



## **Analisis Optimasi Manajemen Termal dan Efisiensi Konsumsi Bahan Bakar pada Transportasi Muatan Asphalt 60/70: Studi Kasus MT LG Asphalt 2**

**Rahman Raising<sup>1\*</sup>, Rusnaedi<sup>2</sup>, Ratnawati Raising<sup>3</sup>, Sudarman<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Prodi Nautika, Politeknik Maritim AMI Makassar (POLIMARIM), Makassar, Indonesia

<sup>2</sup>Prodi Transportasi laut, Politeknik Maritim AMI Makassar (POLIMARIM), Makassar, Indonesia

<sup>3</sup>Unit Penyelenggara Pelabuhan Kelas 2, Bulukumba, Indonesia

<sup>4</sup>Prodi Teknologi Rekayasa Operasi Kapal, Politeknik Maritim AMI Makassar (POLIMARIM), Makassar, Indonesia

Email: <sup>1\*</sup>rahmanraising1987@gmail.com

### **Abstract**

*This study analyses the operational strategy for controlling the temperature of asphalt 60/70 cargo on the asphalt tanker MT LG Asphalt 2 during an eight-day voyage from Sungai Udang (Melaka) to Anggrek (Gorontalo Utara). Temperature control is critical to maintain cargo pumpability, product quality, energy efficiency, and operational safety. The research adopts a single case study with a descriptive-quantitative approach. Cargo temperature data were collected every 24 hours and combined with boiler operation records to formulate four basic heating actions (no heating, one boiler, two boilers 24 h, two boilers 48 h). These actions were then arranged into eleven heating strategies for an eight-day voyage. For each strategy, the final average cargo temperature and total fuel consumption (LSMGO/LSMFO) were calculated and compared with the voyage instruction requirement of 135–140 °C at discharge. The results show that no heating causes a temperature drop of about 3 °C/day, whereas continuous operation of two boilers is energy intensive. Among the eleven models, Strategy No. 11 (A–0–C–A–C–0–A–A) is the most optimal, achieving a final temperature of about 140 °C with moderate fuel use. The study recommends an intermittent, data-driven heating pattern as a practical basis for standard operating procedures on asphalt tankers.*

**Keywords:** Asphalt 60/70, Cargo Heating Strategy, Thermal Oil Heating, Fuel Consumption, Tanker Operation.

### **Abstrak**

Penelitian ini menganalisis strategi operasional pengaturan suhu muatan asphalt 60/70 pada kapal tanker aspal MT LG Asphalt 2 selama pelayaran delapan hari dari Sungai Udang (Melaka) menuju Anggrek (Gorontalo Utara). Pengendalian suhu muatan sangat penting untuk menjaga kemudahan pemompaan, kualitas produk, efisiensi energi, dan keselamatan operasi. Penelitian menggunakan desain studi kasus tunggal dengan pendekatan deskriptif-kuantitatif. Data suhu muatan dikumpulkan setiap 24 jam dan dipadukan dengan catatan operasi boiler untuk merumuskan empat tindakan pemanasan dasar (tanpa pemanasan, satu boiler, dua boiler 24 jam, dua boiler 48 jam). Keempat tindakan tersebut disusun menjadi sebelas strategi pemanasan untuk skenario pelayaran delapan hari. Untuk tiap strategi dihitung suhu rata-rata muatan pada hari ke-8 dan total konsumsi bahan bakar (LSMGO/LSMFO), kemudian dibandingkan dengan ketentuan voyage instruction sebesar 135–140 °C saat bongkar. Hasil menunjukkan bahwa tanpa pemanasan suhu turun sekitar 3 °C/hari, sedangkan pengoperasian dua boiler terus-menerus sangat boros energi. Dari sebelas model, Strategi No. 11 (A–0–C–A–C–0–A–A) paling optimal karena menghasilkan suhu akhir sekitar 140 °C dengan konsumsi bahan bakar yang moderat. Penelitian merekomendasikan pola pemanasan intermiten berbasis data sebagai dasar penyusunan SOP pada kapal tanker aspal.

**Kata Kunci:** Asphalt 60/70, Strategi Pemanasan Muatan, Thermal Oil Heating, Konsumsi Bahan Bakar, Operasi Tanker.

## 1. PENDAHULUAN

Asphalt 60/70 merupakan salah satu jenis bitumen penetrasi yang paling banyak digunakan sebagai bahan pengikat perkerasan jalan dan infrastruktur, sehingga kontinuitas pasokan dan terjaganya mutu produk dari kilang sampai ke pengguna akhir sangat bergantung pada sistem transportasi dan penanganan muatan yang andal. Dalam rantai pasok tersebut, kapal tanker aspal seperti LG Asphalt 2 memegang peran strategis untuk mengangkut muatan pada kondisi suhu tinggi yang harus dijaga stabil selama proses pemuatan, pelayaran, hingga pembongkaran. Secara karakteristik, bitumen penetrasi 60/70 memiliki nilai penetrasi 60–70 (1/10 mm pada 25 °C) dengan titik lembek sekitar 48–56 °C, sehingga pada suhu lingkungan normal material ini berada dalam kondisi padat atau sangat kental. Agar tetap fluida dan dapat dipompa, bitumen 60/70 umumnya harus dipanaskan hingga kisaran 150–180 °C dan dijaga agar tidak mengalami pemanasan berlebih yang dapat mempercepat penuaan (*ageing*) maupun penurunan kualitas produk. Berbagai panduan teknis dan lembar data keselamatan juga menekankan bahwa suhu penyimpanan dan pengangkutan bitumen harus dijaga jauh di bawah titik nyala dan tidak melampaui sekitar 200 °C untuk mencegah risiko oksidasi berlebihan, degradasi termal, maupun bahaya kebakaran (Basekim, 2020; Science, 2025).

Pada pengoperasian kapal tanker aspal, pengaturan suhu muatan tidak hanya berkaitan dengan mutu produk, tetapi juga menyangkut keselamatan pelayaran, keandalan permesinan, serta efisiensi konsumsi energi untuk pemanasan. Beberapa sumber praktik industri menyebutkan bahwa *loading temperature* untuk bitumen/asphalt umumnya berada di sekitar 140 °C, suhu pelayaran sekitar 150 °C, dan suhu pembongkaran 150–160 °C, dengan bantuan sistem pemanas *thermal oil* dan insulasi tangki untuk meminimalkan kehilangan panas selama pelayaran. Jika suhu muatan turun terlalu rendah, viskositas meningkat secara drastis sehingga proses pemompaan dan *stripping* menjadi sulit, bahkan berpotensi menyisakan residu tebal di dasar tangki. Sebaliknya, pemanasan yang terlalu agresif dan berkepanjangan dapat meningkatkan laju penuaan bitumen, menurunkan nilai penetrasi, serta mengakibatkan perubahan sifat reologi yang tidak diinginkan, di samping meningkatkan risiko paparan gas berbahaya dan potensi *over-pressure* dalam tangki (Sabita, 2020; Saenko, Chernov, & Zakharov, 2023).

Sejalan dengan perkembangan teknologi dan tuntutan regulasi keselamatan serta perlindungan lingkungan, berbagai studi mutakhir mulai menyoroiti perilaku bitumen pada suhu tinggi dan implikasinya terhadap stabilitas penyimpanan serta kebutuhan energi pemanasan. Atasağun (2023) meneliti sifat reologi suhu tinggi dan stabilitas penyimpanan bitumen termodifikasi dan menunjukkan bahwa kestabilan sifat reologi sangat dipengaruhi oleh pola pemanasan dan kondisi penyimpanan jangka panjang (Neslihan Atasağun, 2023). Zou dkk. (2022) mengkaji kinerja binder bitumen hidrolik pada suhu tinggi dan rendah untuk aplikasi bendungan, dan menegaskan kembali pentingnya pengendalian siklus suhu terhadap ketahanan mekanik dan umur layan material (Zou et al., 2022). Haji dkk. (2024) mengevaluasi sensitivitas suhu dan stabilitas penyimpanan bitumen termodifikasi plastik dan menemukan bahwa sejarah pemanasan (*heat history*) dan fluktuasi suhu selama penyimpanan maupun transportasi berkontribusi signifikan terhadap degradasi sifat binder (Haji et al., 2024).

Di sisi lain, penelitian mengenai aspek efisiensi energi dan dekarbonisasi dalam penyimpanan bitumen juga berkembang. Cook dkk. (2025), menggunakan pemodelan CFD untuk menilai kehilangan panas dan potensi pemanfaatan sistem penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*) pada fasilitas penyimpanan bitumen, dan menunjukkan bahwa pola pemanasan yang dioptimalkan dapat mengurangi konsumsi

energi tanpa melanggar batasan suhu aman bitumen (Cook et al., 2025). Studi lain mengenai kehilangan panas dan penuaan bitumen di tangki menyimpulkan bahwa pengaturan suhu yang tidak tepat dapat mempercepat proses ageing sekaligus menyebabkan pemborosan energi pada sistem pemanas (Saenko et al., 2023).

Penelitian ini berbeda secara mendasar dari studi manajemen termal pada instalasi darat karena konteksnya adalah pemanasan muatan di sistem yang bergerak (kapal), bukan tangki statis di terminal/pabrik. Pada kapal tanker aspal, pengaturan suhu Asphalt 60/70 harus dilakukan dalam kondisi dinamis (perubahan cuaca dan temperatur laut, hembusan angin, gerak kapal/*rolling pitching*, serta fluktuasi durasi pelayaran dan kecepatan), sehingga kehilangan panas dan respons termalnya tidak bersifat konstan seperti pada fasilitas darat.

Dari sisi operasional kapal, beberapa panduan teknis dan artikel praktik laut terbaru menekankan bahwa sistem pemanas, pola sirkulasi muatan, dan monitoring suhu real-time merupakan elemen kunci untuk menjaga kestabilan suhu muatan bitumen di kapal tanker khusus. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut lebih banyak berfokus pada penyimpanan bitumen di instalasi darat (asphalt mixing plant, depot penyimpanan) atau pada karakteristik material dan modifikasinya, bukan pada strategi operasional secara komprehensif di kapal tanker aspal yang beroperasi pada lintasan pelayaran tertentu. Kajian spesifik mengenai strategi pengaturan suhu muatan asphalt 60/70 di kapal jenis asphalt/bitumen carrier, terutama pada kapal LG Asphalt 2 yang beroperasi di perairan tropis dengan variasi durasi pelayaran, pola operasi pelabuhan, dan keterbatasan fasilitas darat, masih relatif terbatas. Padahal, variasi kondisi lingkungan laut, konfigurasi sistem pemanas, strategi trimming muatan, dan kebijakan operasi mesin pemanas (*thermal oil boiler*) sangat berpotensi memengaruhi profil suhu muatan, konsumsi bahan bakar untuk pemanas, serta risiko deviasi mutu produk ketika tiba di pelabuhan tujuan (Lestianto, 2025).

Keterbatasan tersebut menimbulkan gap penelitian berupa belum adanya model strategi pengaturan suhu muatan yang terformulasi secara spesifik dan aplikatif untuk kondisi operasi kapal LG Asphalt 2. Dalam praktiknya, keputusan terkait kapan pemanasan dinaikkan atau diturunkan, penetapan *set-point* suhu pada fase pelayaran yang berbeda, pola sirkulasi muatan antar-tangki, serta respons operator terhadap gangguan masih banyak bergantung pada pengalaman individu dan prosedur internal yang belum dievaluasi secara kuantitatif, sehingga membuka peluang terjadinya ketidakefisienan energi, ketidakkonsistenan mutu muatan, dan peningkatan risiko keselamatan apabila strategi pengaturan suhu tidak didasarkan pada analisis teknis yang sistematis. Di sisi lain, sebagian model pemanasan aspal konvensional masih menempatkan kondisi lingkungan sebagai faktor implisit karena banyak dikembangkan untuk tangki darat yang relatif stasioner, padahal pada operasi kapal suhu air laut dan suhu udara merupakan kondisi batas yang berubah-ubah dan sangat menentukan laju kehilangan panas. Perubahan kondisi lingkungan ini berpengaruh langsung terhadap profil suhu muatan, konsumsi bahan bakar pemanas, serta risiko deviasi mutu saat tiba di pelabuhan tujuan, namun, aspek tersebut belum banyak dimasukkan sebagai variabel kunci yang secara operasional mengubah strategi pemanasan harian pada lintasan pelayaran tertentu, sehingga mempertegas kebutuhan penelitian ini.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan mengevaluasi model strategi pengaturan suhu muatan Asphalt 60/70 pada MT LG Asphalt 2 yang tidak hanya menggambarkan kondisi eksisting, tetapi juga menghasilkan solusi operasional dan kontribusi teoretis. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan menganalisis baseline operasi pengaturan suhu dan kinerja sistem pemanas sebagai dasar perbaikan; memodelkan perilaku termal-operasional muatan selama pelayaran dengan mengkuantifikasi

perubahan suhu pada berbagai skenario pemanasan; serta mengintegrasikan variabel lingkungan laut (seperti suhu air laut dan suhu udara) sebagai kondisi batas yang memengaruhi kehilangan panas agar strategi pemanasan lebih adaptif dibanding pendekatan konvensional yang cenderung statis. Selanjutnya, penelitian ini merancang, mensimulasikan, dan membandingkan berbagai alternatif strategi pemanasan untuk menentukan strategi yang optimal berdasarkan kriteria multiobjektif, yaitu tetap memenuhi persyaratan suhu bongkar sesuai voyage instruction sekaligus meminimalkan konsumsi bahan bakar boiler. Hasil akhirnya diarahkan untuk menghasilkan keluaran solutif berupa SOP/aturan keputusan (*decision rule*) yang jelas mengenai kapan pemanasan dinaikkan atau diturunkan, penetapan set-point per fase pelayaran, pola sirkulasi antar-tangki, serta respons terhadap gangguan sistem pemanas, sekaligus memperkaya kerangka teoretis manajemen termal muatan cair bersuhu tinggi pada sistem bergerak melalui konsep intermittent heating berbasis data yang dapat direplikasi pada kapal kapal sejenis.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus dengan sifat deskriptif-kuantitatif. Fokus penelitian adalah menganalisis pola pengaturan suhu muatan pada satu voyage tertentu dan menyusun skenario strategi pemanasan yang mampu menjaga mutu muatan sekaligus mengoptimalkan penggunaan bahan bakar.

Secara garis besar tahapan penelitian meliputi:

a. Identifikasi masalah dan studi pustaka

Peneliti mengkaji karakteristik asphalt 60/70, batasan suhu aman, prinsip kerja sistem *Thermal Oil Heating* (TOH), regulasi terkait, serta penelitian terdahulu tentang perilaku bitumen pada suhu tinggi dan efisiensi energi pemanasan. Tahap ini juga digunakan untuk menajamkan rumusan masalah dan tujuan penelitian sebagaimana disajikan pada pendahuluan.

b. Penyusunan model teknis pemanasan dan skenario tindakan

Berdasarkan data teknis boiler (kapasitas, konsumsi bahan bakar per jam) dan karakteristik kehilangan/kenaikan suhu muatan, disusun beberapa bentuk tindakan pemanasan yang menjadi dasar skenario, yaitu:

- 1) *Tindakan 0*: tanpa pemanasan selama 24 jam (menggambarkan penurunan alami suhu muatan).
- 2) *Tindakan A*: pemanasan dengan 2 boiler beroperasi bersamaan selama 24 jam.
- 3) *Tindakan B*: pemanasan dengan 2 boiler selama  $2 \times 24$  jam berturut-turut.
- 4) *Tindakan C*: pemanasan dengan 1 boiler selama beberapa periode 24 jam.

Untuk masing-masing tindakan dihitung perubahan suhu rata-rata muatan dan konsumsi bahan bakar berdasarkan data lapangan dan spesifikasi teknis boiler.

c. Penyusunan model strategi pemanasan selama 8 hari pelayaran

Kombinasi dari Tindakan 0, A, B, dan C kemudian disusun menjadi 11 model strategi pengaturan suhu muatan untuk kondisi pelayaran 8 hari langsung bongkar. Setiap model strategi menggambarkan urutan tindakan harian (hari ke-1 sampai hari ke-8) beserta konsekuensi perubahan suhu muatan dan konsumsi bahan bakar kumulatif.

d. Evaluasi dan seleksi strategi

Seluruh model strategi dievaluasi terhadap dua kriteria utama:

- 1) Kriteria suhu: suhu rata-rata muatan pada hari ke-8 harus berada dalam rentang yang disyaratkan *voyage instruction* (135–140 °C), sehingga muatan siap dibongkar tanpa perlu pemanasan tambahan dan tanpa menyebabkan demurrage.

- 2) Kriteria konsumsi bahan bakar: total konsumsi bahan bakar (LSMGO dan LSMFO) untuk boiler selama 8 hari pelayaran harus serendah mungkin dengan tetap memenuhi kriteria suhu.

Strategi yang tidak memenuhi kriteria suhu dikategorikan tidak direkomendasikan, sedangkan strategi yang memenuhi kriteria suhu kemudian dibandingkan dari sisi efisiensi bahan bakar untuk menentukan strategi yang paling optimal.

## 2.2 Desain Penelitian, Lokasi, dan Obyek

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus tunggal yang berfokus pada satu kapal tanker aspal, yaitu MT LG Asphalt 2, dengan voyage rute Sungai Udang (Melaka) – Pelabuhan Anggrek (Gorontalo Utara) berdurasi sekitar 8 hari pelayaran langsung bongkar.

Obyek utama penelitian meliputi:

- a. Muatan asphalt 60/70 yang diangkut pada 8 tangki muatan (*Cargo Oil Tank* 1P/1S sampai 4P/4S) beserta distribusi muatannya.
- b. Sistem *Thermal Oil Heating* (TOH) mencakup boiler, jaringan pipa dan coil pemanas di tangki muatan, serta pengaturan operasi (jenis bahan bakar, durasi operasi, dan beban).
- c. Dokumen operasional voyage, terutama *voyage instruction* yang memuat ketentuan suhu muatan, jarak dan durasi pelayaran, serta ketentuan lain yang berkaitan dengan pengaturan suhu muatan.

Dengan demikian, analisis difokuskan pada bagaimana kombinasi operasi boiler dan pola pemanasan dapat mengatur suhu muatan asphalt 60/70 selama 8 hari pelayaran sehingga tetap berada pada rentang yang disyaratkan dengan konsumsi bahan bakar yang optimal.

## 2.3 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas:

- a. Data primer
  - 1) Rekaman suhu muatan harian dari *local temperature monitor* dan *cargo temperature monitoring record* yang diambil setiap 24 jam selama pelayaran.
  - 2) Data operasi boiler dan sistem TOH (jam operasi, jumlah boiler yang digunakan, jenis bahan bakar yang dipakai pada setiap fase operasi).
  - 3) Catatan situasi pelayaran (kecepatan, perkiraan durasi, dan informasi operasional terkait) yang mempengaruhi strategi pemanasan.
- b. Data sekunder
  - 1) Dokumen perusahaan dan kapal: *voyage instruction*, *cargo figure after loading*, tabel kapasitas tangki muatan, spesifikasi teknis boiler dan TOH, serta tabel konsumsi bahan bakar standar boiler.
  - 2) Literatur pendukung mengenai karakteristik asphalt 60/70, batasan suhu aman selama transportasi, serta penelitian sebelumnya terkait pemanasan dan penuaan bitumen sebagaimana telah dibahas pada bagian pendahuluan.

## 2.4 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan adalah:

- a. Observasi dan dokumentasi operasional  
Peneliti menggunakan data observasi yang terdokumentasi dalam *cargo temperature monitoring record* untuk melihat perubahan suhu muatan pada masing-masing tangki

dari hari ke hari. Data ini dipadukan dengan catatan operasi boiler (jumlah boiler yang beroperasi dan lama pemanasan) pada periode yang sama.

b. Studi dokumen teknis

Dokumen teknis seperti spesifikasi boiler, diagram sistem TOH, tabel konsumsi bahan bakar, serta *machinery / fuel consumption report* dianalisis untuk memperoleh parameter dasar perhitungan konsumsi bahan bakar dan kemampuan pemanasan sistem.

c. Penelusuran arsip voyage

Arsip voyage yang memuat kondisi pemuatan (kapasitas tangki, distribusi muatan, suhu awal muatan), perjalanan (lama pelayaran), dan pembongkaran digunakan untuk merekonstruksi kronologi pengaturan suhu dari terminal muat sampai terminal bongkar.

## 2.5 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui beberapa langkah berikut:

a. Analisis deskriptif perubahan suhu

Data suhu muatan harian tiap tangki diolah untuk mendapatkan perubahan suhu rata-rata per 24 jam pada kondisi:

- 1) tanpa pemanasan (Tindakan 0),
  - 2) pemanasan dengan 1 boiler,
  - 3) pemanasan dengan 2 boiler dalam satu atau dua periode 24 jam.
- Hasilnya disajikan dalam bentuk tabel untuk menggambarkan kecenderungan penurunan atau kenaikan suhu muatan akibat perlakuan pemanasan tertentu.

b. Model Perhitungan

Dasar perhitungan termodinamika yang digunakan untuk memvalidasi data perubahan suhu muatan per 24 jam pada Tabel 1 serta konsumsi bahan bakar boiler per 24 jam pada Tabel 2. Data suhu muatan dicatat secara berkala setiap 24 jam, kemudian diklasifikasikan berdasarkan tindakan pemanasan (Tindakan 0, A, B, dan C) yang diterapkan selama pelayaran

Bagian ini menyajikan dasar perhitungan termodinamika yang digunakan untuk memvalidasi data perubahan suhu muatan per 24 jam pada Tabel 1 serta konsumsi bahan bakar boiler per 24 jam pada Tabel 2. Data suhu muatan dicatat secara berkala setiap 24 jam, kemudian diklasifikasikan berdasarkan tindakan pemanasan (Tindakan 0, A, B, dan C) yang diterapkan selama pelayaran.

1) Perubahan suhu harian ( $\Delta T$ ) dari data monitoring

Untuk hari ke- $d$  (interval 24 jam), perubahan suhu rata-rata muatan didefinisikan:

$$\Delta T_{24}(d) = T(d+1) - T(d)$$

dengan  $T(d)$  adalah suhu rata-rata muatan pada hari  $d$ . Nilai inilah yang direkap menjadi Perubahan Suhu ( $^{\circ}\text{C}/24$  jam).

2) Energi panas yang hilang/diterima muatan (rumus wajib  $Q = m c \Delta T$ )

Kuantitas panas bersih (netto) yang dialami muatan selama 24 jam dihitung dengan:

$$Q_{\text{cargo},24} = m_{\text{cargo}} c_p \Delta T_{24}$$

Keterangan:

- $Q_{\text{cargo},24}$  = panas bersih pada muatan selama 24 jam (kJ atau MJ)  
 $m_{\text{cargo}}$  = massa muatan (kg). Pada studi kasus, muatan sekitar 4.400 ton  
 $c_p$  = kalor jenis muatan aspal (kJ/kg·K)  
 $\Delta T_{24}$  = perubahan suhu selama 24 jam (K atau  $^{\circ}\text{C}$ ; selisih  $1^{\circ}\text{C} = 1$  K)

Cara memvalidasi Tabel 1 secara termodinamika:

- a) Untuk Tindakan 0 (tanpa pemanasan)  $\Delta T_{24} \approx -3^{\circ}\text{C} \rightarrow Q_{\text{cargo},24}$  bernilai negatif (muatan melepas panas ke lingkungan).
  - b) Untuk Tindakan A  $\Delta T_{24} \approx +2^{\circ}\text{C}$  dan Tindakan C  $\Delta T_{24} \approx +0,5-1^{\circ}\text{C} \rightarrow Q_{\text{cargo},24}$  positif (muatan menerima panas dari sistem TOH).
- 3) Bentuk umum kehilangan panas ke lingkungan

Untuk menunjukkan peran suhu air laut/udara sebagai kondisi batas, Anda bisa cantumkan model sederhana kehilangan panas:

$$Q_{\text{loss}} = UA(T_{\text{cargo}} - T_{\text{env}})\Delta t$$

Keterangan:

- U = koefisien perpindahan panas menyeluruh ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )  
A = luas permukaan efektif perpindahan panas ( $\text{m}^2$ )  
T<sub>env</sub> = suhu lingkungan efektif (gabungan pengaruh laut + udara)  
 $\Delta t$  = waktu (s)

Dalam penelitian Anda, nilai UA tidak harus dihitung rinci; dampaknya ditangkap secara empiris melalui  $\Delta T_{24}$  pada Tabel 1

- 4) Rumus konsumsi bahan bakar boiler  
Konsumsi bahan bakar boiler per 24 jam:  
a) 1 boiler  $\approx 2,6$  ton/24 jam (LSMGO atau LSMFO)  
b) 2 boiler  $\approx 5,2$  ton/24 jam (LSMGO atau LSMFO) dan dinyatakan berasal dari spesifikasi teknis + laporan konsumsi (machinery/fuel consumption report)  
Secara matematis:

$$m_{f,24} = m_f t \quad \text{dengan} \quad t = 24 \text{ jam}$$

atau jika langsung memakai angka Tabel 2:

$$m_{f,24} = \begin{array}{l} 2,6 \text{ ton (1 boiler, 24 jam)} \\ 5,2 \text{ ton (2 boiler, 24 jam)} \end{array}$$

- c. Penyusunan dan evaluasi model strategi  
Kombinasi Tindakan 0, A, B, dan C disusun menjadi 11 model strategi pemanasan. Untuk setiap model strategi dihitung:
- 1) suhu rata-rata muatan pada hari ke-8, dan
  - 2) total konsumsi bahan bakar selama 8 hari. Strategi yang menghasilkan suhu akhir di bawah  $135^{\circ}\text{C}$  dikategorikan tidak memenuhi *voyage instruction* dan dieliminasi, sedangkan strategi yang menghasilkan suhu  $135-140^{\circ}\text{C}$  dinilai lebih lanjut dari sisi konsumsi bahan bakar.
- d. Pemilihan strategi optimal  
Di antara strategi yang memenuhi *voyage instruction*, dipilih strategi dengan suhu akhir mendekati batas atas (sekitar  $139-140^{\circ}\text{C}$ ) dan konsumsi bahan bakar yang moderat. Dalam studi kasus ini, strategi No. 11 teridentifikasi sebagai strategi yang paling seimbang antara pemenuhan suhu muatan dan efisiensi penggunaan bahan bakar, sehingga direkomendasikan sebagai strategi pemanasan yang optimal untuk voyage 8 hari LG Asphalt 2.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Kondisi Awal Muatan dan Sistem Pemanasan

Hasil pengumpulan data menunjukkan bahwa pada voyage studi kasus, MT LG Asphalt 2 memuat asphalt 60/70 sebanyak kurang lebih 4.400 ton di Terminal Petronas Penapisan Sungai Udang, Melaka, untuk diangkut ke Pelabuhan Anggrek, Gorontalo Utara dengan waktu pelayaran sekitar delapan hari dan langsung bongkar tanpa jeda. Muatan didistribusikan merata ke delapan tangki muatan (*Cargo Oil Tank 1P/1S* sampai

4P/4S) dengan rata-rata pengisian sekitar 96% dari volume tangki, menyisakan ruang ekspansi sekitar 3–4% untuk mengakomodasi pemuaian termal akibat pemanasan.

Suhu awal muatan setelah selesai pemuatan tercatat sekitar 140 °C, konsisten dengan rekomendasi suhu muat bitumen/asphalt untuk menjamin kondisi fluida dan kemudahan pemompaan. Nilai ini sekaligus menjadi titik awal perencanaan strategi pemanasan, mengingat *voyage instruction* mensyaratkan agar suhu rata-rata muatan pada saat tiba di pelabuhan bongkar berada pada kisaran 135–140 °C.

Sistem pemanas yang digunakan adalah *Thermal Oil Heating (TOH)* dengan dua unit boiler sebagai sumber panas utama. Thermal oil yang dipanaskan di boiler kemudian disirkulasikan melalui jaringan pipa dan *heating coil* di dalam masing-masing tangki muatan. Sistem ini memungkinkan variasi pola operasi, mulai dari tanpa pemanasan (hanya mengandalkan insulasi tangki), pemanasan dengan satu boiler, hingga pemanasan dengan dua boiler secara bersamaan, yang menjadi dasar penyusunan skenario pemanasan dalam penelitian ini (Hidayat, 2024).

### 3.2 Perubahan Suhu Muatan Akibat Variasi Perlakuan Pemanasan

Data *cargo temperature monitoring record* yang diambil setiap 24 jam menunjukkan respons suhu muatan terhadap berbagai perlakuan pemanasan selama pelayaran. Secara umum diperoleh pola sebagai berikut: (tabel 1).

Tabel 1. Perubahan Suhu Rata-rata Akibat Variasi Perlakuan Pemanasan

Perlakuan	Deskripsi Operasi	Perubahan Suhu (°C/24 jam)	Keterangan
Tindakan 0	Tanpa pemanasan	↓ 3 °C	Penurunan alami suhu muatan
Tindakan A	Dua boiler beroperasi 24 jam	↑ 2 °C	Pemanasan cepat, konsumsi tinggi
Tindakan B	Dua boiler beroperasi 48 jam	↑ 3 °C	Pemanasan sangat efektif tapi boros
Tindakan C	Satu boiler beroperasi 24 jam	↑ 0,5–1 °C	Peningkatan suhu lambat, hemat bahan bakar

Hasil ini mengonfirmasi bahwa penurunan suhu alami muatan asphalt 60/70 di kapal tanker dengan insulasi yang baik masih cukup signifikan, sehingga pengaturan suhu pasif (tanpa pemanasan) dalam periode panjang berisiko menurunkan suhu di bawah batas yang dipersyaratkan *voyage instruction*. Sebaliknya, pengoperasian dua boiler secara terus menerus memang efektif menaikkan suhu, tetapi berpotensi menimbulkan konsumsi bahan bakar yang tinggi dan percepatan *ageing* bitumen bila tidak dikendalikan.

Dari sisi karakteristik material, pola ini sejalan dengan kajian reologi bitumen yang menunjukkan bahwa pada rentang suhu tinggi, perubahan kecil pada suhu dapat berdampak besar terhadap viskositas. Peningkatan suhu beberapa derajat saja sudah cukup untuk mengembalikan bitumen ke rentang viskositas pemompaan yang aman, sehingga strategi pemanasan tidak perlu diarahkan pada pencapaian suhu yang terlalu tinggi, melainkan menjaga agar suhu tetap berada dalam koridor operasi yang dipersyaratkan. Temuan lapangan ini konsisten dengan kajian bitumen termodifikasi yang menekankan pentingnya kontrol siklus suhu untuk menjaga stabilitas penyimpanan dan menghindari degradasi sifat binder (Prosperi & Bocci, 2021).

Analisis data menunjukkan bahwa tanpa pemanasan, suhu muatan turun sekitar ±3°C per 24 jam (Tabel 1). Penurunan ini dapat menyebabkan viskositas asphalt meningkat sehingga sulit dipompa pada akhir pelayaran jika tidak dikendalikan. Penelitian teknologi pemanasan bitumen menyatakan bahwa suhu beton asin harus dipertahankan dalam rentang tertentu (sekitar 140 – 180 °C) untuk mempertahankan fluida dan menghindari degradasi fisik material selama transportasi atau operasi panjang. Pengaturan suhu yang konsisten merupakan kunci untuk menjaga kualitas Asphalt 60/70 selama transportasi panjang seperti di kapal tanker khusus (Eurobitume, 2023).

### 3.3 Konsumsi Bahan Bakar Boiler

Perhitungan konsumsi bahan bakar boiler didasarkan pada spesifikasi teknis dan *machinery/fuel consumption report* kapal. Untuk keperluan analisis strategi, konsumsi per 24 jam diringkas sebagai berikut: (Tabel 2)

Tabel 2. Konsumsi Bahan Bakar Boiler per 24 Jam

Jumlah Boiler	Jenis Bahan Bakar	Konsumsi (ton/24 jam)	Catatan
1 Boiler	LSMGO	± 2,6 ton	Efisien untuk pemanasan bertahap
1 Boiler	LSMFO	± 2,6 ton	Digunakan sebagai alternatif bahan bakar
2 Boiler	LSMGO	± 5,2 ton	Konsumsi tinggi, beban kerja besar
2 Boiler	LSMFO	± 5,2 ton	Risiko <i>overheating</i> lebih tinggi

Tabel 2 menunjukkan konsumsi bahan bakar yang besar pada operasi dua boiler aktif dibandingkan satu boiler. Strategi yang menggabungkan periode tanpa pemanasan, satu boiler, dan dua boiler menghasilkan keseimbangan paling baik antara suhu akhir muatan dan total konsumsi bahan bakar.

Besarnya konsumsi bahan bakar ini menjadi pertimbangan utama karena:

- Biaya operasional meningkat secara langsung proporsional terhadap jumlah dan lama operasi boiler.
- Penggunaan bahan bakar *low sulphur* (LSMGO/LSMFO) harus memenuhi ketentuan IMO 2020 sehingga pemborosan bahan bakar juga berdampak pada aspek kepatuhan lingkungan.
- Beban termal dan mekanis pada sistem TOH dan boiler meningkat jika operasi dilakukan terlalu lama atau dengan kapasitas maksimum, yang berpotensi memperpendek umur peralatan dan meningkatkan kebutuhan perawatan.

Dengan demikian, hasil perhitungan menunjukkan bahwa strategi pemanasan yang terlalu konservatif memang sangat aman dari sisi suhu, tetapi tidak efisien dari sisi konsumsi energi dan keandalan peralatan. Dalam konteks penelitian material bitumen, suhu tinggi selama pemanasan yang berkepanjangan dapat mempercepat proses penuaan (*aging*) bitumen yang disebabkan oleh efek oksidasi dan volatilitas komponen ringan. Penelitian laboratorium terbaru menunjukkan bahwa penyimpanan prolong suhu tinggi dapat mempercepat reaksi oksidatif dan deformasi termal material bitumen sehingga perubahan sifat reologi terjadi lebih cepat (Przyjazny & Boczkaj, 2023).

### 3.4 Evaluasi Model Strategi Pemanasan Selama Delapan Hari Pelayaran

Berdasarkan kombinasi Tindakan 0, A, B, dan C, disusun 11 model strategi pemanasan muatan untuk periode pelayaran delapan hari. Setiap model menggambarkan urutan tindakan harian dan menghasilkan dua keluaran utama: suhu rata-rata muatan pada hari ke-8 dan total konsumsi bahan bakar (LSMGO/LSMFO) kumulatif. (Tabel 3)

Tabel 3. Evaluasi 11 Model Strategi Pemanasan Selama 8 Hari Pelayaran

No. Strategi	Kombinasi Perlakuan Harian (Hari ke-1 → 8)	Suhu Akhir (°C)	Total Konsumsi BB (ton)	Status Kelayakan	Keterangan
1	0-0-0-0-0-0-0-0	130	0	Tidak memenuhi	Suhu terlalu rendah, tidak dapat dibongkar
2	0-0-A-0-0-A-0-0	133	10,4	Tidak memenuhi	Perlu pemanasan tambahan
3	0-A-A-0-C-0-A-0	135	15,6	Memenuhi	Suhu bawah batas aman

No. Strategi	Kombinasi Perlakuan Harian (Hari ke-1 → 8)	Suhu Akhir (°C)	Total Konsumsi BB (ton)	Status Kelayakan	Keterangan
4	A-A-A-0-C-0-A-0	136	18,2	Memenuhi	Aman, konsumsi sedang
5	A-A-B-0-0-C-A-0	138	20,8	Memenuhi	Stabil, sesuai target
6	0-A-C-A-0-C-A-0	138	19,5	Memenuhi	Suhu stabil, efisiensi baik
7	A-B-0-C-A-0-C-0	139	21,2	Memenuhi	Optimal dari sisi suhu
8	A-A-C-A-C-0-A-0	139	21,8	Memenuhi	Kestabilan baik, konsumsi tinggi
9	0-C-A-C-A-0-C-A	138	19,8	Memenuhi	Efisiensi baik, suhu aman
10	A-C-A-0-A-C-A-0	139	21,0	Memenuhi	Stabilitas tinggi
11	A-0-C-A-C-0-A-A	140	20,0	Paling optimal	Suhu ideal, konsumsi moderat, efisien

Secara umum, hasil evaluasi dapat diringkas sebagai berikut:

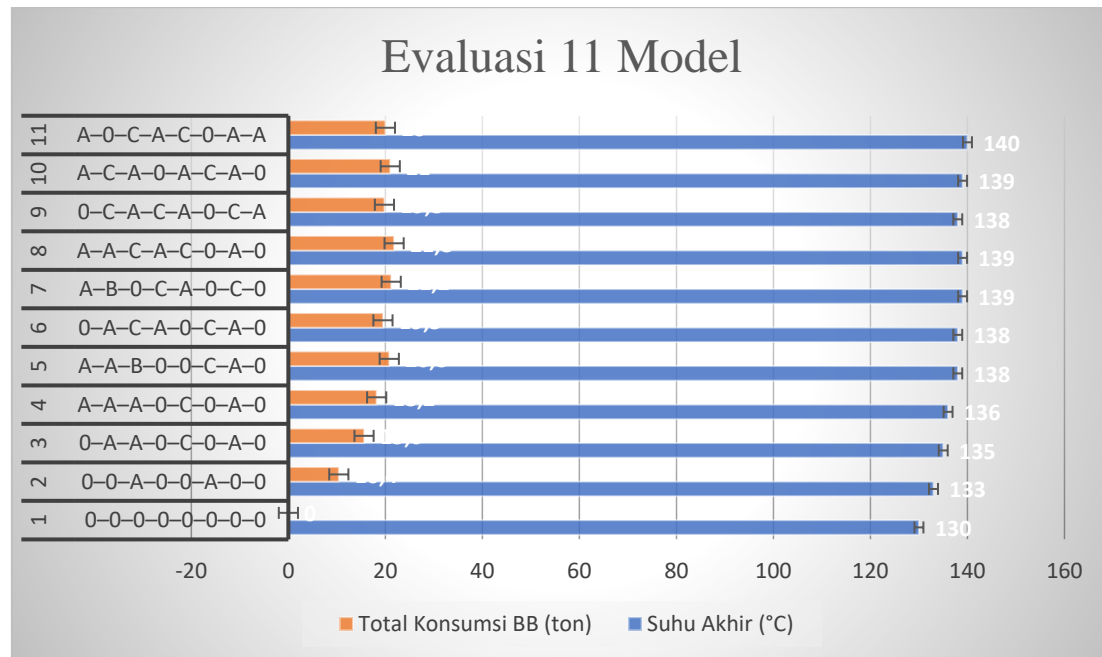
- a. Dua model strategi tidak memenuhi ketentuan voyage instruction karena suhu rata-rata muatan pada hari ke-8 hanya mencapai sekitar 130 °C dan 133 °C. Untuk dapat dibongkar, kedua skenario ini memerlukan pemanasan tambahan (misalnya melalui penerapan Tindakan A atau B) yang memakan waktu 1–2 hari dan tambahan konsumsi bahan bakar signifikan serta berpotensi menimbulkan demurrage.
- b. Sembilan model strategi lainnya mampu menjaga suhu akhir dalam rentang 135–140 °C, sehingga secara teknis memenuhi persyaratan pembongkaran. Namun, terdapat variasi yang cukup besar dalam total konsumsi bahan bakar antar strategi tersebut; beberapa di antaranya mencapai konsumsi maksimum akibat terlalu sering menggunakan dua boiler beroperasi bersamaan, sementara beberapa strategi lain menunjukkan kombinasi yang lebih hemat bahan bakar.

Hasil perbandingan kuantitatif menunjukkan bahwa Strategi No. 11 memberikan kombinasi paling seimbang: suhu rata-rata muatan pada hari ke-8 berada sangat dekat dengan batas atas yang dipersyaratkan *Voyage Instruction* (135–140 °C), sementara total konsumsi bahan bakar berada pada level menengah dibanding model strategi lain yang memenuhi syarat. Pola umum strategi ini dicirikan oleh:

- a. Pemanfaatan periode tanpa pemanasan pada saat suhu masih cukup tinggi dan kehilangan panas per hari masih dapat diterima;
- b. Penggunaan dua boiler hanya pada fase tertentu (awal dan menjelang tiba) untuk menaikkan atau mengembalikan suhu ke rentang target;
- c. Pemanfaatan satu boiler sebagai jembatan (*bridging*) di antara periode tanpa pemanasan dan periode dua boiler, sehingga gradien perubahan suhu tetap terkontrol tanpa lonjakan konsumsi bahan bakar.

Dari sudut pandang energi dan mutu muatan, strategi ini menunjukkan bahwa pemanasan tidak harus dilakukan secara kontinu sepanjang pelayaran. Dengan memanfaatkan sifat termal muatan dan insulasi tangki, kapal dapat mengizinkan penurunan suhu terbatas dalam batas aman, kemudian mengembalikan suhu ke rentang target melalui pemanasan terencana, sehingga tercapai keseimbangan antara keamanan mutu, kesiapan bongkar, dan efisiensi energi.

Secara ilmiah, paparan suhu yang terlalu tinggi selama jangka panjang tidak hanya berdampak pada konsumsi energi tetapi juga pada sifat mikro struktur bitumen—misalnya kekuatan ikatan internal dan fase visko-elastik kompeten material—yang akhirnya memengaruhi performa beton atau aplikasinya di jalan. Penelitian modifikasi dan performance enhancement pada Asphalt 60/70 tahun 2025 juga menegaskan bahwa suhu operasi sangat memengaruhi karakteristik fisik dan mekanik bitumen (R. Zhang, Nie, He, He, & Long, 2025).



Gambar 1. Evaluasi 11 Model Strategi Pemanasan Selama 8 Hari Pelayaran

Pola hasil di MT LG Asphalt 2 menunjukkan bahwa strategi paling optimal bukan pemanasan kontinu, melainkan pemanasan variabel/intermiten: Strategi No. 11 (A-0-C-A-C-0-A-A) mampu menjaga suhu akhir 140°C dengan konsumsi 20,0 ton dan dinyatakan “paling optimal” karena seimbang antara pemenuhan voyage instruction dan konsumsi BB. Pola ini konsisten dengan Cook dkk. (2025) yang menegaskan melalui pemodelan CFD bahwa variable heating patterns tidak melanggar batasan suhu penyimpanan bitumen, sehingga pemanasan tidak harus konstan pemanasan dapat “diatur-ulang” mengikuti kebutuhan (dalam studi mereka dikaitkan dengan *Demand Side Management/DSM* dan pemanfaatan *thermal energy storage*) (Cook et al., 2025). Hasil penelitian ini berada pada jalur yang sama dengan temuan global: memanfaatkan inersia termal untuk menghemat energi tanpa keluar dari temperature constraints.

Sementara itu, Atasagun (2023) memperkuat sisi mutu material: penelitian ini menilai rheologi suhu tinggi (viskositas, rutting resistance, PG) dan juga storage stability, dan bahkan pada metode uji stabilitas penyimpanan disebutkan binder ditahan vertikal pada 180°C selama 72 jam (EN 13399) sebelum dievaluasi perbedaan sifat bagian atas bawah (Neslihan Atasagun, 2023). Ini relevan sebagai pembanding karena menunjukkan bahwa paparan suhu tinggi berkepanjangan (heat history) adalah variabel yang memang “dipantau” dalam kajian stabilitas/rheologi bitumen. Maka, untuk tidak menjadikan pemanasan agresif berkepanjangan sebagai pola default selaras dengan kehati-hatian ilmiah dalam literatur reologi dan stabilitas penyimpanan: strategi intermiten menekan durasi paparan suhu tinggi, sambil tetap menjaga suhu operasi aman untuk pembongkaran.

### 3.5 Efisiensi Energi, Dekarbonisasi, dan Mutu Reologi Asphalt 60/70

- a. Penghematan bahan bakar sebagai pengurangan emisi yang terukur  
Temuan utama penelitian ini menunjukkan adanya trade-off operasional antara mempertahankan suhu muatan dan konsumsi bahan bakar boiler: operasi dua boiler memberikan kenaikan suhu cepat, namun konsumsi bahan bakarnya jauh lebih tinggi dibanding satu boiler ( $\pm 5,2$  ton/24 jam vs  $\pm 2,6$  ton/24 jam). Selain itu, Tindakan B (dua boiler 48 jam) dikategorikan sangat efektif tapi boros, sehingga secara energi merupakan opsi “high input” yang seharusnya tidak dijadikan pola default. Secara hasil, Strategi No. 11 mencapai suhu akhir  $140^{\circ}\text{C}$  dengan konsumsi 20,0 ton dan dinyatakan “paling optimal.” Ini penting secara dekarbonisasi karena strategi tersebut menunjukkan bahwa *target mutu ( $135\text{--}140^{\circ}\text{C}$ ) dapat dicapai tanpa pola pemanasan kontinu dua boiler* artinya ada ruang nyata untuk menurunkan emisi tidak perlu dari auxiliary boiler dengan tetap memenuhi *voyage instruction*.  
Optimalisasi yang dilakukan bukan sekadar memilih strategi hemat, tetapi meminimalkan konsumsi energi pada sistem termal bergerak (kapal) dengan cara memanfaatkan inersia termal muatan + insulasi tangki + pemanasan intermiten. Ini konsisten dengan argumentasi Anda bahwa pemanasan tidak harus kontinu; suhu boleh turun terbatas lalu dipulihkan secara terencana sehingga tercapai keseimbangan mutu kesiapan bongkar efisiensi energi.
- b. Oxidation & volatilization dalam kerangka reologi bitumen  
Temuan ini telah memberi sinyal kuat bahwa pemanasan agresif dan berkepanjangan berpotensi mempercepat *ageing* bitumen. Anda menegaskan bahwa suhu tinggi berkepanjangan dapat mempercepat penuaan karena oksidasi dan volatilitas komponen ringan, dan berdampak pada perubahan sifat reologi. Ini selaras dengan literatur reologi/kimia bitumen yang menempatkan *thermal-oxidative ageing* sebagai mekanisme utama perubahan sifat binder selama paparan suhu tinggi.  
Pemanasan berlebih, khususnya Tindakan B (dua boiler 48 jam), bukan hanya boros energi tetapi juga berisiko menurunkan mutu Asphalt 60/70 karena memperbesar *heat history* pada temperatur tinggi. Dalam literatur reologi bitumen, paparan panas berkepanjangan mempercepat *thermal-oxidative ageing*, yaitu reaksi oksidasi yang meningkatkan komponen polar/berat sehingga binder menjadi lebih “stiff”: viskositas naik, kekakuan meningkat, dan kemampuan relaksasi menurun—yang pada praktiknya dapat mengganggu *pumpability* saat terjadi penurunan suhu. Selain itu, pemanasan lama juga mendorong volatilization (hilangnya fraksi ringan), yang mengubah komposisi binder ke arah lebih berat, memperbesar kecenderungan kenaikan viskositas, serta berpotensi meningkatkan *fume* sehingga aspek HSSE ikut terdampak. Karena itu, pemakaian Tindakan B sebaiknya dibatasi sebagai langkah korektif (misalnya saat suhu turun tajam), sementara strategi intermiten (kombinasi 0–C–A) lebih aman untuk menjaga mutu reologi sekaligus menekan konsumsi bahan bakar dan emisi.
- c. Strategi 11 bukan hanya angka terbaik, tetapi mekanisme kontrol yang lebih ilmiah  
Strategi 11 dinyatakan paling optimal karena mencapai suhu akhir  $140^{\circ}\text{C}$  (sesuai target bongkar) dengan konsumsi bahan bakar 20,0 ton yang masih moderat, sehingga paling seimbang antara pemenuhan suhu dan efisiensi energi/emisi.

### 3.6 Implikasi terhadap Operasi Kapal dan Manajemen Perusahaan

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, dari sudut pandang operasional kapal, penyusunan strategi pemanasan berbasis data memberikan dasar yang lebih objektif bagi Nahkoda, *Chief Officer*, dan *Chief Engineer* dalam mengambil keputusan pengoperasian boiler dan TOH. Keputusan tidak lagi semata-mata

bergantung pada kebiasaan atau pengalaman individual, tetapi didukung perhitungan kuantitatif mengenai perubahan suhu dan konsumsi bahan bakar (Nugroho, Busse, Mehta, Juda, & Osvaldo, 2018).

Kedua, dari sudut pandang manajemen perusahaan pelayaran, strategi pemanasan yang optimal dapat berkontribusi pada pengurangan biaya operasional tanpa mengorbankan mutu muatan dan kepatuhan terhadap *voyage instruction*. Penghematan konsumsi LSMGO/LSMFO tidak hanya berdampak pada efisiensi biaya, tetapi juga sejalan dengan upaya dekarbonisasi dan pengurangan emisi yang menjadi tuntutan regulasi internasional (Kartika, Abdullah, & Saksono, 2023).

Ketiga, dari perspektif mutu muatan, hasil ini menunjukkan bahwa strategi pemanasan yang terkontrol dan tidak berlebihan membantu mengurangi risiko *ageing* bitumen akibat pemanasan berkepanjangan pada suhu tinggi. Hal ini konsisten dengan literatur yang menekankan sensitivitas sifat reologi bitumen terhadap sejarah pemanasan dan fluktuasi suhu selama penyimpanan maupun transportasi (X. Zhang, 2021).

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan ini menjawab tujuan penelitian yang dirumuskan pada pendahuluan: kondisi eksisting pengaturan suhu muatan di LG Asphalt 2 telah dipetakan, faktor-faktor teknis dan operasional yang memengaruhi kestabilan suhu dan konsumsi energi telah diidentifikasi, dan sebuah strategi pengaturan suhu yang lebih optimal, representatif, dan aplikatif (Strategi No. 11) berhasil dirumuskan untuk mendukung operasi kapal tanker aspal pada rute pelayaran delapan hari langsung bongkar.

### **3.7 Sinergi antara Pengaturan Suhu dan Mutu Muatan Asphalt 60/70**

Literatur tentang *rheological behavior* bitumen secara umum mengindikasikan bahwa suhu optimal tidak hanya memengaruhi mobilitas dan viskositas material tetapi juga kemampuan pemulihan stres dan deformasi visko-elastik. Studi seperti yang dilakukan oleh Prospero & Bocci (2022) tentang suhu pada pencampuran dan performa bitumen menunjukkan bahwa suhu yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kekakuan material namun juga menyebabkan efek penuaan yang tidak diinginkan (Prospero & Bocci, 2022).

Dengan demikian, strategi pengaturan suhu muatan yang tidak terlalu ekstrem namun mempertahankan rentang yang direkomendasikan akan membantu mempertahankan kualitas Asphalt 60/70 dari sisi reologi sekaligus mengurangi konsumsi energi dan risiko degradasi termal.

## **4. KESIMPULAN**

Penelitian pada MT LG Asphalt 2 menunjukkan bahwa pengaturan suhu muatan asphalt 60/70 tidak dapat hanya mengandalkan pemanasan terus-menerus ataupun tanpa pemanasan, karena tanpa pemanasan suhu turun sekitar 3 °C/24 jam, sedangkan pemakaian dua boiler terus-menerus sangat boros bahan bakar dan berpotensi mempercepat penuaan termal bitumen. Dari sebelas model strategi yang dianalisis, Strategi No. 11 (kombinasi A-0-C-A-C-0-A-A selama delapan hari pelayaran) terbukti paling optimal karena mampu mempertahankan suhu akhir muatan sekitar 140 °C sesuai *voyage instruction* dengan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien. Secara praktis, hasil ini merekomendasikan penerapan pola *intermittent heating* berbasis data sebagai dasar penyusunan SOP pengaturan suhu muatan asphalt 60/70 di MT LG Asphalt 2 maupun kapal sejenis, guna menjaga mutu muatan, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan meningkatkan keselamatan operasi..

## REFERENCES

- Basekim. (2020). *Material Safety Data Sheet*.
- Cook, M., Roy, S., Najjaran, A., Ma, Z., Morgan, N., & Smallbone, A. (2025). Techno-economic assessment of decarbonising bitumen storage. *Energy*, 340(October), 139131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139131>
- Eurobitume. (2023). *GUIDANCE FOR THE STORAGE OF BITUMEN*.
- Haji, N., Javadi, S., Hajimohammadi, A., Heydari, S., Kien, J., Ng, C., ... Khalili, N. (2024). Investigating the applicability of storage stability test for waste plastic modified bitumen: Morphological analyses. *Construction and Building Materials*, 441(July), 137451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137451>
- Hidayat, I. S. N. (2024). *Kajian Penanganan Exhaust Gas Thermal Oil Heater (EGTOH) di MV.SPIL Rahayu: Sebuah Pendekatan dengan Metode SWOT dan AHP*.
- Kartika, S. A., Abdullah, N. H., & Saksono, P. (2023). ENERGY SAVING ANALYSIS USING BURNER / THERMAL TANK AND HEATER ELECTRIC IN THE MARINE FUEL OIL ( MFO ) TREATMENT PROCESS. *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 17(1), 7–16. <https://doi.org/10.24853/sintek.17.1.7-16>
- Lestianto, E. W. N. (2025). *Perancangan Pengembangan Pelabuhan Utama Kota Sorong : Penerapan Multi-Hazard dalam Pendekatan Resilience Architecture*.
- Neslihan Atasagun. (2023). High-Temperature Rheological Properties and Storage Stability of Bitumen Modified with the Char Produced from Co-Pyrolysis of Different Wastes. *sust*, 15(8119).
- Nugroho, T. F., Busse, W., Mehta, E., Juda, W., & Osvaldo, I. (2018). Heat Transfer Analysis of Thermal Oil Plant on Fuel Oil Tanks of 17500 LTDW Product Oil Tanker. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 2(2).
- Prosperi, E., & Bocci, E. (2021). A Review on Bitumen Aging and Rejuvenation Chemistry : Processes , Materials and Analyses. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6523).
- Prosperi, E., & Bocci, E. (2022). *Effect of Bitumen Production Process and Mix Heating Temperature on the Rheological Properties of Hot Recycled Mix Asphalt*.
- Przyjazny, A., & Boczkaj, G. (2023). Bitumen Aging—Laboratory Simulation Methods Used in Practice and Selected Directions of Research on New Methods. *materials*, 16(853), 1–19.
- Sabita. (2020). *Code of Practice : Transportation , off-loading and storage of bitumen , bituminous products and asphalt in transit*.
- Saenko, S., Chernov, S., & Zakharov, A. (2023). Heat loss effect on bitumen ageing in tanks. *E3S Web of Conferences 402, 07035*, 1–6.
- Science, R. (2025). *Standard Bitumen*.
- Zhang, R., Nie, Y., He, B., He, L., & Long, L. (2025). Performance Enhancement of Asphalt Mixtures Using Recycled Wind Turbine Blade Fiber. *Sustainability (Switzerland)*, 17(8112), 1–21.
- Zhang, X. (2021). Comparative Study of Thermal-Oxidative Aging and Salt Solution Aging on Bitumen Performance. *materials*, 14(1174).
- Zou, C., Hua, Z., Mo, L., Qi, C., Liu, Z., Xie, Y., ... Ke, J. (2022). Evaluation on the Performance of Hydraulic Bitumen Binders under High and Low Temperatures for Pumped Storage Power Station Projects. *materials*, 15(1890).