

Analisis Kegagalan Intercooler pada Mesin Utama Kapal Tugboat dengan Metode *Root Cause Analysis* (RCA) dan *Event Tree Analysis* (ETA)

Alpiyanti¹, M. Rusydi Alwi¹, Zulkifli¹ dan Surya Hariyanto¹

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

*Email: alpiyantiyunus09@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.112023.04

Abstrak

Tugboat adalah kapal yang digunakan untuk melakukan manuver atau pergerakan seperti menarik atau mendorong kapal lain di pelabuhan maupun di laut lepas. Tugboat dilengkapi dengan mesin induk sebagai penggerak utama untuk menjalankan fungsinya. Salah satu kendala utama dalam pengoperasian mesin induk kapal adalah kegagalan pada intercooler yang disebabkan oleh kisi-kisi intercooler yang kotor sehingga menghambat aliran udara. Hal ini mengurangi kemampuan intercooler dalam menurunkan suhu udara yang masuk ke ruang bakar, sehingga dapat berdampak pada performa mesin. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penyebab, dampak, dan upaya pencegahan kegagalan intercooler pada mesin induk kapal tugboat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Root Cause Analysis* (RCA) dan *Event Tree Analysis* (ETA). Objek penelitian dilakukan pada kapal KT. Anoman VIII yang berada di PT Pelabuhan Indonesia. Hasil penelitian berdasarkan metode RCA menunjukkan terdapat 18 penyebab yang terdiri dari empat faktor utama, yaitu faktor material, faktor peralatan, faktor manusia, dan faktor lainnya. Penyebab dengan probabilitas tertinggi adalah faktor peralatan, yaitu adanya kotoran di sisi masuk air (inlet water side) dengan probabilitas sebesar 0,04763. Sementara itu, hasil ETA menunjukkan bahwa output E memiliki indeks risiko tertinggi, yaitu 7, dengan tingkat risiko pada level sedang. Indeks frekuensi berada pada kategori reasonably probable, yang berarti kejadian tersebut kemungkinan besar dapat terjadi. Indeks keparahan berada pada tingkat serius, yang berarti tingkat bahayanya tinggi.

Abstract

Intercooler Failure Analysis on the Main Engine of a Tugboat Using Root Cause Analysis (RCA) and Event Tree Analysis (ETA) Methods. Tugboat (tugboat) is a ship used for maneuvering or movement such as pulling or pushing other ships in ports and high seas. Tugboats are equipped with a main engine as the main driver to perform its function. One of the main obstacles in operating the ship's main engine is intercooler failure caused by dirty intercooler grilles that impede air flow. This reduces the ability to reduce the temperature of the air entering the combustion chamber so that it can have an impact on engine performance. This study aims to determine the causes, impacts and prevention efforts of intercooler failure on the main engine of a tugboat. The methods used in this research are Root Cause Analysis and Event Tree Analysis. The object of this research was carried out on the ship KT. Anoman VIII which is located at PT Pelabuhan Indonesia. The results of the research based on the RCA method there are 18 causes consisting of four main factors, namely material factors, equipment factors, human factors, and other factors. The highest probability cause is the equipment factor, namely there is dirt on the inlet water side with a probability of 0.04763. While the result of ETA that has the highest risk index is output E, which is 7 with the risk level at a moderate level with the frequency index being reasonably probable, which means that the frequency level of the event is likely to occur with the severity index being at a serious level, meaning that the level of danger is high.

Kata Kunci: ETA, intercooler, RCA, tugboat

1. Pendahuluan

Tugboat (kapal tunda) adalah kapal yang digunakan untuk melakukan manuver atau pergerakan seperti menarik atau mendorong kapal lainnya di pelabuhan maupun laut lepas [1]. Tugboat dilengkapi dengan mesin induk sebagai penggerak utama untuk melakukan fungsinya. Mesin induk berfungsi mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga pendorong bagi

propeller agar kapal dapat bergerak. Dimana dalam pengoperasiannya mesin induk selalu dalam kondisi jalan secara terus menerus, hal tersebut tentunya akan mempengaruhi kondisi mesin [2].

Untuk mencapai kinerja yang optimal pada mesin induk kapal, diperlukan perhatian terhadap peran vital komponen-komponen mesin utama kapal sebagai sistem penunjang keberhasilan pengoperasiannya. Salah satu

komponen yang memainkan peran krusial dalam hal ini adalah intercooler. Intercooler berfungsi mendinginkan dan mengirimkan udara untuk pembakaran sehingga udara yang masuk ke ruang bakar bertemperatur rendah dengan kadar oksigen tinggi dan nantinya pembakaran bahan bakar di setiap silinder dapat sempurna. Intercooler harus memiliki kinerja yang optimal karena pada saat mesin penggerak utama bekerja, udara bilas yang maksimal sangat diperlukan dalam proses pembakaran agar tenaga yang dihasilkan dapat maksimal [3]. Salah satu kendala utama dalam pengopersian mesin utama kapal adalah kegagalan intercooler yang disebabkan oleh kotornya kisi-kisi intercooler sehingga menghambat aliran udara. Hal tersebut mengurangi kemampuan untuk menurunkan suhu udara yang masuk ke ruang bakar sehingga dapat berdampak pada kinerja mesin.

Pengoperasian kapal yang aman sangat bergantung pada keandalan sistem propulsi mesin utama. Keandalan suatu komponen atau sistem didefinisikan sebagai kemungkinan komponen atau sistem tersebut dapat menjalankan fungsi yang diperlukan selama periode waktu tertentu saat digunakan dalam kondisi operasi yang telah ditentukan. Faktor keamanan suatu sistem biasanya berkaitan dengan keandalannya dan dapat didefinisikan sebagai upaya untuk menghindari kondisi yang dapat menimbulkan kerugian [4]. Meningkatkan keamanan dan keandalan mesin utama kapal adalah aspek krusial dalam pelayaran, mengingat konsekuensi fatal akibat kelalaian. Pengoperasian mesin utama kapal secara terus menerus dalam kondisi tidak optimal akan menurunkan kinerja mesin dan memicu kegagalan serta pelanggaran keamanan. Kegagalan mesin utama kapal dapat mengakibatkan kerusakan signifikan yang diawali dengan kegagalan komponen mesin. Hal ini dapat berakibat pada kecelakaan dan kerusakan fatal yang membahayakan awak kapal dan penumpang, seperti tabrakan, kandas, kebakaran, dan bahkan ledakan kapal.

Kegagalan komponen mesin utama kapal sering kali terjadi akibat kurangnya upaya pencegahan. Namun dengan melakukan perawatan dengan baik dan tepat dapat menurunkan risiko kegagalan mesin, tetapi hal tersebut harus dilakukan secara konsisten dengan metode yang tepat [5]. Tindakan yang korektif yang diambil saat terjadi kegagalan merupakan

langkah yang tepat untuk meningkatkan efektifitas dalam perawatan. Berbagai metode dapat digunakan untuk menentukan skala prioritas untuk mencegah kegagalan intercooler pada mesin utama kapal, salah satunya adalah metode *Root Cause Analysis (RCA)* dan *Event Tree Analysis (ETA)*. RCA adalah metode yang dapat mengidentifikasi akar penyebab dari suatu masalah atau kejadian baik itu berupa kegagalan, sedangkan ETA adalah metode yang dapat digunakan untuk memprediksi kemungkinan terjadinya berbagai risiko kegagalan dan konsekuensinya. Dengan mengkombinasikan antara metode ini, maka dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang risiko kegagalan intercooler dalam konteks keandalan mesin utama kapal.

Untuk meminimalkan risiko kegagalan, diperlukan upaya pencegahan yang komprehensif, salah satunya dengan meningkatkan kemampuan awak kapal dalam mengidentifikasi kegagalan pada intercooler sebagai langkah awal. Dengan melakukan identifikasi, para awak kapal akan mengetahui penyebab dari kegagalan intercooler pada mesin utama sehingga dapat melakukan pemeliharaan yang tepat untuk membantu mencegah terjadinya kegagalan intercooler dan memperpanjang usia pakai mesin utama kapal.

2. Metodologi

Dalam penelitian ini kapal yang digunakan sebagai objek penelitian adalah kapal KT. Anoman VIII yang merupakan milik PT. Pelabuhan Indonesia (Persero). Berikut adalah data kapal yang digunakan sebagai objek penelitian yang diuraikan pada Tabel 1.

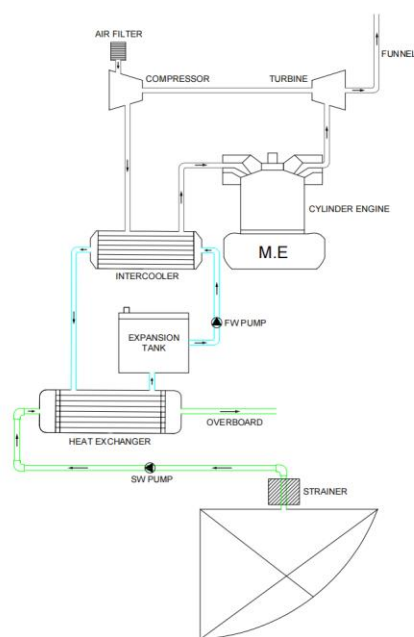
Tabel 1. Data ukuran utama kapal KT. Anoman VIII

Data Ukuran Utama Kapal KT. Anoman VIII	Dimensi
Panjang - LOA (m)	30
Panjang - LBP (m)	27,84
Lebar - B (m)	9,5
Sarat - T (m)	3,5

Dari hasil wawancara langsung yang dilakukan didapatkan beberapa bentuk kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat sebagai berikut yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data penyebab kegagalan intercooler berdasarkan hasil wawancara

No.	Penyebab Kegagalan Intercooler
1.	Korosi pada kisi-kisi air laut intercooler
2.	Korosi pada pipa pendingin air laut intercooler
3.	Terjadi penyumbatan kotoran pada kisi-kisi udara intercooler
4.	Terjadi penyumbatan kotoran pada pipa pendingin air laut intercooler
5.	Tekanan pompa pendingin tidak optimal
6.	Kebocoran pipa, sambungan, atau flange pada intercooler
7.	Kebocoran header (penutup) intercooler
8.	Terdapat kotoran di sisi saluran masuk air laut (<i>Inlet water side</i>)
9.	Terdapat kotoran di sisi saluran masuk udara (<i>Air inlet</i>)
10.	Kerusakan katup cerat
11.	Filter udara (Air filter) turbocharger kotor
12.	Kerusakan impeller turbocharger
13.	Kerusakan gasket
14.	Kelalaian crew dalam melakukan pengecekan dan perawatan yang tidak teratur
15.	Perawatan intercooler tidak sesuai dengan <i>plan maintenance system</i> (PMS)
16.	Mengabaikan pemeriksaan rutin intercooler
17.	Air pendingin intercooler kotor
18.	Supply air laut yang masuk kedalam intercooler kurang maksimal

**Gambar 1. Skema kerja intercooler kapal KT. Anoman VIII**

Berikut penjelasan cara kerja aftercooler/intercooler pada gambar 26 diatas:

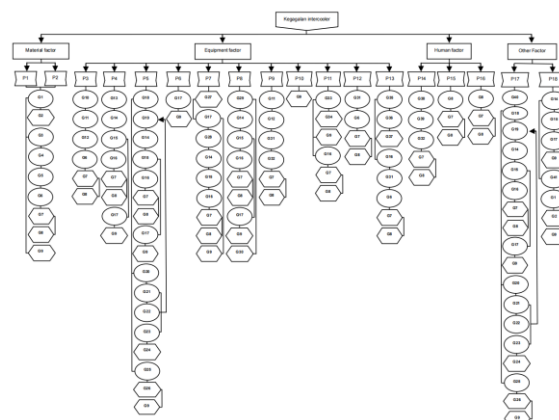
- Udara luar dikompresi, masuk melalui air filter;
- Menuju compressor hingga terjadi peningkatan tekanan dan suhu udara;
- Udara panas masuk ke intercooler untuk didinginkan:

- Pendingin air tawar yang ditampung di expansion tank akan dihisap menggunakan pompa dan mengalir menuju intercooler untuk mendinginkan udara.
 - Setelah mendinginkan udara, air tawar akan dialirkan menuju heat exchanger untuk didinginkan menggunakan air laut.
 - Setelah air laut mendinginkan air tawar, air tawar akan kembali menuju ke *expansion tank* dan air laut akan dialirkan menuju *overboard*.
 - Siklus tersebut bersirkulasi secara terus menerus.
- Udara yang telah dingin akan masuk ke *engine cylinder* melalui *intake manifold*.
 - Sisa gas buang akan keluar melalui cylinder dan diarahkan menuju ke turbin, dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan kompressor.
 - Setelah gas buang memutar turbin, sisa gas buang dikeluarkan melalui *funnel*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisa Faktor Penyebab Pada Mesin Utama Kapal Tugboat

Identifikasi awal dari penelitian ini adalah dengan mengidentifikasi penyebab kegagalan intercooler pada mesin utama kapal dengan menggunakan metode *root cause analysis* (RCA) berdasarkan empat faktor yang mempengaruhi yaitu *material factor*, *equipment factor*, *human factor*, dan *other factor*.

**Gambar 2. Diagram root cause map penyebab kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat**

Tabel 3. Kode diagram untuk kategori penyebab kegagalan intercooler

Kode Penyebab	Kategori Penyebab Kegagalan Intercooler
P1	Korosi pada kisi-kisi air laut intercooler
P2	Korosi pada pipa pendingin air laut intercooler
P3	Terjadi penyumbatan kotoran pada kisi-kisi udara intercooler
P4	Terjadi penyumbatan kotoran pada pipa pendingin air laut intercooler
P5	Tekanan pompa pendingin tidak optimal
P6	Kebocoran pipa, sambungan, atau flange pada intercooler
P7	Kebocoran header (penutup) intercooler
P8	Terdapat kotoran di sisi saluran masuk air laut (<i>Inlet water side</i>)
P9	Terdapat kotoran di sisi saluran masuk udara (<i>Air inlet</i>)
P10	Kerusakan katup cerat
P11	Kerusakan gasket
P12	Filter udara (<i>Air filter</i>) turbocharger kotor
P13	Kerusakan impeller turbocharger
P14	Kelalaian crew dalam melakukan pengecekan dan perawatan yang tidak teratur
P15	Mengabaikan pemeriksaan rutin intercooler
P16	Perawatan intercooler tidak sesuai dengan <i>plan maintenance system</i> (PMS)
P17	Supply air laut yang masuk kedalam intercooler kurang maksimal
P18	Air pendingin intercooler kotor

Tabel 4. Kode diagram untuk penyebab kegagalan intercooler

Kode Penyebab	Penyebab Kegagalan Intercooler (Kategori akar penyebab, dekat akar penyebab, dan akar penyebab)
G1	Terdapat kerak atau endapan
G2	Kontak terus menerus dengan air laut
G3	Zinc anode tidak berfungsi
G4	Zinc anode habis
G5	Tidak dilakukan penggantian zinc anode
G6	Kelalaian crew (dalam melakukan perawatan)
G7	Padatnya jadwal operasional kapal
G8	Kurangnya kesadaran crew (akan pentingnya perawatan)
G9	Faktor usia
G10	Terdapat kotoran pada sisi saluran masuk udara (<i>air inlet</i>)
G11	Sudu-sudu kompresor side kotor
G12	Filter udara turbocharger kotor
G13	Terdapat kotoran atau partikel padat
G14	Strainer sea chest tidak berfungsi dengan baik
G15	Kurasakan strainer sea chest
G16	Kurangnya kontrol dan perawatan
G17	Korosi
G18	Kurangnya isapan pompa
G19	Terjadi penyumbatan
G20	Menurunnya kinerja impeller karet fleksibel
G21	Terkikisnya impeller
G22	Terdapat partikel abrasif
G23	Mengalami keausan
G24	Gesekan
G25	Kerusakan seal
G26	Paparan panas terus-menerus
G27	Pemasangan yang tidak tepat
G28	Kotoran atau kerak
G29	Strainer sea chest kotor
G30	Kondisi kapal berdasarkan perairan
G31	Tidak dilakukan penggantian filter
G32	Sistem kontrol kurang baik
G33	Deformasi
G34	Mendapat tekanan secara terus menerus dan suhu tinggi
G35	Degradasi material
G36	Impeller mengalami keausan
G37	Pelumasan yang buruk
G38	Kurangnya persediaan suku cadang
G39	Tidak memperbaharui daftar inventory list
G40	Tekanan pompa pendingin tidak optimal
G41	Korosi pipa air laut

Untuk mengetahui kode permasalahan pada Gambar 2 pada diagram root cause map penyebab kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

3.2. Perhitungan Probabilitas

Tabel 5 merupakan indeks yang digunakan untuk mengukur seberapa sering kejadian penyebab kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat terjadi.

Tabel 5. Frequency Index (FI)

FI	Rating	Kualitatif	Kuantitatif
5	<i>Frequent</i>	Hampir pasti terjadi dalam kurun waktu 6 bulan	10^{-1}
4	<i>Reasonably Probable</i>	Terjadi beberapa kali dalam kurun waktu 1 tahun	10^{-2}
3	<i>Remote</i>	Terjadi beberapa kali dalam kurun waktu 2-3 tahun	10^{-3}
2	<i>Extremely Remote</i>	Terjadi dalam kurun waktu 4-5 tahun	10^{-4}
1	<i>Extremely Improbable</i>	Terjadi dalam kurun waktu 5-10 tahun	10^{-5}

(Sumber: DNV/Marine Risk Assessment, 2002)

Berikut hasil probabilitas dari masing-masing kejadian/penyebab berdasarkan *material factor*, *equipment factor*, human factor, dan *other factor* dari kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat dengan 32 responden.

Tabel 6. Hasil probabilitas material factor (f1)

No	Penyebab (<i>Initiating event</i>)	Probabilitas
1	Korosi pada kisi-kisi air laut intercooler	0,02303
2	Korosi pipa pendingin air laut intercooler	0,01442
Total		0,03746

Tabel 7. Hasil probabilitas equipment factor (f2)

No	Penyebab (<i>Initiating event</i>)	Probabilitas
1	Terjadi penyumbatan kotoran pada kisi-kisi udara intercooler	0,02748
2	Terjadi penyumbatan kotoran pada pipa pendingin air laut intercooler	0,03190
3	Tekanan pompa pendingin tidak optimal	0,03651
4	Kebocoran header (penutup) intercooler	0,01436
5	Kebocoran pipa, sambungan, atau flange pada intercooler	0,02501
6	Terdapat kotoran pada sisi saluran masuk air laut (<i>inlet water side</i>)	0,04763
7	Terdapat kotoran pada sisi saluran masuk udara (<i>Air inlet</i>)	0,04079
8	Kerusakan katup cerat	0,01799
9	Kerusakan gasket	0,02114
10	Filter udara (<i>Air filter</i>) turbocharger kotor	0,04298
11	Kerusakan impeller turbocharger	0,01649
Total		0,32234

Tabel 8. Hasil probabilitas *human factor* (f3)

No	Penyebab (<i>Initiating event</i>)	Probabilitas
1	Perawatan intercooler tidak sesuai dengan <i>plan maintenance system</i> (PMS)	0,02603
2	Kelalaian crew dalam melakukan pengecekan dan perawatan yang tidak teratur	0,01391
3	Mengabaikan pemeriksaan rutin intercooler	0,03540
Total		0,07535

Tabel 9. Hasil probabilitas *other factor* (f4)

No	Penyebab (<i>Initiating event</i>)	Probabilitas
1	Supply air laut yang masuk kedalam intercooler kurang maksimal	0,03437
2	Air pendingin intercooler kotor	0,02914
Total		0,06353

Pada Tabel 6-9 dapat diketahui nilai probabilitas dari setiap faktor kejadian untuk *material factor* sebesar 0,03746, *equipment factor* sebesar 0,32234, *human factor* sebesar 0,07535, dan *other factor* sebesar 0,06353. Jadi dapat diketahui nilai probabilitas keseluruhan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{tot}} &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \\
 &= 0,03746 + 0,32234 + 0,07535 + 0,06353 \\
 &= 0,499
 \end{aligned}$$

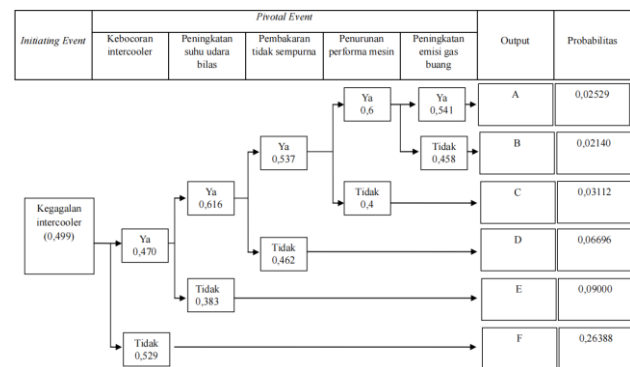
3.3 Analisa Dampak Kegagalan Intercooler Pada Mesin Utama Kapal Dengan Metode *Event Tree Analysis* (ETA)

Pada penelitian ini akan dijelaskan mengenai akibat kegagalan intercooler pada mesin utama kapal mulai dari *pivotal event* hingga *output* yang dihasilkan oleh *pivotal event*. Dari proses-proses tersebut nantinya akan didapatkan dampak/ akibat permasalahan, probabilitas, dan *risk matriks* yang dijabarkan dalam bentuk diagram ETA. Berikut akan dijabarkan mengenai akibat dari kegagalan intercooler pada mesin utama kapal yang terbagi menjadi 5 *pivotal event* yaitu kebocoran intercooler, peningkatan suhu udara bilas, pembakaran tidak sempurna, penurunan performa mesin, dan peningkatan emisi gas buang. Dari 5 *pivotal event* tersebut akan dilengkapi dengan 6 output.

3.2.1. Initiating Event

Initiating event dalam metode ini merupakan hasil keseluruhan probabilitas penyebab

kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat menggunakan metode *root cause analysis* (RCA) dengan hasil probabilitas sebesar 0,499.

**Gambar 3. Diagram *event tree analysis* dampak kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat**

3.2.2. Pivotal Event

Pivotal event adalah kejadian perantara yang terjadi antara *initiating event* dan *output*. Pada *pivotal event* terdapat 5 faktor atau dampak yang merupakan kejadian akan terjadi dan tidak terjadi dari metode keselamatan yang ditetapkan untuk mencegah *initiating event* agar tidak mengakibatkan sebuah risiko. Tabel 10 merupakan *pivotal event* (dampak) dan probabilitas dari kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat. Penentuan *pivotal event* tersebut berdasarkan hasil wawancara oleh beberapa responden.

Tabel 10. *Pivotal event*

No	Pivotal Event	Probabilitas
1	Kebocoran intercooler	0,470
2	Peningkatan suhu udara bilas	0,616
3	Pembakaran tidak sempurna	0,537
4	Penurunan performa mesin	0,6
5	Peningkatan emisi gas buang	0,541

Berdasarkan perhitungan probabilitas yang dilakukan maka hasil dari *pivotal event* yang terjadi “ya” dan tidak terjadi “tidak” sebagai berikut:

- 1) Pivotal event 1
Ya : 0,470
Tidak : 0,529
- 2) Pivotal event 2
Ya : 0,616
Tidak : 0,383

- 3) Pivotal event 3
Ya : 0,537
Tidak : 0,462
- 4) Pivotal event 4
Ya : 0,6
Tidak : 0,4
- 5) Pivotal event 5
Ya : 0,541
Tidak : 0,458

3.2.3. Output

1. Output untuk *Frequency Index* (FI)

Nilai probabilitas *output* didapat berdasarkan pemetaan alur pada diagram *event tree* yang dimulai dengan mengalikan probabilitas initiating event dengan alur “ya” atau “tidak” pada pivotal event hingga mencapai output. Hasil perkalian tersebut merupakan probabilitas pada masing-masing output yang nantinya akan digolongkan ke dalam risk matriks. Keterangan untuk masing-masing output sebagai berikut:

- a. Output A : Kegagalan intercooler menyebabkan kerusakan komponen intercooler hingga mengalami kebocoran intercooler atau komponen lainnya.
Output A terjadi dengan probabilitas:
 $0,499 \times 0,470 \times 0,616 \times 0,537 \times 0,6 \times 0,541 = 0,02529$
Dengan hasil *frequency indeks* (FI) berdasarkan Tabel 3 berada pada *rating* 3.
- b. Output B : Kegagalan intercooler berupa kebocoran atau kerusakan komponen intercooler lainnya menyebabkan peningkatan suhu udara bilas pada mesin utama kapal yang menyebabkan udara bilas tidak dingin dan bekerja secara efektif sehingga menyebabkan suhu udara bilas meningkat yang disebabkan karena terdapat kotoran pada sirip (fins) intercooler.
Output B terjadi dengan probabilitas:
 $0,499 \times 0,470 \times 0,616 \times 0,537 \times 0,6 \times 0,458 = 0,02140$
Dengan hasil *frequency indeks* (FI) berdasarkan Tabel 3 berada pada *rating* 3.
- c. Output C : Kegagalan intercooler menyebabkan pembakaran tidak sempurna pada mesin utama kapal sehingga

menyebabkan udara masuk ke ruang pembakaran menjadi lebih panas dan kurang padat sehingga campuran antara udara dan bahan bakar menjadi tidak optimal sehingga mengurangi efisiensi pembakaran yang berakibat pada penurunan daya mesin dan performa keseluruhan.

Output C terjadi dengan probabilitas:

$$0,499 \times 0,470 \times 0,616 \times 0,537 \times 0,4 = 0,03113$$

Dengan hasil *frequency indeks* (FI) berdasarkan Tabel 3 berada pada *rating* 3.

- d. Output D : Kegagalan intercooler menyebabkan udara yang masuk ke ruang bakar panas yang dimana udara panas memiliki densitas yang lebih rendah, sehingga jumlah oksigen yang masuk ke ruang bakar berkurang yang mengakibatkan proses pembakaran menjadi kurang efisien.
Output D terjadi dengan probabilitas:
 $0,499 \times 0,470 \times 0,616 \times 0,462 = 0,06696$
Dengan hasil *frequency indeks* (FI) berdasarkan Tabel 3 berada pada *rating* 3.
- e. Output E : Kegagalan intercooler menyebabkan penurunan performa mesin yang akan berdampak pada kecepatan kapal yang menurun karena tidak mampu menghasilkan daya yang optimal.
Output E terjadi dengan probabilitas:
 $0,499 \times 0,470 \times 0,383 = 0,09000$
Dengan hasil *frequency indeks* (FI) berdasarkan Tabel 3 berada pada *rating* 3
- f. Output F : Kegagalan intercooler menyebabkan peningkatan emisi gas buang yang berdampak pada pencemaran lingkungan laut yang dapat merusak lingkungan laut secara tidak langsung.
Output F terjadi dengan probabilitas:
 $0,499 \times 0,529 = 0,26388$
Dengan hasil *frequency indeks* (FI) berdasarkan Tabel 3 berada pada *rating* 4.

2. Output untuk *Severity Index* (SI)

Penentuan output dan rating dampak kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat berdasarkan hasil wawancara dan penyebaran kuesioner sebagaimana ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11. *Output*

No	Output	Rating
1	Kegagalan intercooler yang menyebabkan kerusakan komponen intercooler hingga mengalami kebocoran intercooler atau komponen lainnya	2,583
2	Kegagalan intercooler menyebabkan peningkatan suhu udara bilas yang berdampak pada kinerja mesin	2,5
3	Kegagalan intercooler menyebabkan pembakaran tidak sempurna, sehingga sebagian besar bahan bakar terbuang bersama gas buang tanpa menghasilkan energi yang optimal	2
4	Kegagalan intercooler menyebabkan mesin menjadi overheating hingga berdampak pada kerusakan komponen mesin	2,583
5	Kegagalan intercooler menyebabkan mesin menjadi overheating hingga mengakibatkan penurunan performa mesin	2,583
6	Kegagalan intercooler menyebabkan peningkatan emisi gas buang yang berdampak pada lingkungan laut	2,583

Berdasarkan hasil rating output maka hasil dari output sebagai berikut:

- Output A terjadi dengan SI: 2,583 (3)
- Output B terjadi dengan SI : 2,5 (3)
- Output C terjadi dengan SI : 2
- Output D terjadi dengan SI : 2,583 (3)
- Output E terjadi dengan SI : 2,583 (3)
- Output F terjadi dengan SI : 2,583 (3)

3.2.4. Konsekuensi Event Tree Analysis (ETA) pada Risk Matrix

Penentuan kategori konsekuensi dalam *risk matriks* berdasarkan probabilitas dan *rating* dari hasil *event tree analysis* (ETA). Langkah awal yang dilakukan adalah menentukan *frequency index* (FI) dan *severity index* (SI) dari *output* yang dihasilkan pada *event tree analysis*. kemudian menghitung *risk index* (RI) untuk digolongkan ke dalam *risk matriks*.

1. *Frequency Index* (FI)

Hasil output *frequency index* sebagai berikut:

- Output A dengan FI : 3
- Output B dengan FI : 3
- Output C dengan FI : 3
- Output D dengan FI : 3
- Output E dengan FI : 3
- Output F dengan FI : 4

Tabel 12. *Frequency index* untuk risk matrix

FI	Rating	Kualitatif	Kuantitatif
5	<i>Frequent</i>	Hampir pasti terjadi dalam kurun waktu 6 bulan	1
4	<i>Reasonably Probable</i>	Terjadi beberapa kali dalam kurun waktu 1 tahun	0,1-1
3	<i>Remote</i>	Terjadi beberapa kali dalam kurun waktu 2-3 tahun	0,01-0,1
2	<i>Extremely Remote</i>	Terjadi dalam kurun waktu 4-5 tahun	0,001-0,01
1	<i>Extremely Improbable</i>	Terjadi dalam kurun waktu 5-10 tahun	0,0001-0,001

2. *Severity Index* (SI)

Hasil output *severity index* sebagai berikut:

- Output A dengan SI : 3
- Output B dengan SI : 3
- Output C dengan SI : 2
- Output D dengan SI : 3
- Output E dengan SI : 3
- Output F dengan SI : 3

Tabel 13. *Severity index* untuk risk matrix

SI	Rating	Kualitatif	Kuantitatif
1	<i>Minor</i>	Kegagalan ringan yang tidak berdampak signifikan pada kinerja mesin	< 0,01
2	<i>Moderate</i>	Kegagalan yang menyebabkan penurunan kinerja mesin, tetapi tidak membahayakan keselamatan	0,01-0,1
3	<i>Serious</i>	Kegagalan yang dapat menyebabkan kerusakan parah pada mesin atau membahayakan keselamatan	0,1-1
4	<i>Catastrophic</i>	Kegagalan yang menyebabkan kerusakan fatal pada mesin dan atau hilangnya nyawa	1-10

3. *Risk Index* (RI)

Tabel 14 adalah hasil konsekuensi *output* berdasarkan *frequency index* dan *severity index* dengan wawancara dan melakukan penyebaran kuesioner oleh beberapa responden.

Tabel 14. Hasil konsekuensi

No	Output	Frequency Index (FI)		Severity Index (SI)	
		Kualitatif	Kuantitatif	Kualitatif	Kuantitatif
1	Output A	3	<i>Remote</i>	3	<i>Serious</i>
2	Output B	3	<i>Remote</i>	3	<i>Serious</i>
3	Output C	3	<i>Remote</i>	2	<i>Moderate</i>
4	Output D	3	<i>Remote</i>	3	<i>Serious</i>
5	Output E	3	<i>Remote</i>	3	<i>Serious</i>
6	Output F	4	<i>Reasonably Probable</i>	3	<i>Serious</i>

Setelah mengetahui FI dan SI tiap masing-masing output maka tahap selanjutnya adalah menggolongkan ke dalam tabel *risk matriks* untuk mengetahui tingkat resikonya. Sebagaimana pada gambar 4 menunjukkan hasil dari penggolongan *output* ke dalam *risk matrix*. Untuk keterangan gambar, pada rentang 2-4 resikonya berada pada tingkat rendah (*low*), 5-7 berada pada tingkat sedang (*moderate*) dan 8-9 berada pada tingkat risiko tinggi (*high*).

FI	Rating	SEVERITY (SI)			
		Minor	Moderate	Serious	Catastrophic
5	Frequent	6	7	8	9
4	Reasonably Probable	5	6	7	8
3	Remote	4	5	6	7
2	Extremely Remote	3	4	5	6
1	Extremely Improbable	2	3	4	5

Output C
Output A, B, D, E
Output F

Gambar 4. Risk matriks

4. Hasil Risiko

Pada Tabel 16 merupakan hasil risiko dari perhitungan penggolongan output ke dalam *Risk Index* (RI) sebagai berikut:

Tabel 16. Hasil risiko dampak kegagalan intercooler mesin utama kapal

Output	Frequency Index (FI)		Severity Index (SI)		Risk Index (RI)	
	Kualitatif	Kuantitatif	Kualitatif	Kuantitatif	Kualitatif	Kuantitatif
Output A	3	Remote	3	Serious	6	Moderate
Output B	3	Remote	3	Serious	6	Moderate
Output C	3	Remote	2	Moderate	5	Moderate
Output D	3	Remote	3	Serious	6	Moderate
Output E	3	Remote	3	Serious	6	Moderate
Output F	4	Reasonably Probable	3	Serious	7	Moderate

Rumus *Risk Index* (RI) seperti dibawah ini:

$$RI = FI + SI$$

dimana,

RI : *Risk Matrix*

FI : *Frequency Index*

SI : *Severity Index*

Berikut penjelasan hasil risiko setiap masing-masing output:

- Output A berada pada bobot *moderate* yang berarti tingkat resikonya berada pada tingkat

sedang dengan *frequency index* berada pada *remote* yang artinya tingkat frequency kejadian sangat jarang dengan severity index berada pada tingkat serious yang artinya tingkat bahaya tinggi.

- Output B berada pada bobot *moderate* yang berarti tingkat resikonya berada pada tingkat sedang dengan *frequency index* berada pada *remote* yang artinya tingkat frequency kejadian sangat jarang dengan severity index berada pada tingkat serious yang artinya tingkat bahaya tinggi.
- Output C berada pada bobot moderate yang berarti tingkat resikonya berada pada tingkat sedang dengan *frequency index* berada pada *remote* yang artinya tingkat frequency kejadian sangat jarang dengan severity index berada pada tingkat moderate yang artinya tingkat bahaya sedang.
- Output D berada pada bobot *moderate* yang berarti tingkat resikonya berada pada tingkat sedang dengan *frequency index* berada pada *remote* yang artinya tingkat frequency kejadian sangat jarang dengan severity index berada pada tingkat serious yang artinya tingkat bahaya tinggi.
- Output E berada pada bobot *moderate* yang berarti tingkat resikonya berada pada tingkat sedang dengan *frequency index* berada pada *remote* yang artinya tingkat frequency kejadian sangat jarang dengan severity index berada pada tingkat *serious* yang artinya tingkat bahaya tinggi.
- Output F berada pada bobot *moderate* yang berarti tingkat resikonya berada pada tingkat sedang dengan *frequency index* berada pada *reasonably probable* yang artinya tingkat frequency kejadian kemungkinan besar terjadi dengan severity index berada pada tingkat *serious* yang artinya tingkat bahaya tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan metode *Root Cause Analysis* (RCA) terdapat 18 penyebab kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat yang terdiri dari 4 faktor utama yaitu *material factor*, *equipment factor*, *human factor*, dan *other factor*. Tingkat probabilitas tertinggi pertama yaitu terdapat kotoran di sisi saluran masuk air laut (inlet water side) dengan probabilitas 0,04763. Berdasarkan metode *Event Tree Analysis* (ETA) dampak dari kegagalan

intercooler pada mesin utama kapal tugboat yang digolongkan kedalam risk matriks yang memiliki *risk indeks* tertinggi adalah output E yaitu 7 dengan tingkat resikonya berada pada tingkat sedang dengan *frequency index* berada pada *reasonably probable* yang artinya tingkat *frequency* kejadian kemungkinan besar terjadi dengan *severity index* berada pada tingkat *serious* artinya tingkat bahaya tinggi.

Upaya yang harus dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat yaitu dengan melakukan pembersihan secara berkala pada strainer sea chest, melakukan penggantian filter udara turbocharger apabila masa pakainya sudah habis, melakukan penggantian komponen yang rusak, melakukan pembaharuan daftar *inventory list* agar suku cadang tersedia, melakukan perawatan intercooler secara rutin dan teratur yang mengacu pada manual book, dan melakukan sistem kontrol secara proaktif agar crew kapal tidak mengabaikan tugasnya diatas kapal.

Referensi

- [1] E. Kurniawati, "Analisa Teknis Pemilihan Daya Tug Boat dalam Rangka Pengembangan PT. Pelabuhan Indonesia II," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.
- [2] N. M. Darma, H. Supomo, and S. Nugroho, "Analisa Kondisi Mesin Induk Kapal dengan Aplikasi Metode Fuzzy Inference System," in *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XI*, Surabaya, 2010, pp. 1–12.
- [3] S. B. Tanoyo, "Analisa Penyebab Tersumbatnya Sisi Udara Intercooler pada Mesin Diesel Penggerak Utama di Kapal MT. Sumber Mitra Kencana 1," Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang, 2020.
- [4] V. Knežević, J. Orović, L. Stazić, and J. Čulin, "Fault Tree Analysis and Failure Diagnosis of Marine Diesel Engine Turbocharger System," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 12, p. 1004, 2020, doi: 10.3390/jmse8121004.
- [5] Det Norske Veritas, "Marine Risk Assessment," London, 2002.