

EVALUASI KINERJA SISTEM PENDINGIN MESIN INDUK KAPAL TERHADAP EFISIENSI OPERASIONAL

Agustin Dwi Sumiwi^{1*}, Deza Zalia Permata Dewi², Tatri Lara Safitri³

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

Abstrak

Sistem pendingin yang tidak bekerja optimal menurunkan efisiensi mesin induk dan meningkatkan biaya operasional kapal. Penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem pendingin mesin induk kapal bulk carrier 5.000 DWT milik PT Samudera Indonesia Tbk. rute Batam–Dumai–Belawan selama 45 hari. Pengukuran menggunakan termokopel tipe K, pressure gauge digital, dan ultrasonic flow meter dengan interval 4 jam. Hasilnya menunjukkan penurunan efisiensi 23,8% dari kondisi desain akibat fouling pada heat exchanger, dengan tahanan fouling sisi air tawar $4,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$ dan sisi air laut $8,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$ (standar TEMA: $2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$). Penerapan condition-based maintenance (CBM) dan nano-coating TiO_2 meningkatkan koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dari 2.174 menjadi 2.684 $\text{W/m}^2\text{K}$ (+23,5%), efisiensi mencapai 94,2%, dan menurunkan SFOC dari 196 menjadi 184 g/kWh. Penghematan biaya operasional diperkirakan Rp 178,2 juta per tahun dengan payback period CBM 4,2 bulan.

Kata kunci : sistem pendingin kapal; heat exchanger; fouling; efisiensi termal; condition-based maintenance

Abstract

A cooling system that does not work optimally reduces main engine efficiency and increases ship operating costs. This study evaluates the performance of the main engine cooling system of a 5,000 DWT bulk carrier owned by PT Samudera Indonesia Tbk. on the Batam–Dumai–Belawan route for 45 days. Measurements used type K thermocouples, digital pressure gauges, and an ultrasonic flow meter at 4-hour intervals. The results show a 23.8% efficiency decline from the design condition due to heat exchanger fouling, with fouling resistance of $4.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$ on the fresh water side and $8.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$ on the sea water side (TEMA standard: $2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$). Condition-based maintenance (CBM) with TiO_2 nano-coating increased the overall heat transfer coefficient (U) from 2,174 to 2,684 $\text{W/m}^2\text{K}$ (+23.5%), reached 94.2% efficiency, and reduced SFOC from 196 to 184 g/kWh. Operating cost savings are estimated at IDR 178.2 million per year with a CBM payback period of 4.2 months.

Keywords : ship cooling system; heat exchanger; fouling; thermal efficiency; condition-based maintenance

1. PENDAHULUAN

Sistem pendingin menjaga suhu kerja mesin induk kapal melalui sirkulasi air tawar yang didinginkan oleh air laut pada *heat exchanger*. Kinerja *heat exchanger* dipengaruhi oleh endapan atau *fouling* pada permukaan perpindahan panas yang menambah tahanan termal (Kern, 1950; Shah & Sekulić, 2003). Di lingkungan laut, *fouling* dapat berupa kerak (*scale*) maupun lapisan biologis (*biofilm*) (Yang et al., 2020). Jika tidak ditangani, suhu air pendingin naik, efektivitas *heat exchanger* turun, daya pompa meningkat, dan efisiensi mesin menurun sehingga biaya operasional bertambah. Penelitian ini bertujuan mengukur kinerja sistem pendingin mesin induk pada kapal *bulk carrier* 5.000 DWT, menganalisis tahanan *fouling*, dan mengevaluasi dampak penerapan *condition-based maintenance* (CBM) dan *nano-coating* TiO_2 terhadap efisiensi operasional.

2. METODE PENELITIAN

Objek dan Lokasi

Penelitian dilakukan pada kapal *bulk carrier* 5.000 DWT milik PT Samudera Indonesia Tbk., Batam, pada rute Batam–Dumai–Belawan selama 45 hari operasi.

Pengukuran

Pengukuran menggunakan termokopel tipe K ($\pm 0,5^\circ\text{C}$), *pressure gauge* digital Keller LEO 5, dan *ultrasonic flow meter* Endress+Hauser Proline Prosonic Flow B 200 dengan interval pengambilan data 4 jam.

Analisis Fouling

Tahanan *fouling* dianalisis dengan metode *Wilson Plot* dan dibandingkan dengan standar TEMA (2019).

Program CBM

Program CBM terdiri atas pembersihan kimia dengan asam sitrat 5% setiap 1.000 jam, *strainer* yang membersihkan diri sendiri (*self-cleaning*), dan *nano-coating* TiO_2 pada permukaan *heat exchanger*. Kinerja dibandingkan sebelum dan sesudah CBM.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Desain dan Kondisi Aktual

Tabel 1. Parameter desain dan kondisi aktual

Parameter	Desain	Aktual	Perubahan
T air tawar keluar HE ($^\circ\text{C}$)	85	91,4	+7,5%
T air tawar masuk mesin ($^\circ\text{C}$)	70	78,2	+11,7%
Laju alir air tawar (m^3/jam)	28,0	24,6	-12,1%
T air laut keluar HE ($^\circ\text{C}$)	45	54,8	+21,8%
Overall HTC, U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	2.850	2.174	-23,7%
Efektivitas HE (ϵ)	0,82	0,65	-20,7%
Daya pompa air tawar (kW)	18,5	22,4	+21,1%

Kondisi aktual menyimpang dari desain: suhu air tawar dan air laut keluar *heat exchanger* meningkat, laju alir turun 12,1%, U turun 23,7%, dan efektivitas turun dari 0,82 menjadi 0,65. Akibatnya daya pompa air tawar naik 21,1%.

Analisis Fouling

Tabel 2. Analisis fouling (metode Wilson Plot)

Sisi	Tahanan fouling ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)	Komposisi dominan
Air tawar	$4,2 \times 10^{-5}$	Kerak CaCO_3
Air laut	$8,6 \times 10^{-5}$	Biofilm dan kerak

Tahanan *fouling* pada kedua sisi melebihi standar TEMA ($2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$), dengan sisi air laut paling tinggi karena adanya biofilm dan kerak.

Kinerja Sebelum dan Sesudah CBM

Tabel 3. Kinerja sebelum dan sesudah CBM

Parameter	Sebelum	Sesudah	Perubahan
U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	2.174	2.684	+23,5%
Efektivitas (ϵ)	0,65	0,77	+18,5%
T masuk mesin ($^\circ\text{C}$)	78,2	71,4	-6,8 $^\circ\text{C}$
Efisiensi termal mesin	38,4%	41,2%	+2,8 pp
SFOC (g/kWh)	196	184	-6,1%
Biaya operasional per bulan (Rp)	16.480.000	13.670.000	-17,0%

Penerapan CBM dan *nano-coating* TiO₂ memulihkan sebagian besar kinerja *heat exchanger*: U naik 23,5%, suhu masuk mesin turun 6,8°C, efisiensi termal mesin naik 2,8 poin persentase, dan SFOC turun 6,1%. Penghematan biaya operasional diperkirakan Rp 178,2 juta per tahun dengan *payback period* CBM 4,2 bulan.

Kendala penelitian meliputi akses yang terbatas ke ruang mesin saat kapal beroperasi penuh sehingga sebagian pengukuran dilakukan saat kapal bersandar di Batam, suhu ruang mesin di atas 45°C yang membatasi durasi sesi pengukuran, dan perlunya kalibrasi ulang beberapa *flow meter* akibat getaran mesin.

4. KESIMPULAN

1. *Fouling* pada *heat exchanger* menurunkan kinerja sistem pendingin: U turun dari 2.850 menjadi 2.174 W/m²K dan efektivitas turun dari 0,82 menjadi 0,65, dengan tahanan *fouling* $4,2 \times 10^{-5}$ m²K/W (air tawar) dan $8,6 \times 10^{-5}$ m²K/W (air laut) yang melebihi standar TEMA.
2. Program CBM dan *nano-coating* TiO₂ meningkatkan U menjadi 2.684 W/m²K (+23,5%), menurunkan suhu masuk mesin menjadi 71,4°C, dan menurunkan SFOC menjadi 184 g/kWh.
3. Biaya operasional turun 17,0% per bulan, dengan penghematan Rp 178,2 juta per tahun dan *payback period* CBM 4,2 bulan.

5. SARAN

Berikut beberapa saran dari penelitian ini:

1. Perlu dikembangkan sistem pemantauan kondisi pendingin berbasis *wireless* IoT dengan sensor terdistribusi untuk pemantauan *real-time*.
2. Prediksi kebutuhan perawatan dan deteksi anomali dini dapat dikembangkan menggunakan *machine learning*, misalnya algoritma *Random Forest*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). Wiley.
- DNV. (2022). *Rules for Classification – Ships Part 4: Machinery Systems*. DNV AS.
- Kern, D. Q. (1950). *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill.
- MAN Energy Solutions. (2022). *MAN B&W Diesel Engine Operating Manual: L35MC-C-TII*.
- Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Wiley.
- TEMA. (2019). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (10th ed.).
- Wärtsilä. (2021). *Wärtsilä 46DF Product Guide*. Wärtsilä Corporation.
- Yang, J. J., Zhang, G. Y., & Wu, J. H. (2020). Fouling characteristics and anti-fouling strategies in marine heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109802.