

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tugboat (kapal tunda) adalah kapal yang digunakan untuk melakukan manuver atau pergerakan seperti menarik atau mendorong kapal lainnya di pelabuhan maupun laut lepas. (Kurniawati et al., 2014). 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. (Darma et al., 2018).

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. (Tanoyo, S.B, 2020).

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. (Knežević et al., 2020). 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. 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.

Dilatar belakangi oleh permasalahan tersebut seperti yang dijelaskan di atas, maka peneliti tertarik melakukan sebuah penelitian dengan judul **“Analisis Kegagalan Intercooler Pada Mesin Utama Kapal Tugboat Dengan Metode *Root Cause Analysis* dan *Event Tree Analysis*”**.

1.2 Teori

1.2.1 Mesin Diesel

Menurut Handayono (2016), mesin utama adalah mesin yang terdiri dari berbagai unit atau sistem pendukung yang berperan dalam menghasilkan tenaga dorong untuk menggerakkan kapal maju maupun mundur. Salah satu jenis mesin yang sering digunakan sebagai mesin utama kapal adalah mesin diesel.

Mesin diesel adalah jenis mesin pembakaran dalam di mana proses pembakaran terjadi di dalam mesin itu sendiri. Pembakaran terjadi ketika udara murni dikompresi di dalam silinder mesin, menghasilkan udara dengan tekanan dan suhu yang sangat tinggi.(Samlawi, 2015).

Dalam silinder dengan suhu dan tekanan udara yang memadai, partikel bahan bakar dapat secara otomatis terbakar, memulai proses pembakaran. Turbocharger yang digerakkan oleh gas buang menghasilkan udara yang masuk ke ruang bakar. Gas buang ini memberikan tekanan pada sisi turbin, membuat turbin berputar, dan putaran tersebut diteruskan melalui poros ke sisi blower untuk menghasilkan udara bertekanan tinggi, sekaligus meningkatkan aliran udara. Namun, udara tersebut tidak langsung digunakan untuk pembakaran karena dapat menimbulkan efek merugikan. Oleh karena itu, intercooler diperlukan untuk menurunkan suhu udara. Karena pendinginan meningkatkan kerapatan udara, intercooler juga meningkatkan jumlah dan volume udara, yang pada gilirannya meningkatkan kualitas pembakaran.

Sebagai mesin penggerak utama, mesin diesel lebih banyak digunakan daripada jenis mesin lainnya karena mesin diesel banyak memiliki kelebihan, salah satunya yaitu efisiensinya yang tinggi dalam penggunaan bahan bakar, daya tahan yang tinggi, menghasilkan torsi yang tinggi pada putaran mesin yang rendah, dan keandalannya yang tinggi. Mesin diesel dapat menghasilkan daya yang besar dengan menggunakan jumlah bahan bakar yang relatif kecil, sehingga mesin diesel dijadikan pilihan yang lebih ekonomis untuk pelayaran jarak jauh dan pengoperasian kapal secara berkelanjutan.

1.2.2 Sistem Pemasukan Udara

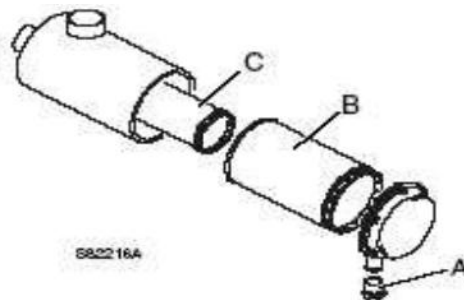
Sistem pemasukan udara adalah sistem yang mengatur pengisian udara murni ke dalam mesin induk. Sistem ini menggunakan udara murni yang melalui saringan udara dan dilengkapi dengan kompresor untuk mengurangi tekanan udara dan membantu proses pembakaran dalam silinder mesin induk. Kompresor ini dapat diperlukan karena tekanan udara di permukaan laut adalah rendah dan tidak cukup untuk menggerakkan mesin induk.

Proses masuknya udara ke dalam mesin dimulai dengan melewati pre air cleaner, yaitu saringan udara, yang berfungsi untuk mencegah partikel kasar masuk ke ruang bakar. Jika partikel kasar masuk ke ruang bakar, dapat menyebabkan kotoran menumpuk pada dinding silinder atau ruang bakar. Hal ini terjadi karena karakteristik utama kotoran tersebut membuatnya sulit untuk dibakar dengan cepat oleh sistem pembakaran. Akibatnya, pembakaran menghasilkan abu sisa sebagai hasil dari pembakaran. Menurut Maksum et al. (2012), Maksum et al. (2012), komponen sistem pemasukan udara adalah sebagai berikut:

1. Saringan Udara (Filter Utama)

Saringan udara menyaring kotoran dan debu yang belum terfilter sebelum mencapai saringan utama. Struktur saringan udara terbuat dari bahan kertas dengan ukuran pori mikron. Semakin kecil ukuran mikron saringan, semakin efektif menyaringnya. Pada beberapa mesin, saringan udara primer menyaring partikel halus, sedangkan saringan udara sekunder menangkap partikel yang

lebih kecil. Ini membuat udara lebih bersih. Dengan cara ini, udara bersih masuk ke ruang bakar melalui turbocharger.

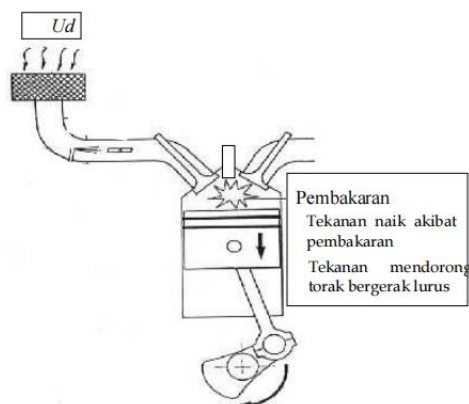


Gambar 1. Saringan udara primer dan sekunder
Sumber: Teknologi Motor Bakar (2012)

2. Sistem Pemasukan Udara

a. *Natural aspirated*

Natural aspirated merupakan sistem yang memungkinkan udara masuk ke ruang bakar secara alami. Proses pemasukan udara terjadi akibat perbedaan tekanan antara lingkungan luar dan sistem, yang menyebabkan udara mengalir masuk, seolah ada daya tarik dari dalam. Prinsip perbedaan tekanan ini memungkinkan aliran udara tanpa bantuan alat tambahan. Sistem *naturally aspirated* biasanya diterapkan pada mesin-mesin komersial dengan daya rendah.



Gambar 2. Mesin dengan jenis *naturally aspirated*
Sumber: Teknologi Motor Bakar (2012)

b. Turbocharger

Turbocharger adalah bagian dari sistem pemasukan udara yang memompa udara ke saluran masuk mesin, memastikan bahwa jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran selalu tersedia pada setiap kecepatan mesin. Turbocharger terdiri dari dua bagian utama, masing-masing berputar pada poros yang sama.

1) *Turbine wheel*

Turbine wheel dan *impeller wheel* berputar karena gas sisa yang keluar dari ruang bakar dan dibuang melalui knalpot. Karena keduanya terhubung pada poros yang sama, tidak ada perbedaan kecepatan antara keduanya.

2) *Impeller wheel*

Putaran roda *impeller* dilakukan untuk menghisap udara yang masuk ke dalam silinder melalui saringan udara dan saluran masuk menuju ruang bakar. Seiring dengan putaran mesin yang lebih besar, lebih banyak udara dipompa ke dalam ruang bakar. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 5, turbocharger digerakkan oleh aliran gas buang, yang memberikan keuntungan karena tidak memerlukan tenaga tambahan dari mesin utama untuk menggerakkannya. Gas buang menggerakkan rotor turbin hingga kecepatan tinggi, yaitu 85.000 RPM, dengan beban maksimum.



Gambar 3. Turbocharger dengan variabel geometri turbo

Sumber: Teknologi Motor Bakar (2012)

Adapun kelebihan pada mesin dengan turbocharger adalah sebagai berikut:

- 1) Daya akselerasi yang lebih baik pada kecepatan rendah (respons waktu)
- 2) Kenyamanan berkendara yang lebih baik
- 3) Daya serap turbo atas udara yang secara konsisten disesuaikan dengan putaran mesin
- 4) Pengendalian suhu yang lebih baik.

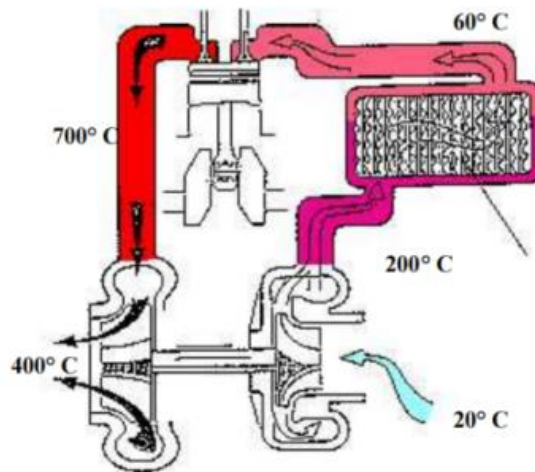
c. Supercharger

Supercharger adalah sistem yang menyuplai udara ke ruang bakar dengan menggunakan kompresor sebagai pemompa. Dalam kebanyakan kasus, kompresor menggerakkan sistem dengan menghisap udara melalui putaran mesin. Hal ini menyebabkan putaran kompresor menjadi beban tambahan bagi mesin dalam sistem supercharger, sehingga seiring

perkembangan teknologi, penggunaan sistem pemasukan udara dengan supercharger semakin ditinggalkan.

3. Intercooler

Intercooler biasanya digunakan pada mesin dengan daya besar, dan hampir semua mesin alat berat menggunakannya sebagai sistem pemasukan udara untuk menurunkan suhu udara sebelum masuk ke ruang bakar. Fungsi pendinginan intercooler adalah untuk meningkatkan kerapatan molekul udara, sehingga jumlah dan kualitas udara yang masuk ke ruang bakar menjadi lebih baik.



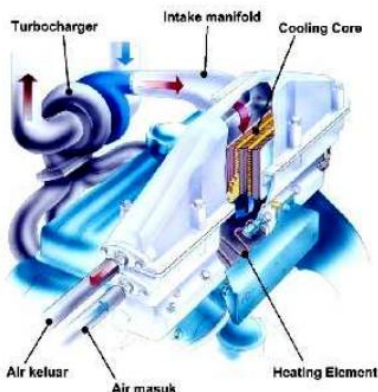
Gambar 4. Intercooler dan model kerjanya
Sumber: Teknologi Motor Bakar (2012)

Pada gambar 4 di atas, dijelaskan bahwa gas yang dihasilkan dari pembakaran menaikkan suhu udara yang dipompa oleh roda impeller menjadi sekitar 200°C, sementara udara yang dipompa oleh roda impeller mencapai suhu sekitar 700°C. Karena tekanan panas dari roda impeller, udara panas ini harus didinginkan sebelum masuk ke ruang pembakaran untuk meningkatkan kerapatan molekul udara. Hal ini sangat penting untuk memastikan perbandingan bahan bakar-udara tetap konsisten, sehingga daya hasil pembakaran tetap stabil setiap putaran mesin.

4. Pemanasan Awal (Pre Heating)

Sebelum udara masuk ke ruang bakar, komponen sistem pemasukan udara dipanaskan untuk mendukung proses pembakaran di dalam ruang bakar. Pemanasan awal bertujuan untuk mempermudah terjadinya pembakaran. Elemen pemanas yang digunakan dalam pemanasan awal ini dihubungkan dengan tegangan baterai 12V. Namun, tidak semua mesin menggunakan elemen pemanas sebagai sumber pemanas awal, penggunaan pemanas ini

bergantung pada suhu lingkungan, seperti pada daerah dengan suhu di bawah 0°C. Di daerah tropis, elemen pemanas tidak diperlukan.



Gambar 5. Pemanas awal pada sebuah mesin
Sumber: Teknologi Motor Bakar (2012)

1.2.3 Intercooler

Sistem pendingin (intercooler) merupakan komponen mesin diesel berbentuk kotak yang terletak di samping atau bawah kompresor turbocharger. Sistem ini menurunkan suhu udara pengisi atau udara tekan sebelum udara masuk ke dalam silinder dan terbuat dari lapisan plat tipis yang memanjang. (Djeli & Saidah, 2016).

Intercooler berfungsi untuk menurunkan suhu udara bertekanan yang dihasilkan oleh turbocharger, karena udara yang dikompresi akan mengalami peningkatan suhu. Pendinginan udara diperlukan karena semakin tinggi suhu udara, molekul oksigen akan semakin rapat. Suhu udara bilas sebelum memasuki intercooler biasanya berkisar antara 140-150°C, sedangkan setelah melewati intercooler, suhu udara turun menjadi sekitar 46-48°C. Energi panas yang terkandung dalam pipa intercooler akan diserap oleh udara panas dari turbocharger dan kemudian dikeluarkan bersama media pendingin. Prinsip kerja intercooler pada kapal adalah untuk mendinginkan udara bilas yang akan digunakan dalam proses pembakaran mesin utama yang disedot oleh turbocharger dari ruang mesin, demi kelancaran pembakaran mesin diesel. Intercooler umumnya memiliki desain seperti kisi-kisi atau mirip radiator mobil, yang berfungsi untuk memperlambat aliran udara bilas agar suhu udara meningkat. Air laut mendinginkan udara bilas yang masuk ke intercooler sebelum disedot kembali oleh saluran masuk sebagai sumber daya tambahan untuk mesin utama.

Intercooler dapat meningkatkan efisiensi sistem induksi dengan menurunkan suhu udara yang dihasilkan oleh supercharger atau turbocharger, sehingga mendukung proses pembakaran yang lebih efisien. Komponen ini bekerja untuk mengurangi panas yang timbul akibat proses kompresi (kenaikan suhu) saat tekanan atau densitas udara meningkat. Turbocharger dirancang untuk memasok lebih banyak massa udara ke ruang bakar dan intake manifold mesin. Proses intercooling diterapkan untuk mengatasi panas yang muncul akibat supercharging,

yang merupakan konsekuensi alami dari kompresi semi-adiabatik. Jika tekanan udara meningkat tanpa intercooling, udara masuk dapat menjadi terlalu panas, yang akan mengurangi efektivitas supercharging karena penurunan densitas udara. Selain itu, suhu udara masuk yang lebih tinggi dapat meningkatkan temperatur di dalam ruang bakar, sehingga berpotensi menyebabkan detonasi atau kerusakan panas pada blok mesin.

1. Macam-Macam Intercooler

Adapun jeni-jenis intercooler secara umum sebagai berikut:

a. Udara ke udara

Pada jenis intercooler udara ke udara sistem kerjanya memanfaatkan udara luar untuk mendinginkan udara panas turbocharger. Udara panas turbocharger dialirkan melalui pipa-pipa intercooler dan udara luar yang dingin menyerap panas dari udara panas di dalam pipa, sehingga membuat udara yang masuk ke ruang bakar lebih dingin dan padat.

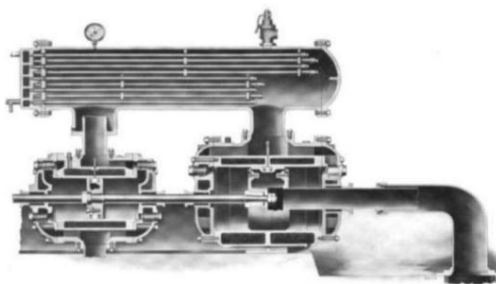


Gambar 6. Intercooler type udara ke udara

Sumber: <https://willycar.com/2009/03/03/macam-macam-intercooler-pada-turbocharge/>

b. Udara ke air

Pada jenis intercooler udara ke air sistem kerjanya menggunakan air untuk mendinginkan udara panas dari turbocharger. Udara panas dari turbocharger dialirkan melalui pipa-pipa intercooler dan air yang menyerap panas di dalam pipa, sehingga udara yang masuk ke ruang bakar menjadi lebih dingin dan padat.



Gambar 7. Intercooler type udara ke air

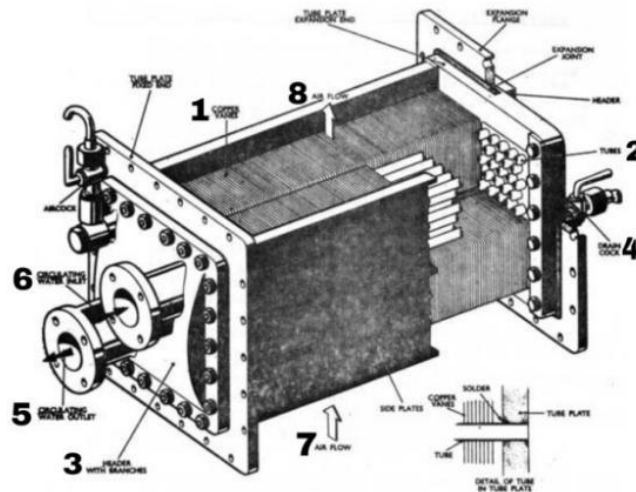
Sumber: <https://id.scribd.com/document/377130842/Intercooler-Assigment>

c. One shot

Pada jenis intercooler one shot sistem kerjanya menggunakan semprotan air atau nitrogen untuk mendinginkan udara panas turbocharger secara langsung, sehingga udara yang masuk ke ruang bakar lebih dingin dan padat.

2. Komponen Intercooler

Intercooler merupakan bagian penting dalam sistem turbocharger dan memainkan peran penting dalam meningkatkan performa dan efisiensi pada mesin. Dibalik fungsinya yang vital, terdapat beberapa komponen yang bekerja sama untuk mencapai kinerja yang optimal. Adapun bagian-bagian dari intercooler sebagai berikut:



Gambar 8. Komponen intercooler

Sumber: Diesel Engine (2011)

- 1) *Fins* (sirip) merupakan komponen yang berfungsi sebagai penyerap panas, terletak di sisi pipa-pipa yang dialiri oleh air laut.
- 2) *Pipe tubes* adalah pipa di dalam intercooler yang berfungsi sebagai jalur sirkulasi air laut sekaligus sebagai media untuk proses pendinginan.
- 3) *Header* adalah penutup pada bagian sisi air (water side) yang berfungsi sebagai pembatas antara saluran masuk (inlet) dan saluran keluar (outlet) air.
- 4) *Drain cock* terletak pada bagian penutup dan berfungsi sebagai katup untuk memeriksa kondisi dalam intercooler pada sisi air.
- 5) *Outlet water side* merupakan bagian keluaran air laut setelah digunakan dalam proses pendinginan atau penyerapan panas.
- 6) *Inlet water side* adalah bagian masukan air laut yang terhubung langsung dengan pipa dari pompa air laut.
- 7) *Air inlet* adalah sisi masukan udara yang terhubung dengan saluran udara dari sisi kompresor pada turbocharger.

- 8) *Air outlet* merupakan sisi keluaran udara setelah mengalami penurunan suhu, yang kemudian terhubung dengan udara scavenging.

Selain komponen utama pada intercooler, terdapat beberapa komponen yang sangat penting yang mempengaruhi kinerja sistem udara bilas (*scaving air system*), di antaranya adalah:

a) *Air Filter*

Di bagian masuknya udara kompresor, ada filter udara yang menyaring debu dan kotoran yang tersedot oleh turbocharger. Sebagai media pembakaran, udara yang telah disaring ini kemudian dialirkan ke setiap silinder. Jika debu atau kotoran masuk ke dalam silinder, mereka dapat menumpuk dan mengeras, menyebabkan kerak, yang dapat memengaruhi proses pembakaran dalam silinder jika dibiarkan terjadi.

b) *Fins*

Fins atau sirip terletak di sisi pipa tempat air laut mengalir dan dilewati oleh udara bertekanan tinggi dengan suhu tinggi. Air laut harus mengalir melalui sirip untuk menyerap panas.

c) *Sea Water Pump*

Sea water pump atau pompa air laut berperan memompa air laut dari ruang hisap (*sea chest*) menuju intercooler pada bagian sirip tabung (*fins tube*). Air laut kemudian bersirkulasi secara kontinyu sebagai fluida pendingin untuk mendinginkan udara masuk pada intercooler.

d) *Blower side*

Blower side pada turbocharger memiliki peran penting terhadap sistem udara bilas karena menghasilkan tekanan dan aliran udara yang mendorong udara melalui intercooler untuk mendinginkannya. Tekanan dan aliran udara yang optimal penting untuk memastikan efisiensi pendingin intercooler, sehingga suhu udara masuk ke ruang bakar menjadi lebih rendah dan meningkatkan performa mesin. Jika sisi blower bekerja dengan baik, maka sisi blower meningkatkan performa dan keseluruhan kinerja turbocharger.

3. Prinsip Kerja Intercooler

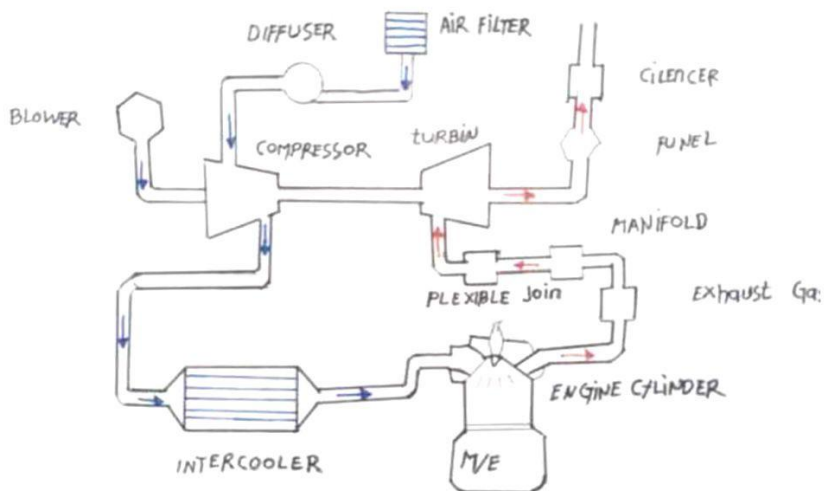
Mekanisme kerja intercooler udara melibatkan perpindahan panas antara udara panas dan pipa-pipa yang dialiri air pendingin, di mana panas tersebut diserap oleh air. Intercooler memiliki bentuk persegi panjang dan terletak di bagian bawah mesin turbo. Intercooler terdiri dari pipa-pipa utama berbahan kuningan yang memiliki sifat tahan panas dan korosi, serta dilengkapi sirip-sirip berbahan campuran aluminium. Struktur ini dirancang untuk mengoptimalkan aliran udara dan air pendingin yang melaluinya. Secara umum, intercooler mampu menurunkan suhu udara sebesar 5°C hingga 10°C, menghasilkan tekanan rata-rata sekitar 10 bar. Oleh karena itu, menjaga kebersihan sistem

udara tekan, mulai dari saringan turbocharger, intercooler, hingga saluran masuk ke silinder, menjadi hal yang sangat krusial (Sukoco dan Zainal, 2018).

Berdasarkan pendapat Nurdin Harahap (2014), udara yang masuk ke silinder melalui saluran masuk terlebih dahulu didinginkan di intercooler. Pendinginan ini bertujuan untuk meningkatkan kerapatan dan massa udara, sehingga jumlah molekul oksigen di dalam udara juga bertambah. Dengan peningkatan molekul oksigen, proses pembakaran menjadi lebih sempurna, yang berdampak pada peningkatan daya mesin. Pembakaran yang optimal memerlukan kandungan molekul oksigen yang tinggi. Proses ini menghasilkan tekanan udara yang masuk ke silinder lebih tinggi dibandingkan tekanan udara luar, sehingga tekanan rata-rata indikator dan daya indikator mesin meningkat. Akibatnya, daya mesin utama dapat meningkat sekitar 15-40%.

4. Cara Kerja Intercooler Mesin Utama Kapal

Intercooler pada kapal berfungsi untuk mendinginkan udara bilas yang digunakan untuk meningkatkan tenaga mesin. Sistem pendinginan pada intercooler menggunakan air laut sebagai media pendingin, dengan sistem pendinginan terbuka yang disedot oleh pompa pendingin air laut melalui sea chest. Air laut masuk melalui sea chest, beredar untuk mendinginkan, dan kemudian kembali ke laut. Berikut adalah cara kerja intercooler pada mesin utama kapal:



Gambar 9. Cara kerja intercooler

Sumber: (Sudarta, 2022)

- 1) Udara luar dikompresi, masuk melalui filter udara
- 2) Melalui kompresor, proses kompresi meningkatkan tekanan dan suhu udara
- 3) Udara panas masuk ke intercooler untuk didinginkan
- 4) Udara yang telah didinginkan mengalir ke dalam silinder mesin melalui saluran masuk (*intake manifold*).

- 5) Sisa gas buang dikeluarkan dari cylinder dan diarahkan ke turbin, dimanfaatkan untuk memutar turbin yang terhubung dengan kompresor
- 6) Setelah gas buang memutar turbin, sisa gas buang dikeluarkan melalui muffler knalpot.

5. Ruang Udara Bilas

Agar proses pembakaran berjalan secara optimal, ruang silinder mesin memerlukan tambahan aliran udara yang disesuaikan dengan tingkat aliran bahan bakar tertentu. Dengan meningkatkan konsentrasi udara sebelum masuk ke silinder, bahan bakar dapat terbakar sepenuhnya, menghasilkan daya mesin yang lebih besar. Oleh karena itu, mesin diesel yang dilengkapi turbo dirancang untuk memampatkan udara yang masuk ke dalam silinder, sehingga mampu menghasilkan tenaga yang lebih tinggi dibandingkan mesin lain dengan ukuran serupa (Karyanto, 2015).

Berdasarkan Jusak Johan Handayono (2015), sistem udara bilas mulai beroperasi saat torak berada sekitar 10% sebelum mencapai Titik Mati Bawah (TMB) dan berlanjut hingga 10% langkah torak setelah TMB. Udara bilas ini dihasilkan oleh blower yang digerakkan menggunakan energi dari gas buang turbo. Adapun fungsi utama dari sistem udara bilas adalah:

- 1) Mengeluarkan sisa gas hasil pembakaran dari dalam silinder setelah langkah kerja selesai.
- 2) Memasukkan udara segar yang kaya oksigen ke dalam silinder untuk mendukung pembakaran yang optimal.
- 3) Memastikan pasokan udara yang cukup agar tenaga mesin dapat ditingkatkan secara maksimal.
- 4) Memberikan pendinginan sementara pada piston, pegas piston, liner silinder, kepala silinder, serta komponen-komponen lainnya yang berhubungan.

6. Sistem Perawatan Intercooler

Perawatan intercooler perlu dilaksanakan dengan manajemen perawatan yang tepat dan efisien untuk memastikan kinerja optimal pada mesin utama kapal. Berdasarkan Wilda Krisna dan Mutaqin (2019), jenis perawatan yang dilakukan pada intercooler mesin utama kapal adalah sebagai berikut:

a. Perawatan Harian

Perawatan intercooler secara rutin dilakukan ketika kapal sedang berada di pelabuhan (mesin dalam keadaan mati). Langkah-langkah perawatan harian intercooler adalah sebagai berikut:

- 1) Memeriksa kondisi pipa-pipa yang terhubung dengan intercooler untuk memastikan tidak terdapat kebocoran.
- 2) Melakukan pemeriksaan terhadap potensi kebocoran pada deksel intercooler.
- 3) Memastikan baut-baut pengikat pondasi intercooler dalam kondisi kencang, serta mengencangkannya jika ditemukan kelonggaran.

- 4) Melakukan pengecekan terhadap sambungan-sambungan pipa untuk memastikan keamanannya.
- 5) Membersihkan deksel intercooler melalui proses scrapping, pemberian lapisan meni, dan aplikasi antifouling.

b. Perawatan Triwulan

Perawatan triwulan dilaksanakan setiap tiga bulan sekali dan wajib dilakukan secara teratur sesuai dengan jadwal kerja yang telah ditetapkan. Berikut ini adalah tahapan-tahapan yang harus diikuti dalam pelaksanaan pemeliharaan triwulan pada intercooler:

- 1) Lepaskan tutup intercooler untuk membersihkan sisa-sisa air laut yang ada.
- 2) Bersihkan cooler menggunakan rotan dengan diameter lebih kecil dari lubang pipa cooler secara bertahap, satu per satu. Periksa kondisi pipa untuk mendeteksi kerusakan atau sumbatan, tandai pipa yang bermasalah, atau tutup kedua ujung pipa yang rusak.
- 3) Utilisasi air tawar dengan tekanan sekitar 3 bar untuk menyemprot pipa-pipa yang telah dibersihkan, bertujuan untuk menghilangkan kerak atau kotoran yang masih menempel pada intercooler.
- 4) Lakukan penyemprotan lanjutan menggunakan udara bertekanan sekitar 5 bar.
- 5) Setelah seluruh proses selesai, pasang kembali tutup intercooler dengan memastikan pemasangan packing dilakukan dengan benar. Jika packing ditemukan rusak, gantilah dengan yang baru.

c. Perawatan *Half Year*

Perawatan *half year* dilakukan setiap enam bulan sekali dan wajib dilaksanakan sesuai jadwal kerja yang telah ditetapkan. Berikut ini adalah tahapan yang perlu dilakukan dalam perawatan setengah tahunan pada intercooler:

- 1) Buka penutup udara
- 2) Semprotkan bahan kimia pada sisi-sisi intercooler
- 3) Tutup saluran udara intercooler yang menuju ruang udara bilas menggunakan penutup khusus yang telah disediakan.
- 4) Pastikan penutup tersebut terpasang dengan rapat dan kedap air untuk mencegah kebocoran.
- 5) Pasang instalasi khusus yang dirancang untuk proses sirkulasi bahan pembersih.
- 6) Tambahkan bahan kimia pembersih khusus intercooler ke dalam sistem.
- 7) Rendam kisi-kisi intercooler dalam larutan bahan kimia tersebut selama satu malam sambil melakukan sirkulasi pada suhu sekitar $+700^{\circ}\text{C}$.
- 8) Lanjutkan proses sirkulasi bahan kimia selama 8 jam untuk memastikan pembersihan menyeluruh.
- 9) Setelah itu, bilas kisi-kisi dengan air sabun menggunakan sirkulasi udara bertekanan sekitar 5 bar.

- 10) Terakhir, semprotkan udara bertekanan +5 bar pada kisi-kisi intercooler untuk membersihkan sisa-sisa bahan kimia.

1.2.4 **Root Cause Analysis (RCA)**

Analisis Akar Penyebab (*Root Cause Analysis/RCA*) adalah metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab utama yang menyebabkan kegagalan suatu sistem atau peralatan. Tujuan utama dari RCA adalah untuk meningkatkan keandalan sistem, yang pada gilirannya dapat meningkatkan ketersediaan sistem tersebut. Setiap faktor penyebab kegagalan dianalisis dan dilaporkan untuk membantu menentukan langkah-langkah perbaikan guna mencegah terulangnya kegagalan serupa serta melindungi kesehatan, keselamatan, dan lingkungan.

Analisis Akar Penyebab (*Root Cause Analysis/RCA*) merupakan langkah penting dalam memahami secara mendalam "apa yang terjadi". Pendekatan ini dimulai dengan memahami peristiwa yang terjadi dan mengidentifikasi pertanyaan yang belum terjawab serta kekurangan informasi. Pengumpulan informasi dilakukan melalui wawancara dengan karyawan yang terlibat langsung atau tidak langsung, inspeksi di lokasi kejadian, serta observasi langsung. Informasi yang terkumpul kemudian digunakan untuk membangun pemahaman yang lebih jelas, yang menjadi dasar untuk menganalisis "mengapa" masalah tersebut terjadi.

1. Tahapan *Root Cause Analysis (RCA)*

Menurut Max Ammerman (1998) dalam bukunya *Root Cause Analysis*, ada beberapa langkah yang harus dilakukan terlebih dahulu sebelum melakukan analisis akar penyebab, yaitu sebagai berikut:

- a) Mengidentifikasi masalah
Dalam proses identifikasi masalah, penting untuk memperhatikan peristiwa yang menimbulkan dampak besar atau kerugian signifikan, sehingga perbaikan harus segera dilakukan.
- b) Menjelaskan apa yang terjadi
Pada tahap ini, peneliti melakukan analisis ulang dengan mengumpulkan data, informasi, dan fakta yang berkaitan dengan peristiwa tersebut untuk memahami masalah yang sesungguhnya.
- c) Mengidentifikasi faktor penyebab
Langkah ini bertujuan untuk menyelidiki lebih lanjut mengenai masalah yang terjadi serta alasan di balik terjadinya peristiwa tersebut. Untuk menentukan faktor penyebab, dapat digunakan Diagram Ishikawa atau Teknik Analisis Sebab dan Akibat (*Cause and Effect Analysis*) untuk menemukan penyebab dan konsekuensi dari suatu peristiwa risiko.
- d) Mengidentifikasi akar penyebab
Pada tahap ini, dilakukan analisis mendalam terhadap faktor-faktor yang menyebabkan masalah untuk menemukan akar penyebabnya. Hal ini bisa dilakukan dengan cara mengajukan pertanyaan "mengapa" berulang kali sampai ditemukan akar permasalahannya. Metode ini dikenal dengan

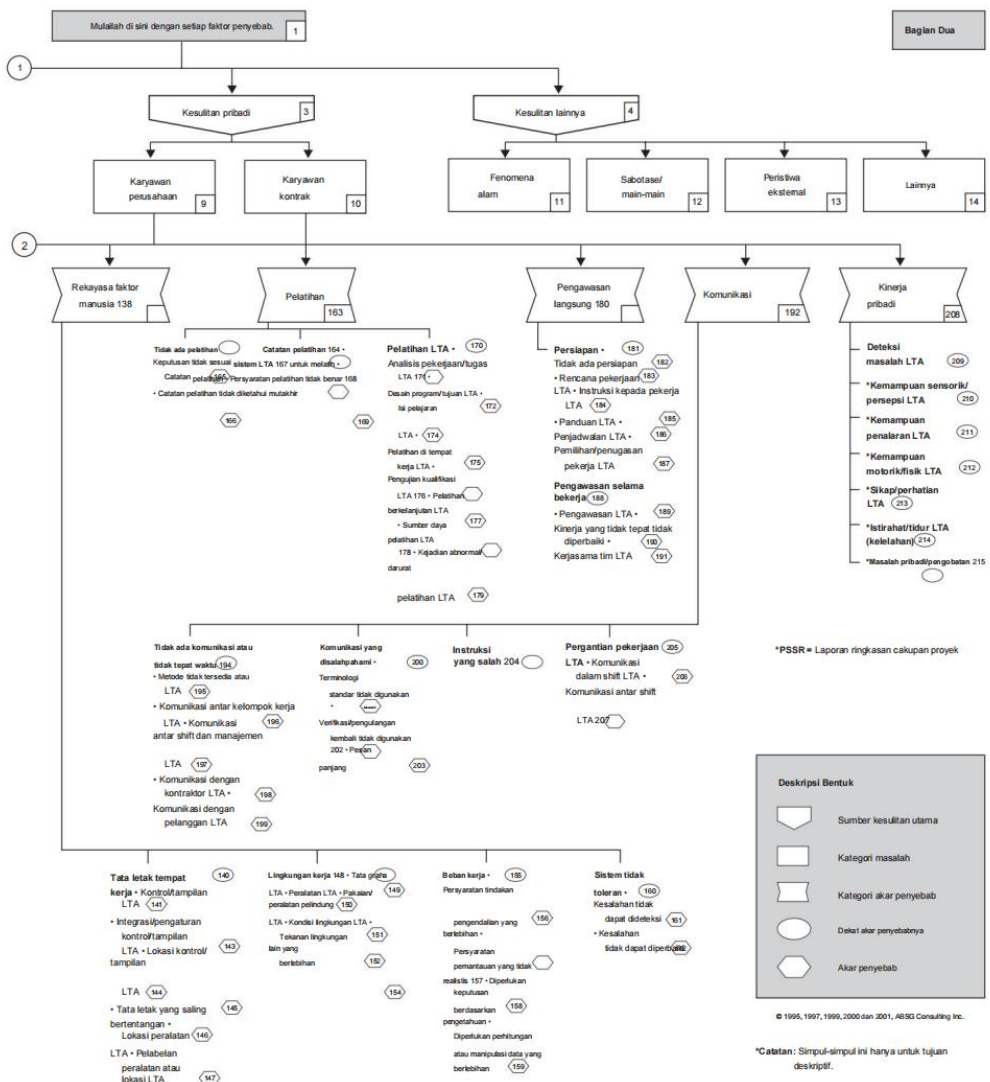
teknik *five why analysis*, kemudian dilanjutkan dengan membuat *root cause map* untuk mengorganisir masalah berdasarkan faktor penyebab.

e) Merancang dan menentukan rencana perbaikan

Tahap ini melibatkan perancangan dan penentuan langkah-langkah perbaikan untuk menyelesaikan masalah dan mencegah terulangnya masalah serupa di masa depan.

f) Mengukur hasil evaluasi perbaikan

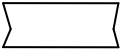
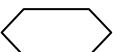
Tindakan perbaikan yang dilakukan untuk mengurangi atau menghilangkan penyebab utama masalah perlu dievaluasi untuk memastikan apakah langkah tersebut efektif dalam mencegah masalah yang sama terulang di masa depan.



Gambar 10. Contoh *root cause map*

Sumber: Rooney & Vanden, 2004

Tabel 1. Deskripsi bentuk simbol *root cause map*

Simbol	Keterangan
	Sumber kesulitan utama
	Kategori masalah
	Kategori akar penyebab
	Dekat akar penyebab
	Akar penyebab

Sumber: Rooney & Vanden, 2004

2. Kelebihan dan Kekurangan *Root Cause Analysis*

Menurut Alijoyo et al. (2021) terdapat kelebihan dan kekurangan pada *root cause analysis* yaitu:

a. Kelebihan

- 1) Mampu menggambarkan seluruh faktor penyebab terjadinya suatu peristiwa risiko.
- 2) Mampu menemukan faktor penyebab utama dari suatu peristiwa risiko.
- 3) Melibatkan pembahasan secara mendalam mengenai suatu peristiwa risiko dan memberikan pemahaman kepada tim secara keseluruhan.

b. Kekurangan

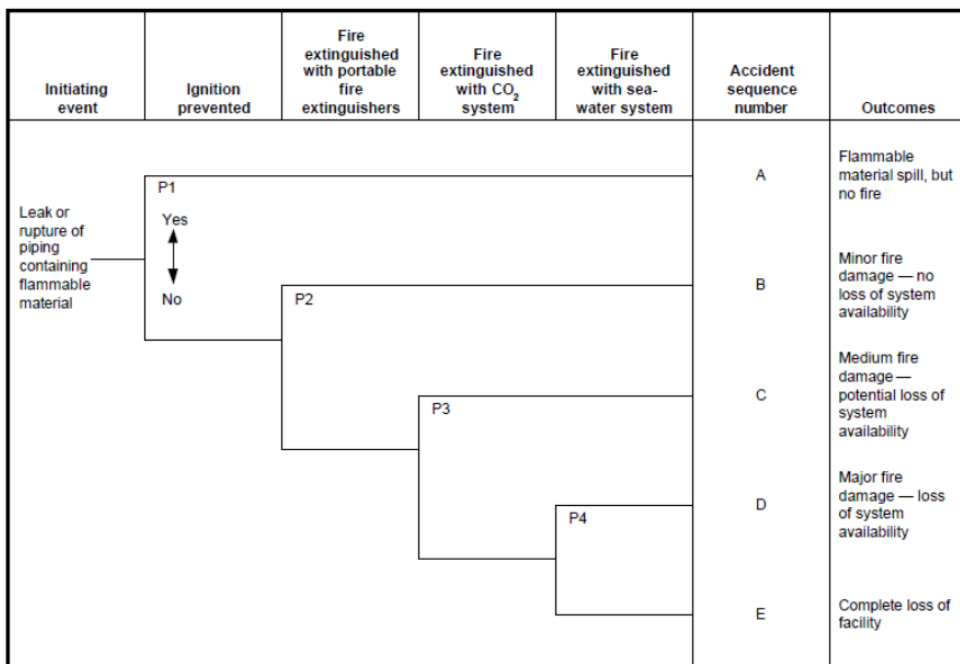
- 1) *Root cause analysis* membutuhkan waktu yang cukup lama.
- 2) Memerlukan perangkat tambahan untuk melaksanakan metode analisis akar penyebab, seperti sesi pemikiran bersama (*brainstorming*) atau analisis sebab-akibat.

1.2.5 *Event Tree Analysis (ETA)*

Menurut American Institute of Chemical Engineers (AIChE), *Event Tree Analysis (ETA)* adalah metode analisis risiko yang digunakan untuk memodelkan rangkaian peristiwa yang berhubungan dengan suatu kejadian. ETA bertujuan untuk mengevaluasi kemungkinan terjadinya suatu peristiwa serta dampak yang ditimbulkan. Tujuan dari *Event Tree Analysis (ETA)* adalah untuk menilai apakah peristiwa awal akan berkembang menjadi masalah yang lebih serius. Metode ini dapat menghasilkan berbagai kemungkinan hasil yang berbeda dari satu peristiwa inisiasi dan memungkinkan perhitungan probabilitas untuk setiap hasil tersebut. (Ericson, 2005).

Untuk memperkirakan jumlah kejadian yang mungkin terjadi setelah kejadian utama terjadi, langkah pertama dalam analisis menggunakan metode event tree analysis adalah memberikan deskripsi menyeluruh tentang bagian sistem yang terkait dengan kejadian utama yang diteliti. Semakin detail deskripsi

sistem yang diberikan, semakin banyak kejadian yang dapat diidentifikasi. Selanjutnya, diagram pohon peristiwa dibuat berdasarkan semua peristiwa yang telah diperkirakan. Pertanyaan dengan jawaban "ya" atau "tidak" digunakan untuk menggambarkan setiap peristiwa yang ditampilkan di diagram. Selanjutnya, kejadian terkait dipicu oleh jawaban tersebut, dan ini berlanjut hingga setiap cabang memiliki hasil akhir yang jelas. Pada langkah terakhir, kita perlu menghitung kemungkinan setiap hasil dari setiap kejadian yang ditunjukkan dalam diagram dan kemudian mengalikannya dengan nilai kemungkinan dari hasil dari kejadian lain yang berada dalam jalur konsekuensi yang sama..(Wibisono, 2021).



Gambar 11. Contoh konsep *Event Tree Analysis*

Sumber: Safi'i (2018)

1. Tahapan *Event Tree Analysis* (ETA)

Berdasarkan Safi'i (2018) Tahapan *Event Tree Analysis* adalah sebagai berikut:

- 1) Menentukan Sistem
Melakukan pemeriksaan terhadap sistem untuk menetapkan batasan, subsistem, serta antarmuka yang terkait.
- 2) Mengidentifikasi Bahaya Kegagalan
Melakukan analisis terhadap sistem atau penilaian bahaya untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin ada dalam sistem serta skenario kecelakaan yang dapat terjadi pada desain.
- 3) Menentukan Kejadian Awal
Memperbaiki analisis bahaya untuk mengidentifikasi kejadian awal (initiating event) yang menjadi pemicu dalam skenario kecelakaan.

- 4) Mengidentifikasi Kejadian *Pivotal*
Menentukan langkah-langkah mitigasi atau penghalang keamanan yang relevan dalam skenario tertentu untuk mencegah terjadinya kecelakaan.
- 5) Membangun Diagram *Event Tree*
Menyusun diagram event tree secara sistematis, dimulai dari kejadian awal dan kejadian pivotal, untuk menentukan hasil dari setiap jalur yang ada.
- 6) Menentukan Probabilitas Kegagalan
Menghitung atau memperoleh probabilitas kegagalan untuk kejadian pivotal pada diagram event tree dengan menggunakan metode analisis tambahan untuk menilai penyebab kegagalan dan menghitung probabilitas terjadinya kegagalan tersebut.
- 7) Mengidentifikasi Hasil pada Setiap Jalur
Melakukan perhitungan risiko untuk setiap hasil jalur dalam diagram *event tree*.
- 8) Menyusun Matriks Risiko
Mengelompokkan hasil risiko dari diagram *event tree* ke dalam matriks risiko berdasarkan frekuensi dan tingkat keparahan (*severity*) dari setiap keluaran.
- 9) Mendokumentasikan Hasil
Mencatat setiap langkah dalam analisis event tree untuk memastikan bahwa informasi yang diperoleh diperbarui dengan tepat dan terdokumentasi dengan rapi.

2. Kelebihan dan Kekurangan *Event Tree Analysis*

Dalam penerapan metode *Event Tree Analysis* (ETA), terdapat kelebihan dan kekurangan yang perlu diperhatikan. Berikut adalah penjelasan mengenai kelebihan dari metode ini:

a. Kelebihan

- 1) Mudah dipahami, dilaksanakan, dan diikuti.
- 2) Dapat digunakan secara efisien pada berbagai tingkat rincian dalam perancangan.
- 3) Sebagian besar tahapan proses dapat didukung dengan penggunaan perangkat komputer.
- 4) Dapat menggambarkan hubungan antara sistem yang kompleks dengan cara yang mudah dipahami.
- 5) Memungkinkan analisis terhadap jalur kesalahan yang melintasi batas-batas sistem. Mudah diterapkan pada berbagai jenis aktivitas dan sistem.
- 6) Mampu mengintegrasikan aspek perangkat lunak, lingkungan, dan interaksi manusia dalam proses analisisnya.
- 7) Tersedia perangkat lunak khusus untuk membantu pelaksanaannya.

b. Kekurangan

- 1) Diperlukan seorang analis yang memiliki pengalaman dan pelatihan khusus untuk memastikan bahwa pelaksanaan pekerjaan berjalan dengan baik dan tanpa kesalahan.
- 2) Metode ini hanya mampu menangani satu kejadian awal (*initiating event*), sehingga untuk mengevaluasi dampak dari beberapa kejadian awal, diperlukan metode tambahan yang digunakan dalam beberapa analisis pohon kejadian (*event tree analysis*).
- 3) Tidak dapat membedakan antara keberhasilan parsial dan kegagalan.
- 4) Sangat tergantung pada tingkat pengalaman pihak yang memberikan informasi.

1.2.6 Probabilitas

1. Probabilitas

Menurut Roberts & Haasl (1981) Percobaan acak dapat diartikan sebagai suatu pengamatan atau serangkaian pengamatan di mana hasil yang didapatkan tidak dapat diprediksi secara pasti, artinya hasilnya tidak dapat dipastikan sebelumnya. Sebuah hasil disebut deterministik jika semua hasil yang mungkin terjadi dalam pengamatan tersebut dapat dipastikan. Sebaliknya, hasil disebut non-deterministik jika hanya satu nilai probabilitas yang benar-benar terjadi.

Percobaan acak biasanya ditandai dengan pemberian label pada setiap hasil yang mungkin. Ini akan lebih mudah dilakukan jika jumlah hasil yang diperoleh tidak terlalu banyak. Notasi seperti E1, E2, E3, ..., En sering digunakan untuk menggambarkan semua kemungkinan hasil atau kejadian yang bisa terjadi dalam percobaan tersebut.

2. Frekuensi Relatif Pada Probabilitas

Menurut Roberts & Haasl (1981), percobaan acak yang menghasilkan berbagai hasil seperti E1, E2, E3, ..., En dilakukan dengan mengulang kejadian tersebut sebanyak N kali untuk mengamati frekuensi terjadinya kejadian tertentu, misalnya En. Setelah N kali pengulangan, jumlah kejadian E1 yang terjadi tercatat sebanyak N1 kali. Oleh karena itu, rasio $N1/N$ dapat digunakan sebagai perbandingan. Jika jumlah pengulangan N sangat besar, maka probabilitas kejadian tersebut dapat dihitung, kejadian E dapat dinyatakan dengan rumus berikut:

$$P(E1) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{N1}{N} \right) \quad (1)$$

Dimana:

$$0 < P(E1) < 1$$

Jika :

$P(E1) = 1$, maka kejadian khusus atau tertentu

$P(E1) = 0$, maka E1 adalah tidak mungkin

1.2.7 Uji Keabsahan Instrumen Penelitian

Instrumen atau alat ukur yang baik harus memenuhi dua kriteria utama, yaitu validitas dan reliabilitas. Tanpa validitas dan reliabilitas yang memadai, hasil

penelitian bisa jadi tidak akurat, sehingga kesimpulan yang diambil bisa keliru dan informasi yang diperoleh tidak dapat dipercaya. Oleh karena itu, instrumen yang digunakan dalam penelitian harus memiliki kedua kriteria tersebut agar data yang diperoleh dapat dipercaya dan sesuai dengan kenyataan. Dengan kata lain, validitas dan reliabilitas adalah syarat penting untuk menghasilkan penelitian yang tepat dan dapat diandalkan. Meskipun instrumen yang valid dan reliabel sangat mendukung penelitian yang berkualitas, faktor lain, seperti kondisi objek penelitian dan keterampilan peneliti dalam mengolah data, juga mempengaruhi hasil yang diperoleh.

1. Uji Validitas

Uji validitas adalah proses untuk menentukan apakah instrumen penelitian yang digunakan sesuai dan mampu mengukur hal yang seharusnya diukur. Dengan kata lain, uji ini bertujuan untuk memastikan bahwa instrumen tersebut mampu mengukur sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai.

a. Jenis -Jenis Validitas

Terdapat dua jenis utama uji validitas yaitu:

1) Uji validitas tes secara rasional (*Logical analysis*)

Validitas diuji melalui pendekatan logis dan analisis rasional. Sebuah instrumen penelitian dianggap memiliki validitas rasional apabila telah melalui analisis logis dan terbukti mampu secara akurat mengukur apa yang seharusnya diukur.

a) Validasi konstruk (*Construct Validity*)

Validitas konstruk adalah metode untuk memvalidasi instrumen dengan melibatkan penilaian dari para ahli (*Judgement expert*). Dengan kata lain, setelah instrumen disusun berdasarkan teori tertentu untuk mengukur aspek-aspek yang relevan, instrumen tersebut dievaluasi oleh para ahli untuk memastikan kesesuaiannya, instrumen tersebut kemudian dikonsultasikan dengan ahli untuk mendapatkan pendapat mereka mengenai kelayakan instrumen yang telah dibuat.

b) Validasi isi (*Content validity*)

Validitas instrumen ini berupa tes yang dapat diuji dengan cara membandingkan isi instrumen tersebut dengan materi yang sudah diajarkan.

2) Validitas tes secara empiris

Validitas empiris merupakan metode validasi yang didasarkan pada data yang diperoleh langsung dari lapangan. Sebuah instrumen penelitian dianggap memiliki validitas empiris jika analisis terhadap data lapangan menunjukkan bahwa instrumen tersebut mampu mengukur dengan akurat. Untuk memastikan bahwa instrumen tersebut benar-benar memiliki validitas empiris, perlu dilakukan peninjauan dari dua aspek berikut:

1) Validitas ramalan (*Predictive validity*)

Validitas ramalan merujuk pada sejauh mana sebuah alat ukur dalam penelitian dapat dengan tepat memprediksi hasil atau pencapaian di masa depan. Alat ukur tersebut dianggap memiliki validitas ramalan jika ada hubungan yang signifikan dan positif antara hasil pengukuran dengan kriteria yang telah ditentukan. Jika hubungan ini terbukti ada, maka validitas ramalan alat ukur tersebut dapat dikatakan terkonfirmasi, maka instrumen tersebut dinilai mampu membuat prediksi yang akurat, artinya apa yang diprediksi benar-benar terjadi dalam praktik nyata.

2) Validitas bandingan

Validitas bandingan adalah tingkat ketepatan suatu instrumen penelitian yang diukur berdasarkan hubungannya dengan kemampuan nyata yang saat ini dimiliki. Perbedaan utama antara validitas bandingan dan validitas ramalan terletak pada orientasi waktu, di mana validitas bandingan berfokus pada kondisi saat ini, sedangkan validitas ramalan berhubungan dengan prediksi di masa depan. Untuk mengukur validitas bandingan, analisis korelasi antara variabel x dan y dapat dilakukan. Jika hasil korelasi menunjukkan nilai yang positif dan signifikan, maka instrumen tersebut dapat dianggap valid dalam mengukur apa yang seharusnya diukur.

b. Validitas Perangkat Soal

1) Validitas empiris butir soal objektif

Perangkat soal terdiri dari beberapa item, dan keabsahan perangkat soal ditentukan oleh keabsahan masing-masing item soal. Perangkat soal dianggap sah jika semua item soal yang ada sah. Terdapat dua jenis keabsahan, yaitu keabsahan teoritis (yang mencakup keabsahan isi dan perilaku) serta keabsahan empiris.

Keabsahan empiris dari item soal dihitung menggunakan statistik korelasi. Untuk soal pilihan ganda, digunakan rumus korelasi point biserial, sementara untuk soal uraian digunakan rumus korelasi product moment. Rumus korelasi point biserial dipilih karena data yang dikorelasikan terdiri dari data nominal (skor item soal, yaitu 1 untuk jawaban benar dan 0 untuk jawaban salah) yang dibandingkan dengan data interval.

Rumus korelasi *point biserial*:

$$r_{pbi} = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_t}{s_t} \sqrt{\frac{p}{1-p}} \quad (2)$$

Dimana:

$\bar{x}_i$ = mean butir yang menjawab benar

$\bar{x}_t$ = mean skor total

S_t = simpangan baku total

p = proporsi yang menjawab benar

2) Validitas empiris butir soal uraian

Validitas butir soal uraian dapat dihitung dengan rumus product moment, yang mengukur hubungan antara skor butir soal dan skor total. Pemilihan rumus ini didasarkan pada kenyataan bahwa data yang digunakan berupa data interval yang memungkinkan dilakukan korelasi.

1) Rumus product moment dengan simpangan

$$r_{xy} = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad (3)$$

Dimana:

r_{xy} = koefisien korelasi antara variabel x dan y

$\sum xy$ = jumlah perkalian x dan y

x^2 = kuadrat dari x

y^2 = kuadrat dari y

2) Rumus *product moment* dengan angka kasar

$$r_{xy} = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \quad (4)$$

Dimana:

n = Banyaknya pasangan data x dan y

$\sum x$ = Total jumlah dari variabel x

$\sum y$ = Total jumlah variabel y

$\sum x^2$ = Kuadrat dari total jumlah variabel x

$\sum y^2$ = Kuadrat dari total jumlah variabel y

$\sum xy$ = Hasil perkalian dari total jumlah variabel x dan y

2. Uji Reliabilitas

Menilai konsistensi responden dalam menjawab pertanyaan kuesioner merupakan tujuan dari uji reliabilitas. Metode internal dan eksternal dapat digunakan untuk menguji ketergantungan instrumen penelitian. Pengujian internal dilakukan dengan menggunakan teknik tertentu untuk menguji konsistensi setiap item dalam instrumen. Sedangkan pengujian dapat dilakukan secara eksternal dengan pendekatan ekuivalen, metode test-retest (stabilitas), atau keduanya.

a. Test-retest

Instrumen diuji beberapa kali kepada responden yang sama untuk melakukan pengujian ini. Dalam hal ini pelaksanaannya dilakukan pada waktu yang berbeda, namun alat yang digunakan tetap sama. Koefisien korelasi *Pearson* antara temuan tes awal dan tes berikutnya digunakan untuk mengukur reliabilitas. Instrumen dikatakan dapat diandalkan apabila koefisien korelasinya menunjukkan nilai positif dan signifikan. Pengujian stabilitas adalah istilah umum untuk prosedur ini.

b. Ekuivalen

Instrumen ekuivalen adalah pernyataan yang berbeda tetapi memiliki makna yang sama dalam bahasa yang sama. Untuk menguji reliabilitas

instrumen, satu uji dilakukan dengan dua instrumen pada responden yang sama dengan instrumen yang berbeda. Data dari kedua instrumen dikorelasikan untuk menghitung reliabilitasnya. Ketika hasil korelasi menunjukkan hubungan yang positif dan signifikan, alat tersebut dapat dianggap dapat diandalkan.

c. Gabungan

Pengujian reliabilitas gabungan melibatkan pengujian data instrumen yang setara pada responden yang sama melalui beberapa kali percobaan. Pengujian pertama dan kedua menggabungkan pengujian, di mana reliabilitas dinilai dengan mengkorelasikan dua instrumen, dan pengujian berikutnya, di mana reliabilitas dinilai dengan mengkorelasikan dua instrumen secara silang. Setelah dua pengujian dilakukan pada waktu yang berbeda, enam koefisien reliabilitas akan dievaluasi. Apabila koefisien korelasi menunjukkan nilai yang positif dan signifikan, alat tersebut dapat dianggap *reliabel*.

d. *Internal Consistency*

Pengujian ini dilakukan dengan menguji instrumen satu kali kemudian menggunakan teknik tertentu untuk menganalisis data yang dihasilkan. Teknik yang dapat digunakan untuk menguji reliabilitas instrumen termasuk Anova Hoyt, KR-20, dan KR-21.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui penyebab terjadinya kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat dengan metode *root cause analysis*.
2. Mengetahui dampak kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat dengan metode *event tree analysis*.
3. Mengetahui upaya yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat.

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

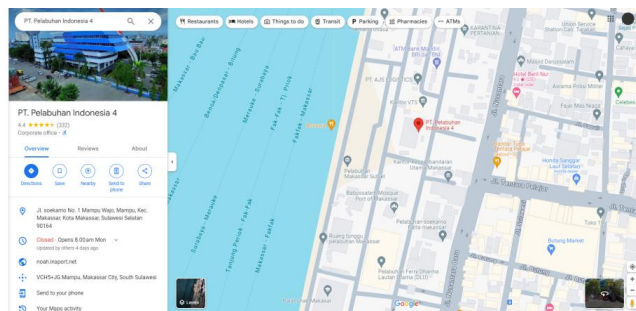
1. Dapat dijadikan acuan dan masukan oleh awak kapal mengenai kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat.
2. Memberikan informasi mengenai prioritas risiko permasalahan-permasalahan yang terjadi pada kegagalan intercooler mesin utama kapal tugboat.
3. Memberikan informasi mengenai penyebab, dampak, dan upaya dari permasalahan yang terjadi pada kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat.
4. Dapat dijadikan sebagai acuan atau perbandingan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

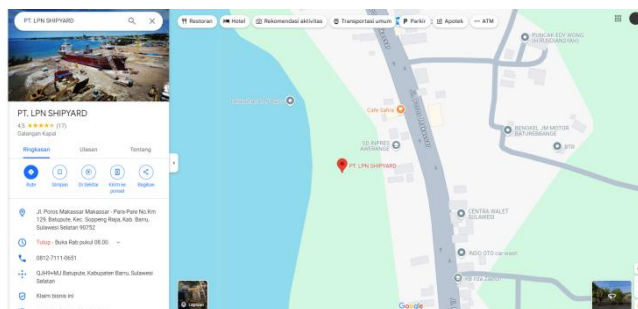
METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di dua tempat yaitu PT. Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional 4 Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan dan di PT. LPN Shipyard Kab. Barru, Provinsi Sulawesi Selatan. Objek penelitian ini adalah kapal tugboat yang terdapat pada lokasi penelitian. Pelaksanaan pengambilan data dilakukan pada bulan Juli – September 2024.



Gambar 12. Lokasi penelitian di PT. Pelabuhan Indonesia (Persero)
Sumber: Google maps



Gambar 13. Lokasi penelitian di PT. LPN Shipyard
Sumber: Google maps

2.2 Prosedur Penelitian

Untuk menyelesaikan masalah dalam penelitian ini, diperlukan proses penelitian yang terorganisir dengan baik, sehingga langkah-langkah yang sistematis menjadi hal yang penting. Berikut adalah tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini:

1. Studi Literatur

Sebagai sarana pengembangan wawasan dan melengkapi teori, maka dibutuhkan studi literatur untuk mendukung dalam penulisan tugas akhir ini dengan menggunakan referensi buku-buku, artikel jurnal, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan kegagalan yang terjadi pada

intercooler mesin utama kapal, metode *Root Cause Analysis*, dan metode *Event Tree Analysis*.

2. Studi Lapangan

Pada tahap ini dilakukan studi lapangan secara langsung dan juga wawancara dengan pihak awak kapal tugboat yang bertanggung jawab langsung dalam memelihara mesin utama kapal tugboat dengan mengidentifikasi kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat. Berikut pada gambar 16 merupakan proses wawancara bersama *crew engine department* kapal KT. Anoman VIII yang berada di Pelabuhan Indonesia (Pelindo).



Gambar 14. Proses wawancara langsung *crew engine department* kapal KT. Anoman VIII

Sumber : Dokumentasi lapangan

2.3 Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan cara studi lapangan yaitu mengadakan wawancara langsung dengan awak kapal yang bertanggung jawab dalam memelihara mesin utama kapal, berupa data kapal, data mesin utama, jenis pendinginan intercooler yang digunakan, cara kerja intercooler, dan bentuk kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat.

Pengumpulan data juga dilakukan dalam bentuk penyebaran kuesioner baik secara online maupun offline (langsung) dengan sasaran >30 responden yang bertanggung jawab langsung dalam pengoperasian dan perawatan mesin utama kapal tugboat atau pihak yang berpengalaman mengenai kegagalan – kegagalan yang terjadi pada intercooler mesin utama kapal tugboat. Tujuannya untuk menentukan probabilitas permasalahan yang terjadi pada kegagalan intercooler mesin utama berdasarkan data penyebab kegagalan intercooler pada kapal tugboat dengan memberikan nilai *frequency index* untuk frekuensi kejadian. Semakin banyak responden yang terlibat, maka semakin akurat hasil penelitian.

1. Data Kapal

Dalam penelitian ini kapal yang digunakan sebagai objek penelitian adalah kapal KT. Anoman VIII yang merupakan milik PT. Pelabuhan Indonesia (Persero) yang digunakan untuk menarik atau mendorong kapal

lain dalam proses sandar, berlayar keluar, atau memindahkan kapal seperti kapal tanker, kapal cargo, kapal container, dan kapal penumpang di wilayah pelabuhan. Berikut adalah data kapal yang digunakan sebagai objek penelitian :

- Nama Kapal : KT. Anoman VIII
- LOA : 30 m
- LBP : 27,84 m
- Lebar : 9,5 m
- Sarat : 3,5 m



Gambar 15. Kapal KT. Anoman VIII
Sumber : Dokumentasi lapangan

2. Data Mesin

Kapal KT. Anoman VIII menggunakan dua mesin utama yang terdapat pada sisi kanan dan kiri, berikut data mesin utama kapal KT. Anoman VIII:

- Merk : Caterpillar
- Type : C32 Acer
- Daya : 2 x 1000 Hp
- : 2 x 746 kW
- Rpm : 1800



Gambar 16. Mesin utama kapal KT. Anoman VIII
Sumber : Dokumentasi lapangan

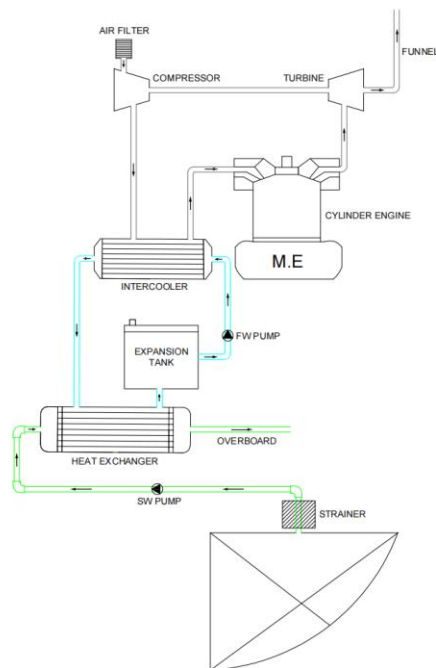
3. Data penyebab kegagalan intercooler

Dari hasil wawancara langsung yang dilakukan didapatkan beberapa bentuk kegagalan intercooler pada mesin utama kapal tugboat sebagai berikut:

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 (<i>Air filter</i>) 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

4. Skema kerja intercooler kapal KT. Anoman VII



Gambar 17. Skema kerja intercooler kapal KT. Anoman VIII

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

- 1) Udara luar dikompresi, masuk melalui *air filter*
- 2) Menuju compressor hingga terjadi peningkatan tekanan dan suhu udara
- 3) 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
- 4) Udara yang telah dingin akan masuk ke *engine cylinder* melalui *intake manifold*
- 5) Sisa gas buang akan keluar melalui cylinder dan diarahkan menuju ke turbin, dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan compressor

- 6) Setelah gas buang memutar turbin, sisa gas buang dikeluarkan melalui *funnel*

2.4 Analisis Data

Adapun langkah-langkah dari pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.4.1 Root Cause Analysis ((RCA)

Adapun langkah-langkah dalam analisis menggunakan metode *Root Cause Analysis* adalah sebagai berikut:

1. **Identifikasi Peristiwa Risiko:** Menemukan dan memahami berbagai kemungkinan kejadian yang dapat menyebabkan kegagalan intercooler mesin utama kapal misalnya kerusakan komponen, kesalahan manusia, faktor desain, dan lain-lain.
2. **Menjelaskan Apa yang Terjadi:** Mengumpulkan data, informasi, dan fakta mengenai kegagalan intercooler mesin utama kapal dengan melakukan wawancara langsung kepada awak kapal yang bertanggung jawab langsung dalam memelihara mesin utama kapal.
3. **Mengidentifikasi Faktor Penyebab:** Sebelum mengidentifikasi akar penyebab dari kegagalan intercooler. Peneliti harus menganalisis faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan intercooler mesin utama kapal misalnya kurangnya perawatan pada intercooler, kotoran dan kontaminasi, kesalahan operasional dan lain sebagainya.
4. **Mengidentifikasi Akar Penyebab:** Melakukan analisis *5-why* untuk mendapatkan pemahaman awal tentang akar penyebab masalah pada kegagalan intercooler mesin utama kapal dan dilanjutkan membuat *root cause map* berdasarkan hasil analisis *5-why* untuk menggali lebih dalam dan mengidentifikasi semua kemungkinan penyebab.
5. **Merancang dan Menentukan Rencana Perbaikan:** Setelah mengetahui akar penyebab dari kegagalan intercooler mesin utama kapal, selanjutnya peneliti melakukan analisis mengenai tindakan perbaikan yang efektif untuk mengurangi dan mencegah terjadinya kegagalan intercooler pada mesin utama.
6. **Menentukan probabilitas masalah:** tahap akhir dari metode *root cause analysis* adalah menentukan probabilitas tiap masing-masing penyebab kegagalan intercooler pada mesin utama kapal dengan cara meminta pendapat atau melakukan penyebaran kuesioner kepada *crew engine department* kapal tugboat atau yang berpengalaman di bidangnya untuk mengetahui probabilitas tiap masing-masing penyebab yang nantinya akan digunakan dalam diagram *event tree analysis*.

2.4.2 Event Tree Analysis (ETA)

Setelah mengetahui penyebab dari kegagalan intercooler pada mesin utama kapal lanjut untuk menganalisis dampak dari kegagalan tersebut menggunakan metode *Event Tree Analysis*. Langkah-langkah dalam metode *Event*

Tree Analysis (ETA) meliputi pembuatan diagram untuk menyusun *initiating event*, *pivotal event*, dan keluaran. Selanjutnya, hasil dari analisis *event tree* ditentukan berdasarkan nilai *frequency index* pada Tabel 3 dan *severity index* pada Tabel 4, yang kemudian diklasifikasikan ke dalam matriks risiko pada Tabel 6. Setiap indeks tersebut harus disesuaikan dengan standar Det Norske Veritas (DNV).

Untuk menentukan konsekuensi (*output*) dilakukan berdasarkan pada Tabel 5 dengan wawancara dan menyebar kuesioner untuk meminta pendapat para ahli atau yang berpengalaman mengenai probabilitas dari nilai *pivotal event* pada diagram *event tree analysis*. Adapun langkah-langkah dalam analisis menggunakan metode ETA adalah sebagai berikut:

1. **Menentukan Sistem atau Kegiatan yang Relevan**
Pilih sistem atau aktivitas yang akan dianalisis menggunakan pohon kejadian berdasarkan relevansi dan tingkat kepentingannya.
2. **Mengidentifikasi Peristiwa Pemicu yang Signifikan**
Lakukan penilaian risiko untuk menemukan peristiwa awal yang dianggap penting untuk dialami dalam analisis.
3. **Mengidentifikasi Peristiwa Kunci**
Identifikasi peristiwa kunci yang bertujuan memberikan perlindungan melalui berbagai lapisan jaminan. Lapisan ini mencakup sistem teknis dan intervensi manusia untuk mengurangi dampak peristiwa awal.
4. **Menyusun Diagram Pohon Kejadian**
Setelah mendefinisikan peristiwa kunci, susun diagram analisis pohon kejadian sebagai kerangka visual.
5. **Memasukkan Nilai Probabilitas**
Input nilai probabilitas berdasarkan data yang diperoleh melalui kuesioner dan wawancara.
6. **Melakukan Evaluasi Analisis Pohon Kejadian**
Evaluasi hasil analisis pohon kejadian dengan menggunakan masukan dari pakar melalui kuesioner. Jika hasil evaluasi tidak sesuai, revisi dan susun ulang diagram berdasarkan koreksi yang diberikan.

Tabel 3. *Frequency Index* (FI) 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

Sumber: (DNV/Marine Risk Assessment, 2002)

Tabel 4. *Severity Index (SI) untuk risk matrix*

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

Sumber: (DNV/Marine Risk Assessment, 2002)

Tabel 5. *Probability rating criteria*

Skor	Deskripsi	Definisi
0,05	Very Negligible	Tidak pernah terjadi
0,2	Negligible	Tidak mungkin terjadi
0,4	Significant	Terkadang terjadi
0,6	Critical	Sering Terjadi
0,8	Very Critical	Selalu Terjadi

Sumber : (Heldman,2005)

Tabel 6. *Risk matrix*

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

Sumber: (DNV/Marine Risk Assessment, 2002)

Pada tabel 6 di atas, hasil dari analisis *event tree* dapat diklasifikasikan dan diubah menjadi *risk matrix* menggunakan rumus *Risk Index (RI)* sebagai berikut:

$$RI = FI + SI$$

Keterangan:

RI : *Risk Matrix*

FI : *Frequency Index*

SI : *Severity Index*

2-4 *Low*, 5-7 *Moderate*, 8-9 *High*

2.4.3 Uji Keabsahan Instrumen Penelitian

1. Uji Validitas

Menurut Masrun (1979), pendekatan korelasi dianggap sebagai yang terbaik untuk menentukan validitas suatu item dan masih digunakan paling sering hingga saat ini. Item dengan korelasi yang tinggi dan skor total yang positif menunjukkan validitas yang baik.

Metode Pearson Product-Moment adalah pengujian validitas yang paling banyak digunakan. Metode ini menggunakan nilai r hitung, yang kemudian dibandingkan dengan r tabel dengan menggunakan derajat kebebasan (df) = $n-2$ atau langsung berdasarkan jumlah sampel (N). Selanjutnya, tingkat signifikansi dihitung menjadi 5% atau 0,05. Untuk mengevaluasi validitas setiap item kuesioner, r hitung dibandingkan dengan r tabel, di mana nilai r tabel didasarkan pada jumlah responden (n). Item dinyatakan valid jika nilai r hitung lebih besar dari r tabel, dan jika nilai r hitung lebih rendah dari r tabel, item tersebut dianggap tidak valid. Selanjutnya, pengujian signifikansi (Sig-2-tailed) dilakukan. Nilai signifikansi item dianggap valid jika kurang dari 0,05, dan tidak valid jika lebih dari 0,05.

2. Uji Reliabilitas

Metode *Alpha Cronbach* digunakan untuk menguji reliabilitas instrumen, nilai α sebesar 0,70 dianggap sebagai batas yang umum diterima nilai α yang lebih tinggi daripada hasil output menunjukkan bahwa instrumen tersebut *reliabel*, sedangkan nilai α yang lebih rendah menunjukkan bahwa instrumen tersebut tidak reliabel.

Rumus *Alpha Cronbach*:

$$r = \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(1 - \frac{\sum \sigma_t^2}{\sigma_t^2} \right)$$

(5)

Dimana:

r = Reliabilitas yang dicari

n = Jumlah item pertanyaan yang diuji

$\sum \sigma_t^2$ = Jumlah varians skor tiap-tiap item

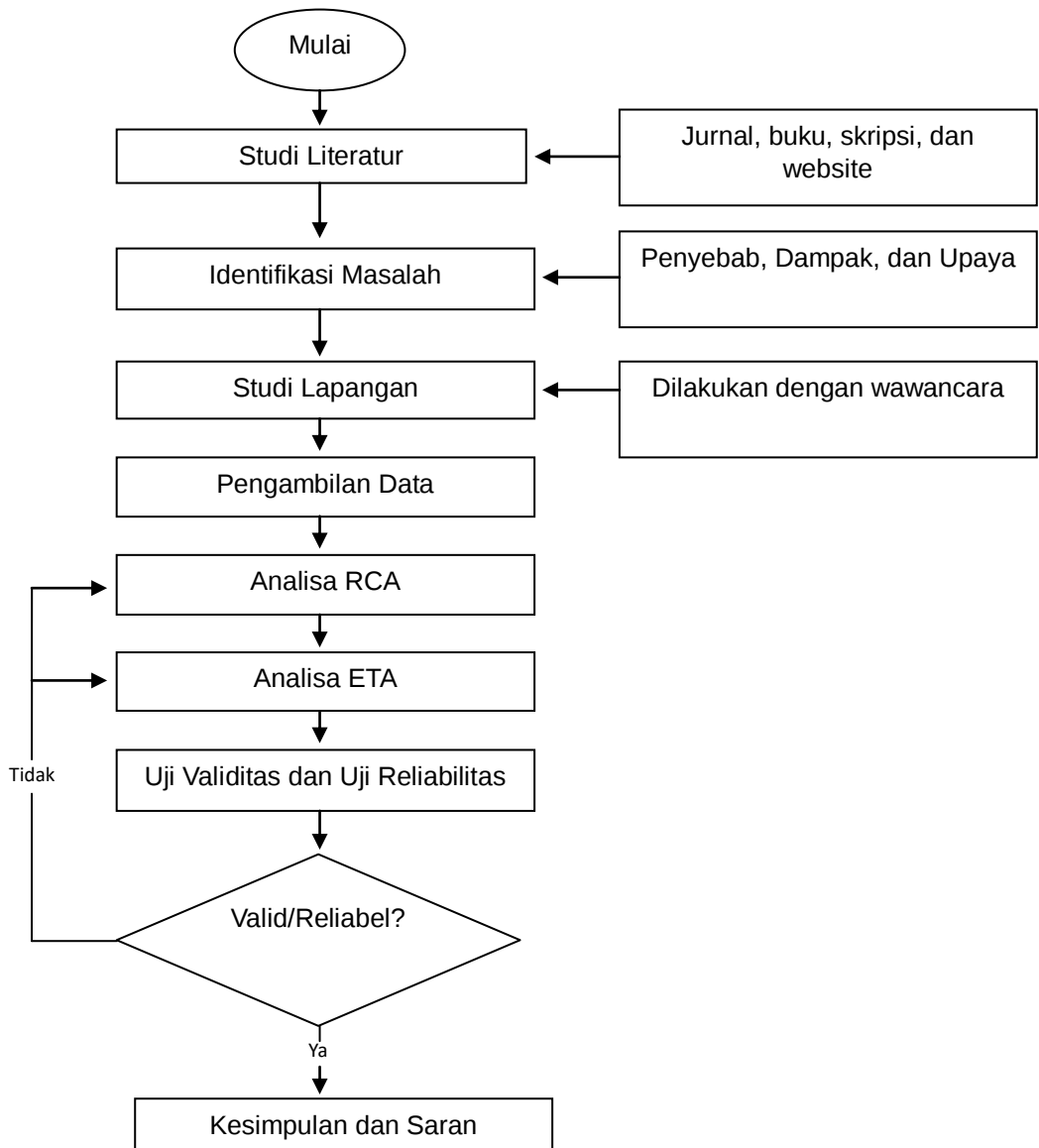
σ_t^2 = Varians total

Apabila nilai $\alpha > 0,70$, berarti reliabilitas mencukup (*sufficient reliability*). $\alpha > 0,80$ berarti semua item reliabel dan semua tes secara konsisten mempunyai reliabilitas yang kuat. Dan apabila $\alpha > 0,90$ berarti reliabilitas sempurna. α 0,70-0,90 berarti memiliki reliabilitas tinggi. Jika 0,50-0,70 berarti memiliki reliabilitas yang lemah, berarti $\alpha <$

0,50 memiliki reliabilitas rendah maka memungkinkan satu atau beberapa item tidak reliabel.

2.5 Kerangka Alur Penelitian

Adapun alur dalam penelitian ini dari dimulainya penelitian sampai akhir dari penelitian yang digambarkan melalui flowchart penelitian sebagai berikut:



Gambar 18. Kerangka alur penelitian