan energi dunia terus mengalami peningkatan dalam beberapa dekade terakhir yang mengakibatkan kenaikan tajam harga bahan bakar minyak dan menimbulkan tuntutan sekaligus tantangan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan hidup. Untuk itu diperlukan pengembangan sumber daya energi terbarukan dengan melakukan eksplorasi cara-cara baru untuk memenuhi peningkatan permintaan energi dengan lebih sedikit dampak buruk terhadap lingkungan.

Sektor maritim adalah salah satu dari banyak industri yang menggunakan bahan bakar minyak sebagai bahan bakar mesin diesel kapal unruk menggerakkan atau memindahkan kapal dari satu pelabuhan ke pelabuhan lainnya, sektor maritim juga adalah salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca seperti CO₂, NO_x, SO_x dengan nilai 2-3% dari total emisi dunia [1]. Emisi gas buang kapal ini memiliki dampak lingkungan yang signifikan karena dapat berkontribusi terhadap perubahan iklim, pencemaran udara, dan dampak negatif lainnya.

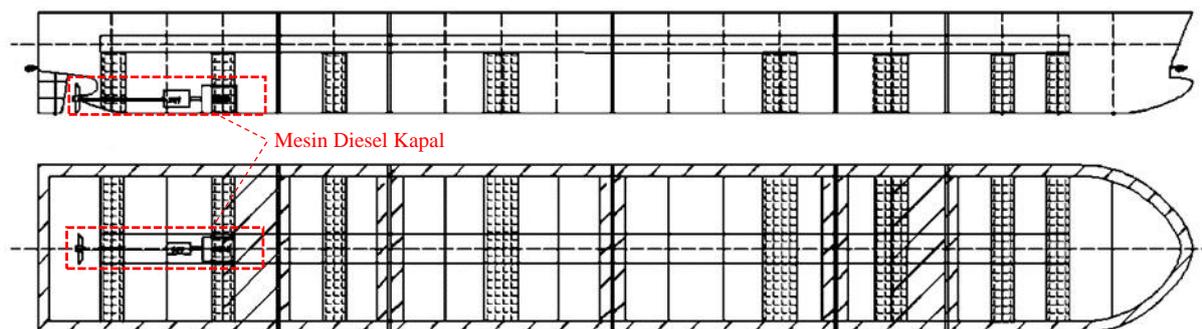
Gas buang mesin diesel kapal dilepas ke udara melalui jalur cerobong yang terhubung ke mesin kapal pada kamar mesin seperti terlihat di gambar 1, mesin kapal umumnya terletak di bagian deck 1 dari bagian kapal atau lantai paling bawah dari sebuah kapal seperti yang terlihat pada gambar 2 dan gambar 3.



Gambar 1. Jalur Gas Buang Mesin Kapal MV. Samudra Sakti 3



Gambar 2. Diagram struktur ruang mesin kapal pada umumnya



Gambar 3. Desain model kapal kontainer skala besar

Gas buang tersebut mengandung panas yang dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan energi listrik, selain dapat menghemat pemakaian bahan bakar juga dapat mengurangi jumlah emisi yang di buang ke udara. Salah satu cara pemanfaatan panas gas buang diesel kapal adalah dengan menerapkan sistem kerja Siklus Rankine Organik (SRO) / *Organic Rankine Cycle* (ORC).

Siklus rankine organik memanfaatkan panas dengan temperatur rendah, untuk menguapkan fluida kerja organik yang memiliki temperatur didih rendah [2]. Salah satu pendekatan yang menarik adalah pemanfaatan gas buang kapal sebagai sumber panas untuk menggerakkan ORC. Gas buang kapal, yang umumnya dianggap sebagai limbah, dapat diubah menjadi sumber energi yang berkelanjutan melalui penerapan siklus rankine organik berbasis fluida kerja organik.

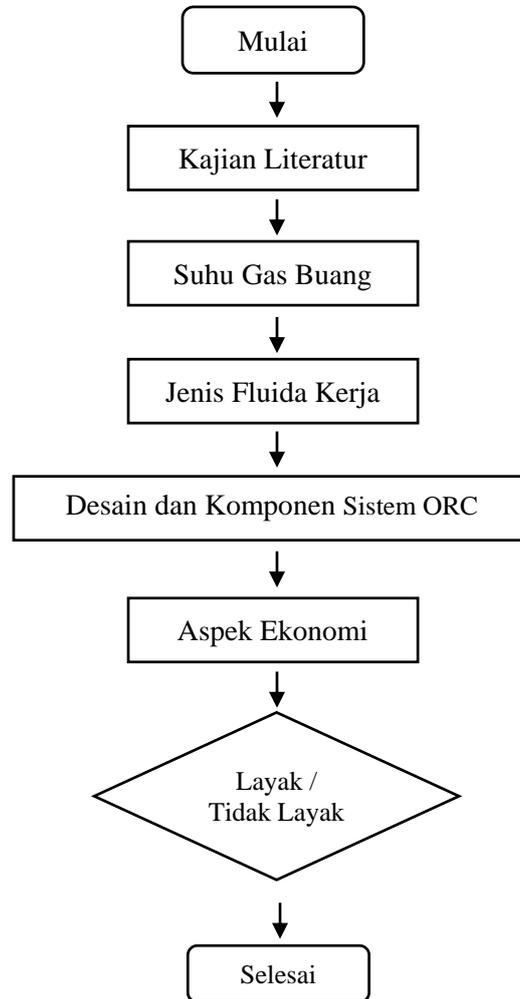
ORC adalah proses yang menjanjikan untuk konversi panas suhu rendah dan menengah menjadi listrik. Penelitian sebelumnya telah membandingkan tiga siklus (ORC, Siklus Kalina, dan Siklus Uap Rankie) pada aplikasi siklus gabungan dengan mesin diesel kapal laut dua langkah dengan hasil bahwa ORC memiliki potensi terbesar dalam peningkatan efisiensi bahan bakar [3]. Proses ORC bekerja seperti pembangkit listrik tenaga uap clausius-rankine tetapi menggunakan fluida kerja organik bukan air [4]. Siklus Rankine Organik (SRO) merupakan Sistem konversi energi panas menjadi energi mekanik, dan kemudian menjadi energi listrik, yang terdiri dari penggunaan cairan organik dengan berat molekul tinggi dalam siklus rankine [5]. Uap panas limbah merupakan salah satu bentuk emisi panas limbah penting yang banyak digunakan pada perusahaan industri seperti pembangkit listrik dan perusahaan besi dan baja [6].

Teknologi ORC untuk mesin diesel laut semakin diminati sebagai solusi pemulihan limbah panas oleh produsen mesin dan sistem ORC karena berpotensi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar, biaya pengoperasian, dan emisi gas rumah kaca secara signifikan. Selain itu, sistem ORC juga sementara dikembangkan untuk memulihkan panas dari sumber panas bersuhu lebih rendah dari unit mesin diesel kapal laut dua langkah, khususnya fokus pada pemulihan panas *jacket cooling engine* [7]. Sistem ORC sangat cocok untuk digunakan memulihkan limbah panas dari sumber suhu rendah maupun sedang. Di Eropa, pembangkit listrik dengan sistem limbah panas berbasis ORC yang berasal dari mesin pembakaran internal sudah menjadi teknologi yang stabil [8].

Dengan menggunakan limbah panas gas buang sebagai sumber panas, kita tidak hanya dapat mengurangi jejak karbon, tetapi juga memaksimalkan pemanfaatan energi yang pada umumnya terbuang sia-sia ke atmosfer. Sebagai hasilnya, pengaplikasian ORC pada limbah panas gas buang kapal dapat menjadi langkah inovatif dalam upaya menuju transportasi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2. METODOLOGI

Tujuan dari tulisan ini adalah untuk mengetahui apakah penggunaan sistem ORC diatas kapal sebagai sumber energi terbarukan sekaligus sebagai pemulihan panas dari gas buang mesin diesel kapal bisa dikatakan layak untuk diterapkan atau tidak. Pada gambar 4 menunjukkan alur flowchart tulisan ini.



Gambar 4. Flowchart

2.1 Penjelasan Flowchart

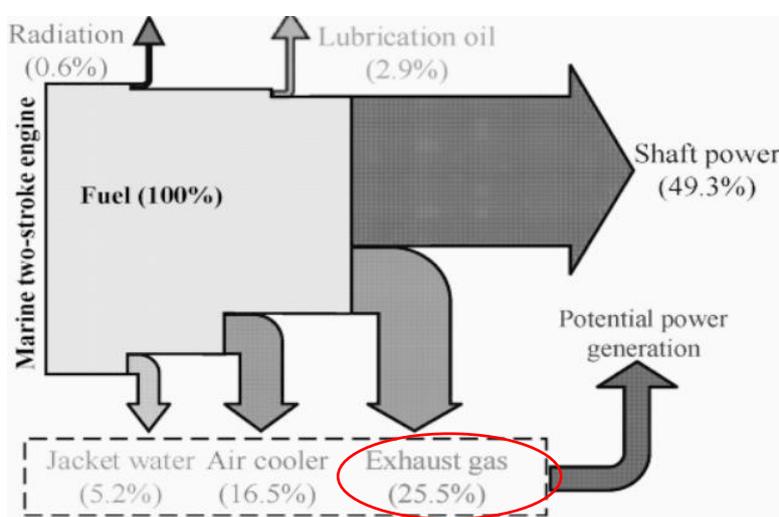
Tulisan ini di mulai dengan mengumpulkan data dari sumber yang berasal dari jurnal internasional, penulis kemudian menentukan komposisi dan karakteristik gas buang kapal yang akan digunakan sebagai sumber panas dalam siklus rankine organik. Parameter suhu gas buang diidentifikasi dengan cermat. Setelah mendapatkan pemahaman yang komprehensif tentang gas buang kapal, langkah selanjutnya adalah pemilihan fluida kerja organik yang sesuai. Pemilihan ini berdasarkan sifat-sifat termal dan termodinamika fluida kerja organik yang dapat dioptimalkan untuk kondisi operasional gas buang kapal. Kemudian proses desain yang melibatkan pemilihan komponen utama seperti penukar kalor, ekspander, dan pompa. Kriteria desain mencakup efisiensi termal, keandalan, dan adaptabilitas terhadap variasi kondisi operasional kapal. Selain aspek teknis, tulisan ini juga mencakup analisis ekonomi untuk pengembalian modal. Akhirnya, hasil dari tulisan ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang keuntungan relatif dan potensi yang dapat dicapai oleh sistem ORC di atas kapal

sehingga dapat di tarik kesimpulan apakah sistem tersebut dapat dikatakan layak atau tidak untuk diterapkan di atas kapal.

3. KAJIAN LITERATUR

3.1 Penentuan Parameter Gas Buang

Panas yang terbuang pada kapal laut terutama adalah energi bahan bakar yang hilang ke lingkungan dari berbagai proses yang sedang berlangsung selama operasi normal, misalnya perpindahan panas termodinamika. Untuk kapal bertenaga diesel, mesin diesel adalah sumber panas terbuang terbesar. Gambar 5 menggambarkan keseimbangan energi dari mesin diesel 2 langkah dan menunjukkan bahwa sekitar 50% dari total energi bahan bakar di buang ke lingkungan melalui aliran yang berbeda-beda tanpa melakukan pekerjaan yang berguna. Setiap aliran panas yang terbuang memiliki karakteristik yang bervariasi, baik dari segi kuantitas maupun kualitas.



Gambar 5. Diagram keseimbangan panas untuk *marine* diesel 2 langkah yang beroperasi pada 100% SMCR (*Specified Maximum Continuous Rating*)

Kualitas panas ditentukan oleh suhu yang tersedia dan di kategorikan menjadi panas kualitas rendah, panas kualitas sedang dan panas kualitas tinggi tergantung pada kisaran suhunya seperti yang di berikan pada Tabel 1 [10]. Peluang pemulihan limbah panas / *waste heat recovery* (WHR) secara langsung bergantung pada kualitas panas dengan potensi efisiensi yang lebih tinggi pada kisaran suhu tinggi. Dari mesin diesel, sebagian besar panas yang terbuang berada diantara kualitas rendah dan sedang. Tabel 2 [10] memberikan daftar sumber panas dan kisaran suhunya yang terbuang dari mesin diesel kapal pada umumnya

Tabel 1. Klasifikasi kualitas energi panas [10]

Kualitas	Kisaran Suhu (°C)
1	2
Rendah	Hingga 232
Sedang	233 - 649
Tinggi	Di atas 650

Tabel 2. Sumber panas dan kisaran suhunya yang terbuang dari mesin diesel kapal [10]

Sumber	Kisaran Suhu (°C)
1	2
<i>Incinerator</i>	850 - 1200
Gas Buang Mesin	200 - 500
<i>Scavenge Air</i>	100 - 160
Air Pendingin	70 - 125

Dari semua aliran panas limbah yang terdaftar, kualitas tertinggi dipasok oleh gas buang dari *incinerator* dan memiliki potensi tertinggi dalam hal pemanfaatan oleh sistem pemulihan limbah panas / *waste heat recovery system* (WHRS). Namun operasi *incinerator* terputus-putus dan kuantitas panas yang disuplai cukup kecil dibandingkan dengan aliran lainnya. Meskipun demikian, panas *incinerator* dapat digunakan untuk mengoperasikan WHRS khusus atau untuk melengkapi WHRS yang dirancang untuk aliran lain untuk meningkatkan efisiensi selama kegiatan *incinerator* berlangsung.

Bersama dengan laju aliran massa yang tinggi, gas buang mesin memiliki potensi paling signifikan untuk dimanfaatkan oleh WHRS baik dari segi kuantitas maupun kualitas, meskipun merupakan sumber panas berkualitas sedang.

Kisaran suhu gas buang mesin bervariasi untuk mesin 2 langkah dan mesin 4 langkah, dimana mesin 4 langkah memiliki suhu gas buang yang lebih tinggi. Suhu gas buang ini berkisar antara 250°C – 300°C untuk mesin 2 langkah dan 300°C – 500°C untuk mesin 4 langkah [1]. Setelah diketahui rata-rata suhu gas buang dari mesin diesel kapal, selanjutnya perlu dilakukan pemilihan fluida kerja yang dapat mendidih dan bekerja pada suhu yang sesuai dari gas buang mesin diesel kapal yaitu 250°C - 500°C.

3.2 Pemilihan Fluida Kerja Organik

Fluida kerja berperan sebagai media perantara yang mengambil panas dari sumber panas dan mentransferkannya ke mesin turbomachinery untuk menghasilkan tenaga mekanis. Keberhasilan suatu sistem ORC sangat bergantung pada sifat-sifat termal dan termodinamika dari fluida kerja yang digunakan. Pemilihan fluida kerja pada aplikasi ORC tidak hanya memengaruhi kinerja dan efisiensi, tetapi juga berdampak pada keandalan, umur operasional, dan keberlanjutan sistem. Sifat-sifat fluida yang bekerja memiliki efek yang besar pada energi efisiensi konversi dan perlindungan lingkungan. Sangat penting untuk mencari kesesuaian fluida kerja untuk pemulihan panas di sistem ORC. Studi yang dilakukan oleh Yang dan Yeh [11] menyatakan R245fa dan R600a direkomendasikan secara luas sebagai cairan kerja yang sesuai. Dengan pemeriksaan *Ozone Depletion Potential* (ODP) nol dan lebih rendah *Global Warming Potential* (GWP), R600, R1234ze juga dipilih sebagai fluida kerja. Tabel 3 menunjukkan sifat-sifat yang dimiliki fluida kerja.

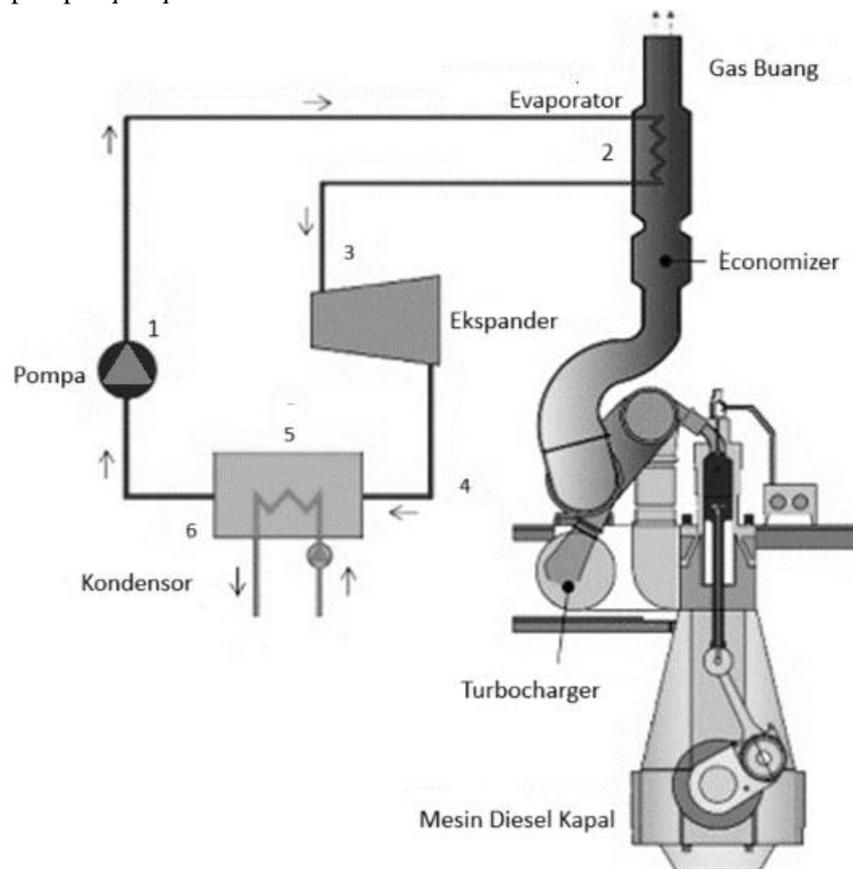
Tabel 3. Sifat-sifat fluida kerja [11]

Item	R1234ze	R245fa	R600	R600a
1	2	3	4	5
Massa Molar (kg/kmol)	114,04	134,05	58,122	58,122
T kritis (°C)	109,36	154,01	151,98	134,66
P kritis (MPa)	3,635	3,652	3,796	3,269
ODP	0	0	0	0
GWP	6	1030	-20	-20

Selanjutnya setelah menentukan jenis fluida yang digunakan, diperlukan desain dan komponen untuk menghubungkan siklus Rankine Organik dengan sumber panas agar dapat melakukan kerja.

3.3 Desain dan Komponen Sistem Siklus Rankine Organik

Sistem ORC adalah sistem yang memanfaatkan gas buang untuk menguapkan fluida kerja oleh karena itu desain dari ORC yang menggunakan gas buang sebagai sumber panas di perlihatkan seperti pada gambar 6 dengan beberapa komponen yang di gunakan diantaranya penukar kalor / *heat exchangers*, ekspander, dan pompa / *pump*.



Gambar 6. Diagram skematik sistem ORC

3.4.1 Penukar Kalor / *Heat Exchangers*

Heat Exchangers atau penukar kalor dapat digunakan sebagai evaporator dan/atau kondensor. Evaporator atau yang berfungsi sebagai boiler gas buang yang dalam hal ini menguapkan fluida kerja dengan gas buang sehingga harus dapat mentolerir suhu sumber panas yang tinggi, tekanan penguapan yang tinggi, korosi, dan masalah pengotoran. Dengan suhu operasi maksimum sekitar 250 °C, Penukar kalor plat tidak direkomendasikan untuk evaporator tetapi cocok untuk memulihkan panas limbah dari *jacket cooling water* atau sebagai kondensor [12]. Penukar kalor *shell and tube* dengan fluida kerja yang mengalir di dalam tabung lebih cocok untuk bekerja sebagai evaporator atau boiler gas buang ini, dan area perpindahan panas di sisi gas buang diperluas untuk memanfaatkan sepenuhnya panas gas buang suhu rendah.

Karena evaporator memainkan peran penting dalam menentukan biaya sistem, ruang instalasi, efisiensi pemulihan panas dan tekanan balik gas buang, parameter desain seperti titik pinch, penurunan tekanan,

dan kecepatan gas harus dipertimbangkan secara serius. Zhu dkk [9] merekomendasikan titik pinch evaporator lebih tinggi dari 15 °C atau bahkan 20 °C, kecepatan rata-rata gas harus lebih tinggi dari 20 m/s. Juga merekomendasikan penurunan tekanan sebesar 0,03 bar di *Specified Maximum Continuous Rating* (SMCR) untuk desain awal.

Mengenai kondensor, tekanan kondensasi dan laju aliran massa fluida kerja merupakan dua faktor kunci. *Steam Rankine Cycle* (SRC) selalu dilengkapi dengan kondensor vakum untuk mengeksplorasi potensi WHR yang maksimal. Namun, kondensor vakum tidak dapat dirancang untuk sistem ORC, karena masalah infiltrasi. Dengan penurunan entalpi penguapan yang signifikan, laju aliran massa yang dibutuhkan fluida kerja ORC jauh lebih besar dibandingkan dengan SRC. Dengan demikian, ukuran kondensor merupakan tantangan besar untuk desain sistem ORC. Selain membagi kondensor menjadi dua kondensor kecil yang bekerja secara paralel, dua opsi alternatif di usulkan, yang pertama adalah menggunakan penukar kalor sirkuit cetak, yang menawarkan pengurangan lebih dari 50% total volume dengan biaya yang sama dengan penukar kalor plat standar. Opsi kedua adalah meningkatkan tekanan kondensasi. Hal ini juga dapat mengurangi ukuran kondensor secara signifikan, namun disertai dengan berkurangnya produksi daya bersih unit ORC [9].

3.4.2 Ekspander

Ekspander adalah komponen penting lainnya yang mempengaruhi biaya dan efisiensi. Berbagai jenis ekspander untuk pembangkit listrik dari sumber panas limbah di sajikan dalam tabel 4 diantaranya ekspander turbin berbasis kecepatan dan ekspander sekrup, gulir, dan piston berbasis volume.

Tabel 4. Ekspander pembangkit listrik sumber panas limbah [9]

<i>Item</i>	<i>Pressure ratio</i>	<i>Rotate speed</i>	<i>Two-phase expansion</i>	<i>Size or weight</i>	<i>Cost</i>	<i>Recommend power scale</i>
1	2	3	4	5	6	7
<i>Turbine expander</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>No</i>	<i>Small</i>	<i>High</i>	<i>>50 kW</i>
<i>Screw expander</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Tolerated</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>10-70 kW</i>
<i>Scroll expander</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Tolerated</i>	<i>Small</i>	<i>Low</i>	<i>1-25 kW</i>
<i>Piston expander</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Tolerated</i>	<i>Large</i>	<i>Medium</i>	<i>20-100 kW</i>

Secara umum, ekspander turbin memiliki keunggulan struktur yang ringkas, ringan, efisiensi tinggi, dan kemampuan manufaktur yang matang. Dibandingkan dengan ekspander turbin, ekspander volumetrik dilengkapi dengan rasio tekanan tinggi, kecepatan operasional rendah, toleransi terhadap ekspansi dua fase, dan biaya yang relatif rendah, sedangkan kehilangan kebocoran, kebutuhan pelumasan, dan kehilangan gesekan merupakan hambatan teknis utama. [13] menunjukkan turbin aliran masuk radial adalah pilihan pertama untuk sistem berkapasitas besar mulai dari 50 hingga 500 kW, dan mesin ekspansi tipe volume lebih cocok untuk sistem berukuran kecil dan menengah. Ekspander volumetrik lebih cocok untuk rentang daya 0–20 kW dan akan terlalu besar untuk sistem ORC dengan output daya melebihi 70 kW, sementara mesin turbo tidak efisien untuk produksi daya rendah karena peningkatan biaya dan kecepatan putaran yang sangat tinggi menyebabkan kegagalan bantalan. Pada kisaran daya 20–70 kW, kedua jenis ekspander tersebut sebanding [9]. Mondejar dkk [14] menyarankan bahwa turbin aliran aksial lebih cocok untuk sistem ORC skala besar yang memulihkan panas buangan mesin kelautan, dan turbin aliran radial bisa dibidang merupakan pilihan paling cocok untuk memulihkan panas air pendingin dengan daya ORC berkisar antara 50 hingga 100kW. Oleh karena itu, ekspander turbin lebih disukai dalam sistem WHR untuk aplikasi kelautan.

3.4.3 Pompa / Pump

Pompa dalam siklus daya rendah mengontrol tingkat tekanan penguapan dan laju aliran massa fluida kerja. Dalam unit ORC, daya pemompaan dapat mewakili hingga 10% dari keluaran daya ekspander [15]. Pompa dapat dikelompokkan menjadi pompa perpindahan positif dan pompa sentrifugal. Pompa perpindahan positif (misalnya, pompa diafragma, baling-baling putar, atau pompa piston) memiliki efisiensi sekitar 40% [14] dimana laju perpindahan alirannya sebanding dengan kecepatan rotasi, dan hampir tidak bergantung pada rasio tekanan, namun, aliran volume pada pompa perpindahan positif dibatasi oleh ukurannya. Oleh karena itu, pompa perpindahan positif terutama digunakan pada sistem ORC skala mikro dan skala mini (<50 kW). Penerapan yang mungkin dari pompa ini adalah sistem ORC yang memulihkan panas dari *jacket cooling water*.

Dalam kasus pompa sentrifugal, dengan efisiensi lebih tinggi dari 60% [14], laju alirannya tidak hanya bergantung pada kecepatan putarannya, namun juga pada rasio tekanan. Berbeda dengan pompa perpindahan positif, efisiensi pompa sentrifugal sangat dipengaruhi oleh rasio tekanan, yang dapat menjadi perhatian utama jika sumber panas memiliki variabilitas tinggi. Karena pompa sentrifugal tidak memiliki batasan aliran volume, pompa ini biasanya digunakan untuk kapasitas daya yang lebih tinggi. Oleh karena itu penggunaan pompa sentrifugal akan lebih cocok jika sumber panas yang dieksploitasi adalah panas gas buang, karena laju aliran volume fluida kerja yang lebih besar dan rasio tekanan yang lebih tinggi dapat diharapkan.

Dalam penerapan ORC perlu juga dilihat dari aspek ekonomi untuk memberikan informasi terkait kelayakan ekonomi.

3.5 Aspek Ekonomi

Untuk melihat kelayakan sistem ORC dan penerapannya dikapal perlu ditinjau dari aspek ekonominya. Berdasarkan kajian literatur dari beberapa penelitian yang telah dilakukan diperoleh metode untuk evaluasi ekonomi, seperti metode *payback period*, metode *net present value* (NPV) dan metode *exergoeconomic* [16], [17]. Dengan sistem tenaga listrik dari generator waktu pengembalian modal sekitar 10,2 tahun dengan menggunakan bahan bakar konvensional [11]. Karena biaya bahan bakar merupakan pengeluaran utama untuk menjalankan kapal, harga bahan bakar mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja ekonomi sistem WHR. Kakalis dkk melakukan analisis sensitivitas biaya bahan bakar dengan harga bervariasi dari 500 hingga 1000 USD/ton, dan hasilnya menunjukkan bahwa waktu pengembalian modal sistem RC uap tekanan ganda dapat dikurangi menjadi 5 tahun dengan harga bahan bakar 1000. USD/ton [9].

Mondejar dkk [14] membandingkan waktu pengembalian modal unit ORC yang diterapkan pada berbagai jenis kapal. Harga bahan bakar dan biaya spesifik unit ORC diasumsikan masing-masing sebesar 600 USD/ton dan 2000 USD/kW. Hasil perhitungan menunjukkan investasi kapal kontainer terbayar kembali setelah 4 tahun, sedangkan kapal tanker minyak dan kapal curah hanya membutuhkan waktu 2,5 tahun. Penghematan bahan bakar yang didapatkan dari pengaplikasian ORC sekitar 10% - 15% [14].

Zhu dkk [9] melakukan tinjauan studi kasus mengenai evaluasi ekonomi untuk sistem WHR di kapal. Untuk membuat perbandingan yang baik, tipe mesin, jenis kapal, konfigurasi WHR, kondisi evaluasi, dan kinerja ekonomi, hasilnya, waktu pengembalian modal dari berbagai studi kasus berkisar antara 3 - 8 tahun. [11] Dalam kasus ini dengan fluida kerja yang digunakan R1234ze, R245fa, R600, dan R600a

didapatkan waktu pengembalian modal masing-masing 6,52, 6,19, 6,31 dan 6,42 tahun yang disajikan dalam tabel 5.

Tabel 5. Waktu pengembalian modal

Item	R1234ze	R245fa	R600	R600a
1	2	3	4	5
Waktu Pengembalian Modal (Tahun)	6,52	6,19	6,31	6,42

4. KESIMPULAN

Karya ini menyajikan survei literatur mengenai penelitian tentang penggunaan siklus Rankine organik untuk pemulihan limbah panas di kapal, dan memberikan kesimpulan potensi dan tantangan penggunaan teknologi ini dalam kapal yang ada saat ini dan pada bangunan baru. Limbah panas yang tersedia dan energi yang dapat diperoleh kembali diperkirakan. Integrasi di kapal, pemilihan jenis fluida dan komponen juga di sediakan. Kelayakan ekonomi juga diperkirakan. Analisis dalam tulisan ini menunjukkan bahwa gas buang mesin merupakan sumber panas yang cocok untuk sistem ORC di kapal dengan fluida kerja R600, R1234ze yang direkomendasikan dikarenakan memiliki nilai ODP nol dan lebih rendah GWP, unit komponen yang di gunakan sebaiknya menggunakan shell and tube untuk evaporator dan exchanger pelat untuk kondensor, penggunaan ekspander turbin lebih di rekomendasikan dengan berbagai kelebihanannya pada aplikasi pemulihan panas gas buang. Penggunaan pompa sentrifugal lebih cocok karena laju aliran volume fluida kerja yang lebih besar dan rasio tekanan yang lebih tinggi. Dengan aplikasi ORC selain mengurangi emisi gas rumah kaca seperti CO₂, NO_x, dan SO_x juga penghematan bahan bakar pelayaran sekitar 10% - 15% dan waktu pengembalian modal lebih cepat 6,19 – 6,52 tahun sehingga sistem ORC layak untuk diterapkan di kapal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini kami sampaikan terima kasih kepada Prodi Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung yang telah banyak membantu dan memfasilitasi dalam penyusunan jurnal ini. Tak lupa pula kami sampaikan terimakasih kepada teman-teman yang telah memberikan dukungan, semangat serta masukan dalam menyelesaikan jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lion, S., Vlaskos, I. and Taccani, R. (2020) “A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery”, *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd.
- [2] Mohammad Asiz M. (2017) “perancangan siklus rankine organik untuk pemanfaatan gas buang pada PLTU di Indonesia”, *Jurnal Rekayasa Hijau*, No. 2, Vol. 1.
- [3] Shu, G. et al. (2017) “Operational profile based thermal-economic analysis on an Organic Rankine cycle using for harvesting marine engine’s exhaust waste heat”, *Energy Conversion and Management*, 146, pp. 107–123.
- [4] Saleh, B. et al. (2007) “Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles”, *Energy*, 32(7), pp. 1210–1221.
- [5] Villarini, M. et al. (2014) “State of art of small scale solar powered ORC systems: A review of the different typologies and technology perspectives”, in *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, pp. 257–267.

- [6] Zhang, X. et al. (2016) “Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low temperature”, *Applied Thermal Engineering*, 106, pp. 1427–1439.
- [7] Michos, C.N. et al. (2017) “Analysis of the backpressure effect of an Organic Rankine Cycle (ORC) evaporator on the exhaust line of a turbocharged heavy duty diesel power generator for marine applications”, *Energy Conversion and Management*, 132, pp. 347–360.
- [8] Badescu, V. et al. (2017) “Design and operational procedures for ORC-based systems coupled with internal combustion engines driving electrical generators at full and partial load”, *Energy Conversion and Management*, 139, pp. 206–221.
- [9] Zhu, S., Zhang, K. and Deng, K. (2020) “A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd.
- [10] Saha, M. et al. (2023) “A review of thermoelectric generators for waste heat recovery in marine applications”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Elsevier Ltd.
- [11] Yang, M.H. and Yeh, R.H. (2015) “Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle system utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine”, *Applied Energy*, 149, pp. 1–12.
- [12] Hatami, M., Ganji, D.D. and Gorji-Bandpy, M. (2014) “A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 168–181.
- [13] Bao, J. and Zhao, L. (2013) “A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 325–342.
- [14] Mondejar, M.E. et al. (2018) “A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp.
- [15] Lion, S. et al. (2017) “A review of waste heat recovery and Organic Rankine Cycles (ORC) in on-off highway vehicle Heavy Duty Diesel Engine applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 691–708.
- [16] Omar, A. et al. (2019) “A review of unconventional bottoming cycles for waste heat recovery: Part II – Applications”, *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, pp. 559–583.
- [17] Saghafifar, M. et al. (2019) “A review of unconventional bottoming cycles for waste heat recovery: Part I – Analysis, design, and optimization”, *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd.