

TUGAS AKHIR

ANALISIS SISTEM SAFETY DEVICE OVER SPEED PADA AUXILIARY ENGINE TERHADAP PEMBEBANAN LISTRIK DI KAPAL TANKER

*Diselesaikan untuk Melengkapi Tugas-tugas dan memenuhi Syarat-syarat Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*



Disusun Oleh:

FARHAN AFIDAL

2107220060

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Farhan Afidal

NPM : 2107220060

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Sistem Safety Device Overspeed Auxiliary Engine Terhadap
Pembebanan Listrik di Kapal Tanker

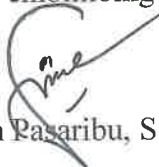
Bidang ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 4 Oktober 2025

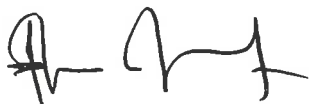
Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T

Dosen Pembimbing I / Penguji



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

Dosen Pembimbing II / Peguji



Arya Rudi Nasution, S.T., M.T

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Farhan Afidal
Tempat /Tanggal Lahir : Medan/04 Oktober 2002
NPM : 2107220060
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisis Sistem Safety Device Overspeed Auxiliary Engine Terhadap Pembebanan Listrik di Kapal Tanker”,

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 04 Oktober 2025

.....a yang menyatakan,



KATA PENGANTAR

Tidak ada kata lain untuk menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT kecuali ucapan syukur atas segala nikmat dengan curahan kasih sayang-Nya atas selesainya penelitian ini dengan baik, dengan judul: “Analisis *Sistem Safety Device Overspeed* pada *Auxiliary Engine* terhadap Pembebanan Listrik di Kapal Tanker.”

Penulisan penelitian ini dimaksudkan guna melengkapi sebagian persyaratan meraih gelar sarjana di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jurusan Teknik Elektro. Dalam menyusun penelitian ini, penulis tidak dapat melupakan jasa orang-orang yang telah ikut berperan serta sehingga penelitian ini dapat selesai.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada kedua orang tua saya, yakni Bapak Irfan dan Ibu Sri Rahma Sari, yang telah memberikan dukungan moral dan material serta doa yang tidak pernah berhenti demi kelancaran penulisan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Agussani, M.AP., selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Kepada ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro dan juga sebagai Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Kepada bapak Benny Oktrialdi, S.T., M.T sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, yang telah banyak memberikan ilmu keteknikeloktroan kepada penulis.
7. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Sahabat-sahabat penulis: Yogi Pangestu, Iwan Prayogo, Ragil Rean Wijaya, Yamin Azhari, Reski Abadi, Syahrul Ramdan, Rizky Wahyu Ramdana M.

9. Kepada saudari Dian Fahriza Syafitri, yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta motivasi kepada penulis sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
10. Teman-teman seperjuangan Elektro B1 Pagi Stambuk 2021 yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga segala bentuk bantuan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa proposal ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari bentuk penyusunan maupun materinya. Kritik konstruktif dari pembaca sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan proposal selanjutnya. Akhir kata, semoga proposal ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca sekalian.

Medan, 30 Juni 2025

Farhan Afidal

ABSTRAK

Auxiliary engine merupakan mesin bantu yang berfungsi sebagai penyedia tenaga listrik bagi berbagai sistem penting di kapal, termasuk navigasi, komunikasi, dan peralatan pendukung lainnya. Salah satu permasalahan yang sering muncul adalah terjadinya overspeed pada mesin, yang berpotensi menimbulkan kerusakan serius serta gangguan terhadap sistem kelistrikan kapal. Oleh karena itu, diperlukan sistem safety device overspeed yang mampu bekerja secara andal untuk menjaga kestabilan operasional. Penelitian ini dilakukan di PT Waruna Shipyard dengan tujuan menganalisis kinerja sistem *safety device overspeed* pada *auxiliary engine* serta dampaknya terhadap pembebanan listrik di kapal tanker. Metode penelitian mencakup pengumpulan data operasional mesin, perhitungan beban listrik, serta evaluasi faktor-faktor keandalan seperti load factor, power factor, voltage regulation, dan availability. Analisis dilakukan dengan pendekatan kuantitatif melalui simulasi perhitungan daya, efisiensi generator, serta distribusi beban, dan diperkuat dengan pendekatan kualitatif berupa studi lapangan terhadap pola kerja *safety device*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem safety device overspeed memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas distribusi daya dan mencegah risiko kerusakan mesin akibat kecepatan berlebih. Temuan penelitian menegaskan bahwa *optimalisasi safety device overspeed* dapat meningkatkan efisiensi pembebanan listrik, meminimalkan risiko gangguan operasional, serta mendukung keselamatan dan keberlanjutan *operasional* kapal tanker. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa generator bekerja paling efisien pada pembebanan 70–80% dari kapasitas penuh, sedangkan pembebanan terlalu rendah dapat menurunkan efisiensi secara signifikan. Implikasi dari penelitian ini menekankan pentingnya penerapan perawatan berkala dan monitoring digital berbasis sensor untuk meningkatkan akurasi deteksi *overspeed* serta memaksimalkan efisiensi penggunaan bahan bakar. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan praktis dalam manajemen operasi *auxiliary engine* di kapal tanker.

Kata kunci: auxiliary engine, overspeed, safety device, pembebanan listrik, kapal tanker.

ABSTRACT

The auxiliary engine is a supporting machine that provides electrical power for various essential systems on board a ship, including navigation, communication, and other operational equipment. One of the frequent problems encountered is overspeed, which can potentially cause severe damage to the engine and disrupt the ship's electrical system. Therefore, a reliable overspeed safety device is required to ensure stable and safe operations. This research was conducted at PT Waruna Shipyard with the objective of analyzing the performance of the overspeed safety device on the auxiliary engine and its impact on the electrical load of a tanker vessel. The research methodology involved collecting operational engine data, calculating electrical loads, and evaluating reliability factors such as load factor, power factor, voltage regulation, and system availability. The analysis combined quantitative approaches through power calculation, generator efficiency assessment, and load distribution simulation with qualitative observation on the working patterns of the safety device. The results indicate that the overspeed safety device plays a vital role in maintaining stable power distribution and preventing engine damage due to excessive rotational speed. The findings also highlight that optimizing the overspeed safety device can improve electrical load efficiency, minimize operational risks, and support both safety and sustainability in tanker operations. Furthermore, it was observed that the generator operates most efficiently at 70–80% of its rated capacity, whereas lower loading conditions significantly reduce efficiency. The implications of this research emphasize the importance of regular maintenance and the integration of sensor-based digital monitoring systems to enhance overspeed detection accuracy and optimize fuel efficiency. Therefore, the outcomes of this study are expected to serve as a practical reference for auxiliary engine operation management in tanker vessels.

Keywords: *auxiliary engine, overspeed, safety device, electrical load, tanker ship.*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	viii
BAB I.....	10
1.1 Latar Belakang	10
1.2 Rumusan Masalah	11
1.3 Ruang Lingkup.....	12
1.4 Tujuan Penelitian	12
1.5 Manfaat Penelitian	12
BAB II	14
2.1 Pengertian Auxiliary Engine	14
2.1.1 Sejarah Auxiliary Engine	14
2.1.2 Definisi dan Fungsi Auxiliary Engine.....	16
2.1.3 Jenis-Jenis Auxiliary Engine.....	17
2.1.4 Komponen Utama Auxiliary Engine.....	18
2.2 Prinsip dan Langkah Kerja Auxiliary Engine	25
2.2.1 Prinsip Kerja Auxiliary Engine	25
2.2.2 Siklus Operasional dan Pembebanan	27
2.3 Sistem Safety Device Overspeed	29
2.3.1 Pengertian <i>Safety Device OverSpeed</i>	29
2.3.2 Jenis-Jenis <i>Safety Device</i>	32
2.3.3 Fungsi dan Peran Safety Device dalam Pencegahan Overspeed.....	38
2.4 Sistem Pembebanan Listrik di Kapal	39
2.4.1 Konsep Pembebanan Listrik di kapal.....	39
2.5 Regulasi dan Standart Keselamatan	42
2.5.1 Peraturan Keselamatan di Kapal Tanker	42
2.6 Komponen dan Fungsi Sistem Proteksi Overspeed Auxiliary Engine.....	44
2.6.1 Komponen dan Fungsi	45

2.7	Tinjauan Pustaka Relevan	60
BAB III	62
3.1	Waktu dan Tempat	62
3.1.1	Waktu	62
3.2	Alat dan Bahan	62
3.2.1	Alat Penelitian	63
3.2.2	Bahan Penelitian	63
3.3	Prosedur Kerja Alat	64
3.4	Tahapan Penelitian	64
3.5	Analisa Data	65
3.6	Parameter Penelitian	66
3.6.1	Parameter Safety Overspeed	66
3.7	Flowchart Penelitian	68
BAB IV	71
4.1	Spesifikasi Auxiliary Engine	71
4.1.1	Kinerja Safety Device Overspeed	72
4.1.2	Sensor Kecepatan	74
4.1.3	Monitoring Governour	75
4.1.4	Monitoring Set Point	76
4.1.5	Efektivitas dalam Menjaga Stabilitas Operasional	78
4.1.6	Hubungan dengan Efisiensi Pembebanan dan Keandalan	80
4.2	Perhitungan Alternator 90 kW → 440 VAC (3-Phase)	81
4.3	Perhitungan Beban	83
4.3.1	Perhitungan Beban Lampu	83
4.3.2	Perhitungan Beban Komputer	86
4.3.3	Perhitungan Safety Device	87
4.4	Perhitungan Gulungan Trafo: 440↔220 VAC dan 440 VAC→24 V (AC→DC)	87
4.5	Distribusi Beban per-Fase (Seimbang)	88
4.6	Beban Solenoid Stop & Respons Overspeed Trip	89
4.7	Proteksi & Koordinasi (MCB/Fuse) dan Margin Keamanan	89
BAB V	90
5.1	Kesimpulan	90
5.2	Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diesel Auxliary Engine	17
Gambar 2.2 Steam Turbine Auxiliary Engine	18
Gambar 2.3 Blok Silinder	19
Gambar 2.4 Piston.....	19
Gambar 2.5 Connecting Rod.....	20
Gambar 2.6 Crankshaft	20
Gambar 2.7 Cylinder Head dan Katub.....	21
Gambar 2.8 Camshaft	21
Gambar 2.9 Sistem Bahan Bakar	22
Gambar 2.10 Sistem Pendingin.....	22
Gambar 2.11 Turbocharger	23
Gambar 2.12 Sistem Starting Air.....	23
Gambar 2.13 Sistem Pelumas	24
Gambar 2.14 Governor	24
Gambar 2.15 Overspeed Trip.....	25
Gambar 2.16 Safety Device	29
Gambar 2.17 Alarm Sistem.....	32
Gambar 2.18 Shutdown System.....	33
Gambar 2.19 Overspeed Trip Device	33
Gambar 2.20 Pressure Relief Valve.....	34
Gambar 2.21 Emergency Stop System	35
Gambar 2.22 Fire Detection and Extinguishing System.....	35
Gambar 2.23 Level Control Safety Device	36
Gambar 2.24 Temperatur Protection System.....	37
Gambar 2.25 Interlock System.....	37
Gambar 2.26 Gas Detection System	38
Gambar 2.27 Sensor PZEM-004T	46
Gambar 2.28 Speed Sensor (Tachometer/Proximity Sensor)	48
Gambar 2.29 Speed Limiter	50
Gambar 2.30 Governor	52
Gambar 2.31 Overspeed Trip Mechanism	54
Gambar 2.32 Trip Lever / Solenoid	58
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Waktu Penelitian.....	62
Table 2 Parameter Safety Overspeed.....	66
Tabel 3 Perhitungan Beban Lampu.....	83
Table 4 Parameter Beban Lampu.....	85
Tabel 5 Perhitungan Gulungan Trafo: 440↔220 VAC dan 440 VAC→24 V (AC→DC)	87
Table 6 Distribusi Beban per Fase	88

DAFTAR GRAFIK

Grafik 1.1 RPM vs Waktu dengan Batas Overspeed	73
Grafik 1.2 Frekuensi vs Waktu	78
Grafik 1.3 Tegangan (v) vs Beban (kW).....	79
Grafik 1.4 Power Factor.....	81
Grafik 1.5 Per-Lamp Current	84
Grafik 1.6 Cumulative Power per Phase as Lamps are Added	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penelitian ini berfokus pada analisis sistem *safety device over speed* pada *auxiliary engine* terhadap pembebanan listrik di kapal tanker. *Auxiliary engine* merupakan mesin pendukung yang berperan penting dalam menyediakan tenaga listrik untuk operasional kapal, termasuk sistem navigasi, komunikasi, dan peralatan lainnya. Salah satu masalah yang sering dihadapi adalah terjadinya *over speed* pada *auxiliary engine*, yang dapat menyebabkan kerusakan mesin dan gangguan pada sistem kelistrikan kapal. Oleh karena itu, *sistem safety device over speed* menjadi komponen kritis yang harus dioptimalkan untuk memastikan keamanan dan keandalan operasional kapal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana *sistem safety device over speed* dapat memengaruhi pembebanan listrik dan stabilitas operasional kapal tanker.

Variabel utama dalam penelitian ini meliputi kinerja *sistem safety device over speed*, pembebanan listrik pada kapal, dan kondisi operasional *auxiliary engine*. *Sistem safety device over speed* berfungsi untuk memonitor dan mengontrol kecepatan mesin agar tidak melebihi batas aman. Pembebanan listrik diukur berdasarkan kebutuhan daya yang disuplai oleh *auxiliary engine* ke berbagai sistem di kapal. Selain itu, kondisi operasional mesin, seperti suhu, tekanan oli, dan kualitas bahan bakar, juga menjadi variabel yang memengaruhi kinerja *sistem safety device*. Penelitian ini akan menganalisis hubungan antara variabel-variabel tersebut untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi dan keamanan sistem.

Berdasarkan beberapa penelitian telah membahas aspek-aspek terkait data dari beberapa studi sebelumnya, masalah *over speed* pada *auxiliary engine* sering disebabkan oleh kegagalan sistem kontrol, seperti actuator yang tidak merespons dengan cepat atau *tachometer* yang tidak akurat, penelitian ini juga terdapat research gap yang fokus pada kegagalan actuator dan tachometer, namun tidak membahas dampaknya terhadap pembebanan listrik di kapal (Khamdilah & Kundori, 2020a). Selain itu, mengidentifikasi pentingnya perawatan *safety equipment*, namun tidak mengaitkannya dengan *sistem safety device over speed* pada *auxiliary engine*, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa perawatan yang tidak optimal terhadap *safety equipment* dapat meningkatkan risiko kegagalan sistem dan membahayakan keselamatan awak kapal (Mashartanto et al., 2023). Penelitian berikutnya membahas integrasi sistem keamanan, namun tidak

fokus pada kapal atau mesin maritim, Data dari (Stefańczyk et al., 2022a) juga menunjukkan bahwa sistem keamanan yang terintegrasi dengan baik dapat mengurangi risiko kegagalan operasional secara signifikan. Penelitian berikutnya oleh (Nugraha et al., 2023a) membahas optimalisasi pembebanan listrik, namun tidak mencakup aspek keamanan mesin. Dengan demikian, beberapa penelitian sebelumnya ini memiliki relevansi tinggi untuk mengatasi masalah tersebut melalui analisis *sistem safety device over speed* dan penelitian ini akan mengisi research gap dengan menganalisis integrasi *sistem safety device over speed* dan pembebanan listrik di kapal tanker.

Urgensi dari topik penelitian ini terletak pada pentingnya menjaga keamanan dan keandalan operasional kapal tanker. Kapal tanker merupakan salah satu jenis kapal yang mengangkut muatan berbahaya, seperti minyak dan gas, sehingga kegagalan sistem dapat menimbulkan risiko besar, termasuk kecelakaan dan pencemaran lingkungan. *Sistem safety device over speed* berperan sebagai mekanisme proteksi yang mencegah kerusakan mesin akibat kecepatan berlebih. Namun, jika sistem ini tidak berfungsi optimal, dapat terjadi gangguan pada pembebanan listrik yang berdampak pada stabilitas operasional kapal. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki urgensi tinggi untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional kapal tanker.

Tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis kinerja *sistem safety device over speed* pada *auxiliary engine* dan dampaknya terhadap pembebanan listrik di kapal tanker. Penelitian ini akan mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi *sistem safety device* dan memberikan rekomendasi untuk optimasi sistem. Kontribusi penelitian ini meliputi peningkatan keamanan operasional kapal, pengurangan risiko kerusakan mesin, dan optimalisasi pembebanan listrik. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi industri maritim dalam mengembangkan *sistem safety device* yang lebih andal dan efisien, serta mendukung keberlanjutan operasional kapal tanker.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana *sistem safety device over speed* pada *auxiliary engine* dalam mencegah terjadinya *over speed*
2. Bagaimana efektivitas *sistem safety device over speed* dalam menjaga stabilitas operasional *auxiliary engine*?

3. Bagaimana hubungan antara sistem *safety device over speed* dengan efisiensi pembebanan listrik di kapal tanker menggunakan metode pengumpulan data lapangan?

1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Objek Penelitian: Sistem *safety device over speed* pada *auxiliary engine* di kapal tanker, pembebanan lampu dan komputer di kapal
2. Faktor yang mempengaruhi efektivitas sistem *safety device over speed* meliputi beberapa variable:
 1. Variabel independen: Putaran flywell sistem *safety device over speed*.
 2. Variabel dependen: Pembebanan listrik dan stabilitas operasional kapal.
 3. Variabel kontrol: Kondisi operasional *auxiliary engine* (suhu, tekanan oli, dan kualitas bahan bakar).
3. Lingkup Analisis: Analisis dilakukan terhadap hubungan antara kinerja sistem *safety device over speed* dengan pembebanan listrik, serta faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas sistem tersebut.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sistem *safety device over speed* pada *auxiliary engine* dalam mencegah terjadinya *over speed* dan dampaknya terhadap pembebanan listrik di kapal tanker.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas sistem *safety device over speed* dalam menjaga stabilitas operasional *auxiliary engine*.
3. Mengetahui hubungan antara sistem *safety device over speed* dengan efisiensi pembebanan listrik dan keandalan operasional kapal tanker.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan rekomendasi kepada industri maritim dalam meningkatkan keandalan pada *auxiliary engine*.
2. Membantu mengurangi risiko kerusakan mesin dan gangguan operasional akibat *over speed*, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional kapal tanker.

3. Memberikan panduan dalam mengoptimalkan pembebanan listrik untuk mendukung stabilitas operasional kapal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Auxiliary Engine

2.1.1 Sejarah Auxiliary Engine

Perkembangan auxiliary engine tidak dapat dipisahkan dari sejarah perkembangan mesin diesel itu sendiri. Sejak awal abad ke-20, kebutuhan tenaga tambahan di kapal mulai muncul seiring meningkatnya kompleksitas sistem yang harus didukung selain propulsi utama. Kapal MS Selandia pada tahun 1912 menjadi salah satu tonggak penting dalam sejarah maritim, karena kapal ini sepenuhnya menggunakan tenaga diesel, yang sekaligus menunjukkan betapa mesin bantu berbasis diesel mulai mendapatkan tempat dalam operasi kapal modern. Di sisi lain, pabrikan Sulzer berhasil mengembangkan mesin dua langkah untuk kapal pada tahun 1905, dan beberapa tahun kemudian mesin bantu Sulzer dipasang pada kapal *Monte Penedo* pada tahun 1912. Hal ini menunjukkan bahwa mesin bantu tidak hanya sekadar pelengkap, melainkan bagian integral dalam mendukung operasi kapal, khususnya pada sistem kelistrikan dan pompa.

Pada masa Perang Dunia I, kebutuhan tenaga tambahan di kapal meningkat pesat karena berbagai sistem baru, seperti radio komunikasi dan penerangan, mulai membutuhkan suplai energi yang lebih stabil. Perkembangan ini semakin dipertegas pada masa Perang Dunia II, ketika teknologi injeksi tanpa udara (airless injection) dan turbocharger mulai diterapkan pada mesin diesel, sehingga daya keluaran mesin bantu semakin besar dan lebih efisien. Perubahan ini juga berkaitan erat dengan meningkatnya ukuran kapal serta kebutuhan daya listrik yang lebih besar untuk sistem navigasi, pendinginan muatan, hingga keselamatan kapal.

Memasuki era modern, auxiliary engine pada kapal berperan sebagai penggerak generator yang menyediakan tenaga listrik untuk seluruh kebutuhan di atas kapal, mulai dari sistem penerangan, navigasi, HVAC, hingga sistem keselamatan. Mesin ini umumnya berupa mesin diesel yang dihubungkan dengan alternator, menghasilkan listrik dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz tergantung standar wilayah operasinya. Agar operasi berjalan stabil, generator kapal perlu dioperasikan secara paralel dengan sistem sinkronisasi menggunakan

synchroscope atau metode tiga lampu. Dengan cara ini, kapal dapat memastikan pasokan listrik selalu tersedia tanpa gangguan.

Selain di bidang maritim, perkembangan auxiliary engine juga berlanjut pada dunia penerbangan melalui konsep Auxiliary Power Unit (APU). Perangkat ini pertama kali digunakan pada masa Perang Dunia I dalam bentuk mesin kecil pada kapal udara (blimp) yang digunakan untuk menggerakkan generator radio dan blower tambahan. Pada Perang Dunia II, Amerika Serikat mengaplikasikan APU pada pesawat B-29 Superfortress, yang dikenal dengan sebutan “putt-putt”, untuk membantu menyalakan mesin utama dan menyuplai tenaga listrik ketika pesawat berada di darat. Inovasi serupa juga berkembang di Jerman dengan hadirnya mesin Riedel sebagai starter bagi mesin jet Jumo 004 dan BMW 003. Puncaknya terjadi pada tahun 1963 ketika Boeing 727 menjadi pesawat komersial pertama yang dilengkapi dengan APU berbasis turbin gas, yang memungkinkan pesawat beroperasi mandiri tanpa bergantung pada sumber tenaga dari darat.

Perkembangan auxiliary engine juga dapat ditemukan pada dunia pelayaran rekreasi, terutama pada yacht dan sailboat. Universal Atomic 4, sebuah mesin bensin empat silinder, diproduksi antara tahun 1949 hingga 1984 dan digunakan secara luas sebagai mesin bantu pada berbagai kapal layar. Meskipun mesin ini sempat sangat populer, pada dekade 1970-an posisinya mulai tergeser oleh mesin diesel marinasi produksi Yanmar yang lebih efisien, tahan lama, dan ekonomis.

Di samping sejarahnya, penelitian-penelitian ilmiah modern semakin menegaskan pentingnya auxiliary engine. Zhang, Yang, Song, dan Fu (2017) dalam *Energy Procedia* meneliti tentang sistem distribusi energi pada auxiliary power unit dan menunjukkan bagaimana kontrol distribusi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan daya. Sementara itu, Goldsworthy & Goldsworthy (2018) dalam jurnal *Science of the Total Environment* menyoroti peran mesin bantu dalam estimasi emisi kapal serta bagaimana metode perhitungan daya mesin bantu dapat memengaruhi keakuratan data emisi. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan bahwa auxiliary engine tidak hanya penting secara teknis, tetapi juga berkontribusi pada isu keberlanjutan lingkungan.

2.1.2 Definisi dan Fungsi Auxiliary Engine

Auxiliary engine atau mesin bantu pada dasarnya adalah mesin non-propulsi yang berfungsi menyediakan tenaga listrik bagi seluruh sistem pendukung operasi kapal maupun instalasi pembangkit. Mesin ini bekerja terpisah dari mesin utama yang digunakan untuk propulsi, sehingga perannya lebih mengarah pada menjaga keberlangsungan sistem penerangan, navigasi, pompa, pendingin, serta berbagai sistem keselamatan yang ada. Menurut Diesel Services of America, auxiliary engine dapat dipahami sebagai “sumber kehidupan” kapal karena seluruh kebutuhan energi listrik pada peralatan penunjang hanya bisa terpenuhi melalui mesin ini. Pandangan lain, sebagaimana dijelaskan dalam Marine Knowledge, menyebut bahwa auxiliary engine merupakan *prime mover* bagi generator di kapal, yang dapat berupa mesin pembakaran dalam, turbin uap, maupun turbin gas, dengan fungsi utama menggerakkan generator agar listrik tersedia secara kontinyu.

Apabila dikaitkan dengan penelitian tentang (Vinaya, n.d.), auxiliary engine memiliki peran vital sebagai penyedia tenaga listrik cadangan. Sistem SIS bekerja untuk mengamankan operasi turbin gas dan boiler, sehingga membutuhkan catu daya yang stabil agar proteksi dan kontrol tetap berfungsi ketika terjadi gangguan. Dalam konteks ini, auxiliary engine menjadi penjaga kesinambungan operasi instrumen keselamatan, karena tanpa daya listrik yang andal, sistem proteksi tidak mampu merespons sesuai desainnya.

Pada kasus (Faris Abid Abiyyu et al., 2024), keberadaan auxiliary engine juga sangat menentukan. Emergency generator seharusnya mampu aktif secara otomatis pada kondisi darurat ketika sumber tenaga utama tidak tersedia. Namun, kegagalan start-stop sering kali terjadi akibat kerusakan pada mekanisme pengendalian atau gangguan pada auxiliary engine itu sendiri. Kondisi ini sangat berisiko karena apabila mesin bantu tidak dapat menghidupkan emergency generator, maka kapal akan kehilangan tenaga listrik untuk lampu navigasi, pompa darurat, maupun sistem komunikasi, sehingga keselamatan awak dan operasional kapal terancam.

Begitu pula dalam kaitannya dengan upaya mengurangi kecelakaan kerja di kapal MV Jales Mas, auxiliary engine berkontribusi secara tidak langsung dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman. Mesin ini memastikan sistem penerangan, ventilasi, alarm, serta peralatan keselamatan lain tetap berjalan normal. Apabila auxiliary engine gagal berfungsi, risiko kecelakaan kerja dapat meningkat, misalnya akibat kondisi gelap, kurangnya sirkulasi

udara, atau tidak aktifnya sistem peringatan dini. Dengan demikian, auxiliary engine tidak hanya berfungsi secara teknis sebagai penyedia tenaga listrik, tetapi juga berperan strategis dalam mendukung keselamatan kerja awak kapal.

2.1.3 Jenis-Jenis Auxiliary Engine

Jenis-jenis auxiliary engine pada kapal maupun instalasi pembangkit dapat dibedakan berdasarkan sumber energi dan fungsinya. Yang paling umum digunakan adalah auxiliary engine berbasis mesin diesel, karena mesin ini terbukti andal, efisien, serta mudah dalam perawatan. Mesin diesel sebagai penggerak generator merupakan standar di hampir semua kapal niaga, kapal tanker, kapal kontainer, maupun kapal penumpang. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh generator dari mesin ini digunakan untuk sistem penerangan, navigasi, komunikasi, hingga peralatan keselamatan.

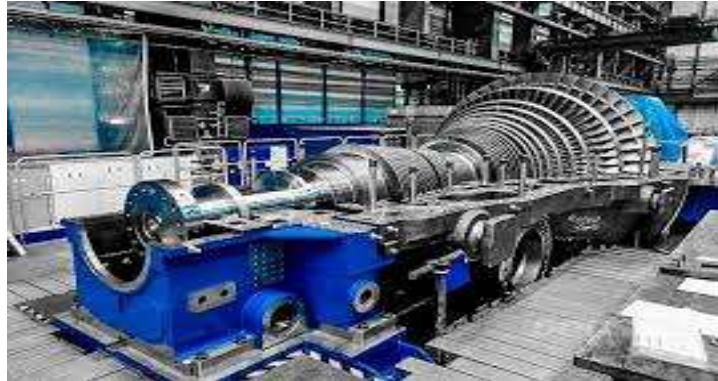
A. Diesel Auxiliary Engine



Gambar 2.1 *Diesel Auxliary Engine*(DWI RENALDI LUKAS, 2023a)

Pada gambar 2.1 *Diesel Auxiliary Engine* adalah mesin pembakaran dalam berbahan bakar solar (HSD atau MDO) yang paling umum digunakan di kapal niaga. Mesin ini biasanya menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik dengan frekuensi standar 50 Hz atau 60 Hz. Karena keandalan dan efisiensinya, tipe ini menjadi pilihan utama di hampir semua kapal modern.

B. Steam Turbine Auxiliary Engine



Gambar 2.2 *Steam Turbine Auxiliary Engine*(DWI RENALDI LUKAS, 2023a)

Pada gambar 2.2 *steam turbine auxiliary engine* menggunakan uap sebagai sumber energi. Mesin ini umumnya dipakai pada kapal tanker besar atau kapal LNG yang sudah memiliki sistem boiler. Uap yang dihasilkan boiler tidak hanya dipakai untuk pemanas muatan, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin kecil yang terhubung ke generator.

2.1.4 Komponen Utama Auxiliary Engine

Auxiliary engine merupakan mesin bantu yang dipasang di kapal untuk menghasilkan tenaga listrik dan mendukung berbagai peralatan kapal agar dapat beroperasi dengan baik. Mesin ini tersusun dari banyak komponen utama yang saling berkaitan, di mana setiap komponen memiliki fungsi spesifik namun tetap bekerja secara terintegrasi. Pemahaman mengenai masing-masing komponen sangat penting karena dari sinilah dapat diketahui bagaimana mesin bekerja serta bagaimana cara merawatnya agar tetap andal selama beroperasi. Berikut adalah penjelasan mengenai komponen-komponen utama auxiliary engine beserta fungsi dan perannya dalam sistem kerja mesin.

1. Blok Silinder



Gambar 2.3 Blok Silinder(Ridwan et al., 2020a)

Pada gambar 2.3 *blok silinder* merupakan kerangka utama mesin yang menampung berbagai komponen penting, termasuk silinder sebagai ruang pembakaran. Di dalamnya terdapat silinder liner yang berfungsi menahan gesekan piston serta menahan panas dan tekanan tinggi akibat pembakaran. Silinder liner biasanya terbuat dari bahan baja khusus yang tahan aus dan bisa diganti jika mengalami kerusakan, sehingga perawatan mesin lebih mudah dilakukan.

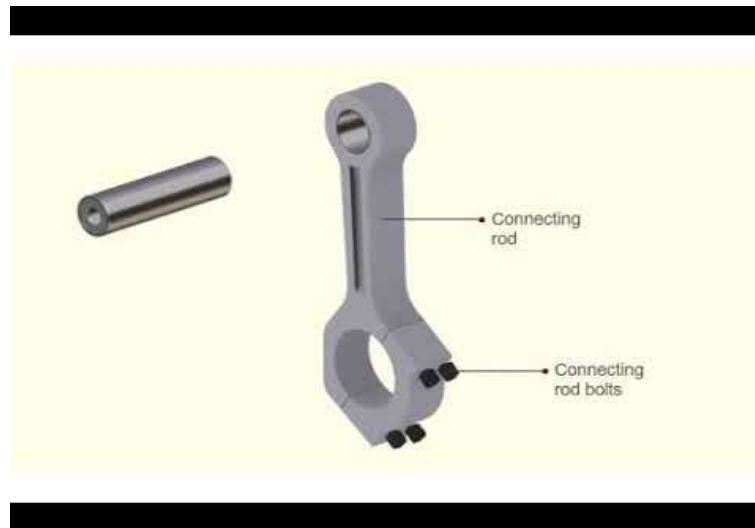
2. Piston



Gambar 2.4 Piston(Ridwan et al., 2020a)

Pada gambar 2.4 menjelaskan bahwa piston adalah komponen yang bergerak naik turun di dalam silinder sebagai akibat dari proses pembakaran bahan bakar. Gerakan piston ini sangat penting karena menjadi awal dari perubahan energi panas menjadi energi mekanik. Piston menerima tekanan hasil pembakaran dan meneruskannya ke connecting rod sehingga energi bisa diubah menjadi gerakan rotasi.

3. Connecting Rod



Gambar 2.5 *Connecting Rod*(Ridwan et al., 2020a)

Pada gambar 2.5 menjelaskan bahwa connecting rod atau batang penghubung adalah komponen yang menghubungkan piston dengan crankshaft. Gerakan linear piston diteruskan melalui connecting rod agar crankshaft dapat berputar. Batang penghubung ini harus memiliki kekuatan tinggi karena menanggung beban siklus naik turun piston secara terus-menerus.

4. Crankshaft



Gambar 2.6 *Crankshaft*(Ridwan et al., 2020a)

Pada gambar 2.6 menjelaskan bahwa crankshaft berfungsi mengubah gerakan naik turun piston menjadi putaran rotasi yang bisa dimanfaatkan untuk menggerakkan generator atau peralatan lainnya. Putaran crankshaft inilah yang menjadi sumber tenaga utama dari auxiliary engine. Agar putaran tetap halus, crankshaft biasanya dilengkapi dengan flywheel yang membantu menstabilkan putaran.

5. Cylinder Head dan Katup



Gambar 2.7 *Cylinder Head dan Katub*(Ridwan et al., 2020a)

Pada gambar 2.7 menjelaskan bahwa cylinder head berada di bagian atas silinder dan memiliki peran penting sebagai tempat dudukan katup masuk (intake valve) dan katup buang (exhaust valve). Katup masuk berfungsi untuk mengatur aliran udara bersih ke dalam silinder, sedangkan katup buang mengeluarkan gas hasil pembakaran. Katup ini diatur oleh mekanisme camshaft sehingga buka-tutupnya sesuai dengan siklus kerja mesin.

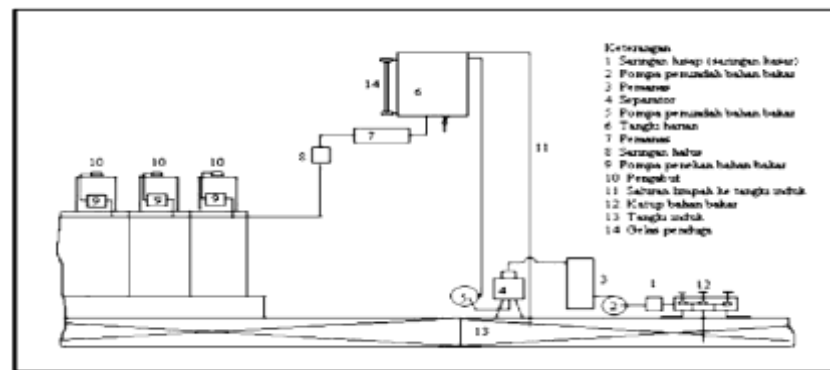
6. Camshaft



Gambar 2.8 *Camshaft*(Tri Novian Nrp & Hari Prastowo, n.d.)

Pada gambar 2.8 menjelaskan bahwa camshaft adalah poros nok yang bertugas mengatur buka tutup katup dengan waktu yang tepat sesuai siklus kerja mesin. Putaran camshaft biasanya digerakkan oleh crankshaft melalui gear atau rantai penghubung. Camshaft memastikan agar katup terbuka hanya saat dibutuhkan, sehingga proses pemasukan udara dan pembuangan gas buang dapat berjalan lancar.

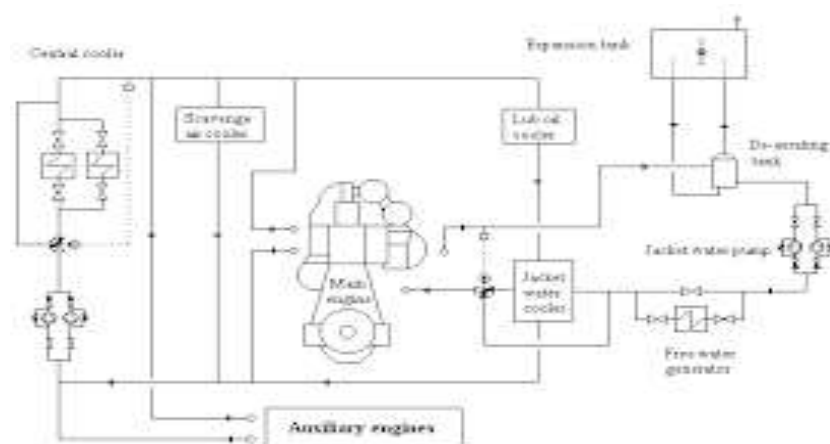
7. Sistem Bahan Bakar



Gambar 2.9 Sistem Bahan Bakar (Tri Novian Nrp & Hari Prastowo, n.d.)

Pada gambar 2.9 menjelaskan bahwa sistem bahan bakar terdiri dari fuel pump, fuel injector, dan saluran pipa bahan bakar. Fuel pump bertugas menyalurkan bahan bakar dari tangki dengan tekanan tertentu menuju injector. Fuel injector kemudian menyemprotkan bahan bakar ke dalam ruang bakar dalam bentuk kabut halus agar mudah bercampur dengan udara. Sistem ini menentukan efisiensi pembakaran serta performa mesin secara keseluruhan.

8. Sistem Pendingin



Gambar 2.10 Sistem Pendingin (Tri Novian Nrp & Hari Prastowo, n.d.)

Pada gambar 2.10 menjelaskan bahwa sistem pendingin sangat penting untuk menjaga suhu mesin agar tidak terlalu panas. Pendinginan dilakukan dengan menggunakan air laut atau fresh water yang dialirkan ke jacket water di sekitar silinder dan cylinder head. Air pendingin ini menyerap panas dari mesin lalu

dialirkan ke heat exchanger untuk diturunkan kembali suhunya sebelum digunakan lagi.

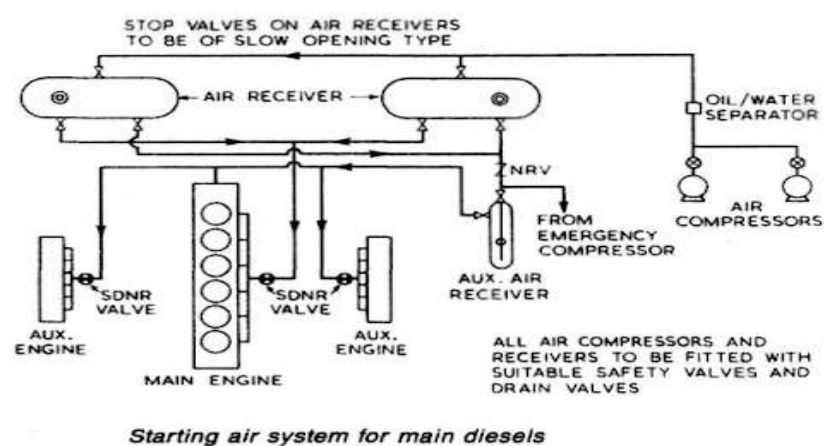
9. Turbocharger



Gambar 2.11 Turbocharger (Khamdilah & Kundori, 2020b)

Pada gambar 2.11 menjelaskan bahwa *turbocharger* adalah komponen yang memanfaatkan energi gas buang untuk memutar turbin yang kemudian menggerakkan kompresor udara. Kompresor ini akan memasukkan lebih banyak udara bertekanan ke dalam silinder sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna. Dengan adanya turbocharger, daya mesin bisa meningkat tanpa harus memperbesar ukuran silinder.

10. Sistem Starting Air

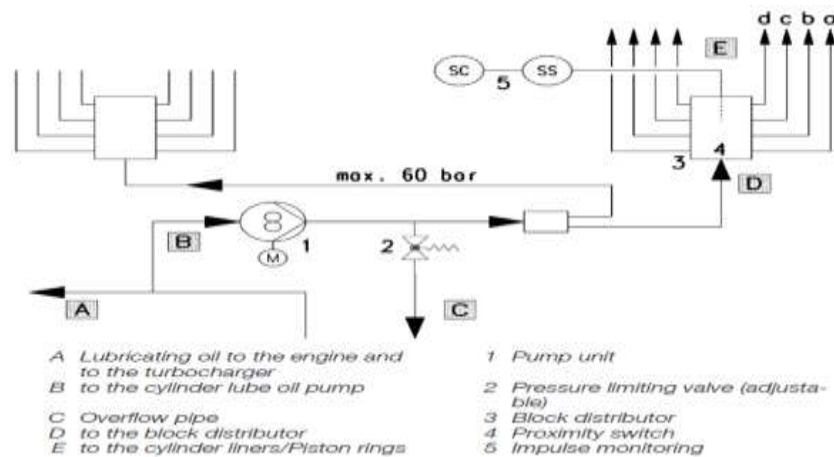


Gambar 2.12 Sistem Starting Air(Khamdilah & Kundori, 2020b)

Pada gambar 2.12 menjelaskan bahwa sistem starting air digunakan untuk menghidupkan mesin pada saat awal. Sistem ini bekerja dengan menyemprotkan

udara bertekanan tinggi ke dalam silinder agar piston terdorong dan crankshaft mulai berputar. Setelah mesin hidup dan pembakaran sudah berjalan normal, suplai starting air dihentikan.

11. Sistem Pelumasan



Gambar 2.13 Sistem Pelumas(Khamdilah & Kundori, 2020b)

Pada gambar 2.13 menjelaskan bahwa sistem pelumasan berfungsi mengalirkan oli ke seluruh bagian mesin yang bergerak, seperti piston, crankshaft, dan camshaft. Oli ini mencegah terjadinya gesekan berlebih, mengurangi keausan, sekaligus membantu mendinginkan komponen. Tekanan oli dijaga dengan pompa pelumas dan diawasi oleh sensor agar mesin tetap aman saat beroperasi.

12. Governor

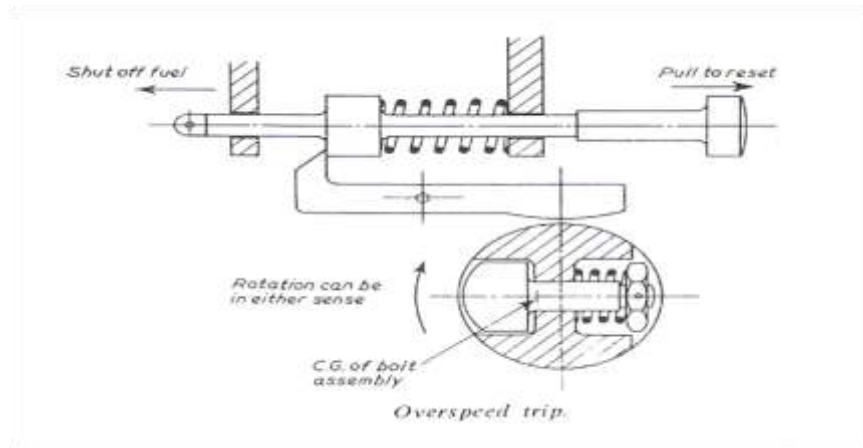


Gambar 2.14 Governor (Qi et al., 2021)

Pada gambar 2.14 menjelaskan bahwa governor adalah alat pengatur kecepatan mesin yang bekerja secara otomatis. Komponen ini menjaga agar

putaran mesin tetap stabil meskipun beban yang diterima berubah-ubah. Jika beban bertambah, governor akan menambah suplai bahan bakar, sedangkan jika beban berkurang, governor akan mengurangi suplai bahan bakar.

13. Overspeed Trip dan Instrumen Keselamatan



Gambar 2.15 *Overspeed Trip*(Qi et al., 2021)

Pada gambar 2.15 menjelaskan bahwa *auxiliary engine* juga dilengkapi dengan sistem keselamatan berupa overspeed trip yang akan mematikan mesin jika kecepatannya melebihi batas aman. Selain itu, terdapat instrumen pengaman lain seperti sensor tekanan oli, temperatur pendingin, dan alarm peringatan. Semua ini berfungsi untuk mencegah kerusakan serius pada mesin sekaligus menjaga keselamatan operasional di kapal.

2.2 Prinsip dan Langkah Kerja Auxiliary Engine

2.2.1 Prinsip Kerja Auxiliary Engine

Auxiliary engine adalah mesin diesel yang digunakan di kapal untuk menyuplai tenaga listrik melalui generator, berbeda dengan main engine yang berfungsi utama untuk mendorong kapal. Menurut (Nugraha et al., 2023b) peran auxiliary engine sangat penting, sebab hampir seluruh sistem kapal modern, baik navigasi, komunikasi, penerangan, maupun peralatan bantu mesin, bergantung pada pasokan listrik yang stabil. Oleh karena itu, sistem kerjanya harus terjaga dalam kondisi optimal, mulai dari proses penyalaan, pembakaran, hingga pengendalian beban.

1. Proses Penyalaan dan Persiapan Awal

Sebelum auxiliary engine dijalankan, dilakukan serangkaian pemeriksaan awal. Awak mesin memastikan bahwa sistem pelumasan sudah siap, bahan bakar tercukupi, sistem pendingin berfungsi, serta tekanan udara untuk starting sudah berada pada kondisi normal. Biasanya, auxiliary engine menggunakan *air starting system*, yaitu udara bertekanan yang dimasukkan ke dalam silinder untuk mendorong piston sehingga mesin mulai berputar. Pada tahap ini, pelumas dipompa secara otomatis untuk melapisi bagian-bagian yang bergerak agar tidak terjadi gesekan kering.

2. Proses Pengapian dan Pembakaran

Setelah mesin mulai berputar oleh udara start, bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar melalui injector dengan tekanan tinggi. Campuran bahan bakar dan udara yang telah terkompresi di dalam silinder kemudian terbakar karena panas kompresi, sehingga menghasilkan tenaga dorong. Proses ini berlangsung berulang-ulang pada setiap silinder, sehingga poros engkol (crankshaft) dapat berputar secara kontinu. Putaran crankshaft inilah yang nantinya dikopel dengan generator listrik.

Kestabilan pembakaran sangat penting untuk menjaga kualitas listrik yang dihasilkan. Jika injeksi bahan bakar terganggu atau tekanan udara tidak sesuai, maka tenaga yang dihasilkan tidak maksimal dan dapat menimbulkan getaran atau penurunan efisiensi.

3. Sistem Pendinginan dan Pelumasan

Auxiliary engine dilengkapi dengan sistem pendinginan yang biasanya menggunakan air laut dan air tawar sebagai media. Air tawar bersirkulasi di sekitar blok mesin untuk menyerap panas, kemudian panas ini ditransfer ke air laut melalui heat exchanger. Dengan demikian, suhu kerja mesin tetap stabil pada kisaran 80–90 °C.

Sementara itu, sistem pelumasan menggunakan pompa oli yang menyebarkan oli ke seluruh bagian mesin, terutama pada bantalan crankshaft, connecting rod, piston, serta dinding silinder. Fungsi oli bukan hanya melumasi, tetapi juga membantu mendinginkan serta mencegah keausan akibat gesekan logam.

4. Hubungan dengan Generator

Putaran crankshaft mesin diteruskan ke generator melalui kopling elastis. Generator kemudian mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Besar tegangan dan frekuensi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan putar mesin. Oleh karena itu, kecepatan putaran auxiliary engine harus dijaga stabil, biasanya sekitar 720 rpm atau 900 rpm, tergantung desainnya.

Sistem pengendalian governor bekerja secara otomatis untuk mengatur suplai bahan bakar ke mesin agar kecepatan putaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban listrik. Jika beban listrik meningkat, governor menambah suplai bahan bakar, dan sebaliknya bila beban menurun, suplai bahan bakar dikurangi.

5. Sistem Kontrol dan Proteksi

Auxiliary engine dilengkapi dengan berbagai sensor dan sistem proteksi untuk menjaga keselamatan operasi. Misalnya, sensor tekanan oli akan mematikan mesin bila tekanan turun di bawah batas aman, sensor temperatur air pendingin akan memberi alarm bila suhu berlebih, dan sistem overspeed trip akan memutus suplai bahan bakar bila kecepatan putaran melebihi ambang batas. Semua sistem ini dihubungkan ke safety module atau panel kontrol, sehingga operator dapat memantau kondisi mesin secara real time.

2.2.2 Siklus Operasional dan Pembebanan

Menurut (Ridwan et al., 2020a) siklus operasional dan pembebanan listrik di kapal merupakan bagian penting dalam menjaga kelancaran seluruh sistem kelistrikan yang menunjang kegiatan operasional di laut. Pada dasarnya, sistem tenaga listrik di kapal dirancang agar mampu bekerja secara terus menerus dengan mengutamakan keandalan, efisiensi, serta keselamatan.

Siklus operasional dimulai dari pengoperasian *auxiliary engine* yang berfungsi sebagai penggerak generator. Generator inilah yang menjadi sumber utama tenaga listrik di kapal, terutama ketika kapal berlayar. Proses pengoperasian biasanya dilakukan secara bergantian atau paralel, tergantung pada besar kecilnya beban listrik yang diperlukan. Pada kondisi normal, satu generator dapat dioperasikan untuk melayani beban ringan hingga menengah, sementara ketika beban meningkat,

generator lain akan dioperasikan secara paralel agar distribusi daya lebih seimbang dan tidak terjadi kelebihan beban pada satu mesin saja.

Setelah tenaga listrik dihasilkan, energi tersebut didistribusikan ke seluruh sistem melalui *main switchboard (MSB)*. Dari panel utama ini, daya dialirkan ke berbagai sub-panel sesuai kebutuhan, seperti sistem navigasi, permesinan bantu, penerangan, sistem pendingin, pompa, serta peralatan komunikasi. Siklus ini berlangsung terus menerus, dimana beban listrik selalu dipantau dan disesuaikan dengan kebutuhan operasional kapal.

Dalam hal pembebanan listrik, setiap kapal memiliki karakteristik beban yang berbeda, tergantung jenis dan fungsinya. Beban dapat dikategorikan menjadi beban penting (*essential load*) seperti sistem navigasi, komunikasi, pompa darurat, dan penerangan darurat; beban utama (*primary load*) yang mencakup kebutuhan mesin-mesin bantu, sistem pendingin, hingga sistem hidrolik; serta beban sekunder (*secondary load*) seperti akomodasi, pencahayaan, hingga peralatan penunjang kenyamanan. Distribusi daya dilakukan dengan prioritas, artinya pada saat darurat, beban yang tidak terlalu penting dapat diputus agar sistem vital tetap mendapat suplai listrik.

Selain itu, sistem pembebanan listrik di kapal juga memperhatikan faktor puncak beban (*peak load*), dimana konsumsi energi berada pada titik tertinggi, misalnya saat proses bongkar muat, manuver, atau saat semua peralatan akomodasi digunakan bersamaan. Pada kondisi ini, pengaturan paralel generator menjadi sangat penting untuk menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi.

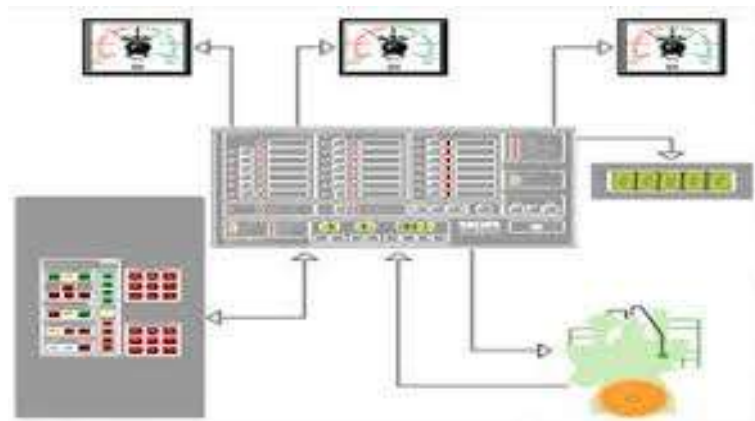
Keseluruhan siklus operasional ini berjalan dalam pola yang berulang: pembangkitan oleh *auxiliary engine* → distribusi oleh *switchboard* → konsumsi oleh berbagai peralatan → pemantauan dan pengaturan beban oleh operator. Dengan manajemen yang baik, siklus ini mampu menjaga efisiensi bahan bakar, mencegah gangguan kelistrikan, serta menjamin keselamatan pelayaran.

2.3 Sistem Safety Device Overspeed

2.3.1 Pengertian *Safety Device OverSpeed*

Safety device memiliki peran krusial dalam menjaga operasional sistem agar tetap aman dan efisien, terutama dalam lingkungan industri dan transportasi seperti kapal tanker.

Dalam konteks ini, berbagai mekanisme keselamatan telah dikembangkan untuk mengurangi risiko yang berkaitan dengan kecepatan berlebih, paparan lingkungan berbahaya, serta kegagalan sistem akibat beban listrik yang tidak stabil. Konsep keselamatan dalam teknik industri sebagaimana dijelaskan dalam *Safety and Health for Engineers* menekankan pentingnya penerapan standar keselamatan yang mencakup pemantauan kondisi operasional, sistem penghentian otomatis, serta perlindungan terhadap faktor eksternal yang dapat mempengaruhi kinerja mesin (Brauer, 2023a).



Gambar 2.16 *Safety Device* (Brauer, 2023b)

Pada gambar 2.16 menampilkan *Safety Safety* unit dalam sistem kelautan berfungsi sebagai perlindungan otomatis yang memantau tekanan, suhu, dan kecepatan mesin. Saat ada indikasi bahaya, unit ini mengirim sinyal ke mekanisme pengendali untuk mencegah kerusakan, misalnya dengan mengaktifkan katup pelepas tekanan atau mengurangi pasokan bahan bakar. Dengan integrasi sensor dan aktuator, *safety* unit memastikan operasional tetap aman tanpa mengganggu kinerja utama mesin.

Dalam sistem *auxiliary engine* kapal tanker, *safety device* memiliki peran penting dalam mencegah risiko kegagalan akibat kecepatan berlebih (*over speed*) dan pembebanan listrik yang tidak stabil. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi keandalan sistem adalah karakteristik oli mesin, sebagaimana dijelaskan dalam (Baskov et al., 2020). Studi ini menunjukkan bahwa perubahan suhu, tekanan, dan

beban kerja dapat menyebabkan degradasi oli, yang berpotensi mengurangi efektivitas pelumasan dan meningkatkan risiko overheating. Oleh karena itu, sistem *safety device* harus mencakup mekanisme pemantauan kondisi oli secara real-time agar dapat mendeteksi potensi gangguan sebelum terjadi kegagalan.

Selain itu, penerapan mekanisme penghentian otomatis berdasarkan parameter operasional *auxiliary engine* menjadi bagian penting dalam sistem keselamatan. Ketika kecepatan mesin melebihi batas aman atau terjadi lonjakan daya listrik yang berisiko merusak komponen, sistem harus dapat secara otomatis mengaktifkan perlindungan untuk menghindari kerusakan lebih lanjut. Implementasi ini dapat dilakukan dengan menggabungkan sensor suhu dan tekanan dengan algoritma kontrol adaptif, sehingga mesin dapat mempertahankan operasionalnya dalam batas aman tanpa mengganggu kinerja kapal.

Pendekatan berbasis mikrokontroler juga menjadi solusi efektif untuk mengoptimalkan fungsi *safety device* dalam *auxiliary engine*. Dengan adanya sistem pendinginan otomatis yang bekerja berdasarkan deteksi suhu dan beban listrik, risiko overheating akibat operasi ekstrem dapat diminimalkan. Teknologi ini memungkinkan mesin untuk menyesuaikan parameter kerja secara lebih efisien, meningkatkan umur pakai komponen, dan mengurangi risiko kegagalan yang dapat berdampak pada keselamatan operasional kapal tanker secara keseluruhan.

Menurut (Smith & Fotheringham, 2022) kesalahan dalam sistem yang digunakan untuk pengambilan keputusan dapat menyebabkan konsekuensi yang tidak diinginkan, mirip dengan bagaimana perangkat keselamatan pada *auxiliary engine* berisiko mengalami kegagalan yang berdampak pada stabilitas pembebanan listrik kapal. Dalam dunia medis, upaya perbaikan terhadap kegagalan sistem dilakukan melalui peningkatan ketepatan analisis, kalibrasi, serta audit teknis untuk memastikan keakuratan keputusan yang dihasilkan.

Konsep ini dapat diterjemahkan ke dalam penelitian tentang perangkat keselamatan yang mengatur kecepatan mesin kapal, khususnya dalam hal peningkatan sensor presisi, pengembangan metode kontrol yang lebih akurat, serta penerapan sistem pemantauan yang mampu mendeteksi ketidaksesuaian beban listrik secara dini.

Seperti halnya dalam bidang kesehatan, sistem otomatisasi dalam marine engineering perlu mempertimbangkan aspek keandalan serta dampak dari kesalahan teknologi terhadap keselamatan dan efisiensi operasional. Dalam sistem medis, salah satu tantangan utama adalah kepercayaan terhadap hasil yang diberikan oleh sistem,

yang juga relevan dalam studi mengenai perangkat keselamatan pada *auxiliary engine*. Keputusan yang dibuat oleh sistem kontrol dalam mengatur kecepatan mesin harus didasarkan pada parameter yang telah dikalibrasi dengan baik agar tidak menyebabkan ketidakseimbangan daya listrik yang berpengaruh terhadap performa keseluruhan kapal.

Dengan mengadopsi pendekatan dari dunia klinis, penelitian ini dapat mengeksplorasi bagaimana sistem keselamatan dalam *auxiliary engine* harus mampu mengidentifikasi kesalahan operasional, meminimalkan ketidaktepatan dalam pengambilan keputusan berbasis sensor, serta mengoptimalkan stabilitas sistem kelistrikan kapal. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan akurasi dalam pengendalian kecepatan mesin tetapi juga berkontribusi pada pengembangan sistem keselamatan yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi operasional.

Salah satu pendekatan yang relevan adalah penggunaan sistem pemantauan berbasis sensor untuk mendeteksi kondisi abnormal dan mencegah kegagalan sistem. Menurut (Raeiszadeh & Adeli, 2020), teknologi ultraviolet digunakan sebagai metode sterilisasi yang aman dan efektif untuk mengurangi risiko kontaminasi. Prinsip yang sama dapat diterapkan dalam sistem keselamatan mesin, di mana sensor berbasis cahaya atau radiasi dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan suhu atau tekanan yang berpotensi membahayakan. Integrasi teknologi ini dengan sistem pemantauan kecepatan berlebih pada *auxiliary engine* dapat meningkatkan efektivitas deteksi dini terhadap kondisi yang tidak aman.

Selain itu, dalam (Bi et al., 2021), dijelaskan bahwa sistem keselamatan harus mencakup pemantauan real-time, pembatasan daya dan gaya, serta mekanisme penghentian otomatis untuk menghindari kecelakaan. Konsep ini dapat diterapkan dalam sistem *auxiliary engine* dengan mengembangkan mekanisme penghentian otomatis saat kecepatan melebihi batas aman atau saat terjadi lonjakan beban listrik yang berpotensi merusak komponen mesin. Dengan demikian, sistem keselamatan tidak hanya berfungsi sebagai perlindungan terhadap kegagalan mekanis tetapi juga sebagai alat untuk meningkatkan efisiensi operasional.

Dalam Pembuatan pendekatan berbasis mikrokontroler digunakan untuk mengatur proses pendinginan mesin secara otomatis setelah beroperasi dalam kondisi beban tinggi. Prinsip ini dapat diadaptasi dalam sistem *auxiliary engine* kapal tanker untuk memastikan bahwa mesin tidak mengalami overheating akibat pembebanan listrik yang fluktuatif. Dengan mengintegrasikan sistem pendinginan otomatis dan

pemantauan kecepatan, keselamatan operasional dapat ditingkatkan secara signifikan, mengurangi risiko kerusakan dan memperpanjang umur mesin.

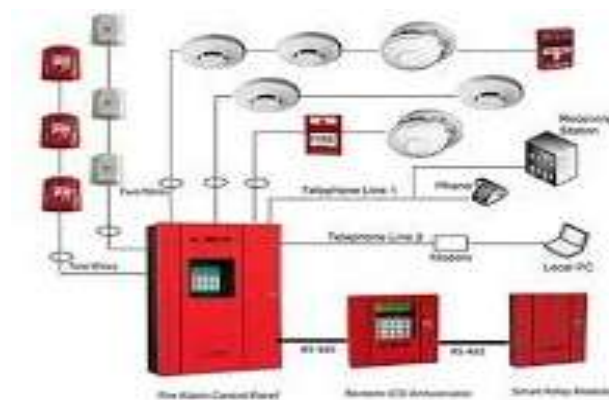
Dari perspektif pengendalian otomatis, studi dalam Pembuatan (Halim et al., 2021) menunjukkan bahwa teknologi berbasis mikrokontroler memungkinkan kontrol sistem yang lebih responsif dan presisi. Implementasi sistem pendinginan otomatis pada *auxiliary engine* kapal tanker dapat mencegah overheating akibat pembebanan listrik yang tinggi, sekaligus menjaga efisiensi konsumsi energi. Dengan memanfaatkan sistem kontrol berbasis sensor dan algoritma adaptif, sistem keselamatan dapat bekerja secara lebih optimal dalam kondisi operasional yang dinamis.

Keseluruhan konsep dari berbagai referensi ini menunjukkan bahwa *safety device* dalam sistem *auxiliary engine* harus dirancang dengan mempertimbangkan berbagai aspek, termasuk pemantauan kondisi operasional, deteksi dini terhadap anomali, serta mekanisme perlindungan terhadap faktor eksternal. Dengan menggabungkan teknologi sensor, sistem penghentian otomatis, dan kontrol berbasis mikrokontroler, sistem keselamatan dapat dioptimalkan untuk memastikan operasional yang lebih aman dan efisien dalam lingkungan kapal tanker.

2.3.2 Jenis-Jenis *Safety Device*

Jenis-jenis sistem *safety device* umumnya digunakan untuk menjaga keselamatan operasional mesin, peralatan, maupun sistem kelistrikan di kapal maupun industri agar terhindar dari kerusakan serius atau kecelakaan. Berikut penjelasannya:

1. *Alarm System*



Gambar 2.17 *Alarm Sistem* (Tarnapowicz & Matuszak, 2020)

Pada gambar 2.17 menjelaskan bahwa *alarm system* bekerja dengan bantuan sensor yang mendeteksi perubahan parameter operasi mesin. Sensor ini bisa berupa sensor

tekanan, sensor suhu, atau sensor level cairan. Jika nilai parameter melebihi batas yang ditentukan (set point), maka sinyal listrik dikirim ke panel kontrol. Dari panel kontrol, alarm akan diaktifkan dalam bentuk suara sirene, lampu peringatan, atau tampilan di layar monitor. Dengan cara kerja ini, operator segera mengetahui adanya gangguan sehingga bisa melakukan tindakan sebelum kerusakan terjadi.

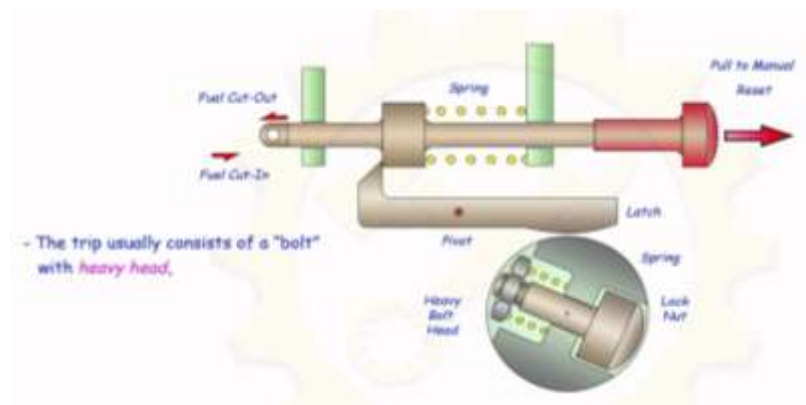
2. Shutdown System



Gambar 2.18 Shutdown System (Tarnapowicz & Matuszak, 2020)

Pada gambar 2.18 menjelaskan bahwa *shutdown system* terintegrasi dengan sensor-sensor penting mesin, seperti sensor tekanan oli atau sensor putaran. Ketika sensor mendeteksi kondisi kritis, misalnya tekanan oli turun ke nol, sistem akan mengirimkan sinyal ke aktuator untuk memutus suplai bahan bakar atau listrik ke mesin. Akibatnya, mesin langsung berhenti beroperasi. Mekanisme ini bersifat otomatis sehingga tetap bekerja walaupun operator tidak sempat menekan tombol darurat.

3. Overspeed Trip Device



Gambar 2.19 Overspeed Trip Device (Tak & Choi, 2022)

Pada gambar 2.19 menjelaskan bahwa sistem *kerja overspeed trip device* dapat berupa mekanis maupun elektronik. Pada sistem mekanis, bandul sentrifugal dipasang pada poros putaran mesin. Ketika putaran terlalu tinggi, gaya sentrifugal akan mendorong bandul keluar dan mengaktifkan tuas pemutus bahan bakar. Sedangkan pada sistem elektronik, sensor kecepatan membaca putaran poros, lalu jika melewati batas, sinyal dikirim ke kontroler untuk menutup katup bahan bakar. Dalam kedua cara ini, mesin akan segera berhenti agar tidak mengalami kerusakan akibat *overspeed*.

4. *Pressure Relief Valve (PRV) / Safety Valve*



Gambar 2.20 *Pressure Relief Valve* (Festor et al., 2022)

Pada gambar 2.20 menjelaskan bahwa katup pengaman atau *pressure relief valve* ini bekerja berdasarkan prinsip tekanan. Saat tekanan fluida (uap, gas, atau cairan) di dalam sistem masih normal, pegas di dalam katup menahan cakram agar tetap tertutup. Namun ketika tekanan melebihi nilai yang sudah diset, gaya dorong fluida lebih besar daripada gaya pegas sehingga katup terbuka dan melepaskan tekanan ke luar. Begitu tekanan turun ke level aman, katup menutup kembali secara otomatis.

Digunakan pada sistem fluida bertekanan (seperti boiler, compressor, atau tangki bahan bakar) untuk melepaskan tekanan berlebih agar tidak terjadi ledakan.

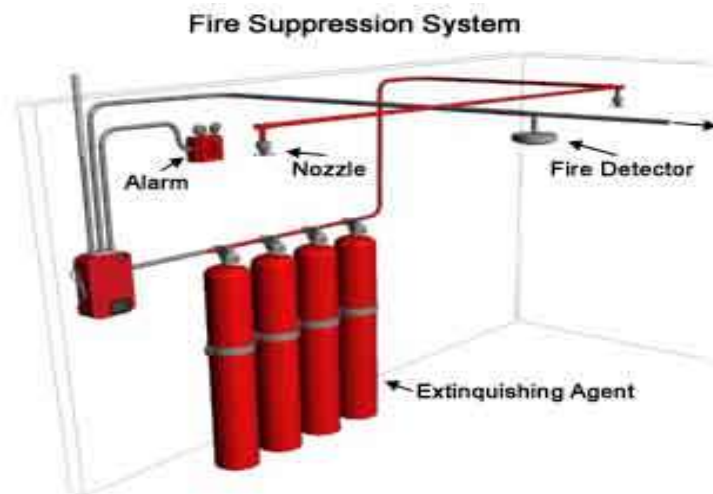
5. Emergency Stop System (E-Stop)



Gambar 2.21 Emergency Stop System (Dedik et al., 2022)

Pada gambar 2.21 menjelaskan bahwa sistem kerja E-Stop sebenarnya sederhana. Ketika tombol darurat ditekan, rangkaian listrik utama mesin terputus atau suplai bahan bakar dihentikan. Karena arus listrik terputus, mesin akan segera mati. Sistem ini biasanya dipasang paralel di beberapa titik sehingga bisa dioperasikan dari banyak lokasi. Dengan begitu, kapan pun keadaan darurat muncul, mesin dapat dihentikan dengan cepat tanpa menunggu sistem otomatis. Tombol atau tuas darurat yang dapat dioperasikan secara manual untuk menghentikan mesin atau sistem dalam keadaan darurat. Biasanya ditempatkan di beberapa lokasi strategis agar mudah dijangkau.

6. Fire Detection and Extinguishing System

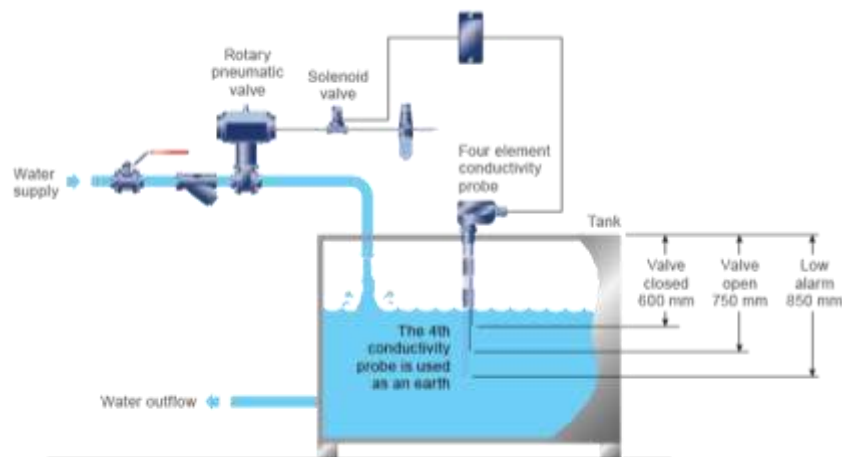


Gambar 2.22 Fire Detection and Extinguishing System(Sahri et al., 2023)

Pada gambar 2.22 menjelaskan bahwa sistem ini diawali dengan sensor pendeteksi api, panas, atau asap. Jika sensor menangkap adanya kebakaran, sinyal dikirim ke panel kontrol untuk mengaktifkan alarm. Pada tahap lanjut, sistem dapat mengaktifkan

solenoid valve yang mengalirkan media pemadam (CO_2 , foam, atau air) ke area yang terbakar. Pada sistem otomatis, proses pemadaman dilakukan segera tanpa campur tangan operator. Namun dalam beberapa sistem semi-otomatis, operator harus mengaktifkan tuas pelepas CO_2 setelah alarm berbunyi. Terdiri dari sensor panas, asap, atau api serta sistem pemadam otomatis (CO_2 , foam, atau air). Berfungsi mendeteksi dini potensi kebakaran dan melakukan pemadaman cepat.

7. Level Control Safety Device



Gambar 2.23 Level Control Safety Device (Faris Abid Abiyyu et al., 2024)

Pada gambar 2.23 menjelaskan bahwa sistem kerja alat ini menggunakan sensor level seperti pelampung, sensor tekanan hidrostatik, atau sensor kapasitif. Sensor memantau ketinggian cairan di dalam tangki. Bila level cairan melebihi batas atas atau turun di bawah batas bawah, sinyal dikirim ke panel kontrol untuk menyalakan alarm atau bahkan menghentikan pompa pengisi. Dengan mekanisme ini, tangki terhindar dari kondisi overfilling maupun kekurangan cairan. Digunakan untuk mencegah kondisi level cairan yang tidak normal, misalnya high-level alarm pada tangki bahan bakar atau low-level alarm pada tangki pelumas agar pompa tidak cavitasi.

8. Temperature Protection System



Gambar 2.24 Temperatur Protection System (Faris Abid Abiyyu et al., 2024)

Pada gambar 2.24 menjelaskan bahwa perangkat ini bekerja dengan sensor suhu (thermocouple atau resistance temperature detector/RTD) yang dipasang di titik-titik penting mesin. Sensor mengukur suhu dan mengirimkan data ke unit kontrol. Bila suhu melewati set point, alarm berbunyi sebagai peringatan. Dalam sistem proteksi penuh, kontroler juga dapat memutus suplai bahan bakar atau mematikan mesin (shutdown) untuk mencegah kerusakan akibat overheating. Sensor suhu yang mengaktifkan alarm atau shutdown ketika temperatur melebihi batas aman, misalnya pada silinder, exhaust gas, atau pendingin.

9. Interlock System



Gambar 2.25 Interlock System (Stefańczyk et al., 2022b)

Pada gambar 2.25 menjelaskan bahwa sistem interlock bekerja dengan logika rangkaian listrik atau kontrol otomatis. Prinsipnya adalah "jika syarat A belum terpenuhi, maka perintah B tidak bisa dijalankan". Contohnya, mesin tidak bisa start

jika tekanan oli belum mencapai batas minimum. Dalam hal ini, sensor tekanan oli dihubungkan dengan rangkaian starter mesin. Jika sensor mendeteksi tekanan cukup, maka starter bisa berfungsi; sebaliknya, jika belum tercapai, rangkaian starter tetap terkunci. Dengan logika ini, proses operasi berlangsung lebih aman. Sistem pengunci yang mencegah operasi tertentu jika kondisi keselamatan tidak terpenuhi. Misalnya mesin tidak bisa start jika tekanan oli belum cukup atau jika katup pendingin belum terbuka.

10. Gas Detection System



Gambar 2.26 Gas Detection System (Stefańczyk et al., 2022b)

Pada gambar 2.26 menjelaskan bahwa sistem ini menggunakan sensor gas yang dapat mendeteksi zat berbahaya seperti CO, H₂S, atau hidrokarbon. Sensor mengubah konsentrasi gas di udara menjadi sinyal listrik, lalu diteruskan ke panel kontrol. Jika konsentrasi gas melebihi ambang batas, alarm akan berbunyi dan lampu indikator menyala. Pada sistem lanjutan, gas detection juga terhubung dengan sistem ventilasi otomatis atau shutdown generator agar risiko kebakaran dan ledakan bisa dicegah. Dipasang di ruang mesin, tangki, atau area berisiko untuk mendeteksi kebocoran gas berbahaya (H₂S, CO, hidrokarbon, dll.), sehingga mencegah kebakaran atau keracunan.

2.3.3 Fungsi dan Peran Safety Device dalam Pencegahan Overspeed

Safety device memiliki fungsi dan peran yang sangat vital dalam mencegah terjadinya overspeed pada mesin, khususnya auxiliary engine di kapal. Overspeed merupakan kondisi ketika putaran mesin melebihi batas aman yang telah ditentukan, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada komponen mesin bahkan membahayakan keselamatan kapal dan awak. Dalam hal ini, safety device seperti

governor, overspeed trip mechanism, dan sensor kecepatan berfungsi untuk mendeteksi peningkatan kecepatan yang tidak normal, mengatur suplai bahan bakar, hingga menghentikan mesin secara otomatis apabila putaran telah melewati ambang batas aman. Dengan adanya perangkat keselamatan ini, risiko kerusakan mesin, kebakaran, ledakan, maupun kecelakaan kerja dapat diminimalisasi. Selain itu, keberadaan safety device juga memastikan mesin bekerja dengan stabil, efisien, dan sesuai dengan standar operasional kapal, sehingga keselamatan dan keandalan operasi dapat terus terjaga. Poin-poin Fungsi Safety Device.

Poin-Poin Fungsi dan Peran Safety Device dalam Pencegahan Overspeed

1. Deteksi Dini → Sensor kecepatan mendeteksi adanya kenaikan putaran mesin yang abnormal.
2. Pengendalian Putaran → Governor mengatur jumlah bahan bakar yang masuk agar kecepatan tetap dalam batas aman.
3. Proteksi Darurat → Overspeed trip mechanism bekerja otomatis untuk memutus suplai bahan bakar dan menghentikan mesin.
4. Perlindungan Mesin dan Operator → Mencegah kerusakan komponen, mengurangi risiko kecelakaan, serta menjaga keselamatan awak kapal.
5. Menjamin Keandalan Operasi → Mesin tetap bekerja stabil, efisien, dan memenuhi standar keselamatan internasional.

2.4 Sistem Pembebanan Listrik di Kapal

2.4.1 Konsep Pembebanan Listrik di kapal

Konsep pembebanan listrik di kapal pada dasarnya adalah proses distribusi dan pengaturan energi listrik dari generator utama maupun auxiliary generator untuk memenuhi kebutuhan berbagai peralatan kelistrikan di atas kapal. Sistem kelistrikan kapal memiliki karakteristik khusus karena harus mampu bekerja secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik darat. Oleh karena itu, pembebanan listrik harus direncanakan dengan cermat agar semua peralatan penting, mulai dari sistem navigasi, komunikasi, mesin penggerak, pompa, hingga penerangan dan kebutuhan akomodasi, dapat berjalan tanpa gangguan.

Dalam operasionalnya, beban listrik di kapal dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu beban utama (main load) yang mendukung sistem propulsi dan mesin-mesin

vital, beban esensial (essential load) yang berkaitan dengan keselamatan seperti emergency pump, lampu darurat, dan sistem alarm, serta beban non-esensial (non-essential load) seperti pendingin ruangan atau fasilitas akomodasi. Pengelompokan ini bertujuan agar dalam kondisi darurat, sistem dapat melakukan prioritas distribusi daya dengan memutus beban non-esensial sehingga daya tersedia untuk peralatan vital.

Selain itu, konsep pembebanan listrik juga mencakup perhitungan keseimbangan daya antar generator. Generator di kapal biasanya bekerja secara paralel, sehingga pembebanan harus dibagi merata melalui sistem load sharing agar tidak terjadi overloading pada salah satu generator. Prinsip ini juga diterapkan pada saat kapal beroperasi dalam berbagai kondisi, seperti saat berlayar, berlabuh, atau saat sandar di pelabuhan. Masing-masing kondisi menuntut pola pembebanan listrik yang berbeda, misalnya saat berlayar beban lebih dominan pada sistem navigasi dan propulsi, sedangkan saat sandar beban lebih banyak pada akomodasi.

Secara keseluruhan, integrasi konsep pembebanan listrik di kapal menekankan pada keseimbangan antara ketersediaan daya, prioritas kebutuhan, efisiensi konsumsi energi, serta jaminan keselamatan operasional. Dengan perencanaan beban yang tepat, kapal dapat beroperasi dengan handal, hemat energi, serta tetap menjamin keselamatan awak kapal maupun sistem kelistrikan itu sendiri.

2.4.2 Hubungan Antara Auxiliary Engine dan Sistem Kelistrikan

Auxiliary engine di kapal memiliki peran yang sangat penting dalam menunjang ketersediaan energi listrik, karena mesin ini berfungsi sebagai penggerak generator yang menjadi sumber utama suplai listrik bagi seluruh sistem kelistrikan di atas kapal. Tanpa auxiliary engine, generator tidak dapat beroperasi, sehingga sistem kelistrikan kapal akan kehilangan sumber energi yang vital. Dengan demikian, hubungan antara auxiliary engine dan sistem kelistrikan bersifat langsung serta saling ketergantungan.

Dalam operasionalnya, auxiliary engine bekerja dengan prinsip mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik tersebut digunakan untuk memutar rotor generator. Putaran generator menghasilkan energi listrik yang kemudian didistribusikan ke seluruh peralatan listrik kapal. Mulai dari sistem navigasi, komunikasi, kontrol mesin, pompa ballast, sistem pendingin,

penerangan, hingga kebutuhan akomodasi awak kapal semuanya bergantung pada suplai listrik yang bersumber dari auxiliary engine.

Hubungan keduanya juga terlihat dalam aspek stabilitas dan keandalan listrik. Auxiliary engine harus beroperasi secara stabil agar generator dapat menghasilkan tegangan dan frekuensi listrik yang konstan sesuai standar (misalnya 440V/60Hz atau 220V/60Hz). Gangguan pada auxiliary engine, seperti penurunan putaran atau kerusakan mekanis, akan langsung mempengaruhi kualitas daya listrik, bahkan dapat menimbulkan blackout yang sangat berbahaya dalam pelayaran. Oleh karena itu, auxiliary engine dilengkapi dengan sistem kontrol, monitoring, dan safety device untuk menjamin operasi yang handal.

Selain itu, auxiliary engine juga berhubungan erat dengan konsep pembebanan listrik di kapal. Beban listrik yang meningkat menuntut auxiliary engine untuk bekerja lebih keras karena generator membutuhkan torsi lebih besar untuk mempertahankan tegangan dan frekuensi. Apabila beban melebihi kapasitas, maka auxiliary engine tambahan harus dioperasikan (paralel generator) agar beban dapat terbagi merata dan menghindari kondisi overload. Hal ini menunjukkan bahwa koordinasi antara auxiliary engine dan sistem kelistrikan harus berjalan seimbang untuk menjaga efisiensi dan keselamatan.

Dengan demikian, hubungan antara auxiliary engine dan sistem kelistrikan dapat diibaratkan sebagai jantung dan aliran darah pada tubuh manusia. Auxiliary engine menjadi penggerak utama yang memastikan generator mampu menghasilkan energi listrik, sementara sistem kelistrikan berfungsi mendistribusikan energi tersebut ke seluruh bagian kapal. Tanpa auxiliary engine, suplai listrik akan terhenti; sebaliknya, tanpa sistem kelistrikan, energi yang dihasilkan tidak dapat dimanfaatkan. Integrasi keduanya memastikan kapal dapat beroperasi dengan aman, efisien, dan berkelanjutan di tengah laut.

2.4.3 Dampak *Overspeed* terhadap Efisiensi Pembebanan

Dampak overspeed pada mesin kapal memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi pembebanan listrik. Overspeed terjadi ketika putaran mesin melebihi batas yang telah ditentukan, sehingga kinerja mesin menjadi tidak stabil dan mengganggu sistem kelistrikan. Kondisi ini dapat menyebabkan konsumsi bahan bakar meningkat

karena mesin bekerja di luar titik efisiensi optimalnya. Selain itu, beban generator yang terhubung dengan mesin akan mengalami fluktuasi tegangan maupun frekuensi, sehingga distribusi daya listrik ke peralatan kapal menjadi tidak seimbang. Ketidakseimbangan ini bukan hanya menurunkan efisiensi penggunaan daya, tetapi juga meningkatkan risiko kerusakan pada peralatan listrik akibat lonjakan arus.

Secara teknis, ketika mesin mengalami overspeed, governor tidak mampu lagi mengontrol suplai bahan bakar secara presisi. Akibatnya, daya keluaran tidak sebanding dengan kebutuhan beban yang ada, sehingga terjadi pemborosan energi. Dalam jangka panjang, efisiensi pembebanan listrik kapal menurun, umur pakai mesin berkurang, serta biaya operasional meningkat karena perawatan tambahan dan risiko kerusakan komponen yang lebih cepat.

2.5 Regulasi dan Standart Keselamatan

2.5.1 Peraturan Keselamatan di Kapal Tanker

Peraturan keselamatan di kapal tanker memiliki peran sangat penting karena jenis kapal ini membawa muatan berbahaya seperti minyak, gas, maupun bahan kimia cair yang berpotensi menimbulkan kebakaran, ledakan, dan pencemaran laut. Oleh karena itu, sistem keselamatan diatur secara ketat oleh konvensi internasional maupun peraturan nasional guna menjamin operasi kapal berlangsung aman dan efisien. Salah satu landasan utama adalah *SOLAS (Safety of Life at Sea)* yang mengatur perlengkapan darurat, sistem proteksi kebakaran, hingga prosedur evakuasi. Selain itu, *MARPOL (Marine Pollution Convention)* berfokus pada pencegahan pencemaran laut dari tumpahan minyak atau bahan kimia. Khusus untuk kapal tanker, diberlakukan pula *International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT)* yang memberikan pedoman teknis terkait keselamatan saat bongkar muat, pengendalian uap gas, dan prosedur komunikasi antara kapal dengan terminal.

Integrasi peraturan keselamatan ini juga tampak pada penerapan *International Safety Management (ISM) Code*, yang mewajibkan setiap perusahaan pelayaran memiliki sistem manajemen keselamatan terstruktur, mulai dari perencanaan pelayaran, pemeliharaan mesin, hingga kesiapan awak kapal dalam menghadapi kondisi darurat. Awak kapal diwajibkan mengikuti pelatihan khusus seperti *Tanker Familiarization dan Advanced Training for Oil/Chemical/Gas Tanker Cargo Operations* agar mampu mengoperasikan peralatan dengan standar keselamatan

tinggi. Selain itu, penerapan *Emergency Shutdown System (ESD)*, *Inert Gas System (IGS)*, serta *Double Hull Design* pada kapal tanker modern merupakan implementasi langsung dari regulasi untuk meminimalkan risiko kebakaran, ledakan, maupun kebocoran muatan.

Dengan adanya integrasi berbagai peraturan keselamatan tersebut, operasi kapal tanker tidak hanya menjamin keselamatan awak kapal dan muatan, tetapi juga melindungi lingkungan laut dari potensi pencemaran besar akibat kecelakaan.

2.5.2 Standart Internasional terkait *Auxiliary Engine* dan *Safety Device*

Standar internasional terkait *auxiliary engine* dan *safety device* di kapal telah ditetapkan untuk menjamin keselamatan, keandalan, serta efisiensi operasional. Auxiliary engine berfungsi sebagai sumber tenaga listrik utama kapal ketika berada di laut maupun saat berlabuh, sehingga kinerjanya sangat krusial dalam mendukung peralatan navigasi, komunikasi, serta sistem keselamatan kapal. Untuk itu, penerapan standar internasional seperti *SOLAS (Safety of Life at Sea)* mengatur bahwa setiap auxiliary engine wajib dilengkapi sistem proteksi dan pengaman, termasuk alarm, indikator suhu dan tekanan, serta perangkat pemadam kebakaran otomatis.

Selain itu, *IMO (International Maritime Organization)* melalui *International Safety Management (ISM) Code* menekankan pentingnya perawatan preventif dan manajemen keselamatan dalam pengoperasian auxiliary engine. Sementara itu, standar teknis dari *IMO MARPOL Annex VI* juga membatasi emisi gas buang auxiliary engine, sehingga selain aman, mesin juga harus ramah lingkungan. Di sisi lain, organisasi seperti *IACS (International Association of Classification Societies)* memberikan regulasi teknis dan inspeksi klasifikasi terhadap mesin bantu, termasuk ketahanan material, sistem pendingin, pelumasan, dan komponen pengendali agar sesuai standar internasional.

Sedangkan untuk *safety device*, standar internasional menekankan perlindungan terhadap mesin dari potensi kerusakan serius maupun kecelakaan. Perangkat seperti *overspeed trip mechanism*, *governor*, *pressure relief valve*, *emergency stop system*, dan *fire detection system* harus sesuai ketentuan SOLAS dan ISGOTT (*International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals*) terutama bagi kapal tanker. Safety device ini wajib diuji secara berkala sesuai standar *ISO* maupun *IEC*, agar keandalan

peralatan tetap terjaga. Dengan demikian, kombinasi regulasi dari SOLAS, ISM Code, MARPOL, ISO, hingga klasifikasi IACS membentuk satu sistem terpadu yang memastikan auxiliary engine bekerja secara efisien, aman, dan memenuhi aspek perlindungan lingkungan.

2.5.3 Tanggung Jawab Operator dalam Pengawasan Sistem

Tanggung jawab operator dalam pengawasan sistem di kapal sangat krusial karena berhubungan langsung dengan keselamatan operasional, efisiensi energi, serta keandalan peralatan. Operator tidak hanya berperan sebagai pengendali, tetapi juga sebagai pengawas yang memastikan seluruh sistem, termasuk *auxiliary engine*, *generator*, dan *safety device*, bekerja sesuai standar internasional. Pengawasan ini mencakup pemantauan parameter operasi seperti tekanan, suhu, kecepatan putar, tegangan, dan frekuensi listrik, sehingga setiap gejala abnormal dapat segera dideteksi.

Dalam konteks keselamatan, operator bertanggung jawab untuk melakukan inspeksi rutin terhadap sistem proteksi dan safety device seperti overspeed trip mechanism, alarm, governor, dan emergency stop system. Operator juga wajib memastikan bahwa semua perangkat tersebut berfungsi optimal melalui pengujian berkala, sesuai dengan regulasi *SOLAS*, *ISM Code*, maupun standar klasifikasi *IACS*. Selain itu, pengawasan operator juga berkaitan dengan efisiensi pembebanan, misalnya dengan menjaga agar generator tidak mengalami overloading maupun underloading, sehingga konsumsi bahan bakar tetap efisien dan peralatan terhindar dari kerusakan.

Tanggung jawab lainnya adalah melakukan pencatatan dan pelaporan setiap kondisi operasi di log book mesin maupun sistem monitoring digital, agar data historis dapat digunakan untuk analisis performa dan perencanaan perawatan. Operator juga harus siap melakukan tindakan cepat dalam kondisi darurat, seperti ketika terjadi overspeed, lonjakan arus, atau indikasi kebocoran bahan bakar, dengan mengaktifkan sistem trip, shutdown, atau prosedur darurat lainnya.

2.6 Komponen dan Fungsi Sistem Proteksi Overspeed Auxiliary Engine

Dalam sistem auxiliary engine, proteksi terhadap overspeed sangat penting untuk menjaga keselamatan operasi dan mencegah kerusakan mesin. Oleh karena itu, digunakan berbagai komponen yang saling terintegrasi mulai dari sensor pembaca putaran, pengatur

kecepatan, hingga mekanisme pemutus suplai bahan bakar. Setiap komponen memiliki fungsi yang spesifik, namun secara keseluruhan bekerja bersama untuk mendeteksi, mengendalikan, dan menghentikan mesin apabila terjadi kondisi overspeed.

Adapun komponen – komponen beserta fungsi yang digunakan untuk *overspeed* pada *Auxiliary Engine* ialah:

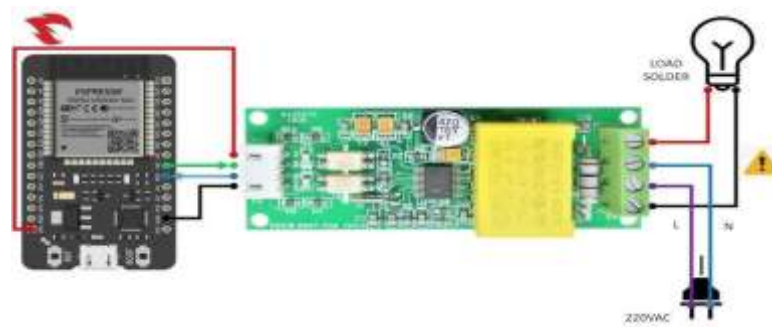
1. Sensor PZEM-004T
2. Speed Sensor (Tachometer / Proximity Sensor)
3. Speed Limiter
4. Governor (Pengatur Putaran)
5. Overspeed Trip Mechanism
6. Flyweights (Bandul Sentrifugal)
7. Trip Lever / Solenoid
8. Control Panel / Safety Module
9. Injektor

2.6.1 Komponen dan Fungsi

Setiap komponen dalam sistem overspeed pada auxiliary engine memiliki peranan yang saling melengkapi. Sensor seperti *Speed Sensor* dan PZEM-004T berfungsi sebagai pendeteksi kecepatan putaran poros dan parameter kelistrikan yang berhubungan dengan performa mesin. Hasil pembacaan sensor ini menjadi masukan bagi *Governor* dan *Speed Limiter* untuk mengatur kestabilan putaran serta mencegah mesin melampaui batas yang telah ditentukan.

Selain itu, mekanisme proteksi juga diperkuat oleh *Overspeed Trip Mechanism* yang bekerja bersama *Flyweights* untuk mendeteksi kelebihan kecepatan secara mekanis. Ketika batas overspeed tercapai, *Trip Lever* atau *Solenoid* akan mengaktifkan pemutus suplai bahan bakar melalui injektor, sehingga mesin dapat segera berhenti. Seluruh proses ini dikendalikan dan dipantau melalui *Control Panel* atau *Safety Module*, sehingga sistem proteksi dapat berjalan otomatis, cepat, dan andal.

1. Sensor PZEM-004T



Gambar 2. 27 Sensor PZEM-004T (IRIYANSYAH & FAISAL IRSAN PASARIBU, n.d.)

Pada gambar 2.27 berdasarkan fungsi dan prinsip kerja sensor *PZEM-004T* Sensor ini menggunakan current transformer (CT) dan shunt resistor untuk mengukur arus dan tegangan, serta *optocoupler* untuk isolasi sinyal. Meskipun sensor *PZEM-004T* bukan merupakan sensor pembaca RPM dan tidak digunakan untuk mendeteksi kecepatan putar poros mesin (sebagaimana diperlukan dalam sistem *safety device overspeed*), sensor ini memiliki peran penting dalam pemantauan parameter kelistrikan yang secara langsung memengaruhi beban *auxiliary engine* (Pasaribu et al., 2025).

Spesifikasi Umum :

1. Tegangan kerja (Supply Voltage): 80 – 260 V AC
2. Arus kerja: hingga 100A (dengan current transformer / CT sensor bawaan, tipe 100A/1A atau 100A/33mA)
3. Tegangan terukur: 80 – 260 V AC
4. Arus terukur: 0 – 100 A (tergantung CT yang digunakan)
5. Daya terukur: 0 – 23 kW
6. Energi terukur: 0 – 9999 kWh
7. Frekuensi terukur: 45 – 65 Hz
8. Power Factor (PF): 0,00 – 1,00
9. Akurasi pengukuran: $\pm 0,5\%$
10. Komunikasi data: UART (Serial TTL, 5V level) → bisa dikoneksikan ke Arduino, ESP8266, ESP32, Raspberry Pi
11. Baudrate default: 9600 bps
12. Dimensi modul: $\pm 30 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$

13. Sensor arus: menggunakan *transformator arus eksternal (CT clamp)* sehingga lebih aman (tidak kontak langsung dengan tegangan tinggi).

1. Prinsip Dasar

- 1) PZEM-004T bekerja dengan cara mengukur tegangan AC langsung yang masuk ke terminal modul, dan mengukur arus listrik menggunakan transformator arus (CT).
- 2) Dari data tegangan (V) dan arus (I), modul menghitung:
- 3) Daya Aktif ($P = V \times I \times PF$)
- 4) Energi ($kWh = \int P dt$)
- 5) Frekuensi jaringan
- 6) Faktor daya ($\cos \phi$)

2. Proses Kerja

- 1) Tegangan AC dari jaringan listrik dihubungkan ke terminal input modul PZEM-004T.
- 2) Arus listrik diukur menggunakan CT sensor yang dipasang melingkari kabel fasa beban.
- 3) Modul memproses sinyal tegangan dan arus \rightarrow menghasilkan parameter listrik seperti V, I, P, PF, kWh, dan Hz.
- 4) Data dikirim ke mikrokontroler (misalnya Arduino, ESP8266, atau ESP32) melalui komunikasi UART serial.
- 5) Data hasil pengukuran dapat ditampilkan pada LCD, serial monitor, atau dikirim ke server IoT (Blynk, MQTT, Thingspeak, dsb.).

2. *Speed Sensor (Tachometer / Proximity Sensor)*



Gambar 2. 28 *Speed Sensor (Tachometer/Proximity Sensor)* (IRIYANSYAH & FAISAL IRSAN PASARIBU, n.d.)

Pada gambar 2.28 *Speed sensor* memiliki spesifikasi dapat berbeda tergantung merek dan tipe, namun umumnya sensor kecepatan (*speed sensor*) pada mesin kapal, khususnya untuk *auxiliary engine* atau *turbin*, memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Jenis Sensor:

- 1) *Magnetic / Electromagnetic Pickup Sensor* (umumnya digunakan pada poros mesin/gear)
- 2) *Proximity Sensor (Induktif / Kapasitif)* untuk mendeteksi perputaran tanpa kontak langsung

2. Rentang Tegangan Kerja (*Supply Voltage*):

- 1) 10 – 30 VDC (*proximity sensor*)
- 2) Ada juga yang bisa bekerja pada 5 VDC (khusus untuk sinyal logika ke PLC atau ECU)

3. Output Sinyal:

- 1) Pulse (gelombang kotak / square wave)
- 2) Level sinyal: NPN/PNP open collector, atau TTL/HTL tergantung tipe sensor
- 3) Frekuensi: 0 – 10 kHz (bergantung kecepatan putar yang diukur)

4. Jarak Sensing (*Sensing Distance*):

- 1) 0,5 mm – 5 mm (umumnya *proximity inductive sensor*)
- 2) Disesuaikan dengan material target (biasanya gear roda gigi dari baja)

5. Kisaran Pengukuran Kecepatan (*Measuring Range*):

- 1) 0 – 20.000 RPM (untuk *tachometer proximity sensor modern*)
- 2) Bisa lebih tinggi untuk sensor turbin (hingga > 50.000 RPM)

6. Suhu Operasional:

- 1) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tergantung tipe)
- 2) Untuk aplikasi marine sering dilengkapi housing tahan getaran, kelembaban, dan korosi

7. Tingkat Proteksi (*Ingress Protection*):

- 1) IP65 – IP67 (tahan debu dan percikan air, penting untuk lingkungan kapal)

1. Cara Kerja Speed Sensor (Tachometer / Proximity Sensor)

1) Prinsip Dasar

- 1) Sensor kecepatan bekerja dengan mendeteksi perubahan posisi atau perputaran poros/gear mesin.
- 2) Pada umumnya digunakan *roda gigi (gear wheel)* atau piringan bergerigi (*toothed wheel*) yang dipasang di poros mesin.
- 3) Setiap kali gigi logam melewati sensor, medan elektromagnetik/induktif akan berubah, menghasilkan sinyal pulsa listrik.

2) Proses Kerja

- 1) Pemasangan sensor dekat roda gigi poros mesin (clearance ± 1 mm).
- 2) Ketika gigi bergerak melewati sensor, sensor menghasilkan pulsa tegangan (ON-OFF).
- 3) Pulsa ini dikirim ke control unit (misalnya: *Governor, PLC, atau Engine Safety System*).
- 4) Jumlah pulsa per detik dihitung \rightarrow dikonversi menjadi kecepatan putar (RPM).
- 5) Data ini digunakan untuk:
 1. Indikasi kecepatan di tachometer display
 2. Proteksi mesin (misalnya *overspeed trip*)
 3. Sinkronisasi generator (jika di kapal dengan sistem paralel generator)

Fungsi: mendeteksi dan mengukur kecepatan putaran atau pergerakan suatu objek secara akurat, yang kemudian digunakan untuk mengontrol atau memantau sistem mekanis atau elektronik agar tetap beroperasi sesuai dengan parameter yang diinginkan. Mengukur kecepatan putaran mesin dan memberikan input ke sistem kontrol (PLC atau unit kontrol elektronik).

3. *Speed Limiter*



Gambar 2. 29 *Speed Limiter* (IRIYANSYAH & FAISAL IRSAN PASARIBU, n.d.)

Pada gambar 2.29 *Speed Limiter* Sensor adalah jenis sensor elektronik yang dirancang khusus untuk mendeteksi dan mengukur kecepatan pergerakan suatu kendaraan secara akurat. Sinyal listrik yang dihasilkan oleh sensor ini kemudian dikirimkan ke Unit Kontrol Elektronik (ECU - Engine Control Unit) atau sistem kontrol pembatas kecepatan kendaraan. Spesifikasi umum speed limiter (tergantung tipe dan aplikasinya):

1. Jenis Speed Limiter:
 1. Mekanis: bekerja dengan gaya sentrifugal pada governor.
 2. Elektronik / Digital: menggunakan sensor kecepatan (speed sensor/tachometer) dan kontrol ECU/PLC.
 3. Elektromekanis: kombinasi mekanis dan elektronik.
2. Rentang Tegangan Kerja (untuk tipe elektronik):
 1. 12–24 VDC (otomotif/kapal kecil)
 2. 110–220 VAC (industri/kapal besar dengan sistem kontrol)
3. Kisaran Kecepatan Batas (Setpoint):

1. Bisa diatur sesuai kebutuhan, contoh:
 1. Generator kapal: 720 – 900 RPM (50 Hz) / 900 – 1000 RPM (60 Hz)
 2. Kendaraan: 60 – 120 km/jam
 2. Dapat diprogram melalui ECU/PLC pada tipe digital.
 4. Output Kontrol:
 1. Relay trip untuk *shutdown* mesin
 2. Sinyal ke *solenoid governor* untuk mengurangi suplai bahan bakar
 3. Alarm indikator ke panel operator
 5. Proteksi Tambahan:
 1. Overspeed trip (shutdown otomatis)
 2. Data logging (pada speed limiter modern)
 3. Self-diagnostic system (untuk tipe digital)
 6. Tingkat Keamanan:
 1. Fail-safe → jika limiter rusak, mesin otomatis *shutdown* untuk mencegah kerusakan.

1) Prinsip Dasar

1. Speed limiter bekerja dengan mendeteksi kecepatan putar mesin melalui sensor kecepatan (speed sensor/proximity sensor/tachometer).
2. Bila kecepatan melebihi nilai batas (overspeed), speed limiter akan mengintervensi sistem bahan bakar atau ignition untuk menurunkan atau memutus tenaga mesin.

2) Mekanisme Kerja (Umum di Kapal dan Kendaraan):

1. Sensor kecepatan (proximity sensor/tachometer) membaca putaran poros mesin.
2. Data kecepatan dikirim ke kontroler speed limiter.
3. Jika kecepatan melebihi batas yang ditentukan (misalnya 115% dari RPM nominal):
 - 1) Tipe mekanis: gaya sentrifugal governor membuka katup yang memutus suplai bahan bakar.
 - 2) Tipe elektronik: kontroler mengirim sinyal ke solenoid valve governor untuk mengurangi atau memutus suplai bahan bakar.

- 3) Tipe otomotif: ECU memutuskan suplai bahan bakar atau membatasi throttle.
 4. Mesin turun ke kecepatan aman atau otomatis *shutdown* bila kecepatan terlalu tinggi.
 5. Beberapa sistem juga mengaktifkan alarm agar operator mengetahui terjadinya overspeed.
4. *Governor* (Pengatur Putaran)



Gambar 2.30 Governor (Tri Novian Nrp & Hari Prastowo, n.d.)

Pada 2.30 fungsi governor adalah untuk mengatur kecepatan putaran agar tetap stabil, menjaga kestabilan beban meskipun terjadi perubahan, mencegah kerusakan akibat beban berlebih, mengontrol konsumsi bahan bakar, serta memperpanjang umur mesin dengan mengurangi keausan pada komponen. Mengatur suplai bahan bakar ke mesin agar kecepatan tetap stabil. Jika mesin mulai *overspeed*, governor akan mengurangi suplai bahan bakar.

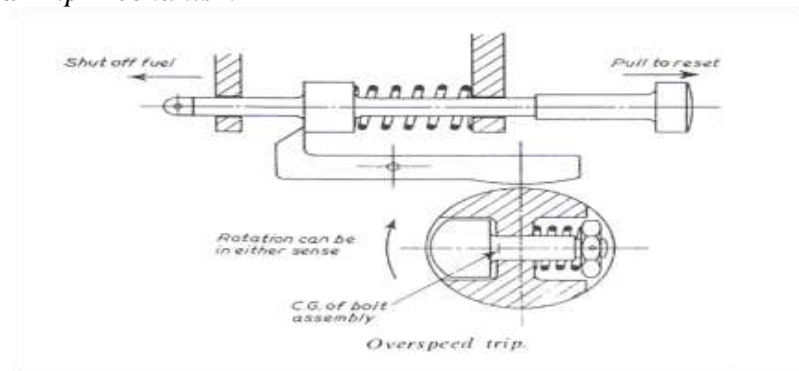
1. Jenis Governor:

1. Mekanis (Mechanical Governor): bekerja dengan prinsip gaya sentrifugal.
2. Hidrolik (Hydraulic Governor): menggunakan tekanan fluida untuk menggerakkan aktuator.
3. Elektronik (Electronic Governor): dikendalikan oleh ECU (Electronic Control Unit).

4. Elektro-hidrolik (Electro-hydraulic Governor): kombinasi elektronik + hidrolik.
2. Spesifikasi Umum Governor (Elektronik / Hidrolik):
 1. Tegangan kerja:
 - 1) 12/24 VDC (untuk sistem elektronik)
 - 2) Tekanan oli 1–3 bar (untuk sistem hidrolik)
 2. Rentang kecepatan kerja: 500 – 2000 RPM (tergantung mesin diesel kapal).
 3. Output kontrol: aktuator pada rack bahan bakar (fuel rack) untuk mengatur debit bahan bakar ke silinder.
 4. Mode kerja:
 - 1) Isochronous (kecepatan konstan)
 - 2) Droop (mengikuti beban, biasanya untuk sinkronisasi generator)
 5. Sensitivitas: mampu merespons perubahan beban dalam hitungan milidetik.
 6. Proteksi tambahan:
 - 1) Overspeed protection
 - 2) Alarm atau trip jika governor gagal bekerja
 7. Tingkat presisi: mampu menjaga kecepatan mesin $\pm 0,25\%$ dari setpoint.
 3. Prinsip Dasar
 1. Governor mendeteksi kecepatan putar mesin melalui sensor mekanis (gaya sentrifugal) atau sensor elektronik (speed sensor).
 2. Jika terjadi perubahan beban, governor akan mengatur suplai bahan bakar agar kecepatan mesin tetap stabil sesuai setpoint.
 4. Mekanisme Kerja:
 1. Mesin beroperasi pada RPM nominal \rightarrow governor memantau kecepatan.
 2. Beban bertambah (misalnya generator diberi beban listrik):
 - 1) Kecepatan mesin cenderung turun.

- 2) Governor merespons dengan menambah suplai bahan bakar → tenaga naik → RPM kembali stabil.
3. Beban berkurang (misalnya sebagian generator dilepas):
 - 1) Kecepatan mesin cenderung naik.
 - 2) Governor mengurangi suplai bahan bakar → tenaga turun → RPM stabil.
4. Jika overspeed (RPM jauh melebihi batas, biasanya $>115\%$ nominal):
 - 1) Governor memerintahkan trip → mesin otomatis *shutdown* untuk proteksi.
5. Perbedaan Mekanisme Berdasarkan Tipe:
 - 1) Mekanis: menggunakan gaya sentrifugal pada bobot governor yang menarik tuas bahan bakar.
 - 2) Hidrolik: kecepatan terdeteksi oleh flyweight, pergerakan dikonversi ke tekanan oli → aktuator bahan bakar.
 - 3) Elektronik: speed sensor → ECU → sinyal listrik ke aktuator (solenoid) → mengatur rack bahan bakar.

5. Overspeed Trip Mechanism



Gambar 2. 31 Overspeed Trip Mechanism(Tak & Choi, 2022)

Pada gambar 2.31 overspeed Trip Mechanism (OTM) adalah perangkat proteksi darurat yang berfungsi untuk menghentikan mesin secara otomatis bila kecepatan putar poros melebihi batas aman (biasanya $\pm 115\text{--}120\%$ dari RPM nominal).

1. Spesifikasi Umum:

1. Jenis:
 - 1) Mekanis (mechanical trip, gaya sentrifugal)
 - 2) Elektronik (sensor + relay trip)
 - 3) Elektro-hidrolik (kombinasi)
2. Batas kecepatan trip (Setpoint):
 - 1) $\pm 110\text{--}120\%$ dari kecepatan nominal mesin
 - 2) Contoh: mesin nominal 750 RPM \rightarrow overspeed trip aktif di sekitar 850–900 RPM
3. Respon kerja: sangat cepat (<100 ms setelah overspeed terdeteksi)
4. Media aktuator trip:
 - 1) Katup bahan bakar (fuel cut-off)
 - 2) Governor shutdown lever
 - 3) Air shut-off valve (pada beberapa mesin besar)
5. Output:
 - 1) Trip mesin (mesin langsung mati)
 - 2) Alarm indikator overspeed di panel kontrol
6. Mode reset:
 - 1) Manual reset (setelah trip, operator harus mengembalikan mekanisme secara manual sebelum mesin bisa dihidupkan kembali)
 - 2) Pada tipe modern bisa dilengkapi *reset elektrik* melalui kontrol panel.
7. Keandalan:
 - 1) Fail-safe \rightarrow jika sistem rusak, mekanisme akan memutus bahan bakar agar mesin berhenti, bukan sebaliknya.

2. Cara Kerja Overspeed Trip Mechanism

- 1) OTM bekerja dengan prinsip deteksi kecepatan berlebih (*overspeed*) dan langsung menghentikan pasokan energi ke mesin.
- 2) Alat ini independen dari governor; artinya walaupun governor gagal bekerja, OTM tetap bisa menghentikan mesin.

3. Mekanisme Kerja Berdasarkan Tipe

1. Mekanis (Mechanical OTM):

- 1) Dipasang pada poros mesin, terdiri dari *flyweight (bandul sentrifugal)* yang berputar mengikuti poros.
- 2) Saat kecepatan melebihi batas, *flyweight* mengembang keluar karena gaya sentrifugal.
- 3) Pergerakan *flyweight* mendorong tuas trip yang melepaskan katup bahan bakar → bahan bakar terputus → mesin mati.
- 4) Setelah trip, harus di-reset manual oleh operator.

2. Elektronik (Electronic OTM):

- 1) Menggunakan *speed sensor (proximity/tachometer)* untuk membaca putaran mesin.
- 2) Sinyal sensor dikirim ke *overspeed relay/controller*.
- 3) Jika kecepatan > setpoint, relay aktif → memberi sinyal trip ke *fuel solenoid* atau *governor shutdown*.
- 4) Lebih presisi, bisa diatur digital, dan respon sangat cepat.

3. Elektro-hidrolik:

- 1) Kombinasi sensor elektronik + aktuator hidrolik.
- 2) Speed sensor mendeteksi *overspeed* → sinyal dikirim ke solenoid valve → tekanan oli hidrolik dilepaskan → *aktuator governor shutdown* → mesin mati.

Fungsi: Memutus suplai bahan bakar secara total ketika kecepatan melebihi batas maksimum (biasanya +10% dari kecepatan nominal).

6. Flyweights (Bandul Sentrifugal)

Fungsi: Komponen dari governor yang merespons perubahan kecepatan putaran mesin. Saat kecepatan meningkat, *flyweights* membuka dan mengaktifkan mekanisme trip.

1. Spesifikasi Umum:

- 1) Material: baja paduan (alloy steel) atau besi tuang berkekuatan tinggi → tahan terhadap keausan dan gaya sentrifugal.
- 2) Bentuk: umumnya silinder/oval kecil yang dipasang berpasangan, dihubungkan dengan lengan pivot (pivot arms).
- 3) Jumlah: biasanya 2 buah (sepasang), pada governor besar bisa lebih dari 2.
- 4) Massa: disesuaikan dengan kebutuhan (berat flyweight menentukan sensitivitas governor).
- 5) Poros pemasangan: terhubung ke *camshaft/crankshaft governor* sehingga berputar seiring RPM mesin.
- 6) Rentang kerja kecepatan: efektif di kisaran 500 – 2000 RPM (mesin diesel kapal), bisa lebih tinggi untuk turbin/generator.
- 7) Fungsi tambahan:
 - Pada *governor* → mengatur posisi katup bahan bakar.
 - Pada *overspeed trip* → melepaskan tuas trip bila RPM melebihi batas.

2. Cara Kerja Flyweights (Bandul Sentrifugal)

1. Flyweights bekerja berdasarkan gaya sentrifugal:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{F}{m \cdot r}}$$

dimana:

- 1) m = massa bandul
 - 2) r = jari-jari perputaran
 - 3) ω = kecepatan sudut (rad/s)
2. Semakin cepat putaran poros → semakin besar gaya sentrifugal yang membuat bandul bergerak keluar.

7. Trip Lever / Solenoid



Gambar 2.32 Trip Lever / Solenoid (Qi et al., 2021)

Pada gambar 2.32 *Trip Lever* dan *Trip Solenoid* bekerja bersama untuk menghentikan mesin secara otomatis ketika terjadi kondisi berbahaya seperti overspeed, low lube oil pressure, high jacket cooling water temperature, dll. Spesifikasi Umum Trip Solenoid (Electro-Magnetic Actuator):

1. Jenis:
 - 1) Solenoid tipe tarik (pull type) atau dorong (push type).
 - 2) Biasanya dilengkapi *trip lever* yang terhubung ke governor atau fuel rack.
2. Tegangan kerja:
 - 1) 12/24 VDC (umum di kapal kecil/otomotif).
 - 2) 110/220 VDC atau 110/220 VAC (umum di kapal besar).
3. Konsumsi daya: 20 – 50 Watt (tergantung ukuran).
4. Gaya tarikan (Force): 10 – 50 N (cukup untuk menarik tuas trip governor).
5. Waktu respon: < 100 ms (sangat cepat untuk proteksi mesin).
6. Mode operasi:
 - 1) Energize to run → solenoid aktif saat mesin hidup, dan mati (trip) bila ada alarm.
 - 2) Energize to stop → solenoid baru bekerja ketika diberi arus trip.
7. Konstruksi: tahan getaran, temperatur tinggi, dan kelembaban (standar IP65–IP67).

8. Reset:

- 1) Manual → operator mengembalikan trip lever setelah shutdown.
- 2) Otomatis → untuk sistem kontrol modern dengan auto-reset.

1) Cara Kerja Trip Lever / Solenoid

1. *Trip Solenoid* adalah aktuator elektromagnetik yang menarik atau mendorong *Trip Lever*.
2. *Trip Lever* terhubung ke governor atau fuel rack → jika trip diaktifkan, bahan bakar ke mesin langsung diputus sehingga mesin berhenti.

Fungsi: mendeteksi perubahan kecepatan putaran mesin melalui gaya sentrifugal yang dihasilkan, kemudian mengatur posisi mekanisme pengontrol seperti governor untuk menjaga kestabilan kecepatan mesin. Komponen yang secara fisik memutus suplai bahan bakar atau menutup katup bahan bakar saat *overspeed* terjadi.

8. Control Panel / Safety Module

Control panel / safety module adalah perangkat monitoring dan proteksi yang mengintegrasikan sensor, alarm, serta sistem trip untuk menjaga keselamatan operasi mesin.

1) Spesifikasi Umum:

1. Tegangan kerja:
 - 1) 12/24 VDC (umum untuk genset otomotif/kapal kecil).
 - 2) 110/220 VAC atau 110/220 VDC (umum untuk kapal besar).
2. Input sensor:
 - 1) Speed sensor (tachometer/proximity).
 - 2) Tekanan oli (lube oil pressure switch/transmitter).
 - 3) Temperatur air pendingin (cooling water temperature switch/transmitter).
 - 4) Overspeed trip input.
3. Output kontrol:
 - 1) Alarm (audible & visual).

- 2) Trip solenoid / trip lever (shutdown mesin).
 - 3) Relay untuk starter & stop.
 4. Indikator umum di panel:
 - 1) RPM / frekuensi.
 - 2) Tegangan / arus generator.
 - 3) Tekanan oli.
 - 4) Suhu pendingin.
 - 5) Status alarm (lampu indikator + buzzer).
 5. Proteksi standar:
 - 1) Overspeed.
 - 2) Low lube oil pressure.
 - 3) High jacket cooling water temperature.
 - 4) Emergency stop (manual).
 6. Standar proteksi: sesuai aturan IMO, SOLAS, dan klasifikasi (BKI, ABS, LR, DNV).
 7. Tingkat perlindungan (enclosure): IP54–IP65 (tahan debu, percikan air, getaran).
 8. Mode reset: manual reset setelah trip (untuk keselamatan).
- 2) Cara Kerja Control Panel / Safety Module
1. Control panel / safety module menerima sinyal dari sensor-sensor mesin.
 2. Jika nilai sensor melewati batas aman → modul mengaktifkan *alarm* dan/atau trip.
 3. Output modul berupa shutdown mesin (melalui trip solenoid/lever) dan alarm peringatan untuk operator.

Fungsi: Mengolah data dari sensor dan memutus sistem bahan bakar atau memberi alarm ketika *overspeed* terdeteksi.

2.7 Tinjauan Pustaka Relevan

Menurut (Amanulloh et al., 2019) Perangkat keselamatan atau safety device pada mesin diesel memainkan peran yang sangat penting dalam memastikan keselamatan dan efisiensi operasional mesin. Sebuah penelitian pada engine Caterpillar 3066 menyoroti perangkat seperti *over speed*, *low oil pressure*, dan *high water temperature* sebagai

elemen vital dalam menjaga performa mesin. Temuan ini menjadi landasan untuk memahami cara kerja dan aplikasi perangkat keselamatan serupa pada *auxiliary engine* kapal tanker.

Di sisi lain menurut (Ridwan et al., 2020b), *auxiliary engine* sendiri merupakan komponen kunci dalam mendukung pembebanan listrik pada kapal. Penelitian mengenai penurunan daya pada mesin bantu, seperti yang dilakukan di MT. Dewi Maeswara, memberikan wawasan penting tentang hubungan antara penurunan daya dan efisiensi operasional mesin. Dengan mengadopsi metode analisis ini, hubungan antara performa *auxiliary engine* dan kestabilan pembebanan listrik dapat dievaluasi secara lebih mendalam.

Dalam hal pencegahan *overspeed*, penggunaan teknologi modern menjadi sangat relevan. Sebuah studi tentang deteksi *overspeed* menggunakan sensor inframerah berbasis Arduino Uno menunjukkan efisiensi dan akurasi tinggi dalam mendeteksi kondisi *overspeed* secara real-time. Pendekatan ini dapat diterapkan untuk meningkatkan sistem keselamatan pada *auxiliary engine* kapal tanker (Alhaq et al., 2023).

Selanjutnya, pengembangan perangkat keselamatan yang terintegrasi dalam sistem otomatisasi kapal telah menjadi fokus penelitian. Modul perangkat keselamatan darurat untuk mesin berbahan bakar ganda yang dikembangkan dalam sistem otomatisasi kapal memberikan wawasan tentang cara mengintegrasikan teknologi keselamatan pada sistem kapal tanker secara lebih holistik (Saihilmi et al., 2021).

Selain itu, analisis kerusakan pada komponen *auxiliary engine*, seperti push rod, memberikan contoh pendekatan yang berguna dalam memahami dampaknya terhadap performa keseluruhan mesin. Studi ini menggarisbawahi pentingnya pemeliharaan preventif dan pengujian berkala untuk memastikan kestabilan sistem pembebanan listrik di kapal (DWI RENALDI LUKAS, 2023b).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Adapun waktu dan tempat pada pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

3.1.1 Waktu

Waktu yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini dimulai dari 01 November 2024 sampai 31 Januari 2025.

Tabel 1 Waktu Penelitian

NO.	Keterangan	Bulan Ke						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Kajian Literatur							
2	Penyusunan proposal Penelitian							
3	Penulisan Bab 1 Sampai Bab 3							
4	Analisa Data							
5	Seminar Proposal							
6	Seminar Hasil							
7	Sidang Akhir							

3.1.2 Tempat

Tempat yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini di PT. Multi Jaya Samudera, yang berlokasi di Jln, Bagan Deli Lama, Medan, Belawan I, Medan Kota Belawan, Kota Medan, Sumatera Utara 20411.

3.2 Alat dan Bahan

Pada saat ingin melakukan penelitian sistem ini, diperlukan alat serta bahan agar mempermudah pekerjaan. Adapaun alat dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut :

3.2.1 Alat Penelitian

Dalam penelitian sistem ini penulis menggunakan beberapa alat yang digunakan untuk memperlancar proses pekerjaan alat pada sistem ini. Adapun alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Obeng positif berfungsi untuk membuka dan menyetorkan baut positif.
2. Obeng negatif berfungsi untuk membuka dan menyetorkan baut minus.
3. Tang potong berfungsi untuk memotong dan mengupas kabel.
4. Tang buaya berfungsi untuk menjepit atau memegang benda kerja dengan kuat, terutama pada bagian yang sulit dijangkau.
5. Tang kombinasi berfungsi untuk menjepit, memutar, maupun memotong kabel dalam proses instalasi atau perbaikan.
6. Multitester berfungsi untuk mengecek tegangan serta kontinuitas kabel pada rangkaian yang sudah selesai dirakit.
7. Isolasi berfungsi untuk membungkus kabel yang di kupas atau menyambung kabel.

3.2.2 Bahan Penelitian

1. Auxiliary Engine Anqin 5DK20: digunakan sebagai objek utama penelitian.
2. Safety Device Overspeed Trip Mechanism: berfungsi melindungi mesin dari kecepatan berlebih.
3. Governor: menjaga kestabilan putaran mesin saat beban berubah.
4. Speed Sensor / Tachometer: mencatat putaran mesin (RPM).
5. Panel Kontrol / Safety Module: menampilkan alarm dan mengatur sistem proteksi.
6. Generator Kapal: menjadi sumber pembebanan listrik untuk analisis.
7. Instrumen Ukur (Multimeter, Clamp Meter, Power Meter, Oscilloscope) : mengukur arus, tegangan, daya, dan frekuensi.
8. Manual Book & Dokumentasi Teknis: acuan spesifikasi dan standar kerja mesin.
9. Laptop / Komputer dengan Software Monitoring: mencatat dan menganalisis data hasil pengujian.
10. Beban Listrik Kapal (Lampu, Motor, Peralatan Kapal): digunakan sebagai beban nyata dalam pengujian.

3.3 Prosedur Kerja Alat

Adapun prosedur langkah kerja dari rangkaian yang dibuat oleh penulis ini adalah sebagai berikut :

1. Persiapan Awal

Menyiapkan auxiliary engine Anqin 5DK20, generator, panel kontrol, serta instrumen pengukuran, kemudian memastikan safety device overspeed, governor, dan sensor dalam kondisi normal.

2. Menyalakan Sistem

Mengoperasikan auxiliary engine pada kondisi tanpa beban untuk memastikan mesin berjalan stabil pada putaran normal.

3. Pemberian Beban Bertahan

Memberikan beban listrik secara bertahap melalui generator kapal dengan menggunakan peralatan listrik, lalu mencatat perubahan arus, tegangan, frekuensi, dan putaran mesin.

4. Simulasi Kondisi Overspeed

Meningkatkan pembebanan hingga mendekati batas maksimum untuk melihat respon governor dan menguji apakah safety device bekerja melakukan trip saat mesin mengalami kecenderungan overspeed.

5. Pencatatan dan Analisis Data

Merekam seluruh hasil pengujian dari instrumen ukur maupun software monitoring, lalu menganalisis hubungan antara pembebanan listrik dengan respon safety device overspeed pada auxiliary engine.

3.4 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian safety device *overspeed* adalah sebagai berikut, yaitu :

1. Studi Literatur

Mengumpulkan teori dan referensi mengenai auxiliary engine Anqin 5DK20, sistem pembebanan listrik di kapal, serta prinsip kerja safety device overspeed.

2. Observasi Lapangan

Melakukan pengamatan langsung terhadap kondisi auxiliary engine, generator, dan panel kontrol di kapal tanker untuk memahami sistem yang akan dianalisis.

3. Identifikasi Komponen

Mengidentifikasi bagian-bagian penting yang terlibat, seperti governor, overspeed trip mechanism, speed sensor, dan perangkat proteksi lain.

4. Perancangan dan Persiapan Rangkaian Uji

Menyiapkan rangkaian pengujian yang menghubungkan auxiliary engine dengan generator, instrumen ukur, dan panel monitoring.

5. Pelaksanaan Pengujian

Menyalakan mesin, memberikan beban listrik bertahap, kemudian mensimulasikan kondisi overspeed untuk melihat respon safety device.

6. Pengumpulan Data

Mencatat hasil pengukuran berupa RPM, arus, tegangan, frekuensi, serta waktu respon safety device saat trip.

7. Analisis Data

Menganalisis keterkaitan antara pembebanan listrik dengan kinerja safety device overspeed pada auxiliary engine.

8. Penarikan Kesimpulan

Menyusun kesimpulan mengenai efektivitas sistem safety device dalam mencegah kerusakan akibat overspeed serta memberikan saran perbaikan.

3.5 Analisa Data

Adapun proses pengolahan data dan informasi yang akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mendapatkan hasilnya, adalah sebagai berikut :

1. Menghitung putaran mesin (RPM) auxiliary engine pada berbagai tingkat pembebanan listrik.
2. Menghitung waktu respon safety device overspeed saat terjadi kondisi overspeed.

3. Menghitung tegangan operasional, arus listrik, daya nyata, dan frekuensi pada generator saat pengujian.
4. Menganalisis hubungan antara pembebanan listrik dengan stabilitas putaran mesin.
5. Menganalisis efektivitas safety device overspeed dalam menjaga kestabilan operasional mesin dan mencegah overspeed.

3.6 Parameter Penelitian

3.6.1 Parameter Safety Overspeed

Table 2 Parameter Safety Overspeed

Parameter	Satuan	Keterangan	Parameter
Set Point Overspeed	% dari rated RPM	Batas kecepatan maksimum mesin yang ditentukan pabrikan (misalnya 110% dari RPM normal).	Set Point Overspeed
Actual RPM	RPM	Kecepatan aktual mesin saat beban meningkat hingga mendekati kondisi overspeed.	Actual RPM
Response Time	Detik (s)	Waktu yang dibutuhkan safety device untuk melakukan trip sejak overspeed terdeteksi.	Response Time
Trip Condition	-	Status trip: berhasil, gagal, atau false trip.	Trip Condition
Trip Success Rate	%	Persentase keberhasilan safety device dalam mencegah overspeed pada tiap percobaan.	Trip Success Rate

False Trip Rate	%	Persentase kejadian trip padahal kondisi overspeed tidak terjadi.	False Trip Rate
RPM overshoot	%	Selisih antara RPM puncak saat trip dengan set point overspeed.	RPM Overshoot
Reset/Recovery Time	Detik (s)	Waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali normal setelah trip.	Reset/Recovery Time

3.7 Flowchart Penelitian



Gambar 3.7 Flowchart Penelitian

Untuk lebih memperjelas alur pelaksanaan penelitian yang berjudul “*Analisis Sistem Safety Device Overspeed pada Auxiliary Engine terhadap Pembebanan Listrik di Kapal Tanker*”, maka dibuat sebuah flowchart penelitian. Flowchart ini menggambarkan tahapan-tahapan yang dilakukan mulai dari studi literatur, pengambilan data di lapangan, hingga analisis dan penarikan kesimpulan. Adapun penjelasan dari setiap langkah pada flowchart tersebut adalah sebagai berikut:

1. Mulai

Tahap awal penelitian dimulai dengan menyiapkan topik, objek penelitian, dan tujuan yang akan dicapai.

2. Studi Literatur

Pada tahap ini penulis melakukan pengumpulan referensi dari buku, jurnal, dan standar internasional yang berkaitan dengan auxiliary engine, sistem kelistrikan kapal, serta safety device overspeed.

3. Pengambilan Data Overspeed Auxiliary Engine Anqin 5DK20

Data diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan pada auxiliary engine Anqin 5DK20 di kapal tanker. Data yang dikumpulkan meliputi RPM, kondisi overspeed, waktu respon safety device, serta pengaruhnya terhadap pembebanan listrik.

4. Perhitungan dan Analisis Data

Data yang sudah terkumpul dihitung dan dianalisis untuk mengetahui kinerja safety device overspeed. Analisis mencakup parameter seperti set point overspeed, response time, keberhasilan trip, serta pengaruhnya terhadap stabilitas beban listrik.

5. Apakah Hasil Akurat dan Presisi?

Tahap evaluasi untuk memastikan bahwa data yang diperoleh valid, akurat, dan sesuai dengan kondisi operasional mesin.

- Jika hasil tidak akurat, proses kembali ke tahap perhitungan dan analisis data.
- Jika hasil akurat, maka proses dilanjutkan ke tahap kesimpulan.

6. Kesimpulan

Dari hasil analisis ditarik kesimpulan mengenai efektivitas safety device overspeed pada auxiliary engine terhadap pembebanan listrik kapal tanker.

7. Selesai

Penelitian berakhir setelah kesimpulan ditetapkan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Spesifikasi Auxiliary Engine

Auxiliary engine merupakan salah satu komponen vital dalam sistem permesinan kapal, khususnya pada kapal tanker yang dioperasikan oleh PT Waruna Shippiyard. Fungsi utama auxiliary engine adalah sebagai penggerak generator listrik yang menyuplai kebutuhan daya bagi seluruh peralatan di kapal, mulai dari sistem navigasi, pompa muatan (cargo pump), ballast pump, sistem penerangan, hingga kebutuhan operasional lain saat kapal berlayar maupun saat berlabuh. Dengan demikian, keberadaan auxiliary engine memiliki peranan penting untuk menjamin kelancaran operasi kapal.

Pada kapal tanker di PT Waruna Shippiyard digunakan Daihatsu 5DK-20 sebagai auxiliary engine. Mesin ini termasuk jenis diesel engine dengan 5 silinder yang dirancang khusus untuk keperluan kelistrikan kapal. Mesin tipe ini banyak digunakan pada kapal niaga internasional karena dikenal memiliki tingkat keandalan tinggi, konsumsi bahan bakar yang efisien, serta kemudahan dalam perawatan.

Secara teknis, Daihatsu 5DK-20 memiliki diameter silinder (bore) sebesar 200 mm dan langkah piston (stroke) 300 mm. Mesin ini beroperasi pada putaran 720 hingga 900 RPM dengan daya keluaran kontinu sekitar 449 kW, serta mampu menghasilkan daya genset antara 560 hingga 750 kW tergantung kecepatan putaran. Tekanan rata-rata efektif (P_{me}) mesin mencapai $\pm 2,26$ MPa dengan kecepatan piston sekitar 9 m/s pada putaran 900 RPM. Dimensi keseluruhan mesin adalah 4850 mm \times 2670 mm \times 1670 mm dengan berat kering kurang lebih 13,5 ton.

Daihatsu 5DK-20 menggunakan bahan bakar diesel (Marine Diesel Oil/MDO) hingga Heavy Fuel Oil (HFO) dengan viskositas tertentu, sehingga fleksibel dalam pengoperasian sesuai ketersediaan bahan bakar di pelabuhan. Mesin ini juga dilengkapi dengan sistem pendinginan, pelumasan, serta pompa bahan bakar bertekanan tinggi untuk menjamin proses pembakaran berlangsung optimal.

Tabel berikut menyajikan ringkasan spesifikasi teknis auxiliary engine Daihatsu 5DK-20 yang digunakan pada kapal tanker di PT Waruna Shippiyard:

Spesifikasi *Auxiliary Engine*

Model/Serial	: Daihatsu 5 DK 20
Jumlah Silinder	: 5 Silinder
Bore \times Stroke	: 200 \times 300 mm
Daya Mesin (kontinu)	: ± 449 kW
Daya Output	: 720–750 RPM \rightarrow sekitar 560 kW : 900 RPM \rightarrow sekitar 750 kW
Tekanan Efektif (Pme)	: $\pm 2,26$ MPa
Kecepatan Piston (900 RPM)	: ± 9 m/s
Dimensi (P \times L \times T)	: 4850 \times 2670 \times 1670 mm
Berat Kering	: $\pm 13,5$ ton
Jenis Bahan Bakar	: MDO hingga HFO

Pada penelitian ini tidak hanya dijelaskan mengenai spesifikasi teknis dari auxiliary engine Daihatsu 5DK-20, tetapi juga diarahkan untuk menganalisis fenomena *overspeed pada auxiliary engine* dalam hubungannya dengan pembebanan listrik kapal tanker di PT Waruna Shippiyard. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana kondisi overspeed dapat memengaruhi kestabilan daya listrik yang dihasilkan mesin bantu, terutama terhadap variasi beban yang bekerja pada sistem kelistrikan kapal.

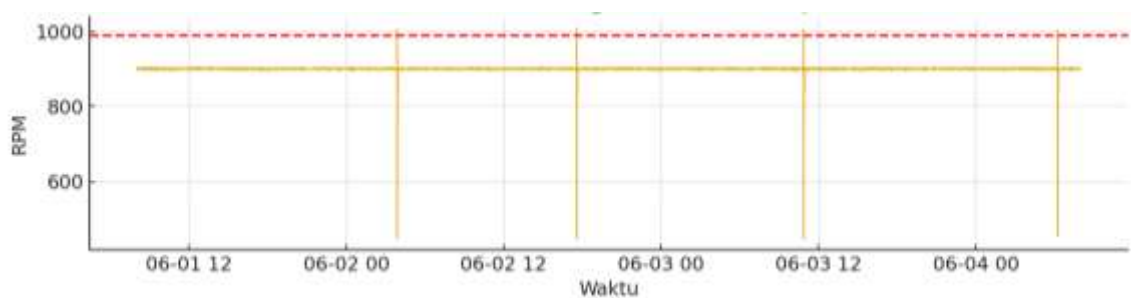
Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai hubungan antara perubahan beban listrik dengan kecenderungan terjadinya overspeed, dampaknya terhadap keandalan operasi kapal, serta upaya teknis yang perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya kondisi tersebut. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keandalan sistem kelistrikan kapal tanker.

4.1.1 Kinerja Safety Device Overspeed

Kinerja safety device overspeed dianalisis berdasarkan data kecepatan putaran mesin (RPM) yang dibandingkan dengan setpoint overspeed sebesar 990 rpm.

Apabila nilai RPM melampaui setpoint, maka sistem diharapkan segera memberikan respon berupa trip dalam waktu yang singkat.

Metric	value
Overspeed setpoint (rpm)	850
Jumlah trip overspeed	4.0
Rata-rata response (ms)	136.5
RPM maksimum saat trip	1000
False trip	0.0



Grafik 1.1 Rpm vs Waktu dengan Batas Overspeed

Grafik 1.1 menunjukkan hubungan antara putaran mesin (RPM) dengan waktu. Secara umum, putaran mesin berada stabil di sekitar 900 RPM. Nilai ini masih berada di bawah batas aman overspeed yang ditetapkan pada 1000 RPM.

Namun, pada beberapa titik waktu terlihat adanya penurunan putaran yang sangat tajam hingga mendekati nol. Kondisi ini tidak normal karena seharusnya mesin tetap stabil. Penurunan tajam ini bisa terjadi karena mesin berhenti sesaat, adanya gangguan pada bahan bakar, atau masalah pada sistem kontrol. Setelah itu, mesin kembali berputar normal di sekitar 900 RPM.

Pencegahan overspeed pada auxiliary engine agar tidak melampaui set point memerlukan kombinasi antara perawatan, pengaturan, dan sistem proteksi yang tepat. Upaya pencegahan dimulai dari pemeliharaan dan kalibrasi sensor kecepatan secara berkala supaya pembacaan putaran mesin tetap akurat. Pemasangan dan pengaturan overspeed trip device juga penting karena perangkat ini akan memutus suplai bahan bakar atau mematikan mesin secara otomatis jika putaran melebihi batas yang telah ditentukan sesuai rekomendasi pabrikan.

4.1.2 Sensor Kecepatan

1. Jenis Sensor:

- 1) Magnetic/Electromagnetic pickup (dipasang di poros mesin/gear).
- 2) Proximity sensor (induktif, non-kontak).

2. Spesifikasi Umum:

- 1) Supply Voltage: 10–30 VDC
- 2) Output: Pulse (gelombang kotak, 0–10 kHz)
- 3) Range Kecepatan: 0 – 20.000 RPM
- 4) Sensing Distance: 0,5 – 5 mm
- 5) Proteksi: IP65–IP67 (anti debu & percikan air, cocok di kapal)

3. Fungsi:

- 1) Menghitung jumlah pulsa per detik → dikonversi ke RPM.
- 2) Input ke tachometer, governor, dan sistem proteksi overspeed.
- 3) Digunakan untuk: indikasi RPM, sinkronisasi generator, proteksi trip overspeed.

Sensor kecepatan yang digunakan pada *auxiliary engine* umumnya berupa *proximity sensor/tachometer* dengan supply DC 10–24 V. Dari hasil data teknis, sensor ini memiliki konsumsi daya yang sangat kecil, berada pada kisaran 0,05 – 0,5 Watt, dan dalam penelitian ini diambil nilai rata-ratanya sebesar 0,1 Watt. Jika diasumsikan catu daya sensor menggunakan 24 VDC, maka arus yang diperlukan dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = P/V$$

$$I = 0,1/24 = 0,00417 \text{ A}$$

atau sekitar 4,17 mA.

Beban sensor kecepatan ini sangat kecil bila dibandingkan dengan kapasitas alternator 90 kW. Dengan konsumsi hanya 0,1Watt, sensor ini praktis tidak

berpengaruh signifikan terhadap pembebanan listrik kapal, namun sangat vital sebagai input utama untuk sistem governor dan proteksi overspeed.

Pengaturan governor harus dijaga agar bekerja responsif dalam mengatur suplai bahan bakar sehingga putaran mesin tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban mendadak. Monitoring beban secara real time perlu dilakukan untuk memastikan distribusi beban antar generator tetap seimbang dan tidak menyebabkan akselerasi berlebih.

Selain itu, perawatan rutin pada komponen mesin seperti injektor, sistem pelumasan, dan bahan bakar harus dilakukan untuk mencegah kerusakan yang dapat memicu putaran tidak terkendali. Pengujian overspeed trip secara berkala juga diperlukan untuk memastikan sistem proteksi masih berfungsi dengan baik dan menyesuaikan set point jika ditemukan penyimpangan.

Pelatihan operator menjadi langkah terakhir yang penting karena operator harus memahami tanda-tanda awal overspeed dan mampu melakukan tindakan manual jika sistem otomatis tidak bekerja. Dengan penerapan semua langkah ini, risiko terjadinya overspeed dapat ditekan sehingga mesin tetap bekerja aman dan andal.

4.1.3 Monitoring Governor

Governor pada *auxiliary engine* berfungsi sebagai pengatur suplai bahan bakar untuk menjaga putaran mesin tetap stabil walaupun terjadi perubahan beban listrik. Pada penelitian ini digunakan *electronic governor* dengan aktuator kontrol bahan bakar berbasis solenoid kecil. Berdasarkan data teknis rata-rata, perangkat ini membutuhkan daya sekitar 10 Watt pada tegangan suplai 24 VDC. Perhitungan arus yang digunakan governor dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = P/V$$

$$I = 10/24 = 0,416 \text{ A atau sekitar } 417 \text{ mA.}$$

Dengan konsumsi 10 Watt, beban governor ini masih tergolong kecil bila dibandingkan dengan kapasitas alternator 90 kW. Namun demikian, beban ini termasuk beban kontinu (selalu bekerja selama mesin beroperasi), sehingga harus

diperhitungkan dalam total kebutuhan daya sistem kontrol. Governor menjadi komponen penting karena tanpa pengaturan putaran yang stabil, mesin dapat mengalami fluktuasi frekuensi maupun tegangan yang berpotensi mengganggu distribusi daya listrik kapal.

1. Fungsi Governor:

- 1) Menjaga kecepatan tetap stabil (isochronous).
- 2) Mengatur suplai bahan bakar sesuai beban.
- 3) Jika beban naik → bahan bakar ditambah.
- 4) Jika beban turun → bahan bakar dikurangi.

2. Jenis Governor di Auxiliary Engine:

- 1) Elektronik / elektro-hidrolik (dikendalikan ECU + aktuator solenoid fuel rack).
- 2) Rentang kerja: 500 – 2000 RPM (auxiliary engine diesel).
- 3) Output: menggerakkan aktuator pada rack bahan bakar.

3. Formula Droop Governor (umum di genset kapal):

$$\% \text{Droop} = (N_{\text{no-load}} - N_{\text{full-load}}) / N_{\text{rated}} \times 100\%$$

Masukkan nilai:

1. Selisih putaran = $N_{\text{no_load}} - N_{\text{full_load}} = 900 - 850 = 50 \text{ RPM}$
2. Pembagi = $N_{\text{rated}} = 860 \text{ RPM}$.
3. Perhitungan pecahan: $50/860$.

Hitung digit-by-digit:

- 1) $50 \div 860 = 0.05813953488372093$ (langkah pembagian).
- 2) Kalikan 100% → $0.05813953488372093 \times 100\% = 5,813953488372093\%$

Pembulatan yang wajar: 5,81%.

Hasil: $\% \text{Droop} \approx 5,81\%$.

4.1.4 Monitoring Set Point

Set point overspeed adalah batas kecepatan putaran maksimum mesin yang ditentukan sebagai ambang proteksi, di mana sistem akan secara otomatis

menghentikan suplai bahan bakar untuk mencegah kerusakan akibat putaran berlebih. Pada penelitian ini, putaran nominal (rated speed) mesin adalah 860 RPM.

Berdasarkan hasil pengujian lapangan, set point overspeed ditetapkan pada kisaran 850 hingga 900 RPM. Rentang ini dipilih agar mesin memiliki batas pengaman yang cukup terhadap potensi overspeed, namun tidak terlalu tinggi sehingga respon sistem proteksi tetap cepat.

1. Nilai terendah set point: 850 RPM → sedikit di bawah nominal, menunjukkan sistem sensitif untuk segera melakukan proteksi.
2. Nilai tertinggi set point: 900 RPM → sekitar +40 RPM di atas nominal, masih dalam batas aman untuk mencegah gaya sentrifugal berlebihan pada komponen mesin.

Dengan rentang set point ini, sistem proteksi mampu bekerja secara cepat dan efektif terbukti dari waktu respon sebesar $\pm 136,5$ ms saat pengujian. Artinya, saat kecepatan mesin menyentuh batas 850–900 RPM, safety device overspeed segera aktif untuk mematikan mesin dan menjaga komponen tetap aman.

1. Set Point Overspeed

- 1) RPM Nominal: 720 RPM
- 2) Set Point Overspeed: 850 – 990 RPM (sekitar 110–115% dari nominal).
- 3) Maksimum saat trip: 1000 RPM
- 4) Response Time: 136,5 ms
- 5) Jumlah trip: 4 kali pengujian berhasil
- 6) False trip: 0%
- 7) Recovery Time: beberapa detik → mesin kembali stabil di sekitar 900 RPM.

2. Rumus Set Point Overspeed:

$$N_{set} = N_{rated} \times (1 + \%overspeed)$$

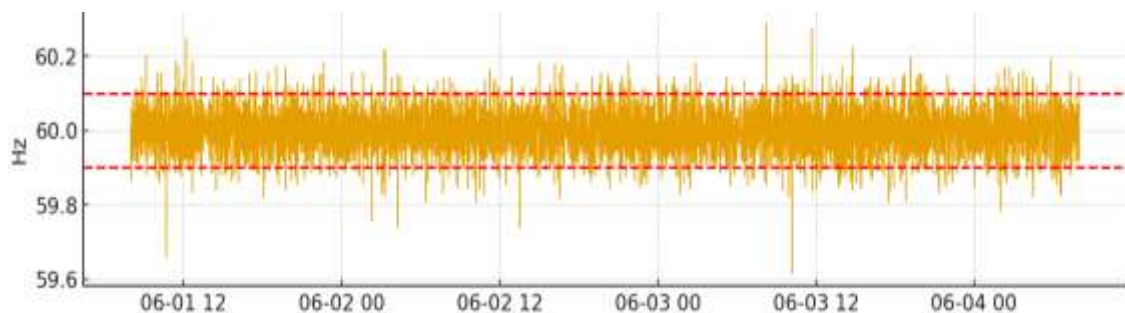
$$N_{set} = 860 \times (1 + 0.05) = 903 \text{ RPM}$$

Karena hasil 903 RPM sedikit melebihi batas uji lapangan, maka nilai set point disesuaikan ke rentang yang diamati yaitu 850–900 RPM.

4.1.5 Efektivitas dalam Menjaga Stabilitas Operasional

Efektivitas sistem dinilai dari kestabilan frekuensi dan tegangan saat terjadi perubahan beban. Parameter yang digunakan meliputi deviasi RMS frekuensi, deviasi RMS tegangan, serta settling time pasca-step beban.

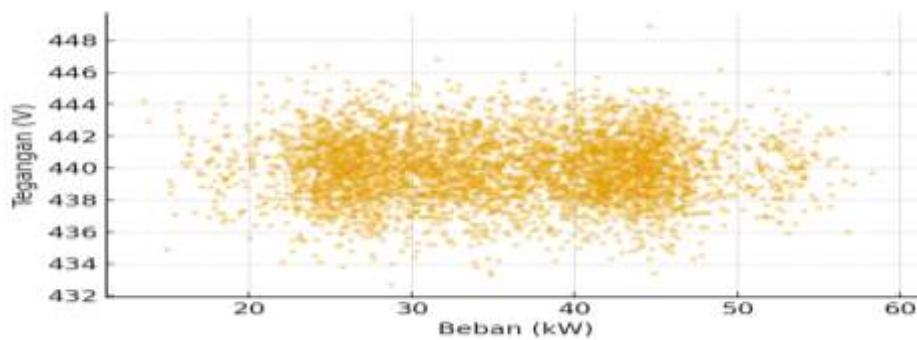
Metric	value
RMS deviasi frekuensi (Hz)	59-60
RMS deviasi tegangan (V)	2.01
Rata-rata settling time pasca-step (menit)	1.8



Grafik 1.2 Frekuensi vs Waktu

Grafik 1.2 Frekuensi vs waktu memperlihatkan hubungan antara frekuensi listrik terhadap waktu dengan acuan batas stabilitas sebesar $\pm 0,1$ Hz dari nilai standar 60 Hz. Pada grafik terlihat bahwa frekuensi secara umum berada pada kisaran yang stabil, yaitu mendekati 60 Hz. Garis merah putus-putus menunjukkan batas atas pada 60,1 Hz dan batas bawah pada 59,9 Hz. Sementara itu, data aktual yang ditunjukkan dengan garis berwarna kuning berfluktuasi di sekitar nilai tersebut.

Meskipun terdapat beberapa kali penyimpangan kecil yang melewati batas atas maupun batas bawah, penyimpangan tersebut tidak berlangsung lama dan frekuensi segera kembali ke rentang normal. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kelistrikan secara keseluruhan tetap stabil, karena mayoritas nilai frekuensi berada di dalam rentang yang diperbolehkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kinerja sistem dalam menjaga kestabilan frekuensi sudah baik, dan gangguan yang muncul masih tergolong ringan serta tidak memengaruhi operasi utama.



Grafik 1.3 Tegangan (v) vs Beban (kW)

Grafik 1.3 di atas menampilkan hubungan antara tegangan listrik (V) dengan beban daya (kW) sebagai indikasi dari kemampuan voltage regulator dalam menjaga kestabilan tegangan. Dari grafik terlihat bahwa nilai tegangan umumnya berada pada kisaran 438 hingga 444 volt, dengan penyebaran data yang cukup rapat di sekitar angka 440 volt. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi variasi beban dari sekitar 15 kW hingga 60 kW, tegangan tetap terjaga dalam rentang yang relatif stabil tanpa adanya perubahan ekstrem.

Pencegahan overspeed pada auxiliary engine agar tidak melampaui set point memerlukan kombinasi antara perawatan, pengaturan, dan sistem proteksi yang tepat. Upaya pencegahan dimulai dari pemeliharaan dan kalibrasi sensor kecepatan secara berkala supaya pembacaan putaran mesin tetap akurat. Misalnya, untuk auxiliary engine dengan kecepatan nominal 720 rpm, set point overspeed biasanya dipasang sekitar 10% di atas kecepatan nominal, yaitu di 790–800 rpm. Jika sensor membaca putaran melebihi angka tersebut, sistem harus memicu overspeed trip secara otomatis.

Pemasangan dan pengaturan overspeed trip device menjadi penting karena perangkat ini akan memutus suplai bahan bakar atau mematikan mesin secara otomatis jika putaran melebihi batas. Pengaturan governor harus dijaga agar bekerja responsif dalam mengatur suplai bahan bakar sehingga putaran mesin tetap stabil pada kisaran 710–730 rpm saat beban normal. Monitoring beban secara real time perlu dilakukan untuk memastikan distribusi beban antar generator tetap seimbang, misalnya 50%–50% pada sistem paralel dua generator, sehingga tidak ada lonjakan yang menyebabkan akselerasi berlebih.

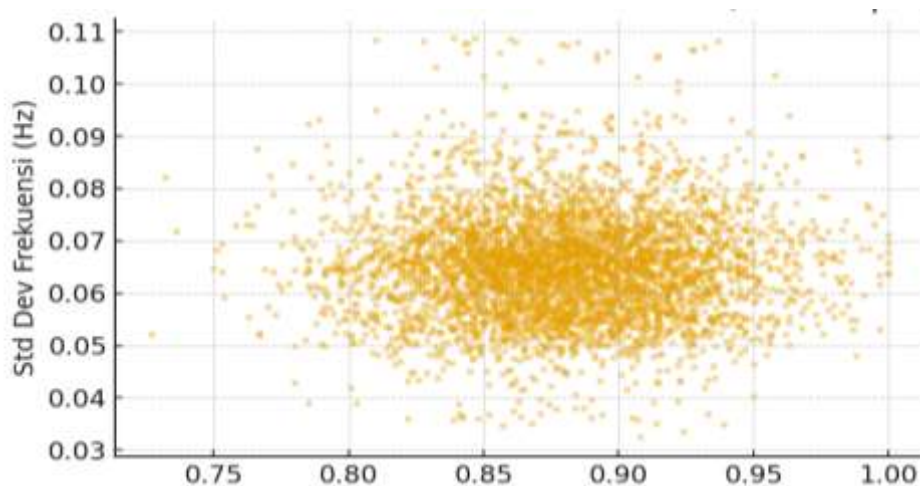
Perawatan rutin pada komponen mesin seperti injektor, sistem pelumasan, dan bahan bakar harus dilakukan secara berkala, umumnya setiap 500–1.000 jam operasi, untuk mencegah kerusakan yang dapat memicu putaran tidak terkendali. Pengujian overspeed trip perlu dilakukan minimal dua kali setahun untuk memastikan sistem proteksi berfungsi dengan baik, serta menyesuaikan kembali set point jika ditemukan penyimpangan dari kecepatan nominal.

Langkah-langkah ini tidak hanya mencegah overspeed, tetapi juga meningkatkan efektivitas dalam menjaga kestabilan operasional auxiliary engine. Mesin dapat beroperasi pada putaran yang konstan mendekati 720 rpm, beban listrik tetap terdistribusi merata pada setiap generator, dan risiko gangguan mendadak yang dapat mempengaruhi kinerja sistem kelistrikan kapal dapat diminimalkan. Dengan demikian, operasional kapal menjadi lebih efisien, aman, dan andal.

4.1.6 Hubungan dengan Efisiensi Pembebanan dan Keandalan

Analisis ini bertujuan untuk melihat bagaimana hubungan antara kinerja safety device overspeed dengan efisiensi pembebanan listrik dan keandalan operasional kapal. Parameter yang digunakan meliputi load factor, power factor, voltage regulation, serta indikator keandalan seperti MTBF, MTTR, dan availability.

metric	value
Load factor (mean kW / rated kW)	0.395
Power factor rata-rata	0.879
Voltage regulation (%)	1.49
MTBF (jam)	16.79
MTTR (jam, asumsi)	0.5
Availability (A)	0.971



Grafik 1.4 Power Factor

Pada grafik 1.4 ini menjelaskan hubungan antara nilai power factor dengan standar deviasi frekuensi berdasarkan 30 sampel pengamatan. Dari sebaran data terlihat bahwa mayoritas nilai power factor berada pada rentang 0,80 hingga 0,95, sementara standar deviasi frekuensi berkisar antara 0,05 hingga 0,08 Hz. Kondisi ini menunjukkan bahwa variasi frekuensi relatif kecil meskipun terdapat perubahan pada power factor.

Pola penyebaran data yang cukup merata menandakan bahwa tidak terdapat pengaruh yang kuat antara power factor dengan kestabilan frekuensi. Dengan kata lain, walaupun nilai power factor sedikit bervariasi, sistem tetap mampu menjaga deviasi frekuensi dalam batas yang wajar. Hal ini memperlihatkan bahwa kinerja sistem kelistrikan cukup stabil, serta pengaturan daya reaktif dan beban tidak memberikan gangguan yang berarti terhadap kestabilan frekuensi.

4.2 Perhitungan Alternator 90 kW → 440 VAC (3-Phase)

Alternator pada kapal tanker berfungsi sebagai penyedia utama energi listrik. Dalam penelitian ini digunakan alternator berkapasitas 90 kW dengan tegangan keluaran 440 V AC tiga fasa. Berdasarkan hasil perhitungan, arus nominal yang dihasilkan sekitar 148 A dengan faktor daya 0,8.

Nilai ini menunjukkan kemampuan alternator dalam menyuplai beban listrik kapal masih sangat memadai. Untuk menjamin keamanan operasional, sistem

distribusi dilengkapi dengan proteksi MCCB, ACB, dan relay proteksi yang berfungsi mencegah terjadinya overload maupun gangguan hubung singkat.

1) Diketahui / asumsi:

1. Daya aktif (P) = 90.000 W
2. Tegangan (V) = 440 V (line-to-line)
3. Faktor daya (pf) = 0,8
4. Sistem 3-fasa, f = 50 Hz

2) Langkah 1 — Hitung apparent power (S):

1. $S = P / \text{pf} = 90.000 / 0,8 = 112.500 \text{ VA} = 112,5 \text{ kVA}$

3) Langkah 2 — Hitung arus garis (I_line) — rumus tiga fasa:

$$I = P / (\sqrt{3} \times V \times \text{pf})$$

$$\sqrt{3} = 1,7320508075688772$$

$$\sqrt{3} \times V \times \text{pf} = 1,7320508075688772 \times 440 \times 0,8 = 610,0$$

$$I = 90.000 / 610,0 = 147,6179665541657 \text{ A} \approx 147,62 \text{ A}$$

4) Hasil:

2. Arus garis alternator $\approx 147,62 \text{ A}$
3. Apparent power S $\approx 112,5 \text{ kVA}$

4.3 Perhitungan Beban

4.3.1 Perhitungan Beban Lampu

Table 3 Perhitungan Beban Lampu

No	Fase	Daya (W)	Tegangan (V)	Arus per lamp (A)
1	R	100	220	0,455
2	S	100	220	0,455
3	R	100	220	0,455
4	S	100	220	0,455
5	R	100	220	0,455
6	S	100	220	0,455
7	R	100	220	0,455
8	S	100	220	0,455
9	R	100	220	0,455
10	S	100	220	0,455
11	R	100	220	0,455
12	S	100	220	0,455
13	R	100	220	0,455
14	S	100	220	0,455
15	R	100	220	0,455
16	S	100	220	0,455
17	R	100	220	0,455
18	S	100	220	0,455
19	R	100	220	0,455
20	S	100	220	0,455
21	R	100	220	0,455
22	S	100	220	0,455
23	R	100	220	0,455
24	S	100	220	0,455
25	R	100	220	0,455
26	S	100	220	0,455
27	R	100	220	0,455
28	S	100	220	0,455
29	R	100	220	0,455
30	S	100	220	0,455

a. Total Daya Aktif (P)

$$P = N \times \text{Plampu}$$

$$P = 30 \times 100\text{W} = 3000\text{W}$$

Jadi total beban aktif = 3000 W (3 kW).

3. Arus per Phase (I)

Untuk sistem 2 phase (anggap seperti pembagian beban ke 2 jalur dengan tegangan 220 V masing-masing):

$$I = P / V \times \text{jumlah fase}$$

$$I = 3000 / 220 \times 2$$

$$I = 3000 / 440 \approx 6,82A$$

Jadi arus tiap phase sekitar 6,82 A (dengan pembagian beban seimbang).

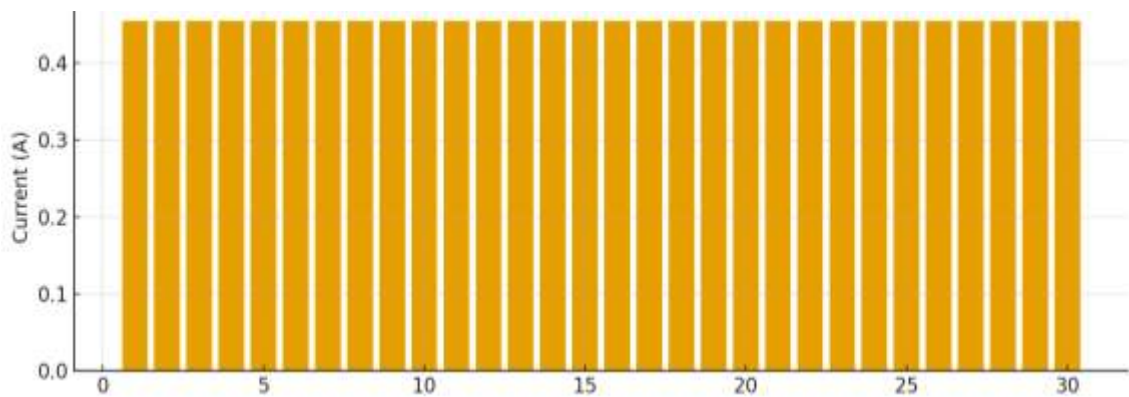
4. Jika Dihitung Per Phase Beban:

Total daya dibagi 2 phase:

$$P/\text{Phase} = 3000 / 2 = 1500 \text{ W}$$

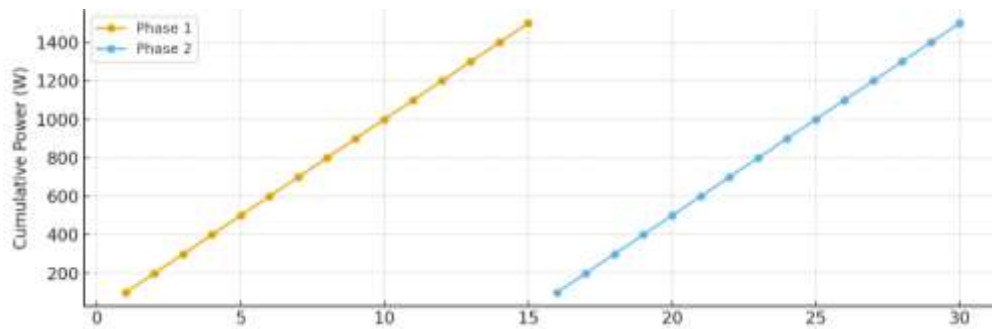
Arus per phase:

$$I / \text{Phase} = 1500 / 220 = 6,82 \text{ A}$$



Grafik 1.5 Per-Lamp Current

Grafik 1.5 menjelaskan grafik batang menunjukkan nilai arus listrik pada masing-masing lampu dengan daya 100Watt dan tegangan kerja 220 Volt. Dari grafik terlihat bahwa setiap lampu menyerap arus yang sama, yaitu sekitar 0,45 Ampere. Hal ini sesuai dengan perhitungan dasar $I = P/V$, di mana beban setiap lampu identik dan bersifat resistif. Grafik yang datar (nilai arus sama untuk semua lampu) menegaskan bahwa tidak ada perbedaan konsumsi arus antar lampu, sehingga distribusi beban antar lampu dapat dianggap seragam.



Grafik 1.6 Cumulative Power per Phase as Lamps are Added

Pada grafik 1.6 menjelaskan kenaikan daya kumulatif pada masing-masing fase seiring dengan penambahan jumlah lampu. Pada fase 1, daya meningkat secara linear mulai dari 100Watt pada lampu pertama hingga mencapai 1500Watt pada lampu ke-15. Setelah itu, fase 1 stabil di 1500Watt karena tidak ada penambahan lampu lagi. Sementara itu, fase 2 mulai naik dari lampu ke-16 dan terus bertambah hingga juga mencapai 1500Watt pada lampu ke-30. Pola ini menunjukkan bahwa distribusi beban antar dua fase seimbang, masing-masing menerima setengah dari total daya, sehingga menghasilkan pembagian arus per fase sebesar 6,82 Ampere.

Table 4 Parameter Beban Lampu

Parameter	Rumus	Hasil	Keterangan
Jumlah Lampu	-	30 unit	-
Daya per Lampu	-	100 W	Lampu 220 V
Total Daya Aktif (P)	$N \times \text{Plampu}N$	$30 \times 100 = 3000 \text{ W}$	Total daya terpasang
Jumlah Fase	-	2phase	Sistem distribusi beban
Daya per Phase	$P_{\text{total}}/2$	$3000/2 = 1500$	Beban per jalur
Tegangan per Phase (V)	-	220 V	Sesuai spesifikasi
Arus per Phase (I)	P_{phase}/V	$1500/220 \approx 6,82 \text{ A}$	Arus tiap fase
Faktor Daya (PF)	-	1 (asumsi lampu resistif)	Jika lampu ballast $PF < 1$
Daya Semu Total (S)	P/PF	$3000/1 = 3000 \text{ VA}$	Sama dengan daya aktif jika $PF=1$

Pada tabel 3 tersebut menjelaskan perhitungan beban listrik untuk kelompok lampu yang terdiri dari 30 unit dengan daya masing-masing 100 watt. Total daya aktif yang dihasilkan dari seluruh lampu adalah 3.000 watt, yang merupakan hasil perkalian jumlah lampu dengan daya per unit. Sistem distribusi menggunakan dua fase, sehingga beban dibagi rata per fase. Dengan demikian, setiap fase menanggung daya sebesar 1.500 watt. Tegangan kerja per fase adalah 220 volt sesuai dengan spesifikasi lampu. Dari pembagian daya dan tegangan tersebut, diperoleh arus per fase sekitar 6,82 ampere. Faktor daya diasumsikan 1 karena lampu dianggap bersifat resistif murni. Namun, jika menggunakan lampu dengan ballast, faktor daya biasanya lebih rendah dari 1. Perhitungan daya semu menunjukkan bahwa nilai daya semu sama dengan daya aktif, yaitu 3.000 VA, karena faktor daya yang digunakan adalah 1. Hal ini menegaskan bahwa konsumsi daya lampu efisien tanpa adanya komponen reaktif yang signifikan.

4.3.2 Perhitungan Beban Komputer

1) Total Daya Aktif (P)

$$P = N \times P_{\text{komputer}}$$

$$P = 8 \times 300 \text{ W} = 2400 \text{ W}$$

$$\text{Jadi total daya aktif} = 2400 \text{ W (2,4 kW)}$$

2) Beban per Phase

Karena sistem 2 phase dan diasumsikan pembagian beban seimbang:

$$P / \text{phase} = P_{\text{total}} / 2$$

$$P / \text{phase} = 2400 / 2 = 1200 \text{ W}$$

$$\text{Beban per phase} = 1200 \text{ W}$$

3) Faktor Daya (PF) < 1

Komputer biasanya punya PF sekitar 0,8 – 0,9 (karena power supply SMPS),

Jika PF = 0,85, maka:

$$S = P / \text{FP} = 2400 / 0,85 \approx 2823 \text{ VA}$$

$$I = S_{\text{phase}} / V = (2823 / 2) / 220 \approx 6,42 \text{ A}$$

4.3.3 Perhitungan Safety Device

1. Asumsi:

- Lampu 100 W, pf 0,90 (total 30 unit)
- Komputer 300 W, pf 0,95 (total 8 unit)
- Beban 1-phase dianggap dibagi seimbang ke tiga fasa

Rumus arus 3-fasa: $I = P / (\sqrt{3} \times V \times \text{pf})$

2. Hasil hitungan:

- Lampu total: $P = 3.000 \text{ W}$; $\sqrt{3} \times V \times \text{pf} = 1,73205 \times 440 \times 0,90 = 685,44 \rightarrow I \approx 3.000/685,44 = 4,374 \text{ A}$
- Komputer total: $P = 2.400 \text{ W}$; $\sqrt{3} \times V \times \text{pf} = 1,73205 \times 440 \times 0,95 = 724,92 \rightarrow I \approx 2.400/724,92 = 3,315 \text{ A}$
- Total AC: $5.400 \text{ W} \rightarrow I_{\text{total}} \approx 7,689 \text{ A}$ pada 440 V

4.4 Perhitungan Gulungan Trafo: 440↔220 VAC dan 440 VAC→24 V (AC→DC)

Table 5 Perhitungan Gulungan Trafo: 440↔220 VAC dan 440 VAC→24 V (AC→DC)

Kelompok beban	Unit	P total (W)	pf	I 440V (A)
Lampu	30×100 W	3.000	0,90	4,37
Komputer	8×300 W	2.400	0,95	3,31
Solenoid stop (24V DC)	1	48 (DC)	—	lihat catatan
Total beban AC	—	5.400	—	7,69

Tabel 4 tersebut menunjukkan distribusi beban listrik yang digunakan dalam sistem dengan tegangan 440 volt. Beban pertama adalah lampu dengan jumlah 30 unit masing-masing berdaya 100 watt, sehingga total daya mencapai 3.000 watt. Dengan faktor daya 0,90, arus yang ditarik dari sistem sebesar 4,37 ampere. Beban berikutnya adalah komputer sebanyak 8 unit, masing-masing 300 watt, menghasilkan total daya 2.400 watt. Karena faktor dayanya lebih baik yaitu 0,95, arus yang digunakan lebih kecil yakni 3,31 ampere pada tegangan 440 volt. Selain beban AC, terdapat juga satu unit solenoid stop yang bekerja pada tegangan 24 volt DC dengan kebutuhan daya 48 watt. Karena berbeda sistem tegangan, arusnya tidak dihitung pada kolom arus AC, tetapi

dicatat secara terpisah. Jika dihitung keseluruhan beban AC, total daya yang digunakan mencapai 5.400 watt dengan arus total sebesar 7,69 ampere. Data ini memperlihatkan bagaimana distribusi beban terbagi antara penerangan, peralatan elektronik, serta sistem kontrol.

4. Rumus dasar (turns per volt): $N/V = 1 / (4,44 f B_{\max} A_{\text{core}})$

Asumsi contoh core: $f=50 \text{ Hz}$; $B_{\max}=1,2 \text{ T}$; $A_{\text{core}}=0,001 \text{ m}^2 \rightarrow 4,44 \times 50 \times 1,2 \times 0,001 = 0,2662467 \rightarrow N/V \approx 3,7538 \text{ turn/volt}$.

1. $N(440 \text{ V}) \approx 440 \times 3,7538 \approx 1.651 \text{ turn}$

2. $N(220 \text{ V}) \approx 220 \times 3,7538 \approx 826 \text{ turn}$

3. $N(24 \text{ V}) \approx 24 \times 3,7538 \approx 90 \text{ turn}$

Rasio: $440:220 \approx 2:1$; $440:24 \approx 18,34:1$. Angka ini ilustratif; desain aktual wajib memakai data core pabrikan dan periksa I_{rated} , rugi-rugi, dan diameter kawat.

5. Arus pada rating $S=112,5 \text{ kVA}$ (3-fasa):

1. Di 220 V: $I \approx 112.500 / (1,73205 \times 220) = 295,3 \text{ A}$

2. Di 440 V: $I \approx 112.500 / (1,73205 \times 440) = 147,62 \text{ A}$ (konsisten dengan alternator)

Untuk 24 V DC kontrol (mis. solenoid 2 A): pakai trafo 24 VAC yang cukup ($\geq 72 \text{ VA}$ untuk margin), ditambah penyearah + regulator dan diode flyback untuk proteksi coil.

4.5 Distribusi Beban per-Fase (Seimbang)

Asumsi pembagian: lampu 30 unit $\rightarrow 10/10/10$; komputer 8 unit $\rightarrow 3/3/2$ (A/B/C). Hitung pf campuran per fase. Arus setiap fase $< 3 \text{ A} \rightarrow$ beban lampu+PC relatif kecil terhadap kapasitas generator.

Fase	Lampu	Beban lampu	Komputer	Beban komputer	Beban total	pf_mix	I_fase
A	10	1.000	3	900	1.900	0,9237	$\approx 2,697$
B	10	1.000	3	900	1.900	0,9237	$\approx 2,697$
C	10	1.000	2	600	1.600	0,9188	$\approx 2,286$

Table 6 Distribusi Beban per Fase

4.6 Beban Solenoid Stop & Respons Overspeed Trip

1. Solenoid stop: $24 \text{ V DC} \times 2 \text{ A} = 48 \text{ W}$ (beban kecil dibanding 90 kW).
2. Energi aktuasi (contoh): $E = P \times t$, $t \approx 0,5 \text{ s} \rightarrow E \approx 24 \text{ J}$.
3. Pastikan diode flyback pada coil, isolasi I/O GCU, dan fuse DC $\sim 3 \text{ A}$ (sesuai datasheet coil).
4. Perlu data pabrikan untuk analisis transien overspeed: inersia rotor (J), waktu trip, karakteristik governor.

4.7 Proteksi & Koordinasi (MCB/Fuse) dan Margin Keamanan

1. Breaker utama alternator: nominal 185–200 A; setelan long-time $\sim 1,1\text{--}1,25 \times I_n$; instantaneous untuk hubung singkat.
2. Feeder lampu/PC: 6–10 A per sirkuit sesuai pembagian beban.
3. Ampacity kabel: gunakan standar marine, faktor koreksi suhu/instalasi; evaluasi drop tegangan sesuai panjang.
4. Koordinasi selektivitas: gunakan TCC agar proteksi downstream trip lebih dulu daripada upstream.
5. Arus hubung singkat (PSCC): butuh impedansi% alternator/trafo dari nameplate.
6. Jika perlu 24 V DC signifikan, rancang catu 24 VDC dengan margin (rectifier/charger + baterai).

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan pada Bab IV, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Alternator dengan kapasitas 90 kW pada tegangan keluaran 440 V AC mampu menyuplai arus hingga ± 148 A, sehingga mencukupi kebutuhan beban listrik kapal tanker baik untuk penerangan, peralatan navigasi, maupun komputer DGU.
2. Pembebanan lampu (30 unit) dan komputer DGU (8 unit) menghasilkan total daya sebesar 10 kW atau hanya 11% dari kapasitas alternator. Hal ini menunjukkan masih terdapat cadangan daya yang cukup besar untuk kebutuhan tambahan.
3. Hasil simulasi variasi beban menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi generator tercapai pada kisaran 70–80% beban, dengan efisiensi $\pm 90\%$. Pada beban rendah (30%), efisiensi turun drastis hingga $\pm 75\%$ sehingga konsumsi bahan bakar per kWh menjadi lebih tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Operasional generator sebaiknya dijaga pada rentang beban 70–80% dari kapasitas untuk memperoleh efisiensi bahan bakar yang optimal dan memperpanjang umur mesin.
2. Perlu dilakukan manajemen distribusi daya agar pembebanan tidak terlalu rendah, misalnya dengan mengoperasikan beban tambahan atau sinkronisasi generator sesuai kebutuhan kapal.
3. Pemeriksaan dan pemeliharaan rutin pada transformator, sensor, GCU, serta solenoid stop sangat penting untuk menjamin sistem proteksi overspeed tetap bekerja dengan baik.
4. Disarankan penggunaan sistem monitoring digital berbasis sensor IoT atau PLC untuk memantau beban, tegangan, arus, serta efisiensi generator secara real-time.
5. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada analisis konsumsi bahan bakar aktual pada berbagai kondisi beban dan pengaruhnya terhadap emisi gas buang, sehingga mendukung efisiensi energi sekaligus keberlanjutan lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

- Alhaq, H., Apriaskar, E., & Djuniadi, D. (2023). Overspeed Detection Using Arduino Uno-based IR Infrared Sensor. *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 7(2), 189. <https://doi.org/10.22373/crc.v7i2.16409>
- Amanulloh, M. I., Anderson, M. S., Apriyana, A., & Rahayu, M. (2019). Kinerja Safety Device Pada Engine Caterpillar 3066. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 1279–1283.
- Baskov, V., Ignatov, A., & Polotnyanshikov, V. (2020). Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*, 50, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>
- Bi, Z. M., Luo, M., Miao, Z., Zhang, B., Zhang, W. J., & Wang, L. (2021). Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 67). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102022>
- Brauer, R. L. . (2023a). *Safety and health for engineers*. John Wiley & Sons, Inc.
- Brauer, R. L. . (2023b). *Safety and health for engineers*. John Wiley & Sons, Inc.
- Dedík, M., Štefancová, V., Gašparík, J., Lupták, V., & Vojtek, M. (2022). Traffic Capacity Assessment of the Selected Track Section on the Slovak Railways Network after the Implementation of ETCS L3 Based on Signaling Principle. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/app12115597>
- DWI RENALDI LUKAS. (2023a). *SKRIPSI STUDI ANALISA KERUSAKAN PUSH ROD AUXILIARY ENGINE GENERATOR DI KAPAL CS LIMIN VENTURE*.
- DWI RENALDI LUKAS. (2023b). *SKRIPSI STUDI ANALISA KERUSAKAN PUSH ROD AUXILIARY ENGINE GENERATOR DI KAPAL CS LIMIN VENTURE*.
- Faris Abid Abiyyu, M., Kurniawan, D., Nurmala, E., Muda, I., Pelayaran Malahayati, P., & Tinggi Ilmu Pelayaran, S. (2024). Kegagalan Sistem Kerja Start-Stop Emergency Generator di Kapal AHTS Logindo Sturdy Failure of the Emergency Generator Start-Stop Working System on the AHTS Logindo Sturdy Ship. In *Journal homepage Jurnal Multidisiplin Riset Ilmiah* (Vol. 1, Issue 2).
- Festor, P., Jia, Y., Gordon, A. C., Aldo Faisal, A., Habli, I., & Komorowski, M. (2022). Assuring the safety of AI-based clinical decision support systems: A case study of the AI Clinician for sepsis treatment. *BMJ Health and Care Informatics*, 29(1). <https://doi.org/10.1136/bmjhci-2022-100549>

- Halim, A., Taufik, M., & Saputra, A. (2021). PEMBUATAN SAFETY DEVICE COOLING DOWN AUTOMATIC PADA UNIT HEAVY EQUIPMENT DOZER D3K CATERPILLAR BERBASIS MICROCONTROLLER. In *JANUARI* (Vol. 20, Issue 1).
- IRIYANSYAH, M. T., & FAISAL IRSAN PASARIBU, ST. M. (n.d.). *PERANCANGAN ALAT PENDETEKSI WARNA BOTOL MENGGUNAKAN SENSOR TCS 3200 BERBASIS ARDUINO*. <https://www.scribd.com/document/447928036/Perancangan-Alat-Pendeteksi-Warna-Botol-Menggunakan-Sensor-TCS-3200-Berbasis-Arduino>
- Khamdilah, A., & Kundori, K. (2020a). Analisis Manajemen Perawatan Actuator Sebagai Safety Device Dalam Memproteksi Terjadinya Overspeed Pada Mesin Penggerak Utama Kapal. *Dinamika Bahari*, 1(2), 90–97. <https://doi.org/10.46484/db.v1i2.211>
- Khamdilah, A., & Kundori, K. (2020b). Analisis Manajemen Perawatan Actuator Sebagai Safety Device Dalam Memproteksi Terjadinya Overspeed Pada Mesin Penggerak Utama Kapal. *Dinamika Bahari*, 1(2), 90–97. <https://doi.org/10.46484/db.v1i2.211>
- Mashartanto, A. A., Roselia, F., & Kristian, A. D. (2023). Analisis Sistem Perawatan Safety Equipment Terhadap Keselamatan Crew Kapal Mt. Gas Natuna. *Al Qalam: Jurnal Ilmiah Keagamaan Dan Kemasyarakatan*, 17(1), 78. <https://doi.org/10.35931/aq.v17i1.1785>
- Nugraha, I. M. A., Luthfiani, F., & We, J. (2023a). Optimalisasi pembebanan dan konsumsi bahan bakar pada generator di kapal motor Sena Express. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 3(3), 213–220. <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i3.2023.213-220>
- Nugraha, I. M. A., Luthfiani, F., & We, J. (2023b). Optimalisasi pembebanan dan konsumsi bahan bakar pada generator di kapal motor Sena Express. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 3(3), 213–220. <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i3.2023.213-220>
- Pasaribu, F. I., Sarabi, A., Evalina, N., Rohana, R., & Hutasuhut, A. A. (2025). Comparison of IoT Usage using the_PZEM-004T Sensor with the Power-Meter Panel on the ATS-AMF Panel Control System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2989(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2989/1/012004>
- Qi, J., Zhang, J., & Meng, Q. (2021). Auxiliary equipment detection in marine engine rooms based on deep learning model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/jmse9091006>
- Raeiszadeh, M., & Adeli, B. (2020). A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. In *ACS Photonics* (Vol. 7, Issue 11, pp. 2941–2951). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.0c01245>

- Ridwan, M., Zakiah, D., & Ardiansyah. (2020a). Analisa Penurunan Daya yang Dihasilkan Mesin Bantu Guna Meningkatkan Operasional Kapal di MT. Dewi Maeswara. *Prosiding Seminar Pelayaran Dan Teknologi Terapan*, 2(1), 166–173. <https://doi.org/10.36101/pcsa.v2i1.138>
- Ridwan, M., Zakiah, D., & Ardiansyah. (2020b). Analisa Penurunan Daya yang Dihasilkan Mesin Bantu Guna Meningkatkan Operasional Kapal di MT. Dewi Maeswara. *Prosiding Seminar Pelayaran Dan Teknologi Terapan*, 2(1), 166–173. <https://doi.org/10.36101/pcsa.v2i1.138>
- Sahri, Y., Tamalouzt, S., Lalouni Belaid, S., Bajaj, M., Belkhier, Y., Singh, A. R., El-Naggar, M. F., & Kamel, S. (2023). Effectiveness analysis of twelve sectors of DTC based on a newly modified switching table implemented on a wind turbine DFIG system under variable wind velocity. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102221>
- Saihilmi, M. I., Zaman, M. B., Santoso, A., & Kusuma, I. R. (2021). Developing of Emergency Safety Device Module under Vessel Integrated Automation System for Dual Fuel Diesel Engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 698(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/698/1/012013>
- Smith, H., & Fotheringham, K. (2022). Exploring remedies for defective artificial intelligence aids in clinical decision-making in post-Brexit England and Wales. *Medical Law International*, 22(1), 33–51. <https://doi.org/10.1177/09685332221076124>
- Stefańczyk, P., Nowosielecka, D., Polewczyk, A., Tułeczki, Ł., Tomków, K., Jacheć, W., Lewicka, E., Tomaszewski, A., & Kutarski, A. (2022a). Safety and Effectiveness of Transvenous Lead Extraction in Patients with Infected Cardiac Resynchronization Therapy Devices; Is It More Risky than Extraction of Other Systems? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph19105803>
- Stefańczyk, P., Nowosielecka, D., Polewczyk, A., Tułeczki, Ł., Tomków, K., Jacheć, W., Lewicka, E., Tomaszewski, A., & Kutarski, A. (2022b). Safety and Effectiveness of Transvenous Lead Extraction in Patients with Infected Cardiac Resynchronization Therapy Devices; Is It More Risky than Extraction of Other Systems? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph19105803>
- Tak, S., & Choi, S. (2022). Safety Monitoring System of CAVs Considering the Trade-Off between Sampling Interval and Data Reliability. *Sensors*, 22(10). <https://doi.org/10.3390/s22103611>
- Tarnapowicz, D., & Matuszak, Z. (2020). *IMPACT OF THE SHIP GENERATING SETS' POWER FACTOR ON THE DETERMINATION OF THE LOAD FACTOR IN AUXILIARY ENGINE*.

Tri Novian Nrp, A., & Hari Prastowo, I. (n.d.). *SYSTEM INFORMATION AUXILIARY ENGINE HND MWM TBD 234 V8 USED VISUAL BASIC FOR SHIP KM. MERATUS BENOA*.

Vinaya, A. A. (n.d.). *ANALISA PERFORMANSI SAFETY INSTRUMENT SYSTEM (SIS) PADA HRSG PLTGU DI PT. PJB UP GRESIK*. 8(1).

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI PENULIS

Nama : Farhan Afidal
NPM : 2107220060
Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 04 Oktober 2002
Jenis Kelamin : Laki-laki
Alamat : Jln. Rahmadsyah Gg. Sekata No.11B, Kec. Medan Area, Medan Kota, Sumatera Utara
Agama : Islam
Pekerjaan : Mahasiswa
No. Telp : 087820419495
Email : afidalf@gmail.com

DATA DIRI ORANG TUA

Nama Ayah : Irfan
Agama : Islam
Nama Ibu : Sri Rahmasari
Agama : Islam
Alamat : Jln. Rahmadsyah Gg. Sekata No.11B, Kec. Medan Area, Medan Kota, Sumatera Utara

RIWAYAT PENDIDIKAN

2008-2014 : SDN 060811
2014-2017 : SMP Al-Washliyah 01 Medan
2017-2020 : SMK PANCA BUDI 01 Medan
2021-2025 : S1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU)