`

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Tugboat

Tugboat merupakan kapal kecil dengan tenaga mesin besar yang dirancang untuk membantu kapal lain dalam *manuver*, terutama kapal-kapal besar yang memiliki keterbatasan ruang gerak di pelabuhan atau perairan sempit. Fungsi utama tugboat adalah mendorong (*push*) atau menarik (*tow*) kapal yang lebih besar agar dapat bergerak dengan aman saat keluar-masuk pelabuhan, saat *docking*, atau ketika menghadapi kondisi darurat di laut.

Karakteristik Tugboat:

a. Dimensi kecil namun bertenaga besar – mesin tugboat biasanya memiliki rasio daya terhadap ukuran kapal yang tinggi, memungkinkan kapal ini bermanuver dengan kuat dan cepat.
b. Manuver tinggi – tugboat dilengkapi dengan sistem kemudi yang responsif dan propulsi dengan *thrust* kuat untuk melakukan gerakan presisi.
c. Operasi di area terbatas – tugboat bekerja di pelabuhan, alur sempit, dan sekitar fasilitas maritim, sehingga membutuhkan keandalan sistem kendali arah yang tinggi.

Tugboat memiliki peranan strategis dalam industri pelayaran, antara lain:

a. Membantu kapal besar bermanuver saat masuk atau keluar pelabuhan.
b. Menarik atau mendorong kapal tanpa tenaga (kapal rusak atau dalam keadaan darurat).
c. Membantu docking dan undocking kapal tanker, kontainer, atau kapal penumpang.
d. Operasi darurat seperti memadamkan kebakaran di laut (*firefighting* tugboat) atau penyelamatan kapal kandas.

`

Tabel 2. 1 karakteristik kapal

Parameter	Kisaran Nilai Umum	Keterangan Teknis
Panjang kapal (LOA)	20 – 35 meter	Ukuran kecil untuk manuver di area sempit.
Daya mesin utama	1.500 – 5.000 HP	Menghasilkan dorongan besar untuk menarik kapal besar.
Kecepatan maksimum	12 – 14 knot	Cukup untuk mengikuti kapal besar saat *escort*.
Gaya dorong (*bollard pull*)	30 – 60 ton	Menentukan kemampuan menarik beban.
Sistem *propulsi*	*Fixed Pitch Propeller (FPP), Azimuth Thruster, atau Kort Nozzle*	Disesuaikan dengan kebutuhan manuver.
Jenis kemudi	*Electro-Hydraulic Steering Gear*	Memberikan respon cepat dan presisi tinggi.

Dari tabel di atas terlihat bahwa meskipun tugboat memiliki ukuran relatif kecil, sistem tenaga dan kemudinya sangat kompleks karena kapal ini harus beroperasi dalam kondisi manuver berat dengan beban torsi tinggi.

1. Jenis-Jenis Tugboat

Berdasarkan fungsi dan wilayah operasinya, tugboat dapat dibedakan menjadi beberapa jenis utama [3]:

1. *Harbor Tug*: Tugboat jenis ini digunakan untuk membantu manuver kapal di sekitar area pelabuhan atau dermaga. Biasanya memiliki ukuran kecil, mesin ganda, dan sistem kemudi elektro-hidrolik untuk meningkatkan ketangkasan.
2. *Escort Tug*: Tugboat ini beroperasi sebagai kapal pengawal kapal besar seperti tanker atau LNG carrier saat memasuki perairan sempit. Kapal ini

`

dilengkapi sistem propulsi ganda (*azimuth atau Voith Schneider*) agar dapat bergerak ke segala arah.

3. *Ocean Tug*: Berfungsi menarik kapal atau barge jarak jauh di laut lepas. Biasanya memiliki daya mesin besar dan dilengkapi perlengkapan *towing wire* serta *winch* berkapasitas tinggi.
4. *Firefighting Tug*: *Tugboat* ini dilengkapi dengan fire monitor (pompa dan *nozzle* pemadam kebakaran) serta sistem pendingin lambung untuk penanganan kebakaran di pelabuhan atau kapal lain.
5. *Salvage Tug*: Digunakan dalam operasi penyelamatan *(salvage operations),* termasuk penarikan kapal karam atau kandas.

Klasifikasi tersebut memperlihatkan bahwa setiap jenis tugboat memiliki kebutuhan sistem kemudi berbeda, tergantung pada beban kerja dan kondisi operasionalnya. Misalnya, tugboat pelabuhan membutuhkan kemudi dengan respon cepat, sedangkan ocean tug memerlukan kemudi yang tahan terhadap tekanan hidrolik tinggi dalam durasi lama.

Sistem propulsi tugboat dirancang untuk menghasilkan gaya dorong tinggi dan kemampuan manuver ke segala arah. Beberapa sistem propulsi yang umum digunakan meliputi:

a. *Conventional Propeller* dengan *Rudder* – sistem konvensional yang terdiri dari baling-baling tetap (*fixed pitch propeller*) dan kemudi hidrolik di belakangnya.
b. *Azimuth Thruste*r *(Z-Drive)* – memungkinkan baling-baling berputar 360°, memberikan kemampuan manuver lateral tanpa mengubah arah haluan kapal.
c. *Voith Schneider Propeller* (VSP) – sistem vertikal dengan bilah berputar yang menghasilkan gaya dorong multi-arah, sangat efektif untuk tugboat pelabuhan.

`

Pada sistem ini, kemudi (*steering gear*) berfungsi mengarahkan aliran air dari *propeller* agar menghasilkan gaya belok. Sistem kemudi *elektro-hidrolik* dipilih karena mampu bekerja pada tekanan fluida tinggi (hingga 150 bar) dengan respon waktu kurang dari 3 detik [8].

2. Fungsi dan Peran Tugboat dalam Operasi Maritim

Peranan *tugboat* dalam sistem transportasi laut sangat strategis, terutama di area pelabuhan besar seperti Tanjung Priok, Tanjung Perak, dan Batam. Fungsi utamanya meliputi:

a. Membantu kapal besar bermanuver saat *docking* atau *undocking*.
b. Menarik kapal yang kehilangan tenaga penggerak (*dead ship*).
c. Menjaga kestabilan kapal tanker saat pengisian bahan bakar (STS *operation*).
d. Menjadi kapal penyelamat dalam operasi darurat (SAR).

Dalam konteks keselamatan pelayaran, tugboat sering disebut sebagai *guardian vessel*, karena kegagalan *tugboat* dalam mengendalikan kapal besar dapat berujung pada kecelakaan pelabuhan, tumpahan minyak, atau kerusakan fasilitas dermaga. Oleh sebab itu, sistem kemudi tugboat harus memiliki keandalan dan presisi tinggi [9].

3. Hubungan Tugboat dengan Sistem Kemudi

Keberhasilan operasi tugboat sangat bergantung pada kinerja sistem kemudi *(steering gear system).* Sistem kemudi berfungsi untuk mengatur arah aliran air yang keluar dari propeller, sehingga menghasilkan momen puntir (*yaw moment*) pada kapal. Pada *tugboat* yang memiliki sistem *propulsi azimuth*, kemudi sekaligus menjadi bagian dari sistem propulsi. Gangguan kecil seperti kebocoran fluida hidrolik, kerusakan pompa, katup macet, atau gangguan sinyal kontrol dapat mengakibatkan:

`

a. Hilangnya kemampuan belok kapal,
b. Tertundanya operasi penarikan,
c. Risiko tabrakan dengan kapal besar, dan
d. Kerusakan pada fasilitas pelabuhan.

Menurut Lutfiyanto [5], sistem kemudi tugboat termasuk dalam kategori *critical component* karena kegagalannya dapat menghentikan seluruh operasi kapal. Oleh karena itu, analisis keandalan dan pemeliharaan preventif harus dilakukan secara terencana.

4. Tantangan Operasional Tugboat

Tugboat bekerja dalam kondisi operasi yang berat dan dinamis. Beberapa tantangan yang dihadapi sistem kemudi antara lain:

a. Frekuensi manuver tinggi: tugboat harus sering berubah arah dengan cepat dalam ruang terbatas.
b. Beban mekanik tinggi: tekanan fluida dan torsi *rudder* mencapai nilai ekstrem.
c. Lingkungan korosif: paparan air laut mempercepat keausan *seal* dan pipa hidrolik.
d. Getaran mesin tinggi: dapat menyebabkan *fatigue* pada sambungan mekanis.

Tantangan tersebut menjadikan sistem kemudi tugboat sebagai fokus utama dalam manajemen keandalan kapal. Penggunaan metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* untuk menganalisis potensi kegagalan komponen menjadi penting agar risiko dapat diidentifikasi sejak dini sebelum menimbulkan kecelakaan [10].

`

2.2 Sistem Kemudi Kapal Tugboat

Sistem kemudi atau *steering gear system* merupakan salah satu sistem vital yang sangat menentukan keselamatan pelayaran, termasuk kapal tugboat. Sistem ini berfungsi untuk mengubah perintah arah dari *bridge control* menjadi gerakan mekanis pada daun kemudi (*rudder*), sehingga kapal dapat berbelok ke kiri (*port side*) atau ke kanan (*starboard side*) sesuai kebutuhan *manuver* [9].

Pada kapal *tugboat*, kecepatan dan ketepatan respons sistem kemudi menjadi faktor krusial karena tugboat harus bermanuver di area sempit dengan akurasi tinggi. Setiap keterlambatan atau gangguan sistem kemudi dapat mengakibatkan kecelakaan, baik terhadap kapal yang ditarik maupun terhadap fasilitas pelabuhan [4]. Kegagalan pada sistem kemudi, meskipun kecil, dapat menyebabkan kapal kehilangan kendali arah dan berpotensi menimbulkan kecelakaan laut seperti tabrakan, kandas, atau kerusakan fasilitas pelabuhan. ecara umum, sistem kemudi kapal dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu sistem kemudi manual dan sistem kemudi elektro-hidrolik (*electro-hydraulic steering gear).*

Menurut Wicaksono (2018), steering gear adalah salah satu permesinan bantu di kapal yang terhubung dengan kemudi dan menjadi alat kontrol utama untuk manuver kapal. Windiyandari (2016) menambahkan bahwa *steering gear* berperan dalam menjaga stabilitas arah gerak kapal, terutama saat menghadapi kondisi laut yang dinamis. Secara umum, *steering gear* pada kapal modern menggunakan sistem hidrolik karena lebih efisien, mudah dalam pengoperasian, dan memiliki daya yang cukup besar untuk menggerakkan *rudder* pada kecepatan penuh. Sistem ini bekerja berdasarkan prinsip tekanan fluida: ketika pompa hidrolik memberikan tekanan pada fluida (biasanya oli), tekanan tersebut diteruskan ke seluruh arah dan menghasilkan gaya pada aktuator (ram) yang selanjutnya menggerakkan *rudder*

`

Berdasarkan laporan investigasi dari Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), beberapa kasus kecelakaan kapal di Indonesia disebabkan oleh kegagalan sistem kemudi yang berasal dari:

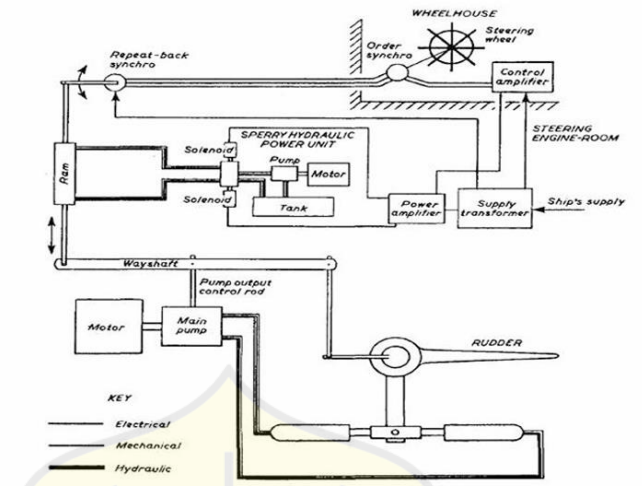
a. Kebocoran fluida hidrolik akibat keausan seal dan sambungan pipa,
b. Kerusakan pompa hidrolik atau katup pengarah (*valve failure*),
c. Gangguan sistem kontrol elektrik dan indikator sudut kemudi,
d. Kurangnya pemeliharaan berkala terhadap *steering gear* dan sistem pendukungnya.

1. Sistem Kemudi Kapal Tugboat

a. Sistem Kemudi Manual

Sistem kemudi manual merupakan sistem kemudi konvensional yang pengoperasiannya dilakukan secara langsung oleh manusia melalui roda kemudi (*steering wheel*). Sistem ini umumnya digunakan pada kapal berukuran kecil atau sebagai sistem cadangan (*emergency steering system*) pada kapal modern. Pada sistem ini, perintah kemudi diberikan oleh operator dengan memutar roda kemudi yang kemudian diteruskan melalui sistem mekanis menuju poros kemudi (*rudder stock*). Gerakan tersebut akan mengubah posisi daun kemudi sehingga arah kapal dapat dikendalikan sesuai keinginan operator. Secara prinsip, cara kerja sistem kemudi manual dimulai dari input berupa putaran roda kemudi, kemudian diteruskan melalui poros dan *mekanisme* penghubung hingga menghasilkan gerakan pada *rudder*. Perubahan posisi *rudder* ini akan mengubah arah aliran air di buritan kapal, sehingga menghasilkan gaya belok pada kapal. Sistem kemudi manual memiliki konstruksi yang relatif sederhana dan mudah dioperasikan, namun memiliki keterbatasan dalam hal kecepatan respon dan kemampuan menghasilkan gaya besar. Oleh karena itu, pada kapal *tugboat* yang membutuhkan *manuver* cepat dan presisi tinggi, sistem ini umumnya hanya digunakan sebagai sistem darurat.

`



Gambar 2. 1 Sistem kemudi manual

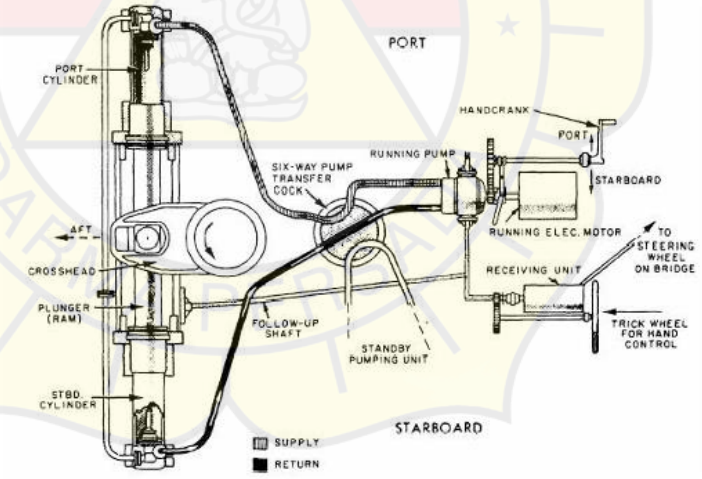
Sumber: website

Gambar sistem kemudi manual menunjukkan hubungan langsung antara roda kemudi, poros penggerak, dan daun kemudi. Ketika roda kemudi diputar, gerakan tersebut diteruskan secara mekanis hingga ke *rudder* tanpa bantuan sistem otomatis atau hidrolik kompleks. Aliran gaya bersifat langsung (*direct transmission*), sehingga sangat bergantung pada tenaga operator.

a. Sistem kemudi elektro-hidrolik

Sistem kemudi elektro-hidrolik merupakan sistem kemudi modern yang banyak digunakan pada kapal tugboat. Sistem ini menggabungkan tenaga listrik dan sistem hidrolik untuk menghasilkan gaya yang besar serta kontrol yang lebih presisi. Pada sistem ini, perintah kemudi diberikan dari anjungan dalam bentuk sinyal listrik, yang kemudian diteruskan ke sistem kontrol dan mengaktifkan motor listrik. Motor listrik tersebut menggerakkan pompa hidrolik untuk menghasilkan tekanan fluida, yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan aktuator (silinder hidrolik atau *vane*). Aktuator ini akan menggerakkan *tiller arm* yang terhubung dengan *rudder*, sehingga kapal dapat berbelok. Sistem ini

bekerja berdasarkan prinsip tekanan fluida, di mana tekanan yang dihasilkan oleh pompa akan diteruskan ke seluruh sistem dan menghasilkan gaya mekanis yang cukup besar untuk menggerakkan *rudder*, bahkan pada kondisi beban tinggi. Keunggulan utama sistem elektro-hidrolik adalah kemampuannya dalam memberikan respon cepat, tenaga besar, serta kontrol yang lebih stabil dibandingkan sistem manual. Hal ini sangat penting bagi tugboat yang harus melakukan manuver secara cepat dan akurat dalam ruang terbatas. Namun demikian, sistem ini memiliki kompleksitas yang lebih tinggi dan memerlukan perawatan rutin, terutama pada komponen seperti pompa hidrolik, *valve*, *seal*, dan fluida hidrolik. Kerusakan pada komponen-komponen tersebut dapat menyebabkan gangguan serius pada sistem kemudi, seperti penurunan tekanan atau kehilangan kendali arah kapal.



Gambar 2. 2 Sistem kemudi elektro-hidrolik

Sumber: Website

Gambar sistem kemudi elektro-hidrolik menunjukkan rangkaian komponen utama, yaitu motor listrik, pompa hidrolik, tangki oli, katup pengarah (*control valve*), dan silinder hidrolik (ram). Aliran kerja dimulai dari sinyal listrik yang mengaktifkan motor, kemudian

`

pompa menghasilkan tekanan fluida yang dialirkan ke silinder untuk menggerakkan *rudder*. Sistem ini juga dilengkapi sensor dan indikator sudut kemudi untuk memastikan akurasi posisi.

Sistem kemudi manual dan elektro-hidrolik memiliki perbedaan yang signifikan dalam hal sumber tenaga, cara kerja, dan kinerja operasional. Sistem manual mengandalkan tenaga manusia sehingga memiliki keterbatasan dalam menghasilkan gaya dan kecepatan respon. Sebaliknya, sistem elektro-hidrolik menggunakan tenaga listrik dan fluida bertekanan tinggi sehingga mampu menghasilkan gaya besar dengan respon yang cepat dan presisi. Pada kapal tugboat, sistem elektro-hidrolik menjadi pilihan utama karena mampu memenuhi kebutuhan *manuver* yang kompleks. Sementara itu, sistem manual tetap digunakan sebagai sistem cadangan untuk memenuhi standar keselamatan pelayaran sesuai regulasi IMO dan SOLAS. Sistem ini bekerja di bawah tekanan tinggi dan beban besar, sehingga rentan terhadap kerusakan akibat keausan komponen maupun kesalahan operasi. Untuk mengantisipasi risiko tersebut, dibutuhkan pendekatan analisis yang mampu mengidentifikasi potensi kegagalan secara sistematis dan memberikan prioritas penanganan berdasarkan tingkat risikonya.

Salah satu metode yang terbukti efektif adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) — metode analisis keandalan yang digunakan untuk menilai kemungkinan, tingkat keparahan, serta kemampuan deteksi dari setiap mode kegagalan komponen sistem. Dengan menerapkan metode *Failure Mode and Effect Analysis (*FMEA) pada sistem kemudi kapal *tugboat*, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan identifikasi mode kegagalan yang dominan, menghitung *Risk Priority Number* (RPN), dan menyusun strategi perawatan berbasis risiko (*Risk-Based Maintenance*). Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada peningkatan keselamatan, efisiensi, dan keandalan operasional kapal-kapal sebagai penyelenggara transportasi laut nasional.

`

2. Prinsip Dasar Sistem Kemudi

Sistem kemudi bekerja dengan mengubah energi fluida bertekanan menjadi energi mekanis untuk menggerakkan *tiller arm* yang terhubung dengan poros kemudi (*rudder stock*). Pada umumnya, sistem ini menggunakan tekanan hidrolik yang dihasilkan oleh pompa dan dikendalikan oleh katup pengarah (*directional control valve*). Dalam sistem ini, perintah kemudi dari anjungan dikirim melalui sinyal elektrik ke ruang kemudi (*steering gear room*). Motor listrik menggerakkan pompa hidrolik untuk menghasilkan tekanan fluida, yang dialirkan melalui pipa ke silinder aktuator. Fluida yang masuk ke salah satu sisi aktuator menyebabkan gerakan linier yang kemudian diubah menjadi gerakan putar oleh *tiller arm* dan diteruskan ke *rudder stock* [11].

Tabel 2. 2 Sistem Kemudi Mekanik

Sistem Kemudi Mekanik		
No	**Komponen**	**Fungsi**
a	*Steering Wheel / Hand Wheel*	Memberikan input awal arah kemudi dari operator ke sistem kemudi
b	*Steering Column / Shaft*	Meneruskan putaran dari steering wheel ke sistem penggerak kemudi
c	*Tiller Arm*	Mengubah gerakan linear aktuator menjadi putaran rudder stock
d	*Connecting Rod*	Meneruskan gaya dan gerakan dari silinder ke tiller arm
e	*Silinder Hidrolik*	Mengubah tekanan oli hidrolik menjadi gerakan mekanik kemudi
f	*Pompa Hidrolik*	Menyediakan tekanan oli untuk sistem kemudi
g	*Hydraulic Hose*	Menyalurkan oli bertekanan dari pompa ke silinder
h	*Rudder Stock*	Poros utama yang menghubungkan sistem kemudi dengan daun kemudi
i	*Rudder Blade*	Mengubah arah aliran air untuk mengendalikan kapal
j	*Pintle Bearing / Gudgeon*	Menopang rudder dan mengurangi gesekan saat berputar
k	*Packing Gland*	Mencegah masuknya air laut melalui poros kemudi

`

Sistem Kemudi Mekanik		
No	**Komponen**	**Fungsi**
l	*Stiffening Web Rudder*	Memperkuat struktur daun kemudi terhadap beban hidrodinamis

Tabel 2. 3 Sistem Kemudi Elektrik

Sistem Kemudi Elektrik		
No	**Komponen**	**Fungsi**
a	*Electric Motor*	Menggerakkan pompa hidrolik atau sistem kemudi elektrik
b	*Motor Starter Panel*	Mengontrol start–stop motor dan proteksi listrik
c	*Solenoid Valve*	Mengatur arah aliran oli hidrolik berdasarkan perintah control
d	*Joy Stick / Control Lever*	Memberikan perintah arah kemudi secara elektrik
e	*Rudder Angle Indicator*	Menunjukkan posisi sudut kemudi secara aktual
f	*Wiring / Kabel*	Menyalurkan daya dan sinyal kontrol ke sistem kemudi
g	*Alarm & Indicator System*	Memberikan peringatan jika terjadi gangguan kemudi
h	*Emergency Steering Control*	Mengendalikan kemudi saat sistem utama gagal

3. Daun Kemudi (*Rudder*)

Daun kemudi (*rudder*) merupakan salah satu bagian penting pada kapal yang berfungsi untuk mengubah, mengatur, dan mempertahankan arah gerak kapal. Daun kemudi umumnya dipasang pada bagian buritan kapal dan bekerja dengan memanfaatkan aliran air yang dihasilkan oleh gerakan kapal maupun putaran propeller. Ukuran dan bentuk daun kemudi disesuaikan dengan ukuran, panjang, serta sarat kapal agar mampu memberikan kemampuan olah gerak yang baik.

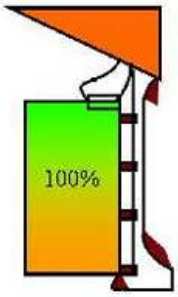
`

Kemampuan kapal dalam melakukan manuver perlu memenuhi standar yang direkomendasikan oleh *International Maritime Organization* (IMO). Salah satu pengujian yang digunakan adalah zig-zag maneuver, yaitu pengujian dengan membelokkan kemudi secara bergantian ke arah kanan (*starboard*) dan kiri (*portside*) dengan sudut tertentu, seperti 10°/10° atau 20°/20°. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan dan kecepatan respons kapal terhadap perubahan arah kemudi. Dalam pengujian tersebut juga diamati sudut overshoot, yaitu besarnya penyimpangan arah kapal setelah kemudi dibelokkan ke arah yang berlawanan.

Pengujian kemampuan manuver dilakukan pada kondisi perairan yang mendukung, seperti perairan dalam atau tidak terbatas, kondisi lingkungan yang tenang, kapal dalam kondisi sarat penuh dan even keel, serta kapal bergerak dalam kondisi stabil. IMO juga menetapkan kriteria manuverabilitas yang harus dipenuhi kapal, baik saat beroperasi di perairan dalam maupun di perairan terbatas, sekitar pelabuhan, dan perairan dangkal. Dengan demikian, daun kemudi memiliki peranan penting dalam menjaga kemampuan manuver, pengendalian arah, serta keselamatan operasional kapal [12].

A. Penggolongan Menurut Bentuknya

a. Kemudi biasa (*unbalanced*): kemudi yang seluruh daun kemudinya berada dibelakang poros putarnya. Kemudi ini umumnya di pasang pada kapal-kapal kecil dan yang mempunyai baling- baling tunggal.

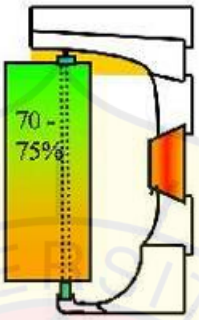


Gambar 2. 3 Kemudi biasa *(unbalanced)*

Sumber: Website

`

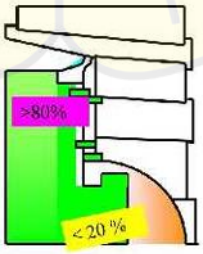
b. Kemudi balansir (*balanced*): Jenis kemudi yang mempunyai luas daun yang terbagi atas dua bagian, yaitu didepan dan dibelakang sumbu putar *Balanced Rudder* dibuat untuk mengurangi kekuatan kemudi dengan mengimbangi luas daun kemudi didepan dan dibelakang poros putar, umumnya luas daun kemudi yang didepan poros putar ialah 20-30 % dari luas keseluruhan



Gambar 2. 4 Kemudi balansir *(balanced)*

Sumber: Website

c. Semi *Balanced Rudder*: Jenis kemudi yang bagian atas termasuk kemudi biasa, tetapi bagian bawah merupakan kemudi balansir. Kemudi bagian bawah dan atas tetap merupakan suatu bagian atau Perpaduan daun kemudi *unbalanced* dengan daun kemudi *balanced*, ½ bagian atas dari daun kemudi semi *balanced* dibuat seperti daun kemudi unbalanced dan ½ bagian bawah seperti daun kemudi *balannced.*



Gambar 2. 5 Semi Balanced Rudder

Sumber: Website

`

B. Penggolongan Menurut Bangunannya

a. *Single Plate Rudder* (Daun Kemudi Pelat Tunggal) yang terbuat dari satu pelat baja.
b. *Double Plate Rudder* (Daun Kemudi Pelat Ganda) ada dua jenis daun kemudi pelat ganda yaitu satu terdiri dari 2 pelat tegak daun kemudi yang tebal membungkus lengan daun kemudi dan yg lain terdiri dari rangka datar dan tegak daun kemudi dan dibungkus oleh pelat baja menjadikan bentuk dari daun kemudi tersebut (*stream Lined*)

5. Sistem Proteksi dan *Alarm*

Sebagai bagian dari sistem keselamatan kapal, sistem kemudi tugboat harus dilengkapi dengan mekanisme proteksi sesuai regulasi IMO dan SOLAS[13]. Fitur-fitur keselamatan yang wajib tersedia antara lain:

1. *Alarm* kehilangan daya listrik – aktif bila suplai daya ke motor utama terganggu.
2. *Alarm* tekanan hidrolik rendah – mendeteksi penurunan tekanan fluida di bawah ambang batas.
3. *Emergency Steering Position* – memungkinkan pengoperasian kemudi secara manual dari ruang kemudi jika sistem kontrol utama gagal.
4. *Automatic Isolation Valve* – menutup aliran fluida saat kebocoran besar terdeteksi.

Fitur-fitur ini memastikan sistem kemudi tetap berfungsi dalam kondisi darurat, serta memberikan waktu bagi awak kapal untuk melakukan tindakan korektif sebelum kehilangan kendali sepenuhnya.

2.3 Mode Kegagalan Sistem Kemudi

Identifikasi mode kegagalan merupakan tahap awal dalam metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) yang bertujuan untuk mengetahui komponen-komponen sistem kemudi yang berpotensi mengalami kegagalan, penyebab kegagalan, dampak yang ditimbulkan, metode pendeteksian, serta tindakan pencegahan yang telah diterapkan [14].

`

Data identifikasi diperoleh melalui hasil observasi, dokumentasi *Planned Maintenance System* (PMS), serta kuesioner yang diisi oleh dua responden yang memiliki pengalaman dalam pengoperasian dan perawatan sistem kemudi kapal tugboat. Sistem kemudi kapal tugboat dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu sistem kemudi mekanik dan sistem kemudi elektrik. Masing-masing komponen memiliki karakteristik kegagalan yang berbeda sesuai dengan fungsi dan kondisi operasionalnya [3].

Objek penelitian dalam penelitian ini adalah sistem kemudi (*steering gear system*) pada kapal tugboat. Sistem kemudi merupakan salah satu sistem vital yang berfungsi mengendalikan arah gerak kapal sesuai dengan perintah dari operator di anjungan (*bridge*)[15]. Keandalan sistem kemudi sangat menentukan keselamatan pelayaran, terutama pada saat kapal melakukan manuver di pelabuhan, menarik kapal (*towing*), mendorong kapal (*pushing*), maupun beroperasi di alur pelayaran yang sempit.

Sistem kemudi kapal tugboat yang menjadi objek penelitian terdiri atas dua kelompok utama, yaitu sistem kemudi mekanik dan sistem kemudi elektrik. Sistem kemudi mekanik terdiri dari roda kemudi (*steering wheel*), poros kemudi (*steering shaft*), *tiller arm*, *connecting rod,* silinder hidrolik, pompa hidrolik, selang hidrolik, *rudder stock*, daun kemudi (*rudder blade*), *bearing rudder, packing gland, dan stiffening web* [16].

Sementara itu, sistem kemudi elektrik terdiri dari motor listrik, panel *starter, solenoid valve, joystick* atau *control lever,* indikator sudut kemudi (*rudder angle indicator*), kabel (*wiring*), sistem *alarm*, dan *emergency steering*. Penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi setiap komponen sistem kemudi untuk mengetahui riwayat kegagalan, penyebab kegagalan, dampak yang ditimbulkan, metode pendeteksian, serta tindakan pencegahan yang telah diterapkan selama pengoperasian kapal[15].

`

Informasi tersebut diperoleh melalui observasi lapangan, dokumentasi *Planned Maintenance System* (PMS), serta pengisian kuesioner oleh dua responden yang memiliki pengalaman dalam pengoperasian dan perawatan sistem kemudi kapal tugboat. Selanjutnya, setiap komponen diberikan penilaian berdasarkan tiga parameter dalam metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D).

Nilai ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) sehingga dapat diketahui tingkat risiko masing-masing komponen. Hasil perhitungan RPN menjadi dasar dalam menentukan komponen yang memiliki prioritas tertinggi untuk dilakukan tindakan perbaikan maupun peningkatan program perawatan[17].

Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai kondisi keandalan sistem kemudi kapal tugboat serta komponen-komponen yang paling berisiko mengalami kegagalan. Hasil analisis tersebut dapat menjadi acuan bagi perusahaan pelayaran dalam meningkatkan efektivitas pemeliharaan sistem kemudi sehingga keselamatan dan keandalan operasional kapal dapat tetap terjaga.[8]

Tabel 2. 4 Kegagalan Sistem Kemudi Mekanik

No	Komponen	Kegagalan
a	*Steering Wheel / Hand Wheel*	Roda kemudi mengalami keausan, putaran menjadi berat atau macet sehingga input kemudi dari operator tidak dapat diteruskan secara optimal.
b	*Steering Column / Shaft*	Poros kemudi mengalami keausan, bengkok, retak, atau sambungan menjadi longgar sehingga putaran dari roda kemudi tidak tersalurkan dengan baik.

`

No	Komponen	Kegagalan
c	*Tiller Arm*	*Tiller arm* mengalami retak, deformasi (bengkok), atau keausan pada titik sambungan sehingga pergerakan *rudder stock* menjadi tidak maksimal.
d	*Connecting Rod*	*Connecting rod* mengalami keausan, bengkok, retak, atau patah sehingga gaya dari silinder hidrolik tidak dapat diteruskan secara efektif ke *tiller arm*.
e	Silinder Hidrolik	Silinder hidrolik mengalami kebocoran pada *seal*, keausan piston, atau kerusakan batang piston yang menyebabkan tekanan hidrolik menurun dan gerakan kemudi melemah.
f	Pompa Hidrolik	Pompa hidrolik mengalami penurunan tekanan akibat keausan komponen internal, filter oli tersumbat, atau kerusakan mekanis sehingga suplai tekanan oli tidak mencukupi.
g	*Hydraulic Hose*	Selang hidrolik mengalami kebocoran, retak, pecah, atau sambungan longgar yang menyebabkan berkurangnya tekanan oli pada sistem kemudi.
h	*Rudder Stock*	*Rudder stock* mengalami keausan, korosi, bengkok, atau retak akibat beban kerja yang tinggi sehingga kemampuan meneruskan putaran ke daun kemudi berkurang.
i	*Rudder Blade*	Daun kemudi mengalami deformasi (bengkok), retak, korosi, atau kerusakan akibat benturan sehingga efektivitas pengendalian arah kapal menurun.

`

No	Komponen	Kegagalan
j	*Pintle Bearing / Gudgeon*	*Pintle bearing* mengalami keausan, korosi, kelonggaran, atau macet sehingga gesekan meningkat dan pergerakan rudder menjadi lebih berat.
k	*Packing Gland*	*Packing gland* mengalami keausan atau kerusakan *seal* sehingga terjadi kebocoran air laut pada area poros kemudi dan berpotensi merusak komponen di sekitarnya.
l	*Stiffening Web Rudder*	*Stiffening web* mengalami retak, deformasi, atau kerusakan pada sambungan las sehingga kekuatan struktur daun kemudi berkurang dalam menahan beban hidrodinamis.

Tabel 2. 5 Kegagalan Sistem Kemudi Elektrik

No	**Komponen**	**Kegagalan**
a	*Electric Motor*	Motor listrik mengalami overheat, penurunan performa, kerusakan bearing, atau gagal beroperasi sehingga tidak mampu menggerakkan pompa hidrolik maupun sistem kemudi.
b	*Motor Starter Panel*	Panel starter mengalami trip, kerusakan kontaktor, *relay*, atau komponen kelistrikan sehingga motor tidak dapat dihidupkan atau dihentikan dengan normal.
c	*Solenoid Valve*	*Solenoid valve* mengalami kerusakan koil, *spool valve* macet, atau gangguan aliran oli sehingga arah aliran hidrolik tidak berubah sesuai perintah kontrol.

`

No	Komponen	Kegagalan
d	*Joy Stick / Control Lever*	*Joy stick* mengalami kerusakan sensor, keausan *mekanisme*, atau gangguan sinyal sehingga perintah arah kemudi tidak dapat diteruskan dengan akurat.
e	*Rudder Angle Indicator*	Indikator sudut kemudi mengalami kesalahan pembacaan, kehilangan sinyal, atau kerusakan sensor sehingga posisi aktual daun kemudi tidak dapat ditampilkan dengan benar.
f	*Wiring* / Kabel	Kabel mengalami putus, korsleting, isolasi rusak, atau sambungan longgar sehingga pasokan daya maupun sinyal kontrol ke sistem kemudi terganggu.
g	*Alarm & Indicator System*	Sistem alarm mengalami kegagalan fungsi, kerusakan indikator, atau gangguan rangkaian listrik sehingga peringatan dini terhadap gangguan sistem kemudi tidak dapat diberikan.
h	*Emergency Steering Control*	Sistem *emergency steering* mengalami kerusakan kontrol, kegagalan perpindahan mode, atau tidak dapat dioperasikan sehingga sistem kemudi cadangan tidak berfungsi saat sistem utama mengalami kegagalan.

2.4 Jenis Kegagalan Sistem Kemudi

Kegagalan pada sistem kemudi *(steering system)* merupakan kondisi ketika satu atau lebih komponen tidak lagi mampu menjalankan fungsinya sesuai dengan spesifikasi sehingga dapat mengurangi performa, kestabilan, dan keselamatan kendaraan. Kegagalan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti

`

keausan, pembebanan berulang, benturan, korosi, degradasi material, suhu operasi, hingga kesalahan manufaktur. Salah satu jenis kegagalan yang umum adalah [6]:

1. *abrasive wear failure*, yaitu kegagalan akibat pengikisan permukaan komponen oleh partikel keras atau gesekan dengan material yang lebih keras. Pada sistem kemudi, kegagalan ini sering terjadi pada *steering rack, pinion gear, tie rod, dan ball joint*, sehingga menyebabkan permukaan komponen menjadi aus, timbul kelonggaran pada kemudi, dan menurunnya presisi pengendalian kendaraan[6].
2. *Adhesive wear failure*, yang terjadi ketika dua permukaan logam saling bergesekan dalam kondisi pelumasan yang tidak memadai sehingga terjadi perpindahan material dari satu permukaan ke permukaan lainnya. Kondisi ini dapat menyebabkan goresan, *galling*, atau *scuffing* pada komponen, meningkatkan gesekan, serta mempercepat kerusakan pada sistem kemudi[18].
3. *Fatigue failure*, yaitu kegagalan akibat pembebanan berulang (*cyclic loading*) dalam jangka waktu lama. Meskipun tegangan yang diterima berada di bawah kekuatan maksimum material, pembebanan yang terus-menerus dapat menimbulkan retakan kecil yang berkembang hingga menyebabkan komponen patah. Pada sistem kemudi, kegagalan ini sering ditemukan pada *steering shaft, tie rod, dan ball joint.*
4. *Impact failure* merupakan kegagalan yang disebabkan oleh benturan atau beban kejut yang besar, misalnya ketika kendaraan menghantam lubang, trotoar, atau mengalami kecelakaan. Benturan tersebut dapat menyebabkan komponen seperti *steering knuckle, tie rod, atau steering rack* mengalami deformasi, retak, atau patah sehingga mengganggu pengendalian kendaraan.
5. *Corrosion failure* terjadi akibat reaksi kimia atau elektrokimia antara material logam dengan lingkungan, seperti air, kelembapan, atau garam, yang mengakibatkan terbentuknya korosi. Korosi menyebabkan penurunan ketebalan dan kekuatan material sehingga meningkatkan risiko kerusakan pada komponen sistem kemudi[16].

`

6. *Degradation failure*, yaitu kegagalan akibat penurunan sifat material secara bertahap karena pengaruh usia, panas, sinar *ultraviolet*, bahan kimia, maupun lingkungan operasi. Pada sistem kemudi, *degradasi* sering terjadi pada *seal*, boot karet, *bushing*, dan selang *power steering*, sehingga mengakibatkan kebocoran, hilangnya elastisitas, atau penurunan fungsi komponen.
7. *Wear-out failure* merupakan kegagalan yang terjadi karena komponen telah mencapai batas umur pakainya. Penggunaan dalam jangka waktu lama menyebabkan komponen seperti *ball joint, bearing, dan tie rod end* mengalami keausan alami yang ditandai dengan bertambahnya celah, munculnya bunyi, dan menurunnya akurasi kemudi.
8. *Thermal failure* adalah kegagalan akibat pengaruh suhu yang terlalu tinggi, terlalu rendah, atau perubahan temperatur yang berulang. Paparan temperatur ekstrem dapat mengubah sifat mekanis material, merusak pelumas, serta menyebabkan deformasi atau retak pada komponen. Pada sistem kemudi, kegagalan ini dapat terjadi pada motor *Electric Power Steering* (EPS), pompa *power steering, seal*, dan selang hidrolik.
9. *Overload failure*, yaitu kegagalan yang terjadi ketika komponen menerima beban melebihi kapasitas desainnya sehingga mengalami deformasi permanen atau patah. Beban berlebih dapat disebabkan oleh benturan keras, modifikasi kendaraan yang tidak sesuai, atau kondisi operasi yang ekstrem.
10. *Buckling failure* merupakan kegagalan akibat beban tekan yang menyebabkan komponen kehilangan kestabilan dan melengkung. Jenis kegagalan ini umumnya terjadi pada komponen berbentuk batang yang menerima gaya tekan.
11. *Creep failure* adalah deformasi permanen yang terjadi secara perlahan akibat pembebanan konstan pada temperatur tinggi dalam waktu lama. Walaupun lebih sering dijumpai pada komponen mesin industri, fenomena ini tetap dikenal dalam kajian kegagalan material.

`

12. *Fretting failure* terjadi akibat gerakan relatif yang sangat kecil dan berulang di antara dua permukaan yang saling bersentuhan sehingga menyebabkan keausan lokal dan korosi.
13. *Erosion failure*, yaitu kegagalan akibat pengikisan permukaan material oleh aliran fluida atau partikel padat yang bergerak dengan kecepatan tinggi.
14. *Cavitation failure* juga dapat terjadi akibat pecahnya gelembung uap di dalam fluida sehingga menghasilkan tumbukan mikro yang merusak permukaan logam.
15. *Fracture failure* merupakan kegagalan berupa patahnya komponen, baik secara ulet (*ductile fracture*) maupun getas (*brittle fracture*),
16. *Plastic deformation failure* terjadi ketika komponen mengalami perubahan bentuk permanen akibat tegangan yang melebihi batas luluh (*yield strength*) material.
17. *Stress corrosion cracking* (SCC), yaitu retak yang terjadi akibat kombinasi antara tegangan tarik dan lingkungan yang korosif,
18. *Hydrogen embrittlement*, yaitu kegagalan akibat penyerapan atom hidrogen ke dalam logam sehingga material menjadi rapuh dan mudah patah.
19. *Oxidation failure* terjadi karena oksidasi pada temperatur tinggi yang mengurangi kualitas permukaan material.
20. *Lubrication failure* disebabkan oleh pelumasan yang tidak memadai atau pelumas yang telah terkontaminasi sehingga gesekan meningkat dan mempercepat keausan komponen.
21. *Misalignment failure* terjadi akibat ketidaksejajaran posisi komponen yang menyebabkan distribusi beban tidak merata,
22. *Seal failure* merupakan kerusakan pada seal yang menyebabkan kebocoran fluida atau pelumas.
23. *Bearing failure* terjadi akibat keausan, korosi, kelelahan material, atau pelumasan yang buruk pada bantalan.

`

24. *Electrical failure* juga menjadi salah satu penyebab kegagalan, misalnya akibat kerusakan sensor, motor listrik, kabel, atau *Electronic Control Unit* (ECU).
25. *Manufacturing failure* merupakan kegagalan yang berasal dari cacat proses manufaktur, seperti porositas, retak akibat pengelasan, kesalahan perlakuan panas, atau penyimpangan dimensi komponen.

Secara keseluruhan, berbagai jenis kegagalan tersebut dapat menurunkan kinerja sistem kemudi dan meningkatkan risiko kecelakaan apabila tidak dideteksi serta ditangani dengan baik. Oleh karena itu, pemeriksaan berkala, pelumasan yang sesuai, penggantian komponen yang telah aus, serta penggunaan komponen yang memenuhi standar kualitas merupakan langkah penting untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem kemudi kendaraan[16].

Tabel 2. 6 Jenis Kegagalan Sistem Kemudi

No	Jenis Kegagalan	Penjelasan Singkat
1	*Abrasive Wear Failure*	Kegagalan akibat pengikisan permukaan komponen oleh partikel keras atau gesekan dengan material yang lebih keras.
2	*Adhesive Wear Failure*	Kegagalan akibat kontak langsung dua permukaan logam sehingga terjadi perpindahan material (*galling* atau *scuffing*).
3	*Fatigue Failure*	Kegagalan akibat pembebanan berulang *(cyclic loading)* yang menyebabkan retak hingga patah.
4	*Impact Failure*	Kegagalan akibat benturan atau beban kejut yang melebihi kekuatan material.
5	*Corrosion Failure*	Kegagalan akibat reaksi kimia atau elektrokimia yang menyebabkan korosi pada material.
6	*Degradation Failure*	Kegagalan akibat penurunan sifat material secara bertahap karena usia, lingkungan, atau kondisi operasi.
7	*Wear-out Failure*	Kegagalan karena komponen telah mencapai batas umur pakainya sehingga mengalami keausan alami.
8	*Thermal Failure*	Kegagalan akibat suhu tinggi, suhu rendah, atau perubahan temperatur yang menyebabkan kerusakan material.

`

No	Jenis Kegagalan	Penjelasan Singkat
9	*Overload Failure*	Kegagalan akibat beban yang diterima melebihi kapasitas desain komponen sehingga terjadi deformasi atau patah.
10	*Buckling Failure*	Kegagalan akibat beban tekan yang menyebabkan komponen melengkung atau kehilangan kestabilan.
11	*Creep Failure*	Kegagalan akibat deformasi permanen karena beban konstan pada temperatur tinggi dalam waktu lama.
12	*Fretting Failure*	Kegagalan akibat gerakan relatif yang sangat kecil antara dua permukaan sehingga menimbulkan keausan dan korosi.
13	*Erosion Failure*	Kegagalan akibat aliran fluida atau partikel berkecepatan tinggi yang mengikis permukaan material.
14	*Cavitation Failure*	Kegagalan akibat pecahnya gelembung uap pada fluida yang menghasilkan benturan mikro dan merusak permukaan logam.
15	*Fracture Failure*	Kegagalan berupa patahnya komponen, baik secara ulet (*ductile fracture*) maupun getas (*brittle fracture*).
16	*Plastic Deformation Failure*	Kegagalan ketika komponen berubah bentuk secara permanen akibat tegangan melebihi batas luluh (*yield strength*).
17	*Stress Corrosion Cracking (SCC)*	Retak akibat kombinasi tegangan tarik dan lingkungan korosif.
18	*Hydrogen Embrittlement*	Kegagalan akibat penyerapan atom hidrogen yang membuat material menjadi rapuh dan mudah patah.
19	*Oxidation Failure*	Kegagalan akibat oksidasi pada temperatur tinggi yang menyebabkan permukaan material rusak.
20	*Lubrication Failure*	Kegagalan akibat pelumasan yang tidak memadai sehingga gesekan dan keausan meningkat.
21	*Misalignment Failure*	Kegagalan akibat ketidaksejajaran posisi komponen yang menyebabkan pembebanan tidak merata.
22	*Seal Failure*	Kegagalan akibat rusaknya seal sehingga terjadi kebocoran pelumas atau fluida hidrolik.
23	*Bearing Failure*	Kegagalan pada bantalan akibat keausan, kelelahan, korosi, atau pelumasan yang buruk.

`

No	Jenis Kegagalan	Penjelasan Singkat
24	*Electrical Failure*	Kegagalan pada sistem kelistrikan seperti sensor, kabel, aktuator, atau ECU, terutama pada *Electric Power Steering* (EPS).
25	*Manufacturing Failure*	Kegagalan yang berasal dari cacat manufaktur, seperti porositas, retak las, perlakuan panas yang tidak tepat, atau kesalahan dimensi.

2.5 Penentuan Nilai Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D)

Setelah dilakukan identifikasi mode kegagalan pada setiap komponen sistem kemudi kapal tugboat, tahap selanjutnya adalah menentukan nilai *Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D)* menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. Penilaian dilakukan berdasarkan hasil kuesioner yang diisi oleh lima responden yang memiliki pengalaman dalam pengoperasian dan perawatan sistem kemudi kapal [19]. Parameter *Severity (S)* digunakan untuk menunjukkan tingkat keparahan dampak yang ditimbulkan apabila suatu komponen mengalami kegagalan. Semakin besar dampak kegagalan terhadap keselamatan pelayaran maupun operasional kapal, maka semakin tinggi nilai *severity* yang diberikan. Parameter *Occurrence (O)* menunjukkan tingkat kemungkinan atau frekuensi terjadinya kegagalan pada suatu komponen. Penilaian *occurrence* didasarkan pada pengalaman responden terhadap riwayat kerusakan, frekuensi gangguan selama pengoperasian kapal, serta catatan perawatan yang tersedia. Sementara itu, *Detection (D)* menunjukkan kemampuan sistem maupun awak kapal dalam mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak yang lebih besar[19]. Komponen yang sulit dideteksi kerusakannya akan memperoleh nilai detection yang lebih tinggi dibandingkan komponen yang mudah diketahui melalui inspeksi rutin atau sistem pemantauan[3].

`

Penilaian ketiga parameter tersebut dilakukan secara independen oleh masing-masing responden berdasarkan kondisi aktual yang pernah dialami selama pengoperasian kapal. Hasil penilaian kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan nilai *Risk Priority Number* (RPN) pada setiap komponen sistem kemudi[20].

Skala penilaian *Saverity*:

Tabel 2. 7 Skala Penilaian Saverity

Nilai	Kategori	Dampak terhadap Sistem Kemudi
10	Bencana	Kehilangan total kendali kemudi; kapal tidak bisa bermanuver.
9	Sangat Parah	Arah kapal tidak stabil, risiko tabrakan sangat tinggi.
8	Parah	Sistem kemudi tidak responsif, butuh tindakan darurat segera.
7	Berat	Respons kemudi sangat lambat; operasi terganggu signifikan.
6	Cukup Berat	Performa kemudi menurun, namun kapal masih bisa dikendalikan.
5	Sedang	Ada getaran atau penundaan perintah kemudi.
4	Ringan	Gangguan kecil, efek minim terhadap manuver kapal.
3	Sangat Ringan	Gangguan hampir tidak terasa; masih dalam batas aman.
2	Minor	Dampak sangat kecil terhadap performa sistem kemudi.
1	Tidak Signifikan	Tidak ada efek terhadap operasi kapal.

`

Tabel 2. 8 Skala Penilaian Occurrence

Nilai	Kategori	Frekuensi
10	Sangat sering	Hampir setiap minggu
9	Sangat sering	1 – 2 Kali/bulan
8	Sering	2 – 3 Bulan
7	Cukup sering	Tiap 6 bulan.
6	Kadang	Sekitar 1 kali/tahun
5	Jarang	1 kali/2 tahun.
4	Sangat jarang	1 kali/3 tahun.
3	Hampir tidak pernah	Tiap 4–5 tahun
2	Sangat kecil kemungkinan	Hanya kondisi ekstrem
1	Nyaris tidak pernah	hampir mustahil selama umur desain.

Tabel 2. 9 Skala Penilaian Detection

Nilai	Kategori	Kemampuan Deteksi
10	Sangat sulit	Tidak ada tanda/indikator; kegagalan tiba-tiba.
9	Sulit	hanya terdeteksi setelah kerusakan besar.
8	Cukup sulit	perlu pemeriksaan khusus untuk menemukan.
7	Rendah	hanya tanda tidak langsung (getaran/penurunan performa).
6	Sedang	inspeksi rutin mungkin mendeteksi
5	Agak mudah	alarm/indikator kadang memberi peringatan
4	Mudah	sensor/indikator biasa memberi peringatan awal.
3	Sangat mudah	tanda jelas dan langsung terlihat.

`

Nilai	Kategori	Kemampuan Deteksi
2	Hampir pasti terditeksi	sistem otomatis hampir selalu peringati
1	Pasti terdeteksi	ada monitoring/alarma yang selalu menangkap gejala.

2.6 Perhitungan Nilai *Risk Priority Number* (RPN)

Menurut Sharma dan Srivastava (2018) dan Faturachman et al. (2013)[21],) Mengidentifikasi berbagai kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi pada setiap komponen, seperti kebocoran fluida, keausan seal, atau gangguan servo valve. Menentukan akibat dari setiap kegagalan terhadap sistem (misalnya kehilangan tekanan atau hilangnya kontrol arah kapal).

Memberikan skor (biasanya 1–10) berdasarkan tingkat keparahan, probabilitas, dan kemampuan deteksi. Setelah diperoleh nilai rata-rata *Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D)* dari responden, tahap selanjutnya adalah menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) pada setiap komponen sistem kemudi kapal tugboat. Nilai RPN digunakan untuk menentukan tingkat prioritas penanganan terhadap setiap mode kegagalan yang telah diidentifikasi.

Perhitungan RPN dilakukan menggunakan persamaan berikut.

$$RPN = S \times O \times D$$

Keterangan:

- Severity (S) = tingkat keparahan dampak kegagalan.
- Occurrence (O) = tingkat kemungkinan atau frekuensi terjadinya kegagalan.
- Detection (D) = kemampuan mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak yang lebih besar.

`

Semakin besar nilai RPN yang diperoleh, maka semakin tinggi pula tingkat risiko suatu komponen sehingga memerlukan prioritas penanganan yang lebih tinggi. Perhitungan yang sama dilakukan terhadap seluruh komponen sistem kemudi mekanik dan elektrik. Hasil perhitungan RPN berdasarkan nilai rata-rata *Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D).*

2.7 Persyaratan IMO dan SOLAS untuk *Steering Gear*

Keandalan sistem kemudi (*steering gear system*) merupakan faktor fundamental dalam menjamin keselamatan pelayaran. Mengingat perannya yang sangat vital, sistem kemudi kapal diatur secara ketat oleh *International Maritime Organization* (IMO) melalui konvensi internasional *Safety of Life at Sea* (SOLAS), khususnya Chapter II-1 Regulation 29, 30, dan 31, yang mengatur tentang persyaratan desain, konstruksi, dan operasi sistem kemudi [13][22].

Regulasi ini memastikan bahwa setiap kapal, termasuk kapal tugboat, memiliki sistem kemudi yang kuat, andal, dan memiliki sistem cadangan untuk mengantisipasi kemungkinan kegagalan teknis. Tugboat yang beroperasi di area pelabuhan wajib mematuhi standar yang sama karena risiko manuver di area terbatas jauh lebih tinggi dibanding kapal niaga biasa. Tujuan utama pengaturan IMO dan SOLAS terhadap sistem kemudi adalah memastikan:

a. Kapal dapat dikendalikan setiap saat di semua kondisi operasi, termasuk saat kehilangan salah satu sumber tenaga.
b. Sistem kemudi memiliki kemampuan manuver minimum yang ditetapkan, sehingga kapal tetap dapat berbelok aman bahkan pada kecepatan maksimum.
c. Tersedia sistem kemudi darurat *(emergency steering)* yang dapat berfungsi secara independen dari sistem utama.
d. Adanya sistem alarm dan kontrol otomatis untuk mendeteksi gangguan daya listrik, tekanan hidrolik, atau kehilangan kendali.

`

Prinsip-prinsip tersebut bertujuan untuk menjamin kapal tetap dapat bermanuver aman tanpa kehilangan kemampuan kemudi dalam situasi darurat, seperti kegagalan daya, kebocoran hidrolik, atau gangguan pada sistem kontrol elektronik [23].

1. Ketentuan Teknis Berdasarkan SOLAS *Regulation* 29

Regulasi *International Maritime Organization* (IMO) dan *Safety Of Life At Sea* (SOLAS) menetapkan persyaratan teknis minimum yang wajib dipenuhi setiap sistem kemudi kapal. Ketentuan utama tersebut dapat dirangkum dalam Tabel berikut.

Tabel 2. 10 Persyaratan IMO & SOLAS

Kategori	**Persyaratan Teknis Utama**	**Keterangan Teknis / Implikasi**
Kapasitas *Manuver*	*Rudder* harus dapat bergerak dari 35° ke satu sisi ke 35° ke sisi lain pada kecepatan penuh dalam waktu ≤ 28 detik.	Menjamin kemampuan belok minimum di kondisi maksimum.
Redundansi Sistem	Harus tersedia *main steering gear* dan *auxiliary steering gear* yang dapat bekerja secara independen.	Jika sistem utama gagal, sistem bantu tetap dapat menggerakkan *rudder* minimal 15°.
Daya dan Kendali	Sistem harus dapat dioperasikan dari *bridge control* dan memiliki sistem kendali lokal di ruang kemudi.	Memastikan kendali ganda saat gangguan sistem elektronik.
Proteksi Tekanan	Dilengkapi *relief valve* untuk melindungi sistem dari tekanan hidrolik berlebih.	Menghindari kerusakan komponen akibat *overpressure*.
Alarm* dan *Monitoring	Dilengkapi alarm visual dan suara untuk kehilangan daya listrik,	Memastikan awak kapal mendapat peringatan dini.

`

Kategori	Persyaratan Teknis Utama	Keterangan Teknis / Implikasi
	tekanan fluida rendah, atau kegagalan pompa.	
Sistem Darurat	Tersedia *emergency power supply* (genset atau baterai) yang mampu mengoperasikan kemudi minimal 45 menit.	Memastikan kapal tetap dapat *bermanuver* meski kehilangan daya utama.
Uji Fungsional	Sistem kemudi harus diuji penuh saat *sea trial* dan diperiksa secara berkala sesuai *maintenance schedule*.	Memastikan performa sesuai spesifikasi desain.

Kepatuhan terhadap regulasi di atas menjadi dasar dalam perancangan dan pemeliharaan sistem kemudi kapal. Tugboat, meskipun berukuran kecil, tetap wajib memenuhi standar ini karena sering beroperasi di kondisi ekstrem dengan frekuensi manuver tinggi [1].

2. Ketentuan Redundansi Sistem *(Dual Steering Gear System)*

Salah satu aspek terpenting dari *Safety Of Life At Sea* (SOLAS) Regulation 29 adalah redundansi sistem kemudi. Tugboat diwajibkan memiliki dua unit sistem tenaga hidrolik independen (*dual hydraulic power unit*) agar tetap dapat beroperasi jika salah satu unit gagal. Kedua unit ini dihubungkan dengan sistem pipa dan katup isolasi otomatis yang memungkinkan pengalihan suplai fluida secara cepat tanpa menghentikan operasi. Setiap *Hydraulic Power Unit* (HPU) terdiri atas pompa, motor listrik, dan tangki fluida terpisah. Sistem ini bekerja dalam mode *stand-by redundancy*, di mana salah satu unit beroperasi aktif, sedangkan unit lainnya siaga dan otomatis aktif bila unit utama gagal.

`

3. Sistem Pengendalian dan Alarm *(Control and Monitoring System)*

Regulasi *International Maritime Organization* (IMO) dan *Safety Of Life At Sea* (SOLAS) juga mengharuskan sistem kemudi dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis dan alarm peringatan dini yang dapat diakses dari anjungan. Sistem ini meliputi:

A. *Main Control Station* – panel di anjungan kapal untuk mengoperasikan kemudi secara normal.
B. *Local Control Station* – panel di ruang kemudi untuk operasi manual atau darurat.
C. *Feedback System* – sensor posisi kemudi (rudder angle transmitter) yang memberikan informasi real-time ke operator.
D. *Alarm System* – sistem audio-visual untuk mendeteksi:
    a. Kehilangan daya listrik pada motor penggerak,
    b. Tekanan hidrolik rendah,
    c. Kegagalan pompa hidrolik,
    d. Deviasi sudut kemudi abnormal (>5° dari perintah).

Menurut *Lloyd's Register Rules for Ships* (2024), sistem alarm ini wajib diuji setiap kali kapal berlayar dan saat inspeksi tahunan untuk memastikan keandalannya.

4. Persyaratan *Emergency Steering System*

Selain sistem utama, setiap kapal wajib memiliki emergency steering system yang dapat dioperasikan secara lokal dari ruang kemudi (steering gear compartment). Sistem ini dapat berupa:

1. *Hand-operated hydraulic valve*, atau
2. *Manual hydraulic pump* sebagai cadangan untuk penggerak rudder.

Sistem ini harus mampu menggerakkan *rudder* minimal 15° ke kiri dan kanan dalam kondisi darurat, sesuai ketentuan SOLAS Regulation 30. Selain itu, kapal harus memiliki *emergency power source* (biasanya *emergency generator* atau

`

battery bank) yang mampu mengoperasikan sistem kemudi darurat selama minimal 45 menit setelah kehilangan daya utama [13].

2.8 Penelitian terdahulu

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas penerapan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) maupun metode analisis keandalan lainnya pada sistem kapal dan industri maritim. Penelitian-penelitian ini menjadi rujukan penting bagi penelitian yang akan dilakukan.

1. Sharma dan Srivastava (2021) menerapkan FMEA pada sistem pompa pendingin kapal tanker dan menemukan bahwa komponen seal ring dan bearing merupakan penyebab utama penurunan efisiensi sistem dengan nilai RPN mencapai 280 [24].
2. Kaur dan Singh (2020) melakukan *comparative study* antara FMEA dan *Fault Tree Analysis* (FTA) pada sistem hidrolik industri, dan menyimpulkan bahwa FMEA lebih efisien dalam menentukan prioritas tindakan preventif karena prosesnya langsung menghubungkan penyebab dan efek kegagalan [25].
3. Arifin dan Daryanto (2023) menegaskan bahwa penerapan FMEA pada sistem permesinan kapal membantu mengidentifikasi hubungan antara mode kegagalan dan sumber penyebab dominan, yang kemudian dapat dikaitkan dengan keandalan sistem secara keseluruhan [26],[17].
4. Gürgen et al. (2023) menggunakan *Fuzzy Fault Tree* untuk memprediksi kehilangan kemampuan manuver kapal. Pendekatan ini menggabungkan logika *fuzzy* untuk menilai ketidakpastian data, namun implementasinya cukup kompleks dan memerlukan basis data kegagalan yang luas [27].
5. Selain itu, laporan investigasi kecelakaan oleh ATSB (2025) pada kapal CMA CGM Puccini menunjukkan bahwa kegagalan *steering gear* dapat menyebabkan kapal kehilangan kendali hingga menabrak navigational beacon. Laporan ini menegaskan pentingnya analisis keandalan steering gear, meskipun tidak menggunakan metode sistematis seperti FMEA [23].

`

Dari hasil-hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa metode FMEA relatif lebih sederhana, aplikatif, dan efektif digunakan dalam sistem kapal yang memiliki struktur komponen kompleks tetapi data kegagalannya terbatas—seperti pada sistem kemudi tugboat.

Tabel 2. 11 Penelitian Terdahulu

No	**Peneliti & Tahun**	**Objek Penelitian**	**Metode**	**Hasil Utama**
1	Sitompul *et al.*, 2025	Sistem kemudi kapal MV. Cemtrans	Analisis kualitatif	Menemukan penyebab dominan kegagalan: kebocoran fluida dan keausan *seal*.
2	Gürgen *et al.*, 2023	Analisis kemampuan *manuver* kapal	*Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)*	Menilai kehilangan kemampuan manuver akibat kegagalan kemudi.
3	Faturachman *et al.*, 2022	Sistem *propulsi* kapal perikanan	FMEA	Mengidentifikasi mode kegagalan *propeller* dan *gearbox*.
4	Daryanto, 2024	Sistem mesin induk kapal	FMEA	Menemukan nilai RPN tertinggi pada sistem injeksi bahan bakar.

`

No	Peneliti & Tahun	Objek Penelitian	Metode	Hasil Utama
5	KNKT, 2023	Kasus kecelakaan kapal Bukit Raya	Investigasi lapangan	Menyimpulkan penyebab kecelakaan akibat kegagalan kemudi dan kebocoran fluida hidrolik.
6	Arifin *et al.*, 2015	Sistem pelumasan mesin kapal	FMEA	Metode efektif dalam prioritisasi risiko perawatan.
7	ATSB, 2025	Kapal kontainer *CMA CGM Puccini*	Analisis kecelakaan	Kegagalan steering gear menyebabkan kehilangan kendali.