

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Human Error

#### 2.1.1 Definisi Human Error

*(Human error)* Kesalahan manusia sering kali dinyatakan sebagai faktor utama penyebab terjadinya suatu kecelakaan. Bagi masyarakat umum, berita-berita tentang kecelakaan transportasi dengan kesalahan manusia sebagai penyebabnya sering diartikan sebagai kesalahan manusia operator sistem seperti masinis, kapten kapal, dan awak kapal lainnya. Persepsi ini sebenarnya kurang tepat, mengingat banyak faktor dan aspek lain yang dapat secara langsung maupun tidak mendorong seorang operator melakukan tindakan yang tidak tepat.

Error sendiri secara umum didefinisikan sebagai suatu kondisi atau situasi di mana terjadi penyimpangan antara tindakan atau hasil aktual dengan tindakan atau hasil yang seharusnya atau yang diharapkan. Dalam konteks yang lebih luas, error mencerminkan suatu bentuk kegagalan dalam sistem, prosedur, atau pengambilan keputusan yang dapat menimbulkan konsekuensi negatif terhadap kinerja, keselamatan, atau keberlanjutan suatu proses. Error dapat terjadi akibat kesalahan manusia (*human error*), kerusakan atau kegagalan teknis, kesalahan prosedural, ataupun kombinasi dari berbagai faktor.

Dalam ranah keselamatan kerja dan operasional di industri pelayaran, khususnya pada kapal tunda dan tongkang (*tug and barge*), error menjadi salah satu penyebab utama terjadinya kecelakaan atau insiden di laut. Error dalam konteks ini tidak hanya terbatas pada tindakan individu, melainkan juga dapat mencakup kesalahan dalam perencanaan, pelatihan, komunikasi, penggunaan peralatan, serta penerapan kebijakan keselamatan yang tidak efektif. Misalnya, kelalaian dalam memantau cuaca sebelum pelayaran, komunikasi yang tidak jelas antara nakhoda dan ABK (anak

buah kapal), atau prosedur tambat-muat yang tidak sesuai standar, semuanya dapat dikategorikan sebagai bentuk error.

Kesalahan yang disebabkan oleh faktor manusia kerap kali berhubungan dengan aktivitas kerja yang dilakukan secara berulang (repetitive work), di mana tingkat kesalahan yang mungkin terjadi mencapai 1% (Sutalaksana et al., 1979). Pekerjaan yang bersifat monoton dan berulang dapat meningkatkan peluang terjadinya kesalahan, sehingga penting untuk mengantisipasi dan meminimalkan dampaknya. Tujuannya adalah untuk meningkatkan keandalan dan konsistensi kinerja seseorang dengan menurunkan tingkat kesalahan yang mungkin timbul. Oleh karena itu, perbaikan terhadap performa manusia menjadi sangat penting guna mengurangi kemungkinan terjadinya error. Tingkat kesalahan sebesar 1 dalam 100 menunjukkan probabilitas sebesar 1%, dan bila hal ini masih dalam batas tersebut, maka sistem atau kondisi kerja masih dianggap berada dalam batas normal atau layak.

Secara umum, error dapat diartikan sebagai kegagalan dalam melakukan tindakan yang tepat dan diharapkan dalam situasi tertentu. Kesalahan ini terjadi bukan karena ketidaktahuan, melainkan karena perhatian yang telah diberikan ternyata tidak menghasilkan tindakan akhir yang sesuai dengan harapan. Dengan demikian, error menghasilkan suatu kejadian atau konsekuensi yang dapat diamati. Kesalahan ini tidak selalu berdampak buruk atau fatal, namun tetap merupakan bentuk deviasi dari prosedur yang benar. Sementara itu, kecelakaan didefinisikan sebagai suatu kejadian yang tidak direncanakan dan tidak diharapkan terjadi, serta biasanya berdampak negatif terhadap sistem atau individu yang terlibat. Error sendiri termasuk dalam ranah psikologis karena dipengaruhi oleh aspek-aspek kejiwaan, sehingga tidak semua error dapat teridentifikasi secara langsung atau keseluruhan

### 2.1.2 Klasifikasi Human Error

Pada hakikatnya, terdapat suatu klasifikasi mengenai kesalahan manusia (*human error*) yang bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab terjadinya kesalahan tersebut. Klasifikasi ini secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga golongan berdasarkan sumber utama kesalahan, yaitu sebagai berikut:

1. *Sistem Induced Human Error.*

Jenis kesalahan ini terjadi karena adanya kondisi atau mekanisme sistem kerja yang memungkinkan seorang individu melakukan kesalahan. Contohnya ialah ketika manajemen tidak memberlakukan pengawasan dan disiplin secara konsisten dan ketat, sehingga menciptakan lingkungan kerja yang rentan terhadap kesalahan.

2. *Desain Induced Human Error.*

Kesalahan semacam ini muncul akibat desain atau rancangan sistem kerja yang kurang tepat dan tidak memperhatikan prinsip ergonomi. Sesuai dengan hukum Murphy (*Murphy's Law*), jika suatu alat atau sistem dirancang tidak sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan pengguna, maka akan muncul potensi kesalahan dalam penggunaannya, dan pada akhirnya pasti terjadi, baik cepat maupun lambat.

3. *Pure Human Error.*

Jenis kesalahan ini sepenuhnya bersumber dari dalam diri manusia itu sendiri. Faktor-faktor seperti tingkat keterampilan (*skill*), pengalaman, kondisi psikologis, kelelahan, hingga motivasi dapat menyebabkan seseorang melakukan kesalahan meskipun sistem dan lingkungan sudah mendukung.

(Sutalaksana et al., 1979).

### 2.1.3 Penyebab Human Error

Kesalahan yang dilakukan oleh manusia (*human error*) dapat dikategorikan ke dalam beberapa jenis berdasarkan sumber utama penyebabnya. Klasifikasi ini membantu dalam memahami akar masalah sekaligus merancang strategi pencegahan yang lebih efektif. Secara umum, penyebab kesalahan manusia terbagi menjadi tiga kelompok utama:

#### 1. Sebab-Sebab Primer

Sebab-sebab primer pada human error mengacu pada faktor-faktor internal individu yang secara langsung berkontribusi terhadap terjadinya kesalahan. Jenis penyebab ini biasanya berasal dari ketidaksiapan personal dalam menjalankan tugas sesuai standar prosedur yang berlaku. Beberapa elemen penting dalam kelompok ini mencakup: kurangnya keterampilan teknis, rendahnya tingkat pengalaman kerja, kelelahan fisik, gangguan psikologis, kurangnya pemahaman terhadap prosedur kerja, serta kemampuan kognitif yang terbatas.

Menurut (Mark S. Sanders & Ernest J. McCormick, 1993), human error dapat dipahami sebagai keputusan atau perilaku yang menyimpang dari standar sistem atau prosedur yang telah ditetapkan, sehingga menurunkan efektivitas, keselamatan, dan performa kerja. Dalam hal ini, individu menjadi titik pusat dari kesalahan karena kegagalan untuk bertindak secara akurat dalam konteks yang membutuhkan ketelitian dan konsentrasi tinggi. (Elisabeth Siahaan, 2017) menegaskan bahwa kesalahan pada tingkat ini sering kali muncul akibat lemahnya sistem seleksi personil dan kurangnya pelatihan teknis yang berkelanjutan. Hal ini diperkuat oleh penelitian yang menunjukkan bahwa proses seleksi tenaga kerja dan efektivitas pelatihan memiliki pengaruh signifikan dalam menurunkan tingkat human error hingga 40,4%.

Selain itu, (G.A. Peters, 2011) menyoroti pentingnya kesiapan psikologis dalam mencegah kesalahan kerja. Pekerja yang mengalami stres berkepanjangan atau tekanan emosional cenderung lebih rentan melakukan kesalahan dibandingkan mereka yang memiliki stabilitas emosional yang baik. Oleh karena itu, strategi pencegahan yang hanya berfokus pada keterampilan teknis tanpa mempertimbangkan faktor mental dan emosional individu sering kali tidak efektif dalam menekan angka kesalahan.

Pendekatan individual untuk mengatasi penyebab primer human error meliputi penyempurnaan sistem pendidikan dan pelatihan berbasis kompetensi, pengembangan kemampuan soft skill seperti manajemen stres dan komunikasi efektif, serta implementasi sistem rekrutmen berbasis psikometri dan uji performa nyata. Dengan demikian, upaya pencegahan tidak hanya terfokus pada aspek teknis tetapi juga mencakup dimensi psikologis dan perilaku individu.

Namun demikian, penting untuk dicatat bahwa pendekatan ini memiliki keterbatasan, khususnya dalam mengatasi kesalahan yang bersifat disengaja seperti tindakan manipulatif atau penipuan. Untuk kasus semacam ini, diperlukan sistem pengawasan internal dan etika kerja yang kuat agar dapat mengurangi celah terjadinya pelanggaran.

Secara keseluruhan, penyebab primer pada human error merupakan bagian fundamental dalam analisis keselamatan kerja. Pemahaman yang mendalam terhadap aspek-aspek ini akan membantu organisasi dalam merancang sistem kerja yang lebih adaptif, aman, dan mampu meminimalkan kesalahan yang bersumber dari faktor individu.

## 2. Sebab-Sebab Manajerial

Pandangan konvensional yang menempatkan kesalahan sepenuhnya pada individu pelaksana telah mengalami pergeseran paradigma

dalam ilmu manajemen risiko dan keselamatan kerja. Dalam praktik organisasi modern, terutama pada sektor-sektor berisiko tinggi seperti industri penerbangan, maritim, kesehatan, dan energi, kesalahan manusia sering kali dipandang sebagai produk dari sistem organisasi yang tidak memadai. Dengan kata lain, kesalahan manusia kerap kali merupakan konsekuensi dari keputusan manajerial yang buruk, perencanaan yang tidak efektif, atau ketidakteraturan dalam desain sistem kerja.

Menurut (Elisabeth Siahaan, 2017), meskipun pelatihan dan seleksi dapat menurunkan tingkat human error secara signifikan, kegagalan sistemik dari pihak manajemen dalam menyediakan prosedur kerja yang jelas, pengawasan yang konsisten, serta alokasi tugas yang proporsional menjadi faktor penyebab kesalahan yang tidak kalah penting. Kesalahan semacam ini dikenal sebagai latent errors atau organizational errors, yang bersifat sistemik dan biasanya tidak langsung terlihat di lapangan, namun memiliki dampak akumulatif terhadap probabilitas terjadinya kesalahan operasional.

(Rooney et al., 2002) menegaskan bahwa dalam banyak kasus insiden kritis, investigasi lebih lanjut menunjukkan bahwa akar masalah bukan hanya pada kesalahan teknis di lapangan, melainkan pada lemahnya kebijakan, komunikasi internal, serta tidak tersedianya panduan kerja yang terstandar dari manajemen puncak. Hal ini juga diperkuat oleh (G.A. Peters, 2011) yang menyatakan bahwa kurangnya keterlibatan manajemen dalam merancang, mengevaluasi, dan menegakkan sistem mutu pelayanan adalah salah satu bentuk kelalaian struktural yang berpotensi memicu kesalahan kerja.

Kegagalan manajerial dapat tercermin dalam berbagai bentuk, antara lain:

- Tidak adanya prosedur operasional standar (SOP) yang

terdokumentasi dan disosialisasikan.

- Penugasan kerja yang tidak seimbang dan melebihi kapasitas personil.
- Ketidaktepatan dalam penempatan pegawai berdasarkan kompetensinya.
- Kurangnya pengawasan dan tindak lanjut terhadap kesalahan yang telah terjadi.
- Sistem pelaporan insiden yang tidak mendukung budaya belajar dari kesalahan (*learning from failures*).

Dalam kerangka ini, tanggung jawab utama manajemen adalah menciptakan lingkungan kerja yang mendukung pengambilan keputusan yang aman, adil, dan berbasis sistem. Hal ini mencakup penyediaan sumber daya yang cukup (manusia, alat, waktu), supervisi yang adil, serta pembentukan budaya organisasi yang proaktif terhadap keselamatan kerja.

Oleh karena itu, untuk mencegah kesalahan yang bersifat manajerial, diperlukan komitmen dari pimpinan organisasi untuk menerapkan prinsip-prinsip manajemen risiko secara menyeluruh. Hal ini termasuk evaluasi berkala terhadap sistem operasional, audit internal, pelatihan manajerial, dan penerapan sistem pelaporan insiden tanpa hukuman (*just culture*). Dalam konteks ini, human error bukanlah akhir dari investigasi, melainkan awal dari perbaikan sistemik.

### 3. Sebab-Sebab Global

Kategori ini mencakup berbagai faktor eksternal yang berada di luar kendali langsung baik individu maupun manajemen organisasi. Faktor-faktor tersebut meliputi tekanan ekonomi makro, keterbatasan waktu proyek, norma-norma sosial yang berlaku, hingga pengaruh budaya organisasi yang dominan. Meskipun tidak sepenuhnya dapat dikendalikan, elemen-elemen ini memiliki pengaruh signifikan

terhadap perilaku kerja dan kemungkinan munculnya kesalahan. Sebagai contoh, budaya organisasi yang tidak mendukung transparansi dan pembelajaran dari kesalahan dapat menciptakan lingkungan di mana individu cenderung menyembunyikan kesalahan daripada melaporkannya. Oleh karena itu, penting bagi institusi untuk memahami konteks lingkungan kerja secara lebih luas, termasuk dinamika eksternal yang mempengaruhi operasional internal, sehingga dapat dirancang sistem pencegahan kesalahan yang lebih menyeluruh dan efektif.

#### **2.1.4 Model Swiss Cheese**

Dalam studi keselamatan dan manajemen risiko, Model Swiss Cheese yang dikembangkan oleh James Reason (1990) merupakan salah satu pendekatan paling berpengaruh dalam memahami terjadinya kecelakaan dan insiden operasional dalam sistem kompleks, termasuk industri pelayaran. Model ini memberikan gambaran visual dan sistematis bahwa kegagalan suatu sistem tidak hanya disebabkan oleh satu kesalahan individu, tetapi akibat dari serangkaian kelemahan dalam berbagai lapisan pertahanan sistem yang gagal mencegah terjadinya kecelakaan.

Model ini diibaratkan seperti tumpukan irisan keju Swiss, di mana setiap irisan merepresentasikan lapisan pertahanan atau pengaman dalam suatu sistem, seperti prosedur operasional, pelatihan, perangkat teknologi, pengawasan, dan manajemen. Setiap lapisan memiliki lubang-lubang yang merepresentasikan kekurangan atau celah (*vulnerabilities*). Dalam situasi normal, celah-celah ini tidak saling berbaris dan dapat ditutupi oleh lapisan lain. Namun, ketika lubang-lubang tersebut secara kebetulan sejajar, maka terbentuklah jalur bebas yang memungkinkan terjadinya kecelakaan (Reason, 1990).

Reason membagi penyebab kecelakaan menjadi dua kategori utama:

1. Active Failures (Kegagalan Aktif):

Kesalahan yang dilakukan oleh operator garis depan (misalnya nakhoda atau ABK), seperti miskomunikasi, pengambilan keputusan yang salah, atau pengabaian prosedur. Dampaknya terjadi langsung dan mudah diidentifikasi.

2. Latent Conditions (Kondisi Laten):

Kegagalan sistemik atau kesalahan tersembunyi yang terdapat di level manajerial atau organisasi, seperti kelemahan dalam desain sistem kerja, kurangnya pelatihan, atau kebijakan keselamatan yang tidak konsisten. Latent failures ini tidak langsung menyebabkan kecelakaan, tetapi menciptakan kondisi yang membuat active failures lebih mungkin terjadi.

Menurut (Dekker, 2011), model ini menekankan bahwa kesalahan manusia adalah gejala, bukan akar masalah. Kesalahan terjadi karena manusia beroperasi dalam sistem yang kompleks dan penuh tekanan. Oleh karena itu, pendekatan yang hanya menyalahkan individu (blaming culture) tidak akan efektif dalam meningkatkan keselamatan.

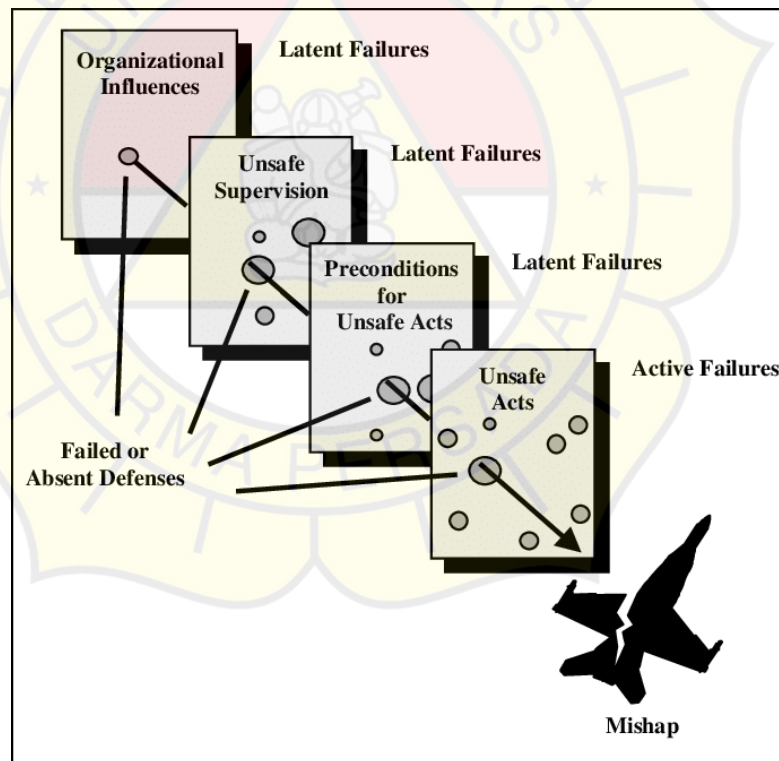
Dalam konteks pelayaran, terutama pada kapal tug and barge, Model Swiss Cheese sangat relevan untuk menjelaskan insiden-insiden seperti tubrukan, kandas, atau kecelakaan muatan, yang sering kali merupakan hasil gabungan antara:

- Kelelahan kru (lubang pada lapisan SDM),
- SOP yang tidak dijalankan (lubang pada software),
- Radar atau AIS yang rusak (lubang pada hardware),
- Cuaca ekstrem tanpa dukungan informasi (lubang pada environment).

Ketika semua lubang ini sejajar, maka risiko kecelakaan meningkat secara eksponensial.

Model ini juga menjadi dasar untuk menganalisis kecelakaan besar seperti tenggelamnya MV Estonia (1994) dan tubrukan Exxon Valdez (1989), yang semuanya menunjukkan bahwa kecelakaan besar bukan disebabkan satu kesalahan tunggal, melainkan akumulasi kesalahan sistemik.

Untuk memperkuat pendekatan ini, (Hollnagel, 2004) menekankan pentingnya barrier (penghalang) dalam sistem, yaitu segala bentuk kontrol atau mitigasi yang dapat menghalangi kesalahan mencapai dampaknya. Bila sistem tidak memiliki barrier yang kuat atau barrier tersebut rusak (misalnya: pelatihan seadanya, SOP tidak diperbarui, alarm dimatikan), maka kecelakaan hanya tinggal menunggu waktu.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Swiss Cheese Model

### 2.1.5 Human Error Berbasis Skill–Rule–Knowledge (SRK)

Model Skill–Rule–Knowledge (SRK) adalah kerangka teoritis yang dikembangkan oleh (Rasmussen, 1983) untuk mengklasifikasikan

tingkatan perilaku manusia berdasarkan cara pengambilan keputusan, khususnya dalam sistem kerja yang kompleks dan berisiko tinggi. Model ini banyak digunakan dalam konteks keselamatan kerja, analisis human error, dan desain sistem berbasis manusia (human-centered design). Kemudian pada tahun 1997, Rasmussen mengembangkan kerangka tersebut dalam konteks manajemen risiko dinamis, untuk memahami bagaimana kesalahan dan kegagalan bisa terjadi dalam interaksi antara manusia dan sistem sosial-teknikal.

Model SRK membagi perilaku manusia ke dalam tiga level berdasarkan tingkat kognitif dan pengalaman yang digunakan dalam menjalankan tugas, yaitu:

1. Skill-Based Behavior (Perilaku Berbasis Keterampilan)

Merupakan perilaku otomatis dan tanpa kesadaran penuh yang dilakukan dalam situasi yang sangat familiar dan sering dilakukan secara berulang (rutin). Contohnya termasuk tugas motorik sederhana seperti memutar katup, mengatur throttle kapal, atau membuka menu navigasi.

Kesalahan khas dalam tingkatan ini disebut slip (kesalahan tindakan tidak sengaja) dan lapse (kelalaian atau kelupaan).

Contoh di sektor pelayaran: operator tug yang terbiasa mengaktifkan AIS setiap pagi, namun karena kelelahan, ia lupa menyalakannya — menyebabkan potensi tubrukan karena kapal tidak terdeteksi radar lain.

2. Rule-Based Behavior (Perilaku Berbasis Aturan)

Perilaku ini muncul ketika seseorang menghadapi situasi yang sudah dikenal dan memilih tindakan berdasarkan aturan, prosedur, atau pengalaman sebelumnya (misalnya SOP). Individu menyesuaikan situasi dengan aturan yang tersedia.

Kesalahan khas pada level ini meliputi:

- Salah menerapkan aturan pada konteks yang salah (misclassification),

- Memilih aturan yang salah untuk situasi yang dihadapi (misapplied rule).

Contoh: Nahkoda menerapkan prosedur bongkar muat pelabuhan tertutup di pelabuhan terbuka dengan kondisi arus deras, mengakibatkan kecelakaan saat proses tambat.

### 3. Knowledge-Based Behavior (Perilaku Berbasis Pengetahuan)

Jenis perilaku ini terjadi ketika individu menghadapi situasi baru, tidak dikenal, atau krisis, yang tidak memiliki aturan baku atau pengalaman sebelumnya. Keputusan diambil berdasarkan pemikiran konseptual, penalaran logis, dan evaluasi informasi.

Kesalahan khas:

Kesalahan dalam analisis situasi atau asumsi keliru karena informasi terbatas.

Contoh: Saat sistem ECDIS dan radar mati di tengah laut, kru harus memutuskan rute alternatif tanpa panduan — ini memerlukan pengetahuan geografis dan navigasi manual yang mumpuni.

Model SRK telah digunakan dalam berbagai studi pelayaran dan kecelakaan maritim. Menurut (Wang & Zhang, 2020), banyak kecelakaan kapal tug terjadi karena awak kapal menggunakan perilaku rule-based dalam situasi yang sebenarnya menuntut knowledge-based response. Kegagalan identifikasi situasi dan kurangnya pelatihan adaptif sering kali menyebabkan tindakan tidak sesuai dengan kompleksitas yang ada.

Selain itu, (Hollnagel, 1998) mengembangkan metode CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) yang berbasis SRK, untuk menilai kemungkinan kesalahan berdasarkan konteks operasional. Metode ini telah diterapkan di sektor pelabuhan, navigasi lepas pantai, dan perawatan kapal besar.

Pemahaman terhadap SRK menjadi penting dalam perancangan sistem kerja agar:

- Tugas rutin tidak menjadi titik lemah karena kelalaian,
- SOP disesuaikan dengan kondisi nyata, bukan hanya ideal,
- Pelatihan mencakup simulasi krisis (untuk membangun knowledge-based resilience).

(Norman, 1986) menekankan pentingnya error-tolerant systems yang mampu memberikan umpan balik, alarm, dan pemandu tindakan untuk mencegah kesalahan pada level skill-based dan rule-based.

### 2.1.6 Studi Aplikasi Human Error di Dunia Maritim

dan Konsep *human error* merupakan salah satu landasan penting dalam kajian keselamatan kerja di lingkungan industri berisiko tinggi, termasuk sektor pelayaran. Berbagai studi menunjukkan bahwa lebih dari 75–90% kecelakaan dalam sistem transportasi laut disebabkan oleh faktor manusia, baik secara langsung (*active failure*) maupun tidak langsung (*latent failure*) (Reason, 1990; IMO, 2020). Dalam konteks ini, memahami bagaimana teori human error diterapkan secara praktis di lapangan menjadi sangat penting, karena tidak semua kesalahan manusia bersumber dari individu semata, melainkan juga dari struktur sistem yang mendukungnya.

#### A. Perspektif Teoritis Human Error dalam Konteks Maritim

Teori *human error*, sebagaimana dikembangkan oleh (Reason, 1990) melalui *Swiss Cheese Model*, membedakan antara *active failures* yang dilakukan oleh operator garis depan, dan *latent conditions*, yaitu kelemahan tersembunyi dalam sistem organisasi yang menciptakan kondisi bagi kesalahan manusia untuk terjadi. Pendekatan ini menyadarkan bahwa sistem keselamatan pelayaran harus dipandang sebagai sistem sosial-teknikal kompleks, di mana keputusan manusia tidak bisa dilepaskan dari interaksi mereka dengan prosedur, teknologi, lingkungan kerja, dan struktur organisasi (Hollnagel, 2004; Dekker, 2011).

Dalam kerangka ini, kesalahan manusia bukan semata-mata

kekeliruan pribadi, tetapi merupakan hasil dari ketidaksesuaian antara kemampuan manusia dengan desain sistem, ketidaktepatan distribusi beban kerja, serta kegagalan organisasi dalam menyediakan dukungan, pelatihan, dan pengawasan yang memadai.

## **B. Klasifikasi Human Error dan Relevansinya di Laut**

Sebagaimana dijelaskan oleh (Rasmussen, 1983) melalui model *Skill–Rule–Knowledge* (SRK), kesalahan manusia dapat dikategorikan berdasarkan tingkat kendali kognitifnya. Dalam sistem pelayaran, ketiga jenis perilaku tersebut sangat nyata:

- **Skill-based errors** sering terjadi pada awak kapal yang menjalankan tugas-tugas rutin tanpa banyak perhatian sadar, seperti memeriksa radar atau menavigasi jalur yang biasa dilewati. Kelelahan atau distraksi lingkungan dapat menyebabkan slip atau lapse yang berdampak besar di laut.
- **Rule-based errors** terjadi ketika awak kapal salah menerapkan SOP karena salah mengenali situasi atau terlalu bergantung pada pengalaman masa lalu. Hal ini kerap terjadi dalam situasi darurat di mana kondisi tidak sesuai dengan prosedur baku.
- **Knowledge-based errors** muncul ketika kru menghadapi situasi baru tanpa petunjuk atau pedoman yang jelas, seperti menghadapi kerusakan sistem navigasi digital di tengah cuaca ekstrem. Tanpa pelatihan yang memadai, keputusan yang diambil bisa fatal.

## **C. Studi Empiris dan Praktik Nyata**

(Wang & Zhang, 2020) dalam studi kasusnya terhadap operasi kapal tunda di Asia-Pasifik menemukan bahwa mayoritas kecelakaan disebabkan oleh interaksi antara kelelahan, SOP yang kaku, dan kurangnya pelatihan respons darurat. Kesalahan yang terjadi bukan sekadar slip operasional, tetapi kesalahan sistemik akibat kegagalan sistem manajemen keselamatan.

(Mulyana & Pratama, 2022) meneliti insiden kapal barge di Selat Makassar dan menemukan bahwa faktor dominan penyebab

kecelakaan adalah kegagalan komunikasi antara tug-master dengan Vessel Traffic Services (VTS), tidak adanya sistem pemantauan real-time, serta muatan berlebih. Insiden-insiden tersebut dikategorikan sebagai hasil dari kombinasi *rule-based error dan latent conditions*, menunjukkan kelemahan sistemik dalam desain operasional dan pengawasan.

(Chowdhury & Zhang, 2024) mengkaji risiko kerja di ruang mesin kapal dan menyimpulkan bahwa kelelahan termal, lingkungan kerja yang bising, dan tekanan jadwal kerja berkontribusi terhadap kesalahan teknis dan pengambilan keputusan yang buruk oleh operator mesin. Hal ini menegaskan bahwa desain lingkungan kerja yang buruk memperbesar kemungkinan kesalahan kognitif.

#### **D. Pendekatan Kuantitatif dalam Evaluasi Human Error**

Dalam upaya mengidentifikasi dan mengukur kontribusi human error terhadap kecelakaan, berbagai pendekatan kuantitatif digunakan:

- (Widyasto, 2016) menggunakan kombinasi *Analytical Hierarchy Process (AHP)* dan *SHELL Model* untuk menganalisis kontribusi human error dalam sistem kelistrikan kapal. Penelitian tersebut menemukan bahwa faktor sumber daya manusia menyumbang lebih dari 26% terhadap kecelakaan, yang didominasi oleh kurangnya pelatihan dan kesehatan kerja yang buruk.
- (Putra & Rum, 2024) menerapkan *Fault Tree Analysis (FTA)* untuk mengidentifikasi penyebab keterlambatan perbaikan lambung kapal. Studi ini menunjukkan bahwa penyebab utama berasal dari *knowledge-based error* akibat minimnya komunikasi dan dokumentasi kerja yang baik.

#### **E. Relevansi untuk Operasi Kapal Tug & Barge**

Operasi tug and barge memiliki kompleksitas unik: navigasi di perairan sempit, operasi muatan besar, interaksi multipihak (kapal induk, pelabuhan, VTS), serta tekanan operasional untuk efisiensi waktu. Seluruh kondisi ini menciptakan lingkungan kerja berisiko

tinggi, di mana kesalahan manusia bukan hanya mungkin terjadi, tetapi hampir pasti terjadi bila tidak ada sistem keselamatan adaptif.

Kelemahan dalam sistem pelatihan, lemahnya budaya pelaporan insiden, serta absennya mekanisme umpan balik yang efisien membuat human error sulit dicegah dan sering kali terjadi secara berulang.

Oleh karena itu, strategi manajemen keselamatan harus memadukan:

- Rekayasa sistem yang memperkuat perilaku *skill-based*,
- Pelatihan situasional untuk memperkaya *rule-based behavior*,
- Simulasi kompleks untuk mengembangkan kemampuan *knowledge-based decision-making*.

## 2.2 Keselamatan Maritim.

### 2.2.1 Definisi dan Prinsip Keselamatan Maritim

Keselamatan maritim merupakan fondasi utama dalam sistem transportasi laut dan pelayaran global. Dalam dunia maritim, keselamatan tidak hanya dimaknai sebagai terhindarnya kapal dari kecelakaan, tetapi mencakup keselamatan jiwa manusia di laut, perlindungan muatan, kelestarian lingkungan laut, serta kepatuhan terhadap ketentuan hukum dan teknis internasional.

Menurut International Maritime Organization (IMO, 2020), keselamatan maritim didefinisikan sebagai “a condition where maritime operations are conducted in such a way that risks to people, the ship, cargo, and the marine environment are minimized and controlled through international conventions, national legislation, and sound maritime practices.” Keselamatan ini bersifat holistik dan sistemik, mencakup aspek teknis, operasional, manajerial, dan sumber daya manusia.

Dalam konteks akademis, (Alan E. Branch, 1982) mendefinisikan keselamatan maritim sebagai “a state in which the risk of harm to persons,

*property, or the environment is reduced to an acceptable level through a combination of technical and organizational measures.”* Artinya, keselamatan tidak hanya bergantung pada aspek teknis kapal, tetapi juga mencakup prosedur operasional, sistem manajemen, dan perilaku manusia. Pernyataan ini menggarisbawahi bahwa keselamatan bukanlah kondisi absolut, melainkan hasil dari proses pengelolaan risiko secara berkelanjutan, dengan memadukan pendekatan teknis dan organisasi

### 1. Pendekatan Safety-I dan Safety-II

Menurut (Hollnagel, 2014), pendekatan tradisional terhadap keselamatan, yang disebut Safety-I, memfokuskan pada pencegahan kegagalan (*avoiding things that go wrong*). Dalam paradigma ini, keselamatan dicapai dengan mengidentifikasi dan mengeliminasi penyebab kecelakaan. Namun pendekatan ini cenderung reaktif, hanya bertindak setelah terjadi insiden.

Sebaliknya, Safety-II merupakan paradigma baru yang menekankan pada kemampuan sistem untuk beradaptasi, menghadapi kompleksitas, dan mempertahankan keberhasilan operasional (*ensuring that things go right*). Pendekatan ini melihat keselamatan sebagai kapabilitas sistem untuk beroperasi secara andal dalam berbagai kondisi—termasuk kondisi abnormal—bukan sekadar absennya kegagalan.

Penerapan Safety-II sangat relevan dalam pelayaran modern, terutama kapal tug & barge yang beroperasi dalam kondisi perairan terbuka dengan variabel risiko tinggi. Safety-II mendorong perbaikan sistem berdasarkan variasi keberhasilan operasional kru, bukan hanya kegagalannya.

### 2. High Reliability Organization (HRO)

Konsep High Reliability Organization (HRO) dikembangkan dalam studi terhadap organisasi berisiko tinggi seperti industri nuklir, penerbangan, dan kini pelayaran. HRO merujuk pada organisasi yang mampu

meminimalkan kesalahan walau bekerja dalam lingkungan kompleks, berubah cepat, dan bertekanan tinggi.

Menurut (Weick & Sutcliffe, 2001), karakteristik HRO meliputi:

- Preoccupation with failure: terus-menerus waspada terhadap potensi kegagalan kecil,
- Reluctance to simplify: menghindari generalisasi berlebihan atas kejadian,
- Sensitivity to operations: perhatian tinggi terhadap kegiatan harian,
- Commitment to resilience: kemampuan bangkit dari gangguan,
- Deference to expertise: keputusan diambil oleh yang paling berpengalaman, bukan berdasarkan hierarki.

Dalam konteks pelayaran, pendekatan HRO dapat diadopsi melalui:

- Pelatihan kru secara intensif dan berulang,
- Penerapan simulasi darurat (drill),
- Penetapan SOP yang berbasis pada pengalaman insiden sebelumnya,
- Delegasi wewenang berdasarkan kompetensi situasional.

### 3. Safety Climate dan Safety Behavior

Keselamatan tidak hanya ditentukan oleh sistem dan teknologi, tetapi juga oleh budaya dan persepsi kru terhadap keselamatan. Dua konsep penting dalam hal ini adalah safety climate dan safety behavior.

- Safety climate mengacu pada persepsi bersama dalam organisasi terhadap komitmen keselamatan, kepemimpinan, dan kebijakan yang ada. Menurut (Zohar, 1980), safety climate yang positif berkorelasi erat dengan tingkat kepatuhan terhadap SOP dan rendahnya angka kecelakaan.
- Safety behavior merujuk pada tindakan nyata individu dalam menjalankan tugas dengan aman, seperti penggunaan APD, pelaporan kondisi tidak aman, dan pemenuhan standar kerja. Penelitian oleh (Neal & Griffin, 2006) menunjukkan bahwa safety

behavior secara langsung memediasi hubungan antara safety climate dan kinerja keselamatan organisasi.

Di atas kapal, interaksi antara safety climate dan behavior menentukan efektivitas implementasi ISM Code dan SOP, terutama saat menghadapi situasi darurat atau kelelahan kerja.

#### 4. Just Culture dan Reporting Culture

Just Culture adalah konsep yang menyeimbangkan antara akuntabilitas dan pembelajaran dari kesalahan. Menurut (Dekker, 2011), dalam organisasi yang memiliki just culture:

- Kru didorong untuk melaporkan insiden, near-miss, atau pelanggaran tanpa takut dihukum, selama tidak dilakukan dengan sengaja atau lalai berat.
- Fokus bukan pada siapa yang salah, tetapi apa yang salah dalam sistem.
- Kesalahan dianggap sebagai peluang pembelajaran dan perbaikan sistem.

Di lingkungan maritim, just culture penting untuk membangun reporting culture—budaya melapor yang aktif dan terbuka. Hal ini meningkatkan deteksi dini atas potensi bahaya dan mempercepat tindakan korektif sebelum kecelakaan terjadi.

#### **Prinsip-Prinsip Keselamatan Maritim**

Keselamatan maritim dilandasi oleh prinsip-prinsip yang diatur dalam berbagai regulasi internasional dan nasional, di antaranya:

##### 1. **Kepatuhan terhadap Regulasi Internasional**

Keselamatan pelayaran secara global diatur oleh konvensi IMO seperti:

- **SOLAS (Safety of Life at Sea) 1974**: Merupakan pilar utama keselamatan maritim yang mengatur standar desain kapal, peralatan keselamatan, prosedur evakuasi, serta sistem navigasi.
- **ISM Code (International Safety Management Code)**: Mengatur sistem manajemen keselamatan kapal dan perusahaan untuk

menjamin operasional kapal dilakukan secara aman dan sesuai regulasi.

- o **STCW (Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers)**: Mengatur standar pelatihan dan sertifikasi pelaut secara internasional.

## 2. Prinsip Pencegahan dan Mitigasi Risiko

Berbasis pada pendekatan *risk management*, keselamatan maritim menekankan pentingnya identifikasi potensi bahaya (hazard), penilaian risiko, dan implementasi tindakan pengendalian. Penerapan *hazard identification* dan *risk assessment (HIRA)* menjadi bagian penting dalam sistem manajemen keselamatan.

## 3. Kultur Keselamatan (Safety Culture)

Kultur keselamatan atau *safety culture* merupakan fondasi dari sistem keselamatan yang efektif dan berkelanjutan di sektor maritim. Konsep ini mencerminkan nilai, keyakinan, sikap, serta praktik yang dimiliki bersama oleh seluruh anggota organisasi terhadap pentingnya keselamatan dalam setiap aspek operasional.

Menurut (Reason, 1990), *safety culture* adalah “the product of individual and group values, attitudes, perceptions, competencies, and patterns of behavior that determine the commitment to, and the style and proficiency of, an organization's health and safety management.” Artinya, keselamatan tidak cukup diatur oleh prosedur atau sistem, tetapi harus menjadi bagian dari cara berpikir dan bertindak setiap orang dalam organisasi, mulai dari manajemen puncak hingga kru di lapangan.

Namun, untuk memahami kultur keselamatan secara komprehensif, perlu dibedakan tiga konsep utama yang saling terkait namun memiliki dimensi berbeda, yaitu:

a. Safety Culture

Adalah nilai-nilai dan keyakinan mendasar yang dimiliki organisasi tentang keselamatan. Safety culture berkembang melalui:

- Kepemimpinan yang konsisten dalam mendahulukan keselamatan di atas efisiensi atau kecepatan kerja,
- Pelaporan insiden yang terbuka dan tanpa rasa takut,
- Sistem pembelajaran dari kejadian masa lalu, bukan hanya menghukum,
- Pengakuan dan penghargaan terhadap tindakan preventif,
- Komunikasi dua arah antara manajemen dan operator kapal.

Kultur ini tidak dapat dibentuk secara instan, melainkan tumbuh melalui akumulasi praktik dan pengalaman organisasi dalam mengelola keselamatan

b. Safety Climate

Menurut (Zohar, 1980), safety climate adalah persepsi kolektif para pekerja terhadap kebijakan, prosedur, dan praktik organisasi yang berkaitan dengan keselamatan pada suatu waktu tertentu. Ini adalah manifestasi “permukaan” dari safety culture—bagaimana budaya itu dirasakan dan dinilai oleh pelaut atau awak kapal.

Sebagai contoh, jika pelaut merasa bahwa pelaporan kecelakaan kecil justru mengundang teguran, maka climate-nya negatif, meskipun secara formal organisasi memiliki prosedur pelaporan.

Penelitian oleh (Neal & Griffin, 2006) menunjukkan bahwa safety climate memiliki pengaruh langsung terhadap safety behavior, yakni perilaku nyata pekerja dalam menerapkan prinsip keselamatan di lapangan, seperti penggunaan alat pelindung diri (APD), ketaatan SOP, dan kehati-hatian dalam pengoperasian kapal.

c. Just Culture

Just culture, sebagaimana dijelaskan oleh (Dekker, 2007), adalah lingkungan kerja yang menyeimbangkan antara akuntabilitas

individu dan pembelajaran organisasi. Dalam budaya ini:

- Kesalahan dilihat sebagai sinyal kegagalan sistem, bukan sekadar kesalahan pribadi,
- Pelaut diberi ruang untuk melaporkan insiden atau near-miss tanpa takut hukuman,
- Organisasi fokus pada apa yang salah, bukan siapa yang salah.

Just culture merupakan syarat penting dalam membangun safety culture yang sehat. Tanpa just culture, sistem pelaporan insiden akan menjadi tidak efektif karena pekerja cenderung menyembunyikan kesalahan

#### 4. Pendekatan Sistemik

Keselamatan tidak dapat dicapai hanya dengan memperbaiki satu aspek saja. Pendekatan keselamatan tidak bisa bersifat parsial. Sistem keselamatan harus memadukan elemen manusia (liveware), peralatan (hardware), prosedur (software), dan lingkungan (environment) sebagaimana dalam SHELL Model (Edwards, 1972). Pendekatan ini dipertegas dalam HTO Model (Human-Technology-Organization) yang digunakan untuk menganalisis kegagalan sistem secara holistik.

#### 5. Audit dan Inspeksi Berkala

Penerapan keselamatan maritim membutuhkan pengawasan dan evaluasi berkala melalui audit internal maupun eksternal. Kementerian Perhubungan melalui Direktorat Jenderal Perhubungan Laut juga mengatur audit berkala terhadap kapal berbendera Indonesia untuk memastikan kepatuhan terhadap ketentuan nasional dan internasional.

### 2.2.2 Faktor- Faktor Kecelakaan Kapal Tug & Barge

Kecelakaan kapal Tug & Barge tidak hanya berdampak pada kerugian material dan lingkungan, namun juga dapat mengancam keselamatan jiwa

awak kapal serta mengganggu kelancaran operasional pelayaran. Pemahaman yang mendalam mengenai faktor penyebab kecelakaan sangat penting dalam upaya mitigasi risiko maritim. Berdasarkan studi literatur dan teori keselamatan pelayaran, faktor-faktor penyebab kecelakaan dalam operasional kapal Tug & Barge dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

### 1. Faktor Manusia (Human Error)

Merupakan penyebab dominan dalam sebagian besar kecelakaan laut. Menurut (Reason, 1990) dalam teori *Swiss Cheese Model*, kecelakaan terjadi akibat akumulasi celah dalam berbagai lapisan pertahanan, banyak di antaranya disebabkan oleh kesalahan manusia. Kesalahan ini meliputi:

- **Kesalahan navigasi:** kegagalan dalam membaca peta laut, penggunaan alat bantu navigasi secara keliru, atau kekeliruan dalam penentuan rute.
- **Kurangnya komunikasi efektif:** miskomunikasi antar kru atau dengan Vessel Traffic Services (VTS) yang berpotensi menyebabkan tubrukan atau kandas.
- **Kelelahan awak kapal (fatigue):** waktu kerja berlebih dan rotasi kerja yang buruk menyebabkan menurunnya konsentrasi dan performa awak kapal.
- **Kurangnya pelatihan dan kompetensi:** awak kapal yang tidak terlatih atau tidak memahami prosedur darurat meningkatkan risiko kecelakaan.

### 2. Faktor Teknis

Berkaitan dengan kondisi teknis kapal dan peralatannya. Menurut SOLAS (Safety of Life at Sea) dan ISM Code, pemilik kapal wajib memastikan seluruh sistem kapal dalam kondisi laik laut (*seaworthy*). Faktor teknis yang sering menjadi penyebab kecelakaan antara lain:

- **Kegagalan mesin induk atau mesin bantu** yang menyebabkan hilangnya daya dorong atau kehilangan kendali saat manuver.

- **Kerusakan sistem kemudi atau steering gear**, yang mengganggu arah pergerakan kapal terutama saat menarik tongkang dalam kondisi cuaca buruk.
- **Malfungsi peralatan navigasi**, seperti radar, GPS, atau echo sounder, yang berdampak pada kekeliruan pengambilan keputusan navigasi.

### 3. Faktor Prosedural dan Organisasi

Mengacu pada implementasi dan kepatuhan terhadap prosedur operasi standar (SOP), termasuk dokumentasi keselamatan. Mengacu pada *International Safety Management (ISM) Code*, setiap perusahaan pelayaran wajib menerapkan sistem manajemen keselamatan yang meliputi:

- **Ketidakpatuhan terhadap SOP**, baik dalam operasional harian maupun prosedur darurat.
- **Dokumentasi yang tidak lengkap**, seperti tidak adanya *checklist* keselamatan atau laporan inspeksi yang valid.
- **Kepemimpinan dan budaya keselamatan yang lemah**, di mana perusahaan atau nahkoda mengabaikan pentingnya keselamatan kerja dan tidak menanamkan budaya *safety first* di atas kapal.

### 4. Faktor Lingkungan

Lingkungan maritim yang tidak dapat dikendalikan menjadi tantangan tersendiri bagi kapal Tug & Barge. Menurut teori *risk-based navigation*, kondisi lingkungan menjadi variabel signifikan dalam analisis risiko pelayaran. Faktor-faktor ini meliputi:

- **Cuaca buruk**: angin kencang, hujan deras, atau badai tropis yang mengganggu stabilitas kapal dan tongkang.
- **Gelombang dan arus kuat**, terutama saat melakukan *berthing* atau *towing* yang membutuhkan presisi tinggi.
- **Visibilitas rendah**, akibat kabut atau malam hari, yang mengurangi kemampuan identifikasi obyek navigasi.

- **Kondisi perairan dangkal dan sempit**, yang meningkatkan risiko kandas atau tubrukan.

## 2.3 Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)

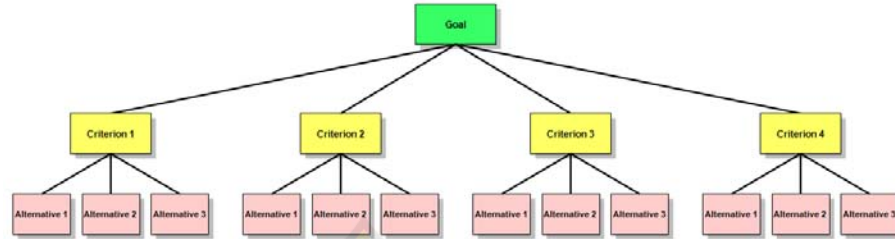
### 2.3.1 Pengertian AHP

Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) merupakan suatu model pendukung keputusan yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty. Metode ini dirancang untuk menangani permasalahan yang melibatkan banyak faktor atau kriteria yang bersifat kompleks dengan cara menguraikannya ke dalam bentuk hierarki. Hierarki ini sendiri dapat dipahami sebagai representasi dari suatu persoalan yang rumit dalam bentuk struktur bertingkat, di mana tingkatan paling atas menggambarkan tujuan utama, yang kemudian diikuti oleh faktor-faktor, kriteria, subkriteria, hingga ke tingkat paling bawah yang berisi alternatif-alternatif solusi (Saaty, 1993). Melalui pendekatan ini, permasalahan yang semula tampak kompleks dapat dipisah ke dalam bagian-bagian yang lebih kecil dan tersusun secara sistematis, sehingga memudahkan dalam proses analisis dan pengambilan keputusan.

AHP banyak dipilih sebagai metode pemecahan masalah dibandingkan metode lainnya karena memiliki keunggulan-keunggulan tertentu, antara lain:

1. Adanya struktur yang berhierarki, yang memungkinkan penguraian dari tujuan utama hingga ke subkriteria terdalam sebagai konsekuensi dari pemilihan kriteria yang relevan.
2. Kemampuan untuk memperhitungkan validitas keputusan melalui pengujian batas toleransi terhadap inkonsistensi yang mungkin terjadi dalam pembobotan kriteria dan alternatif yang dipilih oleh pengambil keputusan.

3. Adanya analisis sensitivitas yang memungkinkan untuk menilai ketahanan atau stabilitas dari hasil akhir keputusan terhadap perubahan input atau kondisi tertentu

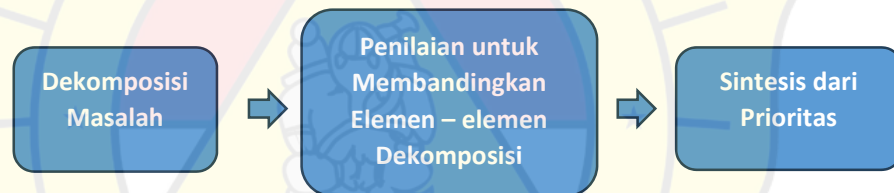


Gambar 2. 2 Bagan Analytic Hierarchy Proses (AHP)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Analytic\\_hierarchy\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_hierarchy_process)

### 2.3.2 Tahapan Penyusunan AHP

Secara umum ada 3 tahapan dalam penyusunan sebuah prioritas menggunakan AHP yang terlihat pada diagram proses di bawah ini



Gambar 2. 3 Tahap Penyusunan AHP

*Dekomposisi* merupakan langkah awal dalam metode AHP, di mana suatu permasalahan yang telah didefinisikan secara jelas dipecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Proses ini bertujuan untuk memetakan permasalahan utama ke dalam sejumlah kriteria, yang selanjutnya dapat dibagi lagi menjadi beberapa subkriteria. Proses pemecahan masalah ke dalam struktur bertingkat ini dikenal sebagai *Hierarki*. Dalam penerapannya, terdapat dua jenis Hierarki, yaitu Hierarki lengkap—yang mencakup seluruh elemen dan hubungannya secara menyeluruh—dan Hierarki tak lengkap, di mana tidak semua elemen saling terhubung secara langsung.

Penilaian Komparatif (*Comparative Judgement*) dilakukan dengan cara membandingkan dua elemen pada tingkat tertentu untuk menentukan

tingkat kepentingan relatifnya terhadap elemen pada tingkat di atasnya. Proses ini bertujuan untuk mengetahui prioritas relatif dari masing-masing elemen yang dibandingkan. Hasil dari perbandingan ini akan sangat mempengaruhi bobot atau prioritas akhir dari tiap elemen yang terlibat. Agar hasil perbandingan lebih mudah dianalisis, biasanya disajikan dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*).

Sintesis Prioritas (*Synthesis of Priority*) dilakukan setelah seluruh matriks perbandingan berpasangan diperoleh. Dari setiap matriks tersebut, dihitung nilai eigen (*eigenvector*) untuk menentukan bobot atau prioritas lokal dari masing-masing elemen. Selanjutnya, dilakukan sintesis antara semua prioritas lokal untuk mendapatkan prioritas global dari elemen-elemen dalam keseluruhan struktur Hierarki. Proses ini penting agar dapat diketahui elemen mana yang memiliki pengaruh paling besar terhadap tujuan akhir.

Konsistensi Logis (*Logical Consistency*) merupakan prinsip penting dalam AHP untuk memastikan keandalan hasil yang diperoleh. Konsistensi mengacu pada ketepatan logika dalam penilaian responden ketika melakukan perbandingan antar elemen. Misalnya, jika seorang responden menyatakan bahwa elemen A lebih penting dari B, dan B lebih penting dari C, maka secara logis seharusnya A juga lebih penting dari C. Tingkat konsistensi ini dapat diukur melalui rasio konsistensi (*Consistency Ratio*), dan apabila nilai ini melebihi batas toleransi yang ditentukan, maka hasil penilaian dianggap tidak konsisten dan perlu diperbaiki.

### **2.3.3 Penyusunan Hierarki dan Prioritas**

Dalam metode AHP dilakukan langkah-langkah sebagai berikut (Suryadi & Ramdhani, 1998) :

#### **1. Mendefinisikan Masalah dan Menentukan Solusi**

Tahap pertama dalam penerapan AHP adalah mendefinisikan permasalahan secara jelas, rinci, dan mudah dipahami oleh seluruh

pihak yang terlibat. Definisi masalah yang baik akan mempermudah dalam penentuan langkah-langkah selanjutnya. Setelah permasalahan dirumuskan, langkah berikutnya adalah mengidentifikasi berbagai solusi atau alternatif yang memungkinkan untuk diterapkan. Tidak jarang, suatu permasalahan memiliki lebih dari satu solusi potensial. Alternatif-alternatif ini nantinya akan dievaluasi lebih lanjut melalui proses perbandingan dan analisis prioritas pada tahapan selanjutnya.

## **2. Membuat Struktur Hierarki.**

Setelah masalah dan tujuan utama ditentukan, langkah selanjutnya adalah menyusun struktur Hierarki sebagai dasar proses analisis. Tujuan utama diletakkan pada tingkat tertinggi dalam Hierarki. Di bawahnya, disusun kriteria-kriteria yang dianggap relevan dalam mengevaluasi alternatif yang ada. Setiap kriteria mencerminkan aspek penilaian yang berbeda dan memiliki tingkat kepentingan yang bervariasi. Jika diperlukan, setiap kriteria dapat dipecah lagi menjadi subkriteria untuk memperjelas aspek penilaian secara lebih mendalam. Struktur Hierarki ini memudahkan dalam memetakan hubungan antara tujuan, kriteria, dan alternatif.

## **3. Membuat Matrik Perbandingan Berpasangan**

Pada tahap ini, disusun matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*) untuk menilai tingkat kepentingan relatif antar elemen dalam satu tingkat Hierarki. Matriks ini bersifat sederhana namun sangat kuat dalam mendukung konsistensi penilaian dan memungkinkan diperolehnya informasi tambahan melalui semua kombinasi perbandingan yang mungkin. Penilaian dilakukan berdasarkan *judgment* dari pengambil keputusan, yang akan membandingkan dua elemen berdasarkan tingkat kepentingan relatif terhadap kriteria pada tingkat di atasnya. Misalnya, apabila kriteria K berada pada tingkat atas, maka elemen-elemen seperti E1, E2, E3, E4, dan E5 dari tingkat bawah dibandingkan satu sama lain berdasarkan

kontribusinya terhadap K. Pendekatan ini juga memungkinkan untuk menganalisis sensitivitas hasil prioritas terhadap perubahan nilai atau penilaian yang diberikan.

Tabel 2. 1 Matrik Berpasangan

Tujuan				
Kriteria	A	B	C	D
A				
B				
C				
D				

#### 4. Mendefinisikan Perbandingan Berpasangan

Dalam metode AHP, proses perbandingan antar elemen dilakukan dengan menggunakan skala numerik dari 1 hingga 9 yang merepresentasikan tingkat kepentingan relatif antar elemen. Nilai-nilai ini digunakan untuk menyatakan seberapa penting suatu elemen dibandingkan dengan elemen lainnya dalam konteks kriteria tertentu. Apabila suatu elemen dibandingkan dengan dirinya sendiri, maka nilai yang diberikan adalah 1, yang menunjukkan bahwa kedua elemen memiliki tingkat kepentingan yang sama.

Skala 1 hingga 9 yang diperkenalkan oleh Thomas L. Saaty telah terbukti efektif dalam membedakan intensitas kepentingan antar elemen, dan diterima secara luas dalam berbagai studi pengambilan keputusan. Nilai-nilai hasil perbandingan ini kemudian dimasukkan ke dalam matriks perbandingan berpasangan pada sel yang sesuai dengan pasangan elemen yang dibandingkan.

Adapun skala perbandingan dan maknanya yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut.

Tabel 2. 2 Skala Perbandingan Saaty

<b>Intensitas Kepentingan</b>	<b>Definisi Verbal</b>	<b>Penjelasan</b>
1	Kedua elemen memiliki kepentingan yang sama	Kedua elemen yang sama terhadap tujuan
3	Salah satu elemen sedikit lebih penting daripada yang lain	Pengalaman dan pertimbangan sedikit memihak pada sebuah elemen dibanding elemen lainnya
5	Elemen yang mempunyai tingkat kepentingan yang kuat terhadap yang lain, jelas lebih penting dari elemen yang lain.	Pengalaman judgment secara kuat memihak pada sebuah elemen dibandingkan elemen lainnya.
7	Satu elemen jelas lebih penting dari elemen yang lainnya.	Satu elemen dengan disukai, dan dominasinya tampak dalam praktek.
9	Satu elemen mutlak lebih dari elemen lainnya.	Bukti bahwa satu element penting dari element lainnya adalah dominan
2, 4, 6, 8	Nilai-nilai tengah diantara dua pertimbangan yang berdampingan	Nilai ini diberikan bila diperlukan adanya dua pertimbangan
Bila komponen I mendapat salah satu nilai, saat dibandingkan dengan elemen J, maka elemen J mempunyai nilai kebalikannya saat dibandingkan dengan elemen J		

## 5. Menghitung Nilai Eigen dan Uji Konsistensi

Setelah seluruh nilai dalam matriks perbandingan berpasangan diisi, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai eigen untuk menentukan bobot atau prioritas relatif dari masing-masing elemen. Nilai eigen ini merupakan hasil perhitungan matematis yang menggambarkan tingkat kontribusi setiap elemen terhadap tujuan di atasnya. Bobot inilah yang nantinya digunakan dalam proses sintesis prioritas pada keseluruhan struktur Hierarki.

Namun, penting untuk memastikan bahwa hasil perbandingan yang diberikan oleh responden atau pengambil keputusan bersifat konsisten secara logis. Oleh karena itu, dilakukan uji konsistensi untuk mengetahui apakah penilaian yang diberikan memenuhi tingkat konsistensi yang dapat diterima. Jika hasil uji menunjukkan bahwa perbandingan bersifat tidak konsisten (nilai rasio konsistensi melebihi ambang batas yang diperbolehkan, biasanya 0.1), maka proses pengambilan data perlu diulang untuk mendapatkan hasil yang valid dan dapat dipercaya.

## 6. Mengulangi Langkah 3,4, dan 5

Langkah-langkah mulai dari pembuatan matriks perbandingan berpasangan (langkah 3), penghitungan nilai prioritas lokal melalui nilai eigen (langkah 4), hingga pengujian konsistensi (langkah 5), perlu diulang untuk setiap tingkat dalam struktur Hierarki. Hal ini dilakukan guna menjamin bahwa setiap elemen dalam seluruh tingkatan Hierarki telah dianalisis secara komprehensif dan konsisten. Proses ini berlanjut sampai seluruh kriteria, subkriteria, dan alternatif telah dievaluasi dan bobot prioritasnya ditentukan, sehingga hasil akhir yang diperoleh benar-benar mencerminkan struktur keputusan secara menyeluruh dan sistematis.

## 7. Menghitung Vektor Eigen

Dalam metode AHP, untuk menentukan prioritas setiap elemen dalam Hierarki, langkah pertama adalah menghitung vektor eigen dari

setiap matriks perbandingan berpasangan. Vektor eigen ini menggambarkan bobot relatif dari setiap elemen yang akan digunakan dalam proses pengambilan keputusan. Proses perhitungan vektor eigen dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

### **Menormalkan Setiap Kolom dalam Matriks A**

Langkah pertama adalah menormalkan setiap kolom dalam matriks perbandingan berpasangan A. Normalisasi ini dilakukan dengan cara menjumlahkan setiap elemen dalam kolom j, sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$A' = \sum a(i, j) = 1$$

Di mana  $a(i, j)$  adalah elemen-elemen dalam matriks A dan  $A'$  adalah matriks yang sudah dinormalisasi.

#### **1. Menghitung Rata-Rata untuk Setiap Baris**

Setelah matriks dinormalisasi, langkah berikutnya adalah menghitung rata-rata untuk setiap baris  $i$  dalam matriks  $A'$ . Rata-rata ini diperoleh dengan menjumlahkan nilai-nilai dalam baris  $i$  dan membaginya dengan jumlah kolom  $n$ . Rumus untuk menghitung bobot  $w_i$  untuk elemen ke- $i$  adalah:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum a(i, j)$$

Di mana  $w_i$  adalah bobot relatif untuk elemen ke- $i$  dan  $n$  adalah jumlah elemen dalam matriks tersebut. Dengan cara ini, diperoleh vektor bobot yang menggambarkan tingkat kepentingan relatif dari setiap elemen yang ada dalam matriks perbandingan berpasangan.

#### **2. Mendekati Penyelesaian Sistem Persamaan Matriks**

Apabila matriks A adalah matriks perbandingan berpasangan, maka vektor bobot tersebut dapat diselesaikan dengan persamaan matriks:

$$(A)(w^T) = (n)(w^T)$$

Dengan pendekatan ini, kita memperoleh bobot relatif untuk setiap elemen dalam Hierarki, yang kemudian digunakan untuk menentukan prioritas global dalam pengambilan keputusan.

## 8. Memeriksa Konsistensi Hierarki

Dalam metode Analytic Hierarchy Process (AHP), salah satu aspek penting yang dievaluasi adalah tingkat konsistensi penilaian. Pengukuran ini dilakukan melalui perhitungan Consistency Index (CI) dan selanjutnya dibandingkan dengan Random Index (RI) untuk menghasilkan Consistency Ratio (CR). Konsistensi yang baik menunjukkan bahwa penilaian yang diberikan relatif logis dan tidak bertentangan secara signifikan, sehingga dapat menghasilkan bobot prioritas yang lebih valid dan dapat diandalkan.

Meskipun sempurna secara konsistensi sulit dicapai dalam praktiknya karena pertimbangan subjektif manusia cenderung tidak sepenuhnya linier Saaty (1980) menyarankan agar nilai rasio konsistensi (CR) sebaiknya berada di bawah atau sama dengan 10% ( $CR \leq 0.10$ ). Jika nilai CR melebihi batas tersebut, maka diperlukan revisi terhadap matriks perbandingan berpasangan guna meningkatkan kualitas data masukan dan memperkuat validitas hasil analisis.

### 2.3.4 Kelebihan dan Kekurangan Sistem AHP

#### Keunggulan Metode Analytic Hierarchy Process (AHP)

Sebagai salah satu pendekatan sistematis dalam pengambilan keputusan, metode AHP memiliki berbagai kelebihan yang membuatnya populer dalam berbagai bidang studi dan aplikasi praktis. Berikut adalah beberapa keuntungan utama yang ditawarkan oleh metode ini:

- **Integrasi Sistematis (Unity)**  
AHP mampu mengubah permasalahan yang kompleks dan tidak terstruktur menjadi suatu model analisis yang lebih sederhana, fleksibel, dan mudah dipahami melalui pendekatan Hierarkis.
- **Penanganan Kompleksitas (Handling Complexity)**  
Salah satu aspek penting dari AHP adalah kemampuannya untuk menganalisis masalah yang rumit dengan cara yang sistematis, menggunakan pendekatan deduktif dan struktur logis yang jelas.
- **Fleksibilitas dalam Hubungan Elemen (Interdependence Handling)**

Metode ini dapat diterapkan pada elemen-elemen sistem yang saling berkaitan maupun yang bersifat independen, tanpa mengharuskan adanya hubungan linier antar variabel.

- **Representasi Struktur Hierarkis (Hierarchy Representation)**  
AHP mencerminkan cara berpikir manusia secara alami, yaitu dengan mengelompokkan elemen-elemen sistem ke dalam tingkatan atau level hierarki, di mana setiap level berisi komponen-komponen sejenis yang saling terkait.
- **Pengukuran Prioritas yang Objektif (Measurement Capability)**  
AHP menyediakan skala penilaian dan teknik matematis untuk menentukan bobot prioritas masing-masing elemen secara kuantitatif berdasarkan perbandingan subjektif.
- **Evaluasi Konsistensi Logis (Consistency Evaluation)**  
Dalam prosesnya, AHP mempertimbangkan konsistensi logis dari penilaian yang dibuat, sehingga hasil yang diperoleh lebih valid dan dapat dipercaya.
- **Sintesa Solusi Menyeluruh (Synthesis of Overall Outcomes)**  
AHP tidak hanya memberikan bobot individual untuk tiap alternatif, tetapi juga menghasilkan sintesa keseluruhan untuk mengetahui seberapa layak atau sesuai masing-masing alternatif terhadap tujuan yang ingin dicapai.
- **Analisis *Trade-off* Antar Kriteria (*Trade-off Analysis*)**  
Melalui bobot relatif yang ditetapkan, AHP membantu pengambil keputusan dalam melakukan pertimbangan antar berbagai faktor penting, sehingga memungkinkan pemilihan alternatif terbaik berdasarkan preferensi dan tujuan spesifik.
- **Kombinasi Berbagai Pendapat (*Judgement Integration*)**  
AHP tidak mewajibkan adanya kesepakatan penuh antar para ahli atau pengambil keputusan, namun mampu menggabungkan berbagai penilaian yang berbeda menjadi satu kesimpulan yang objektif.
- **Proses Iteratif untuk Pemahaman Lebih Baik (*Process Repetition for Clarity*)**

Proses analisis dalam AHP dapat diulang berkali-kali, sehingga memungkinkan para stakeholder untuk merefleksikan kembali definisi masalah, memperbaiki penilaian, serta meningkatkan pemahaman terhadap isu yang sedang dievaluasi.

### **Keterbatasan Metode Analytic Hierarchy Process (AHP)**

Selain berbagai keunggulan yang dimiliki, metode AHP juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam penerapannya. Beberapa kelemahan utama dari pendekatan ini antara lain:

- **Ketergantungan Tinggi pada Penilaian Subjektif**

Salah satu batasan utama dari metode AHP adalah sangat bergantungnya hasil analisis pada masukan utama yang berasal dari persepsi para ahli atau pengambil keputusan. Karena penilaian tersebut bersifat subjektif, maka tingkat akurasi dan validitas model sangat dipengaruhi oleh pemahaman, pengalaman, serta objektivitas pemberi penilaian. Jika penilaian yang diberikan tidak tepat atau kurang relevan, maka dapat menghasilkan prioritas yang keliru dan berdampak pada keputusan akhir yang tidak optimal.

- **Tidak Adanya Uji Statistik untuk Validasi Model**

AHP merupakan metode matematis yang tidak dilengkapi dengan prosedur uji statistik untuk mengevaluasi signifikansi atau tingkat keyakinan (*confidence level*) terhadap hasil yang dihasilkan. Hal ini menyebabkan sulitnya memastikan sejauh mana bobot dan prioritas yang dihitung benar-benar representatif dan dapat digeneralisasi. Oleh karena itu, hasil dari AHP cenderung interpretatif dan bergantung pada konteks serta data masukan yang digunakan tanpa adanya parameter statistik yang mendukung.

## 2.4 SHELL MODEL

### 2.4.1 Pengertian SHELL MODEL

SHELL Model merupakan kerangka konseptual yang dikembangkan untuk menganalisis interaksi antar elemen dalam sistem kerja, terutama dalam konteks *human factors*. Nama "SHELL" berasal dari empat komponen utamanya, yaitu: Software, Hardware, Environment, dan Liveware. Konsep awal model ini pertama kali diperkenalkan oleh Edwards pada tahun 1972, dan kemudian dikembangkan lebih lanjut melalui representasi diagramatik yang dimodifikasi oleh Hawkins pada tahun 1975, guna memberikan gambaran visual yang lebih jelas mengenai hubungan antar komponen tersebut.

Salah satu pendekatan visual yang sering digunakan untuk menjelaskan SHELL Model adalah dengan menggunakan bentuk blok sebagai simbol berbagai elemen *human factors*. Meskipun diagram ini tidak mencakup semua aspek interaksi secara mendalam, namun cukup efektif sebagai alat bantu dasar untuk memahami prinsip-prinsip dasar dalam studi faktor manusia. Berikut penjelasan masing-masing komponen:

- **Software**  
Merujuk pada elemen-elemen non-fisik seperti aturan, prosedur operasional standar (*standard operating procedures*), kebijakan tertulis, manual kerja, dan dokumen-dokumen administratif lainnya yang menjadi panduan dalam pelaksanaan tugas.
- **Hardware**  
Mencakup perangkat keras atau fasilitas fisik yang digunakan dalam sistem kerja, seperti panel kontrol, perangkat tampilan (*display*), sistem fungsional, konfigurasi alat, serta permukaan dan kontrol mekanis yang berinteraksi langsung dengan pengguna.
- **Environment**  
Menggambarkan kondisi lingkungan tempat sistem bekerja, termasuk di dalamnya lingkungan fisik alami (seperti cuaca, suhu, cahaya), iklim sosial dan budaya organisasi, serta konteks ekonomi dan politik yang dapat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan.

- Liveware
- Merupakan elemen inti dalam SHELL Model, yaitu manusia sebagai operator atau pengguna sistem. Liveware mencakup individu-individu seperti pengendali lalu lintas udara (*controller*), anggota kru penerbangan, insinyur, teknisi pemelihara, staf manajemen, serta seluruh personil yang terlibat dalam proses operasional dan pengambilan keputusan.

Dengan memahami interaksi antar komponen tersebut, SHELL Model membantu dalam mengidentifikasi potensi sumber kesalahan, hambatan komunikasi, serta area perbaikan dalam desain sistem kerja yang berfokus pada manusia.

#### 2.4.2 Live ware

Dalam kerangka SHELL Model, *liveware* menjadi elemen utama sekaligus pusat perhatian karena merupakan komponen paling dinamis dan fleksibel di dalam sistem. Sebagai penggerak utama aktivitas operasional, manusia (*liveware*) memiliki kemampuan untuk menyesuaikan diri, membuat keputusan, serta beradaptasi terhadap perubahan kondisi secara cepat. Oleh karena itu, komponen lain seperti *software*, *hardware*, dan *environment* harus dirancang sedemikian rupa agar dapat mendukung optimalisasi kinerja manusia dan menghindari potensi kesalahan atau kegagalan sistem.

Meskipun memiliki tingkat adaptabilitas yang tinggi, *liveware* juga dikenal sebagai komponen yang paling sulit diprediksi dibandingkan elemen lainnya dalam model ini. Hal ini disebabkan oleh rentannya manusia terhadap berbagai faktor internal maupun eksternal yang dapat mempengaruhi kinerjanya. Faktor internal meliputi kondisi fisik seperti rasa lapar, tingkat kelelahan, motivasi, emosi, serta kemampuan kognitif. Sementara itu, faktor eksternal mencakup lingkungan kerja seperti pencahayaan, tingkat kebisingan, beban kerja yang berlebihan, serta kondisi ergonomi tempat kerja.

Karena kompleksitas dan variabilitas yang dimiliki oleh *liveware*, interaksi antara manusia dengan elemen-elemen lain dalam sistem harus selalu dievaluasi secara cermat guna meminimalkan risiko kesalahan manusia (*human error*) dan meningkatkan keselamatan serta efisiensi sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. 4 Komponen Liveware

<http://wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors>

### 2.4.3 Live ware – Live ware

Komponen Liveware – Liveware dalam SHELL Model menggambarkan interaksi atau hubungan antar individu dalam suatu sistem operasional. Elemen ini menitikberatkan pada aspek sosial dan komunikasi antar manusia yang secara langsung dapat mempengaruhi kinerja dan keselamatan sistem secara keseluruhan. Interaksi semacam ini mencakup berbagai dinamika kerja seperti kepemimpinan (*leadership*), kerja sama tim (*teamwork*), koordinasi antar personal, serta kemampuan berkomunikasi secara efektif dalam situasi tertentu.

Dalam konteks penerbangan, industri energi, transportasi, maupun lingkungan operasional berisiko tinggi lainnya, penting bagi organisasi untuk mengembangkan program pelatihan dan manajemen sumber daya manusia yang mampu meningkatkan kualitas interaksi antar liveware . Beberapa program yang umum diterapkan meliputi:

- Crew Resource Management (CRM)  
Program yang dirancang untuk meningkatkan koordinasi, pengambilan keputusan, dan komunikasi di antara anggota kru dalam lingkungan operasional kritis.
- ATC Equivalent  
Adaptasi prinsip CRM untuk petugas pengatur lalu lintas udara (Air Traffic Controllers ), guna meningkatkan kesadaran situasional dan koordinasi antar personil kontrol.
- Team Resource Management (TRM)  
Pendekatan yang lebih luas dari CRM, diterapkan dalam berbagai sektor untuk meningkatkan kerjasama tim dan alokasi sumber daya secara efektif.
- Line Oriented Flight Training (LOFT)  
Simulasi penerbangan yang dilakukan dalam kondisi nyata untuk melatih keterampilan tim dan mengukur respons kru terhadap berbagai situasi darurat.

Melalui pendekatan-pendekatan tersebut, peran interaksi antar manusia dalam SHELL Model menjadi semakin signifikan sebagai faktor kunci dalam mencegah kesalahan manusia (human error ) serta meningkatkan performa sistem secara keseluruhan



Gambar 2. 5 Liveware - Liveware

<http://wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors>

#### 2.4.4 Liveware – Software

Komponen Liveware – Software dalam SHELL Model menggambarkan interaksi antara manusia (liveware ) dengan aturan, prosedur, dan sistem informasi yang menjadi panduan dalam pelaksanaan tugas operasional. Software , dalam konteks ini, merujuk pada kumpulan pedoman normatif seperti hukum, regulasi, peraturan, standar operasional, kebijakan tertulis, kebiasaan, konvensi, serta tata cara yang umum diterapkan dalam suatu organisasi. Selain itu, istilah ini juga mencakup program berbasis komputer atau sistem digital yang dirancang untuk mendukung atau mengotomatisasi proses operasional.

Dalam upaya menjamin keselamatan dan efektivitas sistem, penting bagi pengguna (liveware ) untuk dapat memahami dan menerapkan software secara benar dan konsisten. Oleh karena itu, desain dan penyajian perangkat lunak harus dibuat sedemikian rupa sehingga mudah dimengerti, logis, serta selaras dengan kemampuan dan batasan manusia dalam memproses informasi. Penggunaan bahasa atau frasa yang ambigu, terlalu kompleks, atau rentan menimbulkan kesalahan interpretasi perlu dihindari guna mencegah potensi kesalahan manusia (human error ).

Selain itu, elemen-elemen visual seperti simbol, diagram, dan tata letak antarmuka sistem juga harus dirancang dengan prinsip ergonomi dan kognisi manusia. Kesalahan dalam penamaan, simbologi, atau konsep desain sistem dapat menyebabkan miskomunikasi antara manusia dan sistem, yang berpotensi memicu kebingungan, kelalaian, atau bahkan insiden serius.

Oleh sebab itu, integrasi antara liveware dan software harus selalu dievaluasi secara berkala, baik dari segi konten maupun bentuk penyajiannya, agar memenuhi prinsip keselamatan kerja dan efisiensi

operasional dalam sistem kerja berbasis manusia.



Gambar 2. 6 Liveware - Software

<http://wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors>

#### 2.4.5 Liveware – Hardware

Dalam kerangka SHELL Model, interaksi antara Liveware dan Hardware merupakan salah satu aspek penting yang sering menjadi fokus utama dalam studi tentang faktor manusia (human factors ). Hubungan ini menggambarkan cara manusia berinteraksi secara langsung dengan perangkat keras atau sistem fisik dalam lingkungan kerja, seperti panel kontrol, alat bantu visual (display ), instrumen operasional, hingga fasilitas pendukung seperti kursi, meja, dan layout ruang kerja.

Komponen hardware harus dirancang sedemikian rupa sehingga sesuai dengan karakteristik antropometri, ergonomi, dan kemampuan kognitif pengguna (liveware ). Desain yang tidak mempertimbangkan aspek manusia sebagai pengguna dapat menyebabkan ketidaknyamanan, penurunan produktivitas, hingga risiko terjadinya kesalahan manusia (human error ) yang berpotensi membahayakan keselamatan operasional.

Sebagai contoh penerapan, desain tempat duduk dalam lingkungan kerja harus memperhatikan postur tubuh, tinggi badan, serta distribusi tekanan pada tubuh untuk memastikan kenyamanan dan kinerja optimal pengguna. Selain itu, tata letak tombol kontrol, ukuran layar, warna indikator, dan responsivitas alat juga menjadi elemen penting dalam menciptakan sistem kerja yang ergonomis dan aman.

Oleh karena itu, integrasi yang baik antara liveware dan hardware menjadi kunci dalam meningkatkan efisiensi, kenyamanan, serta keselamatan dalam sistem operasional yang melibatkan interaksi manusia dan mesin.



Gambar 2. 7 Liveware - Software

<http://wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors>

#### 2.4.6 Liveware - Environment

Komponen *Liveware – Environment* dalam SHELL Model menggambarkan interaksi antara manusia (*liveware*) dengan lingkungan di mana sistem operasional berlangsung. Lingkungan merupakan elemen eksternal yang sering kali tidak sepenuhnya dapat dikontrol oleh manusia, seperti kondisi alam contohnya suhu udara, cuaca, tekanan atmosfer, tingkat kebisingan, intensitas cahaya, hingga paparan radiasi.

Meskipun faktor-faktor lingkungan tersebut bersifat eksternal dan tidak dapat sepenuhnya dicegah, perkembangan teknologi dan rekayasa desain sistem telah memungkinkan manusia untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkannya. Contohnya, penggunaan material pelindung terhadap radiasi, penyesuaian tata cahaya pada ruang kontrol, serta penerapan insulasi suara untuk mengurangi gangguan kebisingan.

Interaksi antara manusia dan lingkungan dalam konteks ini melibatkan berbagai disiplin ilmu untuk memastikan bahwa sistem tetap aman, efektif, dan nyaman bagi operator. Disiplin yang relevan mencakup bidang psikologi (untuk memahami respons persepsi dan emosi terhadap

lingkungan), fisiologi (dampak fisik terhadap tubuh), fisika (analisis fenomena lingkungan), serta teknik (solusi rekayasa untuk perlindungan dan adaptasi).

Dengan pendekatan multidisiplin tersebut, hubungan antara *liveware* dan *environment* menjadi salah satu area penting dalam studi *human factors*, yang bertujuan untuk meningkatkan keselamatan kerja, kenyamanan, serta kinerja manusia dalam berbagai kondisi operasional yang kompleks dan dinamis.



Gambar 2. 8 Liveware - Environment

<http://wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors>

SHELL Model dapat diterapkan sebagai kerangka analisis untuk mengidentifikasi area lemah atau titik rawan dalam sistem kerja pelayaran yang berpotensi memicu terjadinya kesalahan manusia (*human error*). Dengan mempertimbangkan interaksi antar komponen utama seperti *Liveware* (manusia), *Software* (prosedur dan aturan), *Hardware* (peralatan dan fasilitas), serta *Environment* (lingkungan operasional), model ini membantu dalam mendeteksi ketidaksesuaian atau disfungsi dalam hubungan antar elemen yang dapat menjadi penyebab tidak langsung dari insiden atau kecelakaan maritim. Penerapan SHELL Model dalam dunia pelayaran sangat relevan guna meningkatkan keselamatan operasional, efisiensi kerja, serta pengelolaan risiko yang lebih baik melalui pendekatan sistemik dan holistik terhadap faktor manusia dalam lingkungan kerja yang kompleks.

## 2.5 Penelitian Terdahulu

1. (Widyasto, 2016) menggunakan AHP dan SHELL untuk menganalisis

human error pada sistem kelistrikan kapal, dengan hasil bahwa faktor kesehatan SDM memiliki bobot tertinggi.

2. (Nurchahyo, 2021) menerapkan diagram Fishbone dan Pareto untuk mengidentifikasi akar penyebab kecelakaan laut.
3. KNKT (2019) mencatat bahwa lebih dari 80% kecelakaan laut di Indonesia disebabkan oleh faktor manusia.

Tinjauan pustaka ini menjadi dasar teoritis dalam menganalisis data kecelakaan kapal Tug & Barge pada PT. LSG periode 2015–2024.

