

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Anchor Handling Tug Supply



Gambar 2. 1 *Anchor Handling Tug Supply*  
(Sumber : Penulis, 2025)

*Anchor Handling Tug Supply* (AHTS) adalah jenis *offshore support vessel* (OSV) yang dirancang khusus untuk mendukung operasi di laut lepas, terutama dalam industri minyak dan gas lepas pantai. Kapal AHTS tidak hanya berfungsi sebagai kapal suplai logistik, tetapi juga memiliki kemampuan teknis untuk menangani jangkar (*anchor handling*), menarik struktur besar seperti oil rig atau barge, serta membantu pemasangan dan pengaturan sistem tambat bawah laut. Dalam literatur teknik laut, AHTS sering dibedakan dari kapal suplai biasa (OSV) karena dilengkapi peralatan khusus seperti winch penangan jangkar, *towing pins*, dan dek terbuka yang memungkinkan operasi *anchor handling* secara efisien dengan kekuatan *bollard pull* tinggi. (J. Zhu et al., 2018).

Kapal AHTS dirancang untuk kondisi laut yang berat dan multi tugas. Kapal ini umumnya dilengkapi *anchor handling winch*, *towing winch*, dan peralatan pengendali rantai/jangkar yang dikontrol langsung dari jembatan kapal untuk keselamatan dan efisiensi operasi. Winch pada AHTS memiliki kapasitas dan spesifikasi yang lebih besar dibandingkan dengan kapal tunda konvensional, memungkinkan kapal ini menarik beban berat sekaligus melepaskan jangkar dengan cepat saat diperlukan. Dalam kajian desain dan operasi kapal AHTS disebutkan bahwa sistem mekanik, hidrolik, dan elektrik yang terintegrasi sangat vital untuk memastikan kapal mampu menangani beban dinamis selama operasi laut dalam (Boko et al., 2022).

Selain fungsi utama dalam *anchor handling* dan *towing*, kapal AHTS sering dimanfaatkan untuk berbagai tugas tambahan seperti pemasokan logistik ke instalasi bawah

laut, pengangkutan peralatan, serta dalam beberapa kasus mendukung operasi keselamatan seperti *emergency response*. Dalam penelitian tentang klasifikasi dan desain AHTS, penulis menekankan bahwa kapal ini memainkan peran penting dalam rantai suplai dan mobilitas instalasi offshore, serta memiliki nilai strategis dalam menjaga kelancaran operasi pengeboran dan pemasangan struktur lepas pantai karena kombinasi kemampuan *maneuverability* dan *bollard pull* yang tinggi (J. Zhu et al., 2018).

## 2.2 Sistem Propulsi Kapal

Sistem propulsi kapal adalah susunan komponen mekanis, hidraulik, dan elektrik yang menyediakan daya dorong untuk menggerakkan kapal dan mengatur kecepatannya. Secara tradisional, sistem propulsi komersial terdiri dari mesin utama, gearbox, poros, dan baling-baling pada *stern*; namun perkembangan teknologi selama dekade terakhir memperkenalkan opsi hybrid listrik, *azimuth/podded drives*, serta konversi ke bahan bakar alternatif untuk memenuhi tujuan efisiensi energi dan regulasi emisi. Peralihan ini dipicu oleh kebutuhan pengurangan emisi dan kenaikan efisiensi operasi sehingga arsitektur propulsi modern sering menggabungkan penggerak listrik, sistem penyimpanan energi, dan kontrol daya terintegrasi (Chiong et al., 2021).

### 2.2.1 Dampak terhadap desain dan operasi

Perubahan terhadap jenis penggerak misal dari *direct drive diesel* ke *hybrid electric* atau *fuel alternative engines* mempengaruhi penempatan mesin, tata ruang mesin, kebutuhan pendinginan, dan strategi pemeliharaan semuanya berdampak pada kinerja propulsi dan keseluruhan efisiensi kapal. Studi *overview* dan *review* teknis menyoroti bahwa penilaian *lifecycle* dan metrik efisiensi (EEDI, EEXI, CII) kini menjadi bagian penting dalam pemilihan sistem propulsi pada tahap desain (Yuksel et al., 2025).

## 2.3 Sistem Propulsi Tambahan Kapal

Propulsi tambahan (*auxiliary propulsion*) mencakup perangkat-perangkat yang bukan merupakan penggerak utama kapal, tetapi dirancang untuk tugas-tugas manuver, posisi stasioner, atau bantuan khusus selama operasi pelabuhan/laut lepas. Misal *bow thrusters*, *stern thrusters*, *azimuthing thrusters*, dan *propulsion pods* skala kecil yang dipakai untuk DP (*dynamic positioning*) dan manuver presisi. Fungsi utamanya meliputi peningkatan kemampuan manuver pada kecepatan rendah, bantuan saat berlabuh/berhenti, dukungan *dynamic positioning*, dan pengurangan kebutuhan tug pada operasi pelabuhan (Okuda et al., 2023).

### 2.3.1 Klasifikasi perangkat propulsi tambahan

1. *Tunnel (bow/stern) thrusters* adalah unit propulsor yang ditempatkan dalam terowongan melintang di haluan atau buritan untuk menghasilkan gaya lateral; umum dipakai pada kapal komersial dan kapal penumpang untuk kemudahan berlabuh. Pengaruh desain terowongan, kondisi aliran lokal, dan interaksi dengan hull mempengaruhi performa thrust pada kondisi nyata.
2. *Azimuth/azimuthing thrusters* adalah unit yang dapat diarahkan 360°; pada beberapa kapal bantu atau kapal khusus, azimuth thruster berfungsi sebagai thruster bantu yang memberikan dorongan multi-arah dan dapat juga menjadi bagian dari penggerak utama pada desain tertentu.

3. *Podded propulsion/propulsor biomimetik & foils* adalah solusi inovatif misalnya *podded* atau *foil-based thrusters* dieksplorasi terutama untuk efisiensi dan pengurangan kebisingan/efek lingkungan di beberapa jenis kapal.

### **2.3.2 Peran operasional dan manfaat**

Propulsi tambahan meningkatkan kemampuan manuver kapal pada kecepatan rendah seperti berlabuh, berputar, pandu masuk atau keluar kanal sempit, mendukung *dynamic positioning* untuk operasi *offshore*, dan sering mengurangi ketergantungan pada tug. Penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa efektivitas thruster sangat bergantung pada kecepatan kapal, sudut kedatangan aliran, serta interaksi hidrodinamis dengan *hull* dan baling-baling utama, oleh karena itu performa terowongan *thruster* pada kondisi nyata perlu dianalisis dengan teknik CFD dan eksperimen terkontrol (Yukun et al., 2020).

### **2.3.3 Isu keandalan, kebisingan dan lingkungan**

Selain performa, aspek keandalan, kebisingan akustik bawah air, dan dampak lingkungan menjadi perhatian penting. Studi-studi terbaru menelaah kebisingan terowongan thruster dan hubungannya dengan pola aliran serta kecepatan kapal ini relevan untuk kepatuhan terhadap regulasi lingkungan dan mitigasi gangguan ekosistem laut. Dari sisi keandalan, integrasi monitoring kondisi dan strategi maintenance berbasis risiko direkomendasikan untuk perangkat-perangkat bantu tersebut (Wahyudi et al., 2025).

## 2.4 Bow Thruster

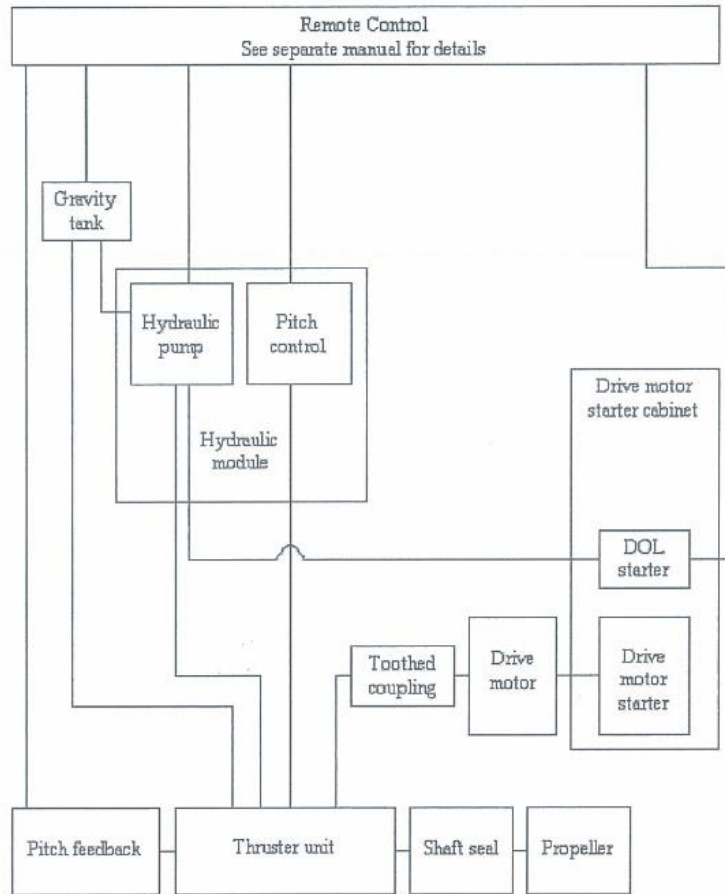


Gambar 2. 2 Bow Thruster  
(Sumber: Penulis, 2025)

*Bow thruster* adalah salah satu jenis perangkat propulsi transversal yang dirancang untuk meningkatkan manuver kapal pada kecepatan rendah atau saat melakukan docking, undocking, dan manuevers dalam perairan sempit. *Thruster* ini biasanya berupa baling-baling yang dipasang di dalam terowongan horizontal pada bagian haluan kapal, sehingga ketika baling-baling ini berputar air dipaksa keluar dari satu sisi ke sisi lainnya untuk menghasilkan gaya dorong lateral yang membantu kapal bergerak secara sideways tanpa mengandalkan mesin utama atau bantuan kapal tunda (Islam et al., 2025). Hal ini menjadikan *bow thruster* sebagai sistem propulsi bantu yang penting dalam mendukung fleksibilitas olah gerak kapal terutama pada fase-fase kritis berlabuh atau berlepas dari dermaga.

AHTS sendiri memiliki 3 *thruster* (2 unit *bow thruster* serta 1 unit *stern thruster*) digunakan untuk kebutuhan menarik anjungan, serta menyediakan pasokan kargo seperti bahan makanan, air, bahan bakar atau kebutuhan lain ke anjungan. *Bow thruster* dibuat pada tanggal 04 September 2008 sesuai kebutuhan ketika kapal AHTS dibuat **Gambar 2.2** merupakan *bow thruster* kapal AHTS.

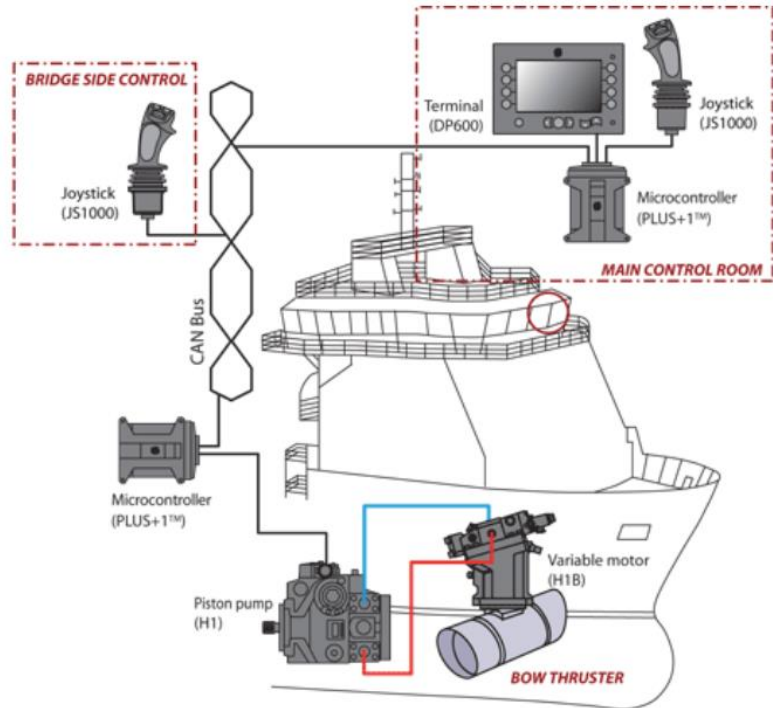
### 2.4.1 Prinsip Kerja *Bow Thruster*



Gambar 2. 3 Diagram Sistem Kerja *Bow Thruster*  
(Sumber: *Rolls-Royce USER MANUAL TT2000 DPN CP*, 2008)

Prinsip kerja *bow thruster* pada kapal pada dasarnya adalah menghasilkan gaya dorong melintang di bagian haluan agar kapal bisa bermanuver saat kecepatan rendah (sandar atau lepas sandar, menjaga posisi, manuver di perairan sempit). Tipe yang paling umum adalah *tunnel bow thruster*, yaitu sebuah propeller yang dipasang di dalam terowongan melintang yang menembus lambung di area haluan. Ketika motor menggerakkan propeller, aliran air dipercepat dari satu sisi *tunnel* ke sisi lainnya sehingga terjadi perubahan momentum fluida, reaksi dari perubahan momentum ini menghasilkan gaya lateral pada kapal. Studi eksperimen dan numerik pada tunnel thruster banyak membahas pola aliran di dalam tunnel serta hubungan putaran/torque dengan gaya dorong yang dihasilkan (Boko et al., 2022).

### 2.4.2 Proses Kerja *Bow Thruster*



Gambar 2. 4 Proses Kerja *Bow Thruster*  
(Sumber: Naval Lovers, 2019)

Secara sistematis, proses kerja *bow thruster* diawali dari perintah operator melalui *thruster control panel* di anjungan. Perintah ini diteruskan ke sistem kontrol untuk mengatur putaran motor atau sudut *pitch propeller* (pada tipe *controllable pitch propeller*). Motor kemudian mentransmisikan daya ke poros propeller sehingga menghasilkan aliran air berkecepatan tinggi di dalam tunnel. Besarnya gaya dorong lateral yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan putaran propeller, diameter propeller, geometri tunnel, serta posisi vertikal terhadap permukaan air. Penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa desain tunnel yang tidak optimal dapat menyebabkan kerugian aliran (*flow losses*) dan menurunkan efisiensi thrust secara signifikan (Yu & Yang, 2016).

### 2.4.3 Spesifikasi *Bow Thruster*

Tabel 2. 1 Spesifikasi *Bow Thruster*  
(Sumber: *Rolls-Royce USER MANUAL TT2000 DPN CP*, 2008)

Unit Identification	
Shipyard	: Zhuhai Shipbuilding Co Ltd
Unit	: T12907
Date	: 04.09.2008
Application Info	
Type	: TT2000 DPN CP
Classification Society	: ABS

<i>Vessel Type</i>	:	AHTS
<i>Thruster Motor</i>		
<i>Thruster Motor Type</i>	:	Electric AC Motor
<i>Thruster Motor Number of Poles</i>	:	6 Poled Motor
<i>Thruster Motor Power</i>	:	883 kW
<i>Thruster Motor Design Speed</i>	:	1180 rpm (Constant speed)
<i>Thruster Motor Rotational Direction</i>	:	Counter-clockwise
<i>Thruster Motor Power Supply</i>	:	3 x 440V 60Hz
<i>Thruster Motor Starter</i>		
<i>Thruster Motor Starter Type</i>	:	Star delta starter
<i>Power Supply for System Pump Unit</i>	:	6.3 kW / 3 x 440V 60Hz
<i>Thruster/Tunnel</i>		
<i>Propeller Speed</i>	:	245 rpm
<i>Calculated Thrust</i>	:	139 kN
<i>Propeller Tip Speed</i>	:	25.6 m/s
<i>Direction of Propeller Rotation</i>	:	Clockwise
<i>Propeller Blade Diameter</i>	:	2000 mm
<i>Propeller Blade Design</i>	:	Skew design
<i>Propeller Type</i>	:	CPP
<i>Number of Propeller Blades</i>	:	4
<i>Propeller Material, Hub/Blades</i>	:	Ni.Al.Bronze
<i>Tunnel Diameter, Inner</i>	:	2026 mm
<i>Tunnel Length</i>	:	2100 mm
<i>Hydraulic System</i>		
<i>Pitching Time Full – Starboard / Port</i>	:	15 Second
<i>Oil Pump Flow</i>	:	22.2/min
<i>Power Supply for Oil Pump Unit</i>	:	6.3kW / 3 x 440V 60Hz
<i>Oil Volume in Thruster Unit</i>	:	340 Litres
<i>Oil Volume in Gravity Tank</i>	:	110 Litres
<i>Oil Volume in Seal Tank</i>	:	55 Litres
<i>Required Oil Volume for Total Installation</i>	:	505 Litres
<i>Remote Control</i>		
<i>Required Main Power Supply to Remote Control</i>	:	220 VAC
<i>Required Back-up Power Supply</i>	:	24 VDC (from battery)
<i>Weight</i>		
<i>Weight of Thruster and Tunnel (dry)</i>	:	6400 kg

#### 2.4.4 Sub-Sistem pada *Bow Thruster*

Menurut (Hardan et al., 2022) sub-sistem pada *bow thruster* dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu:

##### 1. *Mechanical*



Gambar 2. 5 *Shaft Bow Thruster*  
(Sumber: Penulis, 2025)

Sistem mekanik pada *bow thruster* merupakan sistem yang berperan langsung dalam konversi energi mekanik menjadi gaya dorong lateral melalui interaksi hidrodinamika di dalam tunnel. Sistem ini terdiri dari propeller, shaft, bearing, gearbox, seal, dan housing struktural. Propeller menghasilkan gaya dorong transversal akibat perbedaan tekanan fluida, sedangkan *shaft* dan *bearing* mentransmisikan torsi dari sistem penggerak dengan mempertahankan keselarasan dan kestabilan rotasi. Studi numerik pada *bow thruster* menunjukkan bahwa fluktuasi tekanan dan gaya dinamis pada propeller meningkat signifikan pada kondisi off-design, sehingga mempercepat keausan pada bearing dan shaft (Kazemi & Kornev, 2025).

Dari perspektif reliabilitas, bearing dan shaft dikategorikan sebagai komponen mekanik kritis karena bekerja di bawah beban yang tinggi, getaran, serta lingkungan laut yang agresif. Kegagalan pada komponen ini umumnya bersifat progresif dan ditandai dengan peningkatan vibrasi dan temperatur, yang berdampak langsung pada penurunan MTBF sistem thruster secara keseluruhan (Vizentin et al., 2020).

## 2. Hydraulic

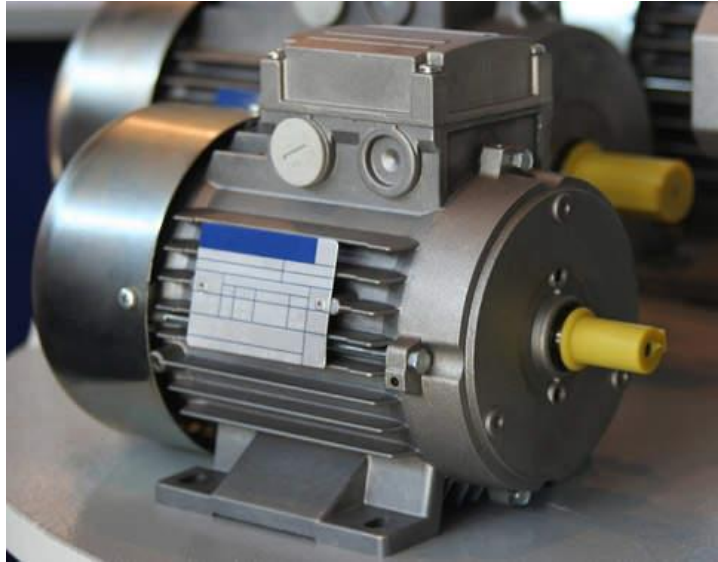


Gambar 2. 6 *Hydraulic Pump Oil*  
(Sumber: Penulis, 2025)

Sistem hidrolik pada *bow thruster* berfungsi sebagai media transmisi daya melalui fluida bertekanan, khususnya pada kapal *offshore* yang memerlukan torsi besar pada kecepatan rendah. Sistem ini mencakup *hydraulic pump*, *hydraulic motor*, *control valve*, *accumulator*, pipa, dan fluida hidrolik. Energi mekanik dari mesin penggerak diubah menjadi energi hidrolik oleh pompa, kemudian dikonversi kembali menjadi energi mekanik pada hydraulic motor untuk memutar propeller thruster. Keunggulan utama sistem ini adalah fleksibilitas instalasi dan kemampuan menahan beban kejut (Islam et al., 2025)

Namun, sistem hidrolik memiliki failure mode spesifik seperti kebocoran fluida, degradasi seal, kontaminasi oli, dan penurunan tekanan kerja. Penelitian keandalan menunjukkan bahwa degradasi kualitas fluida hidrolik berpengaruh signifikan terhadap laju kegagalan pompa dan motor hidrolik, sehingga berdampak pada meningkatnya *downtime* operasional kapal (Bancin S et al., 2025).

## 3. Electric



Gambar 2. 7 *Electric AC Motor*  
(Sumber: Ship Technology, 2026)

Sistem elektrik pada *bow thruster* berfungsi untuk menggerakkan dan mengendalikan operasi *thruster*. Sistem ini meliputi motor listrik, panel kontrol, inverter atau VFD, serta sistem proteksi. Sistem elektrik memungkinkan pengaturan kecepatan dan arah putaran *thruster* secara lebih akurat, sehingga meningkatkan efektivitas manuver kapal (Sun et al., 2025). Gangguan pada sistem elektrik seperti overheating motor atau trip pada inverter dapat menyebabkan *thruster* tidak dapat beroperasi meskipun komponen mekanik masih baik.

## 2.5 Konsep Keandalan Sistem

Keandalan sistem merupakan salah satu konsep fundamental dalam rekayasa teknik yang berkaitan dengan kemampuan suatu sistem untuk menjalankan fungsi yang diharapkan tanpa mengalami kegagalan dalam periode waktu tertentu dan kondisi operasi tertentu. Dalam konteks rekayasa modern, keandalan tidak hanya mencerminkan probabilitas keberhasilan suatu komponen atau sistem, tetapi juga mencakup aspek keselamatan, ketersediaan, dan kontinuitas operasi dalam lingkungan operasional yang kompleks. Definisi ini banyak digunakan dalam literatur *reliability engineering* dan menjadi dasar dalam analisis performa sistem teknik di berbagai sektor industri (Parakulum & Li, 2026).

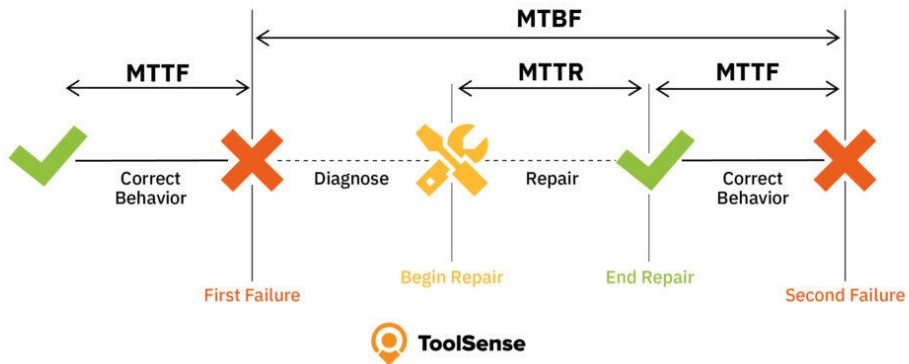
Dalam perspektif sistem, keandalan dipandang sebagai probabilitas bahwa suatu sistem akan berfungsi sesuai tujuan yang telah ditentukan dalam interval waktu tertentu tanpa kegagalan. Pendekatan probabilistik ini menjadikan keandalan sebagai parameter kuantitatif yang dapat dihitung menggunakan data historis kegagalan, pengujian keandalan, maupun model matematis. Studi dalam jurnal (*Reliability Engineering & System Safety | Journal | ScienceDirect.Com by Elsevier, n.d.*) menekankan bahwa analisis keandalan merupakan bagian penting dalam pengembangan sistem teknik kompleks, termasuk sistem energi, transportasi, dan maritim, karena berperan dalam meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional. Keandalan sistem juga berkaitan erat dengan struktur sistem dan hubungan antar komponen di dalamnya. Dalam sistem yang tersusun secara seri, kegagalan satu komponen

dapat menyebabkan kegagalan total sistem, sebagaimana dijelaskan dalam teori reliabilitas klasik seperti hukum Lusser. Sebaliknya, sistem redundan dapat meningkatkan keandalan melalui distribusi fungsi antar komponen. Oleh karena itu, analisis keandalan tidak hanya menilai performa komponen secara individual, tetapi juga mempertimbangkan konfigurasi sistem secara keseluruhan.

Selain aspek struktural, perkembangan teknologi modern turut memengaruhi pendekatan analisis keandalan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi *data real-time*, sensor, dan metode berbasis kecerdasan buatan memungkinkan penerapan *predictive reliability* dan *condition-based maintenance* untuk meningkatkan umur pakai sistem. Pendekatan ini menjadi semakin relevan pada sistem teknik kompleks karena mampu mengurangi *downtime*, menekan biaya pemeliharaan, dan meningkatkan keberlanjutan operasional (Tordeux et al., 2024).

Keandalan juga memiliki hubungan erat dengan strategi pemeliharaan dan manajemen risiko. Studi dalam bidang reliability engineering menunjukkan bahwa analisis keandalan menjadi dasar dalam penyusunan strategi pemeliharaan yang efektif, seperti *preventive maintenance*, *condition-based maintenance*, dan *risk-based maintenance*. Dengan memahami karakteristik kegagalan sistem, strategi pemeliharaan dapat dioptimalkan untuk meningkatkan ketersediaan sistem dan meminimalkan biaya siklus hidup (Antosz et al., 2022). Dalam konteks rekayasa modern, konsep keandalan sistem berkembang menjadi pendekatan multidisiplin yang menggabungkan analisis probabilistik, pemodelan matematis, serta data operasional. Oleh karena itu, keandalan tidak hanya digunakan sebagai indikator performa teknis, tetapi juga sebagai dasar dalam pengambilan keputusan rekayasa, manajemen risiko, dan pengembangan strategi pemeliharaan pada sistem teknik kompleks, termasuk sistem kelautan dan transportasi.

## 2.6 Mean Time Between Failures (MTBF)



Gambar 2. 8 MTBF  
(Sumber: ToolSense)

*Mean Time Between Failures (MTBF)* merupakan matriks keandalan yang sering digunakan dalam *reliability engineering* untuk menggambarkan rata-rata waktu operasi suatu sistem atau komponen sampai terjadi kegagalan berikutnya. MTBF sangat berguna dalam perencanaan pemeliharaan, prediksi kegagalan, serta menentukan efektivitas program maintenance untuk sistem yang dapat diperbaiki. Nilai MTBF yang tinggi menunjukkan bahwa suatu sistem relatif jarang mengalami kegagalan dalam periode penggunaan tertentu,

sementara nilai MTBF yang rendah mengindikasikan seringnya kejadian gangguan atau kegagalan yang mengakibatkan *downtime* operasional (Silvia et al., 2023). Secara matematis, MTBF dihitung sebagai perbandingan antara total waktu operasi sistem dengan jumlah kegagalan yang terjadi selama periode pengamatan. Perhitungan ini mengasumsikan bahwa kegagalan bersifat independen dan sistem dikembalikan ke kondisi operasional setelah dilakukan tindakan perbaikan. Nilai MTBF yang rendah mengindikasikan tingginya laju kegagalan, sedangkan nilai MTBF yang tinggi menunjukkan tingkat keandalan sistem yang lebih baik. Oleh karena itu, MTBF sering digunakan sebagai dasar evaluasi performa sistem serta penentuan interval pemeliharaan preventif dan prediktif (Mujiarto & Indro Asmoro, 2022).

Rumus MTBF dapat dituliskan sebagai berikut:

$$MTBF = T / N$$

dengan:

T = total waktu operasi sistem selama periode pengamatan

N = jumlah kegagalan yang terjadi selama periode tersebut

Total waktu operasi (T) umumnya dinyatakan dalam satuan jam, hari, atau satuan waktu lainnya sesuai dengan kebutuhan analisis, sedangkan jumlah kegagalan (N) merupakan total kejadian kerusakan atau gangguan yang menyebabkan sistem tidak dapat berfungsi sesuai dengan tujuan awalnya. Perhitungan MTBF mengasumsikan bahwa setiap kegagalan bersifat independen dan sistem kembali beroperasi setelah dilakukan tindakan perbaikan.

MTBF sering digunakan sebagai indikator kinerja dalam manajemen pemeliharaan karena dapat membantu dalam mengevaluasi seberapa sering suatu peralatan mengalami gangguan. Nilai MTBF yang rendah mengindikasikan bahwa sistem sering mengalami kegagalan dan memerlukan perhatian lebih lanjut, baik dari sisi desain, operasi, maupun pemeliharaan. Sebaliknya, nilai MTBF yang tinggi menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi dalam jangka waktu yang relatif lama tanpa gangguan, sehingga lebih andal dan efisien dalam penggunaannya (Nicko et al., 2024).

2.7 Risk Matrix

Tabel 2. 2 Format Risk Matrix

Category		Consequence Severity				
Asset		No shutdown, costs less than \$10,000 to repair	No shutdown, costs less than \$100,000 to repair	Operations shutdown, loss of day rate for 1-7 days and/or repair costs of up to \$1,000,000	Operations shutdown, loss of day rate for 7-28 days and/or repair costs of up to \$10,000,000	Operations shutdown, loss of day rate for more than 28 days and/or repair more than \$10,000,000
Environmental Effects		No lasting effect. Low level impacts on biological or physical environment. Limited damage to minimal area of low significance.	Minor effects on biological or physical environment. Minor short-term damage to small area of limited significance.	Moderate effects on biological or physical environment but not affecting ecosystem function. Moderate short-medium term widespread impacts e.g. oil spill causing impacts on shoreline.	Serious environmental effects with some impairment of ecosystem function e.g. displacement of species. Relatively widespread medium-long term impacts.	Very serious effects with impairment of ecosystem function. Long term widespread effects on significant environment e.g. unique habitat, national park.
Community/ Government/ Media/ Reputation		Public concern restricted to local complaints. Ongoing scrutiny/ attention from regulator.	Minor, adverse local public or media attention and complaints. Significant hardship from regulator. Reputation is adversely affected with a small number of site focused people.	Attention from media and/or heightened concern by local community. Criticism by NGO's. Significant difficulties in gaining approvals. Environmental credentials moderately affected.	Significant adverse national media/public/ NGO attention. May lose license to operate or not gain approval. Environment/ management credentials are significantly tarnished.	Serious public or media outcry (international coverage). Damaging NGO campaign. License to operate threatened. Reputation severely tarnished. Share price may be affected.
Injury and Disease		Low level short-term subjective inconvenience or symptoms. No measurable physical effects. No medical treatment required.	Objective but reversible disability/impairment and/or medical treatment, injuries requiring hospitalization.	Moderate irreversible disability or impairment (<30%) to one or more persons.	Single fatality and/or severe irreversible disability or impairment (>30%) to one or more persons.	Short or long term health effects leading to multiple fatalities, or significant irreversible health effects to >50 persons.
		Low (1)	Minor (2)	Moderate (3)	Major (4)	Critical (5)
Likelihood	Almost Certain (E) Occurs 1 or more times a year	High	High	Extreme	Extreme	Extreme
	Likely (D) Occurs once every 1-10 years	Moderate	High	High	Extreme	Extreme
	Possible (C) Occurs once every 10-100 years	Low	Moderate	High	Extreme	Extreme
	Unlikely (B) Occurs once every 100-1000 years	Low	Low	Moderate	High	Extreme
	Rare (A) Occurs once every 1000-10000 years	Low	Low	Moderate	High	High

Risk Matrix merupakan salah satu alat dalam *risk assessment* yang dipakai untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengendalikan risiko berdasarkan dua dimensi utama yaitu kemungkinan kejadian risiko dan dampaknya terhadap tujuan yang ditetapkan. Risk Matrix memetakan kombinasi tingkat kemungkinan dan dampak ke dalam sebuah matriks sehingga memudahkan pemangku keputusan untuk mengelompokkan risiko ke dalam kategori seperti risiko rendah, sedang, atau tinggi. Alat ini banyak digunakan dalam berbagai disiplin ilmu, termasuk kesehatan masyarakat, manajemen proyek, teknik, hingga manajemen organisasi, karena kemampuannya dalam menyederhanakan hasil penilaian risiko menjadi skala yang mudah dipahami. Penggunaan Risk Matrix juga membantu memvisualisasikan informasi risiko agar proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih transparan dan sistematis (Lemmens et al., 2022).

Menurut (Jensen et al., 2022), Risk Matrix merupakan bentuk representasi visual dari hubungan antara probability (kemungkinan) dan impact (dampak) suatu peristiwa risiko. Keduanya diplot pada sumbu vertikal dan horizontal sebuah tabel dua dimensi, kemudian setiap sel hasil persilangan diberi nilai atau label tingkat risiko seperti *low*, *medium*, *high*, atau *extreme*. Proses ini memungkinkan analisis risiko untuk memprioritaskan risiko yang

harus ditangani lebih cepat atau membutuhkan tindakan mitigasi, dibandingkan risiko yang dapat ditangani belakangan atau dinyatakan dapat diterima. Teknik ini bersifat kualitatif atau semi-kuantitatif karena meskipun menggunakan angka atau kategori, cara penetapan skor didasarkan pada penilaian ahli atau data historis yang tersedia.

(Lemmens et al., 2022) juga menjelaskan bahwa Risk Matrix dapat membantu dalam proses *decision-making* karena menyajikan data probabilitas dan konsekuensi dalam bentuk grafis yang intuitif. Dalam konteks evaluasi intervensi kesehatan misalnya, risk matrix dipakai untuk menimbang bagaimana kombinasi probabilitas terjadinya kasus dan tingkat dampak dapat memengaruhi keputusan tentang penerapan strategi preventif atau diagnostik. Dengan cara ini, para pemangku kepentingan dapat menggunakan risk matrix sebagai alat komunikasi risiko yang efektif dan untuk menentukan level risiko yang dapat diterima atau membutuhkan intervensi tambahan.

Metodologi Risk Matrix pada dasarnya merupakan pendekatan kualitatif maupun semi-kuantitatif. Pendekatan kualitatif terjadi ketika penilaian probabilitas dan dampak tidak diberi nilai numerik yang ketat tetapi kategori seperti “jarang”, “mungkin”, atau “sering”, serta “dampak ringan”, “sedang”, atau “parah”. Sedangkan pendekatan semi-kuantitatif menggunakan skala numerik sederhana untuk kemungkinan dan dampak yang kemudian dikombinasikan ke dalam matriks. Kedua pendekatan ini tetap menyajikan informasi yang memadai untuk pemangku kebijakan atau analisis risiko dalam menilai prioritas risiko yang ada. Secara praktis, risk matrix juga dapat dikembangkan menjadi matriks *likelihood* × *consequence* dengan metode skor skala tertentu, yang kemudian dikategorikan ke dalam daftar risiko yang mempengaruhi keputusan manajemen risiko selanjutnya (Alfariki & Rizqi, 2025).

Walaupun mudah dipahami dan digunakan, (Lane & Gagnon, 2022) juga menyatakan bahwa Risk Matrix bukan tanpa keterbatasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa tingkat estimasi probabilitas dan konsekuensi yang digunakan dalam Risk Matrix cenderung bersifat subjektif jika data lengkap tidak tersedia. Oleh karena itu, Risk Matrix sebaiknya digunakan bersama dengan teknik lain seperti distribusi probabilitas, simulasi, atau *quantitative risk analysis* ketika data tersedia untuk meningkatkan akurasi prediksi risiko. Presentasi visual dari risk matrix tetap menjadi cara yang efektif untuk memprioritaskan risiko, namun ketelitian penilaian probability dan impact tetap harus diperhatikan agar hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

## 2.8 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Tabel 2. 3 Format FMEA

Operational Mode:		Describe the operational mode									
Description of Unit		Description of failure			Effects of Failure		Safeguards		Severity <sup>1</sup>	Likelihood <sup>1</sup>	Corrective Actions
ID	Function	Failure Mode	Failure Causes	Detection of Failure	Local	Global	Prevention of Failure	Mitigation of Effect	Low/Med/High	Low/Med/High	
				How do you know that the failure is occurring?	Effects on the same system Loss of functions	Effects on other systems, on the overall system and effects on HSE					

*Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) adalah metode sistematis untuk mengidentifikasi kemungkinan mode kegagalan suatu komponen atau subsistem,

menganalisis penyebab dan efeknya, serta menilai tingkat risiko untuk menentukan tindakan pengendalian atau mitigasi. FMEA awalnya dikembangkan untuk industri manufaktur dan kedirgantaraan, dan kemudian diadaptasi luas ke bidang kelautan dan *offshore* karena kemampuannya untuk mendukung desain yang aman, perencanaan pemeliharaan, dan penilaian risiko operasional (Wang et al., 2020). FMEA sering digunakan untuk menilai fungsi-fungsi kritis seperti sistem propulsi, sistem kelistrikan, sistem hidraulik, dan kontrol otomasi dengan pedoman klasifikasi (ABS Guidance of FMEA, 2015) merekomendasikan agar FMEA mencakup definisi mode operasi, identifikasi mode kegagalan, efek lokal dan sistemik, deteksi, dan pengendalian yang ada serta mengaitkannya dengan penilaian kritikalitas (*severity/likelihood*) untuk kepatuhan klasifikasi dan kelayakan operasi. Penggunaan FMEA sesuai ABS menjadi praktik yang diakui saat melakukan verifikasi atau penyusunan dokumentasi keselamatan untuk kapal dan unit *offshore*.

Menurut (Daya & Lazakis, 2023) pada rekayasa kelautan dan pemeliharaan menunjukkan bahwa FMEA apabila digabungkan dengan analisis data operasional dan metode kuantitatif lainnya, mampu meningkatkan ketepatan prioritas tindakan pemeliharaan dan alokasi sumber daya. Studi tentang kerangka kerja reliabilitas untuk sistem maritim menegaskan bahwa integrasi FMEA dengan analisis kuantitatif mendukung keputusan pemeliharaan berbasis risiko (*risk-based maintenance*) dan pengurangan *downtime* operasional. Pendekatan hibrid ini direkomendasikan untuk sistem yang kompleks seperti *propulsion/auxiliary systems*.

Secara khusus untuk sistem propulsi elektrik/hidraulik kapal, (Herdzik, 2019) mengilustrasikan bahwa FMEA mampu mengidentifikasi mode-mode kegagalan yang berdampak langsung pada kemampuan manuver dan daya tahan komponen. Penelitian terapan pada sistem propulsi dan pengendalian posisi kapal menunjukkan bagaimana FMEA dipakai sejak fase desain sampai operasional untuk memetakan konsekuensi kegagalan pada kemampuan manuver dan sistem *Dynamically Positioned*, memberi dasar bagi persyaratan redundansi, monitoring, dan PMS (*Planned Maintenance System*).

## 2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu memiliki peran penting dalam memberikan landasan teoritis dan empiris terhadap penelitian yang dilakukan, serta sebagai acuan untuk mengetahui perkembangan metode dan pendekatan yang telah digunakan sebelumnya. Selain itu, kajian terhadap penelitian terdahulu juga bertujuan untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian sehingga penelitian yang dilakukan memiliki kontribusi yang jelas dan terarah.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, penelitian terkait keandalan sistem propulsi kapal dan analisis risiko telah berkembang dengan berbagai pendekatan, baik secara kuantitatif maupun kualitatif. Salah satu penelitian oleh (Islam et al., 2025) menggunakan pendekatan bibliometrik dan *literature review* untuk menganalisis tren penelitian dalam bidang keandalan sistem propulsi kapal. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Mean Time Between Failures* (MTBF) merupakan salah satu indikator yang paling banyak digunakan dalam evaluasi keandalan sistem, terutama karena kemampuannya dalam menggambarkan frekuensi kegagalan berdasarkan data historis. Selain itu, penelitian tersebut juga menekankan pentingnya integrasi antara analisis keandalan dan analisis risiko, khususnya pada sistem yang kompleks seperti sistem propulsi kapal.

Penelitian lain yang dilakukan oleh (Kazemi & Kornev, 2025) berfokus pada analisis performa *bow thruster* menggunakan pendekatan numerik berbasis hidrodinamika. Dalam penelitian tersebut, ditunjukkan bahwa performa *bow thruster* sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, seperti variasi kecepatan dan kondisi desain maupun *off-design*. Meskipun penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memahami karakteristik operasional *bow thruster*, namun pendekatan yang digunakan masih terbatas pada aspek

performa teknis dan belum mencakup analisis keandalan maupun risiko kegagalan secara kuantitatif.

Selanjutnya, penelitian oleh (Lemmens et al., 2022) mengembangkan pendekatan *Risk Matrix* sebagai alat bantu dalam pengambilan keputusan dengan mengombinasikan probabilitas dan dampak kegagalan. Metode ini memberikan kerangka kerja yang sistematis dalam mengklasifikasikan tingkat risiko sehingga memudahkan penentuan prioritas penanganan. Dalam konteks industri maritim, *Risk Matrix* banyak digunakan karena sifatnya yang sederhana namun efektif dalam memvisualisasikan tingkat risiko. Namun demikian, penelitian ini lebih berfokus pada pengembangan metodologi dan belum secara spesifik mengintegrasikan data keandalan seperti MTBF.

Penelitian oleh (Risna & Lutfi, 2019) menggunakan kombinasi metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Fault Tree Analysis* (FTA), serta distribusi *Weibull* untuk menganalisis keandalan sistem bahan bakar pada mesin utama kapal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan metode gabungan dapat meningkatkan akurasi dalam mengidentifikasi mode kegagalan serta menentukan prioritas perawatan. Pendekatan ini menegaskan bahwa analisis keandalan yang komprehensif memerlukan integrasi beberapa metode kuantitatif.

Selain itu, (Bancin S et al., 2025) mengkaji keandalan sistem pelumasan mesin induk kapal menggunakan pendekatan FMEA berbasis fuzzy dan rantai Markov. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan tersebut mampu meningkatkan nilai MTBF serta mengidentifikasi komponen kritis yang memiliki tingkat risiko tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa metode analisis keandalan yang dikombinasikan dengan pendekatan probabilistik dapat memberikan hasil yang lebih akurat dalam penentuan strategi pemeliharaan.

Perkembangan metode analisis juga ditunjukkan dalam penelitian oleh (Elmdoost-gashti et al., 2024), yang mengaplikasikan pendekatan *machine learning* dalam *predictive maintenance* pada sistem propulsi kapal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode berbasis data-driven memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memprediksi kegagalan dibandingkan metode konvensional seperti MTBF. Namun, implementasi metode ini memerlukan data yang besar serta kompleksitas komputasi yang tinggi, sehingga belum selalu praktis untuk diterapkan pada semua kondisi operasional.

Penelitian oleh (T. Zhu, 2025) melakukan perbandingan antara sistem kapal berawak dan tanpa awak menggunakan simulasi *discrete-event*. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan simulasi mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif terkait reliabilitas dan *availability* sistem. Meskipun demikian, pendekatan ini lebih bersifat simulatif dan belum secara langsung mengintegrasikan data historis kegagalan dalam analisisnya.

Sementara itu, (Bolbot et al., 2022) mengembangkan metodologi dalam penentuan skala *likelihood* dan *consequence* pada *Risk Matrix*, yang bertujuan untuk meningkatkan konsistensi dan akurasi dalam penilaian risiko. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam standarisasi penggunaan *Risk Matrix*, khususnya dalam konteks sistem maritim yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi.

Penelitian oleh (Liang et al., 2024) melakukan tinjauan sistematis terhadap teknik *prognostics and health management* (PHM) pada peralatan maritim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi antara metode prediktif dan indikator keandalan seperti MTBF dapat meningkatkan efektivitas pemeliharaan serta mengurangi risiko kegagalan yang tidak terduga.

Selain itu, (Proto et al., 2023) meneliti aspek visualisasi dalam *Risk Matrix* dan menunjukkan bahwa penyajian informasi risiko secara visual dapat meningkatkan pemahaman dan kualitas pengambilan keputusan oleh pemangku kepentingan. Hal ini menunjukkan bahwa selain metode analisis, aspek penyajian hasil juga memiliki peran penting dalam implementasi manajemen risiko.

Berdasarkan keseluruhan kajian penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai keandalan sistem propulsi kapal telah berkembang dengan berbagai metode dan pendekatan. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem propulsi utama dan belum banyak yang secara spesifik mengkaji sistem *bow thruster*, khususnya pada kapal *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)*. Selain itu, analisis keandalan dan analisis risiko masih sering dilakukan secara terpisah tanpa adanya integrasi yang kuat.

Lebih lanjut, penelitian yang mengombinasikan perhitungan MTBF berbasis data historis kegagalan dengan metode *Risk Matrix* untuk memetakan tingkat risiko kegagalan secara kuantitatif masih sangat terbatas. Padahal, integrasi kedua metode tersebut memiliki potensi besar dalam menghasilkan analisis yang lebih komprehensif, tidak hanya dalam mengukur tingkat keandalan tetapi juga dalam menentukan prioritas penanganan risiko.

Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan analisis MTBF dan *Risk Matrix* dalam mengevaluasi keandalan sistem *bow thruster* pada kapal AHTS. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam pengembangan metode analisis keandalan yang lebih terintegrasi serta mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko dalam strategi pemeliharaan.