

TUGAS AKHIR

ANALISIS KEGAGALAN DAN STRATEGI PENCEGAHAN KERETAKAN *CRANKSHAFT DIESEL GENERATOR* *AUXILIARY ENGINE* KAPAL

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

MUHAMMAD WIRA ATMAJA
2107230046



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

Proposal penelitian Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Muhammad Wira Atmaja
NPM : 2107230046
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir : Analisa kegagalan dan strategi pencegahan keretakan
crankshaft diesel generator auxiliary engine kapal
Bidang ilmu : Konstruksi Manufaktur

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, 7 April 2026

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Penguji I



Ahmad Marabdi Siregar, S.T., M.T

Dosen Peguji II



Arya Rudi Nst, S.T., M.T

Dosen Penguji III



Chandra A Siregar, S.T., M.T

Ketua Program Studi Teknik Mesin



Chandra A Siregar, S.T., M.T

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertandatangan dibawah ini:

Nama Lengkap : Muhammad Wira Atmaja
NPM : 2107230046
Tempat/Tanggal Lahir : Medan, 16 April 2004
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

“ANALISIS KEGAGALAN DAN STRATEGI PENCEGAHAN KERETAKAN *CRANKSHAFT DIESEL GENERATOR AUXILIARY ENGINE* KAPAL”

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 hakikatnya bukan merupakan karya tulis tugas akhir saya secara orisinal 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 saya buat dengan kesadaran diri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 7 April 2026



Muhammad Wira Atmaja

ABSTRAK

Crankshaft merupakan komponen kritikal pada mesin *diesel* yang berfungsi mengubah gerak translasi *piston* menjadi gerak rotasi untuk menghasilkan tenaga mekanik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor penyebab kegagalan berupa keretakan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal serta merumuskan strategi pencegahannya. Metode penelitian yang digunakan meliputi pemeriksaan *visual*, pengukuran dimensi *crankpin* menggunakan mikrometer, pengecekan *clearance*, serta pengujian *non-destruktif* berupa *Magnetic Particle Inspection (MPI)* untuk mendeteksi retak mikro pada permukaan *material*. Berdasarkan hasil penelitian di PT. Waruna Shipyard Indonesia, ditemukan bahwa *crankpin* pada silinder nomor 1 dan 2 mengalami pengurangan *diameter* (aus) hingga mencapai *undersize* 2.00 mm, di mana nilai *clearance* telah melebihi batas standar yang diizinkan. Hasil uji *MPI* mengonfirmasi adanya indikasi keretakan pada bagian *journal* silinder tersebut. Faktor utama penyebab keretakan diidentifikasi berasal dari kelelahan *material* (*fatigue*) akibat beban siklik yang berlebihan, pelumasan yang tidak sempurna, beban kerja mesin yang melebihi kapasitas *nominal* (*overload*), serta kurangnya kedisiplinan dalam jadwal perawatan rutin. Strategi pencegahan yang direkomendasikan meliputi pelaksanaan inspeksi berkala dengan metode *NDT*, pemantauan sistem pelumasan secara ketat, serta penggantian komponen *bearing* dan *crankshaft* yang telah melewati batas toleransi teknis untuk menjamin keselamatan operasional kapal.

Kata Kunci: *Crankshaft*, Keretakan, *Diesel Generator*, *Magnetic Particle Inspection (MPI)*, Analisis Kegagalan.

ABSTRACT

The crankshaft is a critical component in a diesel engine, converting the piston's translational motion into rotational motion to generate mechanical power. This study aims to analyze the factors causing failure in the form of cracks in the crankshaft of a ship's diesel generator auxiliary engine and to formulate preventive strategies. The research methods used included visual inspection, crankpin dimension measurements using a micrometer, clearance checks, and non-destructive testing using Magnetic Particle Inspection (MPI) to detect microcracks on the material's surface. Research at PT. Waruna Shipyard Indonesia found that the crankpins in cylinders 1 and 2 experienced a reduction in diameter (wear) to an undersize of 2.00 mm, where the clearance value exceeded the standard limit. The MPI test results confirmed the presence of cracks in the cylinder journal. The main causes identified were material fatigue due to excessive cyclic loads, inadequate lubrication, engine workloads exceeding rated capacity (overload), and a lack of discipline in routine maintenance schedules. Recommended prevention strategies include conducting periodic inspections using NDT methods, closely monitoring the lubrication system, and locating bearing and crankshaft components that have exceeded technical tolerances to ensure the ship's operational safety.

Keywords: Crankshaft, Cracks, Diesel Generator, Magnetic Particle Inspection (MPI), Failure Analysis.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang segala puji dan Syukur penulis mengucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan penelitian ini dengan judul “Analisa kegagalan dan keretakan *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal”.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Chandra A Siregar, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing sekaligus selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ahmad Marabdi Siregar, S.T., M.T. selaku Sekretaris Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Ir. Ade Faisal, S.T, M.Sc, Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Dr. Khairul Umurani, S.T, M.T selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Affandi, S.T., M.T selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Kedua orang tua tercinta penulis yaitu Ayahanda Simin dan Ibunda Ernawati yang telah mengasuh, mendidik, serta senantiasa memberikan

kasih sayang, *do'a* yang tulus dan dukungan moril maupun materil sehingga penulis dapat menyelesaikan studi di Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

7. Khairuddin Hanafi S.T dan Muhammad Akbar S.T yang telah memberikan saran, bantuan dan dukungan kepada penulis.
8. Rekan – rekan seperjuangan Raja Imanullah, Mhd Nur Saragih, M Abdul Azis, Jainal Rosidi, Liyum Dzira Damanik, Muhammad Ibnu Sina, Dimas Ardian.
9. Rekan – rekan seperjuangan kelas A1 Pagi Stambuk 2021, serta rekan – rekan bidang keahlian konstruksi manufaktur yang telah banyak memberi saran dan dukungan kepada penulis.

Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis dengan senang hati dan penuh lapang dada menerima kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu keteknik-mesinan.

Medan, 7 April 2026



Muhammad Wira Atmaja

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang lingkup	2
1.4 Tujuan penelitian	2
1.5 Manfaat penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Mesin <i>Diesel</i>	3
2.1.1 Prinsip Kerja Mesin <i>Diesel</i>	7
2.1.2 Komponen Utama Mesin Bantu Kapal	10
2.2 Sistem <i>Crankshaft</i>	18
2.2.1 Bagian Bagian <i>Crankshaft</i>	22
2.2.2 Peran Utama dan Fungsi <i>Crankshaft</i>	23
2.2.3 Jenis Jenis Kerusakan atau Kegagalan pada <i>Crankshaft</i>	23
2.3 Penyebab Terjadinya Keretakan <i>Crankshaft</i>	25
2.3.1 Kelelahan <i>material (fatigue)</i>	25
2.3.2 Konsentrasi Tegangan pada <i>Area Kritis</i>	26
2.3.3 Kegagalan <i>bearing</i> dan masalah <i>tribology</i>	27
2.3.4 <i>Misalignment</i> dan Deformasi <i>Crankshaft</i>	30
2.3.5 Getaran <i>Torsional</i>	31
2.3.6 Beban Berlebihan (<i>overload</i>)	32
2.4 Perawatan dan Pemeliharaan Mesin <i>Diesel</i>	33
2.5 Perawatan Pencegahan Kerusakan <i>Crankshaft</i>	37
BAB 3 METODE PENELITIAN	40
3.1 Tempat dan Waktu	40

3.1.1	Tempat Penelitian	40
3.1.2	Waktu Penelitian	40
3.2	Bahan dan Alat	40
3.2.1	Alat Penelitian	40
3.2.2	Bahan Penelitian	44
3.3	Bagan Alir Penelitian	44
3.4	Rancangan Alat Penelitian	46
3.5	Prosedur Penelitian	47
3.6	Langkah-Langkah Pengujian <i>Magnetic Particle Inspection (MPI)</i>	48
3.7	Variabel	49
3.8	Pengumpulan Data	49
3.9	Pengolahan Data	49
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1	Hasil Penelitian	50
4.1.1	Melakukan pengukuran pada <i>crankpin</i>	50
4.1.2	Melakukan <i>clearance crankpin</i>	53
4.1.3	Uji <i>Magnetic Particle Inspection (MPI)</i>	56
4.2	Pembahasan Hasil Penelitian	58
4.2.1	Analisis penyebab keretakan <i>crankshaft</i>	58
4.3	Faktor Penyebab Keretakan Pada <i>Crankshaft</i>	59
4.4	Rekomendasi Perawatan Untuk Mencegah Keretakan Pada <i>Crankshaft</i>	59
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	61
	DAFTAR PUSTAKA	62
	Lampiran 1. Lembar Asistensi Tugas Akhir	
	Lampiran 2. SK Pembimbing	
	Lampiran 3. Berita Acara Seminar Hasi Penelitian	
	Lampiran 4. Daftar Riwayat Hidup	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Waktu kegiatan penelitian	40
Tabel 4.1 <i>Data</i> pengukuran <i>diameter crankpin</i> (PT. <i>Waruna Shipyard</i> Indonesia)	50
Tabel 4.2 <i>Data</i> pengukuran <i>clearance crankpin</i> (PT. <i>Waruna Shipyard</i> Indonesia)	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mesin diesel (Handoyono 2014)	7
Gambar 2.2 Disel 4 tak (Handoyo, 2014)	8
Gambar 2.3 Disel 2 tak (Handoyo, 2014)	10
Gambar 2.4 <i>Engine Blok</i> (Arik H. 09 : 2014)	11
Gambar 2.5 <i>Cylinder head</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	11
Gambar 2.6 <i>Cylinder liner</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	12
Gambar 2.7 <i>Valve</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	13
Gambar 2.8 <i>Rocker arm</i>	13
Gambar 2.9 <i>Camshaft</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	14
Gambar 2.10 <i>Piston</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	14
Gambar 2.11 <i>Ring piston</i> (PT. Waruna shipyard Indonesia)	15
Gambar 2.12 <i>Connecting rod</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	16
Gambar 2.13 <i>Crankshaft</i> (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	16
Gambar 2.14 Roda gila (<i>flywheel</i>)	17
Gambar 2.15 <i>Journal bearing</i>	17
Gambar 2.16 Bagain bagian dari <i>crankshaft</i>	22
Gambar 3.1 Mikrometer	41
Gambar 3.2 <i>Crankshaft</i>	41
Gambar 3.3 <i>Magnaflux spotcheck SKC-S</i>	41
Gambar 3.4 <i>Magnaflux magnavis WCP-2</i>	42
Gambar 3.5 <i>Magnaflux magnavis 7HF</i>	42
Gambar 3.6 Lampu led	43
Gambar 3.7 Kain majun	43
Gambar 3.8 <i>Yoke magnetic</i>	44
Gambar 3.9 Bagan alir penelitian	45
Gambar 3.10 Rancangan pengujian Defletion <i>Crankshaft</i>	46
Gambar 3.11 Uji <i>magnetic particle inspection (MPI)</i> dan kondisi keretakan <i>crankshaft</i> dudukan <i>crank pin bearing</i>	46
Gambar 3.12 Uji <i>magnetic particle inspection</i>	47
Gambar 4. 1 Grafik hasil pengukuran diameter crankpin pada cylinder no. 1	50
Gambar 4. 2 Grafik hasil pengukuran diameter crankpin pada cylinder no. 2	51
Gambar 4. 3 Grafik hasil pengukuran diameter crankpin pada cylinder no. 3	51
Gambar 4. 4 Grafik hasil pengukuran diameter crankpin pada cylinder no. 4	52
Gambar 4. 5 Grafik hasil pengukuran diameter crankpin pada cylinder no. 5	52
Gambar 4. 6 Grafik hasil pengukuran diameter crankpin pada cylinder no. 6	52
Gambar 4. 7 Grafik hasil pengukuran clearance crankpin pada cylinder no. 1	54
Gambar 4. 8 Grafik hasil pengukuran clearance crankpin pada cylinder no. 2	54
Gambar 4. 9 Grafik hasil pengukuran clearance crankpin pada cylinder no. 3	55
Gambar 4. 10 Grafik hasil pengukuran clearance crankpin pada cylinder no. 4	55
Gambar 4. 11 Grafik hasil pengukuran clearance crankpin pada cylinder no. 5	56
Gambar 4. 12 Grafik hasil pengukuran clearance crankpin pada cylinder no. 6	56
Gambar 4.13 Hasil uji magnetic particle inspection (MPI) pada crankpin cylinder nomor 1 (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	57
Gambar 4.14 Hasil uji magnetic particle inspection (MPI) pada crankpin cylinder nomor 2 (PT. Waruna Shipyad Indonesia)	57

DAFTAR NOTASI

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum, terdapat dua kategori mesin yang berperan dalam mendukung fungsional kapal, yakni mesin induk (*main engine*) dan mesin bantu (*auxiliary engine*). *Auxiliary engine* dengan kata lain *diesel generator* digunakan untuk menghasilkan energi listrik serta menunjang operasional sebuah kapal. Daya listrik ini akan mengisi berbagai sistem seperti lampu, peralatan navigasi dan sistem elektronik lainnya. (Malyuditius Zai Ali Muktar Sitompul et al., 2025).

Crankshaft/poros engkol merupakan komponen utama dalam suatu mesin pembakaran dalam. *Crankshaft* menjadi pusat poros setiap Gerakan *piston*. Umumnya *crankshaft* berbahan besi cor karena harus mampu menahan momen inersia yang dihasilkan dari Gerakan naik turun *piston*. Sehingga fungsi utama adalah mengubah Gerakan naik turun (*translasi*) yang dihasilkan oleh *piston* menjadi Gerakan memutar (*rotasi*) yang nantinya akan diteruskan ke transmisi. *Crankshaft* harus terbuat dari bahan yang kuat dan mampu menahan beban atau momen yang kuat karena *crankshaft* harus menerima getaran dan putaran mesin yang tinggi

Posisi *crankshaft* berada antara blok mesin bagian bawah dengan *oilpan*, *Crankshaft* menjadi pusat dari putaran mesin. Putaran *crankshaft* bisa diteruskan lagi tak hanya ke transmisi namun juga ke *camshaft* lewat *timing belt* atau *timing gear* atau *timing chain* karena memiliki putaran *timing* yang serupa dengan pembukaan *valve*.

Ketika mesin *diesel* beroperasi pada kapasitas yang melebihi batas dari yang direkomendasikan dalam jangka waktu yang panjang, tegangan mekanis yang bekerja pada *crankshaft* meningkat secara signifikan, menyebabkan *material* mengalami deformasi plastis dan kelelahan logam (*metal fatigue*). Seiring berjalan waktu, *stress* pada *metal* yang terjadi berulang-ulang ini menciptakan *micro cracks* pada *area* kirits *crankshaft*. Kondisi ini semakin diperparah oleh getaran yang berlebih, ketidakseimbangan beban silinder, dan minimnya waktu perawatan dan inspeksi berkala. Jika tidak dideteksi dini melalui pemeriksaan berkala, *micro*

cracks ini akan berkembang menjadi *crack* yang lebih besar, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kerusakan total *crankshaft*, kegagalan mesin mendadak, dan potensi bahaya serius bagi keselamatan kapal dan kru di laut.

Dengan itu diperlukan ketelitian dan kemahiran dari para Masinisnya dalam melaksanakan perawatan perbaikan maupun dalam menganalisis faktor-faktor penyebab terjadinya keretakan, agar tidak terulang kembali keretakan sehingga mesin selalu dalam kondisi prima/baik.

Dan dengan alasan tersebut maka penulis terdorong untuk membuat kertas tugas akhir atau skripsi ini dengan judul sebagai berikut "Analisis Kegagalan dan Strategi Pencegahan Keretakan *Crankshaft Diesel Generator Auxiliary Engine* Kapal"

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Apa saja masalah utama yang menyebabkan keretakan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal?
2. Strategi pencegahan apa yang paling efektif untuk mengurangi resiko keretakan *crankshaft* di masa depan?

1.3 Ruang lingkup

Penelitian ini akan berfokus pada analisis kegagalan dan strategi pencegahan keretakan *crankshaft* pada mesin *diesel generator auxiliary* yang digunakan kapal.

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengidentifikasi faktor-faktor penyebab terjadinya keretakan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal
2. Merekomendasikan perawatan untuk pencegahan dari keretakan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal

1.5 Manfaat penelitian

1. Manfaat terhadap diri sendiri : Menambah pengetahuan dibidang Teknik mesin dan ilmu *material*, khususnya mengenai analisis kegagalan komponen kritis pada mesin kapal.
2. Manfaat terhadap orang lain : Memberikan masukan kepada pengguna *diesel generator* untuk mencegah keretakan *crankshaft*

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin *Diesel*

Mesin *diesel* beroperasi berdasarkan siklus empat langkah (empat-tak) yang ditemukan oleh Rudolf *Diesel* pada tahun 1892. Mesin *diesel* merupakan salah satu mesin pembakaran dalam dimana menghasilkan suatu energi gerak dan energi panas dan merupakan mesin yang paling banyak digunakan sebagai sumber mekanis di atas kapal, dimana Mesin *diesel* memanfaatkan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai tenaga penggerak untuk memutar baling baling kapal, sehingga kapal akan bergerak dari suatu tempat ketempat lain dengan adanya tenaga dorong dari baling baling yang berputar (FREDI, 2021).

Tidak seperti mesin bensin yang menggunakan busi, mesin ini mengandalkan panas ekstrem dari kompresi udara untuk menyulut bahan bakar. Pada langkah pertama, udara bersih dihisap ke dalam silinder. Kemudian, pada langkah kedua, udara tersebut dikompresi secara drastis, meningkatkan suhu hingga mencapai lebih dari 540°C. Tepat sebelum *piston* mencapai titik tertinggi, bahan bakar *diesel* disemprotkan ke ruang bakar, di mana suhu tinggi ini langsung menyulutnya secara spontan. Pembakaran yang terjadi mendorong *piston* ke bawah, menghasilkan tenaga yang menggerakkan mesin.

Sebuah mesin dengan pemicu kompresi yang tinggi dimana bahan bakar dinyalakan oleh suhu tinggi gas yang dikompresi, Mesin *diesel* sering digunakan oleh sarana angkutan yaitu salah satunya digunakan pada kapal yang mempunyai kapasitas mesin besar dan tenaga yang besar. Hal tersebut dikarenakan mesin *diesel* cocok digunakan jarak jauh atau lebih tahan panas dibanding mesin jenis lain (Yudisworo & Prihastuty, 2018).

Pada kapal, mesin *diesel* tersedia dalam berbagai ukuran dan jenis, mulai dari mesin *diesel auxiliar* (mesin tambahan) dengan daya kecil hingga mesin *diesel* utama dengan daya mencapai puluhan ribu *horsepower*. Mesin *diesel* kapal umumnya dikategorikan menjadi tiga tipe utama berdasarkan kecepatan putaran: mesin kecepatan tinggi (*High Speed Diesel Engine*) dengan RPM 900-1500, mesin

kecepatan menengah (*Medium Speed Diesel Engine*) dengan RPM 300-900, dan mesin kecepatan rendah (*Low Speed Diesel Engine*) dengan RPM di bawah 300. Setiap tipe memiliki keunggulan tersendiri; mesin kecepatan tinggi lebih kompak dan cocok untuk kapal kecil, mesin kecepatan menengah seimbang dalam hal efisiensi dan ukuran, sedangkan mesin kecepatan rendah memiliki efisiensi bahan bakar tertinggi dan sangat ideal untuk kapal kargo besar yang membutuhkan operasi jarak jauh. Konstruksi mesin *diesel* kapal dirancang dengan presisi tinggi untuk menahan kondisi kerja ekstrem dan pengoperasian berkelanjutan. Blok silinder dibuat dari besi cor berkualitas tinggi dengan dinding tebal untuk menahan tekanan pembakaran yang mencapai lebih dari 100 bar. *Piston* bergerak bolak-balik di dalam silinder, terhubung dengan *connecting rod* yang meneruskan gerakan linier menjadi gerakan rotasi pada poros engkol (*crankshaft*). Sistem katup intake dan exhaust diatur dengan presisi menggunakan cam *shaft* yang digerakkan oleh poros engkol, memastikan timing sempurna untuk pembukaan dan penutupan katup pada setiap siklus mesin. Sistem injeksi bahan bakar pada kapal modern menggunakan injector berteknologi tinggi yang dapat menyuntikkan *diesel* dengan presisi mikron, memastikan pembakaran sempurna dan emisi rendah.

Siklus operasi mesin *diesel* terdiri dari empat langkah penting: langkah intake di mana katup masuk membuka dan udara segar tersedot ke dalam silinder saat *piston* bergerak turun, langkah kompresi di mana kedua katup tertutup dan udara dikompres hingga tekanan dan suhu tinggi saat *piston* bergerak naik, langkah tenaga di mana bahan bakar disuntikkan dan terbakar menciptakan ledakan yang mendorong *piston* turun dengan kuat menghasilkan tenaga, dan langkah buang di mana katup buang terbuka dan gas sisa hasil pembakaran dikeluarkan saat *piston* bergerak naik. Setiap siklus ini terjadi berulang kali per detik pada mesin kecepatan tinggi, sementara pada mesin kecepatan rendah lebih lambat namun dengan tenaga lebih besar per langkah. Sistem pendingin pada mesin *diesel* kapal sangat krusial karena pembakaran menghasilkan panas luar biasa besar. Umumnya menggunakan sistem pendingin air tertutup dengan pompa sirkulasi yang mengalirkan air pendingin melalui water jacket di sekitar silinder, kepala silinder, dan komponen lain yang perlu didinginkan. Air pendingin kemudian dialirkan ke *heat exchanger* yang membuang panas ke laut atau didinginkan melalui sistem *fresh water cooling*

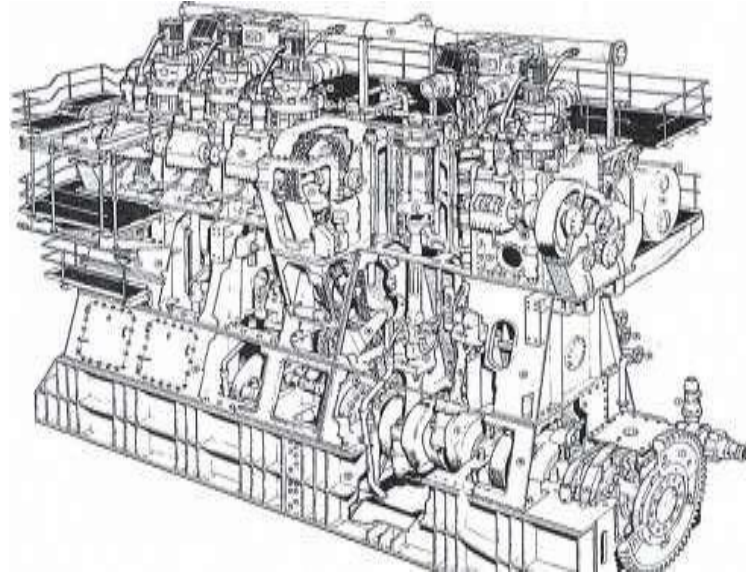
yang lebih canggih pada kapal modern. Sistem pelumasan sama pentingnya, menggunakan minyak lumas berkualitas tinggi yang disirkulasikan melalui pompa ke semua permukaan gesek mesin termasuk *bearing crankshaft*, *piston rings*, dan cam *shaft*, mencegah keausan dan memastikan mesin beroperasi dengan lancar.

Sistem pembakaran mesin *diesel* kapal dilengkapi dengan *turbocharger* yang meningkatkan efisiensi mesin secara signifikan. *Turbocharger* menggunakan energi dari gas buang yang keluar dari mesin untuk memutar turbine, yang kemudian memutar compressor yang mengalirkan udara dengan tekanan tinggi ke dalam silinder. Hal ini memungkinkan lebih banyak udara masuk ke silinder dalam waktu yang sama, sehingga lebih banyak bahan bakar dapat disuntikkan dan menghasilkan tenaga lebih besar tanpa perlu memperbesar ukuran mesin. Efisiensi bahan bakar dapat ditingkatkan hingga 30-40% dengan penggunaan *turbocharger* dibanding mesin tanpa turbo.

Keunggulan mesin *diesel* pada kapal sangat jelas dan menjadi alasan dominasinya di industri maritim. Pertama, efisiensi bahan bakar sangat tinggi, mencapai konsumsi spesifik serendah 170-180 gram per kilowatt-jam pada mesin modern, jauh lebih baik dibanding mesin bensin. Kedua, torsi awal tinggi memungkinkan kapal untuk mulai bergerak dengan mudah bahkan dari kecepatan rendah tanpa memerlukan transmisi kompleks. Ketiga, daya tahan *engine* sangat lama dengan umur teknis bisa mencapai 20-30 tahun atau lebih jika dirawat dengan baik. Keempat, biaya operasional relatif rendah karena bahan bakar *diesel* lebih murah dibanding bahan bakar premium dan perawatan lebih sederhana. Kelima, keandalan tinggi dengan tingkat kerusakan rendah saat dioperasikan sesuai prosedur yang benar.

Namun demikian, mesin *diesel* kapal juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Emisi gas buang mengandung nitrogen oxide (NO_x), sulfur oxide (SO_x), dan partikel debu yang berkontribusi pada polusi udara dan perubahan iklim, meskipun regulasi internasional seperti MARPOL Annex VI terus memperketat standar emisi. Tingkat kebisingan dan vibrasi mesin *diesel* cukup tinggi sehingga memerlukan sistem isolasi dan peredam khusus. Biaya awal pembelian mesin *diesel* lebih mahal dibanding mesin jenis lain. Pemeliharaan memerlukan tenaga ahli yang terlatih karena sistem mesin cukup kompleks dengan

banyak komponen presisi. Sistem kontrol mesin *diesel* modern dilengkapi dengan teknologi elektronik canggih untuk optimalisasi operasi. Control systems menggunakan *sensor* untuk memantau berbagai *parameter* seperti tekanan oli, temperatur air pendingin, kecepatan putaran mesin, dan konsumsi bahan bakar, kemudian secara otomatis melakukan penyesuaian untuk performa optimal. Pada kapal dengan sistem *Full Authority Digital Engine Control (FADEC)*, mesin dapat beroperasi secara semi-otomatis dengan navigasi otomatis, mengurangi beban kerja *crew* dan meningkatkan efisiensi operasional. Banyak kapal modern juga dilengkapi dengan sistem *remote monitoring* yang memungkinkan engineer kapal memantau kondisi mesin dari ruang mesin atau bahkan dari pihak yang bertanggung jawab di kantor pusat melalui koneksi satelit. Perawatan dan pemeliharaan mesin *diesel* kapal memerlukan jadwal teratur dan disiplin tinggi. Pemeriksaan harian mencakup pengecekan level minyak lumas, temperatur air pendingin, tekanan oli mesin, dan inspeksi *visual* untuk kebocoran. Perawatan berkala meliputi penggantian filter minyak, filter udara, dan filter bahan bakar sesuai jam kerja mesin. *Overhaul* besar dilakukan setiap beberapa tahun atau setelah mesin mencapai jam kerja tertentu, yang melibatkan pembongkaran mesin untuk inspeksi mendalam, penggantian komponen aus, dan pemulihan presisi. Crew kapal harus memiliki sertifikasi dan pelatihan khusus untuk mengoperasikan dan merawat mesin *diesel* sesuai standar internasional. Perkembangan teknologi mesin *diesel* kapal terus berlanjut untuk memenuhi kebutuhan maritim modern yang semakin menuntut. Mesin *diesel dual-fuel* menjadi pilihan populer yang dapat beroperasi dengan bahan bakar *diesel* tradisional atau *liquefied natural gas (LNG)* yang lebih ramah lingkungan. Penelitian tentang *carbon capture technology* dan *hydrogen fuel cells* juga sedang dikembangkan untuk dekarbonisasi industri maritim. Selain itu, *hybrid propulsion systems* yang menggabungkan mesin *diesel* dengan baterai listrik dan motor listrik sedang mulai diterapkan pada kapal-kapal kecil dan medium, menawarkan fleksibilitas operasional dan pengurangan emisi. Investasi dalam inovasi ini mencerminkan komitmen industri maritim untuk mencapai *zero-emission shipping* di masa depan sambil mempertahankan keandalan dan efisiensi yang telah lama menjadi ciri khas mesin *diesel*.



Gambar 2.1 Mesin diesel (Handoyono 2014)

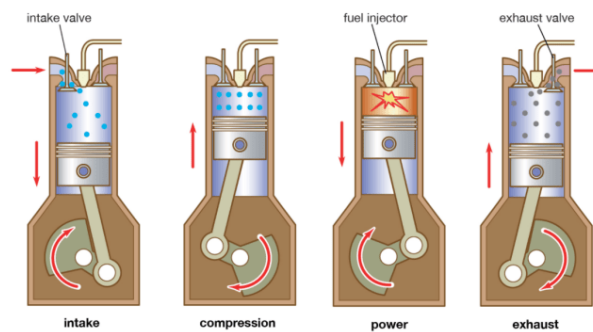
2.1.1 Prinsip Kerja Mesin *Diesel*

Motor bakar empat langkah adalah mesin pembakaran dalam, yang dalam satu kali siklus pembakaran akan mengalami empat langkah *piston*, (Handoyo, 2014). Dimana secara keseluruhan memerlukan dua putaran poros engkol (*crankshaft*) per satu siklus pada mesin bensin atau mesin *diesel*. Menurut Handoyo (2014) proses kerja mesin *diesel* 4 langkah sebagai berikut :

1. Langkah Hisap : Pada langkah hisap katup masuk pada posisi membuka dan katup buang pada posisi tertutup. Torak bergerak turun, ditarik oleh batang engkol, dan udara luar ditarik atau dihisap kedalam silinder melalui katup masuk sampai torak mencapai TMB (Titik Mati Bawah). 30^0 sebelum torak mencapai TMA (Titik Mati Atas) katup isap terbuka, berakhir sampai 30^0 sesudah TMB sehingga udara masuk ke ruang pembakaran.
2. Langkah kompresi : 30^0 sesudah torak mencapai TMB Katup isap tertutup rapat, torak bergerak dari TMB (Titik Mati Bawah) menuju ke TMA (Titik Mati Atas), Udara didalam kompresi sehingga udara dan suhunya meningkat.
3. Langkah Usaha : Pada langkah ini katup masuk dan katup buang masih tertutup. Karena injeksi bahan bakar didalam silinder yang suhunya tinggi,

maka bahan bakar terbakar dan terjadi ledakan menekan *piston* untuk melakukan kerja sampai piston mencapai TMB. 5° sampai dengan 10° sebelum torak mencapai TMA *injector* mengabutkan bahan bakar. Bercampurnya udara yang bersuhu tinggi dengan bahan bakar yang di kabutkan akan terjadi pembakaran atau ledakan pada ruang bakar. Pengabutan berlangsung sampai 10° sesudah TMA. Ledakan atau pembakaran tersebut berfungsi sebagai tenaga untuk mendorong *torak* dari TMA ke TMB guna memutar poros engkol. Yang akan mengakibatkan proses memutarnya baling- baling atau *propeller* untuk mendorong kapal, sehingga kapal bisa bergerak maju ataupun mundur.

4. Langkah buang : Pada langkah ini torak bergerak dari TMA, dengan didorong oleh engkol dan batang engkol, menekan udara hasil pembakaran yang tersisa keluar silinder. Dimana ketika *piston* hampir sampai di titik TMB katup buang terbuka dan katup masuk tertutup. Dengan ini 45° *torak* sebelum sampai di TMB katup buang terbuka sampai 20° sesudah *torak* sampai di TMA sehingga udara hasil pembakaran keluar.



Gambar 2.2 Diesel 4 tak (Handoyo, 2014)

Menurut Handoyo (2014) dimana langkah kerja mesin *diesel* 2 langkah sebagai adalah mesin yang mendapatkan satu kali tenaga dari hasil pembakaran gas, dimana memerlukan dua kali gerakan *piston* naik dan turun, dengan sekali putaran poros engkol, berikut langkah kerja *diesel* 2 tak :

1. Langkah Pertama Ekspansi, Pembuangan, dan pembilasan torak bergerak dari TMA ke TMB pertama digerakkan oleh udara pejala (*air starting*). Jika mesin *diesel* sudah bergerak ke atas melewati batas sekitar 20% di atas TMB, hal ini berarti torak sudah langsung melakukan langkah kompresi

sampai TMA dan seterusnya pengabutan bekerja maka terjadilah proses pembakaran yang mulai berlangsung dari sekitar 10^0 sebelum TMA sampai sekitar 5^0 engkol setelah TMA.

Akibat dari pembakaran maka akan timbul panas yang menghasilkan tenaga atau daya yang sangat besar yang diteruskan *torak* yang bergerak ke bawah guna memutar poros engkol mesin *diesel*.

Pada saat *torak* berada pada posisi kurang lebih 20% dari langkah sebelum TMB, torak akan sampai pada permukaan bagian atas lubang pembuangan sehingga akan terjadi proses pembuangan gas bekas pembakaran selama kurang lebih 20% dari langkah *torak* sampai di TMB.

Pada saat torak berada pada posisi kurang lebih 10% dari langkahnya sebelum TMB, *torak* akan sampai pada permukaan bagian atas lubang pembilasan sehingga akan terjadi proses pembilasan membersihkan sisa-sisa gas bekas pembakaran selama kurang lebih 10% dari langkah *torak* sampai di TMB.

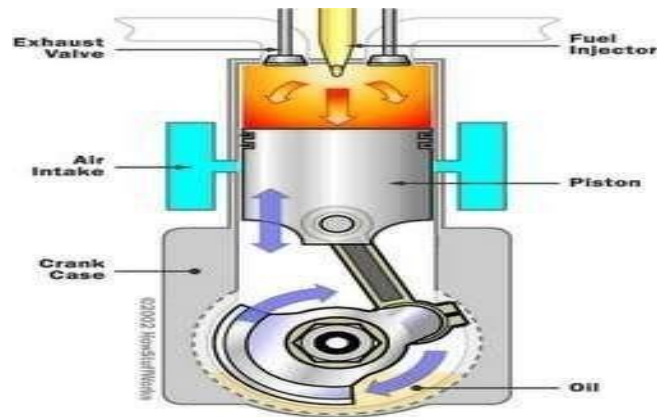
2. Langkah Kedua Pembilasan, Kompresi dan Pembakaran

Pada saat torak bergerak menuju TMA, lubang- lubang udara bilas masih terbuka selama kurang lebih 10% dari langkah *torak* dan lubang-lubang pembuangan juga masih terbuka selama kurang lebih 20% dari langkah *torak (overlapping)* sehingga akan terjadi proses pembilasan.

Saat torak bergerak ke atas sampai kurang lebih 10% dari langkah *torak*, lubang-lubang udara pembilas tertutup dan pada saat *torak* berada kurang lebih 20% dari langkah torak, lubang-lubang gas buang tertutup. Setelah itu *torak* bergerak ke atas melewati kurang lebih 20% dari langkah *torak*, ketika lubang- lubang udara bilas dan gas buang sudah tertutup semuanya, maka akan terjadi proses awal kompresi.

Pada saat proses kompresi ketika udara murni yang masuk ke dalam silinder akan segera ditekan ke atas sampai mencapai tekanan kurang lebih 40 kg/cm². Pada saat *torak* mencapai pada posisi kurang lebih 80 engkol sebelum TMA, pompa bahan bakar tekanan tinggi akan memompa bahan bakar ke pengabut dan langsung di kabutkan ke dalam silinder. Selanjutnya akan terjadi proses pembakaran di dalam silinder sehingga akan mencapai

suhu kurang lebih 1.2000° C. Pada saat proses pembakaran ini berlanjut sampai pada torak melewati kurang lebih 50 engkol setelah TMA. Jadi pada mesin *diesel* penggerak utama selalu terjadi dua kali proses pembakaran, yaitu sebelum dan sesudah TMA sehingga disebut juga dual proses pembakaran.



Gambar 2.3 Diesel 2 tak (Handoyo, 2014)

2.1.2 Komponen Utama Mesin Bantu Kapal

Mesin bantu kapal tersusun dari berbagai komponen yang saling terintegrasi membentuk sistem yang kompleks dan presisi. Setiap komponen memiliki fungsi spesifik yang berkontribusi terhadap operasi mesin secara keseluruhan. Pemahaman mendalam tentang setiap komponen sangat penting untuk memahami bagaimana kerusakan pada satu komponen dapat mempengaruhi performa mesin secara keseluruhan. Bagian utama dari mesin *diesel* adalah sebagai berikut :

a) Blok Mesin (*Engine Block*)

Blok silinder merupakan struktur utama mesin yang berfungsi sebagai rumah bagi semua komponen *internal* mesin. Komponen ini dibuat dari besi tuang yang berkualitas tinggi yang mampu menahan tekanan dan suhu tinggi dari proses pembakaran. Didalam blok silinder terdapat ruang-ruang silinder tempat *piston* bergerak melakukan siklus kerja. Kepala silinder terletak dibagian atas blok silinder dan berisi sistem katup yang mengatur aliran udara masuk dan gas buang keluar dari pembakaran (Taylor, 2008).



Gambar 2.4 *Engine Blok* (Arik H. 09 : 2014)

b) Kepala silinder (*Cylinder head*)

Adalah salah satu komponen utama yang dipasangkan pada blok silinder dan diikat menggunakan baut satu ujung silinder dan sering berisikan katup tempat udara dan bahan bakar diisikan dan gas buang dikeluarkan. Kepala silinder harus tahan terhadap *temperature* dan tekanan yang tinggi selama *engine* bekerja. Oleh sebab itu umumnya kepala silinder dibuat dari besi tuang. Pada saat ini banyak mesin yang kepala silindernya terbuat dari paduan aluminium. Kepala silinder yang terbuat dari paduan Aluminium memiliki kemampuan pendinginan lebih besar disbanding dengan yang terbuat dari besi tuang.



Gambar 2.5 *Cylinder head* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

c) *Cylinder liner*

Cylinder liner adalah komponen berbentuk silinder yang dipasang di dalam blok mesin dan berfungsi sebagai dinding tempat *piston* bergerak naik-

turun selama proses pembakaran. Komponen ini dirancang untuk menahan tekanan tinggi dari pembakaran bahan bakar, mengurangi keausan langsung pada blok mesin, serta membantu sistem pelumasan dan pendinginan mesin.



Gambar 2.6 *Cylinder liner* (PT. Waruna Shipyad Indonesia)

d) Klep (*valve*)

Valve atau katup adalah komponen penting dalam mesin *diesel* yang berfungsi mengatur aliran bahan bakar dan udara ke dalam silinder mesin serta mengeluarkan gas buang setelah proses pembakaran. Katup membuka dan menutup sesuai siklus mesin untuk memastikan pasokan udara dan bahan bakar masuk dengan tepat serta gas buang keluar secara efisien. Katup ditempatkan di kepala silinder dan biasanya dioperasikan oleh *camshaft* melalui mekanisme seperti rockerarm dan batang penggerak. Jenis katup utama dalam mesin *diesel* meliputi:

- 1) Katup masuk (*intake valve*) yang mengatur masuknya campuran udara dan bahan bakar ke ruang bakar
- 2) Katup buang (*exhaust valve*) yang membuka untuk mengeluarkan gas hasil pembakaran.



Gambar 2.7 Valve (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

e) *Rocker arm*

Rocker arm adalah komponen mekanis pada mesin, terutama mesin *diesel* dan bensin, yang berfungsi sebagai penghubung antara *camshaft* dengan katup (*valve*). Fungsi utamanya adalah mentransmisikan gerakan rotasi dari *camshaft* menjadi gerakan buka-tutup katup dengan tepat dan presisi sehingga proses intake (masuknya campuran udara dan bahan bakar) dan exhaust (keluarnya gas buang) dapat berlangsung efisien.



Gambar 2.8 *Rocker arm*

f) Poros nok (*Camshaft*)

Camshaft, juga dikenal sebagai poros nok atau noken as, adalah komponen utama dalam mesin *diesel* yang berfungsi mengatur waktu buka dan tutup katup (*valve*) pada silinder kepala. *Camshaft* memiliki tonjolan berbentuk lonjong yang disebut *cam lobe*, yang bertugas mendorong katup

agar membuka dan menutup sesuai dengan urutan pengapian atau *firing order* mesin.



Gambar 2.9 *Camshaft* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

g) *Piston* (torak)

Piston adalah salah satu komponen penting dalam mesin *diesel*, termasuk mesin kapal *diesel*, yang bergerak naik turun di dalam silinder. Fungsi utama *piston* adalah menahan tekanan dan ledakan dari hasil pembakaran bahan bakar di ruang bakar, serta mengubah energi panas dari pembakaran menjadi energi mekanik berupa gerakan linier (naik turun).



Gambar 2.10 *Piston* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

h) *Ring piston*

Ring piston adalah komponen berbentuk cincin yang terpasang pada alur *piston* di dalam silinder mesin. Fungsi utama *ring piston* adalah untuk mencegah kebocoran kompresi gas dari ruang bakar ke bak engkol, menjaga kompresi mesin agar tetap optimal, sekaligus mengatur pelumasan dinding silinder sehingga oli mesin tidak masuk ke ruang bakar secara berlebihan. Selain itu, *ring piston* membantu memindahkan panas dari *piston* ke dinding silinder agar suhu *piston* tetap terjaga dalam batas aman.



Gambar 2.11 *Ring piston* (PT. Waruna shipyard Indonesia)

h) *Connecting rod*

Connecting rod adalah komponen utama dalam mesin *diesel*, termasuk mesin *diesel* kapal, yang berfungsi sebagai penghubung antara *piston* dan poros engkol (*crankshaft*). *Connecting rod* meneruskan gaya dorong dari *piston* yang bergerak naik turun (gerak linier) ke poros engkol, dan mengubahnya menjadi gerakan putar (rotasi) yang digunakan untuk menggerakkan mesin atau kendaraan. Komponen ini harus mampu menahan beban tekan, tarik, nyalakan, dan panas yang besar selama proses pembakaran agar dapat berfungsi secara optimal.



Gambar 2.12 *Connecting rod* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

i) *Crankshaft*

Crankshaft atau poros engkol adalah komponen utama dalam mesin *diesel* yang berfungsi mengubah gerakan naik turun (linear) *piston* menjadi gerakan putar (rotasi). *Crankshaft* menerima tekanan dari *piston* melalui *connecting rod* dan mengubahnya menjadi tenaga putar yang dapat digunakan untuk menggerakkan mesin atau kendaraan. *Crankshaft* terletak di bagian bawah blok silinder dan biasanya terbuat dari bahan besi cor atau baja berkualitas tinggi agar mampu menahan beban berat dan tekanan tinggi selama proses pembakaran.



Gambar 2.13 *Crankshaft* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

j) Roda gila (*flywheel*)

Flywheel atau roda gila adalah komponen mesin yang berfungsi untuk menyimpan energi mekanik dalam bentuk energi putar (rotasi) dan

menyeimbangkan putaran mesin agar lebih stabil. *Flywheel* menyimpan energi kinetik yang dihasilkan saat langkah usaha mesin dan melepaskan energi tersebut saat mesin mengalami fluktuasi putaran, sehingga putaran mesin tidak mengalami perubahan drastis yang dapat mengganggu kinerja mesin.



Gambar 2.14 Roda gila (*flywheel*)

k) *Bearing*

Bearing berfungsi mencegah keausan dan mengurangi gesekan pada poros engkol (*crankshaft*)



Gambar 2.15 *Journal bearing*

2.2 Sistem Crankshaft

Crankshaft mendapat perlakuan tempa panas yang terdiri dari *rod journal* dan *main journal* yang ditahan bersamaan oleh *web* atau *counterweight*. Masing-masing *journal* membengkok melalui *fillet* menuju *sidewall* (dinding samping). Satu *main journal* memiliki *ground sidewall* khusus yang disebut *thrust face*. *Rod journal* memiliki lubang-lubang pembuat ringan (*lightening holes*) yang mengurangi bobot baja yang berputar disekitar *main journal*. *Main journal* dan *rod journal* memiliki aliran oli bor yang menyediakan jalur oli dari balok ke *main* dan *rod bearing*. Beberapa *crankshaft* memiliki *flange* dibagian depan dan belakang yang berguna untuk menyediakan penyekatan oli, atau untuk menahan *gear*, *damper* dan *flywheel*. (Ponidi, 2019)

Crankshaft rod journal merupakan offset dari garis tengah *main journal* sehingga ketika *piston* bergerak naik turun, *rod journal* bergerak melingkar, Gerakan ini secara efektif akan mengubah gerakan *linear piston* menjadi gerakan putar pada *crankshaft*.

Selama proses mengubah gerakan bolak balik menjadi gerakan putar, *crankshaft* mendapat tekanan pembekokan yang sangat besar di *rod* dan *main journal fillet*, tekanan lingkaran (*torsional*) di *rod* dan permukaan *main journal*, dan tekanan dorong (aksial) di *thrust journal sidewall*. Tekanan pembakaran *piston* dikirimkan ke *rod journal* yang seringkali menghasilkan beban pembengkokan *fillet (fillet bending load)* diatas 689 Mpa (100,000 psi). Beban *gear* dan *flywheel*, serta beban dari *piston* dalam beragam porsi siklus daya, menghasilkan beban torsi dan tekan (*thrust*) yang cukup kuat untuk mematahkan *crankshaft* melalui *rod* yang tebal dan *main journal* jika terjadi masalah. Dapat membawa beban yang sangat berat ini, *crankshaft* ditopang di blok dengan *half shell bearing*, Lubrikasi *bearing* tersebut diberikan melalui saluran oli yang dumasukkan di *rod* dan *main journal*. Oli bertekanan mengalir dari bok ke dalam saluran oli *main journal* terus menerus, Aliran oli mengalir melalui *web* menuju saluran oli *rod journal* dan *rod bearing* memiliki permukaan yang keras dan tahan aus yang di gerindra hingga licin. Sistem pelumasan *crankshaft* bekerja berdasarkan prinsip pelumasan bertekanan di mana pompa oli menyedot oli dari oil pan, menekannya melalui *oil filter*, lalu mengalirkannya ke galeri oli (*oil gallery*) di dalam blok mesin, dari galeri utama ini

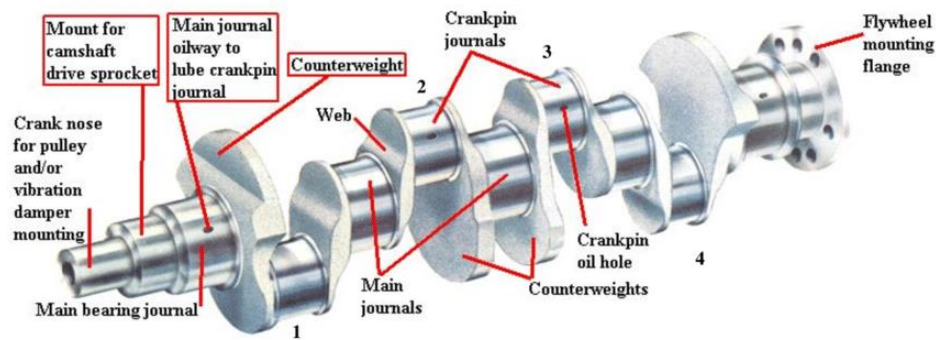
oli didistribusikan ke setiap main *bearing*, dan dari main *bearing* oli mengalir melalui saluran *internal crankshaft* menuju setiap *crankpin bearing* untuk melumasi *big-end bearing connecting rod*, sementara sebagian oli yang menyemprot keluar dari sisi *bearing* juga membantu mendinginkan dan melumasi dinding silinder serta *piston*, dan kunci dari sistem ini adalah terbentuknya lapisan film hidrodinamis yang memisahkan permukaan *crankshaft* dari permukaan *bearing* sehingga tidak terjadi kontak logam langsung selama *crankshaft* berputar di atas kecepatan *minimum*, yang berarti *crankshaft* secara harfiah "mengambang" di atas lapisan oli setebal beberapa mikrometer dan inilah rahasia mengapa *crankshaft* bisa bertahan ratusan ribu kilometer meski bekerja dalam kondisi ekstrem. *Bearing crankshaft* terdiri dari dua jenis utama yaitu main *bearing* yang menopang *crankshaft* pada blok mesin dan *big-end bearing (rod bearing)* yang menghubungkan *connecting rod* dengan *crankpin*, keduanya berbentuk dua setengah lingkaran (*half-shell*) yang terbuat dari bahan bimetal berupa lapisan baja sebagai *backing* dengan lapisan paduan timah-aluminium atau tembaga-timah di bagian dalam sebagai permukaan licin, dengan *clearance* atau celah antara *journal* dan *bearing* yang sangat kritis berkisar antara 0,025 hingga 0,075 mm karena *clearance* yang terlalu kecil akan menyebabkan kurangnya aliran oli sehingga terjadi panas berlebih, sementara *clearance* yang terlalu besar akan menyebabkan tekanan oli turun dan timbul suara knocking. Firing order atau urutan pembakaran antar silinder sangat erat kaitannya dengan desain *crankshaft* karena sudut offset antara *crankpin* satu dengan lainnya harus ditentukan sedemikian rupa sehingga impuls tenaga dari setiap silinder terdistribusi secara merata sepanjang satu putaran penuh untuk meminimalkan getaran, misalnya pada mesin 4 silinder inline dengan firing order 1-3-4-2 setiap silinder menyumbangkan impuls tenaga setiap 180 derajat putaran *crankshaft*, pada mesin 6 silinder inline dengan firing order 1-5-3-6-2-4 intervalnya menjadi 120 derajat sehingga mesinnya jauh lebih halus, dan pada mesin V8 dengan firing order 1-8-4-3-6-5-7-2 intervalnya hanya 90 derajat sehingga dihasilkan putaran yang sangat halus dan konstan. Getaran pada *crankshaft* merupakan tantangan teknis yang serius dan terdiri dari beberapa jenis yaitu getaran primer akibat massa *piston* dan *connecting rod* yang bergerak bolak-balik, getaran sekunder yang merupakan harmonik dengan frekuensi dua kali

frekuensi primer akibat ketidaksimetrisan gerak *piston* antara langkah naik dan turun, serta getaran torsi (*torsional vibration*) yang terjadi akibat impuls torsi yang datang secara periodik dari setiap ledakan pembakaran dan dapat menyebabkan *crankshaft* berputar tidak seragam, di mana untuk mengatasi getaran torsi ini dipasanglah *harmonic balancer* atau *vibration damper* di ujung depan *crankshaft* yang terdiri dari massa luar yang terhubung ke hub melalui lapisan karet elastis sehingga ketika *crankshaft* bergetar torsi massa luar bereaksi berlawanan fase dan menyerap energi getaran tersebut, karena tanpa *harmonic balancer* getaran torsi dapat menyebabkan retak *fatigue* dan bahkan patahnya *crankshaft* dalam jangka waktu yang relatif singkat. Kegagalan *crankshaft* dapat terjadi dalam beberapa modus utama yaitu *fatigue fracture* atau patah akibat kelelahan *material* yang merupakan penyebab paling umum di mana beban siklus berulang jutaan kali menyebabkan retak mikro berkembang secara bertahap dari titik konsentrasi tegangan seperti fillet radius antara *journal* dan *crank web* atau tepi lubang oli hingga akhirnya terjadi patah total, kemudian keausan *journal* (*journal wear*) akibat pelumasan yang tidak memadai baik karena kekurangan oli, tekanan oli rendah, oli yang kotor atau viskositasnya tidak sesuai, yang ditandai dengan munculnya suara ketukan (*knocking*) dari bawah mesin dan turunnya tekanan oli, lalu *bending* atau pembengkokan yang dapat terjadi akibat *hydraulic lock* saat air masuk ke silinder, dan *torsional cracking* yang mengikuti pola heliks akibat kegagalan meredam getaran torsi. Proses rekondisi *crankshaft* yang aus dilakukan dengan menggerinda ulang *journal* ke *diameter* lebih kecil dalam standar *undersize* 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm, atau 1,00 mm lalu memasang *bearing* pengganti dalam ukuran *undersize* yang sesuai, atau pada kasus keausan yang lebih parah dapat dilakukan pelapisan krom keras atau *thermal spray* untuk mengembalikan dimensi *journal* ke ukuran standar sebelum digerinda kembali, namun *crankshaft* yang sudah retak tidak dapat diperbaiki dengan cara apapun dan wajib diganti karena risiko patah total yang dapat menghancurkan seluruh mesin. Pada berbagai konfigurasi mesin yang berbeda, *crankshaft* mengalami adaptasi desain yang signifikan, misalnya mesin *diesel* menggunakan *crankshaft* yang jauh lebih tebal dan berat karena harus menahan tekanan kompresi dan ledakan yang jauh lebih tinggi dengan rasio kompresi 14:1 hingga 23:1 dibandingkan mesin bensin yang hanya 8:1 hingga 12:1,

mesin 2-tak menggunakan roller *bearing* bukan plain *bearing* karena tidak memiliki sistem pelumasan bertekanan, dan mesin radial pesawat terbang menggunakan satu *crankpin* tunggal dengan *connecting rod master* untuk satu silinder dan *knuckle rod* untuk sisanya.

Di era modern, *crankshaft* terus berkembang mengikuti tuntutan teknologi mesin yang semakin canggih, di mana pada kendaraan *hybrid crankshaft* sering terhubung langsung dengan motor/generator listrik terintegrasi yang memungkinkan fungsi *start-stop* otomatis dan *regenerative braking*, sementara penelitian tentang *variable stroke engine* yang memungkinkan panjang langkah *piston* berubah sesuai beban operasi terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, dan seluruh proses desain kini memanfaatkan simulasi FEA dan CFD yang sangat canggih untuk mengoptimalkan bentuk dan distribusi *material crankshaft* agar menghasilkan bobot seminimal mungkin dengan kekuatan semaksimal mungkin, menjadikan *crankshaft* sebagai bukti nyata bahwa sebuah komponen yang tampak sederhana dari luar sesungguhnya menyimpan kedalaman ilmu metalurgi, dinamika mesin, tribologi, dan rekayasa manufaktur yang luar biasa kompleks dan telah disempurnakan selama lebih dari satu abad evolusi teknologi mesin pembakaran dalam.

Crankshaft mendapat perlakuan panas hingga kekerasannya melebihi Rockwell C40 dan dihaluskan hingga permukaan jadi $0,125 \mu\text{m}$ (5 microinch), yang terbaik dalam industri. Struktur *crankshaft* yang kuat, di tempat dan mendapat perlakuan panas kemudian mengirimkannya kekuatan ke kedua ujung *shaft* yang digunakan untuk melakukan tugas bermanfaat di *gear train*, *pulley*, *flywheel*, *transmission*, dan *generator*. *Crankshaft* juga mencegah merembesnya oli melewati bagian depan dan belakang main *bearing journal* dengan memberikan *waer seat* yang halus untuk *oil seal* depan atau belakang. (Ponidi, 2019)



Gambar 2.16 Bagian bagian dari *crankshaft*

2.2.1 Bagian Bagian *Crankshaft*

Crankshaft memiliki bagian bagian utama seperti

1. *Crank pin*

Bagian yang menghubungkan poros engkol dengan ujung batang *piston*. Crank pin biasanya memiliki lubang oli sebagai saluran pelumas

2. *Crank journal*

Bagian dari poros engkol yang terhubung ke blok silinder dan dipasang pada main *bearing* sebagai penopang agar poros engkol dapat berputar. Crank *journal* juga memiliki saluran oli dan crank *arm*.

3. *Oil hole*

Untuk saluran yang dilalui oli sebagai pelumasan mainshaft motor induk

4. *Counter balance weight*

Sebagai bobot peredam atau penyeimbang putaran pada motor induk sebagai meminimalisir getaran yang dihasilkan oleh putaran poros.

5. *Crank web*

Crank web (lengan engkol) adalah bagian yang menghubungkan main *journal* dengan crank pin. Lengan ini berfungsi sebagai tuas yang mentransfer gaya dari crank pin ke poros utama.

6. *Main bearing (Metal duduk)*

Yaitu *bearing* yang terletak pada blok mesin sehinggamerupakan tumpuan utama bagi mainshaft saat berputar. Disebut *metal duduk* karena *metal* ini tidak bergerak hanya diam di blok mesin.

2.2.2 Peran Utama dan Fungsi *Crankshaft*

Peran utama *crankshaft* adalah mengubah gerakan bola-balik (translasi) *piston* menjadi gerakan berputar (rotasi) yang dapat digunakan untuk menggerakkan kendaraan. Proses ini mengubah energi dari ledakan pembakaran bahan bakar di dalam silinder menjadi tenaga mekanik yang dapat disalurkan.

Fungsi-Fungsi *Crankshaft* :

1. Mengubah gerakan bolak balik (atas dan bawah) menjadi gerakan putar (*rotary motion*).
2. Membawa beban *bending*, *torsional*, dan tekan.
3. Mengirim oli bertekanan ke *main bearing* dan *rod bearing*.
4. Memberikan ketahanan permukaan terhadap keausan untuk *main bearing* dan *rod bearing*.
5. Mengirim daya ke *gear train* dan *flywheel*.

Menyediakan permukaan sekat untuk *main oil seal* depan belakang

2.2.3 Jenis Jenis Kerusakan atau Kegagalan pada *Crankshaft*

Kerusakan pada *crankshaft* (poros engkol) merupakan masalah serius yang dapat menyebabkan kegagalan total pada mesin. Berikut adalah jenis-jenis kerusakan yang paling sering terjadi beserta penyebabnya :

1. Oval

Kerusakan yang paling sering terjadi pada *crankshaft* adalah ovalnya leher-lehernya *crankshaft*. Hal yang pertama kali kita lakukan adalah memeriksa leher *crankshaft* dengan mata telanjang kemudian dilakukan pengecekan *diameter* pada bantalan utama dengan cara mengukur *diameter* dalamnya dengan *inside micrometer* minimal 4 titik, meskipun Cuma satu titik yang lebih besar maka harus di *undersize*. Apabila melebihi ukuran yang diizinkan manual book dan metal *bearing* yang ada dipasaran maka dilakukan *undersize* (memperkecil) dengan cara disekrap.

2. Tergores

Hal ini tidak diizinkan karena permukaan *crankshaft* diharuskan bersih, licin sempurna dan halus, begitupun juga dengan bantalannya juga harus bersih, licin sempurna dan halus. Apabila terdapat gram atau tergores atau cacat maka harus di *undersize* karenakan mempengaruhi kerja *crankshaft*.

3. Defleksi pada *crank web*

Pada saat *crank web* mengalami defleksi maka bentuk dari atas dan dari bawah akan berbeda. Apabila mengalami defleksi maka defleksi tersebut tidak dapat dilihat dengan mata telanjang, cara mengetahui terjadinya defleksi adalah dengan mengukur *diameter* dalam dengan menggunakan *inside micrometer*. Alasan mengapa defleksi tidak boleh terjadi adalah berkaitan dengan firing order yang berkaitan dengan posisi top dead center (TDC) dan proses pembakaran dalam combustion chamber. Untuk *crankshaft* dengan 4 silinder, maka sudut antara masing-masing silinder adalah $720^\circ/4 = 180^\circ$. Sudut tersebut tidak boleh berubah. Apabila terjadinya defleksi pada *crankshaft* sudut tersebut akan berubah dengan berubahnya sudut, maka waktu pembakaran pada masing-masing silinder yang telah dirancang sedemikian rupa oleh pabrik pembuat mesin akan berubah. Hal ini menyebabkan terjadinya getaran berlebih dan bila dibiarkan terus menerus akan mengakibatkan *crankshaft* patah atau putus. Untuk mengetahui terjadinya defleksi *crank web* pada *crankshaft*. Biasanya dilakukan dengan pengukuran *web displacement* pada *crankshaft*. Biasanya alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran *web displacement* adalah indikator jarum

4. *Twist* (Puntiran)

Untuk mengetahui terjadinya *twist* maka dapat dilakukan pengukuran terhadap sudut yang dibentuk antar web pada *crankshaft* dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- a) Menembakan laser *beam* pada *crankshaft* yang akan diukur sudut kemiringannya dari arah sejajar sumbu poros.
- b) Ukur sudut yang dibentuk kedua web (web acuan dan web yang akan diukur) dan catat hasil pengukurannya
- c) Jika hasil pengukuran tidak sama dengan sudut standar yang seharusnya maka berarti terjadi *twist*, *allowance* terjadinya *twist* kurang lebih 2° .

Akibat terjadinya *twist* adalah *timing valve* tidak benar, proses pembakaran menjadi lebih lambat, pembakaran tidak sempurna, terjadi knocking, vibrasi berlebih karena *crankshaft* tidak lagi *balance*. Jika *crankshaft* mengalami *twist* maka sudut yang dibentuk antar web menjadi lebih lebar atau lebih dari

pada ukuran standarnya. Hal ini akan mengganggu proses pembakaran dalam mesin, jika sudut antar web menjadi lebih besar salah satu proses pembakaran akan mengalami keterlambatan injeksi bahan bakar akibat dari terlambatnya *crankshaft* menggerakkan *chamshaft* yang menggerakkan *valve* melalui *rocker arm* dan batang *knock*. Keterlambatan injeksi bahan bakar ini akan mengakibatkan tidak sempurnanya proses pembakaran, dan juga akan menimbulkan bahan bakar semakin banyak dalam ruang silinder di mana jika saatnya terbakar maka akan menghasilkan tekanan yang sangat tinggi sehingga timbul suara ledakan, hal inilah yang disebut sebagai *knocking*.

5. *Scratch* (Aus)

Keausan ini biasanya terjadinya pada *crankshaft journal* karena gesekan yang terjadi antara *crankshaft journal* dengan *journal bearing* sangat besar sehingga bagian ini sangat rentan terhadap keausan. Ini mengakibatkan permukaan poros *crankshaft journal* jadi lebih kasar. Untuk memperbaiki terjsdiny keausan pada *crankshaft* dilakukan dengan pengelasan.

6. Retak

Pada *crankshaft* sudut-sudut leher tidak boleh tajam, arus memiliki radius (jari-jari) untuk menghindari konsentrasi tegangan. Keretakan pada *crankshaft* dapat terjadi dari konsentrasi tegangan yang disebabkan terlalu tajamnya sudut-sudut leher dan tidak lurus nya kedudukan *crankshaft* pada bantalannya dan juga diakibatkan oleh kurangnya pelumasan pada bantalan. Cara mengetahuinya adalah terlihat gram-gram yang menempel pada *crankshaft* serta tabah naiknya *temperature* pada oil. Untuk perawatan *oil* sangatlah penting demi menunjang kinerja dari *crankshaft* itu sendiri. *Crankshaft* jarang mengalami kerusakan (patah atau retak) jika dipasang dengan benar dan dioperasikan dalam kondisi normal.

2.3 Penyebab Terjadinya Keretakan *Crankshaft*

Kretakan *crankshaft* merupakan salah satu kegagalan paling serius dalam sistem mesin *diesel* dan dapat menyebabkan kegagalan total mesin.

2.3.1 Kelelahan *material (fatigue)*

Kegagalan *fatigue* bertanggung jawab setidaknya 85% dari semua kegagalan dalam pelayanan karena penyebab mekanis, terutama berasal dari

konsentrasi tegangan pada sambungan dan *misalignment*. *Crankshaft* mengalami *bending* bergantian pada *crankpin* dan *rotating bending* yang dikombinasikan dengan torsion pada *main journal*, yang sebagian besar bertanggung jawab atas kegagalan *fatigue* (Fonte et al., 2015a).

Mekanisme *fatigue* terjadi karena beban siklik berulang yang menyebabkan akumulasi kerusakan mikro pada *material* hingga mencapai batas kritis. Proses ini dimulai dengan inisiasi retak mikro pada permukaan atau di bawah permukaan *material* akibat konsentrasi tegangan lokal yang melebihi kekuatan yield *material* pada skala mikroskopik (Chien et al., 2005). Setiap siklus pembebanan menyebabkan pertumbuhan retak secara progresif melalui mekanisme slip plastik pada tingkat butir kristal, dimana dislokasi bergerak dan terakumulasi pada batas butir atau inklusi *material* (Kubo, Haruyoshi dan Mori, 2005).

Pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal, pembebanan siklik yang kompleks terjadi karena kombinasi gaya gas hasil pembakaran yang ditransmisikan melalui *piston* dan *connecting rod*, serta momen torsi yang dihasilkan untuk menggerakkan *generator*. *Crankpin* mengalami *bending stress* yang berubah arah setiap setengah putaran *crankshaft*, sementara *main journal* mengalami *rotating bending stress* akibat berat *crankshaft* itu sendiri yang berputar, ditambah dengan *torsional stress* dari transmisi torsi (Yu Gongzhi, Yu Hongliang, 2011).

Kondisi operasional *marine engine* yang keras, termasuk variasi beban, temperatur tinggi, dan lingkungan korosif, semakin mempercepat proses degradasi *material*. Fluktuasi temperatur menyebabkan *thermal cycling* yang menginduksi tegangan *thermal*, sementara kondisi *marine environment* dengan kadar garam tinggi dapat memicu *stress corrosion cracking* yang menurunkan *fatigue strength material* secara signifikan. Faktor konsentrasi tegangan pada *area* geometri kompleks seperti oil hole, fillet radius, dan transisi web *to journal* menjadi lokasi kritis dimana *crack initiation* paling sering terjadi, karena tegangan lokal dapat mencapai 2-4 kali lipat dari tegangan *nominal* (Chien et al., 2005).

2.3.2 Konsentrasi Tegangan pada Area Kritis

Kegagalan *crankshaft* disebabkan oleh *fatigue* yang dimulai oleh retak yang berlokasi di web fillet radius dan berkembang ke *journal inner radius* yang

menyebabkan fraktur *overload* akhir. Perubahan geometri pada *area* fillet menciptakan faktor konsentrasi tegangan yang signifikan, terutama pada transisi antara web dan *journal crankshaft*.

Studi menunjukkan bahwa inisiasi *fatigue* dari region *crankpin-web* fillet memerlukan tingkat tegangan sekitar 175 MPa (Fonte et al., 2015a). Satu titik kritis pada *crankshaft* adalah wilayah *interface* antara *crankpin journal* dan web, dimana masalah konsentrasi tegangan biasanya dimitigasi melalui fillet dengan geometri yang memadai. Fillet radius merupakan faktor utama dimana tegangan meningkat secara signifikan ketika fillet radius menurun, kemudian konsentrasi tegangan menjadi jauh lebih tinggi dengan transisi dari smooth ke sharp fillet (Riad Ahmad, Ahmad O. Hasan, 2019).

Mekanisme konsentrasi tegangan pada fillet radius terjadi karena aliran gaya harus berubah arah secara drastis mengikuti kontur geometri, menyebabkan garis-garis gaya menjadi rapat dan tegangan lokal meningkat secara eksponensial. Pada kondisi pembebanan *bending*, tegangan maksimum terjadi pada permukaan fillet di sisi tarik, dimana kombinasi tegangan normal dan shear *stress* menciptakan kondisi *multiaxial stress state* yang kompleks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fenomena konsentrasi tegangan lokal yang disebabkan oleh kegagalan pelumasan meningkat secara signifikan pada kondisi kecepatan rendah.

Propagasi retak dari *area* fillet mengikuti pola karakteristik dimana *crack initiation* dimulai dari permukaan pada titik tegangan maksimum, kemudian berkembang secara semi-elliptical ke dalam *material* dengan orientasi perpendicular terhadap principal *stress*. Radius fillet sendiri mengurangi tegangan pada *area* kritis ini, tetapi karena fillet dalam kebanyakan kasus di-roll, hal ini juga memiliki efek menguntungkan karena *induced compressive residual stress*. Namun, jika proses *fillet rolling* tidak dilakukan dengan *parameter* yang tepat atau terjadi degradasi akibat operasi, manfaat *compressive residual stress* dapat hilang dan bahkan berubah menjadi *tensile residual stress* yang memperburuk kondisi *fatigue*.

2.3.3 Kegagalan *bearing* dan masalah *tribology*

Kegagalan *bearing crankshaft* disebabkan oleh kegagalan mekanis atau *tribologi* dan di antara yang terakhir terutama karena keausan *abrasif* (60%), adhesif (19%) atau *surface fatigue* (11%). Investigasi menunjukkan bahwa tipe

kerusakan dasar dan paling mencolok yang menyebabkan kegagalan *bearing* adalah keausan *abrasif*, *adhesif* dan *surface fatigue* (Vencl & Rac, 2014).

Kegagalan *bearing* menyebabkan perubahan *clearance* yang mengakibatkan distribusi beban tidak merata pada *crankshaft* dan memicu konsentrasi tegangan berlebihan. Penelitian menemukan bahwa ketika *clearance bearing* kecil, kegagalan *adhesive wear* mendominasi, sedangkan ketika *clearance bearing* besar, kegagalan *abrasive wear* mendominasi. Keausan abnormal dari main *journal* atau shell *bearing* dapat menyebabkan *misalignment crankshaft* yang signifikan dan akan menyebabkan oil *clearance* yang lebih tinggi (Fonte et al., 2015a).

Mekanisme keausan abrasif terjadi ketika partikel keras atau kontaminan dalam oli pelumas berperan sebagai media abrasif yang mengikis permukaan *bearing*. Partikel asing yang bersirkulasi dalam oli dapat masuk ke celah antara *bearing* dan *journal* dan menghasilkan keausan abrasif dalam bentuk goresan atau *scratch* sirkumferensial pada permukaan *bearing*. Partikel kontaminan ini dapat berasal dari sistem filtrasi yang tidak adekuat, debris hasil keausan komponen lain, atau kontaminan eksternal yang masuk melalui sistem ventilasi *crankcase*.

Keausan adhesif, di sisi lain, terjadi ketika lapisan film oli tidak mampu memisahkan permukaan *bearing* dan *journal* secara efektif, menyebabkan kontak *metal to metal*. Kondisi ini mengakibatkan transfer *material* dari satu permukaan ke permukaan lainnya, membentuk *spot-spot* yang dapat berkembang menjadi lecet (*scuffing*). *Crush height* berlebihan dapat menyebabkan defleksi inward pada region *parting line bearing* ketika housing dikencangkan, yang mengurangi gap antara permukaan *journal* dan *bearing* serta menghasilkan tekanan film oli puncak terlokalisasi yang dapat menyebabkan *fatigue* pada *material bearing*. Maka dari itu diperlukannya pelumasan yang sempurna untuk mencegah kegagalan *bearing*.

Pelumasan sempurna pada *crankshaft* merupakan aspek kritis dalam menjaga performa dan umur panjang mesin. *Crankshaft*, sebagai komponen utama yang mengubah gerak linear *piston* menjadi gerak rotasi, mengalami beban mekanis yang sangat besar dan frekuensi gesekan yang tinggi. Oleh karena itu, sistem pelumasan yang optimal harus mampu mengurangi gesekan antar permukaan logam, mencegah keausan prematur, dan mempertahankan efisiensi mesin.

Fungsi utama pelumasan pada *crankshaft* adalah membentuk lapisan film minyak antara *bearing crankshaft* dan *journal crankshaft* yang berputar. Lapisan film ini mencegah kontak langsung logam-ke-logam, yang dapat menyebabkan gesekan tinggi, panas berlebih, dan kerusakan permukaan. Minyak pelumas yang berkualitas baik harus memiliki viskositas yang tepat—tidak terlalu encer sehingga tidak dapat mempertahankan film pelumas, tetapi juga tidak terlalu kental sehingga menghambat aliran dan meningkatkan kerugian gesek. Sistem pelumasan umumnya menggunakan tekanan pompa untuk mengalirkan minyak ke seluruh *journal crankshaft* melalui saluran-saluran dalam blok mesin, memastikan setiap *bearing* mendapat pasokan minyak yang cukup.

Selain mengurangi gesekan, pelumasan sempurna pada *crankshaft* juga berfungsi sebagai media pendingin yang membawa panas dari *friction bearing* ke reservoir minyak, di mana panas tersebut dapat dihilangkan. Pelumas juga berperan sebagai pembersih, mengangkut partikel debu dan sisa pembakaran yang terbentuk selama operasi mesin. Selain itu, minyak pelumas melindungi permukaan logam dari korosi dan oksidasi dengan membentuk lapisan pelindung yang mencegah kontak langsung dengan udara dan kelembaban. Karakteristik penting pelumas termasuk indeks viskositas tinggi untuk mempertahankan ketebalan film dalam berbagai suhu operasi, daya anti-oksidasi untuk mencegah degradasi minyak, dan sifat anti-foam untuk menghindari pembentukan gelembung yang dapat mengganggu fungsi pelumasan.

Kualitas pelumasan *crankshaft* dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk tipe dan *grade* minyak pelumas yang digunakan, kondisi operasional mesin, interval penggantian minyak, dan kondisi filter minyak. Minyak pelumas modern dirancang dengan aditif khusus seperti detergent, *dispersant*, *anti-wear agent*, dan *anti-corrosion inhibitor* untuk memaksimalkan proteksi dan performa mesin. Pemeliharaan rutin, termasuk penggantian minyak dan filter sesuai jadwal yang direkomendasikan, sangat penting untuk memastikan pelumasan tetap sempurna. Penurunan kualitas minyak karena keausan, kontaminasi, atau degradasi termal dapat mengakibatkan film pelumas menjadi tidak stabil, meningkatkan gesekan, mempercepat keausan *bearing*, dan pada akhirnya menyebabkan kerusakan serius

pada *crankshaft* dan komponen pendukungnya, berpotensi merugikan seluruh umur mesin.

2.3.4 *Misalignment* dan Deformasi *Crankshaft*

Crankshaft rentan terhadap deformasi karena *misalignment bearing main journal*. *Misalignment* menyebabkan *crankshaft* mengalami momen *bending* tambahan yang tidak diperhitungkan dalam desain awal, sehingga meningkatkan tegangan operasional di atas batas desain. Kadang-kadang gaya *bending* abnormal dihasilkan oleh *misalignment bore main bearing*, *bearing* yang dipasang tidak tepat, *main bearing cap* yang longgar, *pulley* yang tidak seimbang, atau *belt* yang terlalu kencang (Fonte & de Freitas, 2009).

Defleksi *crankshaft* pada *marine diesel engine* terjadi ketika *bearing* yang mendukung *journal crankshaft engine* laut rusak dan mempengaruhi *alignment crankshaft* yang mereka dukung (Marine Engineering, 2009). Defleksi *crankshaft* diukur untuk mendeteksi *misalignment main bearing*, dimana *misalignment* terjadi karena keausan *bearing* atau defleksi *crankshaft*. Kondisi *misalignment* menciptakan distribusi beban yang tidak uniform sepanjang *crankshaft*, dimana beberapa *bearing* menanggung beban berlebihan sementara *bearing* lainnya mengalami *unloading*.

Misalignment meningkatkan beban *bending* pada *fillet main journal* dan dapat menyebabkan fraktur *fatigue bending* (Fonte & de Freitas, 2009). Ketika *crankshaft* mengalami defleksi akibat *misalignment*, terjadi perubahan sudut relatif antar *journal* yang menyebabkan *edge loading* pada *bearing surface*. Kondisi ini menghasilkan konsentrasi tegangan lokal yang dapat mencapai 150-200% dari tegangan *nominal*, terutama pada *area* transisi *journal-to-web*.

Defleksi dalam *crankshaft* = TDC – BDC (jumlah *misalignment* yang diizinkan akan diberikan dalam manual), dan grafik juga dibuat pada beberapa kasus, dimana perubahan mendadak dalam gradien grafik menunjukkan keausan pada *bearing* tertentu yang mengikuti pembacaan defleksi tinggi (Mucky Mariners, 2021). Pengukuran defleksi *crankshaft* menggunakan dial gauge memberikan indikasi kuantitatif tentang kondisi *alignment* sistem *bearing*, dimana nilai defleksi yang melebihi batas toleransi menunjukkan adanya keausan *bearing* atau deformasi struktural.

Faktor-faktor yang memperburuk kondisi *misalignment* termasuk keausan *bearing saddle*, *crack* pada *bearing housing*, *loose foundation bolts* yang menyebabkan getaran, dan *deformasi hull* kapal akibat beban operasional atau *grounding*. Penyebab utama *misalignment* meliputi momen *bending* tinggi pada *crankshaft* karena gaya berlebihan dari *piston assembly*, *grounding* kapal, ledakan atau kebakaran *crankcase*, dan *defective* atau *worn stern tube bearing* (Motionics, 2018).

2.3.5 Getaran *Torsional*

Getaran *torsional* menimbulkan risiko serius; desain yang tidak tepat dapat memperburuk getaran ini, menyebabkan peningkatan keausan dan kemungkinan kegagalan katastrofik (Fonte et al., 2015b). Resonansi *torsional* pada sistem *crankshaft* dapat menghasilkan amplifikasi tegangan dinamis yang signifikan, terutama pada frekuensi eksitasi yang bertepatan dengan frekuensi *natural* sistem.

Getaran *torsional* mempengaruhi semua *engine* dan disebabkan oleh torsi berdenyut yang diterapkan pada *crankshaft* dari pembakaran setiap silinder. *Crankshaft* sebenarnya berputar bolak-balik sedikit dengan setiap langkah. Getaran ini terutama hadir dalam *diesel engine*, karena kompresi tinggi mereka (Equipment, 2020). Getaran *torsional* merupakan perhatian dalam *crankshaft* mesin pembakaran *internal* karena dapat mematahkan *crankshaft* itu sendiri; memotong *flywheel*; atau menyebabkan sabuk yang digerakkan, *gear* dan komponen yang terpasang gagal, terutama ketika frekuensi getaran sesuai dengan resonansi *torsional*

Fenomena resonansi *torsional* terjadi ketika frekuensi eksitasi dari *firing impulses engine coincide* dengan salah satu frekuensi *natural torsional* dari sistem *crankshaft flywheel generator*. *Crankshaft engine* telah dirancang untuk menghindari getaran *torsional* resonansi harmonik order rendah dalam rentang kecepatan *engine* yang umum digunakan, tetapi penulis telah menemukan bahwa, dalam beberapa *engine*, terutama turbo *charged engine*, tingkat signifikan dari torsi eksitasi harmonik-order rendah bekerja pada sistem (Jouji Kimura, Ryoji Kai, 2001).

Dengan menganalisis efek getaran *torsional*, hasil menunjukkan bahwa getaran *torsional crankshaft* memiliki efek penting pada getaran blok *engine* (Industry, 2020). Amplifikasi getaran pada kondisi resonansi dapat mencapai faktor

10-50 kali dari *amplitude* normal, menghasilkan tegangan *shear torsional* yang dapat melebihi *ultimate shear strength material crankshaft*.

Dalam *marine diesel generator auxiliary engine*, masalah getaran *torsional* menjadi lebih kompleks karena karakteristik beban *generator* yang dapat berubah secara drastis tergantung pada konsumsi listrik kapal. Perubahan beban ini dapat menyebabkan variasi kecepatan operasi yang membawa sistem melewati *critical speed range* dimana resonansi *torsional* terjadi. Akibatnya, *crankshaft* mengalami *cyclic torsional stress* yang tinggi, terutama pada area dengan *stiffness* rendah seperti region antara *main bearing supports*.

2.3.6 Beban Berlebihan (*overload*)

Kegagalan biasanya muncul dari beban siklik berulang, khususnya selama kondisi *overload* atau ketika terkena getaran, sebagaimana dibuktikan oleh kasus terdokumentasi setelah 13.000 jam operasi (Fonte et al., 2015a). *Overload* dapat terjadi karena kondisi operasi abnormal seperti *hydraulic lock*, *combustion knock*, atau beban propeller yang berlebihan.

Ketika fluida memenuhi ruang bakar, *crankshaft* akan berputar dan memaksa *piston* ke atas. Aksi abnormal ini menciptakan gaya reaksi yang lebih kuat dari yang dapat ditangani komponen *engine*. Reaksi ini dapat menyebabkan *engine* macet, yang membuatnya tidak dapat digunakan (Hydraulic, 2023). Mode kerusakan umum termasuk *connecting rod* bengkok atau patah, *crankshaft* retak, *head* retak, *block* retak, kerusakan *crankcase*, *bearing* rusak, atau kombinasi dari kerusakan-kerusakan tersebut

Dengan tidak ada tempat untuk pergi, *liquid-on-liquid* menciptakan tekanan yang luar biasa pada *connecting rod*, *piston*, *crankshaft*, dan *bearing*, menyebabkan mereka bengkok atau patah di bawah gaya hidrolis. *Engine* secara efektif terkunci oleh fluida dengan *liquid piston* yang tidak akan bergerak. Kondisi *hydraulic lock* pada *marine diesel generator* dapat terjadi akibat *water ingress* melalui *exhaust system*, *cooling system leak*, atau kondensasi berlebihan dalam *intake manifold*.

Engine yang berjalan *overload* berkepanjangan dapat menyebabkan retak dan keausan pada *bearing shell* dan/atau *crankshaft journal* (Bunyamin kamal, 2022). *Combustion knock*, yang merupakan bentuk *overload* lain, terjadi ketika bahan bakar terbakar secara tidak terkendali sebelum *piston* mencapai TDC,

menghasilkan *pressure spike* yang dapat mencapai 2-3 kali tekanan normal dan menginduksi *shock loading* pada sistem *crankshaft*.

Overload akibat beban propeller berlebihan dapat terjadi karena kondisi cuaca buruk, fouling pada propeller, atau *shaft misalignment* yang menyebabkan peningkatan resistansi. Pada *auxiliary generator engine*, *overload* listrik yang tiba-tiba dapat menyebabkan mesin mengalami *sudden load application* yang menghasilkan *transient torque spikes*. Kondisi ini sangat berbahaya karena *crankshaft* tidak memiliki waktu untuk mendistribusikan beban secara merata, sehingga konsentrasi tegangan terjadi pada *area* yang paling lemah seperti fillet radius dan *oil holes*.

2.4 Perawatan dan Pemeliharaan Mesin *Diesel*

Perawatan mesin *diesel* adalah salah satu aspek terpenting dalam memastikan operasional yang aman, andal, dan efisien. Perawatan yang terencana dengan baik dapat mencegah kerusakan mendadak, mengurangi biaya perbaikan, dan memperpanjang umur mesin. Mesin *diesel* merupakan jantung kapal jika mesin *diesel* tidak dirawat dengan benar, maka bisa menyebabkan kerusakan serius dan berpotensi membahayakan keselamatan kapal dan awaknya.

Perawatan dan pemeliharaan mesin *diesel* merupakan proses sistematis dan berkelanjutan yang dirancang untuk menjaga performa optimal, meningkatkan efisiensi bahan bakar, memperpanjang umur mesin, dan mencegah kerusakan yang tidak terduga. Mesin *diesel*, dengan karakteristik konstruksinya yang kokoh dan kompresi tinggi, memerlukan pendekatan pemeliharaan yang berbeda dari mesin bensin. Pemeliharaan yang terencana dan konsisten tidak hanya menghemat biaya perbaikan jangka panjang tetapi juga memastikan keandalan mesin dalam kondisi operasional yang demanding, baik untuk aplikasi transportasi, industri, maupun pembangkit listrik. Komponen utama yang memerlukan perhatian khusus dalam pemeliharaan mesin *diesel* adalah sistem bahan bakar, yang mencakup tangki, filter bahan bakar, dan injector. Mesin *diesel* menggunakan bahan bakar dengan viskositas lebih tinggi dan sifat pembakaran berbeda dibandingkan bensin, sehingga filter bahan bakar harus diganti secara berkala untuk mencegah penyumbatan dan memastikan aliran bahan bakar yang optimal. Injector *diesel*, yang bekerja pada tekanan sangat tinggi mencapai ratusan bar, memerlukan pemeliharaan ketat karena

endapan karbon dan kontaminan dapat menyebabkan penyumbatan dan penyemprotan bahan bakar yang tidak merata, mengakibatkan pembakaran tidak sempurna dan peningkatan emisi. Sistem injeksi modern yang menggunakan teknologi common rail membutuhkan bahan bakar berkualitas tinggi dan pemeliharaan yang lebih presisi untuk menjaga toleransi yang ketat.

Sistem pelumasan merupakan jantung dari pemeliharaan mesin *diesel* yang efektif. Minyak pelumas berkualitas tinggi dengan spesifikasi yang sesuai (biasanya API CF atau lebih tinggi untuk mesin *diesel*) harus digunakan dan diganti secara teratur sesuai panduan manufaktur, umumnya setiap 5.000 hingga 10.000 jam operasi atau sesuai interval yang ditentukan. Minyak pelumas yang terdegradasi, terkontaminasi oleh partikel, air, atau produk pembakaran, akan kehilangan kemampuannya untuk melindungi komponen bergerak seperti *crankshaft*, *camshaft*, *piston*, dan *bearing*. Oleh karena itu, filter minyak harus diganti bersamaan dengan penggantian minyak, dan pengujian berkala terhadap kondisi minyak (melalui analisis laboratory) dapat memberikan indikasi dini tentang keausan komponen *internal* atau kontaminasi yang memerlukan tindakan koreksi. Sistem pendingin mesin *diesel* harus dijaga dengan baik untuk mencegah overheating yang dapat menyebabkan distorsi *metal*, seal *failure*, dan penurunan performa. *Radiator*, *water pump*, *thermostat*, dan seluruh saluran air pendingin harus diperiksa secara berkala untuk memastikan tidak ada kebocoran, penyumbatan oleh endapan mineral, atau kerusakan pada hose pendingin. Cairan pendingin (*coolant*) harus diganti sesuai interval yang direkomendasikan karena sifat perlindungan anti-korosi dan *anti-freeze* nya akan menurun seiring waktu. Sistem pendingin udara (*air cooler*) pada beberapa mesin *diesel* juga memerlukan pembersihan rutin untuk memastikan efisiensi pendinginan tetap optimal. *Filter* udara dan sistem intake mesin *diesel* juga memerlukan perhatian khusus karena partikel debu yang masuk bersama udara dapat mempercepat keausan silinder, *piston*, dan ring *piston*. *Filter* udara harus diperiksa secara rutin dan diganti atau dibersihkan tergantung pada kondisi lingkungan operasional—lingkungan berdebu memerlukan penggantian lebih sering. Sistem *exhaust*, termasuk *turbocharger* (jika ada), *muffler*, dan saluran buang, harus dipantau untuk memastikan tidak ada penyumbatan yang dapat menghambat aliran gas buang dan menurunkan performa

mesin. *Turbocharger* memerlukan perhatian khusus karena bekerja pada suhu dan kecepatan rotasi yang sangat tinggi; pelumasan yang baik melalui saluran oli khusus dan pendinginan yang memadai sangat krusial untuk mencegah kerusakan *bearing* turbo. Pemeliharaan sistem kelistrikan mesin *diesel* juga penting, terutama pada sistem starter, *alternator*, dan baterai. Mesin *diesel* memerlukan torsi starter yang besar untuk memulai kompresi tinggi, oleh karena itu motor starter dan baterai harus dalam kondisi prima. Pemeriksaan kabel, koneksi, dan terminal listrik harus dilakukan secara berkala untuk mencegah korosi dan memastikan aliran listrik yang baik. Sistem pengisian *alternator* harus juga diperiksa untuk memastikan baterai selalu terisi dengan sempurna, terutama untuk operasi dalam kondisi suhu dingin di mana performa mesin *diesel* paling menantang.

Inspeksi *visual* dan pemeriksaan komponen secara berkala merupakan bagian integral dari program pemeliharaan preventif. Operator dan teknisi harus memantau suara operasional mesin, getaran, emisi asap, dan konsumsi bahan bakar yang dapat menjadi indikator awal masalah. Perubahan warna asap buang—asap hitam menunjukkan pembakaran tidak sempurna atau penyumbatan intake, asap putih menunjukkan adanya air dalam bahan bakar atau oli, dan asap biru menunjukkan konsumsi oli yang berlebihan—harus segera ditangani. Pemeliharaan pencegahan yang konsisten, termasuk penggantian suku cadang berkala, pembersihan sistem, dan penyesuaian komponen sesuai spesifikasi pabrik, secara signifikan dapat mengurangi kemungkinan kerusakan mendadak dan memperpanjang masa pakai mesin hingga ratusan ribu jam operasi. Dokumentasi lengkap dari setiap pemeliharaan yang dilakukan, termasuk tanggal, jam operasi, jenis pekerjaan, suku cadang yang diganti, dan hasil pemeriksaan, sangat penting untuk melacak riwayat mesin dan merencanakan pemeliharaan masa depan. Kebijakan pemeliharaan yang ketat dan terstruktur, dipadukan dengan penggunaan suku cadang original atau setara kualitas tinggi, serta operator yang terlatih dengan baik, akan memastikan mesin *diesel* dapat beroperasi dengan reliabilitas maksimal, efisiensi bahan bakar optimal, dan emisi yang terkontrol, sambil memberikan nilai investasi terbaik dalam jangka panjang.

Pemeliharaan rutin, seperti pemeriksaan harian dan perawatan berkala, dapat mendeteksi masalah kecil sebelum berkembang menjadi kerusakan fatal.

Contohnya, pemeriksaan level oli dan cairan pendingin dapat mencegah mesin mengalami *overheat*. Tanpa perawatan yang tepat, mesin bisa mati mendadak di tengah lautan, meninggalkan kapal tanpa tenaga dan berisiko tinggi terhadap bahaya.

Meskipun pemeliharaan membutuhkan biaya di muka, investasi ini jauh lebih murah daripada biaya perbaikan besar atau penggantian mesin secara total. Pemeliharaan yang teratur, seperti penggantian oli dan filter, dapat mengurangi keausan komponen *internal*. Hal ini tidak hanya memperpanjang umur mesin, tetapi juga menghemat biaya operasional secara keseluruhan.

Beberapa jenis perawatan dan pemeliharaan mesin *diesel* sebagai berikut

a. Perawatan Terencana (*Planned Maintenance*)

Perawatan terencana adalah metode yang paling umum digunakan dalam dunia maritim. Jenis perawatan ini dilakukan berdasarkan jadwal yang sudah ditentukan, entah itu berdasarkan jam operasional mesin, interval waktu (misalnya bulanan atau tahunan), atau setelah jarak tempuh tertentu. Tujuannya adalah untuk mencegah kegagalan mesin mendadak dengan mengganti komponen yang usang sebelum rusak.

Beberapa perawatan terencana sebagai berikut:

1. Penggantian oli mesin setiap 500 jam kerja.
2. Pembersihan filter bahan bakar setiap bulan.
3. Penyetelan katup setiap 2.000 jam operasional.

b. Perawatan Berdasarkan Kondisi (*Condition-Based Maintenance - CBM*)

Perawatan ini lebih modern dan proaktif. Alih-alih mengikuti jadwal yang kaku, perawatan hanya dilakukan saat *data* menunjukkan adanya masalah atau potensi kegagalan. CBM menggunakan teknologi canggih untuk memantau kondisi mesin secara *real-time* atau berkala, memungkinkan perbaikan dilakukan hanya ketika benar-benar diperlukan.

c. Perawatan Reaktif (*Reactive Maintenance*)

Ini adalah perawatan yang paling sederhana, yaitu perbaikan hanya dilakukan setelah mesin atau komponen gagal berfungsi. Meskipun terlihat hemat di awal karena tidak ada biaya perawatan rutin, metode ini sangat berisiko dan tidak direkomendasikan. Kegagalan mendadak dapat menyebabkan waktu henti

operasional yang lama, kerusakan yang lebih parah, dan biaya perbaikan darurat yang sangat mahal.

2.5 Perawatan Pencegahan Kerusakan *Crankshaft*

Perawatan untuk pencegahan kerusakan *crankshaft* sangat penting untuk memastikan keandalan dan umur panjang mesin. Kerusakan pada *crankshaft* dapat menyebabkan kegagalan mesin yang katastropal dan biaya perbaikan yang sangat tinggi. Berikut adalah beberapa perawatan utama yang dapat Anda lakukan untuk mencegah kerusakan pada *crankshaft*:

1. Perawatan Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan yang baik adalah kunci utama. Pelumas berfungsi untuk mengurangi gesekan, mendinginkan bagian-bagian yang bergerak, dan membersihkan kotoran.

- a. Pemeriksaan Kualitas Oli: Pastikan oli yang digunakan sesuai dengan spesifikasi pabrikan dan selalu dalam kondisi bersih. Lakukan uji laboratorium secara berkala untuk mendeteksi kontaminasi seperti air, bahan bakar, atau partikel logam.
- b. Penggantian Filter Oli: Ganti filter oli sesuai jadwal yang direkomendasikan. Filter yang tersumbat dapat mengurangi aliran oli, yang menyebabkan gesekan berlebihan dan panas pada *bearing crankshaft*.
- c. Pemeriksaan Tekanan Oli: Pantau tekanan oli secara teratur. Tekanan yang rendah bisa menjadi indikasi kebocoran atau masalah pada pompa oli, yang dapat menyebabkan pelumasan tidak memadai.

2. Pemeriksaan *Bearing* Utama (*Main Bearings*) dan *Bearing* Batang *Piston* (*Connecting Rod Bearings*)

Bearing adalah bantalan yang mendukung putaran *crankshaft*. Kerusakan *bearing* seringkali menjadi penyebab utama kerusakan *crankshaft*.

- a. Pemeriksaan Rutin: Periksa *bearing* secara *visual* selama *overhaul* mesin. Cari tanda-tanda keausan, korosi, atau *overheating* (perubahan warna).
- b. Pengukuran Kelonggaran (*Clearance*): Ukur kelonggaran *bearing* menggunakan *Plastigage*. Kelonggaran yang terlalu besar menunjukkan

keausan dan dapat menyebabkan getaran berlebihan, sementara kelonggaran yang terlalu kecil dapat menyebabkan panas berlebihan dan kegagalan *bearing*.

- c. Penggantian *Bearing*: Ganti *bearing* sesuai dengan rekomendasi pabrikan atau saat terdeteksi keausan. Jangan menunggu sampai *bearing* benar-benar rusak.

3. Pemeriksaan *Alignment* dan Defleksi *Crankshaft*

Alignment yang buruk dan defleksi yang berlebihan dapat menimbulkan tekanan yang tidak merata pada *crankshaft* dan *bearing*.

- a. Pengukuran Defleksi: Lakukan pengukuran defleksi *crankshaft* secara berkala, terutama saat kapal dalam kondisi kosong dan juga penuh muatan. Pengukuran ini penting untuk memastikan tidak ada pembengkokan pada *crankshaft*.
- b. Penyebab Defleksi: Defleksi bisa disebabkan oleh penurunan (*settling*) pada fondasi mesin, pemasangan yang tidak tepat, atau masalah pada *alignment* poros propeller. Perbaiki penyebabnya segera setelah terdeteksi.

4. Perawatan dan Pemeriksaan *Flywheel* dan Kopling

Flywheel dan kopling yang tidak seimbang (*unbalanced*) atau rusak dapat menyebabkan getaran *torsional* yang merusak *crankshaft*.

- a. Pemeriksaan Keseimbangan (*Balancing*): Pastikan *flywheel* dan kopling berada dalam kondisi seimbang. Getaran yang tidak biasa bisa jadi indikasi adanya masalah.
- b. Pemeriksaan Kekencangan Baut: Pastikan semua baut pengikat *flywheel* dan kopling dikencangkan sesuai dengan torsi yang direkomendasikan. Baut yang longgar dapat menyebabkan getaran dan kerusakan.

5. Perawatan dan Pemantauan Rutin

- a. Analisis Getaran: Lakukan analisis getaran pada mesin secara berkala. Perubahan pola getaran dapat menjadi indikasi awal masalah pada *crankshaft* atau *bearing*.

- b. Pemantauan Suhu: Pantau suhu *bearing* utama dan *bearing* batang *piston*. Kenaikan suhu yang tidak normal dapat menjadi tanda peringatan adanya gesekan berlebihan atau masalah pelumasan.
- c. Dokumentasi: Simpan catatan perawatan yang lengkap, termasuk tanggal, jenis perawatan, dan hasil pemeriksaan. Ini membantu melacak tren dan memprediksi masalah potensial sebelum terjadi.

Dengan menerapkan langkah-langkah perawatan ini secara konsisten, dapat secara signifikan mengurangi risiko kerusakan pada *crankshaft* dan memastikan mesin *diesel* beroperasi dengan efisien dan aman.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di PT. Waruna Shipyard Indonesia tepatnya di Workshop *engine* dan kapal yang berada di galangan

3.1.2 Waktu Penelitian

Tabel 3.1 Waktu kegiatan penelitian

No	Kegiatan	Waktu (Bulan)					
		1	2	3	4	5	6
1	Pengajuan Judul	■	■				
2	Studi Literatur		■	■	■		
3	Penulisan Laporan			■	■	■	
4	Seminar Proposal				■	■	
5	Pengambilan & Analisa <i>Data</i>					■	■
6	Penulisan Laporan Akhir						■
7	Sidang Sarjana						■

3.2 Bahan dan Alat

Berikut merupakan bahan dan alat yang digunakan pada penelitian Analisis Kegagalan dan Strategi Keretakan *Crankshaft Diesel Generator Auxiliary engine* kapal

3.2.1 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah:

1. Mikrometer

Untuk mengukur ketebalan atau *diameter crankshaft* dengan tingkatakurasi tinggi



Gambar 3.1 Mikrometer

2. Crankshaft

Crankshaft berfungsi mengubah gerakan naik turun *piston* menjadi gerak putaran atau gerak rotasi dan



Gambar 3.2 Crankshaft

3. Spotcheck SKC-S

Cairan pembersih dan penghapus (*cleaner/remover*) sebelum dan sesudah diuji berbasis pelarut yang disetujui untuk pengujian *non-destruktif (NDT)*.



Gambar 3.3 Magnaflux spotcheck SKC-S

4. *Magnavis WCP-2*

Berfungsi untuk menciptakan latar belakang yang kontras pada permukaan benda kerja. Tujuannya adalah untuk meningkatkan visibilitas indikasi (tanda) yang dibentuk oleh partikel magnetik berwarna, seperti *Magnaflux 7HF* yang berwarna hitam.



Gambar 3.4 *Magnaflux magnavis WCP-2*

5. *Magnaflux 7HF*

Untuk mendeteksi diskontinuitas atau cacat pada permukaan dan sedikit di bawah permukaan pada *material* feromagnetik (bahan yang dapat dimagnetisasi, seperti baja dan besi).



Gambar 3.5 *Magnaflux magnavis 7HF*

6. Lampu inspeksi LED

Untuk area yang sulit dijangkau atau area yang minim cahaya



Gambar 3.6 Lampu led

7. Kain majun
digunakan untuk membersihkan area penelitian



Gambar 3.7 Kain majun

8. *Yoke magnetic (Magnetic yoke)*
Dan sering digunakan untuk pengujian di lapangan karena sifatnya yang portabel. Alat ini bekerja dengan cara menciptakan medan magnet di *area* yang diuji untuk mendeteksi retakan.



Gambar 3.8 *Yoke magnetic*

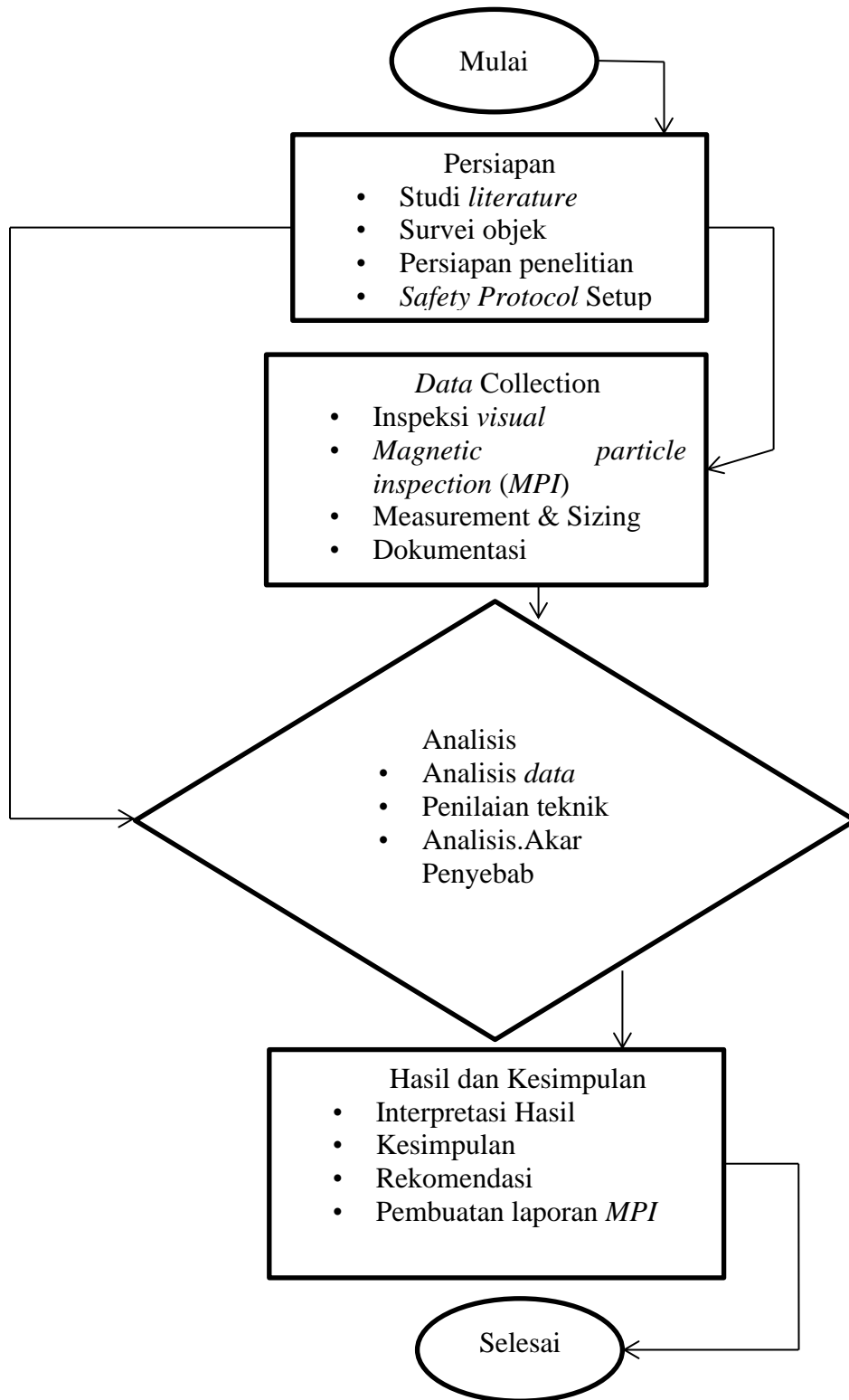
3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah :

1. Data primer yang digunakan adalah mencatat keterangan secara langsung dari mekanik dan kru kapa tentang objek yang diteliti, yaitu terhadap permasalahan yang terjadi pada *crankshaft* di *diesel generator auxiliary engine*
2. Data skunder yang digunakan adalah *data* yang didapatkan secara tidak langsung, yaitu melalui *manual book* yang membahas tentang *crankshaft* yang akan diteliti

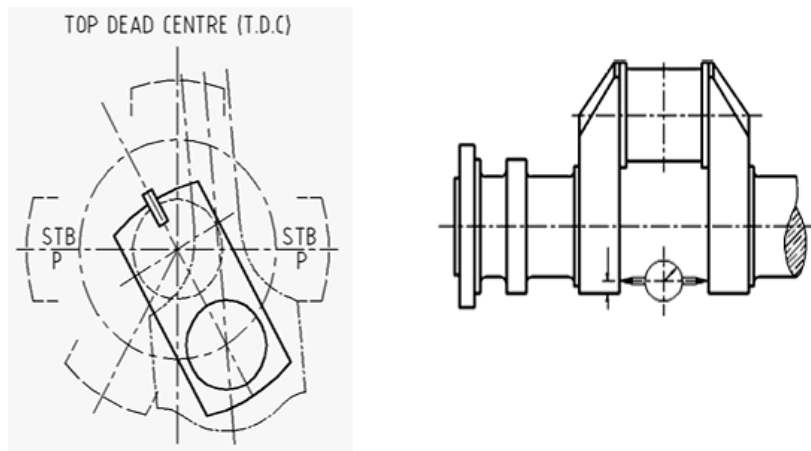
3.3 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ini dapat dilihat gambar dibawah ini :

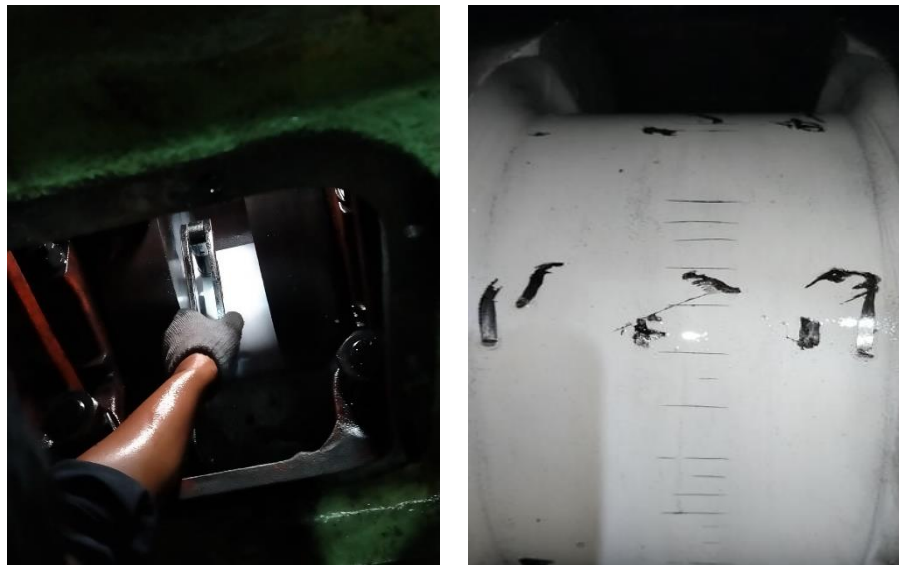


Gambar 3.9 Bagan alir penelitian

3.4 Rancangan Alat Penelitian



Gambar 3.10 Rancangan pengujian Defleksi *Crankshaft*



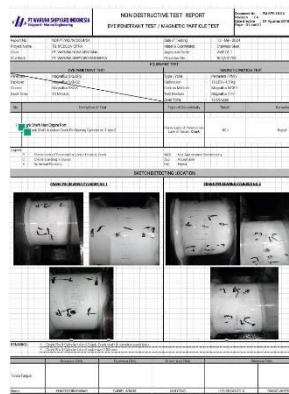
Gambar 3.11 Uji *magnetic particle inspection (MPI)* dan kondisi keretakan *crankshaft* dudukan *crank pin bearing*

3.5 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian sejalan dengan petunjuk yang diketahui diperusahaan tempat melakukan penelitian sebagai berikut :

1. Melakukan pengambilan *data* secara langsung antara lain berupa *data* hasil *clearance*, *manual book*, dan *data* ukur *bearing crankshaft* sebagai dasar referensi dalam penelitian ini.
2. melakukan proses pembongkaran main *bearing* serta melakukan pengecekan *visual* dan *non visual* dengan operator lapangan yang mengerti tentang permesinan mesin bantu pada kapal
3. Melakukan pengecekan *clearance* untuk mengetahui dan mengidentifikasi permukaan dudukan crank pin *bearing* yang rusak sebelum perbaikan dan sesudah perbaikan.
4. Melakukan uji *magnetic particle testing (MPI)* untuk mengetahui *crack* pada dudukan crank pin *bearing*.
5. melakukan pengolahan *data* keretakan dudukan crank pin *bearing* pada mesin bantu, hasil dari pengujian secara langsung untuk menentukan nilai yang efektif sebagai referensi pada mesin bantu.
6. mengidentifikasi penyebab keretakan pada *crankshaft* dudukan crank pin *bearing* pada mesin bantu dengan hasil pengolahan pengujian keretakan pada mesin.

Berikut rangkuman log sheet operator dan *data* pengujian pada gambar 3.11 merupakan hasil *data* penelitian secara langsung di PT. *Waruna Shipyard* Indonesia.



Gambar 3.12 Uji *magnetic particle inspection*

3.6 Langkah-Langkah Pengujian *Magnetic Particle Inspection (MPI)*

1. Persiapkan permukaan (*pre-cleaning*) : pastikan *area* yang diuji benar-benar bersih dari kontaminan seperti kotoran, karat, cat, oli, grease dan juga serpihan logam dengan semprotkan *magnaflux SKC-S* ke kain bersih, lalu lap permukaan benda kerja secara menyeluruh. *SKC-S* adalah pembersih pelarut yang menguap dengan cepat dan tidak menggunakan residu, sehingga idel untuk tahap ini, kemudian biarkan permukaan benar-bener kering.
2. Aplikasikan cat kontras (*WCP-2*) : Semprotkan lapisan tipis dan merata *magnaflux WCP-2* keseluruh *area* pengujian. Jaga jarak penyemprotan sekitar 20-30 cm untuk mendapatkan hasil yang optimal dan hindari penyemprotan berlebihan yang bisa menutupi cacat. Biarkan lapisan cat mengering sepenuhnya, biasanya hanya dalam waktu beberapa menit. Lapisan ini akan menjadi latar belakang putih yang membuat indikasi cacat terlihat jelas.
3. Magnetisasi : Magnetisasi permukaan yang telah dilapisi *WCP-2* menggunakan alat berbentuk “U” yang disebut *yoke* magnetik untuk menciptakan medan magnet diantara dua kutubnya. Magnetisasi ini adalah tahap krusial dimana medan magnet dibuat pada benda kerja yang bertujuan untuk menciptakan medan magnet bocor disekitar cacat permukaan.
4. Aplikasikan partikel magnetik : Semprotkan *Magnaflux 7HF* ke permukaan yang telah di lapisi *WCP-2* saat benda kerja masih dalam kondisi termagnetisasi. Partikel partikel *magnetic* hitam dalam cairan *7HF* akan tertarik ke medan magnet bocor. Partikel partikel ini akan berkumpul di *area* cacat, membentuk indikasi *visual* yang jelas dan gelap pada latar belakang putih *WCP-2*.
5. Inspeksi dan interpretasi : inspeksi dilakukan di bawah cahaya tampak (*visible light*) yang memadai. Latar belakang putih dan partikel putih dan partikel hitam menciptakan kontras yang sangat tinggi. Amati dengan seksama dan juga mengambil dokumentasi seluruh *area* pengujian untuk menemukan indikasi. Indikasi biasanya akan terlihat sebagai garis, pola,

atau noda yang menonjol. Bentuk, ukuran, dan lokasi indikasi memberikan informasi penting tentang jenis dan karakteristik cacat.

6. Demagnetisasi dan pembersihan pascainspeksi : setelah inspeksi selesai, benda kerja harus dimagnetisasi untuk menghilangkan sisa medan magnet. Hal ini penting untuk mencegah partikel asing menempel pada benda kerja di kemudian hari dan menghindari gangguan pada peralatan elektronik di sekitarnya. Sisa partikel 7HF dan lapisan cat WCP-2 harus dibersihkan dari permukaan benda kerja. Ini bisa dilakukan dengan menyeka menggunakan kain bersih yang dibasahi dengan *magnaflux* SKC-S atau pembersih pelarut yang sesuai.

3.7 Variabel

1. *Data* pengujian keretakan *crankshaft* pada kedudukan *crankpin bearing* mesin bantu (*auxiliary engine*)
2. Menganalisis penyebab terjadinya keretakan *crankshaft* pada mesin bantu (*auxiliary engine*)
3. Menentukan metode perawatan dan pertimbangan penggantian *crankshaft* pada mesin bantu (*auxiliary engine*)

3.8 Pengumpulan Data

Pengumpulan *data* dilakukan di PT. *Waruna Shipyard* Indonesia selama 1 bulan

3.9 Pengolahan Data

Pengolahan *data* dalam penelitian ini yaitu : Pengolahan terkait kajian keretakan *crankshaft* di bagian kedudukan *crankpin bearing* pada mesin bantu (*auxiliary engine*) kapal.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

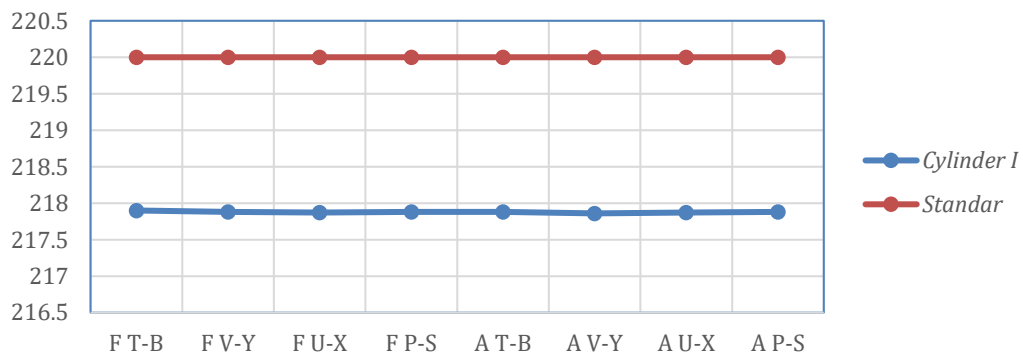
4.1.1 Melakukan pengukuran pada *crankpin*

Mengukur *diameter crankpin* untuk menghitung celah antara *crankpin* dan *connecting rod bearing*. Pengukuran dengan mikrometer juga berfungsi untuk mendeteksi keausan pada *crankpin*. Dengan mengukur *diameter crankpin* secara berkala, mekanik dapat mengidentifikasi apakah *crankpin* sudah aus atau mengalami pengurangan *diameter* akibat penggunaan jangka panjang. Jika *diameter crankpin* berkurang, maka *bearing clearance* akan bertambah dan dapat menyebabkan kerusakan serius pada *bearing* dan permukaan *crankpin*. Berikut hasil pengukuran *crankpin* menggunakan mikrometer.

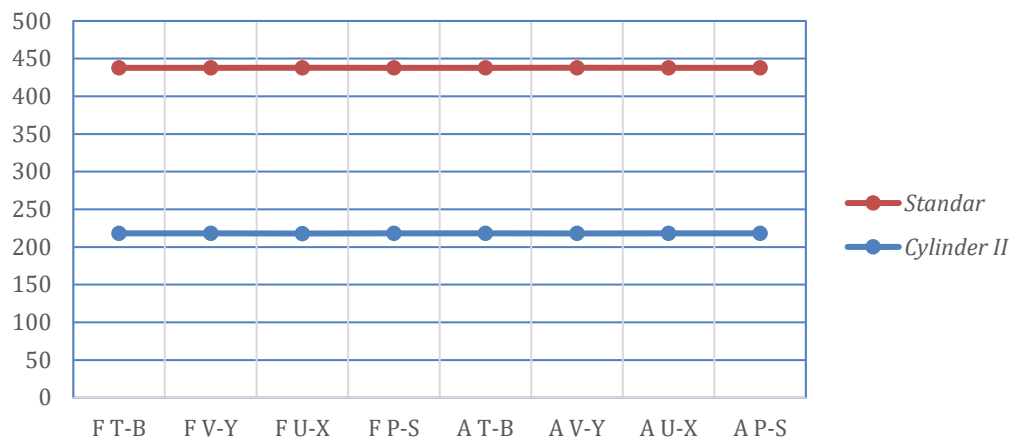
Tabel 4.1 Data pengukuran *diameter crankpin* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

CRANK PIN	Cylinder						Standart Value	
	I	II	III	IV	V	VI		
F	T - B	217.90	217.89	219.95	219.95	219.95	219.95	220.00
	V - Y	217.88	217.93	219.95	219.95	219.95	219.95	
	U - X	217.87	217.88	219.95	219.95	219.95	219.95	
	P - S	217.88	217.90	219.95	219.95	219.95	219.95	
A	T - B	217.88	217.92	219.95	219.95	219.95	219.95	
	V - Y	217.86	217.94	219.95	219.95	219.95	219.95	
	U - X	217.87	217.93	219.95	219.95	219.95	219.95	
	P - S	217.88	217.90	219.95	219.95	219.95	219.95	

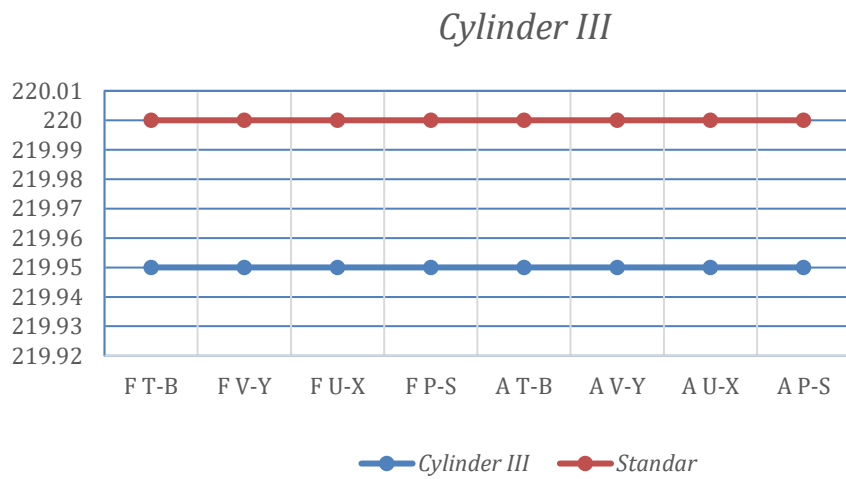
Dari hasil pengukuran diatas keadaan *crankshaft* bagian *crankpin* pada *cylinder* nomor 1 dan 2 telah mengalami pengurangan *diameter* dengan *undersize* 2.00 mm. Berikut grafik hasil pengukuran *diameter crankpin*.



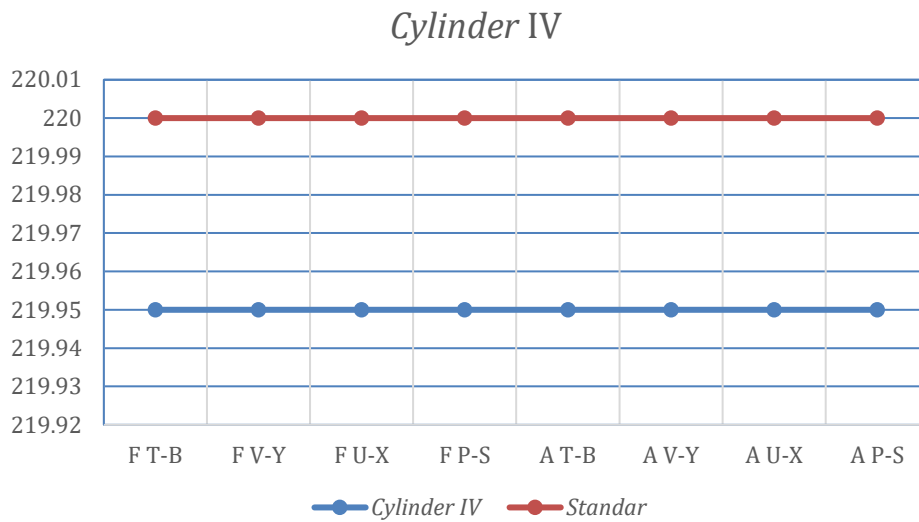
Gambar 4. 1 Grafik hasil pengukuran diameter *crankpin* pada *cylinder* no. 1



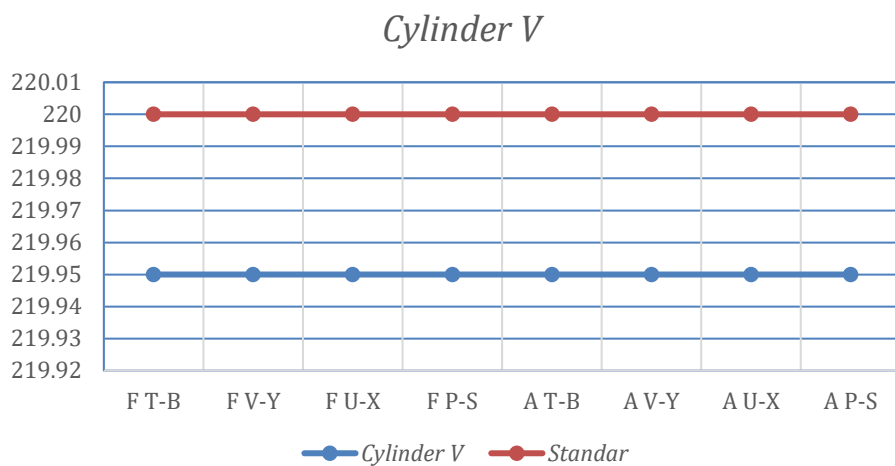
Gambar 4. 2 Grafik hasil pengukuran diameter *crankpin* pada *cylinder* no. 2



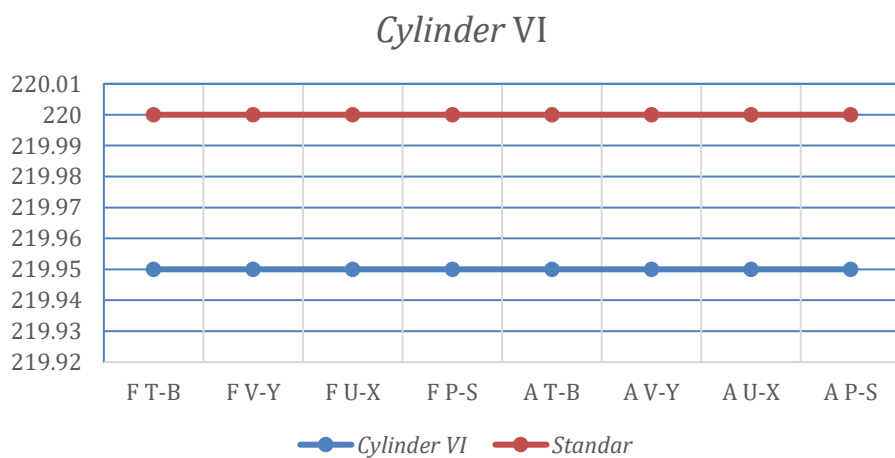
Gambar 4. 3 Grafik hasil pengukuran diameter *crankpin* pada *cylinder* no. 3



Gambar 4. 4 Grafik hasil pengukuran diameter *crankpin* pada *cylinder* no. 4



Gambar 4. 5 Grafik hasil pengukuran diameter *crankpin* pada *cylinder* no. 5



Gambar 4. 6 Grafik hasil pengukuran diameter *crankpin* pada *cylinder* no. 6

4.1.2 Melakukan *clearance crankpin*

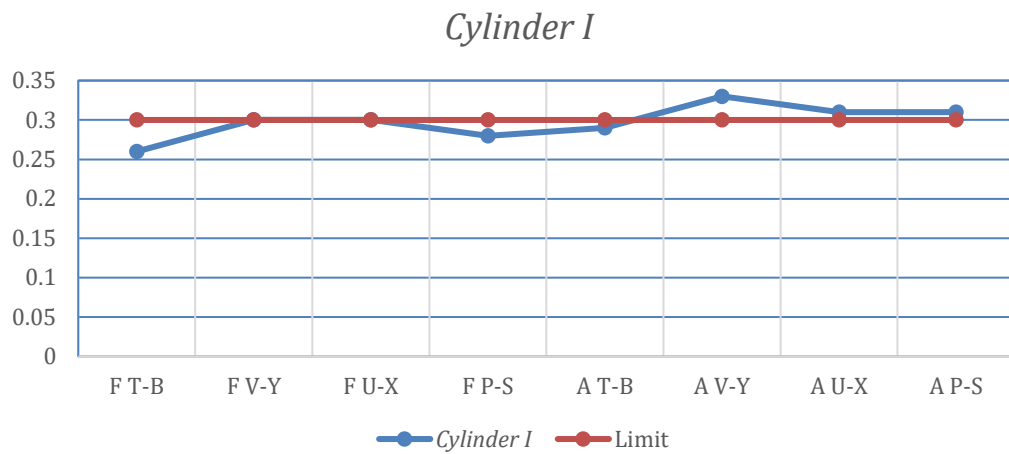
Setelah mendapat hasil pengukuran *crankpin*, selanjutnya melakukan pengukuran *clearance crankpin* berguna untuk mengetahui celah atau jarak batas antara *crankpin* dengan lubang pada *connecting rod*. *Clearance* ini memiliki beberapa fungsi penting dalam operasional mesin. Pertama, *clearance* memungkinkan *connecting rod* untuk bergerak naik-turun dan berputar dengan lancar tanpa hambatan. Kedua, celah ini mencegah kegentingan atau kontak langsung yang berlebihan antar *crankpin* dan lubang *connecting rod* yang dapat menyebabkan keausan cepat dan kerusakan pada komponen tersebut.

Selain itu, *clearance crankpin* berfungsi untuk mengakomodasi pemuaian panas (*thermal expansion*) yang terjadi ketika mesin beroperasi pada suhu normal. Dengan adanya jarak bebas ini, *material* dapat mengembang tanpa menyebabkan tekanan berlebihan pada lubang *connecting rod*. *Clearance* juga memberikan ruang yang cukup untuk sirkulasi dan distribusi minyak pelumas ke seluruh permukaan *crankpin*, sehingga pelumasan dapat berjalan optimal dan mengurangi gesekan antar komponen. Berikut hasil pengukuran *clearance crankpin*

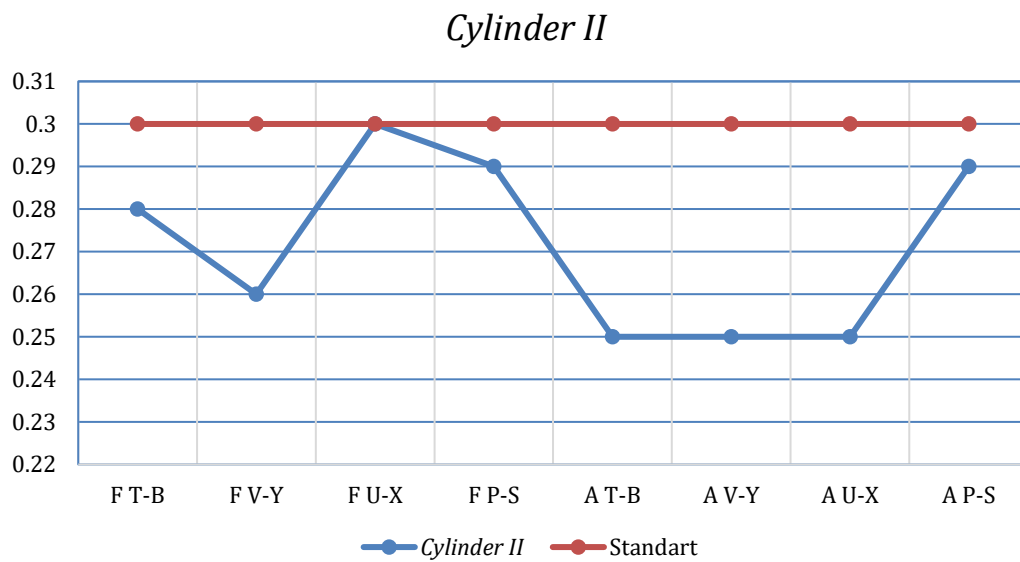
Tabel 4.2 Data pengukuran *clearance crankpin* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

CLEARENCE CRANK PIN	Cylinder						Standart value	
	I	II	III	IV	V	VI		
F	T - B	0.26	0.28	0.27	0.28	0.26	0.29	0.12-0.21
	V - Y	0.30	0.26	0.31	0.30	0.29	0.29	
	U - X	0.30	0.30	0.26	0.29	0.29	0.27	
	P - S	0.28	0.29	0.27	0.28	0.27	0.28	
A	T - B	0.29	0.25	0.27	0.28	0.26	0.29	Limit
	V - Y	0.33	0.25	0.31	0.28	0.29	0.29	
	U - X	0.31	0.25	0.26	0.30	0.27	0.28	
	P - S	0.31	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	

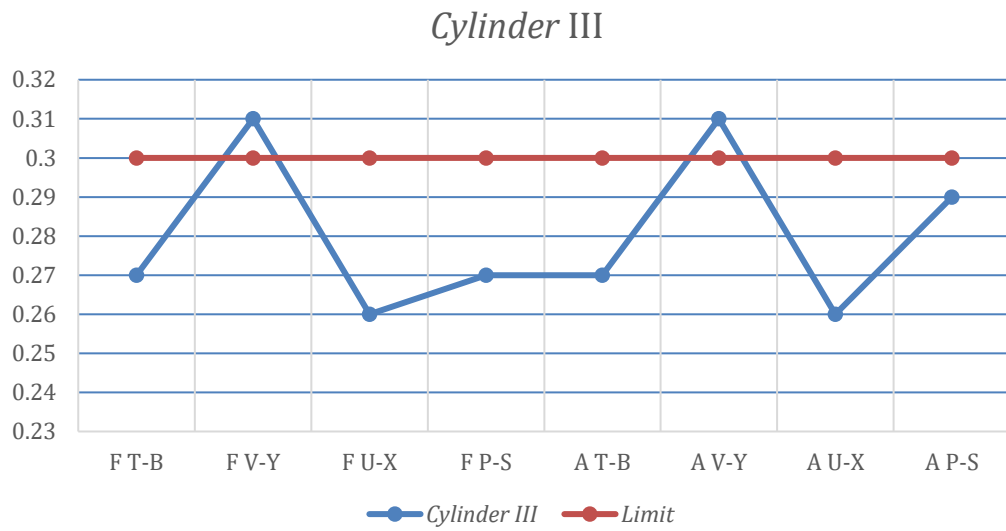
Dari hasil pengukuran di atas keadaan *crankpin* pada *cylinder* nomor 1 dan 2 mengalami pengurangan *diameter* dengan *undersize* 2.00 mm dan *clearance* pada *crankpin* sudah melebihi *limit* dari *standart value* yang ditetapkan. Maka dari itu, *crankshaft* di sarankan untuk uji *Magnetic Particle Inspection (MPI)* karena kedapatan retak (*crack*). Berikut grafik dari hasil pengukuran *clearance crankpin*.



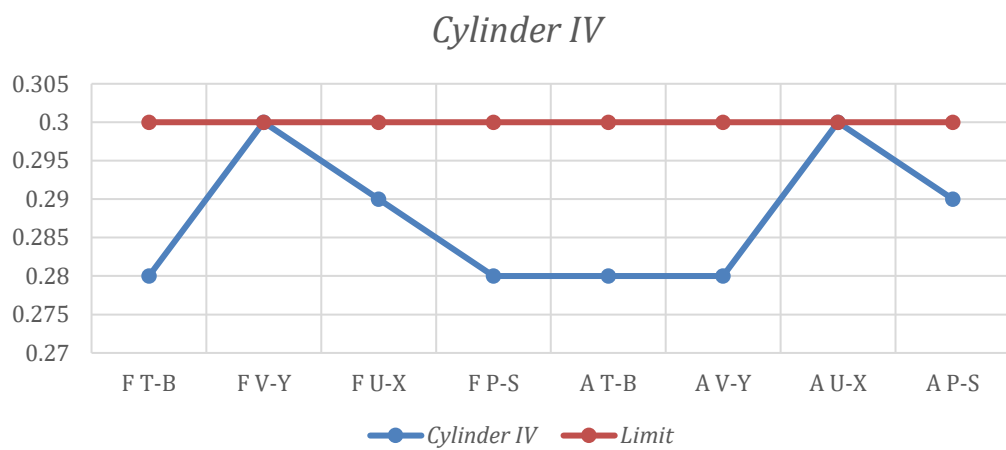
Gambar 4. 7 Grafik hasil pengukuran *clearance crankpin* pada *cylinder no. 1*



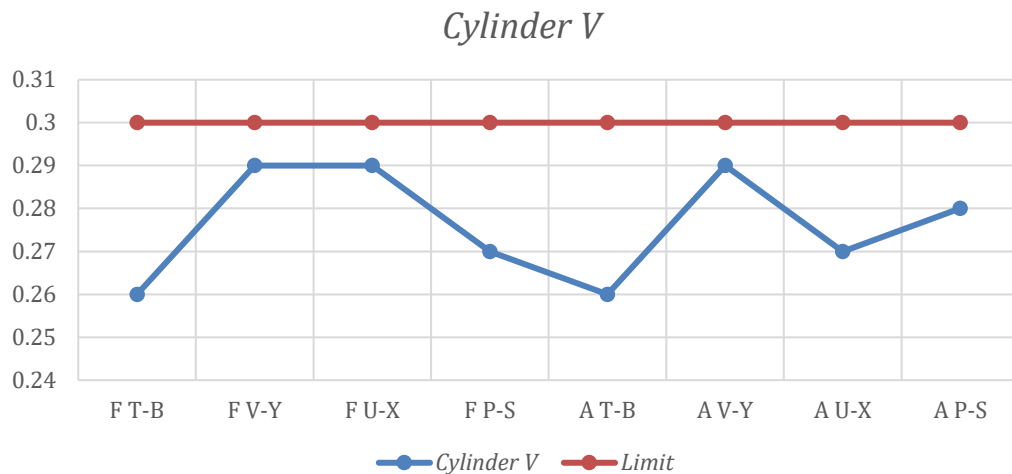
Gambar 4. 8 Grafik hasil pengukuran *clearance crankpin* pada *cylinder no. 2*



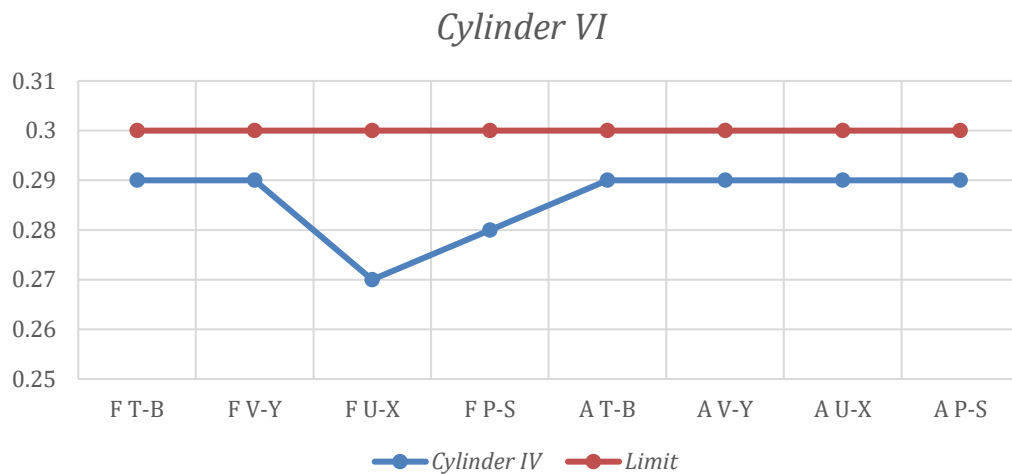
Gambar 4. 9 Grafik hasil pengukuran *clearance crankpin* pada *cylinder* no. 3



Gambar 4. 10 Grafik hasil pengukuran *clearance crankpin* pada *cylinder* no. 4



Gambar 4. 11 Grafik hasil pengukuran *clearance crankpin* pada *cylinder* no. 5



Gambar 4. 12 Grafik hasil pengukuran *clearance crankpin* pada *cylinder* no. 6

4.1.3 Uji *Magnetic Particle Inspection (MPI)*

Uji *Magnetic Particle Inspection (MPI)* pada *crankshaft* adalah metode pemeriksaan *non-destruktif* yang digunakan untuk mendeteksi cacat atau kerusakan pada permukaan dan di bawah permukaan komponen *crankshaft*. Tujuan utama dari pengujian ini adalah memastikan kualitas dan keamanan *crankshaft* sebelum digunakan dalam mesin, sehingga dapat mencegah kerusakan mesin yang lebih serius di kemudian hari. Fungsi utama dari uji *Magnetic Particle Inspection* adalah mendeteksi berbagai jenis cacat pada *crankshaft* seperti retak, patah, *pitting*, *inclusion*, dan deformasi *material* lainnya yang mungkin tidak terlihat dengan mata

telanjang. Cacat-cacat ini dapat terjadi akibat proses manufaktur, penanganan yang tidak hati-hati, atau keausan dari penggunaan. Dengan mendeteksi cacat ini lebih awal, proses *quality control* dapat menghilangkan masalah pada *crankshaft* sebelum menyebabkan kerusakan pada mesin.

Hasil pengujian menunjukkan pola akumulasi partikel magnetik yang mengindikasikan adanya diskontinuitas pada permukaan *material*. Pada *cylinder* nomor 1, indikasi cacat terdeteksi pada bagian *journal* dengan intensitas dan panjang mencapai standar batas yang ditetapkan. Sementara itu, pada *cylinder* nomor 2, pengujian mengungkapkan adanya indikasi cacat yang serupa namun dengan karakteristik yang sedikit berbeda dalam hal ukuran dan kedalaman penetrasi. Dokumentasi *visual* berupa fotografi partikel magnetik mencatat lokasi presisi setiap indikasi untuk analisis lebih lanjut.



Gambar 4.13 Hasil uji *magnetic particle inspection* (MPI) pada crankpin cylinder nomor 1 (PT. Waruna Shipyad Indonesia)



Gambar 4.14 Hasil uji *magnetic particle inspection* (MPI) pada crankpin cylinder nomor 2 (PT. Waruna Shipyad Indonesia)

4.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Dari hasil pengukuran *diameter crankpin* diatas didapatkan bahwa *crankshaft* mengalami pengurangan *diameter* 2.00 mm sehingga *clearance crankpin* melebihi *limit standart value* yang ditetapkan dan dari hasil *MPI crankshaft* pada bagian *crankpin* posisi *cylinder* nomor 1 dan 2 mengalami keretakan. Maka untuk mengembalikan performa mesin menjadi seperti semula perlu dilaksanakan penggantian *crankshaft* sehingga tidak terjadi kegagalan operasi pada mesin dan kerusakan yang lebih parah selanjutnya.

4.2.1 Analisis penyebab keretakan *crankshaft*

a. Kelelahan *material (fatigue)*

Pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal, pembebanan siklik yang kompleks terjadi karena kombinasi gaya gas hasil pembakaran yang ditransmisikan melalui *piston* dan *connecting rod*, serta momen torsi yang dihasilkan untuk menggerakkan *generator*. *Crankpin* mengalami *bending stress* yang berubah arah setiap setengah putaran *crankshaft*, sementara *main journal* mengalami *rotating bending stress* akibat berat *crankshaft* itu sendiri yang berputar, ditambah dengan *torsional stress* dari transmisi torsi. Kelelahan *material* juga disebabkan karena mesin bekerja melebihi *standart running hours* yang ditetapkan, normalnya *running hours* untuk *auxiliary engine* adalah 12 jam untuk melakukan pergantian *auxiliary engine* yang bekerja.

b. Keausan *bearing*

Bantalan (*main bearing, crankpin bearing*) yang sudah aus atau aus tidak merata menyebabkan beban tidak terdistribusi dengan baik, menciptakan *stress point local* yang mudah retak.

c. *Misalignmanet* dan *deformasi Crankshaft*

Crankshaft rentan terhadap *deformasi* karena *misalignment bearing main journal*. *Misalignment* menyebabkan *crankshaft* mengalami momen *bending* tambahan yang tidak diperhitungkan dalam desain awal, sehingga meningkatkan tegangan operasional di atas batas desain. Kadang-kadang gaya *bending abnormal* dihasilkan oleh *misalignment bore main bearing, bearing*

yang dipasang tidak tepat, *main bearing cap* yang longgar, *pulley* yang tidak seimbang, atau *belt* yang terlalu kencang.

d. Getaran *torsional*

Ketidakseimbangan pada *piston*, *connecting rod*, atau *flywheel* dapat menghasilkan getaran berlebihan yang menyebabkan *fatigue* pada *crankshaft* dan akhirnya retak.

e. Interval perawatan tidak terpenuhi

Kurangnya *maintenance* rutin seperti penggantian *oil*, *filter*, atau inspeksi berkala menyebabkan kondisi mesin menurun dan meningkatkan resiko keretakan.

f. Beban berlebih (*overload*)

Pemberian beban yang melebihi kapasitas *nominal* mesin atau operasi pada rpm tinggi secara terus menerus dapat menyebabkan *stress* mekanis berlebihan pada *crankshaft* sehingga retak.

4.3 Faktor Penyebab Keretakan Pada *Crankshaft*

Setelah dilakukan pemeriksaan maka didapatkan penyebab terjadinya keretakan pada *crankshaft* yakni : pelumasan yang tidak sempurna, beban berlebih, perawatan dan manusia.

4.4 Rekomendasi Perawatan Untuk Mencegah Keretakan Pada *Crankshaft*

Untuk mencegah keretakan pada *crankshaft* berikut beberapa rekomendasi perawatan untuk mencegah terjadinya keretakan pada *crankshaft*.

1. Inspeksi Berkala dan *Monitoring*

Melakukan pemeriksaan *visual* dan *non-destructive testing (NDT)* secara teratur menggunakan metode seperti *magnetic particle inspection*, *ultrasonic testing*, dan *dye penetrant inspection* untuk mendeteksi retak *mikro* sebelum berkembang menjadi keretakan besar.

2. *Alignment* dan *Balance* yang Tepat

Misalignment dapat menyebabkan *stress* konsentrasi yang mempercepat retak.

3. Pemeriksaan dan Perawatan *Bearing*

Bearing yang rusak atau aus akan meningkatkan beban pada *crankshaft*. Ganti *bearing* sesuai interval yang ditentukan dan selalu gunakan *bearing* berkualitas.

4. Kontrol Pembebanan *Engine*

Hindari *overloading engine* di atas rating yang ditentukan. *Overload* menyebabkan *stress bending* dan *torsional* yang berlebihan pada *crankshaft*.

5. Sistem Pendingin yang Efektif

Pertahankan *temperature engine* dalam *range* optimal. *Overheating* menyebabkan perubahan *metallurgical* pada *material crankshaft* yang mengurangi kekuatan.

6. Kualitas Bahan Bakar dan Pelumas

Gunakan *fuel* dan *lube oil* berkualitas sesuai spesifikasi *engine*.

7. Operasi yang Tepat

Hindari *cold start* dengan *high load immediately*.

8. Dokumentasi dan *Maintenance Records*

Simpan catatan lengkap semua *maintenance*, *repair*, dan *inspection results*. *Historical data* membantu mengidentifikasi pola masalah dan memprediksi kebutuhan *maintenance preventif* yang lebih akurat.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan pada penelitian penyebab terjadinya keretakan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* pada bagian *crankpin*, peneliti dapat menyimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil penelitian didapatkan bahwa *crankshaft diesel generator auxiliary engine* tersebut dinyatakan tidak memenuhi standart kelayakan, karena pada kondisi *crankpin* ditemukan pengurangan *diameter* sebanyak 2.00 mm dan mengalami keretakan (*crack*) yang cukup dalam dikarenakan kurangnya pelumasan dan beban berlebih (*overload*). Maka dari itu diharusan mengganti komponen yang rusak dengan *sparepart* yang baru untuk mengembalikan performa pada mesin *auxiliary engine*.
2. Faktor penyebab terjadinya keretakan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* kapal disebabkan oleh pelumasan yang tidak sempurna, beban berlebih (*overload*), jangka waktu operasi mesin, faktor perawatan manusia.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan pada *crankshaft diesel generator auxiliary engine* peneliti memberikan saran untuk mengatasi keretakan pada *crankshaft* bagian *crankpin* yang menyebabkan mesin menjadi tidak optimal sebagai berikut :

1. Melakukan perawatan rutin terhadap *crankshaft* dan memperhatikan *running hours crankshaft* juga *crankpin bearing* dan sistem pelumasan.
2. Melakukan inspeksi dengan pengecekan *deflection crankshaft* agar dapat mengetahui kondisi pada *crankshaft*.
3. Melakukan manajemen suku cadang yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Bunyamin kamal. (2022). *Assessment of marine diesel engine crankshaft damages*. ResearchGate (Dipublikasikan Di Maritime Transportation and Logistics).
https://www.researchgate.net/publication/359491221_Assessment_of_marine_diesel_engine_crankshaft_damages
- Chien, W. Y., Pan, J., Close, D., & Ho, S. (2005). *Fatigue analysis of crankshaft sections under bending with consideration of residual stresses*. *International Journal of Fatigue*, 27(1), 1–19.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2004.06.009>
- Equipment, M. (2020). *Understanding Torsional Vibration*. MER Equipment.
<https://merequipment.com/understanding-torsional-vibration/>
- Fonte, M., & de Freitas, M. (2009). *Marine main engine crankshaft failure analysis: A case study*. *Engineering Failure Analysis*, 16(6), 1940–1947.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2008.10.013>
- Fonte, M., Duarte, P., Anes, V., Freitas, M., & Reis, L. (2015a). *On the assessment of fatigue life of marine diesel engine crankshafts*. *Engineering Failure Analysis*, 56, 51–57.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2015.04.014>
- Fonte, M., Duarte, P., Anes, V., Freitas, M., & Reis, L. (2015b). *On the assessment of fatigue life of marine diesel engine crankshafts*. *Engineering Failure Analysis*, 56, 51–57.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2015.04.014>
- FREDI, S. (2021). *ANALISIS MACETNYA MAIN BEARING PADA MAIN ENGINE NINGBO 6DKM-26e DI SPB LANDSEADOOR 16*.
http://repository.pip-semarang.ac.id/id/eprint/3046%0Ahttp://repository.pip-semarang.ac.id/3046/2/531611206081T_SKRIPSI_OPEN_ACCESS.pdf
- Hydraulic, M. (2023). *Hydraulic Lock: Overview, Causes, and Damage*. Miller Hydraulic. <https://www.millerhydraulic.com/hydraulic-lock-overview-causes-and-damage>
- Industry, M. &. (2020). *Analysis of torsional vibration effect on the diesel engine*

- block vibration*. Mechanics & Industry. https://www.mechanics-industry.org/articles/meca/full_html/2020/05/mi190322/mi190322.html
- IRHART, W. D. (2020). Identifikasi Keretakan *Crankshaft Diesel Generator* Di Mv. Shanthi Indah. *Matrik*.
- Jouji Kimura, Ryoji Kai, dan S. S. (2001). *Six-Cylinder-In-Line Turbo-Charged Diesel Engine Crankshaft Torsional Vibration Characteristics*. SAE International. <https://saemobilus.sae.org/papers/six-cylinder-line-turbo-charged-diesel-engine-crankshaft-torsional-vibration-characteristics-2001-01-2719>
- Kubo, Haruyoshi dan Mori, H. (2005). *Technical developments and recent trends in crankshaft materials*. Kobelco Technology Review. https://www.researchgate.net/publication/272853288_Technical_Developments_and_Recent_Trends_in_Crankshaft_Materials
- Malyuditius Zai Ali Muktar Sitompul, M., Trinata Pramudhita, M., Malyuditius Zai, M., & Muktar Sitompul, A. (2025). *Indonesian Journal of Marine Engineering Analisis Bercampurnya Minyak Lumas Rocker Arm dengan Bahan Bakar Pada Auxiliary Engine Daihatsu 6DL-20 di MV. Lady Cedros Analysis of Mixing of Rocker Arm Lubricating Oil with Fuel on Daihatsu 6DL-20 Auxiliary Engi. I*, 26–37.
- Marine Engineering*. (2009). *Defleksi Poros Engkol: Pelajari Tentang Mesin Diesel Laut & Cara Mengatasi Defleksi pada Poros Engkol di Kapal*. Bright Hub Engineering. <https://www.brighthouseengineering.com/marine-engines-machinery/22993-crankshaft-deflection-marine-diesel-engine-components/>
- Motionics. (2018). *Misalignment of Crankshaft in Marine Engines*. Motionics Blog. <https://motionicsllcblog.wordpress.com/2018/12/18/misalignment-of-crankshaft-in-marine-engines/>
- Mucky Mariners. (2021). *CRANKSHAFT, CROSSHEAD & BEARINGS (2/7) CRANKSHAFT FAULTS*. Mucky Mariners (Bagian Dari MEO Class 4 Subjects). <https://muckymariners.com/app/meo-class-4-subjects/function-4b-meol/engines/7-crankshaft-crosshead/crankshaft-crosshead-2-7-crankshaft-deflection/>
- Ponidi. (2019). Pengaruh Kedalaman Keretakan *Crankshaft* Dg Iii Kri.Kerapu-

812 Merk Mwm Tbd 234 V8 Terhadap *Performance* Mesin. *Jurnal Midship*, 2(4), 13–20.

- Riad Ahmad, Ahmad O. Hasan, H. A.-R. (2019). *Photoelastic Stress Analysis of Crankpin Fillets of a Crankshaft*. ASM International 2019.
https://www.researchgate.net/publication/331852223_Photoelastic_Stress_Analysis_of_Crankpin_Fillets_of_a_Crankshaft
- Vencl, A., & Rac, A. (2014). *Diesel engine crankshaft journal bearings failures: Case study*. *Engineering Failure Analysis*, 44, 217–228.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2014.05.014>
- Yu Gongzhi, Yu Hongliang, D. S. (2011). *Crankshaft dynamic strength analysis for marine diesel engine*. Dalam: 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2011).
https://www.researchgate.net/publication/252056510_Crankshaft_Dynamic_Strength_Analysis_for_Marine_Diesel_Engine
- Yudisworo, W. D., & Prihastuty, E. (2018). Analisis Kenaikan Daerah Operasi Mesin *Diesel* Konvensional setelah Dilakukan Tune Up. ... *Nasional Energi & ...*, 111–120.
<https://jurnal.unismabekasi.ac.id/index.php/sinergi/article/download/1150/1018>

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Judul : Analisa kegagalan dan pencegahan keretakan crankshaft
diesel generator auxiliary engine kapal
Nama : Muhammad Wira Atmaja
NPM : 2107230046
Dosen Pembimbing : Chandra A Siregar, S.T., M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1.	21/8-2025	Perbaiki format	f
2.	29/9/2025	Perbaiki bab I Perbaiki bab III	f
3.	2/10/2025	Acc Summary	f
4.	13/11-2025	Perbaiki bab II	f
5.	1/2/2026	perbaiki bab IV	f
6.	13/2-2026	Acc sinhas	f
7.	9/4-2026	Acc siday	f



UMSU
Unggul | Cerdas | Berkarya
1976 - 2025

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN CAMPUSAN PESANTREN MUHAMMADIYAH

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pg/PT/002/2024

Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp: (061) 6622400 - 66224567 Fax: (061) 6625474 - 6631003

<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsumedan](#) [umsumedan](#) [umsumedan](#) [umsumedan](#)

**PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN
DOSEN PEMBIMBING**

Nomor : 1181/II.3AU/UMSU-07/F/2025

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik MESIN Pada Tanggal 17 Juli 2025 dengan ini Menetapkan :

Nama : MUHAMMAD WIRA ATMAJA
Npm : 2107230046
Program Studi : TEKNIK MESIN
Semester : 8 (DELAPAN)
Judul Tugas Akhir : ANALISIS KEGAGALAN DAN STRATEGI PENCEGAHAN
KERETAKAN CRANK SHATT DIESEL GENERATOR
AUXILIARY ERGINE KAPAL

Pembimbing : CHANDRA A SIREGAR ST.MT.

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik MESIN
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 21 Muharram 1447 H
17 Juli 2025 M

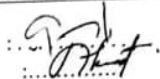
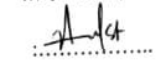
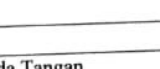


Munawar Alfansury Siregar, ST.,MT
NIDN: 0101017202



**DAFTAR HADIR SEMINAR
TUGAS AKHIR TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK – UMSU
TAHUN AKADEMIK 2025 – 2026**

Peserta seminar
 Nama : Muhammad Wira Atmaja
 NPM : 2107230046
 Judul Tugas Akhir : Analisis kegagalan Dan Strategi Pencegahan Keretakan
 Crankshaft Diesel Generator Auxiliary Engine Kapal

DAFTAR HADIR			TANDA TANGAN
Pembimbing –	: Chandra A Siregar ST.MT		: 
Pemanding –I	: Ahmad Marabdi Siregar ST.MT		: 
Pemanding II	: Arya Rudi NST ST.MT		: 
1			
No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Medan 24 Ramadhan 1447 H
13 Maret 2026 M

Ketua Prodi. T Mesin



Chandra A Siregar, ST, MT

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Muhammad Wira Atmaja
NPM : 2107230046
Judul Tugas Akhir : Analisis kegagalan Dan Strategi Pencegahan Keretakan
Crankshaft Diesel Generator Auxiliary Engine Kapal


Dosen Pembanding – I : Ahmad Marabdi Siregar ST.MT
Dosen Pembanding – II : Arya Rudi NST ST.MT
Dosen Pembimbing – : Chandra A Siregar ST.MT

KEPUTUSAN

1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan antara lain :
lengkap laporan skripsi
.....
.....
.....
3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :
.....
.....
.....

Medan, 24 Ramadhan 1447 H
13 Maret 2026 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin


Chandra A Siregar, ST, MT

Dosen Pembanding- I


Ahmad Marabdi Siregar ST.MT

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Muhammad Wira Atmaja
NPM : 2107230046
Judul Tugas Akhir : Analisis kegagalan Dan Strategi Pencegahan Keretakan
Crankshaft Diesel Generator Auxiliary Engine Kapal

Dosen Pembanding – I : Ahmad Marabdi Siregar ST.MT
Dosen Pembanding – II : Arya Rudi NST ST.MT
Dosen Pembimbing – I : Chandra A Siregar ST.MT

KEPUTUSAN

1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan antara lain :
perbaikan dalam penulisan sesuai Template
- lihat pada panduan & buku skripsi (aya)
saya kerjakan
3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :
.....
.....
.....

Medan 24 Ramadhan 1447 H
13 Maret 2026 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin

Dosen Pembanding- II



Chandra A Siregar, ST, MT



Arya Rudi NST ST.MT

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



A. DATA PRIBADI

Nama : Muhammad Wira Atmaja
Jenis Kelamin : Laki-laki
Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 16 April 2004
Alamat : Kec. Medan Marelan, Pasar 4 Barat, gang pipa
Lingkungan 8, Kel. Terjun
Agama : Islam
Email : Watmaja1644@gmail.com
No HP : 082286773238

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

Nomor Peserta Mahasiswa : 2107230046
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Mesin
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Alamat Perguruan Tinggi : Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan

No	Tingkat Pendidikan	Nama dan Tempat	Tahun
1	SD	SD 060954	2009 – 2015
2	SMP	SMP Negeri 20 Medan	2015 – 2018
3	SMA	SMA Negeri 16 Medan	2018 – 2021
4	Perguruan Tinggi	Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara	2021 – 2026