

## Analisis Penyebab *Cargo Off Spec* pada Muatan Biosolar (B40) dengan *Fishbone Analysis* (Studi Kasus: MT. Gunung Kemala)

Dinar Islami Rachmayanti<sup>1\*</sup>, Muhammad Imam Firdaus<sup>2</sup>, Bugi Nugraha<sup>3</sup>, Dety Sutralinda<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Teknologi Rekayasa Operasi Kapal (TROK), Politeknik Pelayaran (Poltekpel) Surabaya

Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Gunung Anyar, Surabaya, Jawa Timur

Email: [dinarislami07@gmail.com](mailto:dinarislami07@gmail.com), [imam.firdaus@poltekpel-sby.ac.id](mailto:imam.firdaus@poltekpel-sby.ac.id), [Bugi.nugraha@poltekpel-sby.ac.id](mailto:Bugi.nugraha@poltekpel-sby.ac.id),  
[dety.sutralinda@poltekpel-sby.ac.id](mailto:dety.sutralinda@poltekpel-sby.ac.id)

### ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar alternatif berbasis sumber daya alam terbarukan telah menjadi salah satu langkah strategis dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Salah satu bentuk nyata dari komitmen tersebut adalah penggunaan Biosolar (B40) yang merupakan campuran antara 40% FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) dan 60% Solar. Namun dalam operasional pelayaran, sering dijumpai kasus *cargo off spec*, yaitu penyimpangan mutu muatan yang tidak lagi memenuhi standart kualitas. Masalah ini berdampak besar, baik secara finansial, hukum, maupun reputasi Perusahaan. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui: 1) Apa saja faktor-faktor penyebab terjadinya *cargo off spec* di kapal MT. Gunung Kemala 2) Bagaimana upaya pencegahan yang harus dilakukan untuk menghindari *cargo off spec* di kapal MT. Gunung Kemala. Penelitian ini menggunakan metode *fishbone analysis* sebagai teknik analisis data untuk mencari permasalahan secara mendalam. Berdasarkan analisis faktor penyebab *cargo off spec* di MT. Gunung Kemala antara lain usia kapal yang sudah tua mempengaruhi kondisi tangki, sifat muatan Biosolar (B40) yang sensitif, kondisi lingkungan seperti cuaca dan perubahan suhu yang tidak stabil, serta operasi *intertank* yang meningkatkan risiko pencampuran *sludge* ke *cargo*. Upaya yang dapat dilakukan agar kejadian tersebut tidak terjadi kembali adalah dengan menerapkan jadwal *tank inspection*, pengendalian udara (*oxygen exclusion*), optimalisasi kinerja sistem ventilasi (*optimized venting system*), pemanfaatan P/V Valves, pengambilan sampel dan pengujian, serta pelatihan awak kapal. Hasil penelitian menyatakan bahwa faktor utama penyebab *cargo off spec* pada muatan Biosolar (B40) akibat degradasi kondisi fisik tangki *cargo* yang secara langsung dipengaruhi oleh usia kapal (*ageing factor*), selain itu karakteristik Biosolar (B40) yang higroskopis, serta potensi degradasi selama proses *intertank* turut menjadi faktor pendukung terjadinya *cargo off spec*.

**Kata kunci:** Cargo Off Spec, Biosolar, tangki, dan *Fishbone Analysis*

### ABSTRACT

The use of alternative fuels based on renewable natural resources has become a strategic step in reducing dependence on fossil energy. One concrete form of this commitment is the use of Biodiesel (B40), which is a mixture of 40% FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) and 60% Diesel. However, in shipping operations, cases of off-spec cargo are often encountered, namely deviations in cargo quality that no longer meet quality standards. This problem has a major impact, both financially, legally, and on the Company's reputation. This study aims to determine: 1) What are the factors causing off-spec cargo on the MT. Gunung Kemala ship 2) What preventive measures must be taken to avoid off-spec cargo on the MT. Gunung Kemala ship. This study uses the fishbone analysis method as a data analysis technique to find the problem in depth. Based on the analysis of the factors causing off-spec cargo on MT. Gunung Kemala, among others, the ship's age affects the condition of the tank, the sensitive nature of the Biodiesel (B40) cargo, environmental conditions such as unstable weather and temperature changes, and intertank operations that increase the risk of sludge mixing into the cargo. Efforts that can be made to prevent this incident from happening again include implementing a tank inspection schedule, air control (*oxygen exclusion*), optimising ventilation system performance (*optimised venting system*), utilising P/V Valves, sampling and testing, and training the ship crew. The results of the study stated that the main factor causing off-spec cargo in Biodiesel (B40) cargo was due to the degradation of the physical condition of the cargo tank which was directly influenced by the age of the ship (*aging factor*), in addition to the hygroscopic characteristics of Biodiesel (B40), as well as the potential for degradation during the intertank process were also factors that supported the occurrence of off-spec cargo.

**Keywords:** Off-spec Cargo, Biodiesel, Tank, and *Fishbone Analysis*

## Pendahuluan

Studi kasus pada MT. Gunung Kemala terfokus selama kegiatan *Ship-to-Ship* (STS) yang kerap menghadapi kendala operasional, baik dari sisi kekurangan muatan maupun penurunan kualitas [8]. Kondisi peralatan pendukung seperti pompa *cargo* dan kebersihan tangki juga menjadi variabel krusial yang mempengaruhi kelancaran distribusi bahan bakar [9]. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis penyebab degradasi kualitas muatan B40 menggunakan metode *Fishbone Analysis*. Pendekatan ini dipilih karena efektivitasnya dalam memetakan akar penyebab masalah secara terstruktur guna mendukung pengambilan keputusan manajemen yang tepat [10].

Transisi global menuju energi terbarukan telah mendorong penerapan pentingnya Biodiesel B40 di Indonesia, sebuah langkah strategis untuk mengurangi emisi dan ketergantungan pada bahan bakar fosil [1]. Kinerja biosolar ini telah dievaluasi secara luas untuk memastikan efektivitasnya dalam campuran bahan bakar nasional [2]. Namun, distribusi B40 menghadapi tantangan teknis yang signifikan terkait stabilitas penyimpanan. Karakteristik kimia biodiesel yang sensitif membuatnya rentan terhadap degradasi kualitas, terutama ketika disimpan dalam jangka waktu lama yang dapat menyebabkan perubahan parameter fisik dan kimia bahan bakar tersebut [3].

Dalam rantai pasok maritim, faktor lingkungan laut memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik biodiesel, khususnya terkait kelembaban dan suhu yang dapat memicu oksidasi atau kontaminasi air [4]. Oleh karena itu, operasi *cargo* di kapal tanker minyak menuntut standar keselamatan dan penanganan yang sangat ketat guna mencegah insiden *cargo off-spec* [5]. Setiap prosedur di atas kapal harus selaras dengan regulasi internasional seperti *International Safety Management (ISM) Code* untuk menjamin keselamatan manajemen kapal dan perlindungan lingkungan [6]. Kegagalan dalam pengawasan kualitas selama penyimpanan dapat dideteksi melalui evaluasi statistik secara kualitatif untuk memitigasi risiko kerugian [7].

Studi kasus pada MT. Gunung Kemala terfokus selama kegiatan *Ship-to-Ship* (STS) yang kerap menghadapi kendala operasional, baik dari sisi kekurangan muatan maupun penurunan kualitas [8]. Kondisi peralatan pendukung seperti pompa *cargo* dan kebersihan tangki juga menjadi variabel krusial yang mempengaruhi kelancaran distribusi bahan bakar [9]. Meskipun penelitian mengenai karakteristik kimia B40 telah banyak dilakukan, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan mengenai analisis degradasi mutu B40 pada infrastruktur maritim yang menua (*aging vessel*). Literatur yang ada saat ini belum banyak menyoroti bagaimana interaksi spesifik antara karakteristik higroskopis B40 dengan kondisi fisik tangki kapal tua yang memiliki residu lumpur (*sludge*) akibat riwayat operasional yang panjang. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada analisis mendalam mengenai dampak operasi transfer antar tangki (*intertank*) pada kapal tua terhadap kualitas B40, yang mana kondisi ini jarang dibahas dalam studi stabilitas bahan bakar konvensional [10].

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab degradasi kualitas muatan B40 dengan rincian tujuan operasional seperti:

1. Mengidentifikasi faktor-faktor penyebab terjadinya *Cargo Off Spec* di kapal MT. Gunung Kemala
2. Mengetahui upaya pencegahan yang harus dilakukan untuk menghindari *cargo off spec* di MT. Gunung Kemala

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif, yang didefinisikan sebagai pendekatan yang menghasilkan temuan di luar statistik, untuk menyelidiki masalah kualitas *cargo* secara mendalam [11]. Pendekatan ini dipilih karena permasalahan *cargo off-spec* pada MT. Gunung Kemala melibatkan fenomena kompleks yang tidak dapat diukur hanya dengan angka, melainkan memerlukan pemahaman tentang perilaku operasional, kondisi fisik kapal, dan interaksi lingkungan. Penelitian dilaksanakan selama periode dua belas bulan dari Juli 2024 hingga Juli 2025 di atas kapal MT. Gunung Kemala saat kapal beroperasi sebagai *Mothership* dan melakukan kegiatan *intertank*.

Data dikumpulkan melalui kombinasi sumber primer dan sekunder untuk mendapatkan gambaran holistik:

1. Data Primer: Diperoleh melalui observasi partisipatif langsung terhadap prosedur penanganan muatan dan kondisi tangki, serta wawancara mendalam (*in-depth interview*) dengan perwira kunci (*Master, Chief Officer, dan Cargo Engineer*) [12].
2. Data Sekunder: Meliputi dokumen resmi kapal seperti *Logbook*, *Cargo Manifest*, dan laporan hasil uji laboratorium (*Certificate of Analysis*) yang menunjukkan parameter spesifikasi muatan yang menyimpang [13].

Proses pengumpulan data dilakukan dengan pedoman sistematis [14], dimulai dengan meninjau prosedur standar (SOP), mengamati pelaksanaan di lapangan, dan mencatat anomali yang terjadi selama proses transfer *intertank*. Untuk memastikan validitas dan reliabilitas temuan, penelitian ini menerapkan teknik Triangulasi Sumber dan Triangulasi Teknik.

Penulis membandingkan pernyataan awak kapal dalam wawancara dengan data fisik yang tercatat dalam *Logbook* kapal dan hasil uji laboratorium. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa keluhan mengenai "kondisi tangki" yang disampaikan kru konsisten dengan data historis pembersihan tangki yang tercatat. Penulis melakukan pengecekan silang antara hasil observasi visual (warna muatan yang keruh) dengan data dokumen formal (hasil lab yang menunjukkan *water content* tinggi). Jika ditemukan ketidaksesuaian, dilakukan observasi ulang untuk memverifikasi data.

Analisis data dilakukan sebelum tahap *Fishbone*, mengikuti alur reduksi data dan penyajian data:

1. Koding dan Reduksi Data: Transkrip wawancara dan catatan lapangan dipilah (koding) berdasarkan kata kunci terkait degradasi kualitas, seperti "sludge", "suhu", "prosedur", dan "korosi". Informasi yang tidak relevan dengan penanganan B40 disisihkan untuk mempertajam fokus analisis.
2. Penyajian Data: Data yang telah terstruktur dikelompokkan ke dalam kategori penyebab potensial untuk melihat pola hubungan antara aktivitas *intertank* dengan penurunan kualitas muatan.

Sebagai alat analisis utama, penelitian ini menggunakan *Fishbone Analysis* (Diagram Ishikawa). Metode ini dipilih dengan pertimbangan khusus dibandingkan metode *Root Cause Analysis* (RCA) lainnya seperti *Fault Tree Analysis* (FTA) atau *Hazard and Operability Study* (HAZOP): Berbeda dengan FTA yang lebih fokus pada probabilitas kegagalan sistem secara kuantitatif, atau HAZOP yang lebih berorientasi pada risiko desain teknik, *Fishbone Analysis* lebih efektif untuk memetakan masalah operasional yang bersifat multi-faktor. Dalam kasus *cargo off-spec* ini, penyebabnya bukan berasal dari satu kegagalan tunggal, melainkan interaksi simultan antara faktor manusia, prosedur, peralatan, dan lingkungan. *Fishbone* memungkinkan peneliti mengkategorikan variabel-variabel kualitatif tersebut secara terstruktur untuk menemukan akar penyebab dominan [15].

Analisis *Fishbone* dalam penelitian ini dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Menentukan Masalah Utama (Head): Menetapkan "*Cargo Off-Spec* pada Muatan Biosolar (B40)" sebagai akibat yang akan dianalisis.
2. Identifikasi Kategori Utama (4M): Mengadaptasi kategori standar ke dalam konteks operasional tanker:
  - o *Man* (Manusia): Kompetensi kru dan pengawasan operasional.
  - o *Method* (Metode): Prosedur *intertank* dan penanganan residu.
  - o *Material* (Material): Karakteristik kimia B40 dan kondisi fisik tangki kapal tua.
  - o *Environment* (Lingkungan): Pengaruh cuaca laut, kelembaban, dan fluktuasi suhu ruang muat.
3. Analisis Sebab-Akibat: Menelusuri faktor turunan dari setiap kategori (misalnya, pada kategori *Environment*, dianalisis bagaimana fluktuasi suhu tropis mempengaruhi kondensasi di dalam tangki).
4. Verifikasi Akar Masalah: Mengkonfirmasi akar penyebab yang ditemukan dalam diagram dengan fakta lapangan untuk merumuskan strategi pencegahan yang presisi.

## Hasil Dan Pembahasan

Investigasi mendalam yang dilaksanakan di atas MT. Gunung Kemala saat beroperasi sebagai *Mothership* dalam aktivitas transfer *Ship-to-Ship* (STS) menghadapi tantangan krusial terkait penurunan kualitas *cargo* Biodiesel B40. Operasi STS memiliki risiko *inheren* yang lebih tinggi dibandingkan transfer di terminal darat, terutama terkait dinamika pergerakan kapal dan paparan lingkungan terbuka yang dapat mempercepat degradasi kualitas muatan cair [16]. Temuan lapangan secara spesifik menunjukkan bahwa *cargo* mengalami kondisi *off-spec*, yakni kegagalan memenuhi parameter standar kualitas fisik dan kimia, yang sebagian besar dipicu oleh sifat higroskopis *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) yang rentan terhadap oksidasi dan akumulasi kadar air yang melebihi ambang batas [17].

Dengan menerapkan metodologi kualitatif deskriptif, penelitian ini tidak hanya mencatat anomali data numerik, tetapi juga menganalisis secara penuh hubungan antara kondisi fisik tangki kapal yang menua dan residu *sludge* yang teridentifikasi sebagai kontaminan utama [18]. Analisis data primer yang bersumber dari observasi langsung dan dokumentasi lapangan mempertegas bahwa optimalisasi prosedur penanganan *cargo* (*cargo handling*) sangat vital untuk meminimalisir celah kesalahan prosedural maupun kegagalan teknis selama proses transfer [19]. Pada akhirnya, studi ini bertujuan merumuskan strategi pencegahan yang komprehensif dan terintegrasi, mengacu pada pedoman teknis standar penanganan biodiesel, guna menjamin integritas spesifikasi *cargo* dan mencegah kerugian operasional dalam rantai pasok energi maritim di masa depan [20].

### Analisis Data Hasil Uji Laboratorium dan Implikasi Teknis

Investigasi di atas MT. Gunung Kemala mengungkap adanya degradasi kualitas muatan yang signifikan pasca operasi *intertank*. Temuan ini tidak hanya didasarkan pada pengamatan visual, tetapi dikonfirmasi secara kuantitatif melalui uji laboratorium. Tabel berikut menyajikan perbandingan spesifikasi standar dengan kondisi aktual muatan.

**Tabel 1.** Komparasi Hasil Uji Laboratorium dengan Standar Mutu

Parameter	Metode Uji	Satuan	Batas Maksimum (Spec)	Hasil Aktual	Status
Water Content	ASTM D6304	mg/kg	350 - 380	701	Off-Spec
Appearance	Visual	-	Clear & Bright	Cloudy	Off-Spec
Viscosity @40°C	ASTM D445	mm <sup>2</sup> /s	2.0 - 5.0	3.7	On-Spec

Berdasarkan Tabel 1, indikator utama kegagalan mutu adalah **kadar air (water content)** yang mencapai **701 mg/kg**, jauh melampaui ambang batas toleransi 380 mg/kg. Secara teoritis, lonjakan kadar air ini sangat kritis bagi stabilitas

Biodiesel (B40). Kandungan FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) dalam B40 bersifat higroskopis, yang artinya memiliki afinitas tinggi untuk menyerap molekul air dari lingkungan.

Ketika kadar air melampaui batas jenuh (di atas 500 mg/kg), air tidak lagi terlarut melainkan membentuk emulsi atau air bebas (*free water*). Kondisi inilah yang secara visual terdeteksi sebagai penampilan "**Cloudy**" (**keruh**) pada sampel muatan. Dalam konteks komersial maritim, status *cloudy* merupakan dasar yang cukup bagi penerima muatan untuk menolak *cargo* (klaim kerusakan), karena air bebas dapat memicu pertumbuhan mikroba (bakteri dan jamur) di antarmuka bahan bakar-air, yang selanjutnya menyebabkan penyumbatan filter mesin dan korosi pada sistem injeksi bahan bakar. Hasil ini mengonfirmasi bahwa degradasi yang terjadi bukan sekadar kontaminasi fisik, melainkan kerusakan kimiawi akibat hidrolisis yang dipicu oleh kelembaban berlebih.

### **Analisis Observasi**

Pengamatan yang dilakukan Februari 2025 menunjukkan bahwa MT. Gunung Kemala, kapal berusia 38 tahun yang dibangun pada tahun 1986, diperintahkan untuk dinonaktifkan (*scrap*) setelah melebihi batas usia operasional HSSE. Untuk mempersiapkan pemindahan aset ini, kapal melakukan proses yang komprehensif untuk mengosongkan tangki *cargo* sepenuhnya. Operasi ini melibatkan transfer *intertank* khusus atau konsolidasi *cargo* dari COT 2C, 3P, 3S, dan 4C menjadi COT 5C yang dilakukan di bawah otorisasi master pemuatan dari PT. Pertamina Patra Niaga.

Risiko penurunan kualitas selama proses ini ditingkatkan oleh riwayat pemeliharaan kapal dan sifat kimia *cargo*. Sejak *docking* terakhir pada tahun 2022, tangki tidak pernah benar-benar kering, yang menyebabkan akumulasi residu dan lumpur Remaining on Board (ROB). Kondisi tangki ini terbukti bermasalah untuk beban Biodiesel (B40), yang mengandung 40% FAME higroskopis. Sensitivitas bahan bakar terhadap perubahan suhu dan kecenderungan untuk menyerap kelembaban melalui kondensasi, dikombinasikan dengan peningkatan paparan udara dalam tangki yang terisi sebagian, menciptakan potensi tinggi untuk kontaminasi air dan penurunan kualitas dalam infrastruktur tangki yang menua.

### **Analisis Wawancara**

Untuk membuktikan data penelitian di atas kapal, wawancara langsung dilakukan dengan Kapten, Chief Officer, dan Third Officer untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif tentang faktor teknis dan operasional yang berkontribusi pada *cargo* Biodiesel (B40) di MT. Gunung Kemala. Kapten mengidentifikasi kondisi fisik kapal berusia 38 tahun itu sebagai pengaruh utama, mencatat bahwa tangki *cargo* belum dalam "kondisi kering" atau dibersihkan secara menyeluruh sejak 2022 karena operasi kelas tunggal, yang telah menyebabkan akumulasi lumpur yang signifikan. Dia menjelaskan bahwa lumpur ini bertindak sebagai kontaminan dominan ketika diaduk selama transfer antar tangki, menimbulkan risiko tinggi terhadap biodiesel, yang pada dasarnya sensitif dan memiliki umur simpan yang terbatas.

Melengkapi perspektif struktural ini, Chief Officer menekankan dampak kritis dari faktor lingkungan, khususnya fluktuasi suhu yang berkisar antara 40°C di siang hari hingga 28°C di malam hari. Perubahan termal ini memicu kondensasi di dalam ruang ullage tangki, memasukkan tetesan air ke dalam bahan bakar higroskopis, yang meningkatkan kadar air dan menghasilkan penampilan "keruh"—indikasi visual utama bahwa *cargo* menjadi di luar spesifikasi. Secara kolektif, wawancara ini menyoroti bahwa penurunan kualitas *cargo* didorong oleh kombinasi ketidakmampuan kapal yang menua untuk menjaga kebersihan tangki dan kerentanan *cargo* terhadap kelembaban dan ketidakstabilan suhu.

### **Analisis Dokumentasi**

Data sekunder, yang terdiri dari dokumentasi fotografi dan risalah kapal resmi, memberikan bukti visual yang jelas tentang degradasi *cargo* setelah operasi *intertank*. Dokumentasi mengungkapkan bahwa bahan bakar kehilangan transparansi yang diperlukan; *Cargo* di kedalaman atas dan tengah tampak kuning keruh karena residu oksidasi dan partikel halus, sedangkan bagian bawah tangki menunjukkan warna coklat keruh. Rona yang lebih gelap ini menunjukkan kontaminasi yang signifikan dari lumpur dan sedimen yang diaduk dan dicampur ke dalam bahan bakar selama proses transfer.



**Gambar 1.** Kondisi *Cargo* Bewarna Keruh

Hasil uji laboratorium (*test report*) yang menunjukkan bahwa beberapa parameter mutu muatan telah melebihi batas spesifikasi yang telah ditetapkan. Parameter yang menonjol adalah *water content*, dimana batas maksimum yang ditentukan adalah 380 mg/kg, sedangkan hasil pengujian menunjukkan angka 701 mg/kg, yang berarti melampaui limit yang telah ditentukan. Selain itu, pada parameter *appearance* (penampilan visual), hasil pengujian menunjukkan kondisi *cloudy* (keruh), sedangkan spesifikasi yang disyaratkan adalah *clean and bright* (jernih dan terang). Berdasarkan hasil tersebut, sampel muatan dinyatakan tidak memenuhi spesifikasi sesuai dengan standart mutu yang berlaku oleh Dirjen Migas.

**Tabel 2.** Hasil Test Report Mutu Cargo

Parameter	Test Method	Units	Limitation		Result
			Min	Max	
Viscosity @40°C	ASTM D445	mm <sup>2</sup> /s	2.0	5.0	3.7
Pour Point	ASTM D97	°C	-	18	3
Water Content	ASTM D6304	mg/kg	-	380	701
Sulfur Content	ASTM 4294	% m/m	-	0.2	0.08
Density @15°C	ASTM D1298	Kg/m <sup>3</sup>	815	880	860.2
Appearance	Visual	-	Clear & Bright		Cloudy
ASTM Colour	ASTM D1500	-	-	3.0	1.0

#### Analisis Fishbone

Untuk membedah kompleksitas masalah ini, analisis *Fishbone* digunakan untuk memetakan hubungan kausalitas antara faktor penyebab. Berbeda dengan pandangan umum yang sering menyalahkan satu faktor, analisis ini menemukan bahwa *cargo off-spec* adalah hasil dari interaksi sistemik antara "Material" (kapal tua) dan "Environment" (lingkungan tropis).

**Tabel 3.** Faktor Manusia (Man)

No	Pertanyaan	Ya	Tidak
1.	Apakah ada jadwal pemeriksaan atau pemeliharaan rutin pada tangki beban MT. Gunung Kemala yang dilakukan oleh awak kapal?		✓
2.	Apakah kru memahami karakteristik Biosolar (B40), termasuk risiko higroskopis dan potensi kontaminasi air?	✓	
3.	Apakah pembagian tugas dan tanggung jawab selama proses <i>intertank</i> didistribusikan dengan jelas kepada semua anggota kru?	✓	
4.	Apakah inspeksi visual oleh petugas penjaga dilakukan dengan hati-hati selama proses <i>intertank</i> ?		✓

Faktor manusia menjadi penanda bahwa kurangnya kewaspadaan terhadap karakteristik muatan baru.

- Bukti Konkret: Wawancara dengan *Chief Officer* mengindikasikan kru menyadari karakteristik B40 namun kurang dalam mitigasi visual selama proses transfer.
- Analisis Sebab-Akibat: Tidak adanya inspeksi visual *multi-layer* (atas, tengah, bawah) *sebelum* transfer selesai menyebabkan kontaminasi terlambat dideteksi

**Tabel 4.** Faktor Metode (Method)

No	Pertanyaan	Ya	Tidak
1.	Apakah <i>prosedur antar tangki</i> telah diterapkan sesuai dengan SOP ( <i>Prosedur Operasi Standar</i> ) yang berlaku di atas kapal?		✓
2.	Sudahkah Anda mempertimbangkan potensi <i>lumpur</i> di dasar tangki selama proses <i>antartangki</i> dari COT 2C, 3P, 3S, dan 4C ke COT 5C?	✓	

Kelemahan prosedural memperburuk risiko yang ada.

- Bukti Konkret: Operasi transfer *intertank* dilakukan dari COT 2, 3, 4 ke COT 5C tanpa memperhitungkan *sediment disturbance*.
- Analisis Sebab-Akibat: Prosedur pemompaan (transfer) menciptakan turbulensi fluida. Dalam kondisi statis, *sludge* mengendap di dasar. Namun, aliran turbulen saat *intertank* mengaduk kembali (*resuspension*) endapan lumpur dan air yang ada di dasar tangki, mendistribusikannya ke seluruh volume muatan di COT 5C. Metode transfer ini gagal mengisolasi kontaminan dasar.

**Tabel 5.** Faktor Material (Material)

No	Pertanyaan	Ya	Tidak
1.	Apakah ada indikasi kontaminasi beban ( <i>lumpur</i> atau residu sebelumnya) sebelum proses antartangki?		✓
2.	Apakah karakteristik muatan berubah selama penyimpanan di dalam tangki (warna, kejernihan, atau viskositas)?	✓	
3.	Apakah usia kapal yang sudah mencapai 38 tahun berdampak pada kondisi fisik tangki, seperti korosi atau penumpukan sedimen yang dapat mencemari cargo?	✓	

Faktor material memberikan kontribusi terbesar (faktor dominan) terhadap insiden ini.

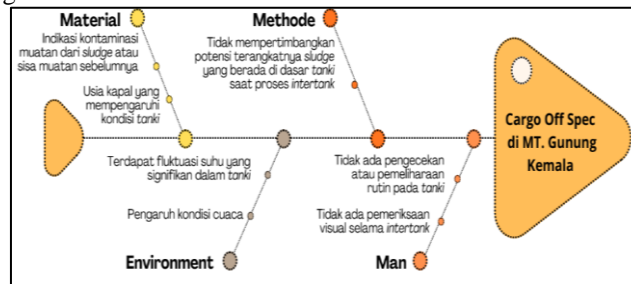
- **Bukti Konkret:** MT. Gunung Kemala berusia 38 tahun (dibangun 1986). Dokumentasi foto menunjukkan muatan berwarna coklat pekat di dasar tangki.
- **Analisis Sebab-Akibat:** Usia kapal yang tua berkorelasi lurus dengan tingkat korosi tangki. Selama bertahun-tahun, dinding tangki mengakumulasi residu karat dan lumpur (*sludge*). B40 memiliki sifat *solvent* (pelarut) yang kuat, lebih kuat dari solar murni. Ketika B40 dimasukkan ke tangki tua yang tidak dibersihkan total (*tank cleaning*) sejak 2022, B40 melarutkan deposit lumpur purba di dinding dan dasar tangki. Hal ini menjelaskan mengapa sampel dari dasar tangki berwarna coklat keruh.

**Tabel 6.** Faktor Lingkungan Kerja (Work Environment)

No	Pertanyaan	Ya	Tidak
1.	Apakah ada fluktuasi suhu (fluktuasi) yang signifikan di tangki selama periode penyimpanan?		✓
2.	Apakah perubahan cuaca (hujan, kelembaban, panas) memengaruhi kondisi fisik muatan selama pengamatan?	✓	

Lingkungan bertindak sebagai katalisator yang mempercepat degradasi.

- **Bukti Konkret:** Catatan *logbook* menunjukkan fluktuasi suhu ekstrem antara siang (40°C) dan malam (28°C)<sup>8888</sup>.
- **Analisis Sebab-Akibat:** Perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) sebesar 12°C di ruang tertutup memicu fenomena "bernapas" pada tangki (*breathing*). Saat suhu turun drastis di malam hari, udara lembab di ruang kosong tangki (*ullage space*) mencapai titik embun (*dew point*), menyebabkan kondensasi di langit-langit tangki. Tetesan air ini jatuh ke permukaan muatan (efek hujan dalam tangki), yang langsung diserap oleh sifat higroskopis FAME<sup>9</sup>. Mekanisme ini adalah penyebab utama lonjakan *water content* hingga 701 mg/kg.



**Gambar 2.** Diagram Fishbone

### Pembahasan

Temuan penelitian ini sejalan dengan studi Mufidah et al. [3] yang menyatakan bahwa stabilitas B40 sangat rentan terhadap penyimpanan jangka panjang, namun penelitian ini menambahkan perspektif baru bahwa usia infrastruktur penyimpanan adalah variabel kritis yang sering diabaikan. Jika Sasongko [17] menekankan pada oksidasi akibat panas, temuan di MT. Gunung Kemala menunjukkan bahwa dalam konteks maritim, kontaminasi air akibat kondensasi dan pencampuran lumpur (*sludge mixing*) akibat operasional *intertank* memiliki dampak yang lebih destruktif dan instan dibandingkan oksidasi termal semata.

Hubungan sebab-akibat yang terjadi membentuk pola rantai:

1. Akar Masalah: Tangki tua dengan akumulasi *sludge* (Material).
  2. Pemicu: Fluktuasi suhu tropis menciptakan air kondensasi (Lingkungan).
  3. Akselerator: Turbulensi saat *intertank* mencampur air dan *sludge* ke dalam muatan (Metode).
  4. Hasil Akhir: *Water content* 701 mg/kg dan tampilan *Cloudy (Off-spec)*.
- Pelayaran

Berdasarkan analisis di atas, strategi pencegahan harus difokuskan pada pemutusan rantai kausalitas dengan rujukan standar teknis yang ketat:

1. Manajemen Atmosfer Tangki (*Oxygen & Moisture Control*): Mengacu pada standar penanganan B40, kapal harus memaksimalkan penggunaan *Inert Gas System* atau *Nitrogen Blanketing* di ruang *ullage*. Hal ini bertujuan untuk menekan kadar oksigen dan kelembaban, sehingga mencegah oksidasi dan kondensasi meskipun terjadi fluktuasi suhu luar.
2. Protokol *Tank Cleaning* yang Diperketat: Mengingat sifat *solvent* dari B40, kapal tua wajib melakukan *Wall Wash Test* sebelum memuat biodiesel. Prosedur *stripping* (pengeringan dasar tangki) harus dilakukan secara agresif untuk memastikan tangki benar-benar kering dari air dan residu sebelum muatan masuk.
3. Revisi SOP *Intertank* dengan *Sampling* Bertingkat: Prosedur transfer harus mewajibkan pengambilan sampel dengan metode ASTM D4057 (*Manual Sampling of Petroleum*) pada tiga level kedalaman (atas, tengah, bawah) sebelum, selama, dan setelah transfer. Jika sampel "bawah" menunjukkan kekeruhan, operasi harus dihentikan seketika untuk mencegah kontaminasi silang ke tangki penerima.

## Simulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan menggunakan metode *Fishbone Analysis* terhadap insiden *cargo off-spec* di MT. Gunung Kemala bahwa penyebab utama *cargo off-spec* (kadar air 701 mg/kg dan tampilan *cloudy*) bukanlah kegagalan mutu produk dari kilang, melainkan kontaminasi silang yang terjadi di atas kapal. Faktor dominan adalah Faktor Material, yaitu kondisi tangki kapal berusia 38 tahun yang memiliki residu lumpur (*sludge*) akibat korosi dan absennya *tank cleaning* total sejak 2022.

Mekanisme Kegagalan (Fishbone): Analisis akar masalah menunjukkan rantai kausalitas yang fatal: Sifat higroskopis FAME pada B40 menyerap kelembaban akibat kondensasi suhu tropis (*Environment*), yang kemudian diperparah oleh metode transfer *intertank* yang menciptakan turbulensi (*Method*). Turbulensi ini mengangkat endapan lumpur purba di dasar tangki dan mencampurnya dengan air kondensasi ke dalam muatan. Implikasi Praktis: Penelitian ini menegaskan bahwa kapal tanker kategori tua (*aging vessel*) memiliki risiko tinggi untuk mengangkut Biodiesel B40 jika tidak dilakukan modifikasi prosedur perawatan tangki. Standar kebersihan tangki konvensional untuk bahan bakar fosil terbukti tidak memadai untuk menangani sensitivitas B40.

Berdasarkan temuan di atas, rekomendasi disusun dengan fokus pada penguatan standar teknis untuk mencegah keberulangan insiden dengan Penguatan Standar Teknis *Tank Cleaning & Persiapan Tangki*. Dapat diawali dengan Prosedur *Wall Wash Test*: Sebelum memuat B40, kapal wajib melakukan verifikasi kebersihan tangki tidak hanya secara visual, tetapi menggunakan metode *Wall Wash* untuk mendeteksi residu hidrokarbon atau klorida yang tidak terlihat, guna memastikan tangki bebas dari kontaminan *sludge* lama. Serta Mengingat batas toleransi air B40 yang ketat (maks 350-380 mg/kg), prosedur pengeringan tangki (*mopping/stripping*) harus dilakukan hingga kondisi *absolute dryness* tercapai sebelum *loading*, untuk mengeliminasi potensi hidrolisis FAME.

Dilakukan Pengendalian Atmosfer Tangki dan Ventilasi dengan Memastikan *Pressure/Vacuum (P/V) Valves* berfungsi optimal sesuai pengaturan tekanannya untuk meminimalkan "napas tangki" (*breathing losses*) yang membawa masuk udara lembab saat terjadi fluktuasi suhu ekstrim (40°C - 28°C). Serta *Oxygen Exclusion* (Pengusiran Oksigen): Mengacu pada pedoman teknis penanganan biodiesel, disarankan menerapkan metode *Nitrogen Blanketing* atau menjaga atmosfer *Inert Gas* di ruang *ullage* untuk menekan kadar oksigen, sehingga menghambat laju oksidasi dan pertumbuhan bakteri dalam tangki. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menganalisis efektivitas berbagai jenis pelapis tangki (*tank coating*) (seperti *Epoxy* vs *Zinc Silicate*) terhadap ketahanan korosi akibat keasaman FAME pada penyimpanan jangka panjang di lingkungan maritim tropis.

## Daftar Pustaka

- [1] G. Wu, J. C. Ge, And N. J. Choi, "A Comprehensive Review Of The Application Characteristics Of Biodiesel Blends In Diesel Engines," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 22, P. 8015, Nov. 2020, Doi: 10.3390/App10228015.
- [2] Hidayat, "Evaluasi Kualitas Biodiesel Dan Bahan Bakar Solar Dengan Campuran Rasio Tinggi," *Seri Konferensi Iop: Ilmu Bumi Dan Lingkungan*, Vol. 1187, P. 012018, 2023.
- [3] Z. Mufidah, A. H. Tiguna, And A. Haryanto, "Stability Of Pure Biodiesel (B100), Biodiesel Mixture (B40), And Petroleum Diesel (B0) Due To Storage," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal Of Agricultural Engineering)*, Vol. 13, No. 3, P. 900, Aug. 2024, Doi: 10.23960/Jtep-L.V13i3.900-913.
- [4] D Wahyudi, M Fawzi, And D Artanti, "Pengaruh Lingkungan Laut Terhadap Karakteristik Biodiesel Kelapa Sawit Selama Penyimpanan," *Jurnal Penelitian Lanjutan Dalam Mekanika Fluida Dan Ilmu Termal*, 2021.

- [5] M. Maljković, S. Vukša, P. Vidan, And I. Pavić, “Review Of Cargo Operations On Crude Oil Tankers And Methods/Models Used For Optimisation And Improvement Of Safety,” *Časopis Pomorskog Fakulteta Kotor - Journal Of Maritime Sciences*, Vol. 23, No. 1/2022, Pp. 153–164, Jun. 2022, Doi: 10.56080/Jms220512.
- [6] International Maritime Organization (Imo), “The International Safety Management (Ism) Code,” 2018 [Online]. Available: <https://www.imo.org/En/Ourwork/Humanelement/Pages/Ismcode.aspx>
- [7] M. A. Akbar, F. W. Navira, R. A. Nova, J. Kemong, And O. Venriza, “Evaluasi Kualitas Produk Bahan Bakar Solar Selama Proses Penyimpanan Menggunakan Metode Statistik Kualitatif,” *Urnal Ilmu Terapan, Manajemen Dan Teknologi Rekayasa, Itats*, 2021.
- [8] Yuli Susanto, Dedy Rusmiyanto, And Kalmah, “Analisis Penyebab Terjadinya Shortage Cargo Pada Kegiatan Transshipment Batu Bara Di Vessel Pada Pt.Sedayu Makmur Abadi,” *Jurnal Universal Technic*, Vol. 2, No. 1, Pp. 42–50, Apr. 2023, Doi: 10.58192/Unitech.V2i1.671.
- [9] W. P. Aji And E. Darmana, “Analisa Penyebab Rusaknya Cargo Oil Pump Guna Menunjang Discharge Cargo Pertamina Di Ataskapal Mt. Patra Tanker 2,” *Jurnal Sains Dan Teknologi Maritim*, Vol. 22, No. 1, P. 31, Sep. 2021, Doi: 10.33556/Jstm.V22i1.269.
- [10] S. Holifahtus Sakdiyah, N. Eltivia, And A. Afandi, “Root Cause Analysis Using Fishbone Diagram: Company Management Decision Making,” *Journal Of Applied Business, Taxation And Economics Research*, Vol. 1, No. 6, Pp. 566–576, Aug. 2022, Doi: 10.54408/Jabter.V1i6.103.
- [11] I. M. L. M. Jaya, *Metode Penelitian Kuantitatif Dan Kualitatif: Teori, Penerapan, Dan Riset Nyata*. In Anak Hebat Indonesia. Anak Hebat Indonesia, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Yz8keaaqbaj>
- [12] P. D. Sugiyono, “Metode Penelitian Pendidikan (Kuantitatif, Kualitatif, Kombinasi, R&D Dan Penelitian Pendidikan),” *Metode Penelitian Pendidikan*, Vol. 67, 2019.
- [13] Ahmad, “Pemanfaatan Data Sekunder Dalam Penelitian Maritim,” *Jurnal Riset Transportasi Laut*, Vol. 5, No. 2, Pp. 10–18, 2024.
- [14] J. W. Creswell And C. N. Poth, *Qualitative Inquiry And Research Design: Choosing Among Five Approaches*. Sage Publications, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Gx1zdwaqbaj>
- [15] S. Holifahtus Sakdiyah, N. Eltivia, And A. Afandi, “Root Cause Analysis Using Fishbone Diagram: Company Management Decision Making,” *Journal Of Applied Business, Taxation And Economics Research*, Vol. 1, No. 6, Pp. 566–576, Aug. 2022, Doi: 10.54408/Jabter.V1i6.103.
- [16] E. B. I. Purwanto, Dharma Widada, And Willy Tambunan, “Analisis Risiko K3 Pada Bongkar Muat Di Pelabuhan Dengan Metode Hazop (Hazard Analysis And Operability Study) (Studi Kasus : Pt. Xyz),” *Journal Of Industrial And Manufacture Engineering*, Vol. 7, No. 2, Pp. 180–191, Nov. 2023, Doi: 10.31289/Jime.V7i2.9803.
- [17] Et Al. A. P. Sasongko, “Analisis Stabilitas Oksidasi Biodiesel B30 Dan B40 Pada Penyimpanan Jangka Panjang,” *Jurnal Teknologi Minyak Dan Gas Bumi*, Vol. 18, No. 2, Pp. 89–88, 2022.
- [18] C. C. Adigwe, I. L. Nwaogazie, E. Ugwoha, A. O. David, And N. G. Elemuo, “Sludge Pollution Control From Crude Oil Tank Cleaning,” *J Water Resour Prot*, Vol. 14, No. 09, Pp. 632–649, 2022, Doi: 10.4236/Jwarp.2022.149033.
- [19] D. B. Putra, “Optimalisasi Penanganan Muatan Cair Untuk Mencegah Klaim Cargo Pada Kapal Tanker,” *Jurnal Sains Dan Teknologi Maritim*, Vol. 24, Pp. 55–63, 2024.
- [20] Ppptmgb “Lemigas,” “Pedoman Teknis Penanganan Dan Penyimpanan Biodiesel B40 Di Sektor Maritim,” 2023