

Efektivitas *Keel Cooler* pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal

Agung Setiawan N.¹, Syerly Klara¹, Muhammad Iqbal Nikmatullah*¹

¹Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
Jl. Poros Malino km. 6, Kecamatan Bontomarannu, Gowa, Sulawesi Selatan, 92171, Indonesia

*Email: lakibbal@unhas.ac.id

DOI: 10.25042/jpe.052024.05

Abstrak

Kapal OT. Skyline yang diproduksi oleh PT. Samudra Marine Indonesia merupakan salah satu jenis kapal tanker yang menggunakan *keel cooler* sebagai sistem pendingin mesinnya. *Keel cooler* ini menjadi salah satu alat penukar kalor tipe baru yang diaplikasikan di dunia perkapalan karena dipasang secara eksternal pada lambung kapal di bawah permukaan air. Setelah diketahui efektivitas dari *keel cooler* tersebut selanjutnya penelitian ini dikembangkan menjadi optimasi *keel cooler* dengan tujuan untuk mengetahui ukuran lebar Inlet yang optimum pada *keel cooler system*. Penelitian ini menggunakan metode analisis dan simulasi menggunakan *software Ansys*. Berdasarkan hasil perhitungan pada beberapa variasi dimensi lebar Inlet *keel cooler* diperoleh nilai suhu yang minimum pada variasi lebar III dengan suhu minimum pada simulasi CFD sebesar 32 °C, perpindahan kalor terendah sebesar 145,176 W/m²°C pada variasi lebar III dengan ukuran lebar pipa Inlet 0,78 meter. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin kecil dimensi ukuran Inlet pada *keel cooler* maka suhu minimum pada *keel cooler* akan lebih efektif dan nilai perpindahan kalor semakin besar dan variasi ukuran yang diteliti memenuhi nilai standar efektivitas penggunaan *keel cooler*.

Abstract

Effectiveness of the Keel Cooler in the Main Engine Cooling System of a Ship. The OT. Skyline vessel, manufactured by PT Samudra Marine Indonesia, is a type of tanker ship that utilizes a keel cooler as its engine cooling system. The keel cooler is a relatively new type of heat exchanger applied in the maritime industry, installed externally on the ship's hull below the waterline. After evaluating the effectiveness of the keel cooler, this study was further developed into an optimization analysis with the objective of determining the optimal inlet width for the keel cooler system. The research employed analytical and simulation methods using ANSYS software. Based on the calculations from several inlet width variations of the keel cooler, the minimum temperature was obtained in variation III, with a minimum temperature from CFD simulation of 32 °C and the lowest heat transfer rate of 145.176 W/m²°C, occurring at an inlet pipe width of 0.78 meters. It can therefore be concluded that the smaller the inlet dimension of the keel cooler, the more effective the minimum temperature control, and the higher the heat transfer rate. The variations studied meet the standard effectiveness criteria for keel cooler applications.

Kata Kunci: Keel cooling system, perpindahan panas, variasi dimensi lebar inlet, mesin penggerak kapal

1. Pendahuluan

Kapal tanker adalah jenis kapal yang dirancang khusus untuk mengangkut minyak, cairan kimia, dan berbagai cairan lainnya. Ciri khas dari kapal ini adalah keberadaan banyak pipa di atas dek kapal yang berfungsi untuk mendistribusikan muatan. Umumnya, kapal dilengkapi dengan dua metode untuk mendinginkan mesin utama dan mesin bantu, yaitu sistem pendinginan terbuka (langsung) dan sistem pendinginan tertutup (tidak langsung). Di antara dua sistem ini, sistem pendinginan tertutup adalah yang paling sering digunakan di kapal [1].

Tujuan utama dari sistem pendinginan yang terpasang pada mesin kapal adalah untuk menjaga suhu mesin agar tetap berada dalam

rentang temperatur operasionalnya. Hal ini penting karena mesin berfungsi dengan optimal pada suhu tersebut, memungkinkan kapal untuk beroperasi secara efisien dan berkelanjutan selama berjam-jam. Kehilangan energi pada mesin sering terjadi dalam bentuk panas. Untuk mengatasi kelebihan panas tersebut, diperlukan media pendingin seperti penukar kalor (heat exchanger), agar fungsi dan komponen mesin tetap terjaga [2].

Penukar kalor dirancang agar per pindahan panas antara fluida dapat berlangsung dengan efisien. Pertukaran panas terjadi melalui kontak, baik antara fluida yang terpisahkan oleh dinding atau dalam keadaan bercampur langsung (direct contact). Di kapal, terdapat beberapa tipe penukar kalor yang digunakan, antara lain tipe

shell and tube heat exchanger. Tipe ini umumnya memiliki efektivitas antara 25% hingga 40%. Seiring berjalannya waktu, muncul berbagai inovasi dalam desain penukar kalor, salah satunya adalah keel cooler.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi debit aliran mempengaruhi nilai efektivitas penukar kalor tipe box cooler [3]. Namun, dalam penelitian ini digunakan tipe penukar kalor yang berbeda. Salah satu perbedaan antara box cooler dan keel cooler terletak pada letaknya di lambung kapal, di mana box cooler berada di dalam sea chest, sedangkan keel cooler dipasang di luar lambung kapal.

Penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu analisis dan simulasi CFD. Metode analisis dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus pendekatan yang diperoleh dari beberapa buku dan penelitian sebelumnya. Sementara metode simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan aplikasi Ansys CFX R22, dimana simulasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai temperatur air pendingin setelah melewati keel cooler system dan distribusi panas pada aliran dalam pipa. Pada metode CFD pembuatan model dilakukan dengan menggunakan aplikasi desain Rhinoceros 6 dengan menggunakan data yang diperoleh atau diberikan oleh PT. Samudera Marine Indonesia. Hasil analisis dan simulasi CFD kemudian dibandingkan untuk mengetahui, apakah hasil analisis yang dilakukan sudah sesuai dengan hasil simulasi CFD. Apabila hasil yang diperoleh dari hasil analisis dengan simulasi CFD sudah sesuai, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan analisa terkait kinerja dari alat penukar kalor keel cooler ini [4].

Sistem pendinginan keel menggunakan bagian kapal yang disebut keel. Sistem ini merupakan sirkuit pendingin tertutup yang dipasang secara eksternal di bawah permukaan air pada lambung kapal. Konsep pendinginan keel mirip dengan sistem radiator pada mobil, di mana cairan pendingin dialirkan melalui keel cooler untuk menghilangkan panas sebelum kembali ke mesin. Keel cooler tetap dalam kontak konstan dengan air laut, yang memungkinkan transfer panas berlangsung secara efisien antara cairan pendingin dan air laut.

2. Metodologi

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di ruang laboratorium Heat Transfer Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan berlangsung selama selama 3 bulan yaitu dari bulan Juni sampai Agustus 2022.

2.2 Objek Penelitian

Objek yang menjadi bahan penelitian ini adalah Kapal OT. Skyliie yang dapat dilihat pada Gambar 1, dengan data kapal yang dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Pembangunan Kapal OT. Skyliie dengan Sistem Pendingin Keel Cooler

Tabel 1. Data Utama Kapal OT. Skyliie

Dimensi Kapal	
Panjang (LBP)	74.63 m
Lebar	18 m
Sarat (Draft)	4.5 m
Berat (DWT)	3700 Ton
Kecepatan (v)	10 Knot
Data Mesin Kapal	
Merel Mesin	Cummins
Model	KTA 50-M2
RPM	1900 Rpm
Daya Mesin	1530 Hp / 1141 Kw
Spesifikasi Material Keel Cooler	
Jenis Material	Baja
Ukuran Plat	250 x 90 x 9 x 1200 mm
Jumlah Plat	34/34
Total Plat	68 batang

Gambar keel cooler yang dijadikan objek penelitian dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3, dengan spesifikasi pada Tabel 2.



Gambar 2. Keel Cooler pada Kapal OT. Skyliie



Gambar 3. Letak Penetrasi Keel Cooler

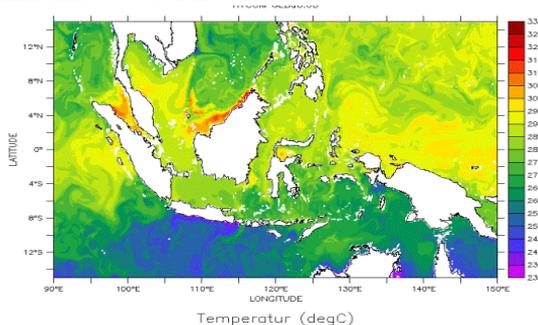
Tabel 2. Variasi Dimensi Penampang Inlet

Model	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)
Standar	375,841	0,090	0,090
Variasi I	375,841	0,078	0,078
Variasi II	375,841	0,102	0,102

Data yang diperoleh pada tabel 1 variasi dimensi variasi penampang pada inlet kapal, hasil dari beberapa sumber yaitu dari pihak galangan PT. Samudra Marine Indonesia, dan berbagai jurnal ilmiah.

2.3 Data Suhu Air Laut Indonesia

(BMKG, 12-07-2022) Pada perairan Indonesia, khususnya pada perairan laut jawa memiliki suhu permukaan laut maksimum sebesar 31°C dan suhu permukaan air laut minimum sebesar 28°C.



Gambar 4. Peta Suhu Air Laut

Penelitian ini bertujuan untuk mencari tahu seberapa besar pengaruh sebuah kinerja penukar kalor terhadap sistem pendinginan mesin utama kapal OT. Skylie. Dimana alat penukar kalor yang digunakan di kapal ini sangat berbeda dengan alat penukar kalor yang biasanya digunakan pada kapal secara umum, alat penukar kalor yang digunakan adalah keel cooler yang terdiri dari beberapa kumpulan plat yang berbentuk persegi panjang. Konsep dari keel cooler ini yaitu dipasang di luar lambung kapal

dan proses perpindahan kalor secara alami antara fluida panas yang keluar dari mesin lalu masuk ke pipa yang diletakkan di luar lambung kapal dengan media fluida pendinginnya yaitu air laut yang berada di luar kapal. Mengacu pada rumusan masalah yang telah disusun sebelumnya, bahwa power/torque dari mesin utama akan divariasikan, berdasarkan variasi power/torque akan diketahui seberapa besar pengaruh kinerja alat penukar kalor ini terhadap sistem pendinginan mesin utama kapal.

Penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu analisis dan simulasi CFD. Metode analisis dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus pendekatan yang diperoleh dari beberapa buku dan penelitian sebelumnya. Sementara metode simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan aplikasi Ansys CFX R22, dimana simulasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai temperatur air pendingin setelah melewati keel cooler system dan distribusi panas pada aliran dalam pipa. Pada metode CFD pembuatan model dilakukan dengan menggunakan aplikasi desain Rhinoceros 6 dengan menggunakan data yang diperoleh atau diberikan oleh PT. Samudra Marine Indonesia. Hasil analisis dan simulasi CFD kemudian dibandingkan untuk mengetahui, apakah hasil analisis yang dilakukan sudah sesuai dengan hasil simulasi CFD. Apabila hasil yang diperoleh dari hasil analisis dengan simulasi CFD sudah sesuai, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan analisa terkait kinerja dari alat penukar kalor keel cooler ini.

Dalam upaya meningkatkan efisiensi sistem pendinginnya, dilakukan penelitian untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk Keel Cooler terhadap performa pendinginan mesin utama. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak ANSYS CFX untuk mensimulasikan berbagai ukuran bentuk Keel Cooler guna mengetahui bentuk yang paling efisien.

Untuk mengetahui pengaruh kinerja tersebut, maka akan dicari tahu nilai variabel yang berpengaruh, diantaranya yaitu nilai koefisien perpindahan kalor menyeluruh, $\Delta LMTD$ (nilai beda suhu rata-rata), nilai perpindahan kalor total dan nilai efektivitas. Kemudian setelah didapatkan nilai dari variabel yang berpengaruh, maka akan ditarik sebuah kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah yang telah disusun sebelumnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemodelan Keel Cooler

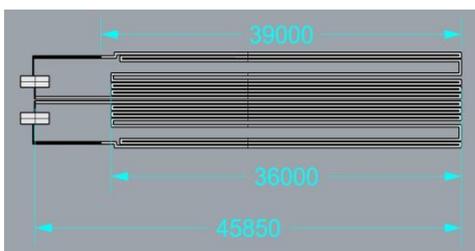
Pada tahap ini, dilakukan penggambaran model penelitian berupa plat-plat yang berbentuk balok (keel cooler), yang kemudian akan dianalisis dan disimulasikan pada tahap selanjutnya. Keel cooler system ini terdiri dari 68 plat yang disusun sebagai pipa yang diletakkan di luar lambung kapal. Pada proses pembuatan model ini dilakukan dengan menggunakan Aplikasi desain Rhinoceros 6.

Panjang, Lebar, Tinggi & Jumlah Pipa Keel Cooler

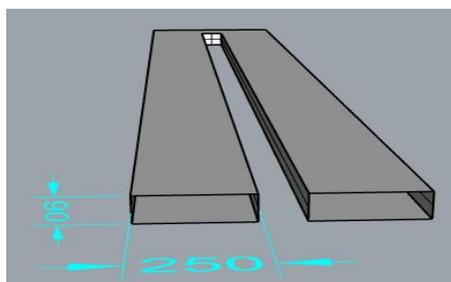
Pada keel cooler ini terdiri dari 68 plat yang dibentuk balok dengan 34 plat pada sisi kiri dan 34 plat pada sisi kanan. Jika plat-plat tersebut digabungkan maka akan membentuk 10 jenis pipa (penampang berbentuk balok) pada sisi kiri dan kanan, yang terdiri dari 1 buah pipa inlet, 1 buah pipa outlet dan 8 buah pipa dengan dimensi panjang yang sama. Pemodelan pipa dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6 dan data pipa dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Berat Benda Uji

Panjang pipa inlet	45.85 mm
Panjang pipa outlet	39.00 mm
Panjang pipa sama	36.00 mm



Gambar 5. Panjang Pipa Keel Cooler



Gambar 6. Dimensi Lebar dan Tinggi

3.2 Perhitungan Analisis Kinerja Keel Cooler

Perhitungan Tahanan Termal

Alat penukar panas Keel Cooler terjadi dua proses perpindahan panas, yaitu secara konduksi dan secara konveksi. Adapun tahapan dalam menghitung nilai tahanan termal pada pipa adalah sebagai berikut

$$Ri = \frac{1}{hi \times Ai}$$

Dimana

$$hi = Nu \times \frac{k}{d}$$

$$= 635.864 \times \left(\frac{0.666}{0.341}\right)$$

$$= 731.273 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

$$= 374.996 \text{ (Nusselt Number)}$$

$$k = 0.666 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Di = 0.341 \text{ m}$$

$$Ai = 240.148 \text{ m}^2$$

Jadi nilai tahanan thermal convection yang terjadi didalam pipa dapat dihitung sebagai berikut:

$$Ri = \frac{1}{731.273 \times 121.785}$$

$$= 1.122 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Dengan menggunakan prinsip perhitungan yang sama dengan perbandingan sebelumnya, maka diperoleh nilai yang diperlukan dalam analisis tahanan termal sebagai berikut yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Tahanan Termal Total Setiap Variasi

Variasi	Power (%)	T (°C)	Rwall (°C/W) x 10 ⁻⁵	Ro (°C/W) x 10 ⁻⁵	Ri (°C/W) x 10 ⁻⁶	Rtotal (°C/W) x 10 ⁻⁵
I	100	82	4,022	1,847	1,122	6,993
II	100	82	3,586	1,859	1,073	6,471
III	100	82	4,660	1,829	1,176	7,666

Perbedaan Bada Suhu Keseluruhan Rata-rata Logaritmik

Oleh karena nilai temperatur fluida panas yang masuk ke keel cooler dan nilai temperatur fluida dingin disekitar keel cooler telah diketahui

dari hasil analisis dan simulasi Ansys. Maka nilai $\Delta LMTD$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [5]:

$$\Delta T_1 = T_{hin} - T_{cout} = 82 - 31.1 = 50.9^\circ C$$

$$\Delta T_2 = T_{hin} - T_{cin} = 82 - 30 = 52^\circ C$$

Sehingga,

$$\Delta_{LMTD} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = 51.448^\circ C$$

Perpindahan Kalor Menyeluruh

Didalam penukar panas, dua aliran biasanya di bagi oleh dinding padat. Konveksi digunakan untuk menyalurkan panas dari fluida panas ke dinding, konduksi digunakan untuk mentransferkan panas dari dinding ke dinding pipa, dan konveksi digunakan untuk mentransfer panas dari dinding pipa ke fluida air laut yang dingin. Perhitungan berikut digunakan untuk menghitung koefisien perpindahan panas keseluruhan pada bagian dalam dan luar pipa pada Keel Cooler [6].

$$U_o = 1/R_o \times A_o$$

$$U_i = 1/R_i \times A_i$$

Dimana

R_i : tahanan termal bagian dalam pipa $82^\circ C = 1.122 \times 10^{-6}^\circ C/W$

R_o : tahanan termal bagian luar pipa $30^\circ C = 1,847 \times 10^{-5}^\circ C/W$

A_i : 240,148 m^2

A_o : 227,858 m^2

Sehingga diperoleh nilai U_o sebesar 209,179 $W/m^2^\circ C$ dan U_i sebesar 623,386 $W/m^2^\circ C$. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hubungan Perpindahan Kalor Menyeluruh Pada Tiap Variasi

Variasi	Power (%)	T ($^\circ C$)	A_i (m^2)	R_i ($^\circ C/W$)	U_i ($W/m^2^\circ C$)
Standar			240,148	1.122×10^{-6}	692,765
I	100	82	146,600	1.072×10^{-6}	635,586
II			110,510	1.176×10^{-6}	769,087

Dalam aplikasi alat penukar kalor, untuk menjadi acuan nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan biasanya didasarkan pada bagian

permukaan luar pipa, kemudian dapat dipresentasikan dalam hal koefisien perpindahan panas keseluruhan dengan menggunakan persamaan, sebagai berikut:

$$U_{total} = 1/(D_o/D_i) \times (1/h_i) + ((D_o/D_i) \times f_i) + [D_o/2k] \times (\ln(D_o/D_i)) + f_o + (1/h_o)$$

$$U_{total} = 1/(0,359/0,341) \times (1/731,273) + ((0,359/0,341 \times 0,0001) + [0,359/2 \times 54] \times (\ln(0,359/0,341))) + 0,0002 + (1/237,534)$$

$$U_{total} = 162,347 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ C$$

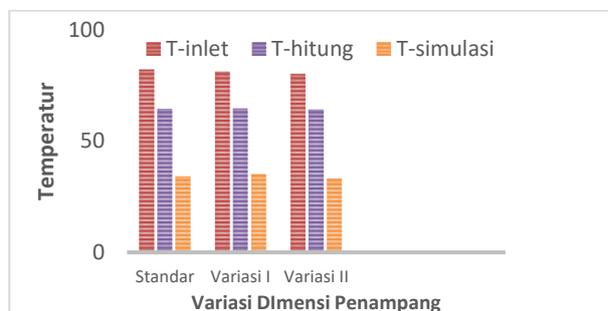
Menentukan Temperatur Fluida Panas yang Keluar

Dalam aplikasi alat penukar kalor, untuk menjadi acuan nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan biasanya didasarkan pada bagian permukaan luar pipa, kemudian dapat dipresentasikan dalam hal koefisien perpindahan panas keseluruhan dengan menggunakan persamaan, sebagai berikut:

Tabel 6. Perbandingan Nilai Temperatur Analisis Dengan Simulasi

NO	Variasi	Power Kapal (%)	T_{inlet} ($^\circ C$)	T_{hitung} ($^\circ C$)	$T_{simulasi}$ ($^\circ C$)
1	Standar		82	64,124	33
2	I	100	82	64,355	35
3	II		82	63,813	32

Temperatur fluida panas yang keluar setelah melewati keel cooler system ditentukan dengan metode analisa dan simulasi CFD, dimana simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan software Ansys CFX R22. Adapun untuk nilai perbandingan hasil analisis dan simulasi CFD dapat dilihat pada tabel berikut:



Gambar 7. Grafik Perbandingan Nilai Temperatur Analisis Dengan Simulasi

Dari Gambar 7 diatas diketahui bahwa nilai temperatur setelah melewati Keel Cooler mengalami perubahan yang sangat signifikan. Perbandingan antara perhitungan nilai

temperatur analisis terlihat hanya sedikit adanya perbedaan dengan nilai simulasi. Dan dapat diketahui keduanya menjelaskan bahwa semakin kecil dimensi *Keel Cooler* maka nilai temperaturnya akan semakin menurun.

4. Kesimpulan

Nilai perpindahan kalor total dan hasil simulasi dari alat penukar kalor pada sistem keel cooler dianalisis melalui tiga variasi penampang inlet, yaitu variasi standar dengan lebar 90 mm, variasi I dengan lebar 102 mm, dan variasi II dengan lebar 78 mm. Berdasarkan hasil simulasi, variasi dimensi lebar yang paling efektif diperoleh pada variasi III dengan lebar inlet 0,72 m, yang menghasilkan perbedaan suhu sebesar 32 °C. Pada variasi III tersebut juga diperoleh nilai perpindahan kalor menyeluruh tertinggi sebesar 145,176 W/m²C. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil dimensi inlet pada sistem keel cooler, maka semakin besar perpindahan kalor yang terjadi, sehingga efektivitas pendinginan meningkat secara signifikan.

Referensi

- [1] M. L. Setyana, "Retrofit Sistem Pendingin Mesin untuk Kapal Coaster 1200GT dengan Menggunakan Sistem Keel Cooler," Universitas Indonesia, 2014.
- [2] E. A. Handoyo, "Pengaruh Kecepatan Aliran terhadap Efektivitas Shell-and-Tube Heat Exchanger," *J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 86–90, 2000.
- [3] Idawati, "Analisis Efektivitas Penukar Kalor U-Tube Bundle pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal," Universitas Hasanuddin, 2021.
- [4] M. Faizal, "Efektivitas Keel Cooler pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal," Universitas Hasanuddin, 2023.
- [5] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [6] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2002.